T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIM ÇIKIŞLI SENSÖRLER İÇİN GEÇİŞ EMPEDANS MODLU ANALOG DEVRE TASARIMI

Muhammed Taha KAVLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Programı

Danışman
Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

Haziran, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIM ÇIKIŞLI SENSÖRLER İÇİN GEÇİŞ EMPEDANS MODLU ANALOG DEVRE TASARIMI

Muhammed Taha KAVLAK tarafından hazırlanan tez çalışması 27.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Tezli Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Herman SEDEF, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Surhan BOZKURT, Üye
Doğuş Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Umut Engin AYTEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Akım Çıkışlı Sensörler İçin Geçiş Empedans Modlu Analog Devre Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Taha KAVLAK

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca yanımda olan ve beni destekleyen aileme,

Tez çalışmasının planlanmasında ve yürütülmesinde destek ve emeklerini esirgemeyen, süreç içerisinde her zaman değerli fikirleriyle yol gösteren ve yardım eden danışmanım Sayın Doç. Dr. Umut Engin AYTEN'e,

Çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleriyle yaptıkları katkılardan ve rehberlikten dolayı Sayın S. Metin YAVUZ ve Sayın Osman ÖZYURT başta olmak üzere, desteklerini sunan ve yardımlarını esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Muhammed Taha KAVLAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 5

1.3 Tezin Hipotezi 5

2 FOTOELEKTRİK HÜCRE ve ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEYSEL ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ 7

2.1 Fotodedektör 7

2.2 Işık Kaynağı 9

2.2.1 Led Sürme Devresi 10

2.3 Ölçüm Yöntemleri 11

2.3.1 Aeresol Konsantrasyonu Ölçümü 12

2.3.2 Işık Gücü Ölçüm Hücresi 14

2.4 Deney Düzeneklerinde Kullanılan Cihazlar 15

2.4.1 Aeresol Üreteci 15

2.4.2 Referans Fotodiyot Ölçüm Cihazı 16

3 GELENEKSEL OPAMP TIA DEVRESİ ve CFOA AKTİF ELEMANI KULLANARAK TIA TASARIMI 17

3.1 Akım ve Gerilim Geribeslemesi Karşılaştırması 17

3.2 Opamp Aktif Elemanı ile Gerçeklenen Geribeslemeli TIA Devresi . 18

3.3 CFOA Aktif Elemanı Kullanılarak Tasarlanan TIA Devresi 20

3.4 Test Devreleri 21

3.5 Benzetim Sonuçları 22

3.5.1 Kazanç Direnci 22

3.5.2 Frekans Karakteristiği 24
3.6 Deneysel Çalışma 24
3.6.1 Deney Düzeneği 26
3.6.2 Deney Sonuçları 26
3.7 Bölüm Sonuçları ve Tartışma 32

4 CDTA AKTİF ELEMANI KULLANARAK GERÇEKLENEN TIA TASARIMI 33
4.1 CDTA Aktif Elemanı 33
4.2 CDTA Aktif Elemanı Kullanılarak Gerçeklenen TIA Tasarımı . . . 34
4.3 Benzetim Sonuçları 35
4.3.1 Frekans Yanıtı 36
4.3.2 Zaman Domeni Analizi 39
4.4 Deneysel Çalışma 40
4.4.1 Deney Sonuçları 41
4.5 Bölüm Sonuçları ve Tartışma 45

5 CDTA ve CDBA AKTİF ELEMANLARINI KULLANARAK GERÇEKLENEN TIA TASARIMI 48
5.1 CDBA Aktif Elemanı 48
5.2 CDTA ve CDBA Aktif Elemanlarını Kullanarak Gerçeklenen TIA Tasarımı 49
5.3 Benzetim Sonuçları 50
5.3.1 Frekans Yanıtı 51
5.3.2 Zaman Domeni Analizi 53
5.4 Deneysel Çalışma 54
5.4.1 Deney Sonuçları 55
5.5 Bölüm Sonuçları ve Tartışma 58

6 CFTA AKTİF ELEMANI KULLANARAK GERÇEKLENEN TIA TASARIMI 59
6.1 CFTA Aktif Elemanı 59
6.2 CFTA Tasarımı 60
6.3 CFTA Aktif Elemanı Kullanılarak Gerçeklenen TIA Tasarımı 64
6.4 TIA Benzetim Sonuçları 65
6.4.1 Frekans Yanıtı 65
6.4.2 Zaman Domeni Analizi 68
6.5 Bölüm Sonuçları ve Tartışma 71

7 SONUÇ 72

KAYNAKÇA **74**

A MOS TRANSİSTÖR PARAMETRELERİ **80**

A.1 NMOS Parametreleri 80

A.2 PMOS Parametreleri 80

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **82**

SİMGE LİSTESİ

A	Amper
dB	Desibel
f	Frekans
g_m	Geçiş iletkenliği
V	Gerilim
Hz	Hertz
λ	Işığın dalgaboyu
η	Kırılma indisi
ms	Milisaniye
μA	Mikroamper
nA	Nanoamper
Ω	Ohm
pA	Pikoamper
θ	Saçılma açısı
TΩ	Teraohm

KISALTMA LİSTESİ

APD	Çığ fotodiyotu
CCD	Yük bağlantılı cihazlar
CCII	İkinci kuşak akım taşıyıcı
CDBA	Gerilim izlemeli akım fark kuvvetlendirici
CDTA	Farksal akımlı geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi
CDTRA	Farksal akımlı geçiş direnci kuvvetlendirici
CFOA	Akım geribeslemeli işlemsel kuvvetlendirici
CFTA	Akım izleyicili geçiş iletkenliği kuvvetlendirici
CMOS	Bütünleyici metal oksit yarıiletken
GBW	Kazanç-bant genişliği
MEMS	Mikro elektromekanik sistem
OTA	İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendirici
OTRA	İşlemsel geçiş direnci kuvvetlendirici
OPAMP	İşlemsel kuvvetlendirici
PD	Fotodiyot
SNR	Sinyalin gürültüye oranı
TIA	Geçiş empedans kuvvetlendirici
VCII	İkinci kuşak gerilim taşıyıcı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Yarıiletken fotodiyot çalışma prensibi [28] 8
Şekil 2.2 Yarıiletken fotodiyot eşdeğer iç yapısı [31] 8
Şekil 2.3 Fotodiyot dalgaboyu – duyarlılık grafiği [33] 9
Şekil 2.4 Mavi LED dalga boyu grafiği [36] 10
Şekil 2.5 Darbe genişlik modülasyonlu ışık kaynağı sürme devresi 11
Şekil 2.6 Darbe genişlik modülasyonu devresi benzetim sonucu 11
Şekil 2.7 Işık saçılımı ilkesi [41] 13
Şekil 2.8 Fotoelektrik hücre yapısı [38] 13
Şekil 2.9 Aeresol ölçüm düzeneği blok şeması 14
Şekil 2.10 Işık gücü ölçüm hücre yapısı 15
Şekil 2.11 Aeresol üreteci iç yapısı [43] 16
Şekil 3.1 Akım çıkışlı sensörler için genel geribeslemeli Opamp aktif elemanı kullanan TIA devresi [48] 18
Şekil 3.2 Geleneksel Opamp TIA devresi 18
Şekil 3.3 Opamp TIA devresi 19
Şekil 3.4 CFOA aktif elemanı a) devre sembolü b) ideal eşdeğer devresi . . 20
Şekil 3.5 CFOA TIA devresi 21
Şekil 3.6 Prototip test kartları 22
Şekil 3.7 Zaman domeni benzetim sonuçları (tam darbe) (a) geribesleme kapasitörlü Opamp TIA (b) geribesleme kapasitörsüz Opamp TIA (c) CFOA TIA 23
Şekil 3.8 Zaman domeni benzetim sonuçları (darbe başlangıcı) (a) geribesleme kapasitörlü Opamp TIA (b) geribesleme kapasitörsüz Opamp TIA (c) CFOA TIA 23
Şekil 3.9 Geribesleme kapasitörsüz Opamp TIA frekans Yanıtı (a) kazanç (dB) (b) faz 25
Şekil 3.10 Geribesleme kapasitörlü Opamp TIA frekans yanıtı (a) kazanç (dB) (b) faz 25
Şekil 3.11 CFOA TIA frekans yanıtı (a) kazanç (dB) (b) faz 26
Şekil 3.12 Deney düzeneği blok şeması 27
Şekil 3.13 Referans cihaz ölçüm sonucu 27
Şekil 3.14 Opamp TIA kazanç direnci sonuç karşılaştırması 28
Şekil 3.15 CFOA TIA kazanç direnci sonuç karşılaştırması 29
Şekil 3.16 Referans ölçüm cihazı sonuçları 30
Şekil 3.17 Opamp TIA ölçüm sonuçları 31

Şekil 3.18 CFOA TIA ölçüm sonuçları 31
Şekil 4.1 CDTA (a) devre sembolü (b) ideal iç yapısı [56] 33
Şekil 4.2 Ticari tümdevreler ile CDTA gerçeklemesi [57] 34
Şekil 4.3 Önerilen CDTA aktif elemanı kullanılarak gerçeklenen TIA devresi 34
Şekil 4.4 Ticari tümdevrelerle gerçeklenmiş CDTA TIA devresi 36
Şekil 4.5 Geçiş iletkenliği oranının değişimine göre elde edilen frekans yanıtı - kazanç grafiği 36
Şekil 4.6 Kazanç direnci değişimine göre elde edilen frekans yanıtı - kazanç grafiği 37
Şekil 4.7 Kazanca göre kesim frekanslarının değişimi 38
Şekil 4.8 Benzetim sonuçları karşılaştırma 38
Şekil 4.9 Yük direnci bağlı CDTA TIA 39
Şekil 4.10 Yük direnci değişimine göre değişen frekans yanıtı grafiği 39
Şekil 4.11 CDTA TIA devresi zaman domeni analiz sonucu 40
Şekil 4.12 CDTA TIA test kartı 40
Şekil 4.13 Deney düzeneği blok şeması 41
Şekil 4.14 Çıkış gerilimi gürültüsü 41
Şekil 4.15 Çıkış gerilimi (a) filtrelenmemiş sinyal (b) filtrelenmiş sinyal . . . 42
Şekil 4.16 Alçak geçiren filtre yapısı 43
Şekil 4.17 Referans cihaz ölçüm sonuçları 43
Şekil 4.18 CDTA TIA deneysel sonuçlar (a) filtrelenmemiş sinyal (b) filtrelenmiş sinyal 44
Şekil 4.19 Deneysel giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği 44
Şekil 4.20 CDTA TIA çıkış gerilimi (doyumda) 45
Şekil 4.21 CDTA TIA karşılaştırmalı sonuç grafiği 46
Şekil 5.1 CDBA aktif elemanı (a) devre sembolü (b) ideal iç yapısı [62] . . 48
Şekil 5.2 Ticari tümdevreler ile CDBA gerçeklemesi [63] 49
Şekil 5.3 CDTA ve CDBA aktif elemanlarını kullanılarak gerçeklenen TIA devresi 49
Şekil 5.4 CDBA ve CDTA elemanlarıyla tasarlanmış TIA devre yapısının ticari tümdevrelerle gerçeklenmesi 51
Şekil 5.5 Geçiş iletkenliği değişimine göre elde edilen frekans yanıtı grafiği 51
Şekil 5.6 Kazanç direnci değişimine göre elde edilen frekans yanıtı grafiği . 52
Şekil 5.7 Kazanca göre kesim frekanslarının değişimi 53
Şekil 5.8 Zaman domeni benzetim sonucu 53
Şekil 5.9 CDTA-CDBA TIA test kartı 54
Şekil 5.10 Deney düzeneği blok şeması 54
Şekil 5.11 Referans cihaz ölçüm sonucu 55
Şekil 5.12 TIA devresi deneysel çıkış gerilimi grafiği 56

Şekil 5.13 TIA devresi filtrelenmiş deneysel çıkış gerilimi grafiği 56
Şekil 5.14 Deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırma grafiği . . 57
Şekil 6.1 CFTA aktif elemanı (a) devre sembolü (b) ideal iç yapısı [64] . . . 59
Şekil 6.2 Ticari tümdevreler ile CFTA gerçeklemesi [67] 60
Şekil 6.3 Tasarlanan CFTA aktif elemanı iç yapısı 61
Şekil 6.4 Akım izleyici devresi frekans yanıtı 62
Şekil 6.5 Akım izleyici giriş akımı – çıkış akımı DC tarama grafiği 62
Şekil 6.6 CFTA z terminali gerilimi – çıkış akımı DC tarama grafiği 63
Şekil 6.7 Geçiş iletkenliği – frekans grafiği 63
Şekil 6.8 CFTA elemanı ile gerçeklenmiş TIA devresi 64
Şekil 6.9 V_b = 3.6V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği 66
Şekil 6.10 V_b = 3.8V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği 66
Şekil 6.11 V_b = 4V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği 67
Şekil 6.12 V_b = 4.3V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği 67
Şekil 6.13 V_b = 3.6V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği . 69
Şekil 6.14 V_b = 3.8V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği . 69
Şekil 6.15 V_b = 4V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği . . 70
Şekil 6.16 V_b = 4.3V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği . 70

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Akım modlu aktif elemanlarla gerçekleştirilen TIA devresi literatür karşılaştırma tablosu 5
Tablo 2.1 Referans cihaz ölçüm kademeleri özellikleri 16
Tablo 3.1 Kazanç direnci - kesim frekansı karşılaştırması 24
Tablo 3.2 Kazanç direnci – çıkış gerilimi tablosu 27
Tablo 3.3 Test devreleri ölçüm sonuçları 30
Tablo 3.4 Test devreleri ölçüm sonuçları 30
Tablo 4.1 Farklı değişkenlerin değişimine göre kazanç - kesim frekansı tablosu 37
Tablo 4.2 Deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırması 45
Tablo 5.1 Farklı değişkenlerin değişimine göre elde edilen kazanç - kesim frekansı tablosu 52
Tablo 5.2 Test devreleri ölçüm sonuçları 55
Tablo 5.3 Deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırması 57
Tablo 6.1 CFTA iç yapısı MOS transistör parametreleri 61
Tablo 6.2 CFTA çalışma sınırları 64
Tablo 6.3 V_b = 3.6V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu . . 68
Tablo 6.4 V_b = 3.8V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu . . 68
Tablo 6.5 V_b = 4V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu . . . 68
Tablo 6.6 V_b = 4.3V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu . . 68
Tablo 6.7 Önerilen devre yapısı ile literatür karşılaştırma tablosu 71
Tablo 7.1 TIA devreleri kazanç - kesim frekansı karşılaştırma tablosu . . . 73

ÖZET

AKIM ÇIKIŞLI SENSÖRLER İÇİN GEÇİŞ EMPEDANS MODLU ANALOG DEVRE TASARIMI

Muhammed Taha KAVLAK

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

Fiziksel dünyada bir büyüklüğü ölçümlemek ve algılamak amaçlı çeşitli sensörler kullanılmaktadır. Sensörlerin çıkış büyüklükleri gerilim veya akım olabilmektedir. Akım çıkışlı sensörlerin oluşturduğu akım büyüklükleri küçük genliklidir. Bu akım değerlerinin elektronik donanım tarafından kullanılabilecek gerilim değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için giriş büyüklüğü akım ve çıkış büyüklüğü gerilim olan geçiş empedans kuvvetlendiricisi devreleri kullanılmalıdır. Bu tez çalışmasında farklı aktif elemanlarla geçiş empedans kuvvetlendiricisi devresi tasarımlarına yer verilmiştir. Yapılan tasarımlar endüstriyel standartlara uygun fotoelektrik hücre ölçüm sistemlerinde test edilmiştir. Çalışma kapsamında ilk önce literatürde yaygın olarak kullanılmakta olan geleneksel geri beslemeli Opamp geçiş empedans kuvvetlendiricisi devre yapısı, akım geri beslemeli CFOA geçiş empedans kuvvetlendiricisi devre yapısı ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma deney ve benzetim ortamında elde edilen sonuçlara göre gerçekleştirilmiştir. Yapılan diğer çalışmalarda CDTA, CDBA ve CFTA aktif elemanları ile geçiş empedans kuvvetlendiricisi devre tasarımlarına yer verilmiştir. Geçiş empedans kuvvetlendiricisi devresinde kullanılan CDTA ve CDBA aktif elemanlarının deney ve benzetim çalışmaları ticari tümdevrelerle gerçeklenen aktif eleman yapılarıyla gerçekleştirilmiştir. CFTA aktif elemanı iç yapısı ise TSMC 0.18 μm teknoloji parametresi kullanılarak CMOS transistörlerle tasarlanmıştır. Önerilen CFTA geçiş empedans kuvvetlendiricisi devresi ile hiçbir pasif eleman kullanılmadan 100 kΩ - 730 kΩ arasında kazanç değeri elektronik olarak ayarlanabilir bir yapı ile elde edilmiştir. Devrenin performansı PSPICE benzetim ortamında incelenmiştir. TIA devresi 0.1 - 2 μA giriş akımı değerine kadar test edilmiş ve çıkış geriliminin doğrusal olduğu görülmüştür. Tasarlanan yapı en yüksek kazancın sağlandığı

koşulda 2.69 mW değerinde güç tüketimine sahiptir. Devre yapıları içerisinde eşit geçiş empedans kazancı değerleri için en yüksek bant genişliği CFTA aktif elemanı ile yapılan tasarımda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geçiş Empedans Kuvvetlendirici, Akım Geribeslemeli İşlemsel Yükselteç, Farksal Akımlı Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi, Gerilim İzlemeli Akım Fark Kuvvetlendirici, Akım İzleyicili Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi

ABSTRACT

ANALOG CIRCUIT DESIGN WITH TRANSIMPEDANCE MODE FOR CURRENT OUTPUT SENSORS

Muhammed Taha KAVLAK

Department of Electronics and Communication Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Umut Engin AYTEN

Various sensors are used to measure and detect a magnitude in the physical world. The output quantities of the sensors can be voltage or current. The current magnitudes created by current output sensors have small amplitudes. These current values must be converted into voltage values that can be used by electronic equipment. For this process, transimpedance amplifier (TIA) circuits with input size current and output size voltage should be used. In this thesis study, transimpedance amplifier circuit designs with different active elements are included. The designs were tested in photoelectric cell measurement systems in accordance with industrial standards. Within the scope of the study, first the traditional feedback Opamp transimpedance amplifier circuit structure, which is widely used in the literature, was compared with the current feedback CFOA transimpedance amplifier circuit structure. The comparison was made based on the results obtained in the experimental and simulation environment. Other studies include transimpedance amplifier circuit designs made with CDTA, CDBA and CFTA active elements. Experiments and simulation studies of CDTA and CDBA active elements used in the transimpedance amplifier circuit were carried out with active element structures implemented with commercial integrated circuits. The internal structure of the CFTA active element was designed with CMOS transistors using TSMC 0.18 μm technology parameter. With the proposed CFTA transimpedance amplifier circuit, gain values between 100 kΩ - 730 kΩ were obtained with an electronically adjustable structure, without using any passive elements. The performance of the circuit was examined in the PSPICE simulation environment. The TIA circuit was tested up to 0.1 - 2 μA input current value and the output voltage was found to be linear. The designed structure has a power consumption of 2.69 mW under the

condition where the highest gain is achieved. The highest bandwidth for equal transimpedance gain values within the circuit structures was obtained in the design made with the CFTA active element.

Keywords: Transimpedance Amplifier, Current Feedback Operational Amplifier, Current Differencing Transconductance Amplifier, Current Differencing Buffered Amplifier, Current Follower Transconductance Amplifier

1
GİRİŞ

Fiziksel dünyada bir büyüklüğü ölçümlemek ve algılamak amacıyla sensörler kullanılmaktadır. Sensörler ölçülmek istenen fiziksel büyüklüğü elektriksel bir işarete dönüştürmektedir. Çıkış büyüklüğü akım olan sensörler akım çıkışlı sensörler olarak adlandırılır. Akım çıkışlı sensörler rezistif, kapasitif veya yarıiletken tabanlı yapıda olabilir.

Farklı sensör çıkışlarından alınan küçük genlikli akım değerlerinin elektronik donanım tarafından kullanılabilecek gerilim değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için giriş büyüklüğü akım ve çıkış büyüklüğü gerilim olan geçiş empedans kuvvetlendiricisi (Transimpedance amplifier, TIA) devreleri kullanılmalıdır.

1.1 Literatür Özeti

Pierre Jarron vd. (1996), akım modlu geri besleme topolojisine dayanan bir TIA devresi önermiştir. Devre CMOS transistörler ile tasarlanmıştır. Devre kararlılığını arttırmak için kapasitör kullanılmamaktadır [1].

Rui Tao, Manfred Berroth (2003), akım modlu ortak geçit topolojisinde TIA devresi tasarlamıştır. 0.18 μm teknoloji parametresi ile tasarlanan devrenin tümdevre üretimi de gerçekleştirilmiştir. 60 dBΩ kazanç sağlanan devrenin deneysel çalışması üretilen tümdevre üzerinden gerçekleştirilmiştir [2].

Maziar Tavakoli vd. (2009), nabız oksimetre için tümdevre halinde bir logaritmik TIA devresi oluşturmuştur. Tümdevre yapısı 1.5 μm teknoloji parametreleri ile tasarlanmıştır. Deneysel çalışma üretilen tümdevre yapısı üzerinde gerçekleştirilmiştir [3].

Luis B. Oliveira vd. (2012), Pozitron emisyon tomografisi cihazlarına yönelik farklı TIA topolojileri karşılaştırılmıştır. Bu topolojiler, geleneksel Opamp TIA devresi, ortak geçit TIA devresi ve regüle edilmiş kaskad TIA devresidir. Yapılan karşılaştırmada ortak geçit TIA devresinin yüksek gürültüye sahip olduğu, ancak aynı maksimum geçiş iletkenlik değeri dikkate alındığında, düzenlenmiş kaskad TIA devresine göre geri besleme TIA ile aynı baskın gürültü değerine sahip olduğu elde edilmiştir. Regüle edilmiş TIA devresinin devre prototipi 0.35 μm CMOS teknolojisinde tasarlanmıştır [4].

Abdelaziz Trabelsi vd. (2012), geleneksel Opamp geri beslemeli TIA yapısı ile akım modlu bir TIA yapısını karşılaştırmıştır. Çalışma CMOS devre yapısı üzerinden benzetim sonucu olarak verilmiştir. Deneysel çalışma verilmemiştir [5].

Rajeshwari Pandey vd. (2013), İşlemsel Geçiş Direnci Kuvvetlendiricisi (OTRA), aktif elemanı kullanarak bir geçiş empedans modlu enstrümantasyon kuvvetlendiricisi yapısı tasarlamıştır. Devrede yer alan direnç elemanları yerine doğrusal bölgede çalıştırılan MOS transistörler kullanılarak elektronik kazanç ayarı sağlanmıştır. Çalışmada benzetim ve deney sonuçlarına yer vermiştir [6].

Mark Ibrahim (2014), elektrokimyasal biyosensör devreleri için nA altı mertebeden akımları işlemeye yönelik bir CMOS TIA devresi tasarlamıştır. Devrenin geri besleme hattında İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (OTA) aktif elemanı kullanılmıştır. 0.35 μm teknoloji parametreleri ile tasarım yapılmıştır [7].

Seung-Hoon Kim vd. (2014), lazer algılama ve menzil sistemlerinin uygulamaları için 0.18 μm CMOS teknoloji parametreleri ile çift modlu bir TIA devresi tasarlamıştır. Tasarlanan tümdevre deneysel çalışmalar için üretilmiştir. TIA devresi çift modlu CMOS ileri beslemeli TIA, bir geri besleme direncine sahip bir gerilim modlu inverter giriş aşamasından ve bir akım modlu ortak geçit kuvvetlendiriciden oluşur. Devrenin ölçülen kazanç değeri 76 dBΩ değerindedir [8].

Yavuz Kansu (2015), kapasitif ultrasonik sensörler için bir TIA devresi tasarlamıştır. Devre AMS 0.35 μm teknoloji parametreleri ile tasarlanmıştır. Tasarlanmış olan TIA devresi 30 MHz bant genişliğine ve 400 kΩ kazanca sahiptir. Çalışma deneysel ortamda gerçeklenmemiştir [9].

Masahiro Kubo vd. (2015), hücre zarındaki iyon akımını ölçme sisteminde kullanılmak üzere bir TIA devresi tasarlamıştır. Devrede geri besleme direnci yerine OTA aktif elemanı kullanılarak elektronik kazanç ayarı sağlanması hedeflenmiştir. Devrenin tümdevre üretimi gerçekleştirilmiştir [10].

Bhaskar Mishra vd. (2015), İndiyum Galyum Arsenit yarıiletken fotodetektörler için nA-μA aralığında çalışan Opamp tabanlı geribeslemeli bir TIA devre yapısı oluşturmuştur. Çalışma sonuçları benzetim ortamında incelenmiştir [11].

Wenjia Shao vd. (2016), fotoelektrik hücre ölçümü için geleneksel Opamp geri beslemeli TIA devre yapısı kullanmıştır. Fiziksel ölçümler ticari tümdevreler ile oluşturulmuş devre ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan farklı fotodedektörler için farklı kazanç direnci değerleri seçilmiştir [12].

Syifaul Fuada vd. (2016), görünür ışık haberleşmesi için Opamp tabanlı geri beslemeli bir TIA yapısı oluşturmuştur. TIA kazancı için ideal direnç ve kapasitör seçimine yönelik benzetim çalışmaları gerçekleşleştirmiştir. Çalışma aynı zamanda deneysel olarak da ticari tümdevre kullanılarak test edilmiştir. Deneysel çalışmada farklı kazanç direnci değerlerine karşılık devre çıkışı incelenmiştir [13].

Harun Arslan (2018), Opamp temelli geri beslemeli TIA yapısı için farklı geri besleme empedansları için devrenin kararlılığı, kazanç, gürültü ve SNR gibi parametrelerini incelemiştir. Devre girişine farklı işaretler uygulayarak farklı ticari tümdevreler üzerinden kazanç, bant genişliği gibi parametreleri analiz etmiştir [14].

Alessandro Nastro vd. (2018), kapasitif mikrosensörler için Akım Taşıyıcı (CCII) aktif elemanı kullanarak bir TIA devresi oluşturmuştur. Devrede üç adet CCII aktif elemanı ve üç adet pasif eleman kullanılmıştır. Önerilen devrenin CMOS teknolojisi ile transistor seviyesinde tasarımı yapılmıştır [15].

Mehmet Cem Dikbaş vd. (2018), literatürde Akım Farkı Geçiş Direnci Kuvvetlendiricisi (CDTRA), isminde yeni bir aktif eleman tanımlamıştır. Aktif eleman hem akım hem de geçiş empedans modlu enstrümantasyon kuvvetlendiricisi olarak çalışabilmektedir [16].

Mahdi Rajabzadeh vd. (2018), mikro potansiyostatlar için üç farklı akım okuma devresi arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Bu yapılar, dirençli TIA, kapasitif TIA ve akım modlu sürekli zamanlı sigma-delta modülatörüdür. Karşılaştırma benzetim ortamında elde edilen sonuçlara göre gerçekleştirilmiş, deneysel çalışma yapılmamıştır [17].

Mehmet Demirtaş vd. (2019), küçük kapasitans değerlerinin ölçümü için bir TIA devresi tasarlamış ve benzerim ortamında incelemiştir. Devre, ölçülen kapasitans üzerinde akan akımı, istenen kapasitansla ilgili bilgileri içeren modüle edilmiş bir gerilim değerine dönüştürmektedir. Farklı Opamp ticari tümdevre elemanları benzetim ortamında karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaya yer verilmemiştir [18].

Todd Wey (2019), geleneksel geribeslemeli Opamp TIA devresi için kazanç, bant genişliği, geri besleme döngü kararlılığı ve gürültü performansını optimize etmek için bir tasarım tekniği önermiştir. Önerilen yöntem SPICE benzetimi ile doğrulanmış ve yayınlanmış deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır [19].

Mahziar Serri vd. (2020), ivmeölçer ve jiroskop sistemlerinde kullanılabilecek bir TIA devresini OTA aktif elemanı ile tasarlamıştır [20].

Samar Elsaegh vd. (2020), ışık sensörlerine yönelik iki farklı TIA topolojisi tasarlamıştır. İlk yapı 0–100 μA arası giriş akımları için kullanılan bir Opamp geri beslemeli TIA yapısıdır. İkinci yapı ise kazancı artırılmış ortak geçit TIA yapısıdır. Tasarlanan yapılar tümdevre halinde üretilmiş ve test edilmiştir. Doğrusallık, kararlılık, yanıt süresi ve güç tüketimi açısından ortak geçit TIA topolojisinin Opamp tabanlı topoloji yerine uygulamanın daha avantajlı olduğu gösterilmiştir [21].

Wei Wang vd. (2021), biyomedikal sinyal işleme için pA altı mertebeden akımların ölçülmesi için düşük gürültülü bir TIA devre yapısı tasarlamıştır. Tasarlanan devre kaçak akım engelleme bloğu, akım kazancı bloğu ve geleneksel Opamp TIA bloğundan oluşmaktadır. Devre 0.18 μm teknoloji parametresi ile tasarlanmıştır. Toplam 160 dBΩ değerinde TIA kazancı, bir akım ön kuvvetlendirici aşaması ile geri besleme dirençli bir TIA ile elde edilmektedir [22].

Saroj R Desai vd. (2021), kan teşhis makinelerine yönelik geleneksel Opamp TIA yapısı kullanarak değişken kazançlı bir devre tasarlamıştır. Devrede ölçülecek büyüklüğe göre değişken kazanç ayarı kontrolü mikrodenetleyici üzerinden gerçekleştirilmiştir. Kazanç ayarı Opamp geri besleme hattında yer alan direnç ve kapasite elemanlarının değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Devre, deneysel olarak incelenmiştir [23].

Hyusim Park vd. (2022), çeşitli akım çıkışlı elektrokimyasal sensörler için kazanç ayarlı Opamp geri beslemeli bir TIA devre yapısı oluşturmuştur. Devre kazancı dijital olarak ayarlanabilmektedir. Tasarlanan devre 0.18 μm CMOS teknolojisi ile üretilmiş ve deneysel çalışma tümdevre üzerinde gerçekleştirilmiştir. Devre, 0.1-100 μA giriş akımları için uygundur. Tümdevre yapısı 0.38 mW'lık düşük güç tüketimi ile giyilebilir cihazlarda kullanılmaya yönelik tasarlanmıştır [24].

José C. García-Montesdeoca vd. (2022), Gerilim taşıyıcı (VCII) aktif elemanı ile bir TIA devresi tasarlamıştır. Devre 65 nm CMOS teknolojisi ile üretilmiştir [25].

Riyaz Ahmad vd. (2024), elektrokimyasal glikoz sensörleri için 0.18 μm CMOS teknolojisi kullanılarak bir TIA devresi tasarlanmıştır. Devre kazancı elektronik olarak ayarlanabilir şekilde tasarlanmıştır. Deneysel çalışma için devrenin ticari tümdevrelerle gerçeklenmiş hali kullanılmıştır. Devrenin fiziksel deneyleri CCII, OTA ve Opamp aktif elemanları ile gerçekleştirilmiştir. Giriş akımı CCII elemanına bağlanan direnç üzerinden gerilime dönüştürülmüş daha sonra elde edilen gerilim OTA üzerinden akıma dönüştürülmüştür. OTA aktif elemanı çıkışında elde edilen akım Opamp TIA yapısı üzerinden tekrar gerilime dönüştürülerek çıkış gerilimi elde edilmiştir [26].

Literatür çalışmaları incelendiğinde çalışmalarda genel olarak geribeslemeli Opamp TIA devre yapısının kullanıldığı görülmektedir [7], [10], [11–14], [18], [19], [21–24]. Bu çalışmalar içerisinde Opamp aktif elemanı geribesleme hattında pasif kazanç direnci yerine aktif eleman kullanan çalışmalar da bulunmaktadır [7], [10].

Geribeslemeli Opamp TIA devre yapısının kararlılık ve bant genişliği parametreleri geri besleme kapasitörü tarafından kısıtlanmaktadır. Bu kapsamda kapasitör parametresinin kısıtlamalarını inceleyen ve uygun bant genişliği, kararlılık gibi parametreleri bulmayı hedefleyen çalışmalar gerçekleştirilmiştir [13], [14], [19].

Literatürde geleneksel Opamp devre topolojisi dışında farklı aktif elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiş devre yapıları da bulunmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde kazanç pasif elemanlar ile [15], [25] veya pasif eleman yapısını benzetim ile sağlayan aktif elemanlar ile [6], [20] gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan akım modlu çalışabilen aktif elemanlardan oluşturulmuş TIA devreleri karşılaştırması Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1 Akım modlu aktif elemanlarla gerçekleştirilen TIA devresi literatür karşılaştırma tablosu

Ref.	Kullanılan Aktif Eleman	Pasif Eleman Sayısı	Elektronik ayarlanabilirlik
[6]	3 OTRA	6 R	+
[15]	3 CCII	3 R	-
[20]	2 OTA	8R - 8C	-
[25]	1 VCII	1 R	-

Çalışmalar incelendiğinde sadece aktif eleman parametresi ile pasif eleman kullanmadan TIA kazancı sağlayan devre yapısı bulunmadığı görülmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı Opamp aktif elemanı dışında akım modlu çalışmaya uygun olan farklı aktif elemanlar kullanılarak yeni geçiş empedans modlu kuvvetlendirici tasarımları gerçekleştirmektir. Bu tasarlanan devre yapıları ile Opamp'lı geleneksel TIA devrelerine göre daha yüksek kazanç - bant genişliği elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda önerilen devrelerin çalışabilirliğinin benzetim sonuçları ve deneysel çalışma ile gösterilmesi hedeflenmiştir.

1.3 Tezin Hipotezi

Bu tezin hipotezi, Opamp aktif elemanı ile gerçeklenen geleneksel TIA devresine alternatif olacak ve literatürde önerilen TIA devrelerine göre avantajlı devre

tasarımlarının gerçeklenebileceğidir. Özellikle tasarlanan devrelerin kazanç-bant genişliği açısından Opamp'lı geleneksel TIA devre yapısına göre avantajlı olabileceği önerilmektedir.

2
FOTOELEKTRİK HÜCRE ve ÇALIŞMADA KULLANILAN DENEYSEL ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Bu bölümde geçiş empedans kuvvetlendiricisi devre yapılarını deneysel olarak test etmek için kullanılan fotoelektrik ölçüm hücresi yapıları ve genel çalışma prensiplerine yer verilmiştir. Devreleri test etmek için iki farklı ölçüm hücresi kullanılmıştır. Bunlardan biri havada bulunan küçük partiküllerin (aerosol) yoğunluğunun ölçümü için diğeri ise ışık gücü ölçümü için kullanılmaktadır. Bu deney düzeneklerinde asıl amaç akım çıkışı sağlayan bir fotodedektör ile TIA devrelerinin test edilmesini sağlamaktır.

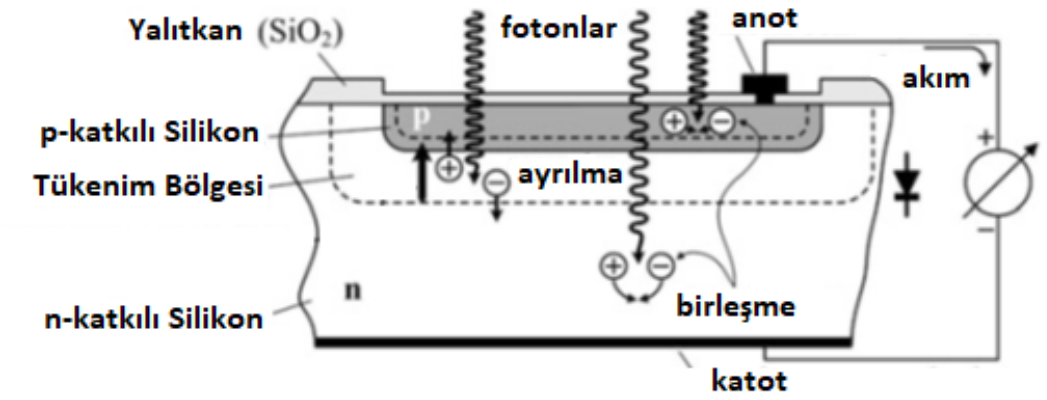
2.1 Fotodedektör

Diğer ölçüm türlerinde olduğu gibi, optik ölçümlerde ölçülecek büyüklüğü bir tür elektrik sinyaline dönüştüren sensörlere bağlıdır. Optik ölçümlerde bu tip sensörler fotodedektör olarak adlandırılır. Fotodedektörler ışık gücünü standart elektronik cihazlar kullanılarak kaydedilebilen veya ölçülebilen elektrik sinyaline, gerilime veya akıma dönüştürür.

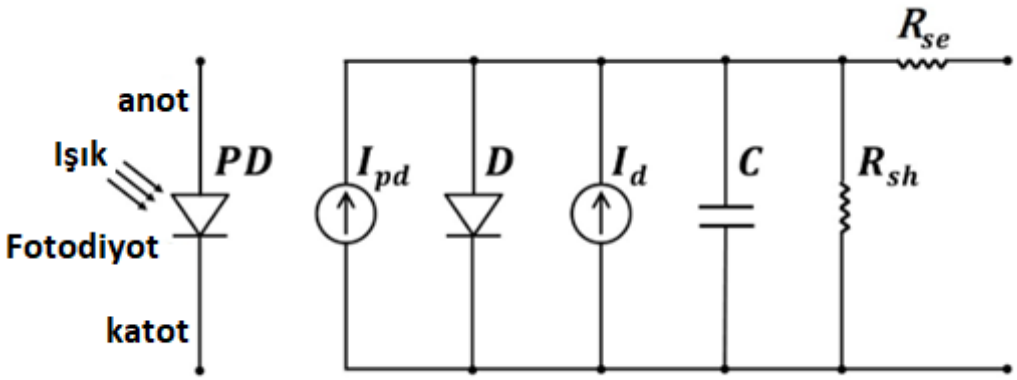
En sık kullanılan yarıiletken fotodedektörler, fotodirençler, fotodiyotlar (PD), çığ fotodiyotları (APD), fototransistörler, fotodiyot dizileri ve yük bağlantılı cihazlardır (CCD) [27]. Bütün bu farklı tip fotodedektörler içerisinde fotodiyot, boyut, maliyet ve güvenilirlik gibi özellikleri nedeniyle en yaygın kullanılan optoelektronik eleman olmaktadır [28].

Silisyum bir fotodiyotun temel çalışma prensibi Şekil 2.1'de gösterilmiştir [28]. Fotodiyotun jonksiyon noktası üzerine ışık düştüğünde valans bandındaki elektronlar iletim bandına aktarılır ve elektron-delik çiftleri oluşur. Jonksiyon bölgesindeki güçlü potansiyel gradyanı nedeniyle elektronlar ve delikler zıt yönlerde hızlandırılır ve bir akım akar [29].

Fotodiyot devre elemanının eşdeğer iç yapısı Şekil 2.2'de verildiği gibidir [30]. Bir fotodiyot eşdeğer iç yapısında bir ideal diyot, bir jonksiyon kapasitansı ve parazitik seri ve paralel dirençlerden oluşmaktadır [31]. Burada seri direnç çok düşük, paralel direnç ise çok yüksek mertebededir.



Şekil 2.1 Yarıiletken fotodiyot çalışma prensibi [28]



Şekil 2.2 Yarıiletken fotodiyot eşdeğer iç yapısı [31]

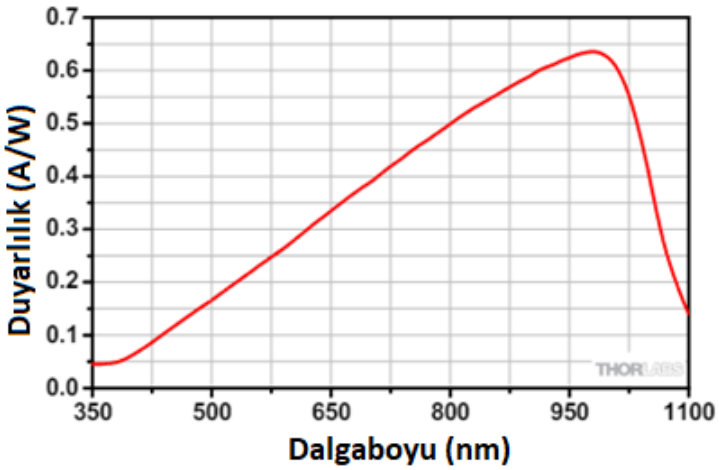
Fotodiyot akımını veren bağıntılar Denklem (2.1) ve (2.2)'de verilmiştir. Çıkış akımı, fotodiyotun üzerine düşen dalga boyuna karşılık gelen duyarlılık değerine ($\Re(\lambda)$), üzerine düşen ışık gücüne (P_{Light}) ve fotodiyotun karanlık akımına (I_{Dark}) bağlıdır. Fotodiyot üzerine hiç ışık düşmediği durumda çıkışında oluşan akıma karanlık akım denir [27].

$$I_{PD} = P_{Light}.\Re(\lambda) \tag{2.1}$$

$$I_{Out} = I_{PD} + I_{Dark} \tag{2.2}$$

Fotodiyot uygulamalarına bakıldığı zaman genellikle silisyum yarıiletken fotodiyotların tercih edildiği görülmektedir. Silisyum yarıiletken fotodiyotlar genel olarak 0.8 – 0.9 μm aralığında tepe duyarlılığa sahipken Germanyum ve InGaAs yarıiletken fotodiyotlar 1.1 – 1.7 μm aralığında tepe duyarlılığa sahiptir [32].

Bu çalışmada yapılan deneylerde 350 – 1100 nm arası duyarlılığa sahip Thorlabs SM05PD1B fotodiyotu kullanılmıştır [33]. Fotodiyotun bu dalga boyları aralığında tepkisi olması, deneylerde görünür bölge ışık kaynaklarına ek olarak kızılötesi ışık kaynağı kullanmayı da mümkün kılmaktadır. Fotodiyotun dalga boyu – duyarlılık grafiği Şekil 2.3'te verilmiştir [33].



Şekil 2.3 Fotodiyot dalgaboyu – duyarlılık grafiği [33]

Fotodiyotlar besleme durumlarına göre iki farklı modda çalışabilmektedir. Bu çalışma modları ters besleme altında fotoiletken, ve sıfır besleme altında fotovoltaik olarak adlandırılmaktadır. Mod seçimi, uygulamanın hız gereksinimlerine ve tolere edilebilir karanlık akım miktarına bağlıdır [34].

Ters gerilim uygulanması, tükenme jonksiyon noktasının genişliğini arttırır ve jonksiyon kapasitansı değerini düşürür. Bu uygulamada çıkış yanıtının doğrusallığı artar. Bu koşullar altında çalışmak daha büyük genlikli bir karanlık akım üretme eğilimindedir. Fotovoltaik mod, güneş pillerinin temeli olan fotovoltaik etkiden yararlanır. Fotovoltaik modda çalışırken karanlık akım miktarı daha düşük olmaktadır [35].

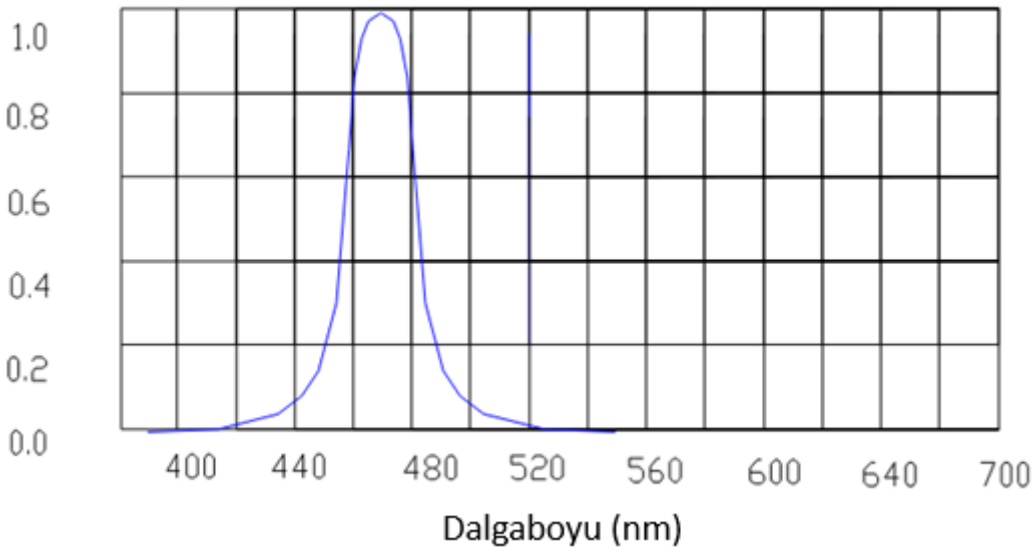
Bu tezde yapılan deneysel çalışmalarda fotodiyot sıfır besleme altında fotovoltaik modda kullanılmıştır.

2.2 Işık Kaynağı

Aeresol ölçümü için kullanılan deney düzeneğinde 850 nm dalga boyuna sahip kızılötesi lazer kullanılmıştır. Işık yoğunluğu ölçümü için kullanılan deney düzeneğinde ise mavi LED tercih edilmiştir. Mavi LED tercih edilmesinin sebebi fotodiyotun 450 nm civarında tepkisinin daha düşük olmasıdır. Aeresol ölçümünden farklı olarak ikinci düzenekte ışık kaynağı doğrudan fotodiyota bakmaktadır.

Bundan ötürü fotodiyot duyarlılığının daha düşük olduğu bir dalgaboyunda ışık gücü ayarlı bir ışık kaynağı kullanarak kontrol edilebilir bir fotodiyot akımı oluşturmak hedeflenmiştir. Kullanılan mavi LED ışık kaynağının dalga boyu grafiği Şekil 2.4'te verilmiştir [36].

Işık kaynaklarını sürmek için darbe süresi ve ışık gücünün ayarlanması gerekmektedir. Bunun kontrolü için ayrı bir devre kullanılmıştır.

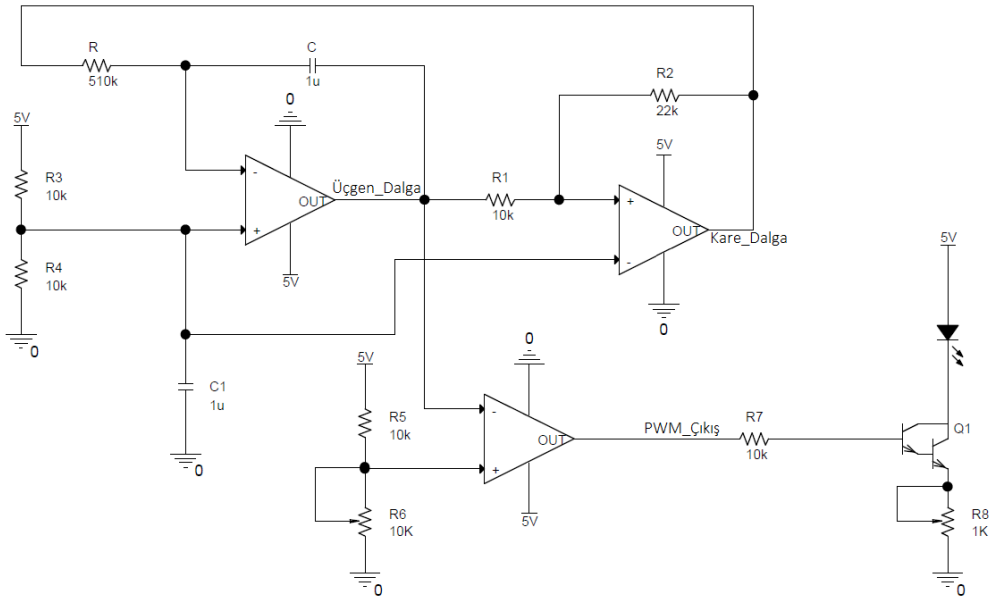


Şekil 2.4 Mavi LED dalga boyu grafiği [36]

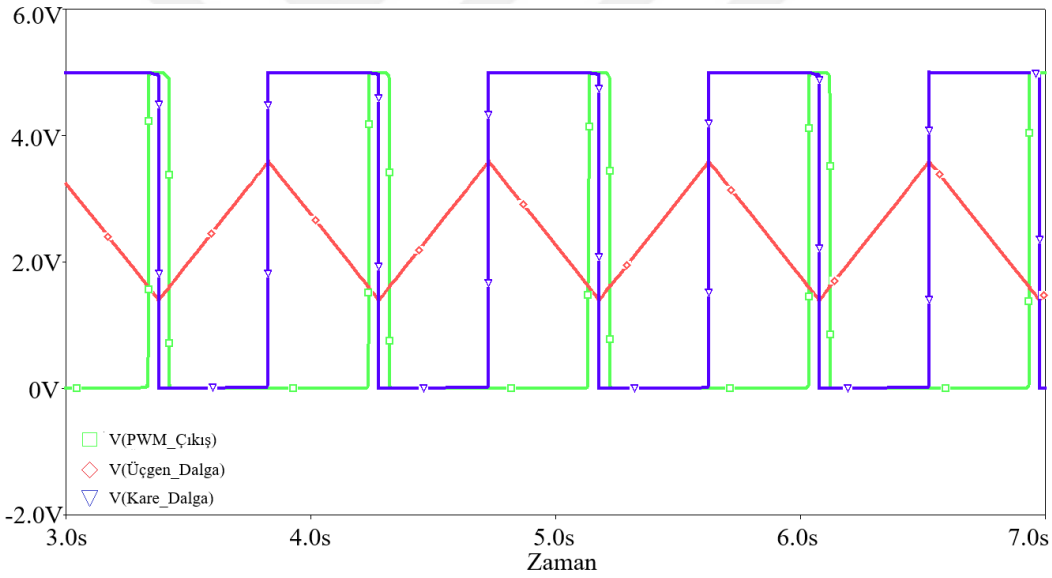
2.2.1 Led Sürme Devresi

Fotoelektrik hücreler üzerinde yer alan ışık kaynaklarını darbe formunda sürebilmek için darbe genlik modülasyonu kullanılmıştır. Darbe genlik modülasyonu elde edebilmek için literatürde yer alan Opamp aktif elemanı ile oluşturulan yapı tercih edilmiştir [37]. Devrede modülasyonlu çıkış işareti, kare dalga osilatörü çıkışına bağlanan integratör devresinin oluşturduğu üçgen dalga sinyal formunun DC seviye ile karşılaştırılması sonucu elde edilir. Kullanılan devre şeması Şekil 2.5'te verilmiştir. Darbe genişlik modülasyonu devresinde devre çıkışına bağlanan bir transistör ile sabit akımda ışık kaynağının modülasyonlu sürülmesi hedeflenmiştir.

Devre yapısına, deneyler esnasında darbe genişlik süresi ve ışık kaynağının sürme akımını değiştirecek şekilde ayarlı dirençler eklenmiştir. Devrede üretilen modülasyonlu işaretin frekans ifadesi Denklem 2.3'te verildiği gibidir. Devrenin PSPICE benzetim sonucu Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.5 Darbe genişlik modülasyonlu ışık kaynağı sürme devresi



Şekil 2.6 Darbe genişlik modülasyonu devresi benzetim sonucu

$$f = \frac{R_2}{4.R.C.R_1} \tag{2.3}$$

2.3 Ölçüm Yöntemleri

Deneylerde aeresol konsantrasyonu ve ışık yoğunluğu ölçümü olmak üzere iki farklı ölçüm yöntemi üzerinden devreler test edilmiştir.

2.3.1 Aeresol Konsantrasyonu Ölçümü

Fotoelektrik ölçüm hücreleri, parçacık sayaçları, parçacık çap analizi, akış sitometrisi, duman dedektörleri ve aeresol konsantrasyonu ölçümü gibi amaçlar için kullanılmaktadır [12], [38]. Aeresoller veya havada dağılmış sistemler, gazlarda asılı duran küçük parçacıklar bütünüdür. Bu parçacıklar, pus, duman, toz, buğu, sis veya sprey gibi havada asılı madde bulutlarını içerir [39].

Aeresol ölçümü için kullanılan tekniklerden en yaygın olanı bir fotoelektrik ölçüm hücresinde, hücreye verilen partiküllere (aerosol) çarpan ışığın fotodiyot elemanı üzerinden elektronik devre ile ölçülmesidir. Işığın saçılma yoğunluğu aeresollerin hacim yoğunluğu ile doğru orantılıdır [38]. Temel olarak ölçüm prensibi ışık saçılımı ilkesine dayanmaktadır.

2.3.1.1 Işık Saçılımı Teorisi

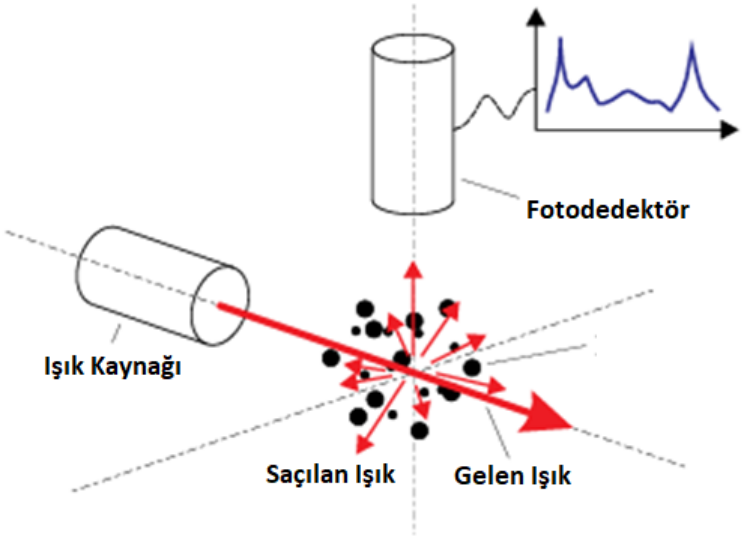
Bir partiküle çarpan ışığın saçılımı ilkesi Mie teorisi ile açıklanmaktadır. Mie teorisine göre saçılan ışık yoğunluğunu, ölçüm açısına, gelen ışığın dalga boyuna ve parçacıkların kırılma indeksine bağlıdır [40]. Mie saçılmasını ilişkin ifade Denklem (2.4)'de verilmiştir.

$$I(\theta) = I_0.\frac{\lambda^2}{8\pi^2}[i_1(\alpha,\eta,\theta) + i_2(\alpha,\eta,\theta)] \tag{2.4}$$

Burada "I_0" ışık kaynağından gelen ışık yoğunluğunu, "i_1 ve i_2" ışığın dikey ve yatay polarizasyon yoğunluğunu, "η" partikülün kırılma indisini, "λ" ışık kaynağının dalga boyunu, "α" boyut parametresini ve "θ" saçılma açısını ifade etmektedir.

Bir fotoelektrik hücrede parçacıklara çarpan ışığın saçılımı Şekil 2.7'de gösterilmiştir [41]. Fotoelektrik hücrede ana hedef, parçacık yoğunluğuna bağlı olarak saçılan ışığın, fotodiyot elemanının çıkışında oluşturduğu akım büyüklüğünün ölçülmesidir.

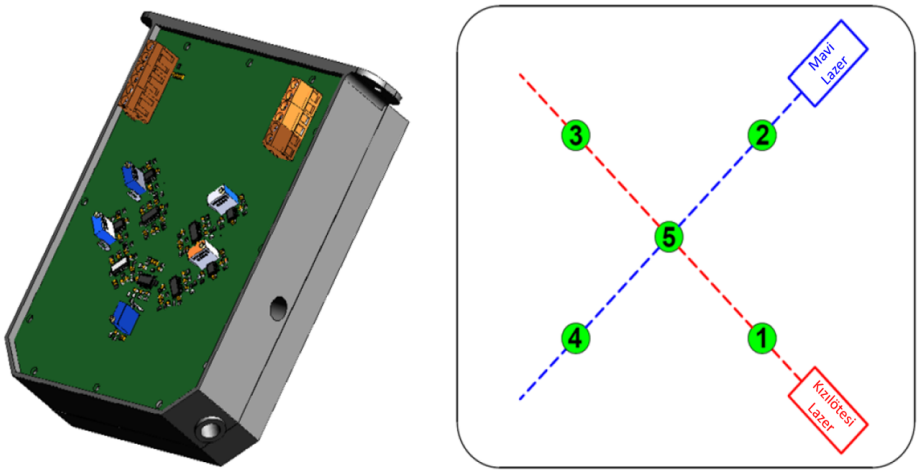
Fotoelektrik hücre üzerinde yer alan fotodiyot elemanının oluşturduğu akım büyüklükleri çok küçük genliklidir. Bu akım değerlerinin elektronik donanım tarafından kullanılabilecek gerilim değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için giriş büyüklüğü akım ve çıkış büyüklüğü gerilim olan TIA devresi kullanılmalıdır.



Şekil 2.7 Işık saçılımı ilkesi [41]

2.3.1.2 Optik Ölçüm Hücresi

TIA devrelerini test etmek için kullanılan aerosol ölçüm deney düzeneğinde [38], [42] çalışmasında verilen optik hücre yapısı kullanılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan hücre ve hücre içerisindeki sensör ve ışık kaynaklarının yerleşimini gösteren yapı Şekil 2.8'de verilmiştir [38].

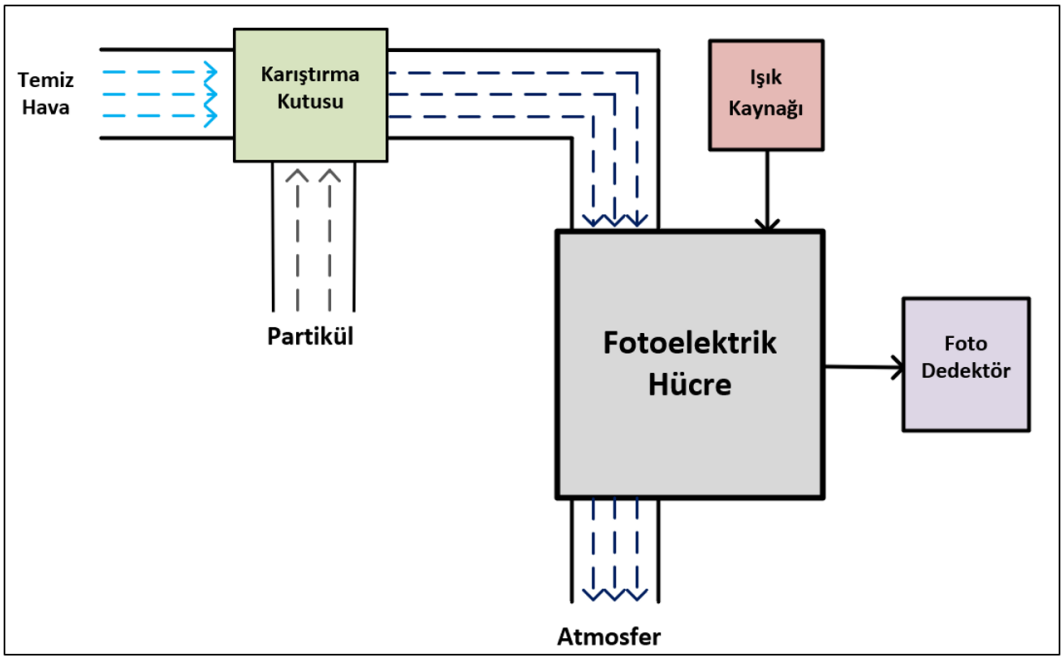


Şekil 2.8 Fotoelektrik hücre yapısı [38]

Kullanılan optik hücre yapısı çalışmasında beş adet sensör ve iki farklı dalga boyunda ışık kaynağı kullanıldığı görülmektedir. Yapılan deneylerde hücre üzerinde 90°düzleminde yer alan tek bir sensör ve bir adet 850 nm dalga boyunda kızılötesi ışık kaynağı kullanılmıştır.

2.3.1.3 Deney Düzeneği

Aeresol ölçümüne yönelik deney düzeneği blok şeması Şekil 2.9'da verildiği gibidir. Deney düzeneği, optik ölçüm hücresi, ışık kaynağı, fotodedektör, aeresol üreteci ve karıştırma kutusundan oluşmaktadır. Aeresol üreteci ile oluşturulan aeresoller temiz hava ile birlikte üzerinde fan bulunan karıştırma kutusuna çekilir. Burada aeresoller ve temiz hava karıştırılıp hücre içerisine aktarılır. Hücre üzerinde bir adet ışık kaynağı ve fotodedektör bulunmaktadır. Hücrenin içinden geçen karışım ışık kaynağı aktif olduğu sürece fotodedektör üzerinden okunabilmektedir. Hücre içerisine giren karışım hücrenin çıkış ucundan tahliye olur.



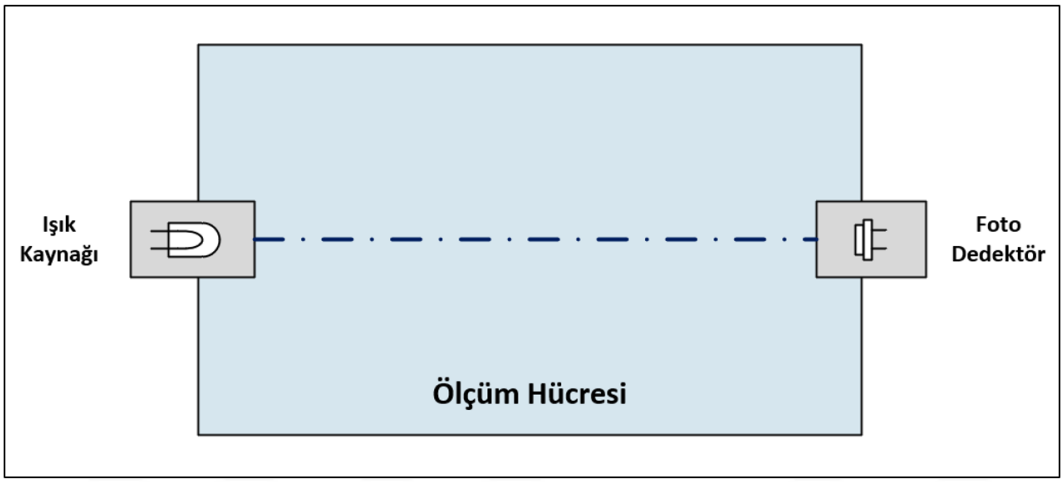
Şekil 2.9 Aeresol ölçüm düzeneği blok şeması

2.3.2 Işık Gücü Ölçüm Hücresi

Aeresol konsantrasyonu ölçüm düzeneğinde sabit bir aeresol konsantrasyonu altında fotodedektör üzerinde sabit bir akım oluşturmak mümkündür. Ancak malzemeye göre darbe formunda farklı salınımlar meydana gelebilmektedir. Bu salınımlar malzemeye özgü bir özellik olup aeresol karakteristiği tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır [42].

Aeresol ölçüm düzeneği her ne kadar literatürde ve pratikte çok yaygın kullanılsa da bu çalışmada TIA devrelerini test etmek için ışık gücü ölçümüne yönelik ikinci bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Ölçüm düzeneğinde asıl amaç fotodiyot üzerinde sabit bir akım oluşturmaktır. Aeresol ölçüm düzeneğinde sabit akımı, partiküllere çarpıp saçılan ışık oluştururken ikinci düzenekte doğrudan fotodiyot üzerine ışık düşürerek sabit akım oluşturmak hedeflenmiştir.

Hücre yapısı Şekil 2.10'da verilmiştir. Sistemde dış ortama kapalı bir hücre içerisinde doğrudan fotodiyota düşen ışığın ölçümlenmesi hedeflenmiştir. Düzenekte kullanılan fotodiyot aeresol ölçüm düzeneğinde kullanılan fotodiyot ile aynıdır. Işık kaynağı olarak mavi LED seçilmiştir. Fotodiyotun duyarlılığının mavi ışık dalga boyunda kızılötesi dalga boyunda olduğundan daha az olduğu bilinmektedir. Işık kaynağı doğrudan fotodiyota düştüğü için ışık kaynağını duyarlılığın daha az olduğu bir bölgede kullanarak fotodiyotta aynı ışık gücünde daha az akım oluşturması hedeflenmiştir. Farklı akım miktarı oluşturmak için ışık kaynağının akımı değiştirilerek fotodiyot üzerine düşen ışık miktarı değiştirilmektedir.



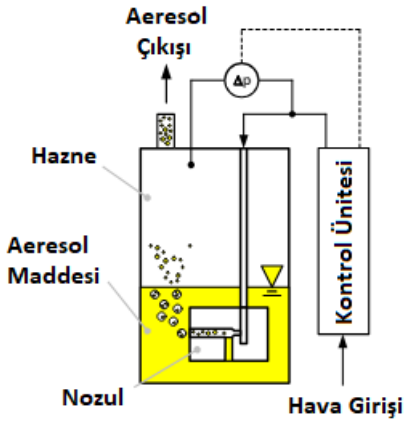
Şekil 2.10 Işık gücü ölçüm hücre yapısı

2.4 Deney Düzeneklerinde Kullanılan Cihazlar

2.4.1 Aeresol Üreteci

Deneylerde aerosol yoğunluğu TOPAS ATM 228 aerosol jeneratörü [43] ile kontrol edilmiştir. Bu cihaz yardımıyla farklı basınç kademelerinde sabit aerosol konsatrasyonu elde ederek deneylerde hücre içerisinde fotodedektör üzerine düşecek akımın sabit kalması sağlanmıştır.

Aeresol üretecinin çalışma prensibi Şekil 2.11'de verilmiştir [43]. Cihaza aerosol üretilecek maddenin takılması için giriş ucu bulunmaktadır. Cihazın basınç kademesinin ayarlanmasıyla birlikte aerosol maddesinin takıldığı uçta basınç oluşmaktadır. Böylece aerosol maddesi dağıtım bölgesine akmaktadır. Burada aerosol maddesi bir aerosol oluşturmaktadır.



Şekil 2.11 Aeresol üreteci iç yapısı [43]

2.4.2 Referans Fotodiyot Ölçüm Cihazı

Deneylerde fotodiyot akımını ölçmek için Thorlabs PDA200C [44] fotodiyot ölçüm cihazı referans olarak kullanılmıştır. Hücre üzerinde yer alan sensörde meydana gelen çıkış akımı devrelere uygulanmadan önce referans ölçüm cihazı ile ölçülüp sonuçlar kaydedilmiştir.

Cihaz üzerinde altı adet ölçüm kademesi yer almaktadır. Cihaz minumum 10 pA değerinde ölçüm çözünürlüğüne sahiptir. Cihazın kazanç kademelerine ait akım ölçüm aralığı, çözünürlüğü, bant genişliği ve kazanç değerleri Tablo 2.1'de yer almaktadır.

Tablo 2.1 Referans cihaz ölçüm kademeleri özellikleri

Akım Aralığı	Çözünürlük	Doğruluk	Analog Çıkış	
			Bant Genişliği	Kazanç
10 mA	1 μA	±0.05%	500 kHz	10^3V/A ± 5%
1 mA	100 nA	±0.05%	250 kHz	10^4V/A ± 5%
100 μA	10 nA	±0.05%	70 kHz	10^5V/A ± 5%
10 μA	1 nA	±0.05%	20 kHz	10^6V/A ± 5%
1 μA	100 pA	±0.05%	5 kHz	10^7V/A ± 5%
100 nA	10 pA	±0.1%	1 kHz	10^8V/A ± 5%

Deneyler esnasında uygun kademelere göre ölçülen akım sonucu elde edilen çıkış gerilimi, cihaz üzerinde yer alan analog çıkış ucundan okunmuştur. Çıkış gerilimi cihaz üzerinde BNC konnektöre bağlıdır. Böylece osiloskop gibi veri okuyan cihazlar üzerinden okuma yapmak mümkün olmaktadır.

3
GELENEKSEL OPAMP TIA DEVRESİ ve CFOA AKTİF ELEMANI KULLANARAK TIA TASARIMI

Bu bölümde fotoelektrik hücredeki aerosol yoğunluğunun değişimine göre fotodiyot elemanı tarafından üretilen akımı voltaj büyüklüğüne dönüştürmek için akım geri beslemeli işlemsel yükselteç kullanılarak bir TIA devre tasarımı yapılmıştır. Bu devre, yaygın olarak kullanılan Opamp aktif elemanı ile tasarlanmış TIA devresi ile deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

Her iki TIA devre yapısında da kaskad bağlı şekilde iki kat analog devre yapısı bulunmaktadır. İlk katta akım büyüklüğü gerilime dönüştürülmekte, ikinci katta ise gerilim büyüklüğü tekrar kuvvetlendirilmektedir. İki yapı için de kazanç dirençleri eşit büyüklükte seçilmiştir. Böylece tamamen eşit şartlarda iki farklı devrenin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu bölümde yer alan çalışma bildiri olarak sunulmuştur [45].

3.1 Akım ve Gerilim Geribeslemesi Karşılaştırması

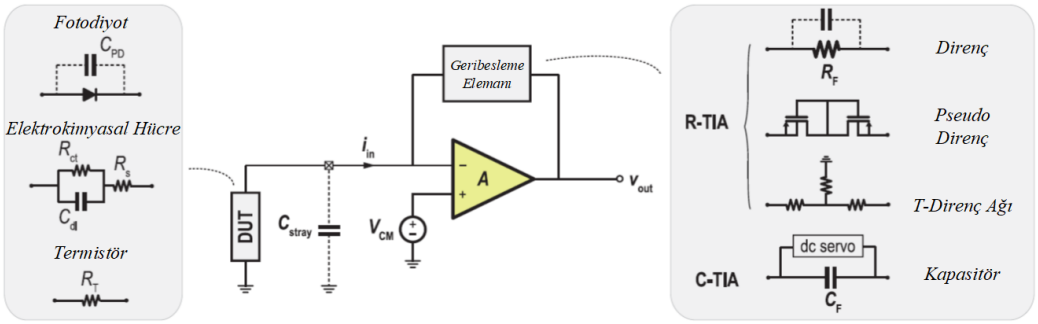
Bir akım geri besleme kuvvetlendiricisi aktif elemanı, artı tip ikinci nesil akım taşıyıcısı ve bir gerilim izleyici yapısından oluşur. Opamp bazlı devrelerin maksimum çalışma frekansı, öncelikle sınırlı kazanç bant genişliği çarpımı ve işlemsel yükselticinin dönüş hızı tarafından belirlenir.

Geleneksel işlemsel yükselteçler yıllar boyunca analog sinyal işleme devrelerinin tasarımında başarıyla kullanılmıştır [46]. Akım geri beslemeli yapıların gerilim geri beslemeli yapılara karşı sinyal işleme uygulamalarında kullanımı açısından pek çok avantajı olduğu bilinmektedir. Bunlardan bazıları aşağıda verildiği gibidir [47].

- Yüksek dönüş hızı
- Yüksek bant genişliği
- Neredeyse bant genişliğinden bağımsız kazanç
- Daha yüksek çıkış akımı

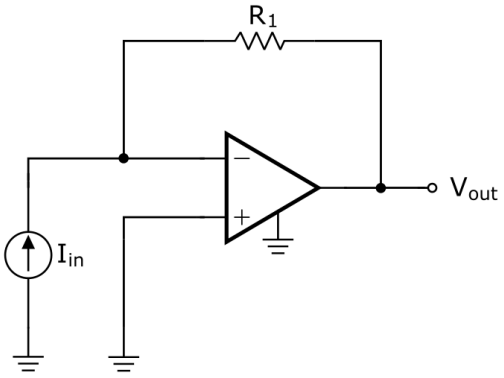
3.2 Opamp Aktif Elemanı ile Gerçeklenen Geribeslemeli TIA Devresi

OpAmp aktif elemanı ile gerçekleştirilen girişine bağlanan herhangi bir akım çıkışlı sensörü geri besleme hattı üzerinden gerilime dönüştürerek çıkış veren literatürde yaygın olarak kullanılan geri beslemeli geçiş empedans kuvvetlendirici yapısının genel devresi Şekil 3.1'de verildiği gibidir [48].



Şekil 3.1 Akım çıkışlı sensörler için genel geribeslemeli Opamp aktif elemanı kullanan TIA devresi [48]

Girişe bağlanan akım çıkışlı sensör yerine akım kaynağı, geri besleme hattına da kazanç direnci eklenmesi durumunda devrenin genel gösterimi Şekil 3.2'de verildiği gibi olmaktadır.



Şekil 3.2 Geleneksel Opamp TIA devresi

Bu devre yapısında çıkış gerilim ifadesi Denklem (3.1)'de verildiği gibi olmaktadır.

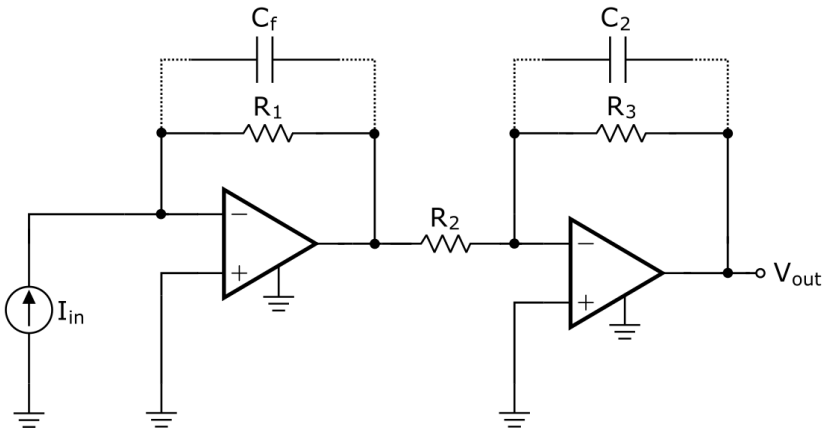
$$v_{out} = i_{in}.R_1 \tag{3.1}$$

Fiziksel Opamp yapısında giriş terminallerine akan akımın kazanç üzerinde etkisi olmaktadır. Bu etki göz önüne alınarak bu çalışma için giriş akımı pA mertebesinde veya daha düşük seçilmelidir. Pratikte devrenin kararlı çalışması için geri besleme direncine paralel bir kapasite elemanı eklenmelidir. Eklenen bu eleman aynı zamanda Opamp elemanının minimum kazanç-bant genişliğini (GBW) belirlemektedir [49]. Kazanç bant genişliği ifadesi Denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$GBW > \frac{C_i + C_f}{2.\pi.R_f.C_f^2} \tag{3.2}$$

Bu denklemde C_i: Giriş kapasitansı, C_f: Geri besleme kapasitansı ve R_f: Geri besleme direncidir.

Bu çalışmada deneysel ölçümleri gerçekleştirilen Opamp tabanlı TIA devre yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir. Devrenin DC koşullarda analizi yapıldığında çıkış gerilim ifadesi Denklem (3.3)'te verildiği şekilde elde edilir.



Şekil 3.3 Opamp TIA devresi

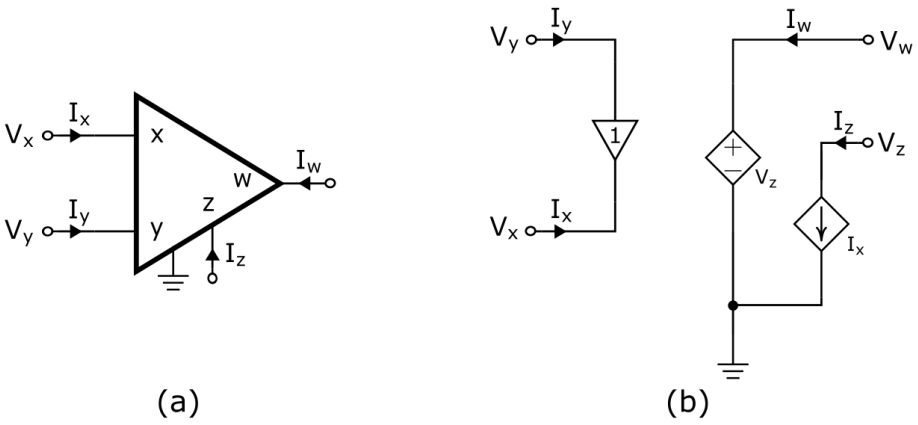
$$v_{out} = i_{in}\frac{R_1.R_3}{R_2} \tag{3.3}$$

Devrenin AC koşullarda analizi yapıldığı zaman elde edilen çıkış gerilimi bağıntısı Denklem (3.4)'te verilmiştir.

$$V_{out} = I_{in}\frac{R_1 + R_3}{s^2.(R_1.C_f.R_2.R_3.C_2) + s.R_2(R_1.C_f + R_3.C_2) + R_2} \tag{3.4}$$

3.3 CFOA Aktif Elemanı Kullanılarak Tasarlanan TIA Devresi

CFOA aktif elemanının devre sembolü ve ideal eşdeğer devre modeli Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 CFOA aktif elemanı a) devre sembolü b) ideal eşdeğer devresi

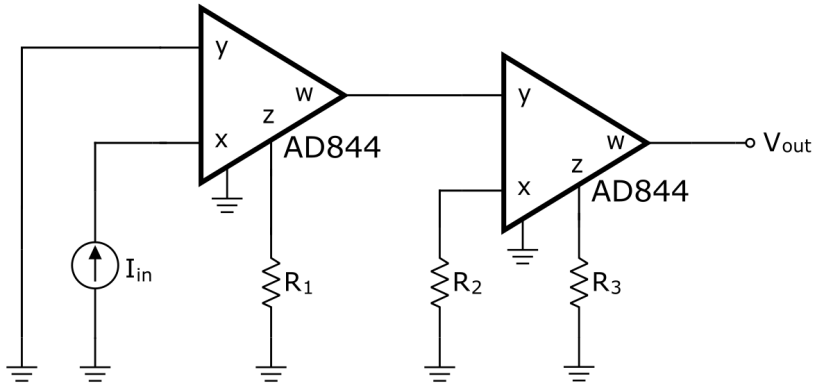
CFOA aktif elemanının tanım bağıntıları Denklem (3.5) ile verilmiştir. Burada α akım kazancı, β ve γ ise gerilim kazanç ifadeleridir. İdealde α = β = γ = 1'dir.

$$\begin{bmatrix} I_y \\ I_z \\ V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Bu çalışmada CFOA aktif elemanı kullanılarak gerçeklenen TIA devre yapısı Şekil 3.5'te verilmiştir. Devrenin analizi yapıldığında çıkış gerilim ifadesi Denklem (3.6)'da verildiği şekilde elde edilir.

$$v_{out} = -i_{in}\frac{R_1.R_3}{R_2} \tag{3.6}$$

CFOA TIA devre yapısının duyarlılık analizi de gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi, bir sistemin girdilerindeki değişikliklere nasıl tepki verdiğini incelemektedir [50]. Elektronik devrelerde pasif eleman veya aktif eleman parametre toleranslarının sistem üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Genel normalize duyarlılık ifadesi Denklem (3.7)'de verildiği gibidir. Sistemin normalize duyarlılık değerinin [-1, 1] aralığında olması gerekmektedir.



Şekil 3.5 CFOA TIA devresi

$$S_x^y = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} \frac{x}{y} = \frac{\partial y}{\partial x} \frac{x}{y} \tag{3.7}$$

CFOA TIA devresinin pasif eleman duyarlılığı R_1, R_2 ve R_3 direnç elemanları üzerinden incelenmiştir. Elde edilen duyarlılık değerleri Denklem (3.8-3.10)'da verilmiştir.

$$S_{R_1}^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial R_1} \frac{R_1}{V_{out}} = 1 \tag{3.8}$$

$$S_{R_2}^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial R_2} \frac{R_2}{V_{out}} = -1 \tag{3.9}$$

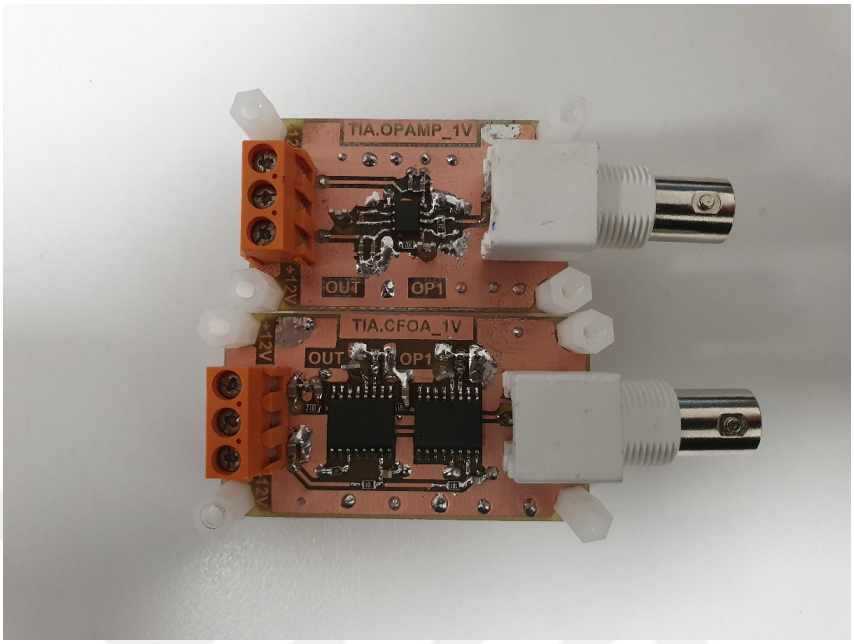
$$S_{R_3}^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial R_3} \frac{R_3}{V_{out}} = 1 \tag{3.10}$$

Çıkış geriliminin pasif eleman duyarlılığı incelendiğinde duyarlılık değerleri [-1,1] aralığındadır. Devrenin pasif eleman duyarlılığının düşük olduğu görülmektedir.

3.4 Test Devreleri

CFOA ve Opamp TIA devrelerini deneysel olarak incelemek için prototip test kartları hazırlanmıştır. Test devrelerine bağlanacak sensör BNC konnektör ile bağlanmaktadır. Devreler ±12 V DC simetrik besleme ile çalışmaktadır. Test devrelerine ait görseller Şekil 3.6'da verilmiştir.

Bu bölümde yer alan çalışmada tasarımı gerçekleştirilen TIA devrelerinde CFOA ticari tümdevresi olarak AD844 [51], Opamp tümdevresi olarak ise OPA2191 [52] kullanılmıştır.



Şekil 3.6 Prototip test kartları

3.5 Benzetim Sonuçları

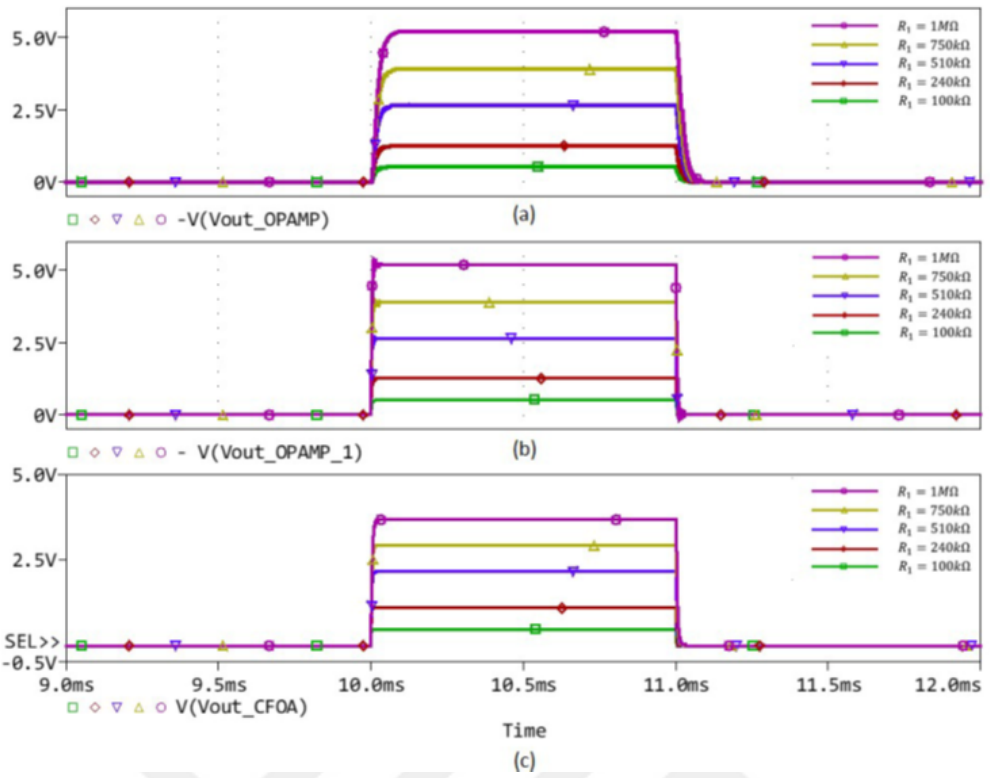
Opamp ve CFOA kullanarak oluşturulan TIA devreleri PSPICE benzetim ortamında incelenmiştir. Burada kazanç direnci belirlenmesi ve frekans karakteristiği analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.5.1 Kazanç Direnci

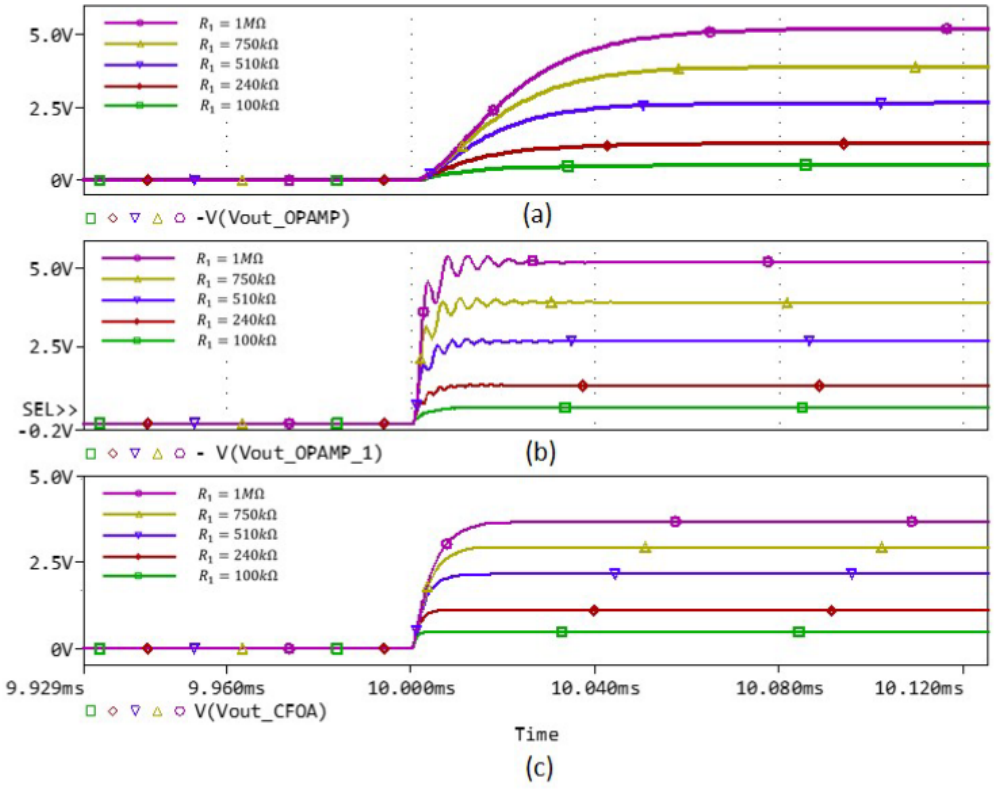
Benzetim ortamında ilk önce kazanç direnci belirlenmesine yönelik çalışma gerçekleştirilmiştir. Verilen devrelerde R_2 = 2 kΩ, R_3 = 100 kΩ olacak şekilde seçilmiştir. R_1 direnci için sırasıyla 100 kΩ, 240 kΩ, 510 kΩ, 750 kΩ ve 1 MΩ dirençler kullanılarak PSPICE ortamında benzetimi ve deney ortamında testleri gerçekleştirilmiştir.

Deney ve benzetimin aynı giriş akımı ile yapılabilmesi için simülatörde devrenin girişine referans ölçüm cihazında giriş akımı olarak okunan 104 nA (±5%) uygulanmıştır.

Farklı R_1 dirençlerine göre çıkış geriliminin değişiminin benzetim sonuçları Şekil 3.7 ve 3.8'de verilmiştir. CFOA kullanılan devrede DC seviye meydana gelmektedir. Benzetim sonuçları DC seviye süzülerek elde edilmiştir.



Şekil 3.7 Zaman domeni benzetim sonuçları (tam darbe) (a) geribesleme kapasitörlü Opamp TIA (b) geribesleme kapasitörsüz Opamp TIA (c) CFOA TIA



Şekil 3.8 Zaman domeni benzetim sonuçları (darbe başlangıcı) (a) geribesleme kapasitörlü Opamp TIA (b) geribesleme kapasitörsüz Opamp TIA (c) CFOA TIA

Şekil 3.7'de darbe formunda bir akım uygulandığında farklı kazanç dirençleri durumunda oluşan çıkış gerilimleri verilmiştir. Şekil 3.8'de ise aynı durumda oluşan çıkış gerilimi darbe formunun başlangıcı gösterilmektedir. Her iki grafikte de çıkış gerilimleri sırasıyla geri besleme kapasitörlü Opamp TIA, geri besleme kapasitörsüz Opamp TIA ve CFOA ile gerçekleştirilmiş TIA devresi olacak şekilde verilmiştir.

Geri besleme kapasitörünün kullanılmadığı Opamp devresinde darbe formunda bozulma olduğu görülmektedir. Burada kullanılan kazanç direnci değerleri ile deneysel ve ideal sonuçları içeren karşılaştırma Tablo 3.2'de verilmiştir.

3.5.2 Frekans Karakteristiği

TIA devrelerinin frekans karakteristiklerini elde etmek için PSPICE programında benzetimler gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetimlerde farklı kazanç direnci değerleri için elde edilen kesim frekansı değerleri incelenmiştir. Verilen devrelerin frekans karakteristikleri Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11'de verilmiştir. TIA devrelerinin farklı kazanç direnci değerleri için köşe frekans değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

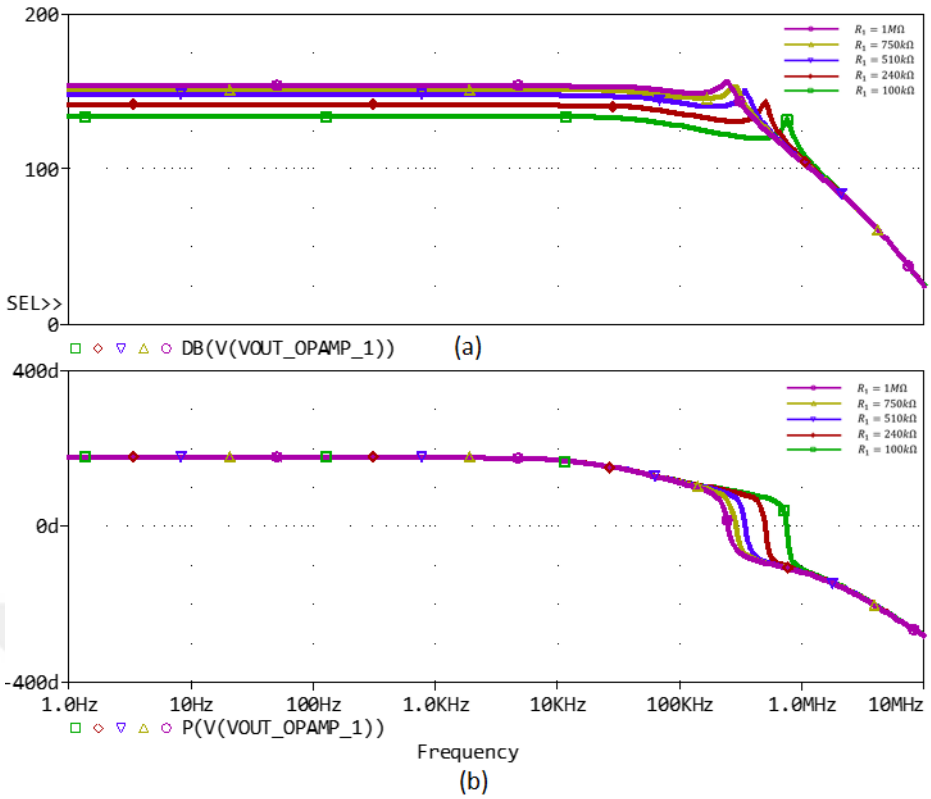
Tablo 3.1 Kazanç direnci - kesim frekansı karşılaştırması

Kazanç Direnci (Ω)	GB Kapasitörsüz Opamp TIA	GB Kapasitörlü Opamp TIA	CFOA TIA
100 k	58.8 kHz	12.5 kHz	194.5 kHz
240 k	60.5 kHz	12.1 kHz	112.4 kHz
510 k	62.6 kHz	11.0 kHz	63.2 kHz
750 k	66.7 kHz	10.0 kHz	46.5 kHz
1 M	69.8 kHz	8.9 kHz	37.9 kHz

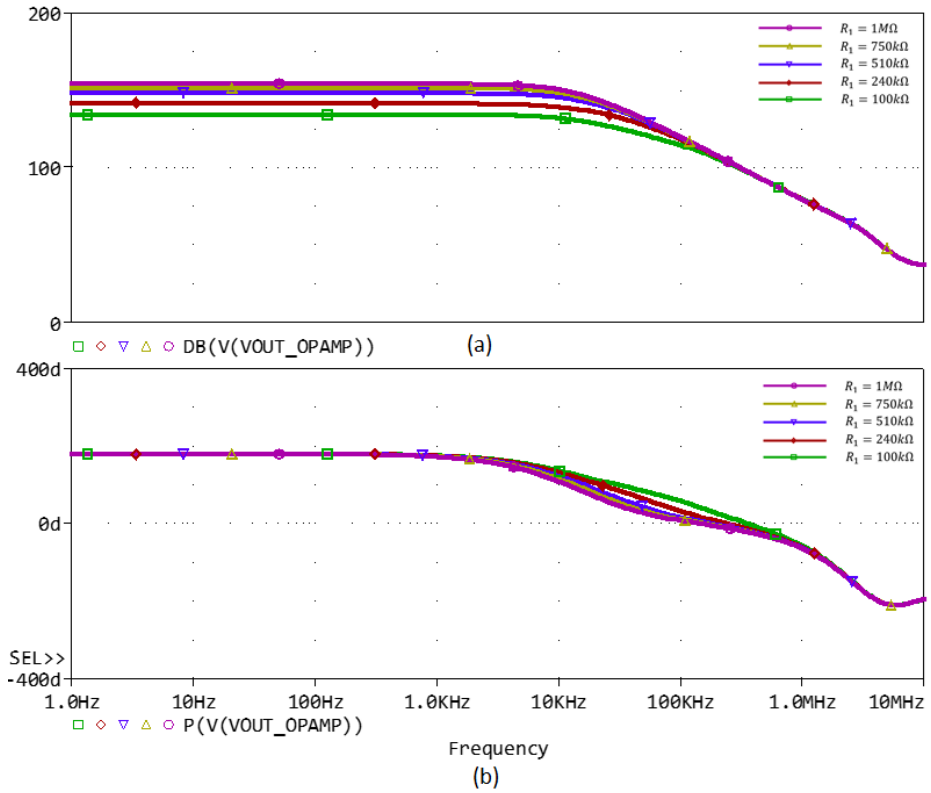
Opamp geribesleme hattına atılan kapasitörün frekans yanıtında meydana gelen bozulmayı giderdiği ancak kesim frekansını değerini düşürdüğü görülmektedir. CFOA TIA devresi ise düşük kazanç değerlerinde Opamp devresine göre daha yüksek bant genişliği sunmaktadır. Kazanç değeri arttıkça kesim frekansı değeri düşmektedir.

3.6 Deneysel Çalışma

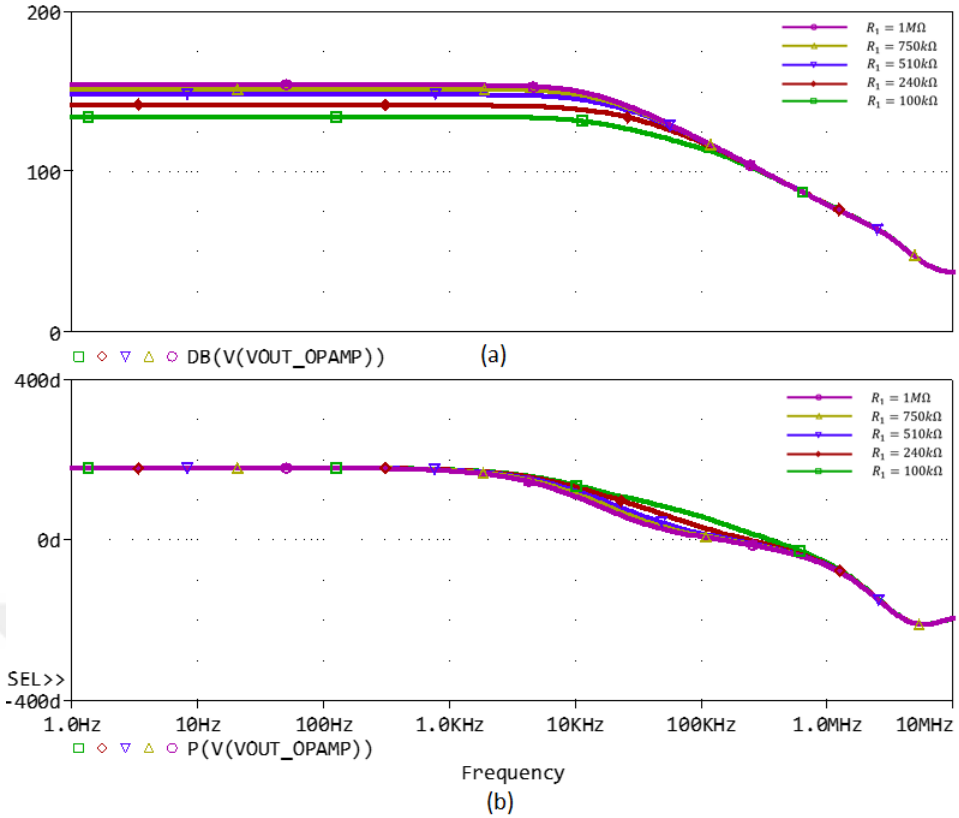
Bu bölümde öncelikle kuvvetlendiricinin kazanç direncindeki değişimin etkilerinin doğrusallığı deneysel olarak incelenmiştir. Bu ölçümler sonucunda devrelerin doğrusal çalışma aralığında çalışabilmesi için uygun kazanç direnci değeri belirlenmiştir. Daha sonra oluşturulan devreler, endüstride partikül sayımı, akış sitometrisi ve duman algılama amacıyla kullanılan fotoelektrik hücreli aerosol ölçüm sistemi üzerinde deneysel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.9 Geribesleme kapasitörsüz Opamp TIA frekans Yanıtı (a) kazanç (dB) (b) faz



Şekil 3.10 Geribesleme kapasitörlü Opamp TIA frekans yanıtı (a) kazanç (dB) (b) faz



Şekil 3.11 CFOA TIA frekans yanıtı (a) kazanç (dB) (b) faz

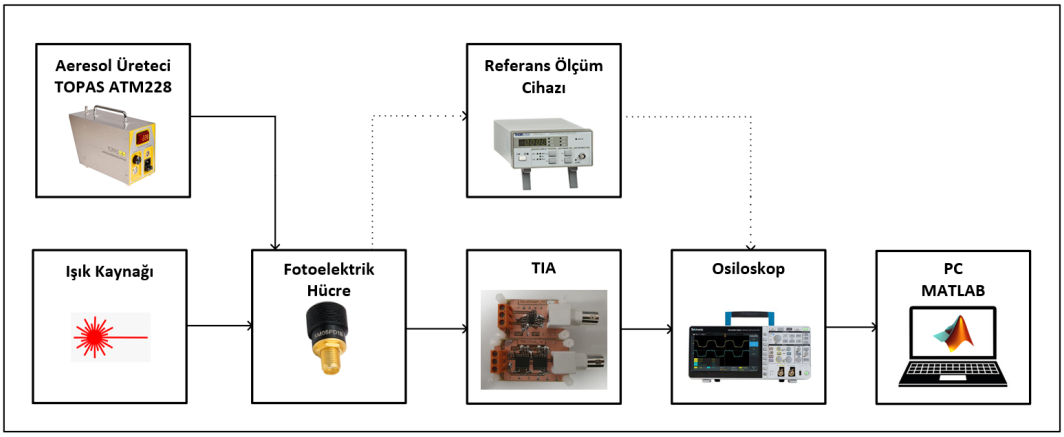
3.6.1 Deney Düzeneği

Deney sisteminin blok şeması Şekil 3.12'de verilmiştir. Fotoelektrik hücrede fotodiyot akımının sabit tutulması, farklı kademelerde aerosol jeneratörü [43] kullanılarak sağlanmıştır. Böylece testler tekrarlanabilir ve yeniden üretilebilir bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

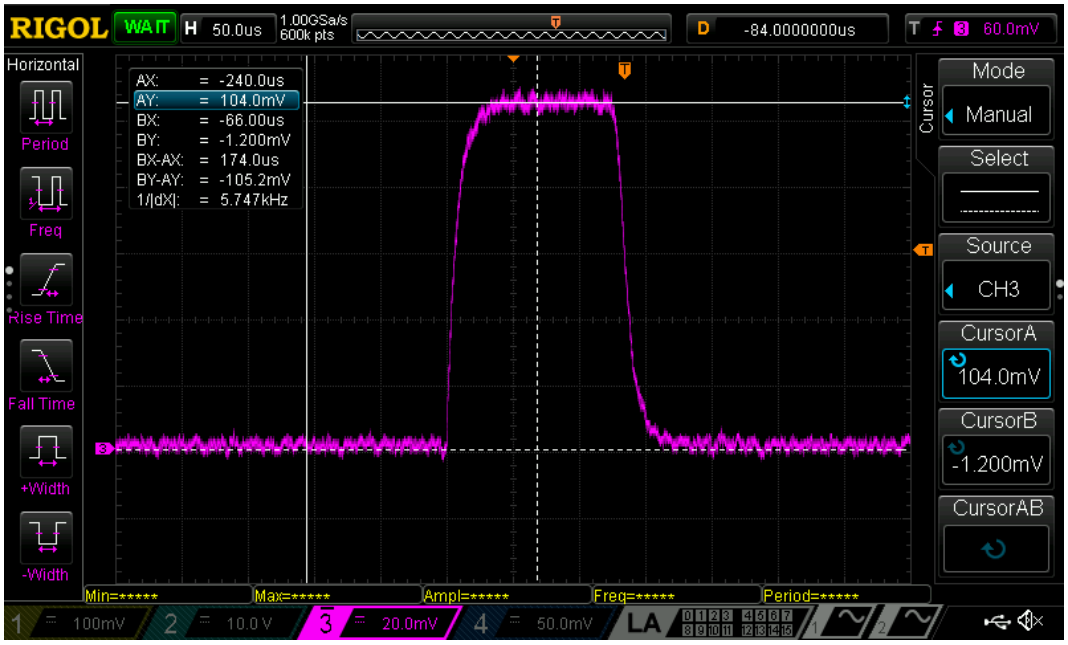
Deney sisteminde gerçekleştirilen deneyler standartlara uygun malzemelerle gerçekleştirilmiştir. Deneylerde aeresol kaynak malzemesi olarak EN54-7 standardına uygun olacak şekilde parafin yağı kullanılmıştır [53].

3.6.2 Deney Sonuçları

Deneysel çalışmada referans fotodiyot ölçüm cihazından 104 mV değeri okunmuştur. Cihazın ilgili kazanç kademesinde bu gerilim değeri 104 nA giriş akımı değerine karşılık gelmektedir. Deneysel çalışmada bu değerin elde edilmesinden dolayı benzetim sonuçları ve teorik hesaplamada yer alan sonuçlar 104 nA giriş akımı için elde edilmiştir. Referans cihaz ölçüm sonucu osiloskop görüntüsü Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.12 Deney düzeneği blok şeması



Şekil 3.13 Referans cihaz ölçüm sonucu

Kazanç direncinin çıkış gerilimine etkisinin deneysel sonuçları, benzetim sonuçları ve teorik hesaplamaları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Kazanç direnci – çıkış gerilimi tablosu

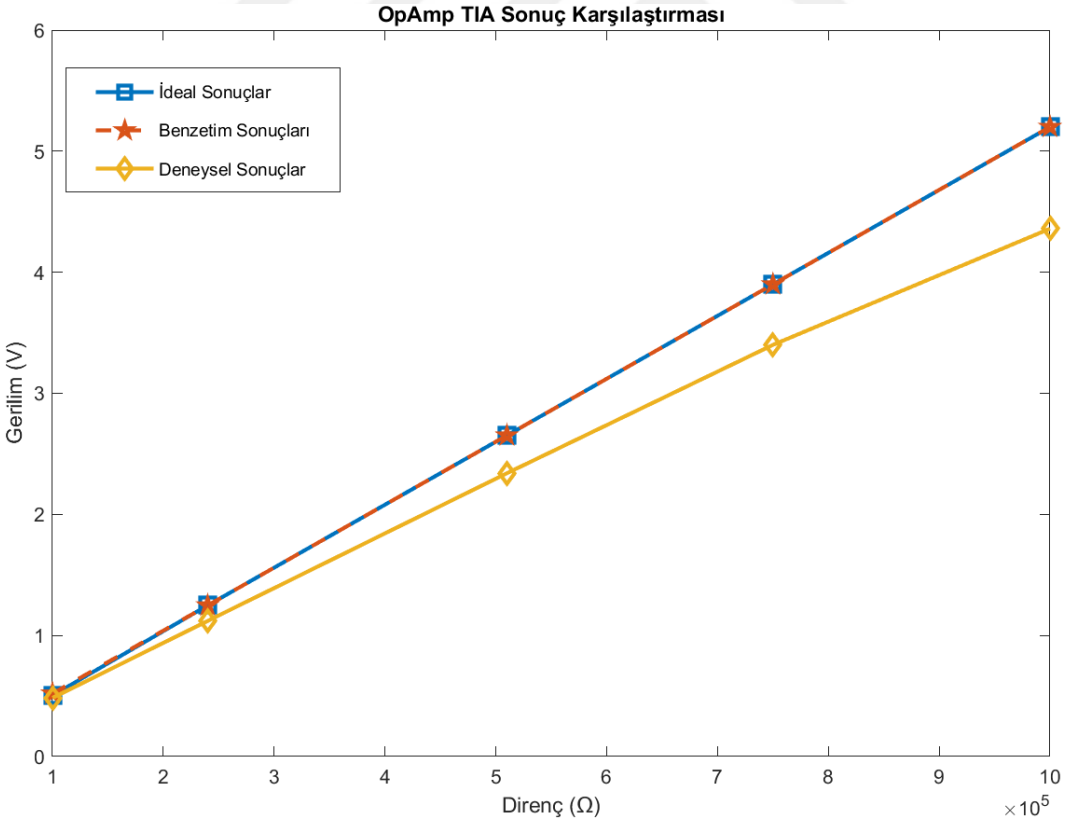
Giriş Akımı	R_1 (Ω)	Çıkış Gerilimi (V)				
		Teorik Hesap	Benzetim		Deney	
			CFOA	Opamp	CFOA	Opamp
104 nA	100 k	0.504	0.472	0.520	0.472	0.484
	240 k	1.248	1.084	1.248	1.110	1.120
	510k	2.652	2.126	2.652	2.180	2.340
	750 k	3.900	2.926	3.900	2.940	3.400
	1 M	5.200	3.658	5.200	3.800	4.360

Bu sonuçlara göre CFOA ile gerçekleştirilen devrenin kazanca göre doğrusallığının bozulduğu görülmektedir. Elde edilen benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar birbiri ile örtüşmektedir. CFOA aktif elemanı için yapılan çalışmada benzetim ve deneysel sonuçlar örtüşmektedir.

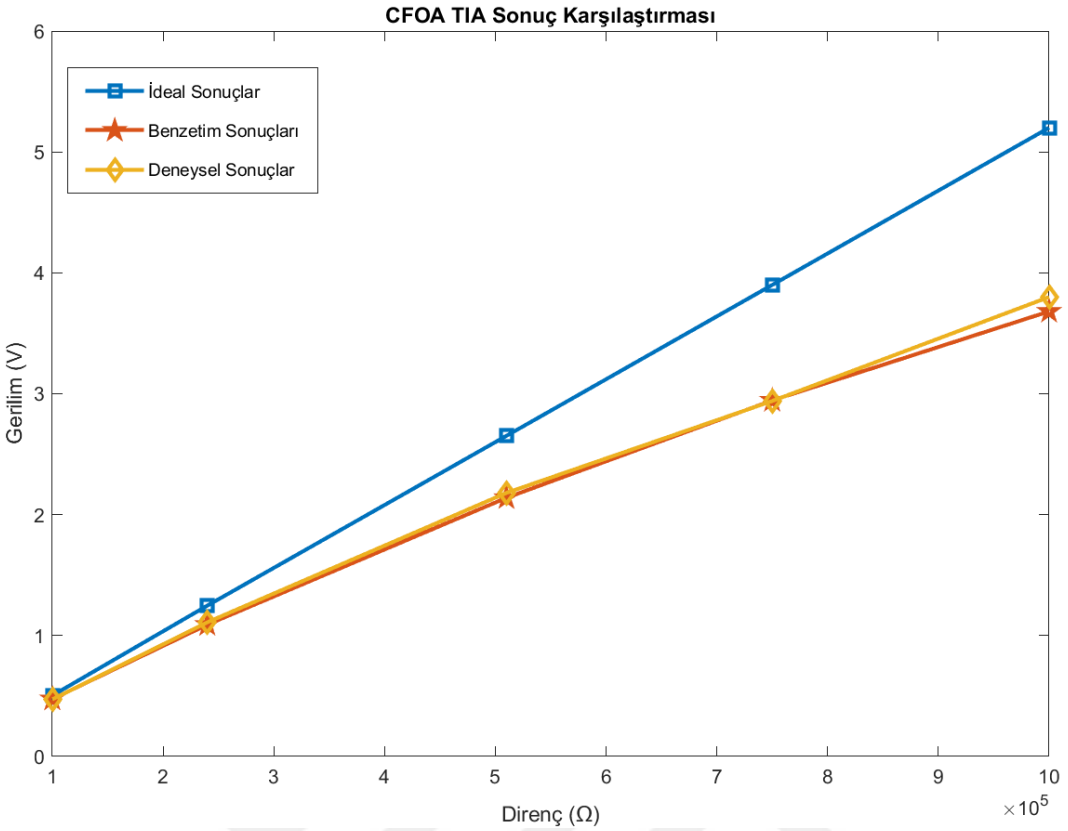
Opamp'lı devrenin sonuçlarına baktığımızda ise teorik ve benzetim sonuçlarının örtüştüğü görülmektedir. Teorik sonuçların deneysel ve benzetim sonuçlarından farklı çıkması, aktif elemanların iç parazitik bileşenlerinden dolayı doğrusallığının bozulmasından kaynaklı olmaktadır.

Deneysel sonuçların benzetim sonuçlarından farklı olmasının nedeni ise benzetim ortamında kullanılan makro modelin doğruluğu ile alakalı olmaktadır. Sonuçlara bakıldığı zaman kazanç direnci değerinin artması devre çıkışının doğrusallığını bozmaktadır.

R_1 direnci elde edilen sonuçlara göre doğrusallık kriteri de göz önüne alınarak 510 kΩ seçilmiştir. Opamp kararlılığını arttırmak için C_f = 10 pF, C_2 = 100 pF seçilmiştir.



Şekil 3.14 Opamp TIA kazanç direnci sonuç karşılaştırması



Şekil 3.15 CFOA TIA kazanç direnci sonuç karşılaştırması

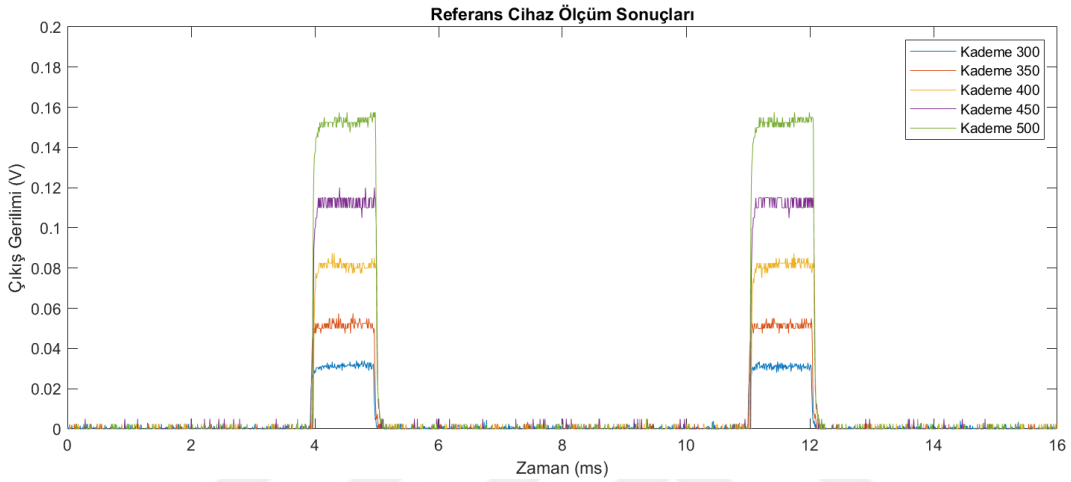
Kazanç direnci belirlendikten sonra devreler farklı akım değerlerinde test edilmiştir. Aerosol jeneratörünün farklı aşamalarında üretilen farklı aerosol yoğunlukları, fotoelektrik hücrede farklı akım değerleri üretmiştir. Aerosol yoğunlukları, aerosol üretecinin sırasıyla 300, 350, 400, 450 ve 500 basınç kademelerinde oluşturulmuştur.

Farklı aerosol yoğunluklarında üretilen sensör akımı öncelikle Thorlabs PDA200C referans ölçüm cihazı ile Tektronix TBS2000B osiloskop [54] üzerinde ölçülerek sonuçlar kaydedilmiştir. Osiloskop cihazından kaydedilen dalga formu bilgisayara aktarılmış ve elde edilen deney verileri MATLAB programında çizilmiştir. Deneyler sırasında fotoelektrik hücredeki ışık kaynağı 1 ms darbe genişliğinde çalıştırılmıştır. Aerosol analizi açısından deney setinde 1 ms boyunca yaklaşık 20 aerosol bulutunun örneklenmesi mümkündür. Böylece daha fazla sayıda parçacığın analizi mümkün olur.

Ölçülen değerlere karşılık gelen akım değerleri cihazın kademe kazancına göre hesaplanmış ve Tablo 3.3'te verilmiştir. Ölçüm değerleri ±5% hata payı içermektedir. Referans cihaz çıkış gerilimi grafiği Şekil 3.16'da verilmiştir.

Tablo 3.3 Test devreleri ölçüm sonuçları

Cihaz Basınç Kademesi	Ölçülen Gerilim (mV)	Hesaplanan Akım (nA)
300	30	30 ± 1.5
350	50	50 ± 2.5
400	80	80 ± 4
450	110	110 ± 5.5
500	150	150 ± 7.5



Şekil 3.16 Referans ölçüm cihazı sonuçları

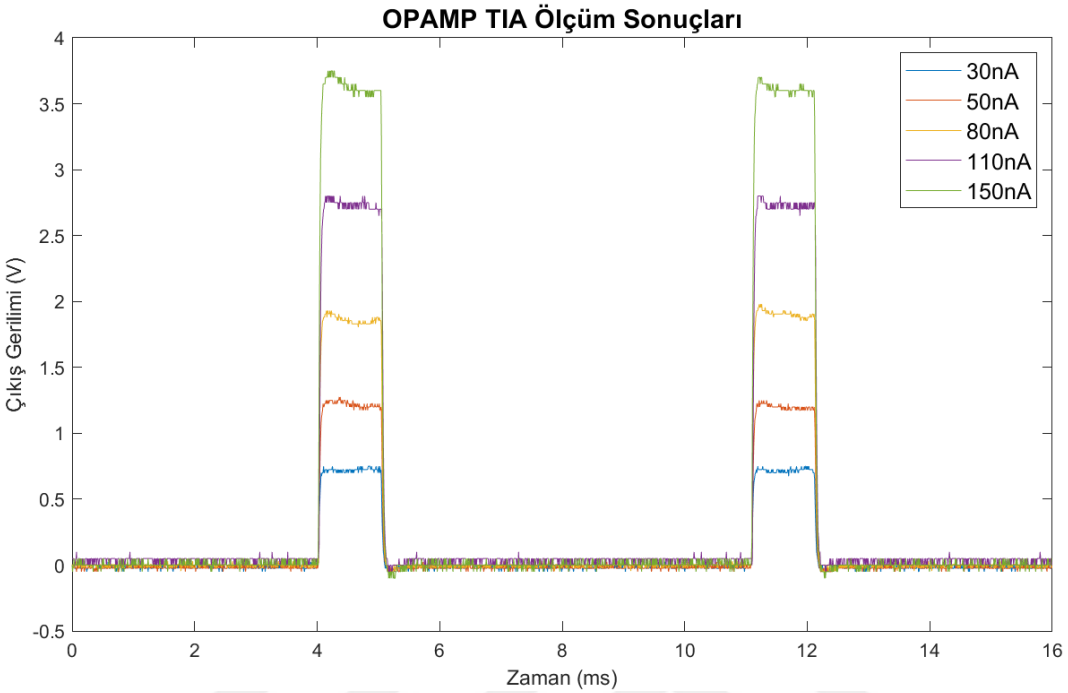
Hücreye uygulanan akım değerleri ölçüldükten sonra fotodiyotun akım çıkışı CFOA ile Opamp aktif elemanlı TIA devrelerine sırasıyla uygulanmış ve osiloskop üzerinden sonuçlar kaydedilmiştir. Ölçülen sinyallerde DC seviye bulunmaktadır. Deneysel çalışmalarda üretilen darbe formunun genliği ölçülmek istenildiği için ölçümler AC kuplaj olarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel sonuçlarda elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 3.4'te verilmiştir. Opamp'lı devrede çıkış sinyali negatif genliklidir. Opamp sinyal polaritesi ölçümlerde evirilerek pozitif genlikli olacak şekilde elde edilmiştir.

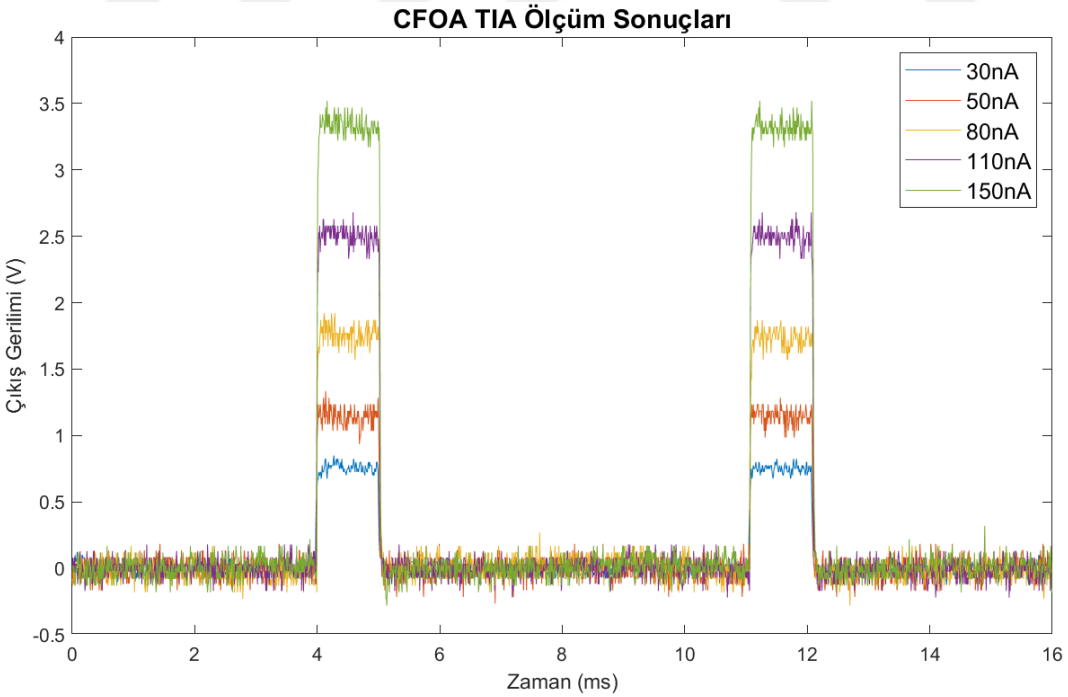
Tablo 3.4 Test devreleri ölçüm sonuçları

Akım Değeri (nA)	Ölçülen Gerilim (V)	
	CFOA	Opamp
30	0.77	0.7
50	1.18	1.22
80	1.77	1.85
110	2.53	2.75
150	3.32	3.55

Deneysel çalışmada ölçülen TIA devreleri çıkış sinyalleri MATLAB programında çizdirilmiştir. Şekil 3.17 Opamp TIA devresinin çıkış geriliminin grafiğini, Şekil 3.18 ise CFOA TIA devresinin çıkış geriliminin grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.17 Opamp TIA ölçüm sonuçları



Şekil 3.18 CFOA TIA ölçüm sonuçları

3.7 Bölüm Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde yer alan çalışmada, aerosol üreteci tarafından oluşturulan aerosol uygulanarak fotoelektrik hücrede üretilen fotodiyotun nA mertebesindeki sabit akımı, CFOA ve Opamp TIA devrelerine eşit kazanç değerleri ile kaydedilmiştir. Bu çalışmada önerilen CFOA kullanan TIA devresi CFOA ve CCII kullanılarak amplifikatör devreleri ve temel analog devre yapıları aracılığıyla elde edilmiştir. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için devrelerin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Sensör akımı bir referans cihazı ile ölçülmüş ve sensör akımı hata payı dahilinde hesaplanmıştır. Elde edilen test sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tüm deneyler, endüstrinin kabul ettiği standartlara uygun bir fiziksel ölçüm düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada önerilen TIA devresi endüstride parçacık sayımı, akış sitometrisi ve duman algılama amacıyla kullanılabilir.

Yapılar ışık saçılımı ilkesi kullanan endüstriye uygun bir sistemde test edilmiştir. Işık saçılımı ilkesine dayanan cihaz ve sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada sinyal işleme açısından yüksek dönüş hızı ve bant genişliğine sahip devreler ön plana çıkmaktadır. Opamp'lı yapılar uzun yıllardır sinyal işleme açısından ön plandadır ancak hızlı uygulamalarda bant genişliği gibi kısıtlamalar yüzünden kompanze edilmesi gerekmektedir. Akım geri beslemeli yapılar ise neredeyse kazançtan bağımsız bant genişliği, yüksek dönüş hızı gibi avantajlara sahip olması nedeniyle sinyal işlemede son yıllarda ön plana çıkmıştır. Bu çalışmada asıl amaç pek çok amaç için kullanılan bir sistemde iki devre yapısını aynı şartlarda karşılaştırmaktır.

CFOA ile gerçekleştirilen devre yapısında geri besleme kondansatörü ve geri besleme direnci kullanılmamaktadır. Bu nedenle bant genişliğini sınırlayan herhangi bir faktör yoktur. Bu formda CFOA TIA devresi ile geribeslemeli Opamp TIA devresi pratik bir deney ortamında karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile CFOA TIA devre yapısının klasik Opamp devre yapısına alternatif olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Aynı devre konfigürasyonunda CFOA ile Opamp arasında %10'dan az sapma vardır. AD844, CFOA TIA yapısında ticari bir ürün olarak kullanılmıştır. Burada gelişen CMOS teknolojisi kullanılarak daha iyi sonuçlar elde etmek mümkündür.

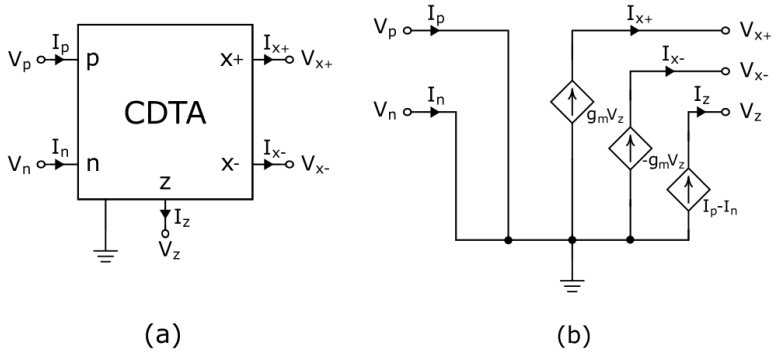
4
CDTA AKTİF ELEMANI KULLANARAK GERÇEKLENEN TIA TASARIMI

Bu bölümde Farksal Akımlı Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (Current Differencing Transconductance Amplifier, CDTA) aktif elemanı ile bir geçiş empedans modlu devre tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapı benzetim ortamında ve deneysel olarak test edilmiştir.

4.1 CDTA Aktif Elemanı

Akım taşıyıcılar, akım kuvvetlendiriler ve OTA aktif elemanı gibi akım modlu yapıların, geleneksel gerilim modlu kuvvetlendiricilerden daha iyi bir dinamik aralığa ve kapalı döngü bant genişliği performansına sahip olduğu görülmektedir. CDTA aktif elemanı da akım modlu bir aktif elemandır. CDTA aktif elemanının giriş terminalleri düşük empedanslı, çıkış terminali ise yüksek empedanslıdır. Bu özelliği sayesinde uygulamalarda ek aktif elemana ihtiyaç duyulmadan kaskad bağlamak mümkün olmaktadır [55].

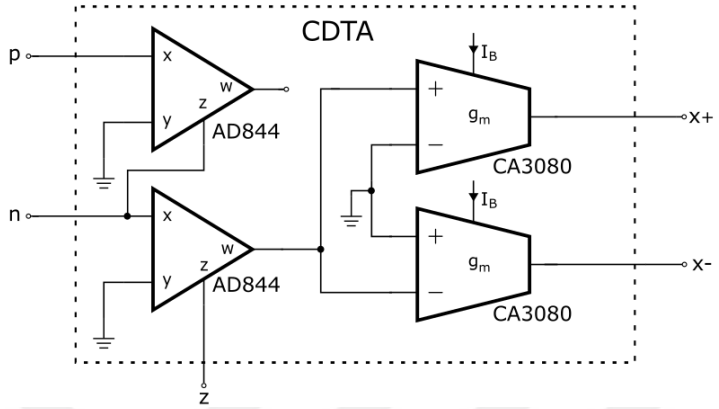
CDTA aktif elemanı ve ideal devre yapısı Şekil 4.1'de verildiği gibidir [56]. Tanım bağıntısı Denklem (4.1)'de verilmiştir. İfadede yer alan α_p ve α_n ifadeleri akım kazancı ifadeleridir. İdealde α_p = α_n = 1'dir.



Şekil 4.1 CDTA (a) devre sembolü (b) ideal iç yapısı [56]

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ I_z \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_p & -\alpha_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ V_x \\ V_z \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

CDTA aktif elemanının ticari olarak bulunabilen tümdevrelerle gerçekleştirilmiş hali Şekil 4.2'de verilmiştir [57]. Verilen yapıda OTA elemanı olarak CA3080 [58] tümdevresi kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan yapıda ise LM13700 OTA tümdevresi [59] kullanılmıştır. Devre çıkışında negatif ve pozitif polariteli akım çıkışı elde edilebilecek şekilde bağlantılar düzenlenmiştir.

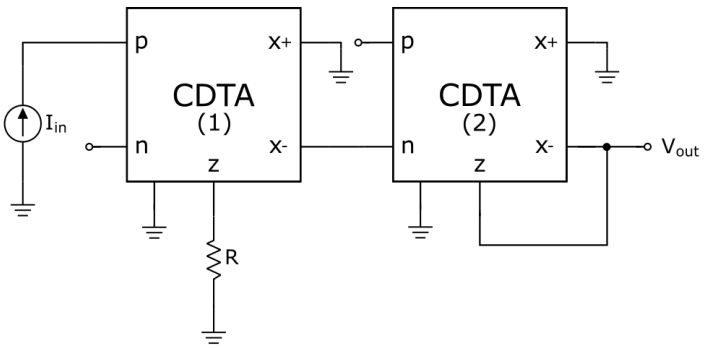


Şekil 4.2 Ticari tümdevreler ile CDTA gerçeklemesi [57]

4.2 CDTA Aktif Elemanı Kullanılarak Gerçeklenen TIA Tasarımı

Bu bölümde CDTA aktif elemanı ile tasarlanan TIA devre yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir. Tasarlanan yapı iki adet CDTA elemanının kaskad bağlanması sonucu elde edilmiştir.

Devrede sadece bir adet pasif eleman bulunmaktadır. İlk kat giriş akımını kuvvetlendirip ikinci kata aktarmaktadır. İkinci katta ise CDTA aktif elemanının geçiş iletkenliği parametresi ile geçiş empedans kazancı pasif eleman olmadan sağlanmaktadır.



Şekil 4.3 Önerilen CDTA aktif elemanı kullanılarak gerçeklenen TIA devresi

Devrenin çıkış ifadesi bağıntısı Denklem (4.2-4.10) arasında elde edilmiştir. Buna göre çıkış gerilimi, R direnci ve kullanılan CDTA aktif elemanlarının geçiş iletkenliğine bağlıdır. Böylece R direnci yanı sıra geçiş iletkenlikleri üzerinden geçiş empedans kazancını değiştirmek mümkün olmaktadır. Bu denklemlerde verilen g_{m1} ve g_{m2} ifadeleri CDTA aktif elemanların geçiş iletkenleridir.

$$i_{z_1} = i_{in} \tag{4.2}$$

$$v_{z_1} = i_{in}.R \tag{4.3}$$

$$i_{x_1} = g_{m_1}.v_{z_1} \tag{4.4}$$

$$i_{x_1} = g_{m_1}.i_{in}.R \tag{4.5}$$

$$i_{z_2} = g_{m_1}.R.i_{in} \tag{4.6}$$

$$v_{z_2} = v_{out} \tag{4.7}$$

$$i_{x_2} = i_{z_2} = v_{out}.g_{m_2} \tag{4.8}$$

$$v_{out}.g_{m2} = g_{m_1}.R.i_{in} \tag{4.9}$$

$$v_{out} = \frac{g_{m_1}}{g_{m_2}} R.i_{in} \tag{4.10}$$

CDTA TIA devresinin pasif eleman duyarlılığı R direnç elemanı üzerinden incelenmiştir. Elde edilen duyarlılık değerleri Denklem (4.11)'da verilmiştir.

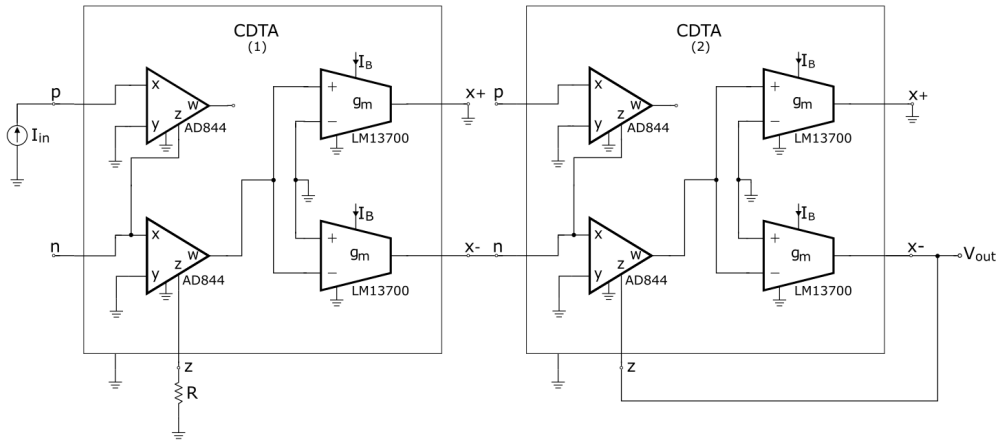
$$S_R^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial R} \frac{R}{V_{out}} = 1 \tag{4.11}$$

TIA devresinin pasif eleman duyarlılık değerleri [-1,1] aralığındadır. Devrenin pasif eleman duyarlılığının düşük olduğu görülmektedir.

4.3 Benzetim Sonuçları

Tasarlanan devre yapısı AD844 ve LM13700 ticari tümdevreleri ile gerçekleştirilmiştir. Devre ilk önce benzetim ortamında daha sonra deneysel olarak incelenmiştir. Ticari tümdevrelerle oluşturulan yapı Şekil 4.4'te verildiği gibidir.

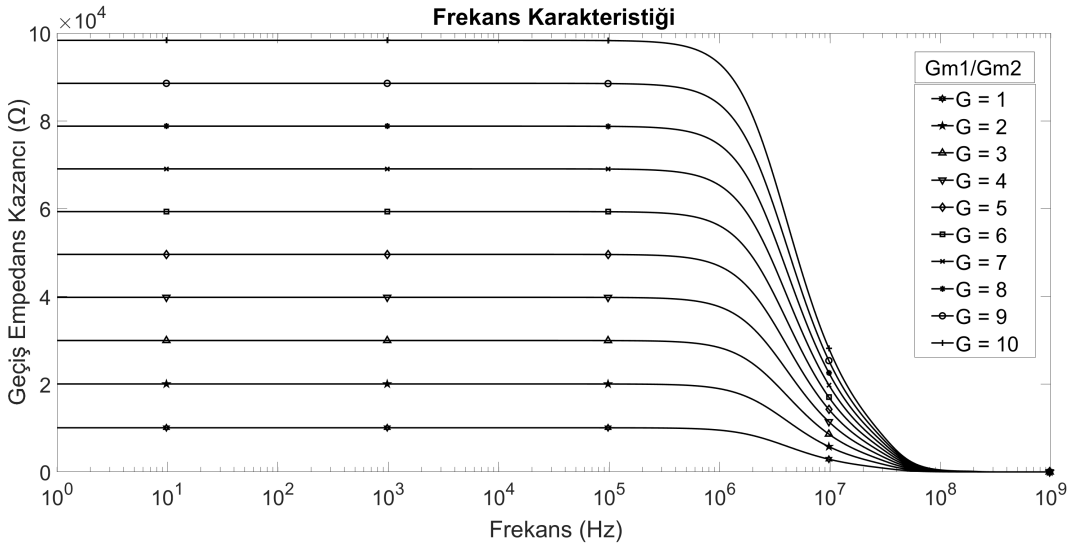
Devrenin benzetimi PSPICE ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında devrenin frekans ve zaman domeni analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4 Ticari tümdevrelerle gerçeklenmiş CDTA TIA devresi

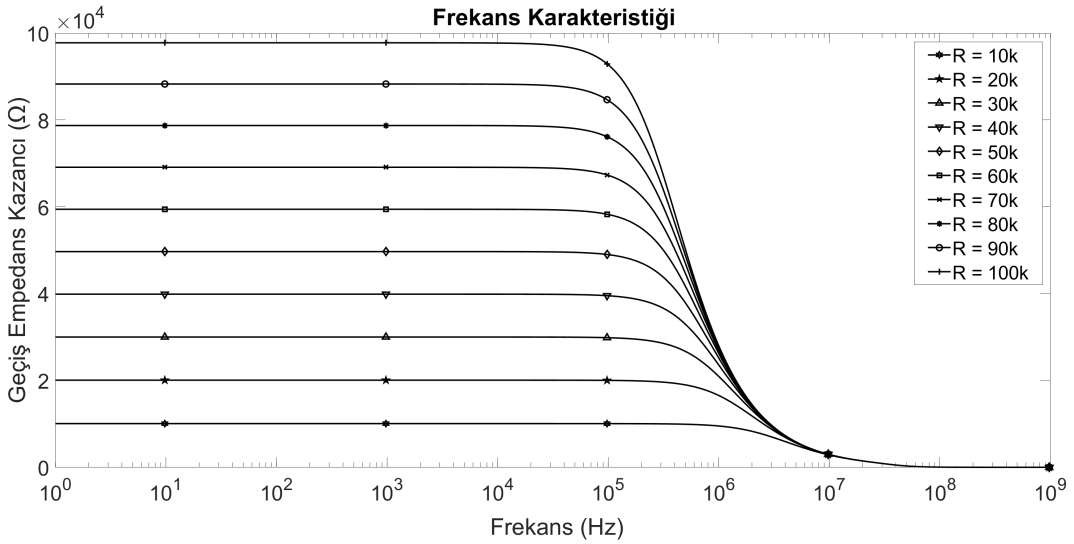
4.3.1 Frekans Yanıtı

Geçiş empedans modlu devrede frekans yanıtı karakteristiği, geçiş iletkenlikleri oranı ve R direncinin değişimine göre iki farklı parametrede incelenmiştir. Her iki durumda da toplam kazanç eşit olacak şekilde inceleme yapılmıştır. Sabit kazanç direnci koşulunda iki farklı CDTA elemanının geçiş iletkenlik oranı parametresi değiştirilerek elde edilen kazanç eğrisi Şekil 4.5'te verilmiştir. Burada yapılan benzetimde ikinci CDTA elemanının geçiş iletkenliği sabit bırakılmış ve ilk CDTA elemanının geçiş iletkenliği değiştirilmiştir.



Şekil 4.5 Geçiş iletkenliği oranının değişimine göre elde edilen frekans yanıtı - kazanç grafiği

İkinci durumda ise iki CDTA aktif elemanın geçiş iletkenlik oranları sabit bırakılmış ve kazanç direnci değiştirilerek devre kazanç değeri incelenmiştir. Sabit geçiş iletkenliği oranında kazanç dirençlerinin değişimine göre elde edilen frekans yanıtı Şekil 4.6'da verildiği gibidir.

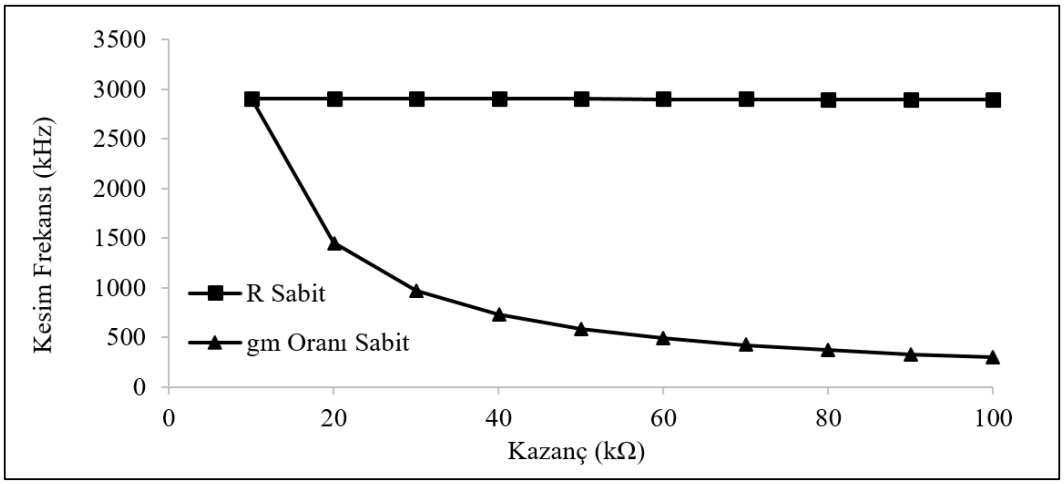


Şekil 4.6 Kazanç direnci değişimine göre elde edilen frekans yanıtı - kazanç grafiği

Tablo 4.1 Farklı değişkenlerin değişimine göre kazanç - kesim frekansı tablosu

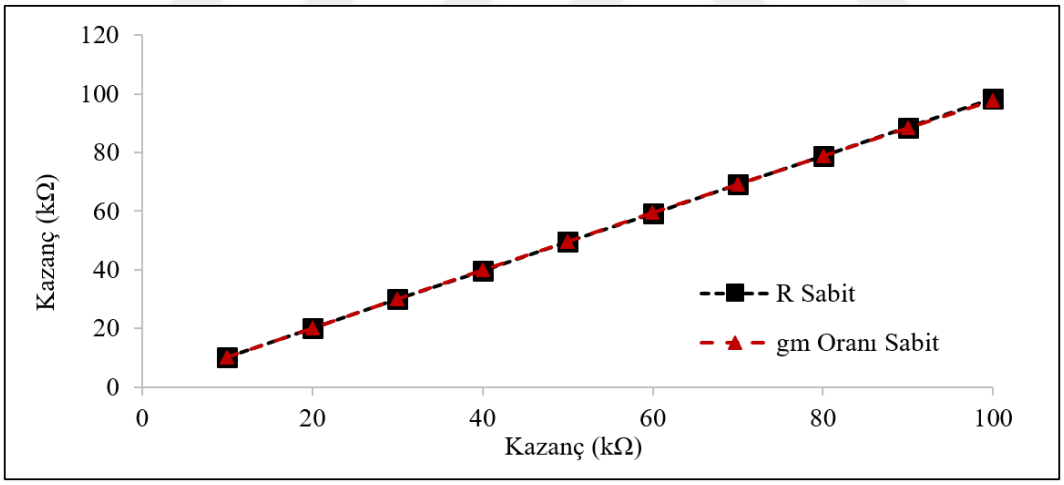
Kazanç Direnci Sabit (R = 10kΩ)			Geçiş İletkenliği Oranı Sabit (g_{m1}/g_{m2} = 1)		
g_{m1}/g_{m2}	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (kHz)	R (kΩ)	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (kHz)
1	10.07	2903.82	10	10.07	2903.82
2	20.05	2903.57	20	20.07	1454.00
3	29.96	2903.32	30	30.01	972.20
4	39.79	2903.06	40	39.88	731.46
5	49.58	2902.79	50	49.69	587.06
6	59.33	2902.50	60	59.43	490.81
7	69.07	2902.21	70	69.11	422.06
8	78.80	2901.89	80	78.72	370.50
9	88.56	2901.56	90	88.28	330.40
10	98.36	2901.21	100	97.77	298.32

Devrelerin frekans yanıtları incelendiğinde aynı geçiş empedans kazancı durumlarında kazanç direncinin değişimi devrenin kesim frekansı değerini düşürmektedir. Kazanç direncini sabit bırakarak geçiş iletkenliği oranıyla kazancı değiştirme durumunda ise kesim frekansı artan kazanca rağmen sabit kalmaktadır. Akım modlu yapıların kazanç - bant genişliği çarpımı Opamp aktif elemanında olduğu gibi sabit değildir. Kazanç artarken bant genişliği neredeyse sabit kalmaktadır. Bu benzetim çalışması artan kazanç değerlerinde bant genişliğinin sabit kaldığını göstermektedir. Direnç değişimi ve geçiş iletkenliği değişimi durumlarına göre elde edilen kazanç değerlerinde kesim frekanslarının değişim grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



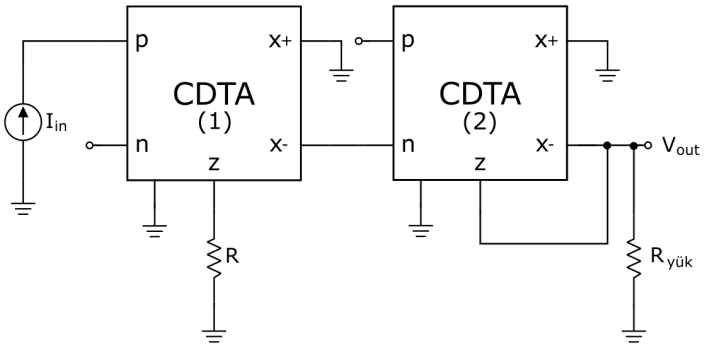
Şekil 4.7 Kazanca göre kesim frekanslarının değişimi

Devrenin kazanç değerlerinin matematiksel olarak hesaplanmış ideal kazanç değerlerine göre karşılaştırma grafiği Şekil 4.8'de verildiği gibidir. Burada x ekseni matematiksel olarak hesaplanmış ideal kazanç değerlerini y ekseni ise farklı parametrelerin değişimine göre frekans yanıtı benzetim sonuçlarında elde edilen kazanç değerlerini ifade etmektedir. Sonuçların düşük bir hata payı içerisinde ideal değere yakın olduğu görülmektedir.

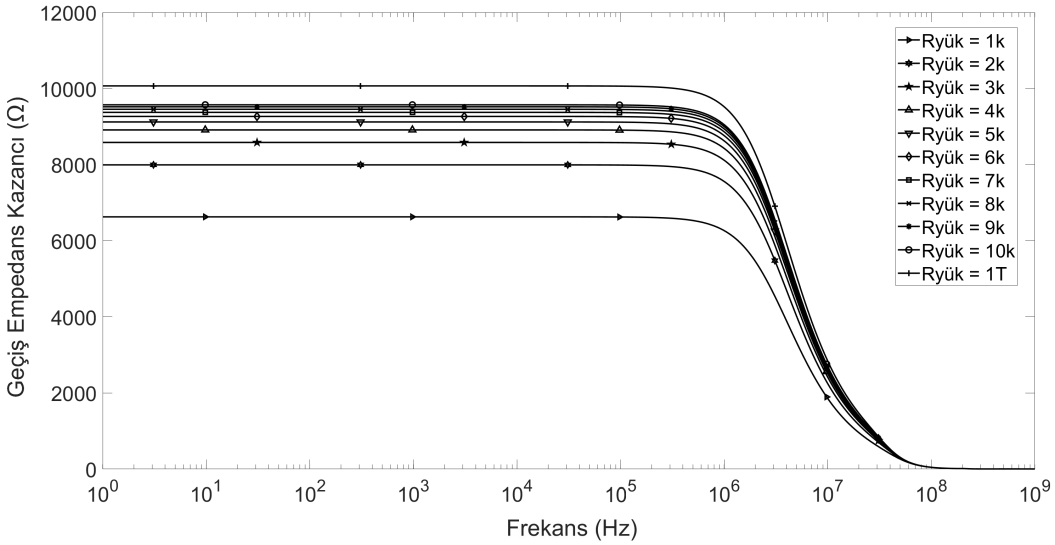


Şekil 4.8 Benzetim sonuçları karşılaştırma

Tasarlanan devrenin frekans karakteristiği çıkışa bağlanan yük direnci değişimine göre de incelenmiştir. CDTA aktif elemanının x terminali aynı zamanda çıkış geriliminin elde edildiği terminaldir. Çıkışa bağlanan yük direnci Şekil 4.9'da verilen devre şemasında gösterilmiştir. Çıkışa bağlanan yük durumunun $I_z = I_{x-}$ koşulunu etkilememesi gerekmektedir. Çıkışa bağlanan farklı yüklerde geçiş empedans kazancının değişimi grafiği Şekil 4.10'da verildiği gibidir. Burada farklı yük dirençleri altında kazanç değeri incelenmiştir. Açık devre durumunu benzetim için R_{yuk} = 1 TΩ koşulu kullanılmıştır.



Şekil 4.9 Yük direnci bağlı CDTA TIA

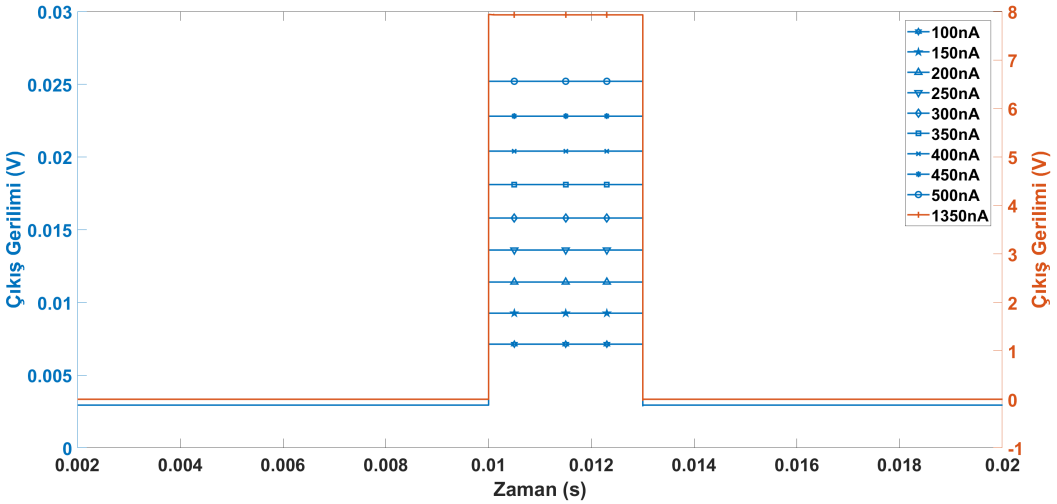


Şekil 4.10 Yük direnci değişimine göre değişen frekans yanıtı grafiği

Yük direnci değeri düştükçe yük direnci üzerinden geçen akım artmaktadır. Bu durum devrede verilen akım eşitliği durumunu bozmaktadır. Buna bağlı olarak kazanç değerinin düştüğü görülmektedir. Deneyler esnasında bu durumun etkilerini azaltmak için devre çıkışına, girişi yüksek çıkışı düşük empedanslı bir tampon devre uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucu R_1 direnci 10 kΩ olarak seçilmiştir.

4.3.2 Zaman Domeni Analizi

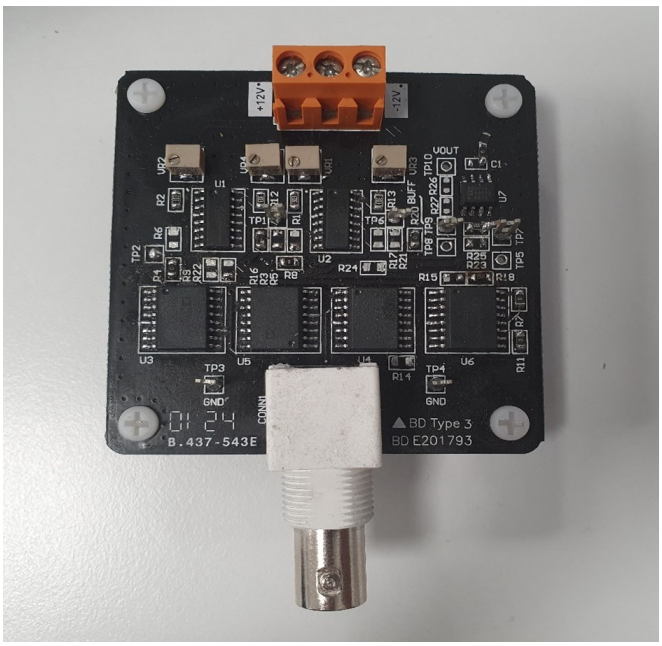
Frekans analizi yapıldıktan sonra devrenin darbe akım formu girişi durumunda çıkış gerilimi incelenmiştir. Girişe uygulanan farklı akım değerlerine karşılık oluşan çıkış gerilimi benzetim sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde belirli bir giriş akımı değerinden sonra çıkış geriliminin doyuma gittiği görülmektedir. Grafik çift y ekseni içerecek şekilde çizilmiştir.



Şekil 4.11 CDTA TIA devresi zaman domeni analiz sonucu

4.4 Deneysel Çalışma

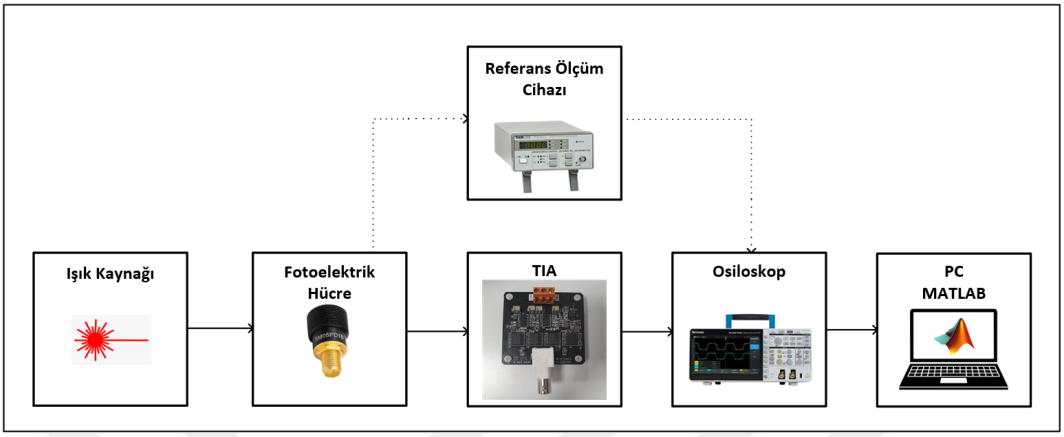
Deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için hazırlanan test kartı Şekil 4.12'de verilmiştir. Kartın girişine fotodiyotla uyumlu olan BNC konnektör yerleştirilmiştir. Devre ±12 V DC simetrik besleme ile çalışmaktadır. Devre üzerinde yer alan ayarlı dirençler sayesinde geçiş iletkenliği kuvvetlendiricilerinin besleme akımı değerleri ayarlanabilmektedir. Bu sayede farklı geçiş iletkenliği değerleri elde edilebilmektedir.



Şekil 4.12 CDTA TIA test kartı

Bu bölümde yer alan devrenin deneysel çalışmasını gerçekleştirmek üzere hazırlanan deney düzeneği Şekil 4.13'te verilmiştir. Bu bölümde yapılan deneylerde ışık gücü ölçüm hücresi kullanılmıştır.

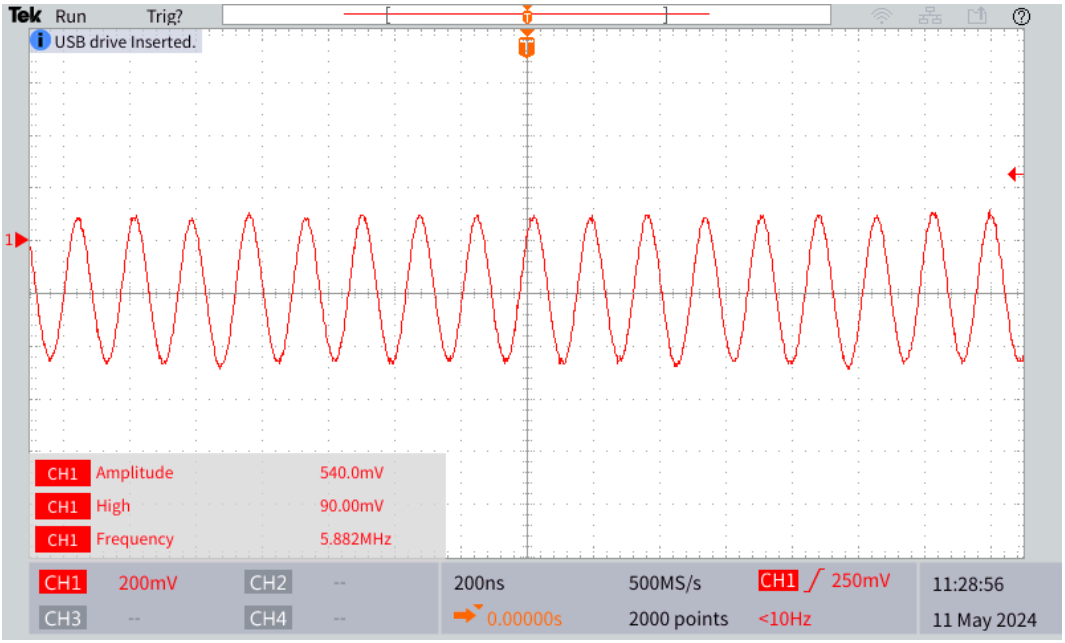
Farklı değerlerde sabit akım, her deneyde ışık kaynağının akımını değiştirerek elde edilmiştir. Fotodiyot akımı devreye uygulanmadan önce referans ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Sonrasında ölçülen akım değerleri devreye uygulanmıştır.



Şekil 4.13 Deney düzeneği blok şeması

4.4.1 Deney Sonuçları

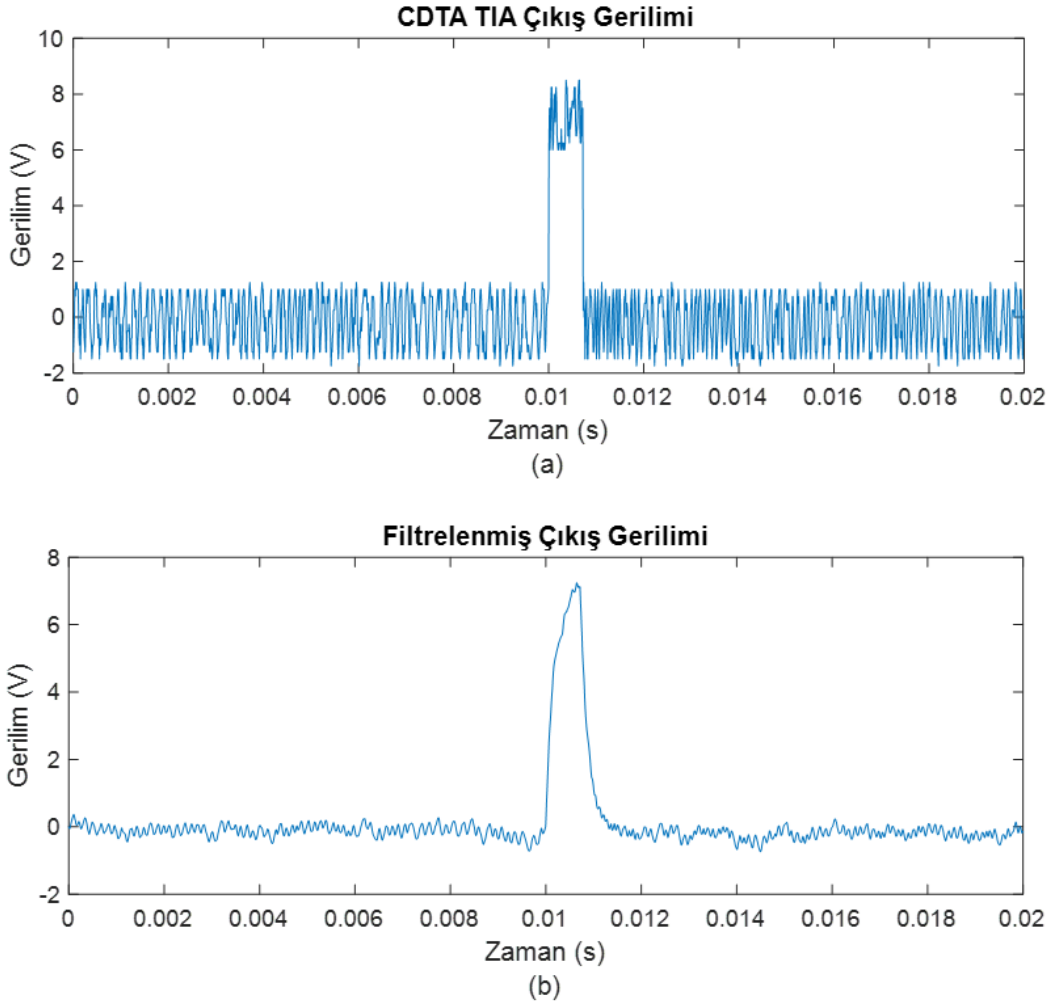
Deneysel çalışma kapsamında ilk önce devrenin girişine bir akım uygulanmadığı durum incelenmiştir ve çıkış geriliminde sabit genlik ve frekansta bir sinüs dalgası olduğu görülmüştür. Çıkış geriliminin gürültüsü Şekil 4.14'te verilmiştir. Gürültünün yaklaşık 5.9 MHz frekansında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.14 Çıkış gerilimi gürültüsü

Daha sonra devrenin girişine 100 μA giriş akımı uygulanmıştır. Bu giriş akımı değerinde çıkış geriliminin doyuma gittiği görülmektedir.

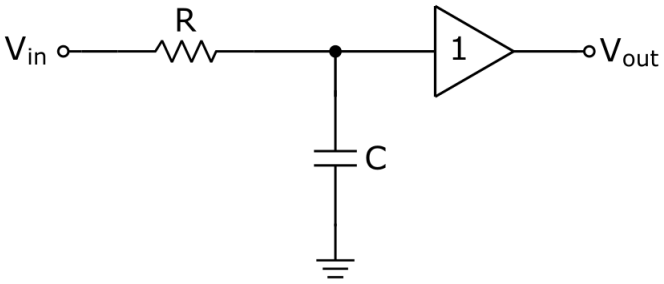
Düşük akım değeri ölçümleri devre çıkışında meydana gelen gürültüden dolayı okunamamaktadır. Devrenin bu şartlar altında kaydedilen çıkış gerilimi Şekil 4.15.(a)'da verilmiştir. Çıkış geriliminin doyumda ve gürültülü olduğu görülmektedir. MATLAB ile kaydedilen çıkış gerilimi dijital alçak geçiren filtre ile filtrelenmiş ve elde edilen sonuç Şekil 4.15.(b)'de verilmiştir.



Şekil 4.15 Çıkış gerilimi (a) filtrelenmemiş sinyal (b) filtrelenmiş sinyal

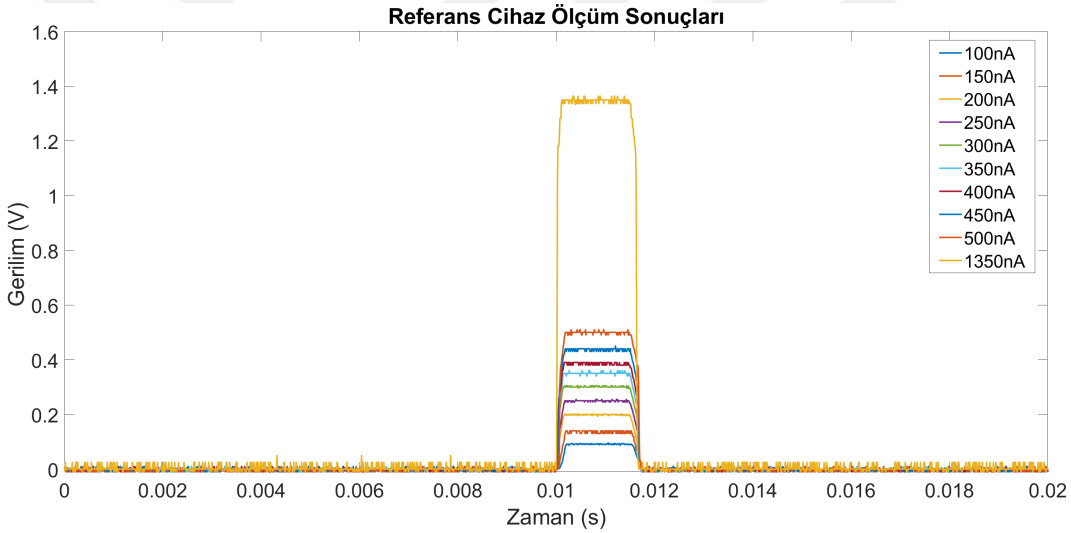
Çıkış gürültüsünü elimine etmek için çıkışa filtre devresi eklenerek devre revize edilmiştir. Ölçülen sinyale dijital alçak geçiren filtre uygulandığı zaman çıkış geriliminde görülen parazit sinyalin ayrıştırıldığı görülmektedir. Ölçümlerde istenmeyen sinyallerin filtrelenmesi için devrenin çıkışına pasif alçak geçiren filtre ve ölçüm sonuçlarının problardan etkilenmemesi için tampon devre eklenmiştir. Eklenen yapı Şekil 4.16'da verilmiştir.

Burada R = 10 kΩ ve C = 1 nF olacak şekilde bir alçak geçiren filtre yapısı oluşturulmuştur. Bu değerler ışık kaynağının sürme süresi göz önüne alınarak seçilmiştir.



Şekil 4.16 Alçak geçiren filtre yapısı

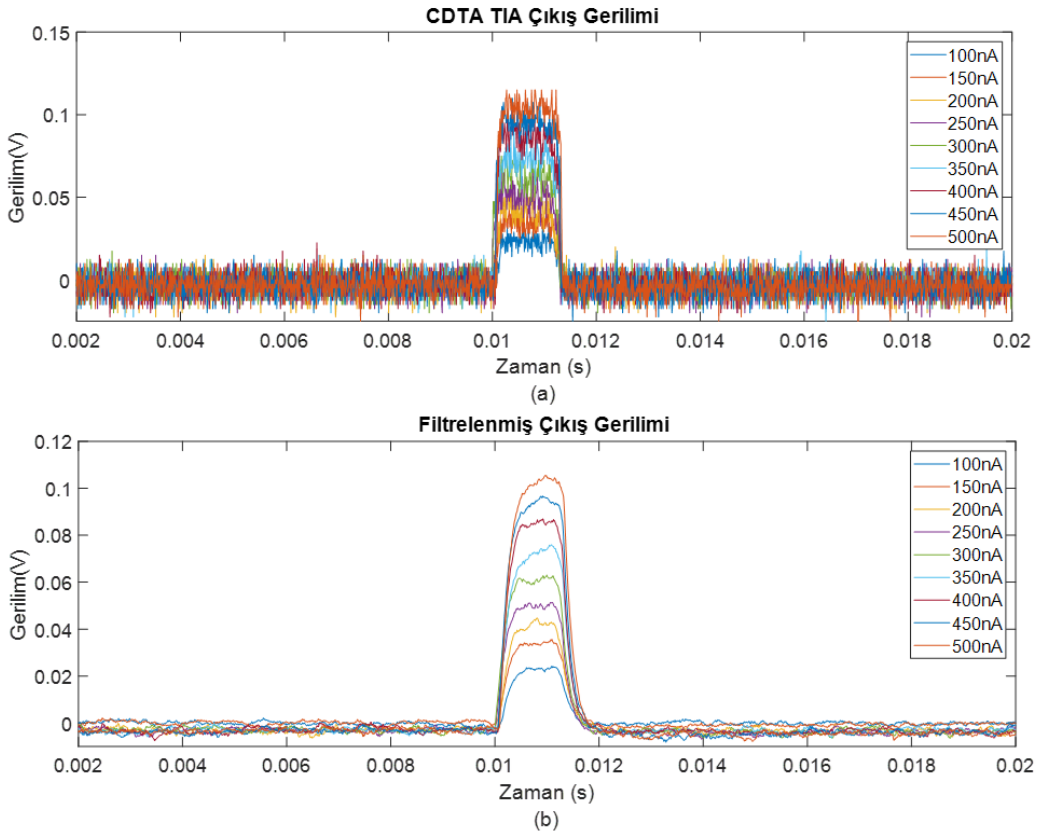
Deneyler sırasında giriş akımı değeri benzetim sonuçlarıyla aynı olacak şekilde ışık kaynağının sürme akımı değiştirilerek ayarlanmıştır. Akım değerleri referans ölçüm cihazı üzerinden ölçülmüş daha sonra devreye uygulanmıştır. Referans ölçüm cihazı sonuçları Şekil 4.17'de verilmiştir.



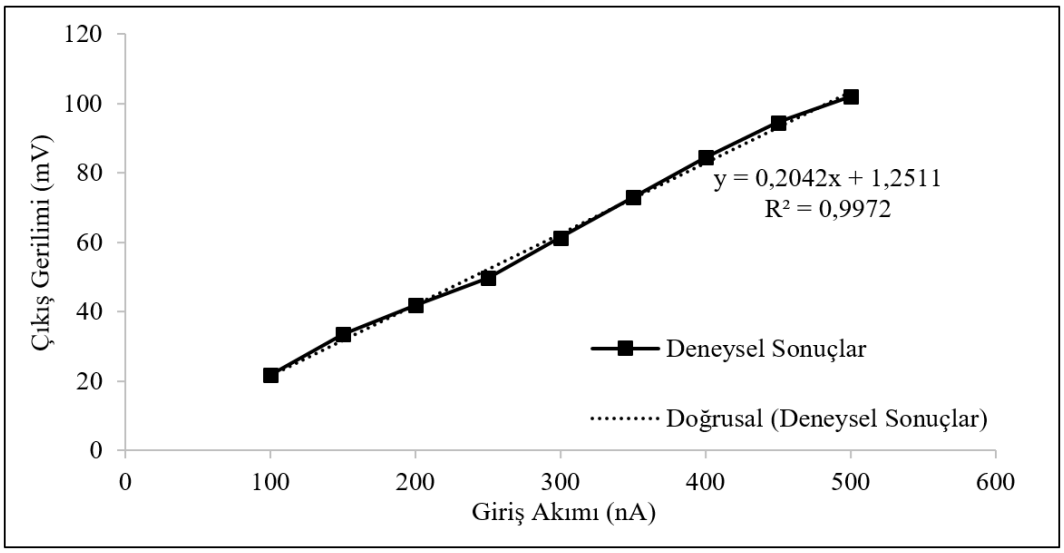
Şekil 4.17 Referans cihaz ölçüm sonuçları

Benzetim çalışmasında kullanılan giriş akımı değerleri ışık gücü değiştirilerek elde edilmiş ve sırasıyla TIA devresine uygulanmıştır. Her bir akım değeri için kaydedilen çıkış gerilimi değerleri MATLAB üzerinde çizdirilmiştir ve filtrelenmiştir. Çıkış geriliminin filtrelenmemiş ve filtrelenmiş sinyal grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir. Deney sonuçlarında devreye uygulanan giriş akımlarına karşılık elde edilen çıkış gerilimlerinin grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir. Akım ve gerilim arasındaki ilişki, grafikte doğrusal bir modelle temsil edilmiştir. Ölçüm hataları da göz önüne alındığında devrenin test edilen akım değerlerinde doğrusal davrandığı görülmektedir.

Devrenin deneysel sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırması Tablo 4.2'de verilmiştir. Burada deneysel sonuçların ve benzetim sonuçlarının kendi aralarında doğrusal olduğu görülmektedir. Ancak sonuçlar birbirleri ile örtüşmemektedir.



Şekil 4.18 CDTA TIA deneysel sonuçlar (a) filtrelenmemiş sinyal (b) filtrelenmiş sinyal



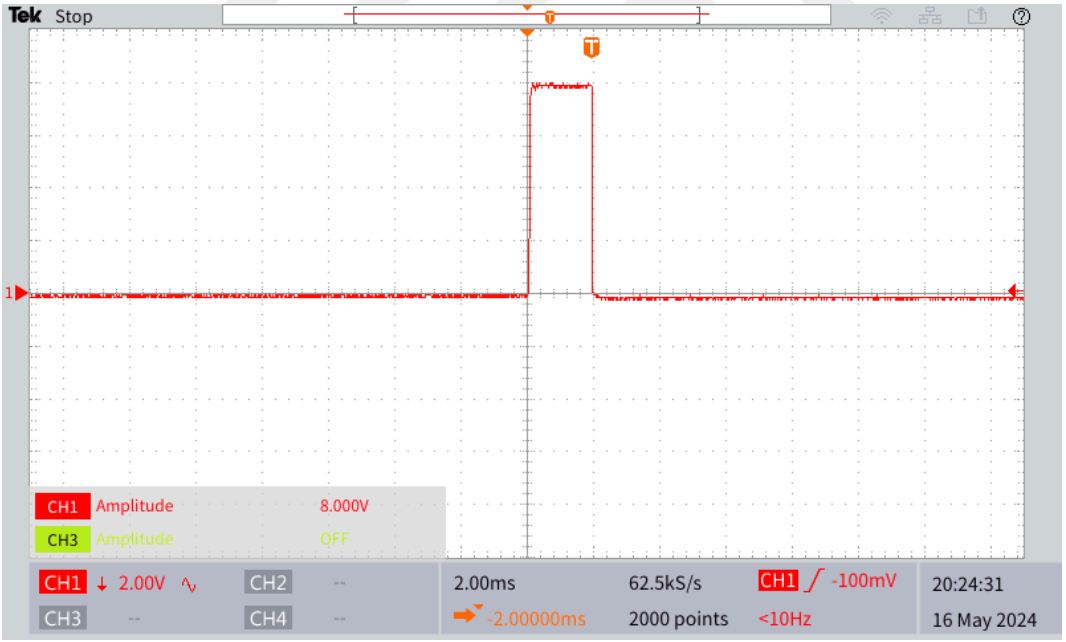
Şekil 4.19 Deneysel giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği

Deneysel çalışmada devre çıkış geriliminin beklenenden yüksek olduğu görülmüştür. Devre çıkışının belirli bir akım değerinden sonra doyuma gitmektedir. Deneysel çalışma ve benzetim sonuçlarında aynı akım değeri için devre çıkışının doyumda olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2 Deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırması

Giriş Akımı (nA)	Deneysel Sonuçlar (mV)	Benzetim Sonuçları (mV)	İdeal Sonuçlar (mV)
100	21.80	4.19	6.00
150	33.50	6.32	9.00
200	42.00	8.47	12.00
250	49.70	10.65	15.00
300	61.40	12.86	18.00
350	73.00	15.12	21.00
400	84.60	17.44	24.00
450	94.60	19.82	27.00
500	102.00	22.26	30.00
1350	8000.00	8000.00	81.00

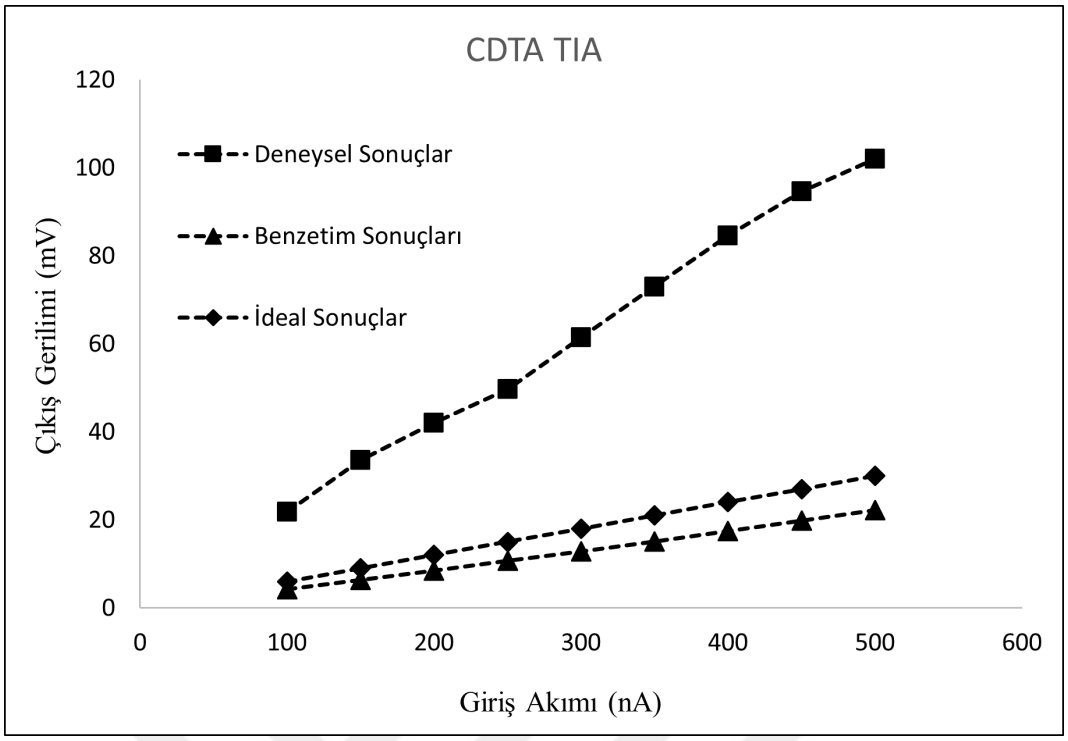
Deneysel sonuçlarda ve benzetim sonuçlarında 1350 μA değerinde çıkışın doyumda olduğu görülmektedir. İlgili akım değeri için elde edilen çıkış gerilimi Şekil 4.20'de verilmiştir. Devrenin benzetim, deney ve ideal sonuçlarını içeren karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.20 CDTA TIA çıkış gerilimi (doyumda)

4.5 Bölüm Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde CDTA aktif elemanı ile bir TIA devre tasarımı yapılmıştır. Devre performası benzetim ortamında ve deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Devre yapısı iki adet CDTA aktif elemanının kaskad bağlanması sonucu elde edilmiştir. İlk katta giriş akımı kuvvetlendirilmektedir.



Şekil 4.21 CDTA TIA karşılaştırmalı sonuç grafiği

İkinci katta ise akım gerilime dönüştürülmektedir. Akımı gerilime dönüştürme işleminde herhangi bir direnç ve kapasite elemanı kullanılmamaktadır. CDTA iç yapısında yer alan geçiş iletkenliği parametresi üzerinden bir kazanç sağlanmaktadır.

Oluşturulan devre yapısı benzetim ortamında farklı koşullarda incelenmiştir. Frekans karakteristiği ilk katta yer alan kazanç direnci sabitken geçiş iletkenliği oranı değişimi ve geçiş iletkenliği oranı sabitken kazanç direnci değişimine göre incelenmiştir. Direnç sabit durumda kazanç değişiminde bant genişliğinin sabit kaldığı görülmektedir. Direncin değiştiği durumda ise bant genişliği düşmektedir. Direnç elemanının bağlı olduğu terminal CDTA iç yapısında CFOA elemanının Z terminaline denk gelmektedir. Bir önceki çalışmada ticari entegre olarak bulunan CFOA elemanının kazancı arttıkça bant genişliğinin düştüğü deneysel ve benzetim ortamında yapılan çalışmayla gösterilmiştir.

Devre yapısı yüksek empedanslı çıkış yükleri için uygundur. Çıkışa bağlanan düşük empedanslı yüklerde kazancın düştüğü görülmektedir. Ölçümlerde bundan etkilenmemek için çıkışa tampon devre eklenmiştir. Devre, ışık gücü ölçüm hücresi ile test edilmiştir. Devrenin giriş ucu boştayken çıkışta sinüzoidal bir gürültü olduğu görülmüştür. Ölçümlerde gürültüyü bastırmak için alçak geçiren filtre devresi eklenmiştir. Deneyler ile benzetim sonuçları aynı giriş akımı değerleri için elde edilmiştir.

Deneylerde ölçülen çıkış gerilimleri ile giriş akımı değerlerinin doğrusal bir ilişkisi olduğu görülmektedir. Ancak benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar birbiri ile örtüşmemektedir. Benzetim sonuçları ideal sonuçlara yakın çıkmıştır. Deneysel sonuçlarda ise kazanç değerinin kendi içinde doğrusal ancak benzetim sonuçlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Bu bölümde yer alan TIA devresi yüksek empedanslı çıkış yükleri için uygundur. Devrenin ticari entegrelerle gerçeklenmiş hali yüksek kazançlar için uygun değildir. Devrenin giriş akımı da belirli aralıklarda doğrusal olarak çıkış verdiği görülmektedir. Devrenin avantajı kazanç parametresinin geçiş iletkenliği üzerinden ayarlanabilmesidir. Bunun neticesinde kazanç arttıkça bant genişliği sabit kalmaktadır. Devrenin güncel CMOS teknolojisi tasarımı ile birlikte doğrusal çalışma aralığını ve kazanç seviyesi devrede kullanılacak sensöre göre ayarlanabilir ve daha geniş çalışma aralığında tasarımlar yapmak mümkün hale gelebilir.

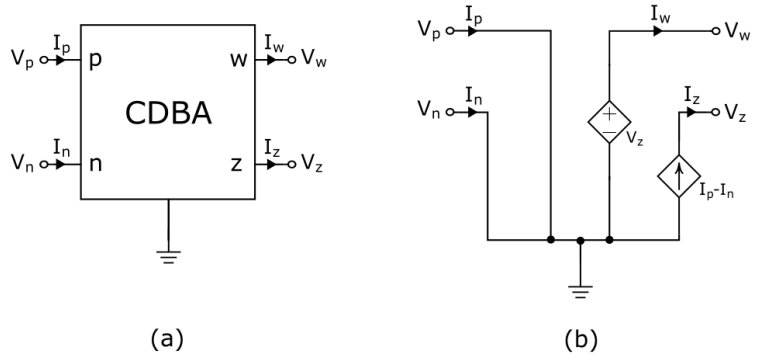
5
CDTA ve CDBA AKTİF ELEMANLARINI KULLANARAK GERÇEKLENEN TIA TASARIMI

Bu bölümde çıkış yapısı gerilim çıkışı almaya uygun bir yapıda olan Gerilim İzlemeli Akım Fark Kuvvetlendirici (CDBA) ve CDTA aktif elemanları ile bir TIA devre yapısı oluşturulmuştur. Devrenin ilk katında CDTA elemanı yer almaktadır. Tasarlanan yapı benzetim ortamında ve deneysel olarak test edilmiştir.

5.1 CDBA Aktif Elemanı

CDBA aktif elemanı, akım modunda ve gerilim modunda çalışır. Bu nedenle akım modlu aktif eleman muadillerine benzer şekilde geniş bir dinamik aralığa ve oldukça geniş bant genişliğine sahiptir [60]. İdeal CDBA, dahili olarak topraklanmış giriş terminalleri nedeniyle parazitik giriş kapasitanslarına ve giriş dirençlerine karşı duyarsızdır [61]. CDBA çıkışında yer alan w terminali düşük empedanslı yapısı ile gerilim çıkışı elde etmek için uygun bir yapıya sahiptir.

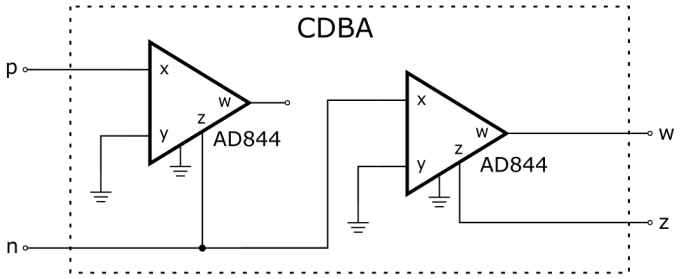
CDBA aktif elemanı ve ideal devre iç yapısı Şekil 5.1'de verildiği gibidir [62]. CDBA aktif elemanının ideal tanım bağıntısı ise Denklem (5.1)'de yer almaktadır. İfadede yer alan α_p ve α_n ifadeleri akım kazancı, β ise gerilim kazancı ifadeleridir. İdealde α_p = α_n = β = 1'dir.



Şekil 5.1 CDBA aktif elemanı (a) devre sembolü (b) ideal iç yapısı [62]

$$\begin{bmatrix} I_z \\ V_w \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha_p & -\alpha_n \\ \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_z \\ I_w \\ I_p \\ I_n \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

CDBA aktif elemanının ticari olarak bulunabilen tümdevrelerle gerçekleştirilmiş hali Şekil 5.2'de verilmiştir [63].



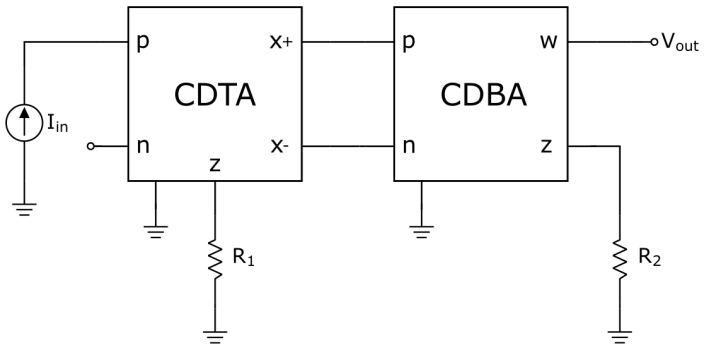
Şekil 5.2 Ticari tümdevreler ile CDBA gerçeklemesi [63]

CDBA aktif elemanı iki adet AD844 CFOA ticari tümdevre elemanı ile oluşturulmuştur [63]. Bu çalışmada da ticari tümdevrelerle oluşturulmuş CDBA iç yapısı olarak aynı yapı kullanılmıştır. Çalışmada yer alan CDTA iç yapısı için ise CDTA TIA devresinde kullanılan iç yapı kullanılmıştır.

5.2 CDTA ve CDBA Aktif Elemanlarını Kullanarak Gerçeklenen TIA Tasarımı

Bu bölümde CDTA ve CDBA aktif elemanı kullanılarak tasarlanan TIA devre yapısı Şekil 5.3'te verilmiştir. Tasarlanan yapı iki katlı bir yapı olup CDTA ve CDBA aktif elemanının kaskad bağlanması sonucu elde edilmiştir.

Devrede iki adet pasif eleman bulunmaktadır. Devrenin ilk katında giriş akımı kuvvetlendirilmektedir. İkinci katta ise CDBA aktif elemanı R_2 direnci üzerinden akımı gerilime dönüştürmektedir.



Şekil 5.3 CDTA ve CDBA aktif elemanlarını kullanılarak gerçeklenen TIA devresi

Devrenin çıkış ifadesi bağıntısı Denklem (5.2-5.9) arasında elde edilmiştir. Buna göre çıkış gerilimi, R_1 ve R_2 direnci ve kullanılan CDTA aktif elemanlarının geçiş iletkenliğine bağlıdır. Böylece kazanç için kullanılan dirençler yanı sıra geçiş iletkenlikleri üzerinden geçiş empedans kazancını değiştirmek mümkün olmaktadır.

$$i_{z_1} = i_{in} \tag{5.2}$$

$$v_{z_1} = i_{in}.R_1 \tag{5.3}$$

$$i_{x_1} = g_m.v_{z_1} \tag{5.4}$$

$$i_{x_1} = g_m.i_{in}.R_1 \tag{5.5}$$

$$i_{z_2} = i_{x_{1+}} - i_{x_{1-}} \tag{5.6}$$

$$i_{z_2} = 2.g_m.i_{in}.R_1 \tag{5.7}$$

$$v_{out} = i_{z_2}.R_2 \tag{5.8}$$

$$v_{out} = 2.g_m.R_1.R_2.i_{in} \tag{5.9}$$

TIA devresinin pasif eleman duyarlılığı R_1 ve R_2 direnç elemanları üzerinden incelenmiştir. Elde edilen duyarlılık değerleri Denklem (5.10-5.11)'de verilmiştir.

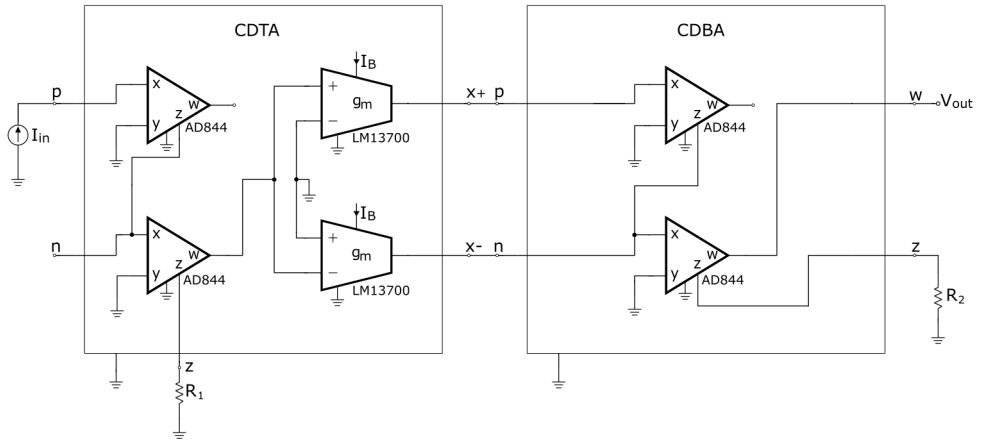
$$S_{R_1}^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial R_1}\frac{R_1}{V_{out}} = 1 \tag{5.10}$$

$$S_{R_2}^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial R_2}\frac{R_2}{V_{out}} = 1 \tag{5.11}$$

TIA devresinin pasif eleman duyarlılık değerleri [-1,1] aralığındadır. Devrenin pasif eleman duyarlılığının düşük olduğu görülmektedir.

5.3 Benzetim Sonuçları

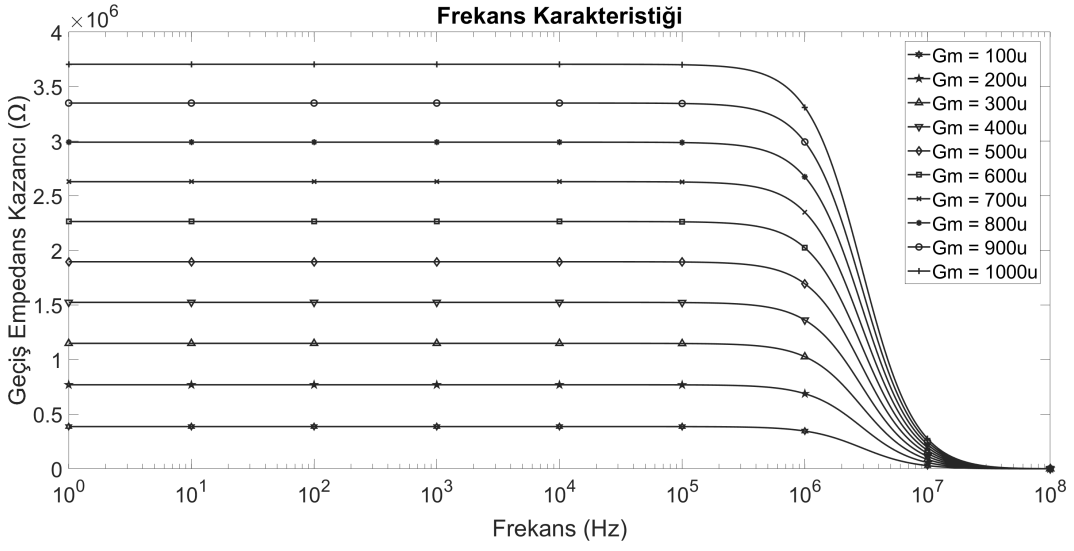
Tasarlanan devre yapısı AD844 ve LM13700 ticari entegreleri ile gerçekleştirilmiştir. Devre ilk önce benzetim ortamında daha sonra deneysel olarak ticari tümdevrelerle kurulmuş test devrelerinde incelenmiştir. Devre yapısı Şekil 5.4'te verildiği gibidir. Devrenin benzetimi PSPICE ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında devrenin frekans ve zaman domeni analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4 CDBA ve CDTA elemanlarıyla tasarlanmış TIA devre yapısının ticari tümdevrelerle gerçeklenmesi

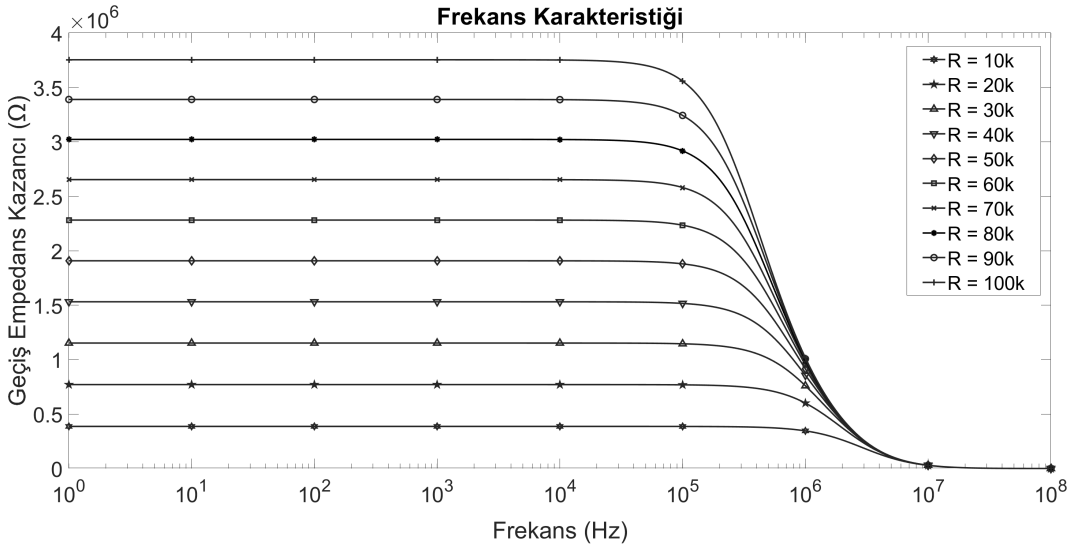
5.3.1 Frekans Yanıtı

Tasarlanan devre yapısının kazanç değeri değişimine göre değişen frekans karakteristiği R_1 direnci ve geçiş iletkenliği parametreleri üzerinden incelenmiştir. CDTA TIA devre analizinde de yapıldığı gibi her iki durum eşit kazanç değerleri için incelenmiştir. İlk durumda R_1 direnci sabit bırakılmış ve ilk katta akım kazancını sağlayan CDTA elemanının geçiş iletkenliği değiştirilmiştir. Elde edilen kazanç – frekans eğrisi Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 Geçiş iletkenliği değişimine göre elde edilen frekans yanıtı grafiği

Daha sonra geçiş iletkenliği değeri sabit bırakılmış ve R_1 direnci sırasıyla değiştirilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 5.6'da verilmiştir. Her iki durum için elde edilen kazanç ve kesim frekansı değerleri Tablo 5.1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

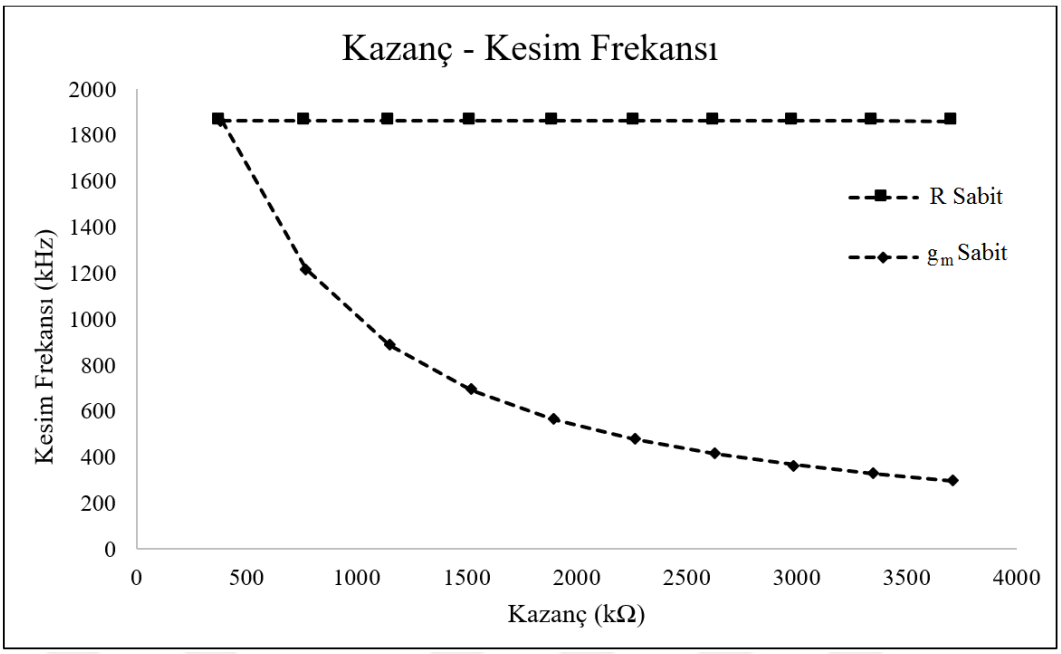


Şekil 5.6 Kazanç direnci değişimine göre elde edilen frekans yanıtı grafiği

Tablo 5.1 Farklı değişkenlerin değişimine göre elde edilen kazanç - kesim frekansı tablosu

Kazanç Direnci Sabit (R_1 = 10 kΩ)			Geçiş İletkenliği Sabit (g_m = 100 μS)		
g_m (μS)	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (kHz)	R_1 (kΩ)	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (kHz)
100	386.61	1860.55	10	386.61	1860.55
200	769.57	1860.54	20	770.67	1215.06
300	1148.77	1860.52	30	1152.18	884.69
400	1524.29	1860.51	40	1531.19	690.69
500	1896.22	1860.49	50	1907.71	564.98
600	2264.64	1860.48	60	2281.78	477.55
700	2629.65	1860.46	70	2653.40	413.48
800	2991.32	1860.45	80	3022.61	364.63
900	3349.74	1860.43	90	3389.43	326.20
1000	3704.98	1860.41	100	3753.89	295.21

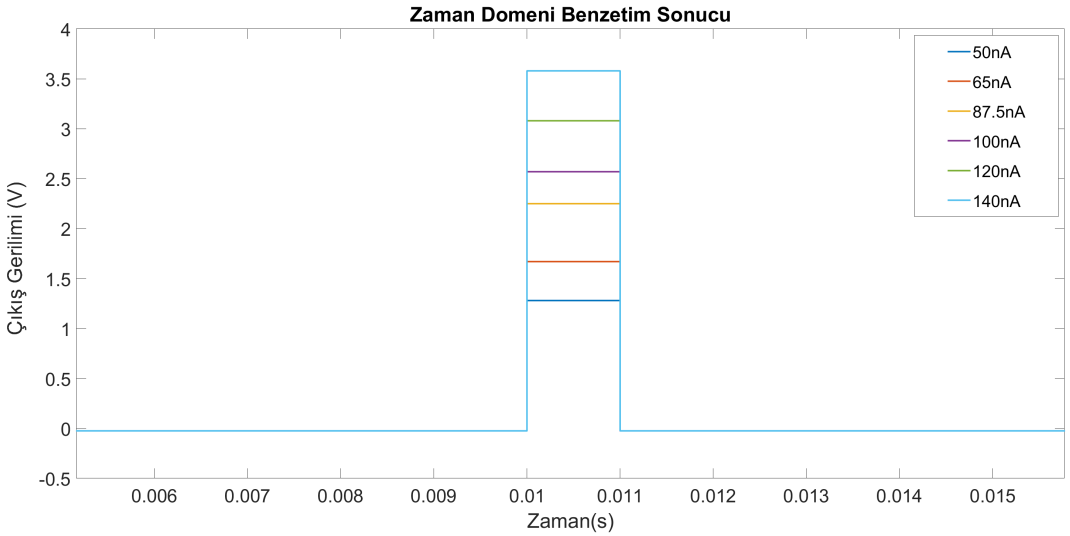
Devrelerin frekans yanıtları incelendiğinde eşit kazanç durumlarında kazanç direncinin değişimi devrenin kesim frekansı değerini düşürdüğü görülmektedir. Geçiş iletkenliği oranıyla kazancı değiştirme durumunda ise kesim frekansı artan kazanca rağmen sabit kalmaktadır. Bu durum akım modlu aktif elemanlı yapıda kazanç arttıkça bant genişliği değerinin sabit kaldığını göstermektedir. Kesim frekansı değerlerinin kazanç değerine göre değişimi Şekil 5.7'de verilmiştir. Farklı konfigürasyonlar için kazanç ve kesim frekansı değişimleri incelendikten sonra ihtiyaç duyulan kazanç ve bant genişliği değerine göre R_1 = 100 kΩ, R_2 = 10 kΩ olarak seçilmiştir. TIA devresinin ilk katında yer alan CDTA aktif elemanının geçiş iletkenliği 14 mS değerinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Devrenin ideal geçiş empedans kazancı ilgili R_1, R_2 ve g_m değerleri için 28 MΩ değerinde olmaktadır.



Şekil 5.7 Kazanca göre kesim frekanslarının değişimi

5.3.2 Zaman Domeni Analizi

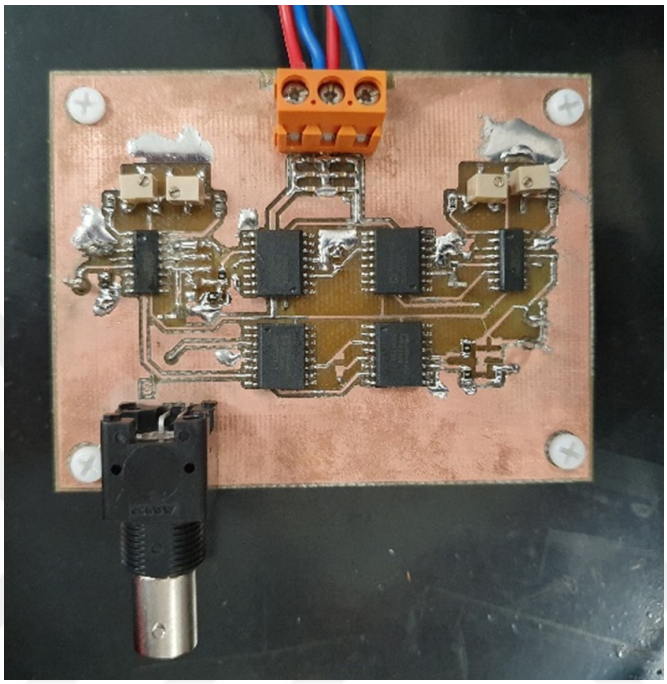
Simülasyonda darbeli formda sürülen ışık kaynağının fotodiyot üzerinde oluşturduğu darbe formundaki akıma bağlı oluşan çıkış gerilimi incelenmiştir. Benzetim sonuçları PSPICE benzetim ortamında elde edilmiştir. Benzetim sonucu ortaya çıkan çıkış gerilimi verisi MATLAB programında çizdirilmiştir. Simülasyonda farklı akım değerlerinde elde edilen çıkış gerilimleri verilmiştir. Devrenin girişine, deneysel ortamda referans cihaz ile okunan akım değerleri uygulanmıştır. Elde edilen çıkış gerilimi sonuç grafiği Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8 Zaman domeni benzetim sonucu

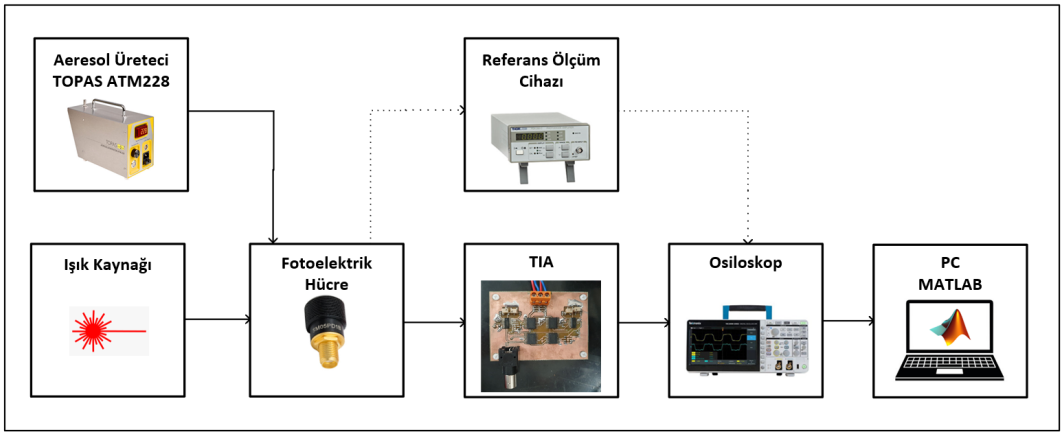
5.4 Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için hazırlanan test kartı Şekil 5.9'da verilmiştir. Devre ±12 V DC simetrik besleme ile çalışmaktadır. Kart üzerindeki OTA aktif elemanlarının geçiş iletkenlikleri devre üzerinde yer alan ayarlı dirençler sayesinde ayarlanabilmektedir.



Şekil 5.9 CDTA-CDBA TIA test kartı

Bu bölümde yer alan devrenin deneysel çalışmasını gerçekleştirmek üzere hazırlanan deney düzeneği Şekil 5.10'da verilmiştir.



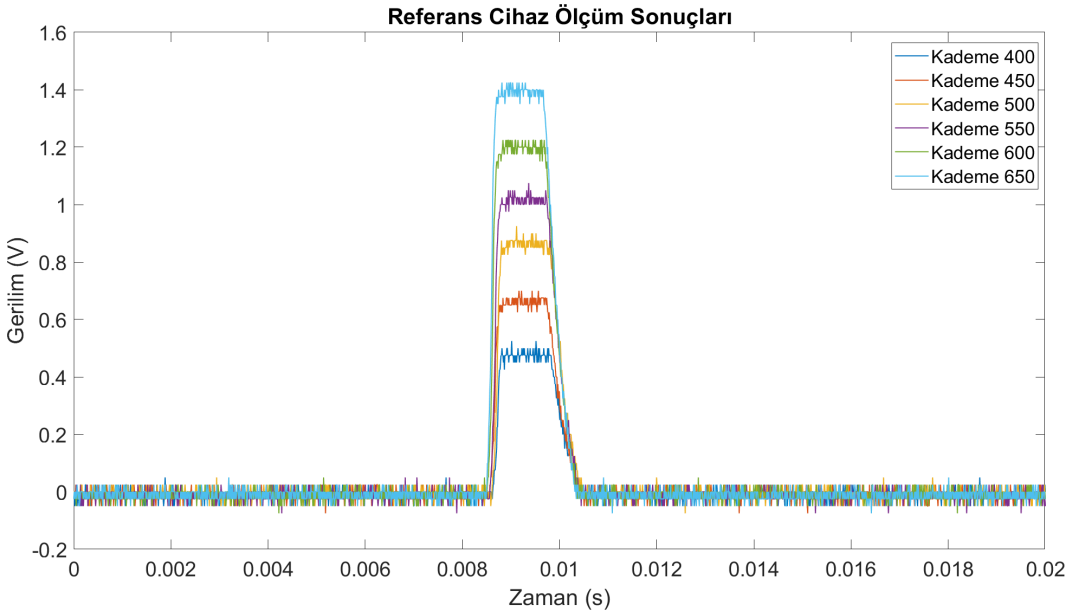
Şekil 5.10 Deney düzeneği blok şeması

Yapılan deneylerde aerosol ölçüm hücresi kullanılmıştır. Farklı değerlerde sabit akım, her deneyde aerosol üretecinin basınç kademe ayarıyla elde edilmiştir.

Fotodiyot akımı devreye uygulanmadan önce referans ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Sonrasında ölçülen akım değerleri devreye uygulanmıştır.

5.4.1 Deney Sonuçları

Deneyler esnasında aeresol üretecinin kademelerine karşılık gelen akımlar referans ölçüm cihazıyla ölçülmüş daha sonra test devresine uygulanmıştır. Deneylerde aerosol üretmek için EN54-7 standardına uygun olacak şekilde parafin malzemesi kullanılmıştır. Referans cihaz ölçüm sonucu Şekil 5.11'de verildiği gibidir.



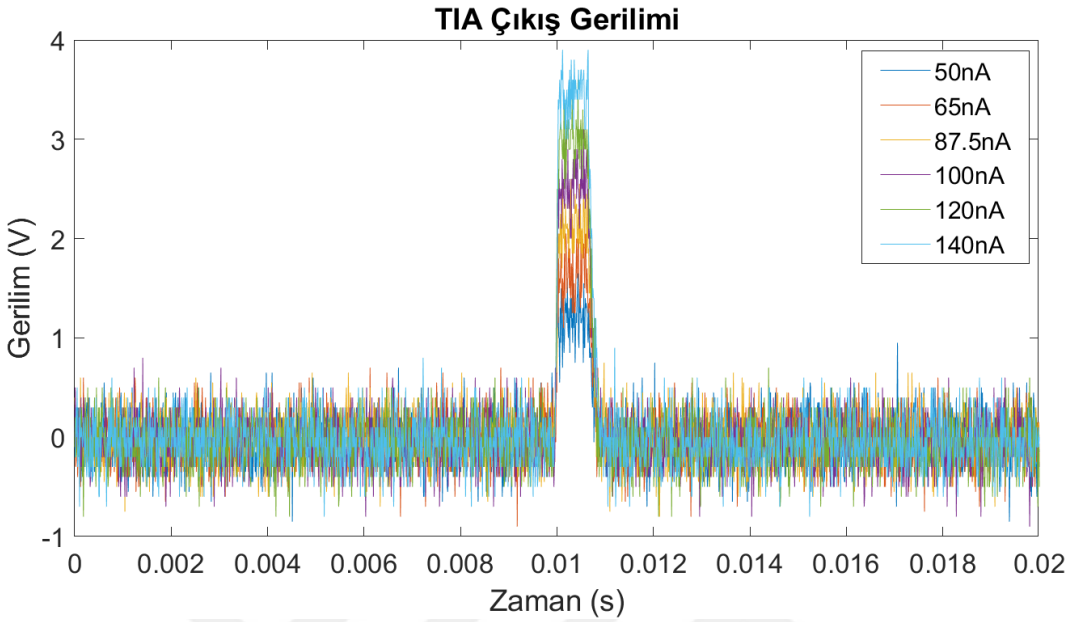
Şekil 5.11 Referans cihaz ölçüm sonucu

Referans cihaz ölçümü yapıldıktan sonra ölçülen gerilim değerleri cihazın ilgili kazanç kademesindeki kazanç değerine göre akıma dönüştürülmüştür. Aeresol üretecinin kademelerinde oluşan çıkış gerilimi ve fotodiyot akımı Tablo 5.2'de verilmiştir. Deney düzeneği Bölüm 3'te kullanılan düzenekle aynıdır. Aeresol üretecinin kademelerindeki farklı akım değerleri düzeneğin hava karıştırıcı girişinde yer alan temiz hava vanasının ayarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5.2 Test devreleri ölçüm sonuçları

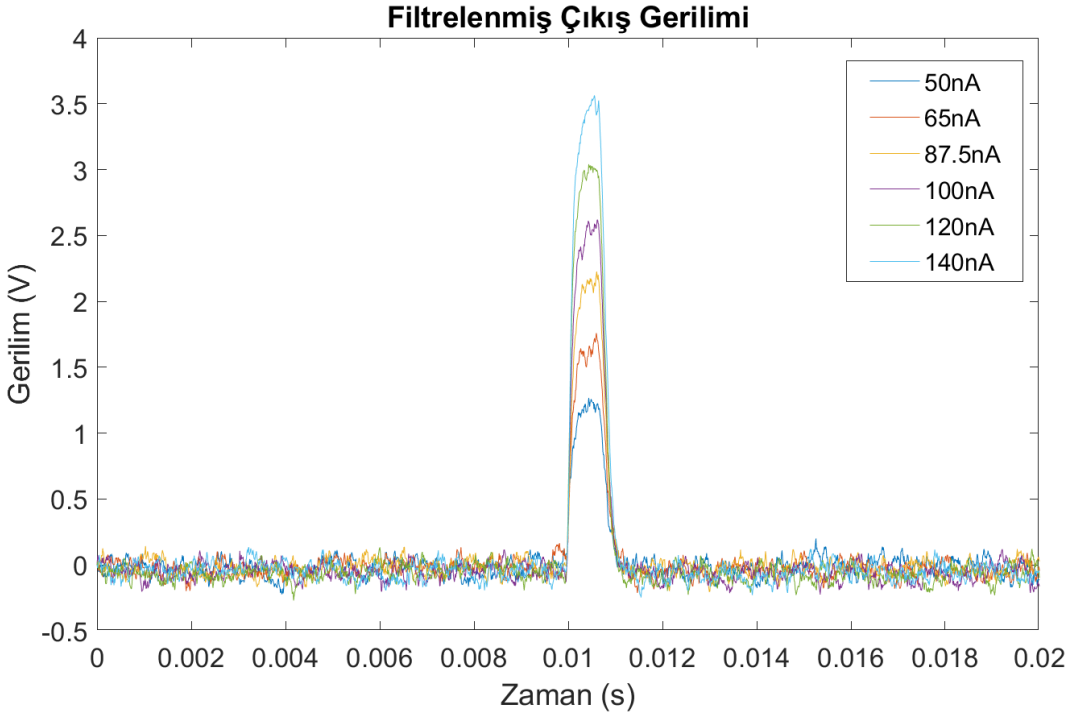
Cihaz Basınç Kademesi	Ölçülen Gerilim (mV)	Fotodiyot Akımı (nA)
400	0.500	50.0
450	0.650	65.0
500	0.875	87.5
550	1.000	100.0
600	1.200	120.0
650	1.400	140.0

Referans cihaz üzerinden akım ölçümü gerçekleştirdikten sonra ilgili kademe akımları test devresine sırasıyla uygulanmış ve kaydedilmiştir. Farklı kademeler için kaydedilen çıkış gerilimi Şekil 5.12'de verildiği gibidir.



Şekil 5.12 TIA devresi deneysel çıkış gerilimi grafiği

Ölçülen çıkış geriliminin gürültülü olduğu görülmektedir. Kaydedilen sinyale MATLAB programı üzerinde dijital alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Elde edilen sinyal Şekil 5.13'te verilmiştir.



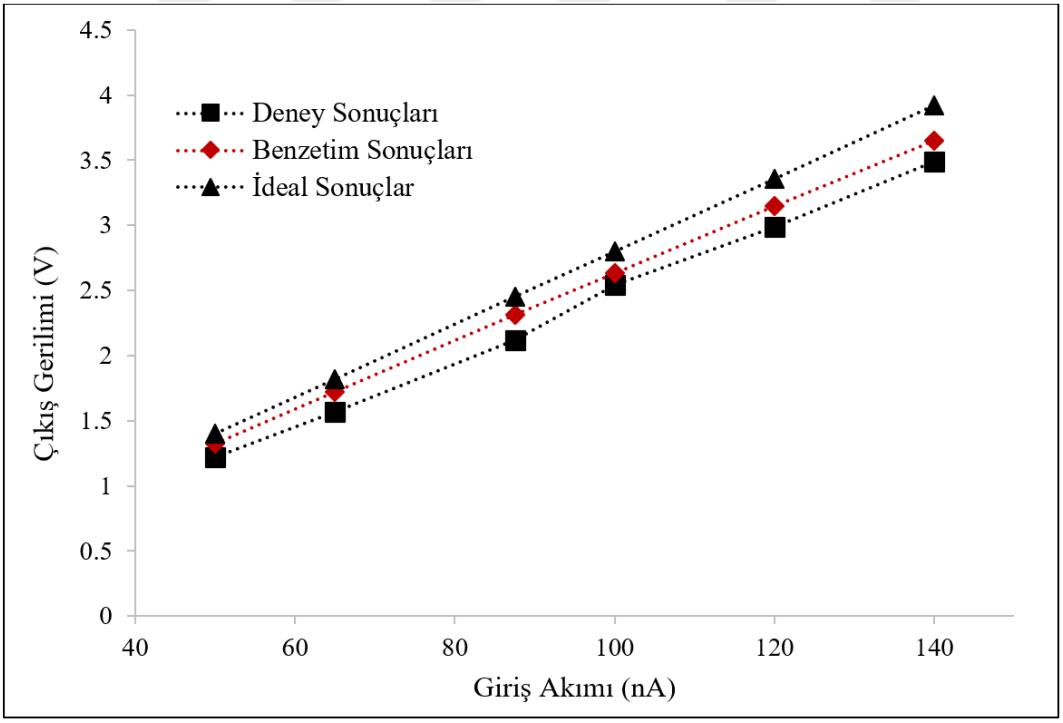
Şekil 5.13 TIA devresi filtrelenmiş deneysel çıkış gerilimi grafiği

Deney ve benzetim ortamında devreye uygulanan farklı giriş akım değerlerinde elde edilen çıkış gerilimi değerleri Tablo 5.3'te verilmiştir. Deneysel sonuçların benzetim sonuçları ve ideal değerlerle karşılaştırma grafiği ise Şekil 5.14'te verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde deneysel sonuçlar, benzetim sonuçları ve ideal sonuçların maksimum 13% sapma ile birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Bu sapma değeri deneysel çalışmada meydana gelen ölçüm hataları, ticari tümdevrelerin parazitik iç komponentleri ve benzetim ortamında kullanılan makro model gibi çeşitli etkilerden kaynaklı olmaktadır.

Tablo 5.3 Deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırması

Giriş Akımı (nA)	Çıkış Gerilimi (V)		
	Deneysel Sonuçlar	Benzetim Sonuçları	İdeal Sonuçlar
50	1.22	1.33	1.40
65	1.57	1.72	1.82
87.5	2.12	2.31	2.45
100	2.54	2.63	2.80
120	2.99	3.15	3.36
140	3.49	3.65	3.92



Şekil 5.14 Deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırma grafiği

5.5 Bölüm Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde CDTA ve CDBA aktif elemanları ile TIA devresi tasarlanmıştır. Devrenin ilk katında giriş akımı kuvvetlendirilmiş, ikinci katında ise gerilime dönüştürülmüştür. İlk katta elde edilen diferansiyel akım çıkışı ikinci katın girişine birbirinin farkı alınacak şekilde bağlanmış ve böylece iki kat kazanç elde edilmiştir. Kazanç ifadesinde iki farklı parametre bulunmaktadır. Bunlar kazanç dirençleri ve geçiş iletkenliği parametreleridir. Farklı parametrelerin değişimine göre frekans yanıtı ve kazanç değerleri incelenmiştir. CDTA TIA devresinde olduğu gibi bu yapıda da geçiş iletkenliği değişiminin artan kazanç durumunda bant genişliğini etkilemediği görülmüştür.

Tasarlanan devre fiziksel olarak gerçeklenmiş ve standartlara uygun bir aeresol ölçümü deney düzeneğinde test edilmiştir. Ölçülen çıkış gerilimi değerleri kaydedilmiş ve MATLAB programı üzerinde çizdirilmiştir. Kaydedilen çıkış geriliminin gürültülü olduğu görülmüştür. Bunun üzerine ölçülen veri MATLAB programında dijital olarak filtrelenmiştir.

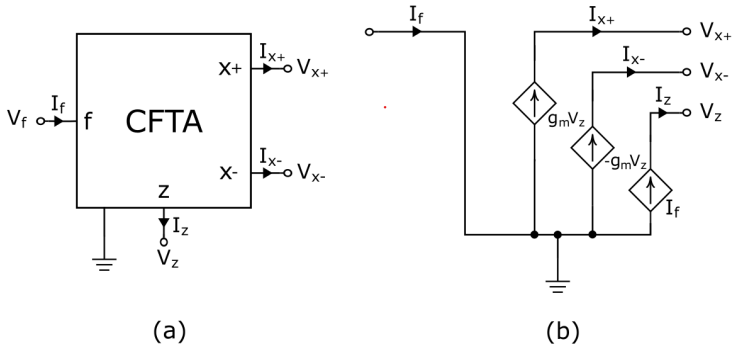
Elde edilen deneysel sonuçların, benzetim sonuçlarının ve ideal sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. CDTA aktif elemanı ile gerçeklenen TIA devresine kıyasla bu yapıda daha yüksek kazanç elde edilmiştir.

6
CFTA AKTİF ELEMANI KULLANARAK GERÇEKLENEN TIA TASARIMI

Bu bölümde CFTA aktif elemanı ile bir TIA devre yapısı oluşturulmuştur. CFTA aktif elemanı CMOS iç yapısı ile birlikte tasarlanmıştır. Tasarlanan TIA devresi kazancı elektronik olarak ayarlanabilirdir. Tasarlanan yapı benzetim ortamında test edilmiştir.

6.1 CFTA Aktif Elemanı

CFTA aktif elemanı ve ideal devre yapısı Şekil 6.1'de verildiği gibidir [64].



Şekil 6.1 CFTA aktif elemanı (a) devre sembolü (b) ideal iç yapısı [64]

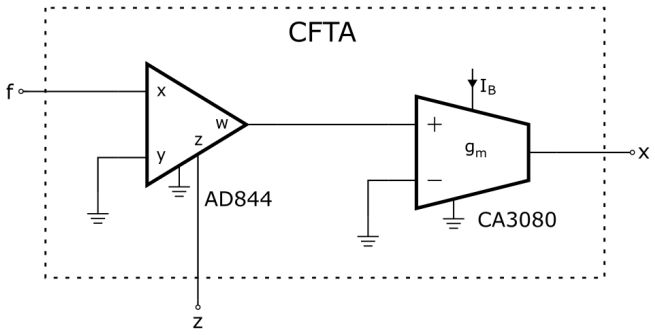
CFTA aktif elemanı temel olarak CDTA aktif elemanına benzemektedir. Aralarındaki fark CDTA giriş terminallerinden akan akımların farkını alırken CFTA aktif elamanında tek bir giriş akımını diğer terminale aktarmaktadır.

CDTA aktif elemanı kullanan devre yapılarında p veya n terminallerinin bağlantısız kalması, devrede istenmeyen gürültüye neden olmaktadır. Bu gürültü ise aktif eleman çıkışındaki gürültü seviyesini arttırabilmektedir [65]. CDTA ve CDBA TIA yapılarında giriş terminallerinden bir tanesi boşta bırakılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre çıkış geriliminin gürültülü olduğu görülmektedir. Bu çalışmada CFTA aktif elemanı kullanılması ile birlikte bu giriş gürültüsünün de elimine edilmesi hedeflenmiştir.

CFTA aktif elemanına ait tanım bağıntısı Denklem (6.1)'de verilmiştir. Burada R_f giriş terminalinin parazitik direnci, α akım kazancı, g_m ise geçiş iletkenliği kazancı ifadeleridir [66]. İdealde R_f = 0, α = 1'dir.

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_z \\ I_{x+} \\ I_{x-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +g_m & 0 & 0 \\ 0 & -g_m & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ V_z \\ V_{x+} \\ V_{x-} \end{bmatrix} \tag{6.1}$$

CFTA aktif elemanının ticari olarak bulunabilen tümdevrelerle gerçekleştirilmiş hali Şekil 6.2'de verilmiştir [67]. Verilen devre pozitif akım çıkışı veren CFTA yapısını göstermektedir. CFTA aktif elemanının x terminalinin negatif veya pozitif olması ikinci katta bağlı olan OTA yapısının bağlantısı ile ilgilidir.



Şekil 6.2 Ticari tümdevreler ile CFTA gerçeklemesi [67]

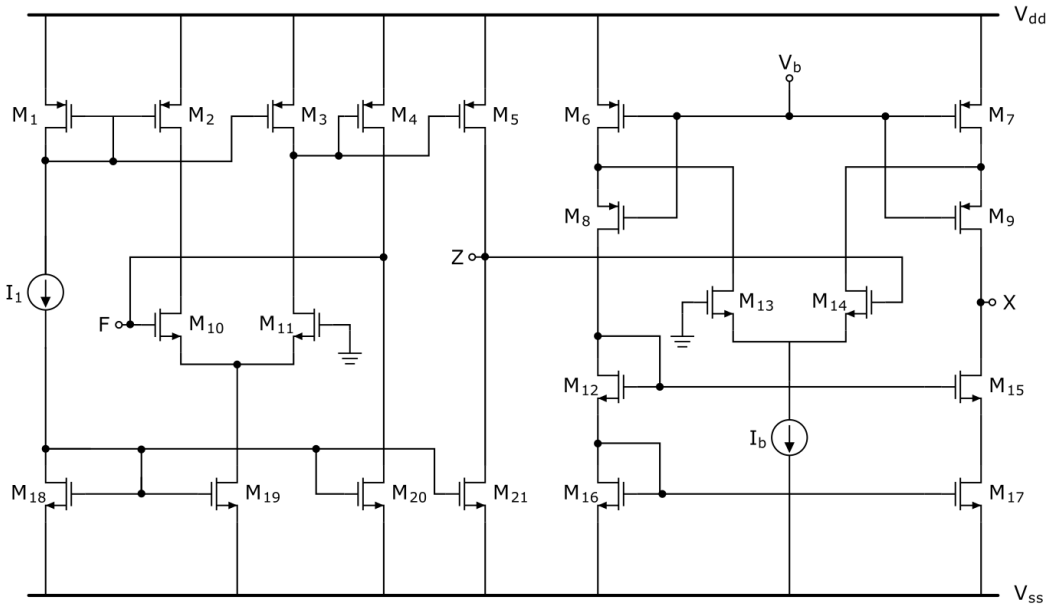
Bu çalışmada x terminali tek çıkışlı negatif polariteli olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Tasarım ticari tümdevreler ile değil MOS transistörlerle iç yapısı oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan aktif elemanın çalışma sınırları benzetim ortamında incelenmiştir.

6.2 CFTA Tasarımı

Bu çalışmada TIA devresi için kullanılacak CFTA aktif elemanı iç yapısı çalışmaya uygun parametrelere göre MOS transistörlerle oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında MOS transistörlerle elde edilmiş CFTA iç yapısı Şekil 6.3'te verilmiştir. Devre tasarımı TSMC 0.18 μm teknoloji parametreleri ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan teknoloji parametreleri ek bölümünde verilmiştir. MOS transistörlere ait tasarım parametreleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

CFTA elemanı iki farklı blok yapıdan meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla akım izleyici ve geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi yapılarıdır. Devre yapısını oluştururken literatürde yaygın olarak kullanılan akım izleyici bloğu ve OTA yapısı kullanılmıştır [64], [68–70]. Ancak yapılardaki transistörlerin parametreleri bu çalışmanın kriterleri göz önüne alınarak değiştirilmiş ve çalışmaya uygun tasarım yapılması sağlanmıştır.

TIA devresi tasarımı açısından akım izleyici bloğunun geniş bir aralıkta doğrusal olarak çalışması ve OTA bloğu yapısının düşük geçiş iletkenliği değerine sahip olması önemli parametreler olmaktadır. Tasarım yapılırken bu kriterler göz önüne alınarak ilgili sensör ve uygulama parametrelerine uygun bir yapı oluşturulması hedeflenmiştir. Akım izleyici ve OTA bloğu yapılarının doğrusal çalışma aralıkları ve frekans yanıtları PSPICE benzetim ortamında incelenmiştir.

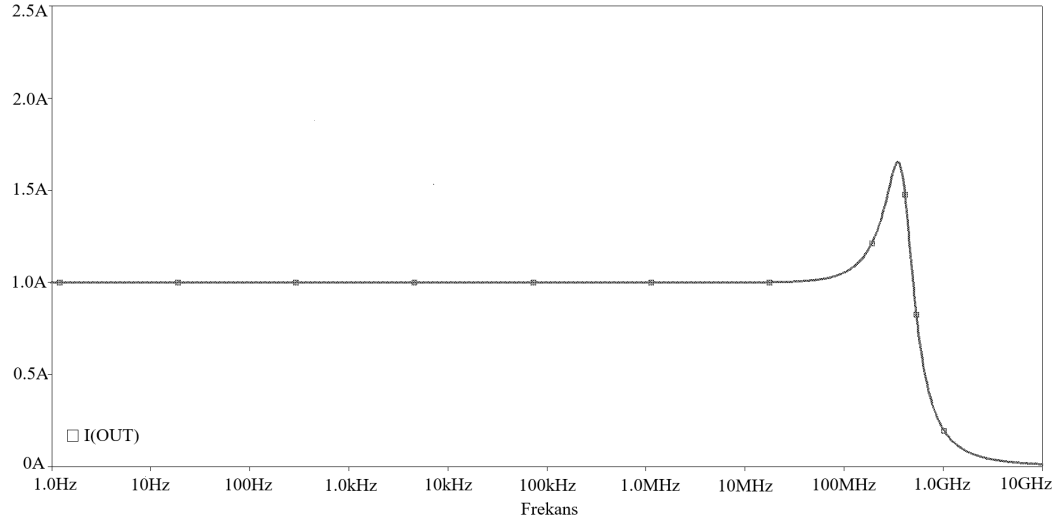


Şekil 6.3 Tasarlanan CFTA aktif elemanı iç yapısı

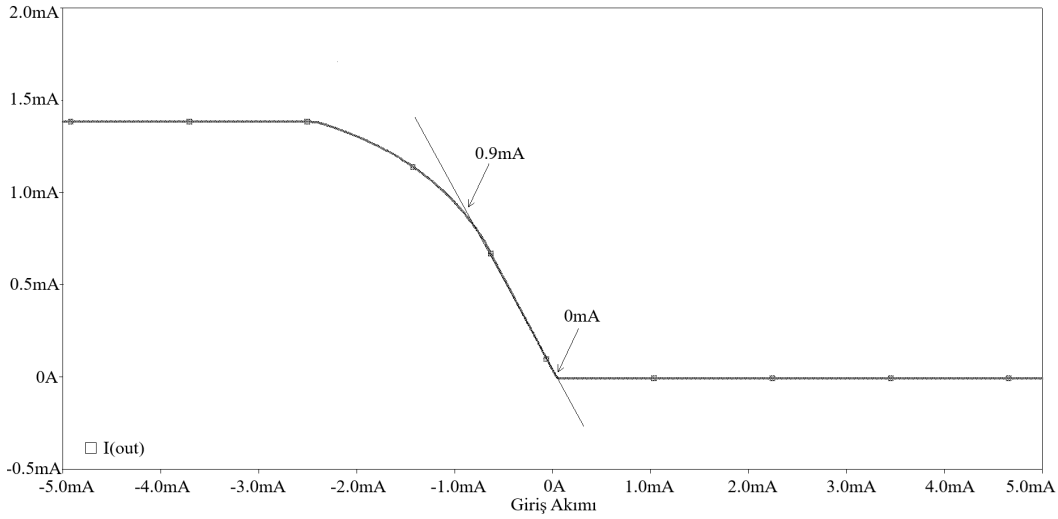
Tablo 6.1 CFTA iç yapısı MOS transistör parametreleri

NMOS Transistor	W(μm)/L(μm)
M10, M11	10/0.9
M12, M15	9/1.8
M13, M14	1.08/1.08
M16, M17	9/0.36
M18, M19	1.8/0.36
M20	0.72/0.18
M21	9/9
PMOS Transistor	W(μm)/L(μm)
M1	3.6/0.72
M2	10.8/0.18
M3	1.26/0.9
M4, M5	1.08/0.72
M6, M7	36/0.72
M8, M9	7.2/0.36

CFTA aktif elemanının akım izleyici devresine ait frekans karakteristiği Şekil 6.4'te verildiği gibidir. Frekans yanıtı incelendiğinde devre çıkışının giriş akımını 100 MHz frekansına kadar takip ettiği görülmektedir. Akım izleyici yapısının doğrusal çalışma aralığı da benzetim ortamında analiz edilmiştir. DC koşullarda doğrusal çalışma aralığı grafiği Şekil 6.5'te verilmiştir. Buna göre devre çıkış akımı giriş akımını 0-0.9 mA aralığında doğrusal olarak takip etmektedir. Bu değer fotoelektrik dedektörlerin çıkış akımı değerleri içerisinde kalmaktadır.

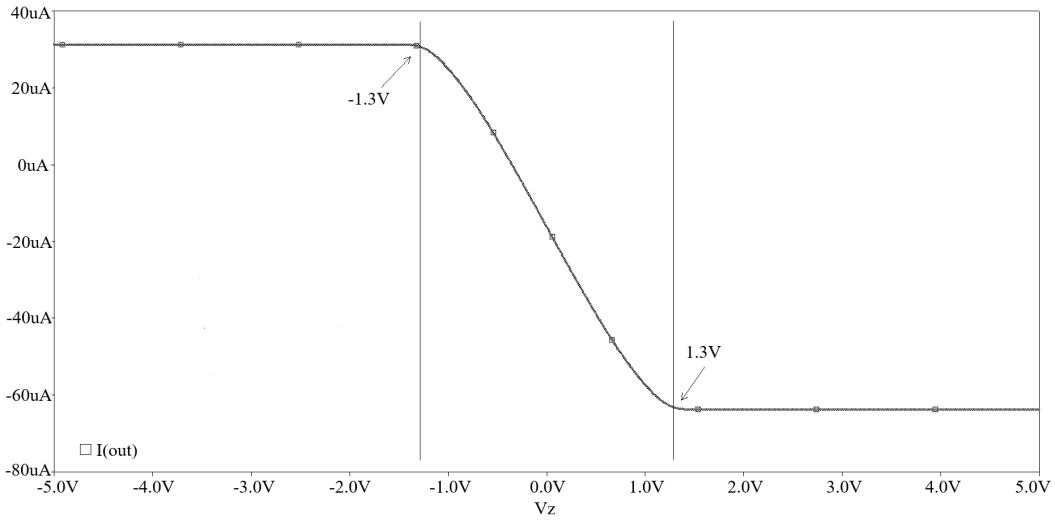


Şekil 6.4 Akım izleyici devresi frekans yanıtı



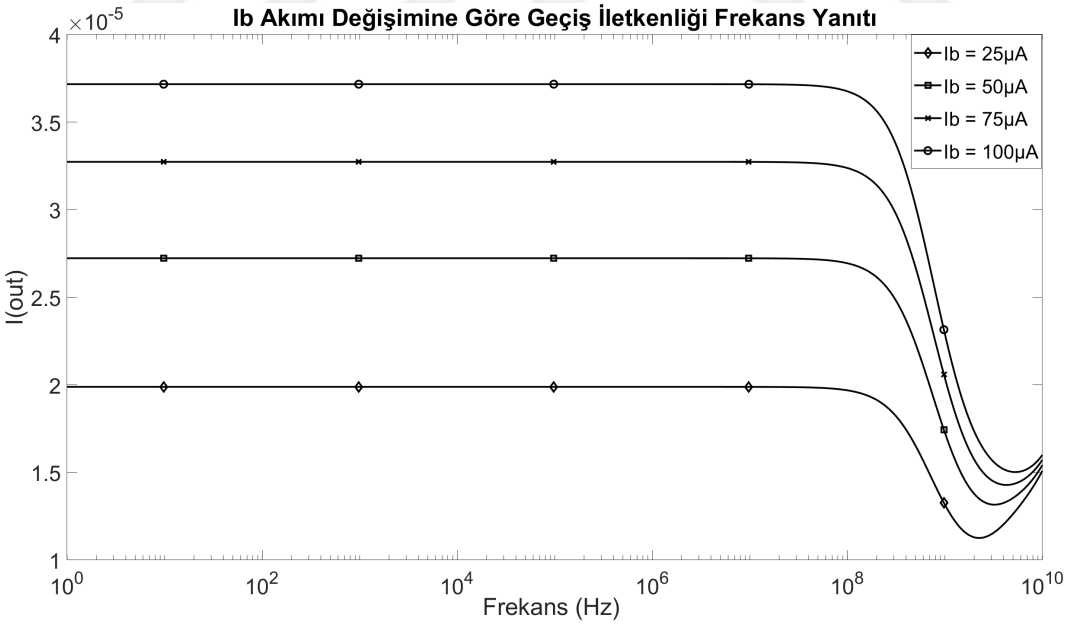
Şekil 6.5 Akım izleyici giriş akımı – çıkış akımı DC tarama grafiği

Tasarlanan CFTA iç yapısında z terminali gerilimine karşılık x terminalinde oluşan akım değeri benzetim ortamında DC tarama ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuç grafiği Şekil 6.6'da verildiği gibidir. Burada z terminali geriliminin ±1.3 V gerilimleri arasında doğrusal bir şekilde çıkışta akım oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 6.6 CFTA z terminali gerilimi – çıkış akımı DC tarama grafiği

Tasarımı yapılan CFTA iç yapısının I_b akımı değişimine karşılık elde edilen geçiş iletkenliği değeri benzetim ortamında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.7'de verilmiştir. Farklı geçiş iletkenliği değerlerini bias akımını değiştirerek elde etmek mümkündür. Verilen grafikte farklı I_b akımları için V_b = 3.5 V gerilim değeri uygulandığında elde edilen geçiş iletkenliği – frekans verisi gösterilmiştir. Geçiş iletkenliği μS mertebelerinde olmaktadır.



Şekil 6.7 Geçiş iletkenliği – frekans grafiği

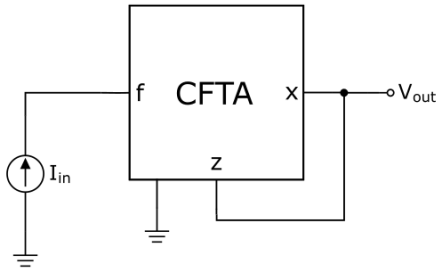
MOS transistörlerle tasarlanan CFTA yapısının çalışma sınırları ile ilgili parametreler Tablo 6.2' de verilmiştir. Güç tüketimi değeri V_b = 4.3 V, I_b = 90 μA gerilim değeri için hesaplanmıştır.

Tablo 6.2 CFTA çalışma sınırları

Besleme Gerilimi	± 5 V
Güç Tüketimi	2.69 mW
I_1	15 μA
Akım İzleyici Doğrusal Çalışma Aralığı	0-0.9 mA
OTA Doğrusal Çalışma Aralığı	± 1.3 V

6.3 CFTA Aktif Elemanı Kullanılarak Gerçeklenen TIA Tasarımı

Bu bölümde CFTA aktif elemanı kullanılarak tasarlanan TIA devre yapısı Şekil 6.8'de verilmiştir. Tasarlanan yapı tek katlı bir yapıdır. Devrede pasif eleman kullanılmamaktadır. Elektronik olarak kazancı ayarlanabilir bir yapı tek bir aktif elemanla sunulmuştur.



Şekil 6.8 CFTA elemanı ile gerçeklenmiş TIA devresi

Devrenin çıkış gerilimi ifadesi ideal olmayan bağıntılara göre Denklem (6.2-6.8) arasında elde edilmiştir.

$$i_z = \alpha . i_x \tag{6.2}$$

$$i_z = \alpha . i_{in} \tag{6.3}$$

$$i_x = g_m . V_z \tag{6.4}$$

$$i_x = i_z \tag{6.5}$$

$$v_z = v_{out} \tag{6.6}$$

$$\alpha . i_{in} = g_m . v_{out} \tag{6.7}$$

$$v_{out} = \alpha . i_{in} . \frac{1}{g_m} \tag{6.8}$$

Devrenin çıkış gerilimi ifadesi aktif elemanın geçiş iletkenliğinin (g_m) bir fonksiyonudur. Böylece geçiş iletkenliği üzerinden geçiş empedans kazancını değiştirerek elektronik olarak ayarlı bir kazanç yapısı elde etmek mümkün olmaktadır. Devrenin çıkış geriliminin duyarlılığı aktif eleman parametrelerine göre incelenmiştir. Elde edilen ifade Denklem (6.9) ve (6.10)'da verilmiştir.

$$S_{1/g_m}^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial 1/g_m} \frac{1/g_m}{V_{out}} = -1 \tag{6.9}$$

$$S_{\alpha}^{V_{out}} = \frac{\partial V_{out}}{\partial \alpha} \frac{\alpha}{V_{out}} = 1 \tag{6.10}$$

TIA devresinin aktif duyarlılığı [-1,1] aralığındadır. Devrenin aktif duyarlılığının düşük olduğu görülmektedir.

Tasarlanan devrenin girişi düşük, çıkışı yüksek empedanslıdır. Çıkış empedansının yüksek olması sebebiyle çıkışa bağlanacak düşük empedanslı yükler kazanç değerini etkiler. Çıkış yüksek empedanslı yükler için uygundur. Düşük empedanslı yük bağlamak için çıkışa tampon devre eklenmelidir.

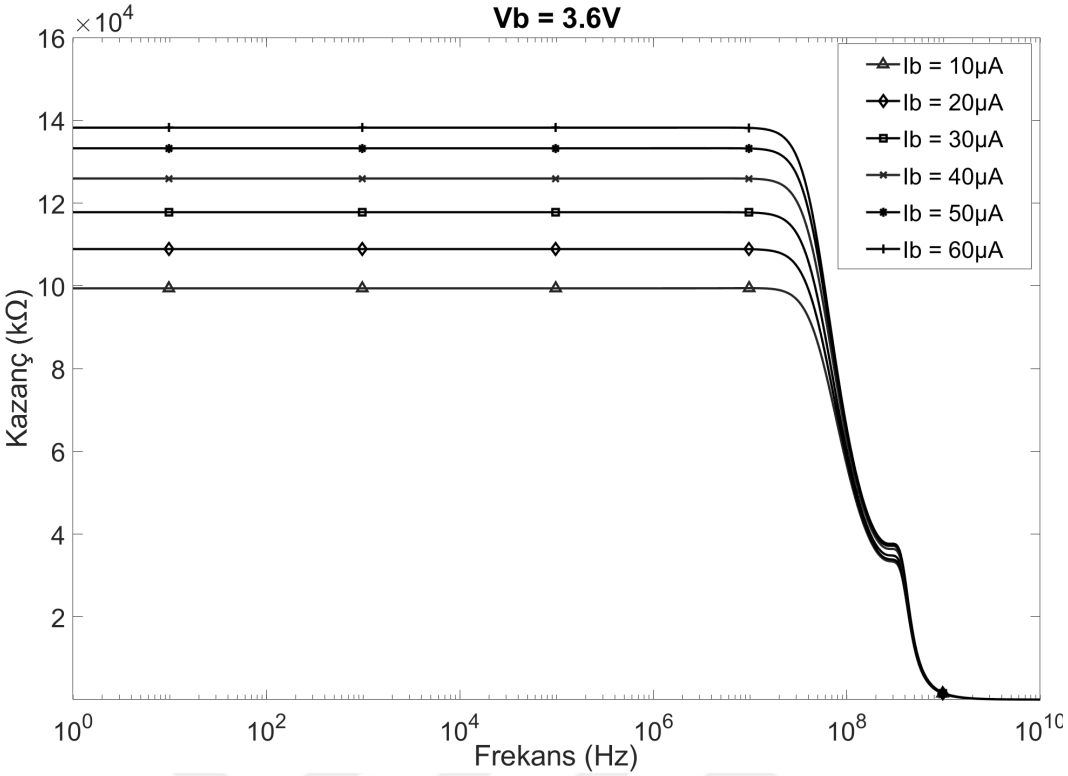
6.4 TIA Benzetim Sonuçları

CFTA elemanı ile oluşturulan TIA devresinin incelemesi benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Burada V_b ve I_b parametrelerine göre farklı kazanç değerleri incelenmiştir. Devrenin benzetimi PSPICE ortamında gerçeklenmiştir. Benzetim ortamında ilk önce devrenin farklı V_b ve I_b değerleri altında frekans yanıtı değişimi incelenmiş daha sonra zaman domeni analizi elde edilen ilgili kazanç değerlerine göre gerçekleştirilmiştir.

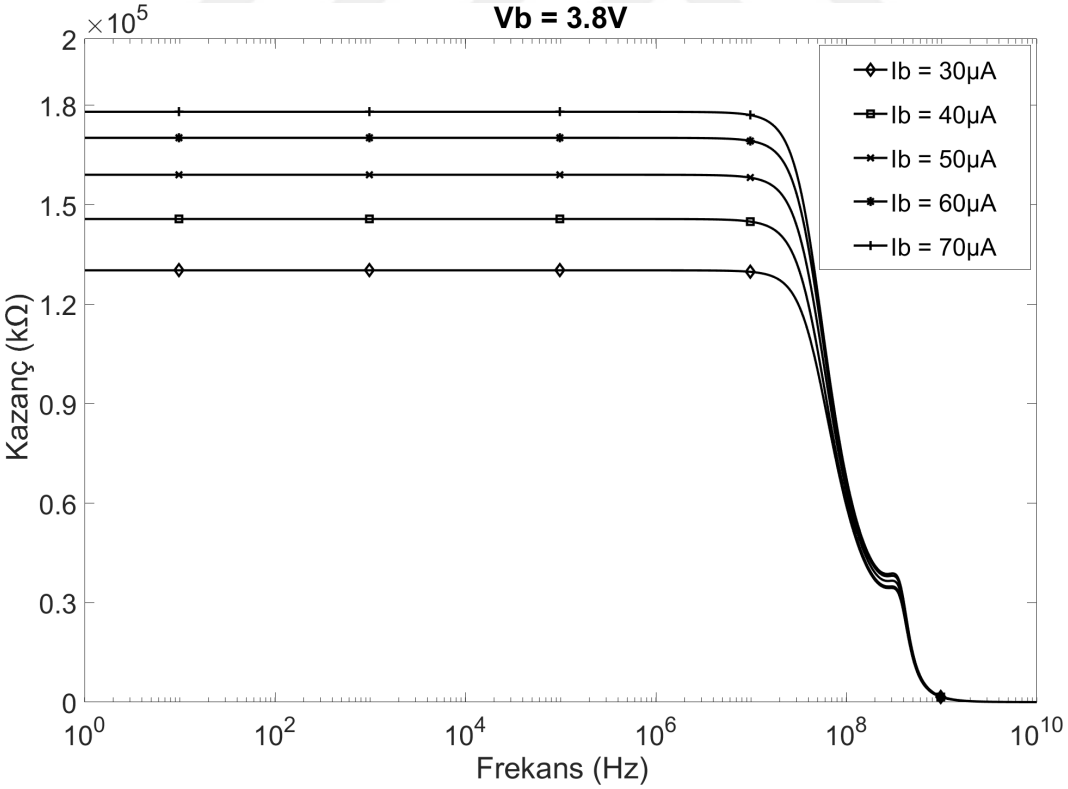
6.4.1 Frekans Yanıtı

Frekans yanıtı analizi farklı V_b gerilimleri altında I_b akımı gerilimi değişimine göre elde edilmiştir. Elde edilen TIA devresi kazanç grafikleri 6.9-6.12'de verilmiştir. Farklı gerilim değerleri altında değişen kazanç – kesim frekansı grafikleri ise Tablo 6.3-6.6'da verilmiştir.

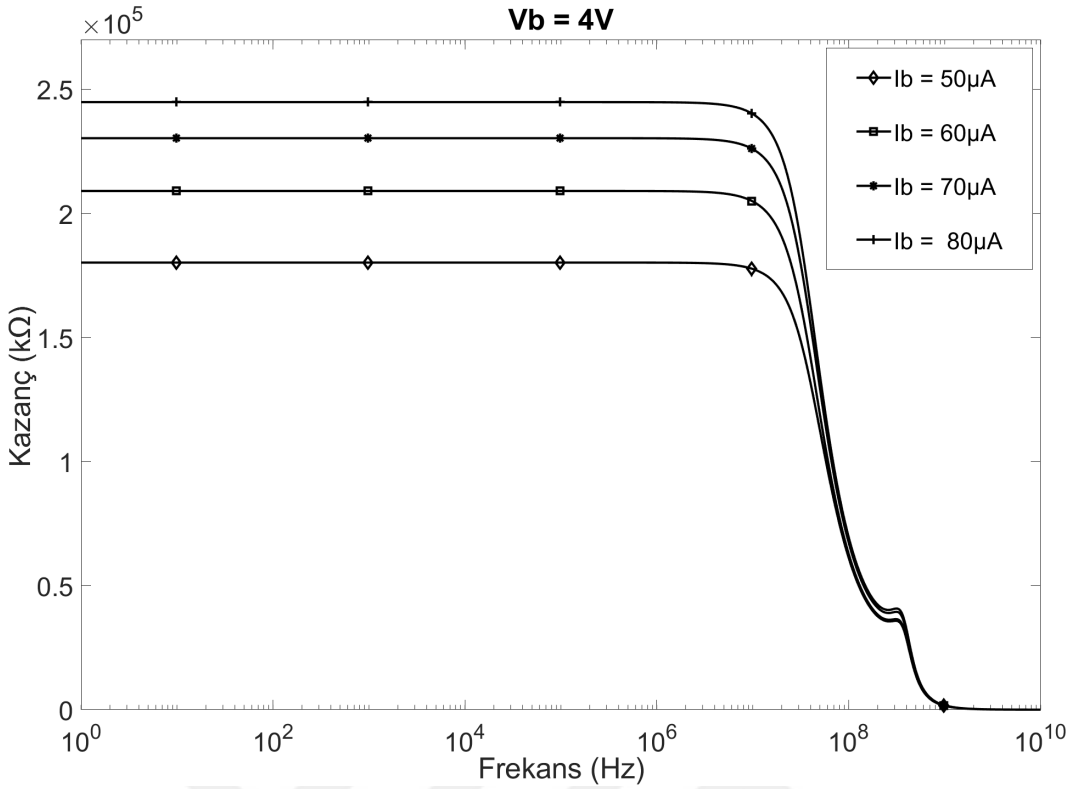
Değerler incelendiğinde I_b akımı değişiminin kazanç değerini değiştirdiği ancak köşe frekans değerlerinin kendi içerisinde ortalama değerinden maksimum %20 değerinde sapma ile benzer olduğu görülmektedir.



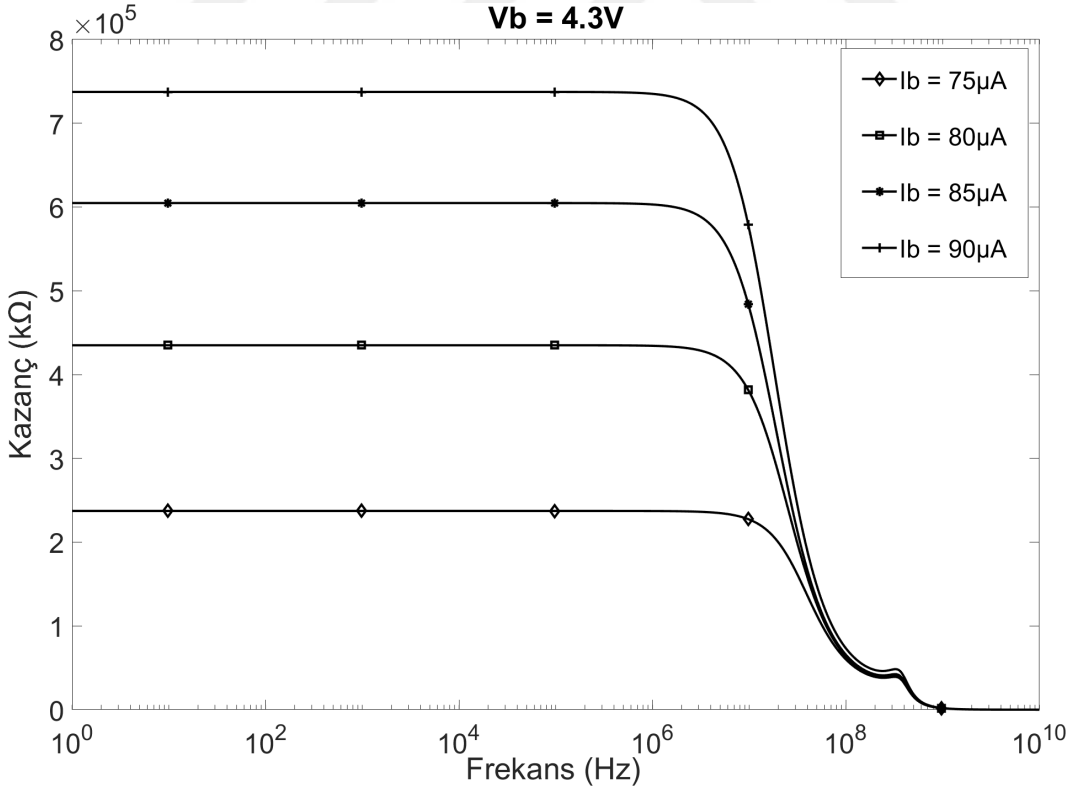
Şekil 6.9 V_b = 3.6V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği



Şekil 6.10 V_b = 3.8V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği



Şekil 6.11 V_b = 4V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği



Şekil 6.12 V_b = 4.3V gerilimi koşulunda frekans yanıtı grafiği

Tablo 6.3 V_b = 3.6V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu

Ib (μA)	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (MHz)
10	99.44	73.45
20	108.89	68.00
30	117.79	64.85
40	125.95	63.66
50	133.25	61.75
60	138.23	60.57

Tablo 6.4 V_b = 3.8V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu

Ib (μA)	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (MHz)
30	130.22	57.00
40	145.70	52.16
50	159.04	50.55
60	170.17	49.52
70	178.02	48.52

Tablo 6.5 V_b = 4V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu

Ib (μA)	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (MHz)
50	180.16	42.04
60	209.00	37.50
70	230.27	37.19
80	244.80	36.49

Tablo 6.6 V_b = 4.3V gerilimi koşulunda kazanç – kesim frekansı tablosu

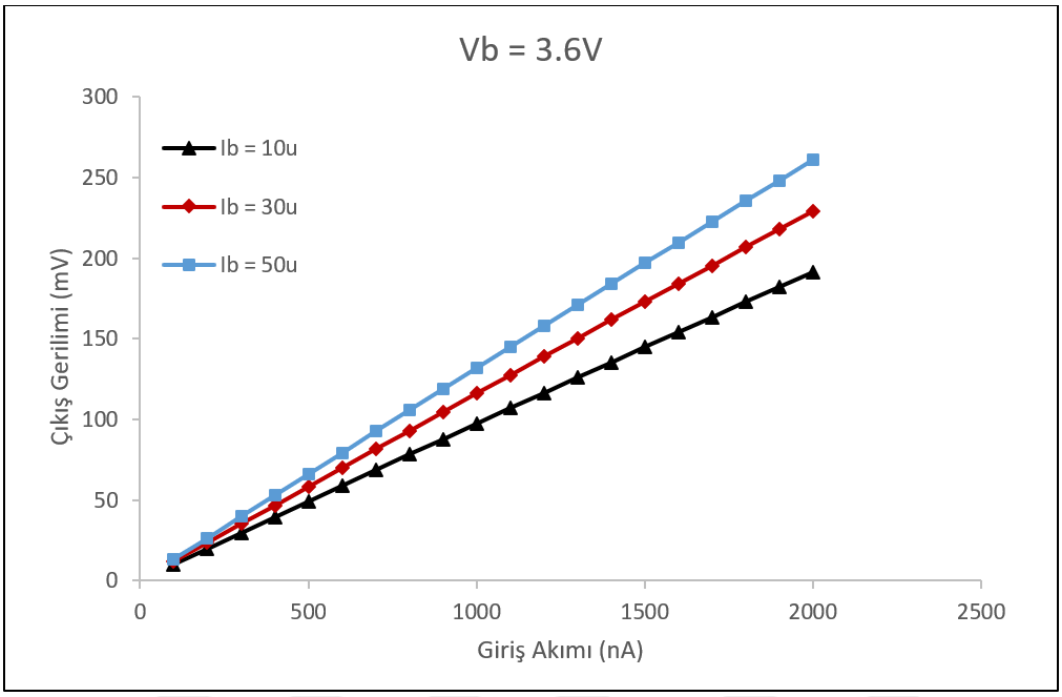
Ib (μA)	Kazanç (kΩ)	Kesim Frekansı (MHz)
80	434.99	17.27
82.5	525.29	14.54
85	604.72	12.88
87.5	674.20	12.75
90	737.37	12.22

6.4.2 Zaman Domeni Analizi

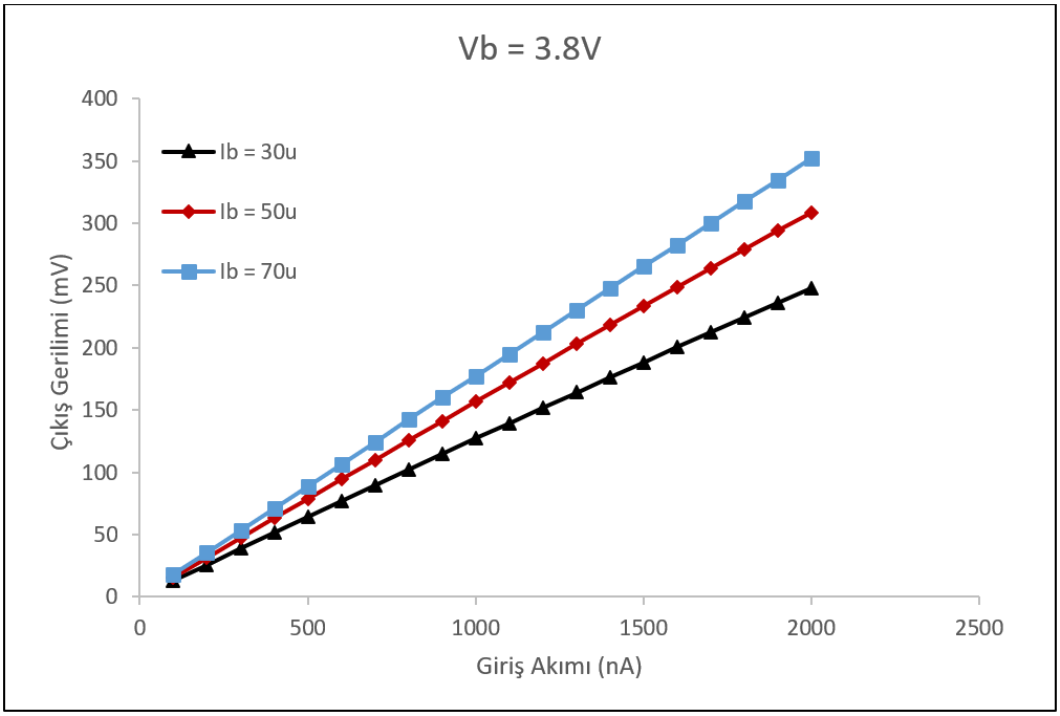
Zaman domeni analizi, farklı V_b gerilimi değerlerinde I_b akımının değişimine göre frekans yanıtı analizinden elde edilen farklı kazanç değerlerine göre gerçekleştirilmiştir. Böylece frekans yanıtı analizlerinde elde edilen farklı kazanç konfigürasyonları denemek mümkün olmaktadır.

Zaman domeni analizinde benzetim ortamında devreye her bir farklı V_b – I_b konfigürasyonunda, darbe formunda giriş akımı 0.1-2 μA aralığında 100 nA adımlarla uygulanmıştır. Farklı kazanç değerleri için elde edilen çıkış gerilimi değerleri giriş akımına karşılık çizdirilerek Şekil 6.13-6.16 arası grafik olarak

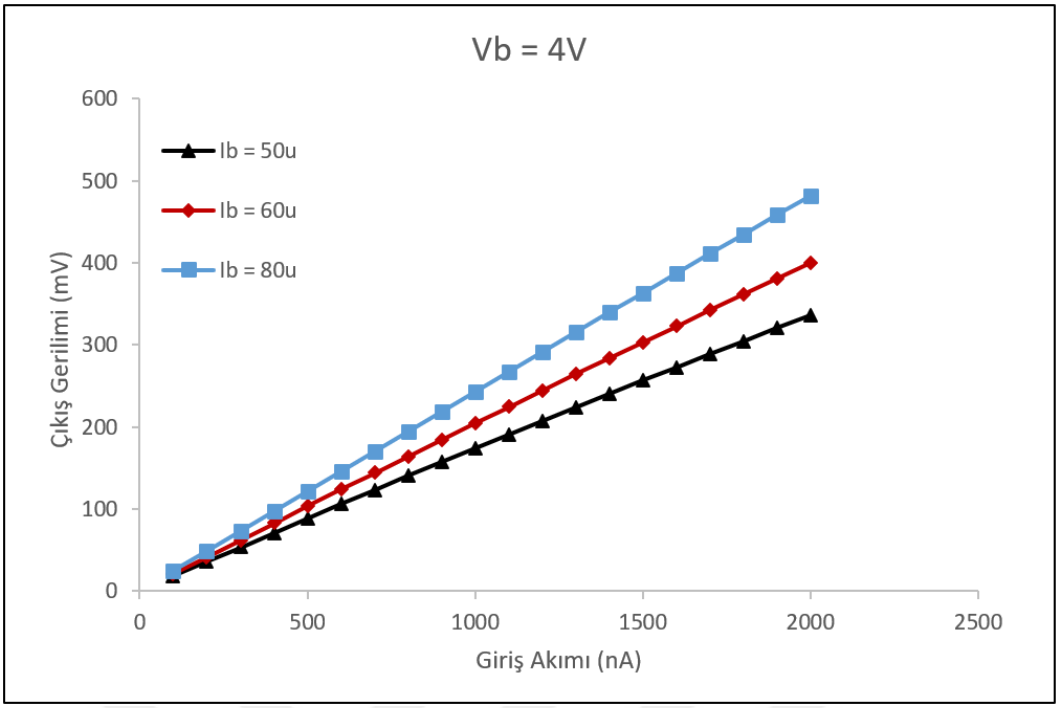
verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde devre çıkışlarının değişken kazanç değerleri için doğrusal olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre farklı I_b akımı ve V_b değerleri konfigürasyonları için farklı kazanç değerleri doğrusal bir şekilde elektronik kazanç ayarı ile elde edilebilir.



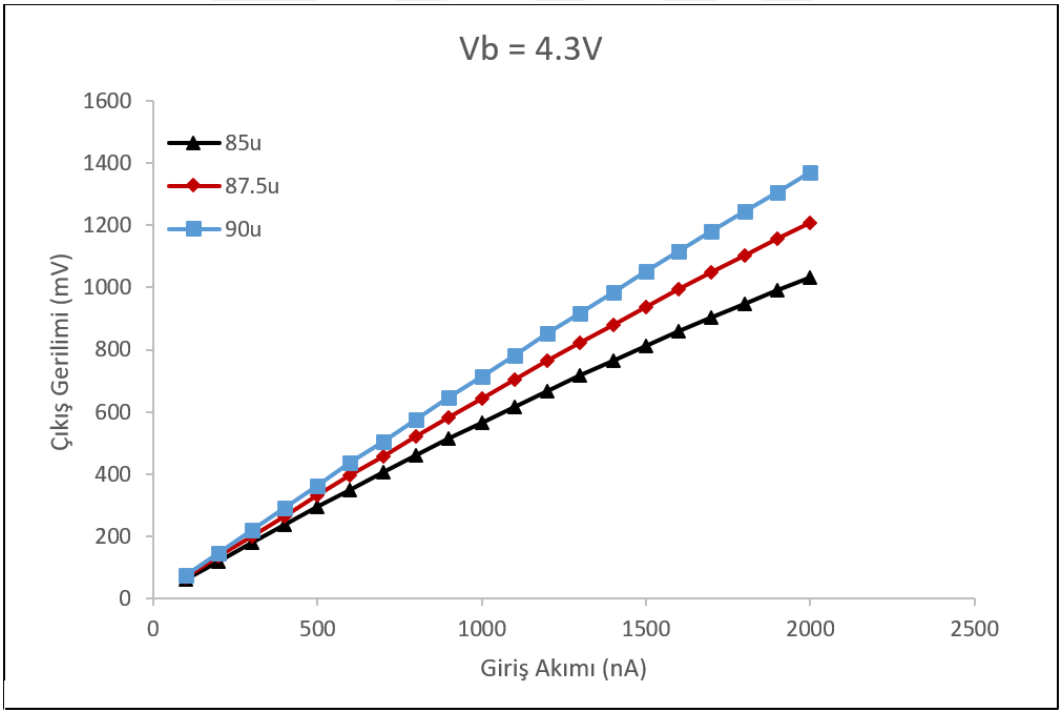
Şekil 6.13 V_b = 3.6V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği



Şekil 6.14 V_b = 3.8V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği



Şekil 6.15 V_b = 4V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği



Şekil 6.16 V_b = 4.3V gerilimi koşulunda giriş akımı – çıkış gerilimi grafiği

Devrenin çıkış geriliminin alındığı uç yapısı Bölüm 4'te verilen CDTA çıkış ucu yapısı ile aynı olmaktadır. Ancak bu yapıda çıkış gerilimi daha geniş giriş akımı değerleri için doğrusal olarak elde edilebilmektedir.

6.5 Bölüm Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde CFTA aktif elemanları ile TIA devresi tasarlanmıştır. Devrede kullanılan CFTA aktif elemanı iç yapısı MOS transistörlerle TSMC 0.18 μm teknoloji parametresine göre oluşturulmuş ve benzetim ortamında analiz edilmiştir. TIA devre yapısında pasif eleman kullanılmamıştır. Yapının kazancı elektronik olarak ayarlanabilirdir. Bu haliyle elektronik olarak ayarlanabilen farklı kazanç ve bant genişliği konfigürasyonları pasif eleman kullanılmadan tek bir aktif elemanla verilmiştir.

TIA devresinin analizi 2 μA giriş akımına kadar test edilmiş ve farklı kazanç değerleri için doğrusal olduğu gösterilmiştir. Bu akım değerleri fotoelektrik hücre uygulamalarından nabız oksimetre gibi TIA devresi kullanımı gerektiren pek çok akım çıkışlı sensör yapısında kullanıma uygundur. TIA devresi kazanç değeri 100 kΩ - 730 kΩ arasında ayarlanabilmektedir. Tasarlanan yapı en yüksek kazancın elde edildiği koşulda (V_b = 4.3 V, I_b = 90 μA) 2.69 mW güç tüketimine sahiptir. Bu yönüyle düşük güç tüketimi uygulamalarında kullanılabilir.

Tasarlanan devrenin girişi düşük, çıkışı yüksek empedanslıdır. Çıkış yüksek empedanslı yükler için uygundur. Düşük empedanslı yük bağlamak için çıkışa tampon devre eklenmelidir.

CFTA aktif elemanı ile oluşturulmuş TIA devre yapısı literatürde yer almamaktadır. Literatürde benzer çıkış ucu yapısına sahip CDTA içeren bir geçiş empedans modlu yapı yer almaktadır. Ancak yapı geçiş empedans modlu filtre devresi olarak kullanılmıştır [71]. Bu bölümde CFTA ile oluşturulan devre yapısının literatürde yer alan geleneksel geribeslemeli Opamp yapısı dışında farklı aktif elemanlı TIA devreleriyle karşılaştırma tablosu Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7 Önerilen devre yapısı ile literatür karşılaştırma tablosu

Ref.	Kullanılan Aktif Eleman	Pasif Eleman Sayısı	Kazanç dBΩ	Elektronik ayarlanabilirlik
[6]	3 OTRA	6 R	48	+
[15]	3 CCII	3 R	111	-
[20]	2 OTA	8R - 8C	159	-
[25]	1 VCII	1 R	52	-
Bu Çalışma	1 CFTA	-	117	+

Literatür çalıştırmalarında pasif eleman kullanmadan gerçekleştirilen TIA devre çalışması bulunmamaktadır. Bu çalışmada önerilen devre yapısı ile pasif eleman kullanmadan elektronik ayarlı bir yapı sunmaktadır.

7
SONUÇ

Bu tezde farklı aktif elemanlar ile TIA devre tasarımları gerçeklenmiş ve bu tasarımlar fotoelektrik hücre deneyleriyle fiziksel olarak test edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda yer alan maddelerde özetlenmiştir.

- Eşit kazançlı geleneksel geribeslemeli Opamp TIA devresi ile CFOA TIA devresi performansları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.
- CDTA aktif elemanı ile bir TIA devresi tasarlanmıştır. Devre benzetim ortamında ve deney ortamında incelenmiştir.
- CDTA ve CDBA aktif elemanları ile bir TIA devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu devre yapısıyla CDTA ile oluşturulan devre yapısına kıyasla daha yüksek kazanç elde edilmiştir. Çalışma benzetim ortamında ve deney ortamında incelenmiştir.
- CFTA aktif elemanı ile bir TIA devresi tasarımı yapılmıştır. Burada CFTA aktif elemanı iç yapısı CMOS transistörler ile TSMC 0.18 μm teknoloji parametresi ile tasarlanmıştır. Tasarlanan yapının çalışma aralığı analiz edilmiştir. Bu aktif eleman ile elektronik olarak kazanç ayarlı bir yapı pasif eleman kullanılmadan elde edilmiştir. Yapının zaman domeni analizi de gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalar esnasında elde edilen kazanç direnci değerlerine göre değişen kesim frekansı değerleri karşılaştırması Tablo 7.1'de verilmiştir. Bu değerler her bir çalışmanın frekans yanıtı analizinde yer alan en yakın direnç değerleri için elde edilmiştir.

Önerilen tasarımlar ile Opamp kullanılan TIA devrelerine göre bant genişliği ve kazanç-bant genişliği açılarından daha avantajlı sonuçlar elde edildiği bilgisayar ortamında gerçekleştirilen benzetimler ve deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir. CDTA ve CDBA aktif elemanları ile gerçekleştirilen çalışmalarda ticari tümdevreler kullanılmıştır. Kullanılan tümdevrelerin doğrusal çalışma aralığı ve aktif eleman parametreleri bu çalışma için uygun değildir. Ayrıca CDTA ve CDBA aktif elemanları ile tasarlanan devre yapılarında boşta bırakılan düşük empedanslı giriş terminali devre çıkış geriliminde gürültüye neden olmaktadır. CFTA aktif elemanı ile gerçekleştirilen tasarımda girişte boşta bırakılan bir terminal bulunmamaktadır.

Bu aktif eleman ile karşılaşılan gürültü probleminin giderilmesi hedeflenmiştir. CFTA aktif elemanı ile gerçekleştirilen tasarımda aktif eleman akım çıkışlı sensör uygulamalarına uygun sınırlarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yapı kazancı elektronik olarak ayarlanabilmektedir. Aynı geçiş empedans kazancı değerleri için en yüksek bant genişliği değerleri CFTA aktif elemanı ile yapılan tasarımda elde edilmiştir.

Tablo 7.1 TIA devreleri kazanç - kesim frekansı karşılaştırma tablosu

TIA Devresi	Kesim Frekansı			
	100 kΩ	240 kΩ	510 kΩ	750 kΩ
GB Kapasitörsüz Opamp TIA	58.8 kHz	60.5 kHz	62.6 kHz	66.7 kHz
GB Kapasitörlü Opamp TIA	12.5 kHz	12.1 kHz	11.0 kHz	10.0 kHz
CFOA TIA	194.5 kHz	112.4 kHz	63.2 kHz	46.5 kHz
CDTA TIA	2.90 MHz	-	-	-
CDTA-CDBA TIA	-	-	-	1.86 MHz
CFTA TIA	73.45 MHz	36.49 MHz	14.54 MHz	12.22 MHz

KAYNAKÇA

[1] P. Jarron, F. Anghinolfi, E. Delagne, W. Dabrowski, L. Scharfetter, "A transimpedance amplifier using a novel current mode feedback loop," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 377, no. 2-3, pp. 435–439, 1996.

[2] R. Tao, M. Berroth, "Wide-band low-power cmos current mode transimpedance preamplifier," in *The 11th IEEE International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 2003. EDMO 2003.*, IEEE, 2003, pp. 128–132.

[3] M. Tavakoli, L. Turicchia, R. Sarpeshkar, "An ultra-low-power pulse oximeter implemented with an energy-efficient transimpedance amplifier," *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, vol. 4, no. 1, pp. 27–38, 2009.

[4] L. B. Oliveira, C. M. Leitao, M. M. Silva, "Noise performance of a regulated cascode transimpedance amplifier for radiation detectors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 9, pp. 1841–1848, 2012.

[5] A. Trabelsi, M. Boukadoum, "Comparison of two cmos front-end transimpedance amplifiers for optical biosensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 657–663, 2012.

[6] R. Pandey, N. Pandey, S. K. Paul, "Electronically tunable transimpedance instrumentation amplifier based on otra," *Journal of Engineering*, vol. 2013, 2013.

[7] M. M. Ibrahim, P. M. Levine, "Cmos transimpedance amplifier for biosensor signal acquisition," in *2014 IEEE international symposium on circuits and systems (ISCAS)*, IEEE, 2014, pp. 25–28.

[8] S.-H. Kim, S.-B. Cho, S. M. Park, "Dual-mode cmos feed-forward transimpedance amplifier for ladars," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 23, pp. 1678–1680, 2014.

[9] Y. Kansu, "A transimpedance amplifier for capacitive micromachined ultrasonic transducers," Ph.D. dissertation, Bilkent Universitesi (Turkey), 2015.

[10] M. Kubo, H. Yotsuda, T. Kosaka, N. Nakano, "A design of transimpedance amplifier using ota as a feedback resistor for patch-clamp measurement system," in *2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, IEEE, 2015, pp. 307–311.

[11] B. Mishra, K. Sharma, P. Choudhary, "A low noise op-amp transimpedance amplifier for ingaas photodetectors," *Int. Research J. of Engg. And Tech.(IRJET)*, vol. 2, no. 5, pp. 54–58, 2015.

[12] W. Shao, H. Zhang, H. Zhou, "A new particle sensor based on true rms value measurement," in *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, IEEE, 2016, pp. 1–6.

[13] S. Fuada, A. P. Putra, Y. Aska, T. Adiono, "Trans-impedance amplifier (ha) design for visible light communication (vlc) using commercially available op-amp," in *2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, IEEE, 2016, pp. 31–36.

[14] H. Arslan, "Farklı giriş frekans değerlerine yönelik transempedans yükselteçlerin geliştirilmesi," Ph.D. dissertation, Necmettin Erbakan University (Turkey), 2018.

[15] A. Nastro, A. D. Marcellis, M. Ferrari, V. Ferrari, "A current-mode transimpedance amplifier for capacitive sensors," in *Proceedings*, MDPI, vol. 2, 2018, p. 1033.

[16] M. C. Dikbaş, U. E. Ayten, "Current and transimpedance mode instrumentation amplifier using a single new active component named cdtra," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 91, pp. 24–36, 2018.

[17] M. Rajabzadeh, D. Djekic, M. Haeberle, J. Becker, J. Anders, M. Ortmanns, "Comparison study of integrated potentiostats: Resistive-tia, capacitive-tia, ct $\sigma\delta$ modulator," in *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, IEEE, 2018, pp. 1–5.

[18] M. Demirtaş, M. A. Erişmiş, S. Güneş, "Analysis and design of a transimpedance amplifier based front-end circuit for capacitance measurements," *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 2, p. 280, 2020.

[19] T. Wey, "Transimpedance amplifier graphical design technique," in *2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, IEEE, 2019, pp. 654–657.

[20] M. Serri, S. Saeedi, "Ultra-low-noise tia topology for mems gyroscope readout," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 118, p. 153 145, 2020.

[21] S. Elsaegh *et al.*, "Low-power organic light sensor array based on active-matrix common-gate transimpedance amplifier on foil for imaging applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, pp. 2553–2566, 2020.

[22] W. Wang, W. Zeng, S. Sonkusale, "A low noise current readout architecture with 160 db transimpedance gain and 1.3 mhz bandwidth," *Microelectronics Journal*, vol. 108, p. 104 984, 2021.

[23] S. R. Desai, N. V. Warke, S. S. Nawatake, "Auto gain ultra low signal transimpedance amplifier for blood diagnostic machine.," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 1084, 2021, p. 012 070.

[24] H. Park, S. Lakshminarayana, C. Pan, H.-J. Chung, S. Jung, "An auto adjustable transimpedance readout system for wearable healthcare devices," *Electronics*, vol. 11, no. 8, p. 1181, 2022.

[25] J. C. García-Montesdeoca, J. A. Montiel-Nelson, J. Sosa, "High gain, low noise and power transimpedance amplifier based on second generation voltage conveyor in 65 nm cmos technology," *Sensors*, vol. 22, no. 16, p. 5997, 2022.

[26] R. Ahmad, A. M. Joshi, D. Boolchandani, "Programmable readout with integrated bandgap reference potentiostat for glucose sensing," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024.

[27] N. Tkachenko, N. Tkachenko, "Chapter 4–optical measurements," *Optical spectroscopy. Elsevier Science, Amsterdam*, pp. 61–87, 2006.

[28] V. Protopopov, *Practical opto-electronics*. Springer, 2014, vol. 10.

[29] P. Hariharan, *Basics of interferometry*. Elsevier, 2010.

[30] S. K. Nayar, D. C. Sims, M. Fridberg, "Towards self-powered cameras," in *2015 IEEE international conference on computational photography (ICCP)*, IEEE, 2015, pp. 1–10.

[31] J. Graeme, *Photodiode amplifiers: op amp solutions*. McGraw-Hill, Inc., 1995.

[32] S. Zvanovec, P. Chvojka, P. A. Haigh, Z. Ghassemlooy, "Visible light communications towards 5g," *Radioengineering*, 2015.

[33] *Thorlabs, large area mounted silicon photodiode, 350-1100 nm, anode grounded*. [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SM05PD1B (visited on 04/21/2024).

[34] Z. Bielecki, K. Achtenberg, M. E. Kopytko, J. A. Mikołajczyk, J. Wojtas, A. W. Rogalski, "Review of photodetectors characterization methods," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 70, no. 2, 2022.

[35] M. W. M. Cunico, J. Carvalho, "Determination of degree of polymerization by low cost photometric system: Application of uv led and photodiode," in *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, ABCM, Natal*, 2011.

[36] *Fyl-5014ubc1c 5mm blue led*. [Online]. Available: https://www.foryard.com/product/91.html (visited on 04/23/2024).

[37] *Pulse-width modulator operates at various levels of frequency and power*. [Online]. Available: https://www.analog.com/en/resources/design-notes/pulsewidth-modulator-operates-at-various-levels-of-frequency-and-power.html (visited on 04/23/2024).

[38] O. Özyurt, "Methods of classifying aerosol types by using scattering of light," in *2022 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, IEEE, 2022, pp. 1–6.

[39] G. Hidy, "Aerosols. encyclopedia of physical science and technology," *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 2003.

[40] K. K. Pahalawatta, R. Green, "Classifying airborne particles," in *2011 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*, IEEE, 2011, pp. 376–381.

[41] H. Axmann, B. Eichberger, "Light scattering device for measuring finest particles in the exhaust of diesel engines.," in *ICINCO (1)*, 2013, pp. 457–462.

[42] O. Özyurt, "The effect of time correlation function, sauter mean diameter and asymmetry ratio on machine learning classifiers for particle discrimination by using light scattering," *Fire Safety Journal*, vol. 141, p. 104 002, 2023.

[43] *Atm 228 aeresol generator*. [Online]. Available: https://www.topas-gmbh.de/en/products/generation/product/atm-228 (visited on 04/21/2024).

[44] *Pda200c - benchtop photodiode amplifier*. [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA200C (visited on 04/21/2024).

[45] M. T. Kavlak, U. E. Ayten, "Transimpedance amplifier design and performance comparison for photoelectric cells," in *2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, IEEE, 2023, pp. 1–5.

[46] H. Kuntman, D. Özenli, "Current feedback operational amplifiers, cfoa, and applications," *Trends in Circuit Design for Analog Signal Processing*, pp. 161–180, 2022.

[47] *Voltage feedback vs. current feedback amplifiers: Advantages and limitations*. [Online]. Available: https://ieee.li/pdf/viewgraphs/current_feedback_vs_voltage_feedback_amplifiers.pdf (visited on 04/24/2024).

[48] D. Ying, D. A. Hall, "Current sensing front-ends: A review and design guidance," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 20, pp. 22 329–22 346, 2021.

[49] J. Caldwell, "Transimpedance amplifiers: What op amp bandwidth do i need?" *Texas Instrum., Dallas, TX, USA, Tech. Rep*, 2014.

[50] *Sensitivity analysis for power supply design*. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/pdf/slva481 (visited on 06/14/2024).

[51] *Analog devices, 60 mhz, monolithic op amp with quad low noise*. [Online]. Available: https://www.analog.com/en/products/ad844.html (visited on 05/03/2024).

[52] *36-v, low-power, precision, cmos, rail-to-rail input/output, low offset voltage, low input bias current op amp.* [Online]. Available: https://www.ti.com/product/OPA2191 (visited on 04/25/2024).

[53] *En 54-7, fire detection and fire alarm systems smoke detectors, point smoke detectors that operate using scattered light, transmitted light or ionization*, 2018.

[54] *Digital storage oscilloscope tbs2000b series*. [Online]. Available: https://www.tek.com/en/products/oscilloscopes/tbs2000 (visited on 04/26/2024).

[55] H. Kuntman, D. Özenli, "Versatile active elements, structure, and applications," *Trends in Circuit Design for Analog Signal Processing*, pp. 225–266, 2022.

[56] F. Kacar, H. H. Kuntman, "A new, improved cmos realization of cdta and its filter applications," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 19, no. 4, pp. 631–642, 2011.

[57] J. Jin, C. Wang, "Current-mode universal filter and quadrature oscillator using cdtas," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 22, no. 2, pp. 276–286, 2014.

[58] *Ca3080 operational transconductance amplifier (ota)*. [Online]. Available: https://www.elde.cz/datasht/ca3080.pdf (visited on 04/30/2024).

[59] *Lm13700 dual operational transconductance amplifiers with linearizing diodes and buffers*. [Online]. Available: https : / / www . ti . com / product / LM13700 (visited on 04/30/2024).

[60] S. Özcan, A. Toker, C. Acar, H. Kuntman, O. Çiçekoğlu, "Single resistance-controlled sinusoidal oscillators employing current differencing buffered amplifier," *Microelectronics Journal*, vol. 31, no. 3, pp. 169–174, 2000.

[61] B. Metin, K. Pal, O. Cicekoglu, "Cmos-controlled inverting cdba with a new all-pass filter application," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 417–425, 2011.

[62] S. Özcan, H. Kuntman, O. Uzhan Çiçekolu, "Cascadable current mode multipurpose filters employing current differencing buffered amplifier (cdba)," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 56, no. 2, pp. 67–72, 2002.

[63] C. Acar, S. Ozoguz, "A new versatile building block: Current differencing buffered amplifier suitable for analog signal-processing filters," *Microelectronics journal*, vol. 30, no. 2, pp. 157–160, 1999.

[64] S. Kumari, M. Gupta, "Design and analysis of high transconductance current follower transconductance amplifier (cfta) and its applications," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 93, pp. 489–506, 2017.

[65] J. Koton, N. Herencsar, M. Venclovsky, "History, progress and new results in synthetic passive element design employing cftas," *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 15–26, 2015.

[66] M. Kumngern, F. Khateb, "Current-mode universal filter and quadrature oscillator using current controlled current follower transconductance amplifiers," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 100, pp. 235–248, 2019.

[67] S. Tasneem, R. K. Ranjan, S. K. Paul, "Low-frequency electronically tunable fractional filter and its implementation as neural network," *J. Circuits, Syst. Comput*, vol. 2450037, 2023.

[68] H. D. Dammak, S. Bensalem, S. Zouari, M. Loulou, "Design of folded cascode ota in different regions of operation through gm/id methodology," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 178–183, 2008.

[69] C. Yang, Y. Huang, B. L. Hassler, R. M. Worden, A. J. Mason, "Amperometric electrochemical microsystem for a miniaturized protein biosensor array," *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, vol. 3, no. 3, pp. 160–168, 2009.

[70] H. Daoud, S. B. Salem, S. Zouari, M. Loulou, “Folded cascode ota design for wide band applications,” in *International Conference on Design and Test of Integrated Systems in Nanoscale Technology, 2006. DTIS 2006.*, IEEE, 2006, pp. 437–440.

[71] N. Shah, M. Quadri, S. Iqbal, “Cdta based transimpedance type first-order all-pass filter,” *WSEAS Transactions on Electronics*, vol. 5, no. 6, pp. 280–284, 2008.

A
MOS TRANSİSTÖR PARAMETRELERİ

Bu ek bölümünde CFTA aktif elemanı tasarımında kullanılan MOS transistör parametreleri verilmiştir.

A.1 NMOS Parametreleri

.MODEL cmosn NMOS (LEVEL = 7 +VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 4.1E-9 +XJ = 1E-7 NCH = 2.3549E17 VTH0 = 0.3662473 +K1 = 0.5864999 K2 = 1.127266E-3 K3 = 1E-3 +K3B = 0.0294061 W0 = 1E-7 NLX = 1.630684E-7 +DVT0W = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0 +DVT0 = 1.2064649 DVT1 = 0.4215486 DVT2 = 0.0197749 +U0 = 273.8094484 UA = -1.40499E-9 UB = 2.408323E-18 +UC = 6.504826E-11 VSAT = 1.355009E5 A0 = 2 +AGS = 0.4449958 B0 = 1.901075E-7 B1 = 4.99995E-6 +KETA = -0.0164863 A1 = 3.868769E-4 A2 = 0.4640272 +RDSW = 123.3376355 PRWG = 0.5 PRWB = -0.197728 +WR = 1 WINT = 0 LINT = 1.690044E-8 +XL = 0 XW = -1E-8 DWG = -4.728719E-9 +DWB = -2.452411E-9 VOFF = -0.0948017 NFACTOR = 2.1860065 +CIT = 0 CDSC = 2.4E-4 CDSCD = 0 +CDSCB = 0 ETA0 = 2.230928E-3 ETAB = 6.028975E-5 +DSUB = 0.0145467 PCLM = 1.3822069 PDIBLC1 = 0.1762787 +PDIBLC2 = 1.66653E-3 PDIBLCB = -0.1 DROUT = 0.7694691 +PSCBE1 = 8.91287E9 PSCBE2 = 7.349607E-9 PVAG = 1.685917E-3 +DELTA = 0.01 RSH = 6.7 MOBMOD = 1 +PRT = 0 UTE = -1.5 KT1 = -0.11 +KT1L = 0 KT2 = 0.022 UA1 = 4.31E-9 +UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11 AT = 3.3E4 +WL = 0 WLN = 1 WW = 0 +WWN = 1 WWL = 0 LL = 0 +LLN = 1 LW = 0 LWN = 1 +LWL = 0 CAPMOD = 2 XPART = 0.5 +CGDO = 8.23E-10 CGSO = 8.23E-10 CGBO = 1E-12 +CJ = 9.466429E-4 PB = 0.8 MJ = 0.3820266 +CJSW = 2.608154E-10 PBSW = 0.8 MJSW = 0.102322 +CJSWG = 3.3E-10 PBSWG = 0.8 MJSWG = 0.102322 +CF = 0 PVTH0 = -2.199373E-3 PRDSW = -0.9368961 +PK2 = 1.593254E-3 WKETA = -2.880976E-3 LKETA = 7.165078E-3 +PU0 = 6.777519 PUA = 5.505418E-12 PUB = 8.84133E-25 +PVSAT = 2.006286E3 PETA0 = 1.003159E-4 PKETA = -6.759277E-3 +NOIMOD=2.0E+00 NOIA=1.3182567385564E+19 +NOIB=144543.977074592 NOIC=-1.24515784572817E-12 EF=0.92 EM=41000000)

A.2 PMOS Parametreleri

.MODEL cmosp PMOS (LEVEL = 7 +VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 4.1E-9 +XJ = 1E-7 NCH = 4.1589E17 VTH0 = -0.3906012 +K1 = 0.5341312 K2 = 0.0395326 K3 = 0 +K3B = 7.4916211 W0 = 1E-6 NLX = 1.194072E-7 +DVT0W = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0 +DVT0 = 0.5060555 DVT1 = 0.2423835 DVT2 = 0.1 +U0 = 115.6894042 UA = 1.573746E-9 UB = 1.874308E-21 +UC = -1E-10 VSAT = 1.130982E5 A0 = 1.9976555 +AGS = 0.4186945 B0 = 1.949178E-7 B1 = 6.422908E-7 +KETA = 0.0166345 A1 = 0.4749146 A2 = 0.300003 +RDSW = 198.321294 PRWG = 0.5 PRWB = -0.4986647 +WR = 1 WINT = 0 LINT = 2.94454E-8 +XL = 0 XW = -1E-8 DWG = -2.798724E-8 +DWB = -4.83797E-10 VOFF = -0.095236 NFACTOR = 2 +CIT = 0 CDSC = 2.4E-4 CDSCD = 0 +CDSCB

= 0 ETA0 = 1.035504E-3 ETAB = -4.358398E-4 +DSUB = 1.816555E-3 PCLM = 1.3299898 PDIBLC1 = 1.766563E-3 +PDIBLC2 = 7.728395E-7 PDIBLCB = -1E-3 DROUT = 1.011891E-3 +PSCBE1 = 4.872184E10 PSCBE2 = 5E-10 PVAG = 0.0209921 +DELTA = 0.01 RSH = 7.7 MOBMOD = 1 +PRT = 0 UTE = -1.5 KT1 = -0.11 +KT1L = 0 KT2 = 0.022 UA1 = 4.31E-9 +UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11 AT = 3.3E4 +WL = 0 WLN = 1 WW = 0 +WWN = 1 WWL = 0 LL = 0 +LLN = 1 LW = 0 LWN = 1 +LWL = 0 CAPMOD = 2 XPART = 0.5 +CGDO = 6.35E-10 CGSO = 6.35E-10 CGBO = 1E-12 +CJ = 1.144521E-3 PB = 0.8468686 MJ = 0.4099522 +CJSW = 2.490749E-10 PBSW = 0.8769118 MJSW = 0.3478565 +CJSWG = 4.22E-10 PBSWG = 0.8769118 MJSWG = 0.3478565 +CF = 0 PVTH0 = 2.302018E-3 PRDSW = 9.0575312 +PK2 = 1.821914E-3 WKETA = 0.0222457 LKETA = -1.495872E-3 +PU0 = -1.5580645 PUA = -6.36889E-11 PUB = 1E-21 +PVSAT = 49.8420442 PETA0 = 2.827793E-5 PKETA = -2.536564E-3 + NOIMOD=2.0E+00 NOIA=3.57456993317604E+18 NOIB=2500 + NOIC=2.61260020285845E-11 EF=1.1388 EM=41000000)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. M. T. Kavlak and U. E. Ayten, "Transimpedance Amplifier Design and Performance Comparison for Photoelectric Cells," 2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkiye, 2023, pp. 1-5