



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DOKTORA TEZİ

NÖROMORFİK DEVRE TASARIMI ve YENİ UYGULAMALARI

MELİH YILDIRIM

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. FIRAT KAÇAR

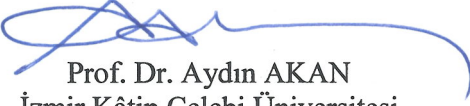
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

İSTANBUL-2018

Bu çalışma, 23.11.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi


Prof. Dr. Fırat KAÇAR (Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Prof. Dr. Aydın AKAN
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi


Doç. Dr. Emre ARSLAN
Marmara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç. Dr. Yasın ÖZÇELEP
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahım AKGÜNDOĞDU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



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

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim süresince değerli vaktini ayırarak bana her konuda yardımcı olan ve kendisini tanımış olmaktan mutluluk duyduğum danışmanım Prof. Dr. Fırat KAÇAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan ve tezimin her aşamasında desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Aydın AKAN ve Doç. Dr. Emre ARSLAN'a, ayrıca tez çalışmama katkıda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Yunus BABACAN'a teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her döneminde daima yanımda olan, bana sürekli destek veren, yol gösteren ve bu zamana kadar elde ettiğim başarıların gerçekleşmesine özveriyle katkıda bulunan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2018

Melih YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	8
2.1. DÖRDÜNCÜ PASİF DEVRE ELEMANI MEMRİSTÖR	8
2.2. RETİNANIN YAPISI VE HÜCRE ÖZELLİKLERİ	12
2.3. KONVOLÜSYON TEORİSİ VE SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEMEDE KULLANILAN MASKELEME KAVRAMI	15
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	18
3.1. EŞİKALTI BÖLGEDE MOS TRANSİSTÖRÜN LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞI.....	18
3.2. İŞLEMSEL GEÇİŞ İLETKENLİĞİ KUVVETLENDİRİCİSİ (OTA)	21
3.3. MEMRİSTÖR FUSE YAPISI	23
3.4. AKIM AYNASI VE AKIM ÇIKARICI DEVRE YAPISI	25
3.5. LATERAL İNHİBİSYON BİYOLOJİK OLAYI	27
3.6. LAPLACIAN FİLTRELEME YÖNTEMİ	33
4. BULGULAR.....	36
4.1. MEMRİSTÖR TABANLI RETİNOMORFİK GRID MİMARİSİ.....	36
4.1.1. Yeni Memristör Taklit Devresi Tasarımı	36
4.1.2. Lineer Olmayan Direnç Olarak Memristör Fuse Kullanılması	38
4.1.3. Retina-İlhamlı Piksel Devresi.....	40
4.1.4. Memristif Retinomorfik Grid Yapısı.....	42
4.1.5. Analiz Sonuçları	44
4.2. LATERAL İNHİBİSYON OLAYINI GERÇEKLEŞTİREN RETİNOMORFİK DEVRE YAPISI.....	46

4.2.1. Lateral İnhibisyon Olayına Ait Maske Katsayıların Elde Edilmesi	46
4.2.2. Retina-İlhamlı Tek Bir Piksel Devresi	47
4.2.3. Grid Yapıda Retina Mimarisi	50
4.2.4. Analiz Sonuçları	52
4.2.4.1. Kenar İyileştirme	52
4.2.4.2. Kenar Algılama.....	53
4.3. LAPLACIAN FİLTRELEME METODU TABANLI RETİNOMORFİK ANALOG GÖRÜNTÜ İŞLEME DEVRESİ	56
4.3.1. Retinanın Taklit Edilmesi Yardımıyla Oluşturulan Piksel Devre Mimarisi	56
4.3.2. Konvolüsyon İşlemine Gerçekleştiren Retina-İlhamlı Laplacian Filtre Tabanlı Analog İmge İşleyici.....	59
4.3.3. Analiz Sonuçları	62
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Temel elektriksel ifadelerden pasif devre elemanlarının elde edilmesi [40].	10
Şekil 2.2: Memristör elemanı gerilim-akım karakteristiği.	11
Şekil 2.3: Memristör elemanının (a) ilk durumu (b) tam iletim durumu (c) tam kesim durumu [40].	12
Şekil 2.4: Retinanın Yapısı.	13
Şekil 2.5: Rod fotoreseptörünün (a) karanlıkta (b) aydınlıkta davranışı [59].	14
Şekil 2.6: Silikon retinanın fonksiyonel diyagramı [10].	15
Şekil 2.7: Konvolüsyon işleminin matematiksel açıklaması.	17
Şekil 3.1: Eşik altı ve eşik üstü bölge için drain akımı [61].	19
Şekil 3.2: OTA'nın (a) devre sembolü (b) ideal eşdeğer devresi (c) basit bir CMOS devresi.	22
Şekil 3.3: Memristör fuse yapısı.	23
Şekil 3.4: Grid mimaride (a) memristör ve (b) memristör fuse kullanmanın memristans değerine olan etkisi.	24
Şekil 3.5: (a) NMOS (b) bipolar transistörlerden oluşan basit akım kaynağı yapısı.	25
Şekil 3.6: Akım çıkarıcı devre yapısının temel konsepti.	27
Şekil 3.7: Retinal hücrelerdeki merkez-çevre reseptif alanı yapısı [59].	28
Şekil 3.8: Retinada meydana gelen lateral inhibisyonun mekanizması ve matematiksel olarak açıklanması.	29
Şekil 3.9: Retinanın (a) lateral inhibisyon olmadan ve (b) lateral inhibisyon ile verdiği yanıt.	31
Şekil 3.10: Kontrast oranlarının farklılığının kenarların belirginliğine etkisi.	31
Şekil 3.11: İçinde iki adet kare şekli bulunan dikdörtgen (a) kademeli olarak gri arka planlı ve (b) beyaz arka planlı.	32
Şekil 3.12: 6 farklı gri tonundan oluşan görüntü.	33
Şekil 4.1: Önerilen yeni memristör taklit tasarımı ve kutupları [63].	37

Şekil 4.2: 1Hz, 5Hz ve 10Hz frekansları için memristöre ait histerezis eğrisi [63].....	38
Şekil 4.3: Lineer olmayan dirence ait V-I karakteristiği	39
Şekil 4.4: Önerilen memristör fuse yapısına ait V-I karakteristiği [63].....	40
Şekil 4.5: (a) İnsan retinasındaki OPL yapısı (b) bu yapının elektronik devre elemanlarıyla taklit edilmesi [63].....	42
Şekil 4.6: Retinaya ait retinomorfik grid devre yapısı [15].	43
Şekil 4.7: Memristör taklit devresindeki OTA'ya ait g_m değişiminin görüntüye etkisi (a) gürültüsüz giriş görüntüsü için (b) gürültülü giriş görüntüsü için [63].....	45
Şekil 4.8: Lateral inhibisyon maskesine ait katsayılar.	47
Şekil 4.9: Retina-ilhamlı tek bir piksel devre tasarımı.....	49
Şekil 4.10: Önerilen devre için grid yapıya sahip retina mimarisi.....	51
Şekil 4.11: (a) Giriş görüntüsü (b) lateral inhibisyon öncesinde ve lateral inhibisyon sonrasında oluşan parlaklık değişiminin uzaysal domainde gösterimi.....	53
Şekil 4.12: (a) Giriş görüntüsü (b) kenar algılama maskelemesi öncesinde ve sonrasında ortaya çıkan normalize edilmemiş parlaklık değerleri (c) normalize edilmiş çıkış görüntüsü.	55
Şekil 4.13: (a) Retina-ilhamlı piksel devresi (b) sembolü.	58
Şekil 4.14: Konvolüsyon işlemi gerçekleştirilebilmek amacıyla yapılan merkez piksel ve komşuluğunda bulunan pikseller arasındaki bağlantı.....	61
Şekil 4.15: (a) Kuş görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.	64
Şekil 4.16: (a) Fotoğrafçı görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.	64
Şekil 4.17: (a) Yavru aslan görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.	65
Şekil 4.18: Sincap görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.....	65

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: Analizlerde kullanılan 0.18 μ m TSMC CMOS parametreleri.	20
Tablo 4.1: Memristör devresine ait bileşenler ve giriş gerilim değerinin listesi [63].....	38
Tablo 4.2: Kenar iyileştirme devresi için devre parametreleri.	49
Tablo 4.3: Kenar algılama devresi için devre parametreleri.....	50
Tablo 4.4: Retina-ilhamlı piksel devresine ait devre bileşenleri ve giriş akımına ait aralıklar.....	59
Tablo 4.5: Akım çıkışları için normalizasyon değerleri ve akım yönleri listesi.....	62

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
C	: Kondansatör.
D	: Memristörün toplam genişliği.
g_m	: OTA için iletkenlik katsayısı.
i	: Akım.
I_A	: OTA kuyruk akımı.
I_D	: MOS transistörün drain akımı.
I_{D0}	: MOS transistörün sızıntı drain akımı.
L	: Bobin.
M	: Memristör.
Na	: Sodyum.
q	: Elektrik yükü.
R	: Direnç.
R_{OFF}	: Memristörün kesim durumunda direnci.
R_{ON}	: Memristörün iletim durumunda direnci.
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık değeri.
V	: Gerilim.
V_{BE}	: Bipolar transistörün base-emitter gerilimi.
V_{DD}	: Besleme gerilimi.
V_{SS}	: Besleme gerilimi.
V_{DS}	: MOS transistörün drain-source gerilimi.
V_{GS}	: MOS transistörün gate-source gerilimi.
V_T	: Eşik gerilimi.
x	: Memristörün katkılı bölge genişliğinin memristörün toplam genişliğine oranı.
w	: Memristörün katkılı bölge genişliği.
W/L	: MOS transistör için kanal genişliğinin kanal uzunluğuna oranı.
Φ	: Manyetik akı.
μ_v	: Elektron mobilitesi.

Kısaltmalar	Açıklama
cGMP	: Cyclic Guanosine Monophosphate.
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor.
DO-OTA	: Dual-Output OTA.
INL	: Inner Nuclear Layer.
LoG	: Laplacian of Gaussian.
LSI	: Large Scale Integration.
MOS	: Metal-Oxide Semiconductor.
ONL	: Outer Nuclear Layer.
OPL	: Outer Plexiform Layer.
OTA	: Operational Transconductance Amplifier.

ÖZET

DOKTORA TEZİ

NÖROMORFİK DEVRE TASARIMI ve YENİ UYGULAMALARI

Melih YILDIRIM

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Fırat KAÇAR

Bu tez çalışması farklı nöromorfik devre tasarımlarını ve retina-ilhamlı analog görüntü işleme uygulamalarını içermektedir. Yapılan çalışmanın ilk bölümünde, 4. pasif devre bileşeni olarak ortaya çıkan memristör elemanından faydalanılarak elde edilen memristör fuse tabanlı retina mimarisi önerilmiştir. Tezde kullanılan memristör taklit devresi SPICE modellemesi yerine aktif ve pasif elektronik devre bileşenleri kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca bu eleman tıpkı biyolojik sistemler gibi lineer olmayan davranış sergilemekte olup, retina taklit devresi için oldukça uygundur.

Çalışmanın ikinci bölümünde, retinada meydana gelen bir biyolojik olay olan lateral inhibisyon özelliği gösteren devre mimarisi verilmiştir. Analog görüntü işleme karakteristiğine sahip bu devre ile kenar iyileştirme ve kenar algılama metotları başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sadece MOS (Metal-Oxide Semiconductor) transistörlerden oluşan analog devre tasarımında akım aynaları ve akım çıkarıcı devre yapısı kullanılmıştır. Ayrıca bu mimaride sayısal görüntü işlemede kullanılan konvolüsyon teorisinden ve görüntü maskeleyme kavramından yararlanılmıştır.

Çalışmanın en son kısmında, Laplacian filtre tabanlı analog görüntü işleme özelliğine sahip özgün bir devre mimarisi verilmiştir. İmgenin en küçük parçası piksel olduğundan ötürü öncelikle tek bir piksele ait retina-ilhamlı devre sunulmuştur. Piksel devresinin yapısında lateral inhibisyon devresindeki yapı modifiye edilerek kullanılmıştır. Daha sonra konvolüsyon

ve Laplacian maskeleye teorilerine uygun bir biçimde piksel bağlantıları yapılarak 100x100 pikselden meydana gelen grid mimari tasarlanmıştır.

Tez çalışmasının tamamında yapılan analiz sonuçları beklenen sonuçlar ile uyumlu olarak başarıyla elde edilmiştir.

Kasım 2018, 88 sayfa.

Anahtar kelimeler: Analog görüntü işleme, biyo-ilham, konvolüsyon, memristör, nöromorfik.



SUMMARY

Ph.D. THESIS

NEUROMORPHIC CIRCUIT DESIGN and ITS NEW APPLICATIONS

Melih YILDIRIM

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Fırat KAÇAR

This thesis includes neuromorphic circuit designs and retina-inspired analog image processing applications. In the first part of the conducted study, memristor fuse based retina architecture which is obtained utilizing memristor as a fourth passive circuit component is proposed. Memristor emulator circuit in this thesis is designed using active and passive electronic circuit components instead of SPICE model. In addition, this element displays non-linear characteristic just like biological systems and is quite suitable for retina-inspired circuit.

Circuit architecture which exhibits the behavior of lateral inhibition, a biological phenomenon occurring in retina, is presented in the second part of study. Edge enhancement and edge detection methods are successfully achieved with this circuit having the feature of analog image processing. Current mirrors and current subtractor circuit structure are used in the analog circuit design consisting of only MOS (Metal-Oxide Semiconductor) transistors. Moreover, convolution theory and image masking concept in digital image processing are utilized in this architecture.

In the last part of this study, a novel circuit architecture providing Laplacian filter based analog image processing feature is given. Since pixel is the smallest part in an image, a single pixel circuit mimicking the retina is first of all suggested. Structure in the lateral inhibition emulator

circuit is modified and employed. Then, a grid architecture of 100x100 pixels is designed making pixel connections according to convolution and Laplacian masking theories.

Analysis results carried out on the entire thesis work are successfully obtained in accordance with the expected results.

November 2018, 88 pages.

Keywords: Analog image processing, bio-inspired, convolution, memristor, neuromorphic.



1. GİRİŞ

Uzun zamandan beri araştırmacılar canlı hücrelerinde meydana gelen elektriksel faaliyetleri karakterize etme ile ilgili çalışmalarını sürdürmektedir. Hücredeki elektriksel faaliyetlerin nasıl meydana geldiğini anlayarak insan vücudunda bulunan sinir sisteminin çalışmasını ve vücut fonksiyonlarının beyin tarafından nasıl kontrol edildiğini öğrenmeye çalışmışlardır. Sinir sisteminde meydana gelen elektriksel faaliyetlerin donanımsal devreler yardımıyla gerçekleşmesi sayesinde büyük ölçekli nöral sistemlerin modellenmesi, gerçek zamanlı davranış gösteren sistemlerin oluşturulması ve beyin-bilgisayar arasında ara-yüz oluşturulmasını sağlayan elektronik devreler gibi çok sayıda uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Bu tip yapılar nöromorfik devre olarak adlandırılmakta olup, sinir sisteminin transistör gibi devre elemanlarıyla taklit edilmesiyle oluşturulabilmektedir. Nöron sistemlerin taklit edilmesi silikon nöron olarak da bilinir [1]. Nöromorfik devre yapıları ile alakalı çalışmalar silikon nöron yapısının analog devrelerde kullanılmasının 100 kat daha fazla verimlilik getirdiğini ve sayısal sistemlere göre 10000 kat daha düşük güç ile çalışmasını sağladığını göstermiştir. Nöromorfik devreler alışlagelmiş devrelere göre sunduğu daha çok verimlilik ve daha az güç tüketimi gibi özelliklerinden dolayı bilim adamlarının ilgisini çekmiştir [2].

Nöromorfik alanında gözün önemli bir parçası olan retina ile alakalı çok sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır [3-13]. İnsan retinasında bulunan ve fotoreseptör, horizontal, bipolar, amakrin, ganglion hücre olarak adlandırılan beş hücre, retinanın temel yapısını oluşturmaktadır. Misha A. Mahowald ve Carver Mead tarafından yapılan ve literatürde öncülük eden çalışmada retinaya ait 5 katmandan 3'ünün 1991 yılında elektronik ortamda taklit edilmesi başarıyla gerçekleştirildi [10]. Nöromorfik teknoloji alanında silikon retina ile alakalı gerçekleştirilen bilimsel çalışmaların artmasından dolayı Kwabena Boahen tarafından ilk kez retina ile ilgili yapılan nöromorfik çalışmalar için "Retinomorfik" terimi ortaya atıldı [6]. Kareem Zaghloul ise yürüttüğü çalışmada retinanın yapısında bulunan 5 katmanın tamamını taklit etmeyi başardı [12].

Gerilim, akım, elektrik yükü ve manyetik akı olmak üzere 4 adet bulunan temel elektriksel ifadelerin arasındaki bağlantılar 3 farklı pasif devre elemanının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Gerilim ile akım arasındaki ilişki direnci, gerilim ile elektrik yükü arasındaki ilişki kapasitörü ve akım ile manyetik akı arasındaki ilişki ise bobini meydana getirir. Buradan yola çıkarak elektrik yükü ile manyetik akı arasındaki ilişkinin de bir pasif devre elemanını ifade etmesi beklenmektedir. Leon Ong Chua 1971 yılında ilk kez elektrik yükü ile manyetik akı arasında bağlantıdan yola çıkarak memristör adındaki iki uçlu pasif devre elemanını ortaya atmıştır. Bu devre elemanında akım ile gerilim değerleri arasında lineer olmayan bir ilişki vardır. Yani ortaya atılan bu yeni pasif devre elemanı lineer olmayan bir karakteristiğe sahiptir. Biyolojik sistemlerin de lineer olmayan davranış göstermeleri, retinomorfik yapılar için memristör kullanmanın uygun olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Fakat memristörün kutuplu bir devre elemanı olmasından dolayı grid retina mimarisinde kullanılması uygun değildir. Konu ile alakalı yapılan önceki çalışmalarda birden fazla eş memristörün gerek seri, gerekse paralel olarak farklı biçimlerde bağlanmasıyla memristör fuse yapısı elde edilmiştir [14-17]. Grid retina yapısı kutupsuz devre elemanlarına ihtiyaç duymaktadır. Bu durum her bir piksel çıkışlarının arasında memristör fuse yapısı kullanılarak sağlanabilir. Yapılan bu çalışmada memristör için hedeflenen V-I karakteristiğini elde edebilmek için memristör fuse yapısı kullanılmıştır. Ayrıca memristör yapısının kullanıldığı retinomorfik devrelere ait yapılan önceki çalışmalarda memristör taklit yapısının değil de sadece memristör SPICE modellemelerin kullanıldığı görülmektedir. Yani akademik çalışmalarda memristör tabanlı retinomorfik devrelerde kullanılan memristör taklit devresi eksikliği bulunmaktadır.

Işığı nöral bir sinyale dönüştürmekten sorumlu olan retina, görme sisteminde hayati bir öneme sahiptir. Retinada meydana gelen ve lateral inhibisyon diye adlandırılan biyolojik olay 1866 yılında ilk kez Ernst Mach tarafından tespit edilmiştir. Lateral inhibisyon olayının merkez piksel ve komşuluğunda bulunan pikseller arasında bir takım diferansiyel işlemler gerçekleştirilerek uzaysal (spatial) domainde görüntünün kayda değer bir biçimde kontrastının artmasına sebep olarak görüntüde iyileştirmeye yardımcı olduğu tespit edilmiştir [18].

Fotoreseptör tarafından alınan sinyaller beyin görmeden sorumlu yeri olan görme korteksine direkt olarak iletilmezler. Retina, kimyasal ve elektriksel bir takım aşamalar vasıtasıyla ışık sinyalini beyin için anlamlı bir nöral sinyale çevirme özelliğine sahiptir. Bu aşamalardan biri de lateral inhibisyon olarak bilinmektedir. Lateral inhibisyon işleminin “inhibisyon” kelimesinin sahip olduğu olumsuz anlamdan dolayı retinal sistemin görme yeteneğini azaltacağı zannedilmektedir. Ancak gerçekte bu biyolojik olay insan görüşünde iyileştirme

sağlamaktadır. İnsan gözünün biyolojik mekanizmasında, görme sinirinde meydana gelen bir eksitasyon durumu bu sinirin komşuluğunda bulunan görme sinirindeki faaliyetin inhibe olmasına neden olur. Örneğin bir grup görme sinir hücrelerinin olduğunu varsayalım. Bu gruptaki sinir hücreleri arasında orta kısımda bulunan nöron merkez nöron olarak adlandırılırken, tüm diğer nöronlar komşu nöronlar olarak adlandırılır. Merkez nöronun yoğun bir biçimde uyarılması merkez nöron kadar uyarılmayan komşu sinir hücrelerinin horizontal hücreler tarafından merkez nörona göre daha fazla inhibe edilmesini sağlar. Bu sayede merkez nörondan gelen sinyalin algılanmasının daha iyi bir şekilde olması sağlanır. Bundan dolayı, kenar bölgelerinin yani sağ ya da sol bölgenin parlaklığının diğer bölgeden daha fazla olduğu (yoğun uyarılma durumu) yerlerin daha keskin bir biçimde görülmesi mümkün olur. Lateral inhibisyon, retinada yapısında horizontal hücrelerde ve amakrin hücrelerde meydana gelir. Bipolar hücreler ile fotoreseptör arasında meydana gelen sinaptik kazancın düzenlenmesi horizontal hücreler tarafından gerçekleştirilir [19].

Lateral inhibisyonla ilgili detaylı bir çalışma 1967 yılında Georg von Bekesy tarafından yapılmıştır [20]. Bu çalışmanın dışında lateral inhibisyon olayının elektronik devre şeklinde gerçekleştirilmesiyle alakalı [21-23] ve silikon model tasarımı şeklinde yapılan [18,20,24-26] çalışmalar mevcuttur.

Akademik çalışmalarda en çok tercih edilen duyu organı parçası olan retina, hareketli ve hareketsiz nesnelere algılanması için iyi bir şekilde tasarlanmıştır [27]. Retinada bulunan hücreler, nesnelere gelen ışık sinyali bilgisini etkili bir biçimde iletebilmek için karmaşık yapılar geliştirmiştir [28]. Böylelikle insan beyni nesnenin orijinal halinin farklı ancak daha iyi bir şekliyle algılar. İnsan retinası dış retina ve iç retina olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Retinanın her bir kısmı görme fonksiyonu için önemli bir role sahiptir [12]. Horizontal hücreler dış retinada bulunmakta olup, fotoreseptörler retinanın bu kısmında bipolar hücrelere bağlıdır. Amakrin hücreler ise iç retinada yer almakta olup, bipolar hücreler ise retinanın bu kısmında ganglion hücrelere bağlı olarak yer almaktadır [19].

Görüntü işleme, görüntünün iyileştirilmesini sağlamak ve görüntüden gerekli bilgiyi elde edebilmek için görüntü üzerinde filtreleme (maskeleyme) yardımıyla gerçekleştirilen matematiksel işlemler olarak tanımlanabilir. Akademik çalışmalarda çeşitli sayıda filtreleme yöntemleri tercih edilmiştir. S. Siskos [29] tarafından yapılan çalışmada, en etkili lineer olmayan filtreleme yöntemlerinden biri olan medyan filtreleme tekniği kullanılmıştır. Lineer

olmayan filtreleme yapısı, karşılaştırmacı devresi ve CMOS tabanlı düşük gerilimli akım modlu devrelerden oluşan minimum/maksimum değer seçici ile gerçekleştirilmiştir. Bu filtre yapısı analog görüntü işleme uygulamalarında faydalanılmaktadır. T. Taguchi ve arkadaşları [30] 64x64 piksellik analog görüntü işleme özelliğine sahip geniş ölçekli tümleşik (Large Scale Integration-LSI) devresi önermiştir. Önerilen görüntü filtreleme LSI devresi programlanabilme ve piksel hafıza birimi dizisi ile paralel işlem yapabilme özelliklerine sahiptir. Sahip olduğu programlanabilme mimarisi sayesinde görüntüyü yumuşatma işlemi gerçekleştirilmiştir. T. Shimmi ve arkadaşları [31] tarafından yapılan çalışmada, görüntüler üzerinde kontrast iyileştirme sağlamak amacıyla 53x52'lik foto sensör dizisi, Laplacian of Gaussian (LoG) filtresi özelliğini barındıran CMOS tabanlı işaret işleme ağ yapısı şeklinde verilmiştir. I. Vornicu ve L. Goraş [32] yaptıkları çalışmada, hüresel sinir ağı şeklinde bir CMOS analog paralel mimarisi önermişlerdir. Kenar algılama ve kontrast iyileştirme özelliklerini yüksek geçiren filtrelemeyle, görüntü yumuşatma karakteristiğini (görüntüde bulunan detayların flu hale getirilmesi ve görüntüdeki gürültünün silinmesi) alçak geçiren filtrelemeyle ve de görüntü segmentasyonu yapmayı ise log-domain filtrelemeyle gerçekleştirmeyi başarmışlardır. Bu çalışmaların yanında Laplacian filtre ve kenar algılama ile alakalı birçok bilimsel çalışma mevcuttur [33-37].

İmge işleme uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar iki önemli temel sebepten dolayı araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Sebeplerden birincisi, araştırmacılar sürekli olarak hareketli ve hareketsiz nesnelere bulunan bilginin insan görme duyusu tarafından daha düzgün bir biçimde algılanabilmesi için iyileştirilmesini istemişler ve amaçlamışlardır. İkinci sebep ise, görüntü işleme sayesinde görsel bilginin iletilmesi, değerlendirilmesi, yorumlanması, depolanması ve görüntülenmesinin makine tarafından gerçekleştirilmesi sağlanabilmektedir. Sayısal görüntüdeki her bir piksel değeri sonlu bir genlik değerine sahipken, analog görüntüde ise her bir piksele ait bu değer sonsuzdur [38]. Sayısal görüntüde bulunan piksel parlaklık değerleri ayrık değer olduğundan, resim bilgisinde analog görüntüye göre eksikliğe ve kayba neden olacaktır. Analog görüntü işleyiciler, analog görüntüde bulunan tüm piksel değerleri sürekli bir değere sahip olmasından ötürü sayısal görüntü işleyicilere göre avantaj sağlamaktadır.

Bulgular bölümünden de görüleceği üzere tezde yapılan çalışmalar üç temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi memristör devre elemanı kullanılarak oluşturulan memristör

fuse yapısı yardımıyla gerçekleştirilen çalışma, ikincisi retinada meydana gelen bir biyolojik olay olan lateral inhibisyon özelliğini sağlayan devre mimarisi ile alakalı çalışma ve üçüncüsü ise sayısal görüntü işleme tekniklerinden biri olan Laplacian filtreleme metodunun analog bir devre yapısı ile yapıldığı çalışmadır.

Birinci yapılan çalışmaya ait motivasyon sebepleri şu şekilde sıralanabilir. Bu çalışmada matematiksel bir memristör fuse modeli kullanmak yerine, memristör fuse yapısı taklit devresi olarak önerilmiştir. SPICE modeli yerine taklit devresinin tercih edilme sebebi ise bu sayede devrenin ayrık devre elemanlarıyla gerçekleştirilebilmesinden dolayıdır. Oysaki matematiksel olarak tasarlanan memristör fuse SPICE modelinin elektronik devre olarak gerçeğe dönüştürebilmesi mümkün değildir. Bunların yanı sıra memristör pasif devre elemanı, lineer olmama, düşük boyuta sahip olma, yüksek depolama kapasitesi (Memristans değeri belirli aralıkta olmak kaydıyla herhangi bir değerde olabildiğinden dolayı bu değer hafıza olarak düşünülebilmektedir.) ve düşük güç tüketme gibi dikkat çekici özelliklere sahiptir. Yani, tasarımı yapılan retina devresinde bu bahsedilen üstün özelliklerden yararlanılacaktır. Dahası, literatürde bazı memristör taklit devreleri lineer olmayan davranışı sağlayabilmek adına çarpıcı devresine ihtiyaç duymaktadır. Ancak çarpıcı devresinin kullanılması geniş çip alanına ve ekstra güç tüketimine ihtiyaç duyma gibi dezavantajlara sahiptir. Bu sebepten ötürü memristör taklit devresi çarpıcı devresi içermeden tasarlanacaktır. Bunlara ek olarak memristör taklit devre mimarisinde gerilim-modlu devre yapılarına kıyasla az yer kaplama ve daha basit devre yapısı gibi özelliklere sahip olan akım-modlu bir devre olan İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (Operational Transconductance Amplifier-OTA) devresi tercih edilmiştir. Yukarıda belirtilen sebeplerden anlaşılacağı üzere önerilen devrenin çok sayıda avantajı bulunmaktadır. Yapılan çalışmada ilk olarak memristör yapısında kullanılan MOS transistörler eşik altı gerilim bölgesinde çalıştığı için eşik altı gerilim bölgesinde MOS transistörün lineer olmayan davranışı incelenecektir. Bu sayede MOS transistörün eşik altı bölgede çalıştırılması sayesinde memristörün lineer olmayan davranışının sağlanacağı ispat edilecektir. Daha sonra özgün olarak tasarımı yapılan ve aktif ile pasif devre elemanlarından oluşan memristör taklit devresi incelenecektir. Bir sonraki aşamada kutupsuz olarak faaliyet gösterme karakteristiğine sahip memristör fuse yapısı görülecektir. Son kısımda, görme duyusu organı olan gözün retina yapısının piksellerden oluşan grid bir mimari olarak tasarımı yapılmıştır. Önerilen biyo-ilham grid yapıda bulunan her bir piksel yapısında memristör elemanından faydalanılmıştır. Gözdeki retinal yapının işleyişinden esinlenilerek yapılan nöromorfik devreye ait analiz kısmında 16x16

pikselden oluşan grid yapıdaki mimariye ait sonuçlar verilmiştir. Devrenin test edilmesindeki kısıtlamalardan dolayı 256 piksellik bir grid yapının analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan grid yapı ile görüntüde yer alan kenarların korunup korunmadığı ve görüntüde gürültü olması durumunda görüntünün gürültüden arındırılıp arındırılmadığı görülecektir.

İkinci yapılan çalışmada, ilk olarak konvolüsyon teorisi ve sayısal sinyal işlemede kullanılan görüntü maskeleyme olayının temel konsepti hakkında detaylı bilgi verilecektir. Bunun sebebi, önerilen analog devrede sinyal işleme metotlarından faydalanan olunmasından dolayıdır. İkinci olarak insan retinasının ana mekanizması ayrıntılı bir biçimde açıklanacak olup, retina hücrelerinde meydana gelen lateral inhibisyon biyolojik olayı ve bu olayın retina hücreleri tarafından nasıl gerçekleştirildiği ile alakalı açıklama verilecektir. Bunlara ek olarak, lateral inhibisyon karakteristiği gösteren ve MOS transistörler haricinde herhangi bir devre elemanına sahip olmayan silikon bir devreye ait maske katsayıları ilk kez verilmiştir. Üçüncü olarak tek bir piksele ait özgün devre yapısı ve bu piksel devrelerinden meydana gelen retinomorfik devre mimarisi sunulmuştur. Dördüncü olarak analiz sonuçları bölümünde kenar iyileştirme ve kenar algılama davranışları gösteren ve farklı maske katsayılarına sahip iki devre tasarımı verilmiştir.

Üçüncü yapılan çalışmaya ait motivasyon şu şekilde sıralanabilir. Öncelikle tasarımı yapılan analog elektronik devrede sayısal görüntü işlemede kullanılan metotlardan biri olan Laplacian filtreleme tekniği kullanılmıştır. Bilindiği üzere, bütün sayısal görüntü işleme metotlarında bu metodun kullanılabilmesi için bir yazılımın geliştirilmesi gereklidir. Ancak yapılan çalışma ile görüntü işleme yapabilmek için herhangi bir yazılıma ihtiyaç olmadığı ve Laplacian filtreleme tabanlı görüntü işleyici gibi davranış sergileyen analog devre tasarlanabildiği ispat edilmiştir. Bunun haricinde önerilen analog görüntü işleme mimarisi retina-ilhamlı bir devre olarak tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan bu devre ile dış retinada bulunan fotoreseptör, horizontal ve bipolar hücre yapılarının taklit edilmesi sağlanmıştır. Bu bölümde, ilk olarak, konvolüsyon teorisi ve sayısal görüntü işleme metotlarının temelini oluşturan maskeleyme tekniği açıklanacaktır. İkinci olarak, görüntü işleme metotlarından biri olan Laplacian filtreleme yönteminden bahsedilecektir. Üçüncü kısımda, biyolojik olarak ilham alınan ve konvolüsyon alabilme özelliği gösteren piksel devresi önerilmiştir. Ayrıca ilham alma kısmında görme duyusunun önemli bir parçasını oluşturan retinadan faydalanılmıştır. Bu bölümün dördüncü kısmında, analog görüntü işleyici olarak 10.000 pikselden meydana gelen grid mimarisi oluşturulmuştur. Analiz kısmında, gri-skalada verilen 4 farklı görüntü için, önerilen devre

mimarisinin Laplacian filtreleme metodu ile görüntü üzerinde kenar algılama karakteristiğinin sağlanıp sağlanmadığı tespit edilmiştir.



2. GENEL KISIMLAR

2.1. DÖRDÜNCÜ PASİF DEVRE ELEMANI MEMRİSTÖR

Direnç, kapasitör ve indüktör elemanları haricinde 4. pasif devre elemanı olarak memristör, ilk kez Leon Ong Chua tarafından 1971 yılında kuram olarak ortaya atılmıştır [39]. 2008 yılında, yani ortaya atılmasından 37 yıl sonra, ilk kez HP laboratuvarlarında Richard Stanley Williams öncülüğündeki araştırma grubu tarafından üretilmiştir [40]. 2 terminalli pasif devre elemanı olan memristör direnç ve hafıza (uçucu olmama özelliği) özelliklerini bir arada barındırma özelliğine sahip olup, direnç değeri (memristans) pozitif ve negatif uçlarına uygulanan toplam yüke bağlı olarak değişmektedir [41]. Bu sebepten dolayı bu yeni pasif devre elemanı aynı zamanda yük kontrollü memristör şeklinde ifade edilmektedir. Ayrıca pozitif ve negatif olmak üzere iki farklı ucu olmasından ötürü kutuplu devre elemanı olarak adlandırılmaktadır. Memristör elemanının diğer üç temel devre elemanları vasıtasıyla elde edilmesi mümkün değildir [42]. Bunlara ek olarak memristör, adını sahip olduğu özelliklerden olan hafıza ve direnç kelimelerinin birleşiminden almıştır (MEMory+ResISTOR).

Dört temel elektriksel ifade olan gerilim, akım, elektrik yükü ve manyetik akının birbirleri arasındaki bağlantı sonucu ortaya çıkan 4. pasif devre elemanı Şekil 2.1’de ifade edilmiştir. Şekil 2.1’de görüleceği üzere memristör elemanının temeli elektrik yükü (q) ve manyetik akı (ϕ) arasındaki ilişkiye dayanmaktadır [39,43]. Strukov ve arkadaşları [40] tarafından önerilen linear ion drift modeline göre memristöre ilişkin gerilim-akım bağlantısı,

$$V(t) = M(x)i(t) \quad (2.1)$$

$$V(t) = \left(R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t) \quad (2.2)$$

şeklinde Denklem (2.1) ve (2.2)’de verilmiştir. Burada $w(t)$, memristörün katkılı bölge genişliğini, D , memristörün toplam genişliğini, M , memristör direncini, R_{ON} ve R_{OFF} ise sırasıyla memristör direncinin (memristans) minimum ve maksimum değerlerini ifade etmektedir. Memristöre ait direncin değişimi ise Denklem (2.3)’de verilmiştir.

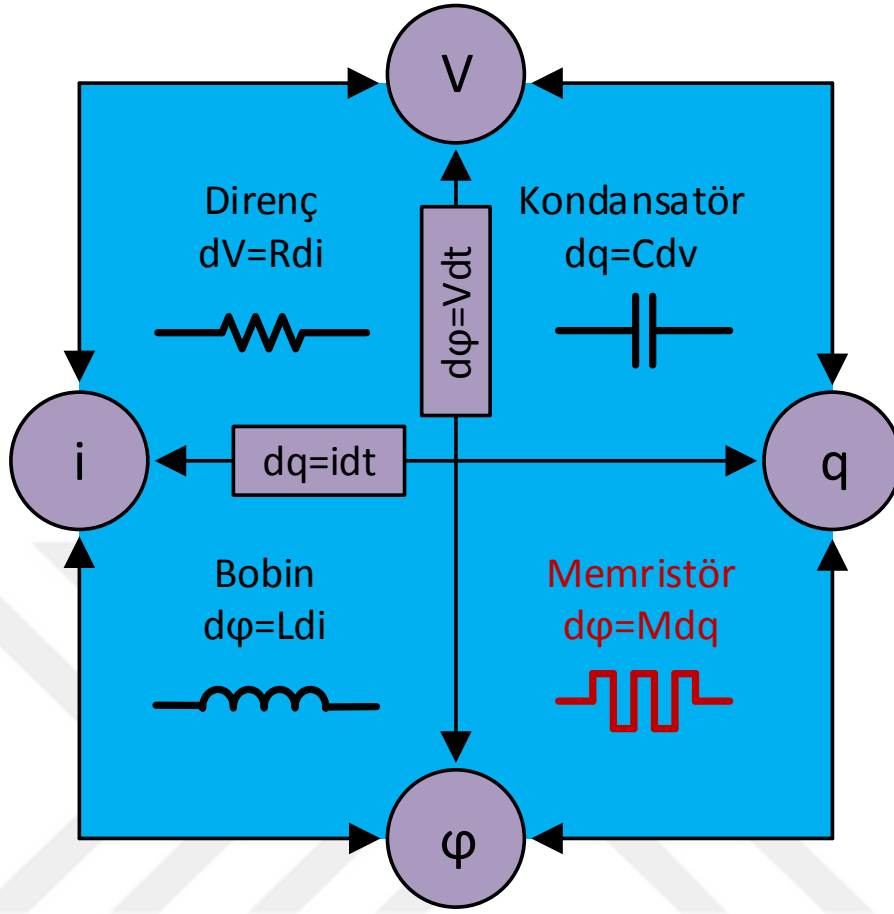
$$M(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x), x = \frac{w}{D} \quad (2.3)$$

Burada yer alan x , memristörün katkılı bölge genişliğinin memristörün toplam genişliğine oranıdır. x parametresinin değişimi memristör direncinin değişmesini sağlamaktadır. x parametresinin değişimi ile alakalı bağlantı Denklem (2.4)'de verilmiştir. Denklemde verilen μ_v elektron hareketliliğini (mobilitesi) ifade etmektedir.

$$\frac{dx}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D^2} i(t) \quad (2.4)$$

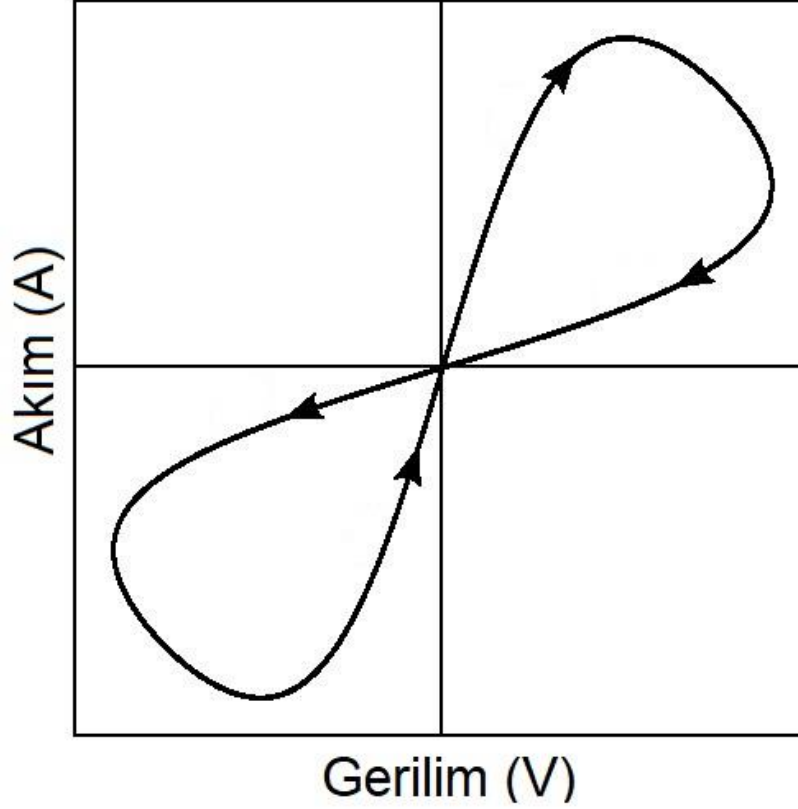
$$w(t) = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'de yük ifadesi akımın integrali olduğu için, akımın akmadığı yani $i(t)=0A$ durumu için $q(t)$ ifadesi, sıfırın integrali sabit olduğundan dolayı yük sabit kalmakta, buna bağlı olarak ta memristans değeri de değişmemektedir [41]. Yani buradan anlaşılacağı üzere memristör üzerine uygulanan gerilim kesildiği zaman en son durumdaki memristans değeri korunmakta olup, bu durum memristörün hafıza özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Hafıza özelliğini sağlayan memristans değeridir. Memristöre ait memristans değeri 0 ya da 1 şeklinde sayısal bilgi olmayıp, R_{ON} ve R_{OFF} değerlerini ve R_{ON} ile R_{OFF} arasındaki tüm değerleri alabileceğinden ötürü memristörde saklanan veri sayısal değil analog veridir.



Şekil 2.1: Temel elektriksel ifadelerden pasif devre elemanlarının elde edilmesi [40].

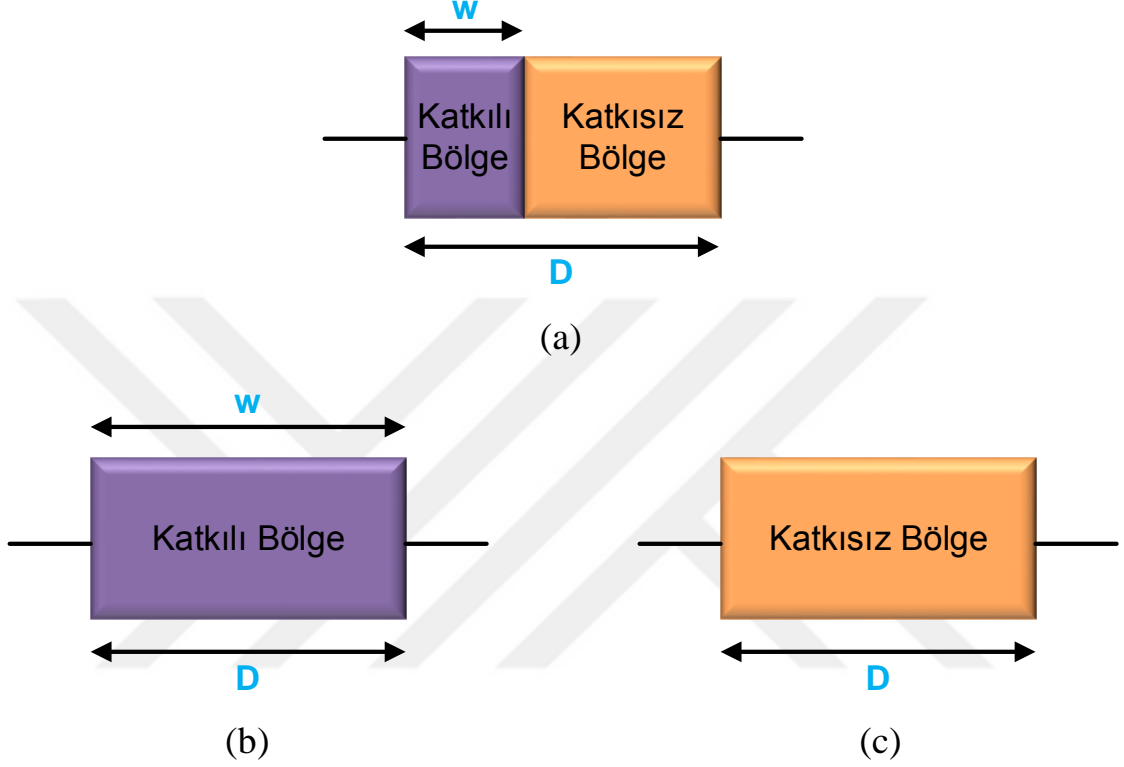
Bu devre elemanın en belirgin özelliği gerilim-akım ilişkisinin sonucu ortaya çıkan histerezis eğrisidir. Bu eğriye göre akım sıfır olduğu anda gerilim sıfırdır ve bunun tersi de doğrudur. Ayrıca akım ve gerilime ait değerlerin sıfır olmadığı durumlarda gerilim ile akım arasında lineer olmayan bir bağlantı vardır. Şekil 2.2’de memristöre ait gerilim-akım karakteristiği verilmiştir.



Şekil 2.2: Memristör elemanı gerilim-akım karakteristiği.

Memristörün iç yapısında Şekil 2.3(a)'da gösterildiği gibi elektron katkılı bölge ve elektron katkısız bölge adında iki farklı kısım bulunmaktadır. Burada w elektron katkılı bölgenin uzunluğunu ifade ederken, D ise memristör yapısındaki bütün bölgenin uzunluğunu ifade etmektedir. Memristöre uygulanan gerilime göre w uzunluğu artıp azalmakta ve buna göre de memristörün memristans olarak adlandırılan direnci değişmektedir. Eğer memristör elemanına ileri yönde bir gerilim uygulanırsa katkılı bölgenin uzunluğu artıp, memristans değeri azalacak ve memristör üzerinden geçen akım miktarı artacaktır. Şekil 2.3(b)'de gösterildiği gibi w uzunluğunun D uzunluğuna eşit olması durumunda ise memristans değeri yaklaşık sıfır olacak ve memristör üzerinde tam iletim olayı gerçekleşecektir. Bunun tersi durumda ise yani eğer memristör elemanına geri yönde bir gerilim uygulanırsa katkılı bölgenin uzunluğu azalır, memristansın değeri yükselmeye başlayacaktır ve memristör üzerinden geçen akım miktarı azalacaktır. Şekil 2.3(c)'de verildiği gibi w uzunluğunun sıfır olması durumunda ise memristans değeri çok yüksek olacaktır ve memristör üzerinde tam kesim olayı gerçekleşecektir. Memristörün iki ucuna uygulanan gerilimin kesilmesi durumunda memristörün iç yapısında bulunan elektronlar o an buldukları konumu koruyacakları için memristöre herhangi bir gerilim uygulanmadığı süre boyunca memristans değerinde değişim olmayacaktır. Bu sebepten

ötürü memristör devre elemanı gerilim kesildiği süre boyunca memristans değerini koruduğu için hafızalı devre elemanı olarak bilinmektedir. Burada hafızayı meydana getiren ise memristörün kendi direnç değeridir.

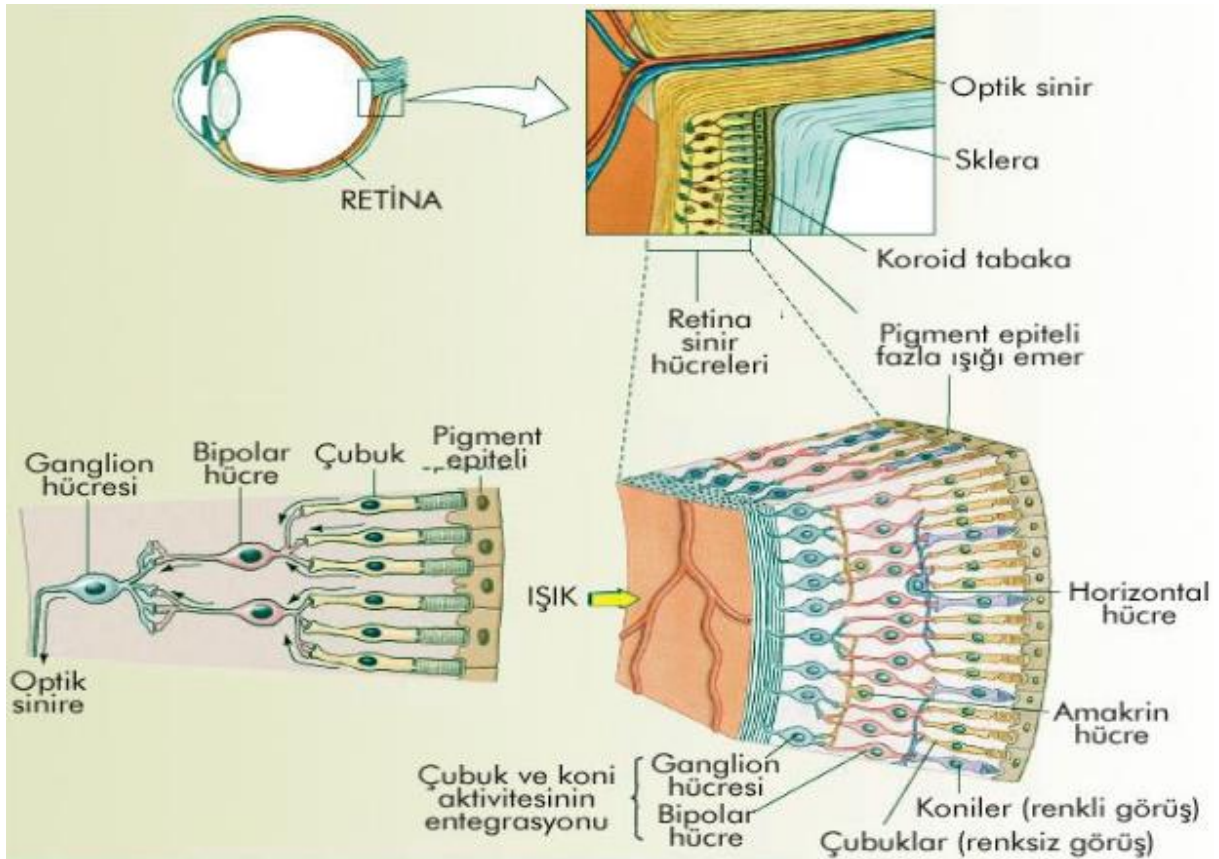


Şekil 2.3: Memristör elemanının (a) ilk durumu (b) tam iletim durumu (c) tam kesim durumu [40]. Memristans değeri tunnel etkisine bağlı olduğundan dolayı lineer olmayan davranış sergilemektedir. Bunun sebebi ise tunnel bariyer genişliğinin azalması ile birlikte akan akımın eksponansiyel bir şekilde artmasındandır. Memristör önemli özelliklere sahip olmasına karşın nano skala boyutlarda olmasından ötürü üretimi zor olduğu için deneysel çalışmalar için kullanılabilirliği pek mümkün olamamaktadır [44]. Bu sebepten dolayı çok sayıda SPICE modeli [42,45-47] oluşturulmuş, birçok memristör taklit devresi de [44,48-51] tasarlanmıştır. Bunlara ek olarak, memristör tabanlı nöral ağlar üzerine birçok çalışma da mevcuttur [52-58].

2.2. RETİNANIN YAPISI VE HÜCRE ÖZELLİKLERİ

Gözler, elektromanyetik spektrumun görünür ışık frekans bölgesindeki enerjiyi optik sinirde aksiyon potansiyeline çevirir. Görünür ışığın dalga boyu 397nm (mavi renk) ile 723nm (kırmızı renk) aralığında bulunmaktadır. Herhangi bir cisimden insan gözüne gelen ışık korneada kırılıp

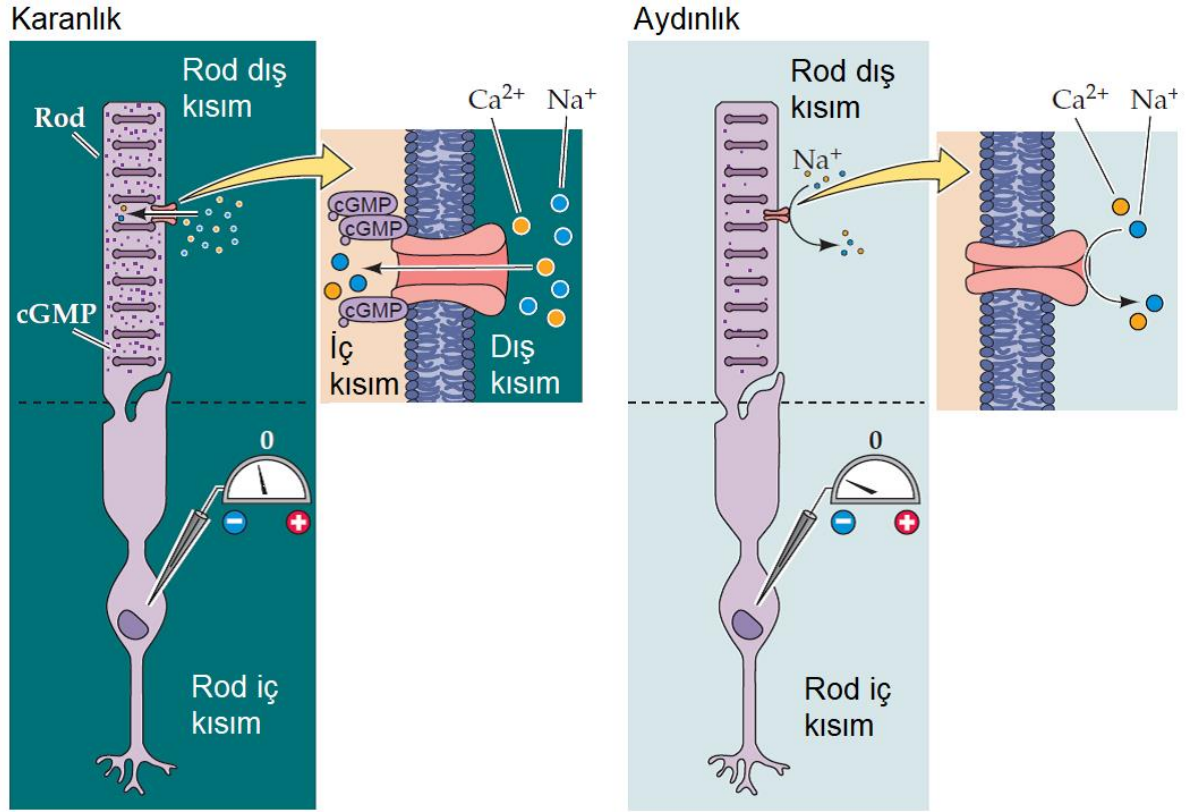
göz bebeğinden geçtikten sonra göz merceğine gelir. Göz merceğine gelen ışın bu bölgede tekrar kırılarak retina üzerinde ters bir görüntü oluşturur. Retinaya ulaşan ışık, cone (çubuk) ve rod (koni) adındaki görme reseptörlerini uyarak elektriksel impulsa dönüştür. Oluşan impuls retinada bulunan horizontal, bipolar, amakrin ve ganglion adındaki 4 nöron yardımıyla ve optik sinirler vasıtasıyla beyindeki görme merkezine gönderilerek görme işlemi gerçekleşir. Retinanın yapısı Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4: Retinanın Yapısı.

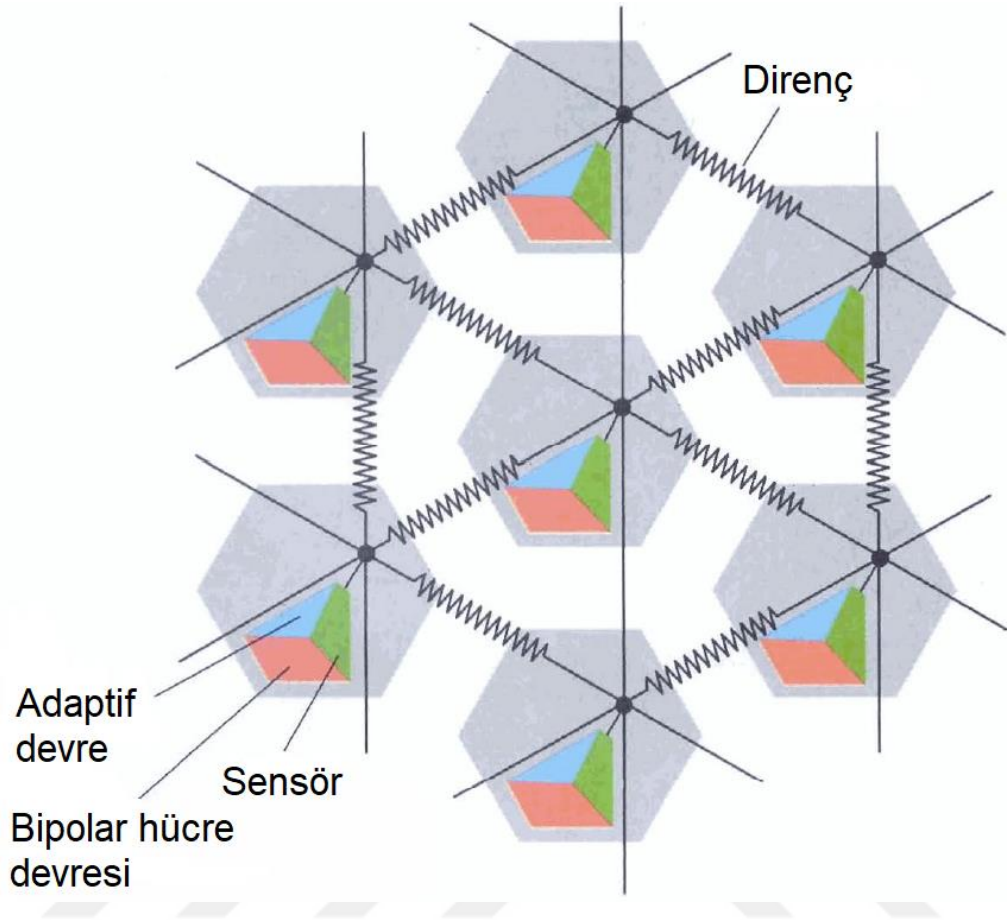
İnsan retinası nöral sinyallerin retinadaki katmanlarda kendi içerisinde ve katmanlar arasında iletilmesini sağlayan hücrelerden oluşur. [10] tarafından yapılan çalışmada oluşturulan silikon retina ile en dış tabakada yer alan rod ve cone fotoreseptörü, horizontal hücre ve bipolar hücrenin özelliklerinin modellenmesi yapılmıştır. Rod ve cone fotoreseptörleri retinaya gelen ışığın elektriksel sinyale dönüşmesini sağlarlar. Şekil 2.5(a)'da görüleceği üzere karanlık ortamdayken yüksek seviyeye ulaşan cGMP nükleotiti rodun dış kısmında bulunan kanalların açık olması sağlayarak içeriye Na^+ girişini sağlar ve rod fotoreseptörün depolarize duruma geçmesini sağlar. Bunun tersi durum olarak Şekil 2.5(b)'de gösterildiği gibi aydınlık ortamda rodun dış kısmında bulunan kanallar ışığa maruz kaldığında azalan cGMP nükleotitinden dolayı

kapanarak rod fotoreseptörün hiperpolarize olmasını sağlar. Örnekte rod fotoreseptörü anlatılmıştır ancak benzer işleyiş düzeni cone fotoreseptörü için de geçerlidir.



Şekil 2.5: Rod fotoreseptörünün (a) karanlıkta (b) aydınlıkta davranışı [59].

Horizontal hücre ise komşuluğunda bulunan ortalama ışık yoğunluğuna tepki vermektedir. Bipolar hücreye gelen sinyaller fotoreseptör ve horizontal hücreden gelen sinyallerin oranına göre beyine iletilmeden önce daha başka işlemlerin gerçekleştirildiği yer olan ganglion hücrelere iletilir. Yapılan çalışmada [10] her bir silikon fotoreseptör koni hücrelerinin sağladığı özellikleri taklit etmekte olup, fotosensör ve değişen ışık seviyeleriyle başa çıkmak için tepkisini değiştiren adaptif devreden meydana gelmektedir. Değişken dirençlerden oluşan ağ yapısı horizontal hücreleri taklit edip, yakınında bulunan fotoreseptöre düşen ortalama ışık miktarına bağlı olarak bir geri besleme sağlamaktadır. Modellemede yer alan bipolar hücre yapısı ise fotoreseptörden gelen sinyal ile horizontal hücrelerden gelip lokal ortalama ile hesaplanan sinyallerinin farkını alıp yükseltilmesi görevini üstlenmektedir. Şekil 2.6'da horizontal hücre yapısını oluşturan değişken dirençlerin meydana getirdiği altıgen biçimli ağ yapısı ve reseptör devre yapısı gösterilmiştir. Modellenen retinal devrenin verdiği yanıt insan retina davranışına oldukça yakındır.



Şekil 2.6: Silikon retinanın fonksiyonel diyagramı [10].

2.3. KONVOLÜSYON TEORİSİ VE SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEMEDE KULLANILAN MASKELEME KAVRAMI

Sayısal işaret işleme ve sayısal görüntü işleme kullanılan en temel işlem konvolüsyon olarak bilinen matematiksel işlemidir [60]. Konvolüsyon teorisi, en temel haliyle giriş sinyali ve maske (filtre) olarak adlandırılan iki fonksiyonun integral alma işleminden geçmesidir. Bu işlem spatial domainde gerçekleşmekte olup, spatial kelimesi anlam itibariyle uzayı ifade etmektedir. Sayısal bir görüntü, uzayda iki boyuta sahiptir. Konvolüsyon işleminde maskeleme (kernel matris) yardımıyla görüntünün merkez pikselinin komşuluğunda bulunan piksellerin belirli bir etkisiyle uzaysal domainde değişime uğratılması sağlanır. Konvolüsyon vasıtasıyla oluşturulan çarpımların toplamı işlemi filtrelenmiş görüntünün yeni piksel değerini ortaya çıkarır. Herhangi bir görüntü matris olarak tanımlanabilir ve maskeye ait matris boyutu giriş görüntüsünün matris boyutundan küçük olmalıdır. Farklı katsayılarla ve farklı boyutlara sahip maskeler görüntüde farklı sonuçların ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Kullanılan maske tipine

göre kenar iyileştirme, kenar belirleme, görüntüde keskinleştirme, görüntüde yumuşatma gibi farklı durumlar elde edilebilmektedir. Maske boyutu keyfi şekilde seçilebilmekte olup, ancak genellikle 3x3'lük maske boyutları tercih edilmektedir. Konvolüsyon işlemi ile alakalı matematiksel eşitlikler Denklem (2.6) ve (2.7)'te verilmiştir.

$$g = h * f \quad (2.6)$$

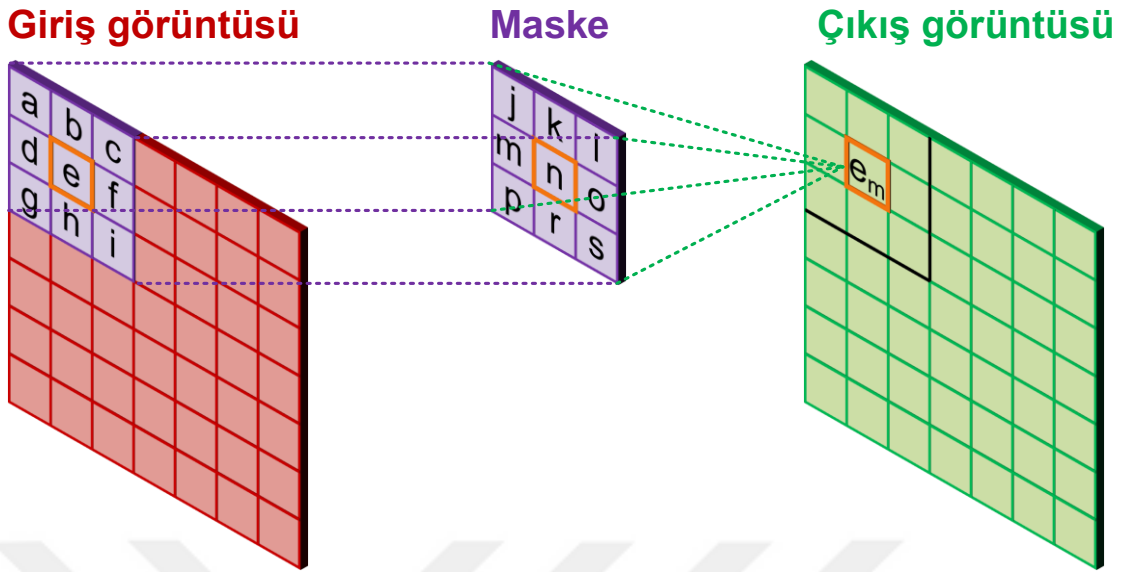
$$g = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (2.7)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde f, giriş görüntüsünü, h, maskeyi, g, çıkış görüntüsünü ya da diğer bir tabirle maskelenmiş görüntüyü ve asterisk sembolü * ise konvolüsyon işlemi göstermektedir. Bu matematiksel işlemin asıl amacı f fonksiyonunu h fonksiyonu üzerinde kaydırmaktır.

Matematik açısından ele alındığında eğer hem giriş sinyali hem de maske ayırık (sürekli olmayan) değerlere sahip ise konvolüsyon işlemi integral alma yerine çarpımların toplamı şeklinde düşünülebilir. Böyle bir durumda konvolüsyon işlemine ait eşitlik Denklem (2.8)'te belirtildiği gibi gösterilebilmektedir.

$$g[x, y] = \sum_{u=-k}^k \sum_{v=-k}^k h[u, v] f[x - u, y - v] \quad (2.8)$$

(2k+1)x(2k+1)'lık maske konvolüsyon işlemi gerçekleştirilmek için 180 derece döndürülür (Maske hem yatay olarak hem dikey olarak döndürülür.). Maskenin merkezi, giriş görüntüsünün en sol üstünden başlayıp sağ alt kısmına kadar kaydırılarak çarpımların toplamı işlemi ile çıkış görüntüsü elde edilip konvolüsyon işlemi gerçekleştirilmiş olunur. Yani, giriş görüntüsüne ait her bir piksel komşuluğunda bulunan pikseller ve kendi pikselinin belirli bir ağırlık toplamına göre değişikliğe uğratılır. Konvolüsyon teorisinin temelini oluşturan matematiksel açıklama Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Şekildeki e_m, e'nin maskeleme işlemi sonrasında elde edilen yeni değerini ifade etmektedir (m harfi maskenin kısaltması olarak verilmiştir.).



Çıkış görüntüsü = Giriş görüntüsü * Maske

$$e_m = ax_j + bx_k + cx_l + dx_m + ex_n + fx_o + gx_p + hx_r + ix_s$$

Şekil 2.7: Konvolüsyon işleminin matematiksel açıklaması.

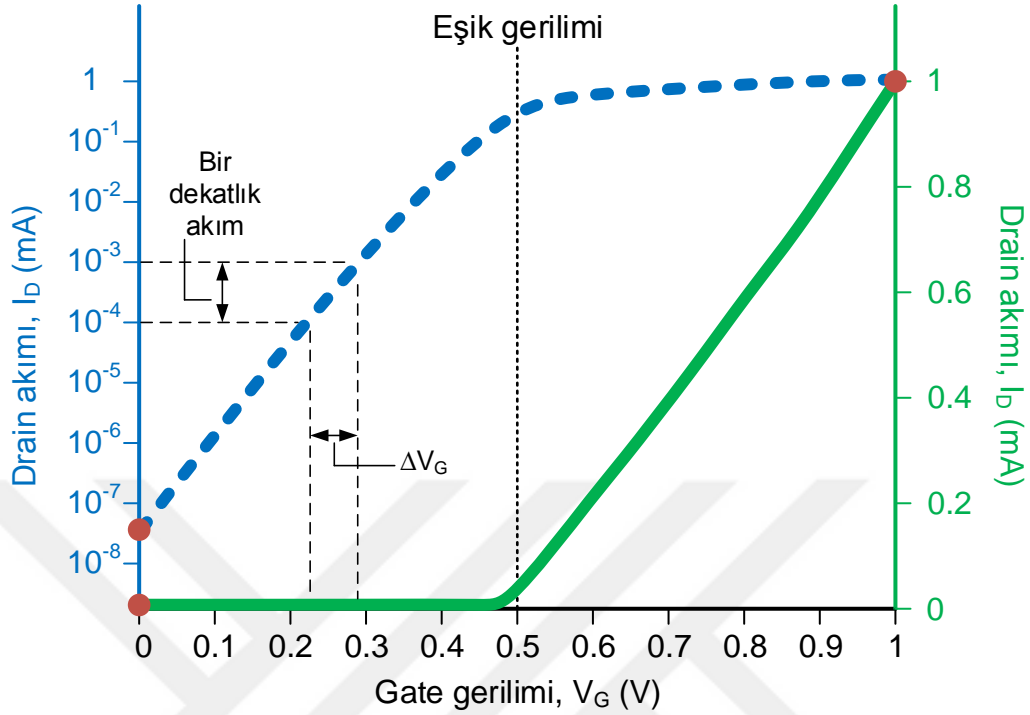
3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. EŞİKALTI BÖLGEDE MOS TRANSİSTÖRÜN LİNEER OLMAYAN DAVRANIŞI

Gate-source geriliminin eşik geriliminden düşük olduğu bölgeye eşik altı bölge ($V_{GS} < V_T$) denilmektedir. Genelde eşik altı bölge için drain akımı ihmal edilir ve $I_D=0$ A olarak alınır. Ancak bu bölgede çok düşük bile olsa belirli bir drain akımı akmaktadır. Eşik altı bölge için NMOS transistöre ait drain akımı eşitliği,

$$I_D = I_{D0} \left(\frac{W}{L} \right) e^{\left(\frac{V_{GS}}{nV_T} \right)} \left[1 - e^{\left(\frac{-V_{DS}}{V_T} \right)} \right] \quad (3.1)$$

şeklinde Denklem (3.1)'de verilmiştir. Burada I_D , drain akımı, W ve L sırasıyla MOS transistöre ait kanal genişliği ve kanal uzunluğudur. Ayrıca I_{D0} , MOS transistörün sızıntı drain akımı, n , eğim faktörü (1-1.5 aralığındadır.) ve V_T , termal gerilimidir ($V_T=kT/q \approx 26$ mV, $T=300$ K için). Eşitlikten de anlaşılacağı üzere eşik altı bölge için drain akımı eksponansiyel yani lineer olmayan özelliğe sahiptir.



Şekil 3.1: Eşik altı ve eşik üstü bölge için drain akımı [61].

Bu durumu ayrıca eşik altı ve eşik üstü bölge için drain akımını gösteren Şekil 3.1'den de görebilmekteyiz. Şekil 3.1'de eşik üstü gerilim bölgesi (düz çizgi ile) için drain akımı lineer skalada, eşik altı gerilim bölgesi (kesikli çizgi ile) için ise logaritmik skalada çizilmiştir. MOS transistörde bulunan gate oksit bölgesinin altında yer alan kanaldaki elektron sayısı gate ucuna uygulanan gerilimin artmasına bağlı olarak artar. Bu durum source ile drain uçları arasında akan akımın artmasına sebep olmaktadır. Eşik üstü bölgesinde drain akımı lineer olarak artarken, eşik altı bölgesinde ise eksponansiyel olarak artmaktadır. Çünkü eşik altı bölge için drain akımının logaritmik skalada lineer olarak artması, bu akımın lineer skalada eksponansiyel (artarak artan) olarak artması anlamına gelmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki MOS transistör eşik altı bölgede lineer olmayan davranış sergilemektedir. Bilindiği üzere biyolojik sistemler de lineer olmayan davranış sergilemektedirler. Yani biyomedikal uygulamalar lineer olmayan davranışa sahip olduğundan, bu tip uygulamalar için eşik altı bölgede çalışan MOS transistör kullanmanın uygun olduğu görülmektedir. Şekil 3.1'de ΔV_G ile gösterilen parametre eşik altı bölgede her bir dekat için drain akımında meydana gelen akım değişimini göstermektedir. Tipik

olarak eşik altı gerilim bölgesinde her bir dekat için drain akımındaki değişim yaklaşık 60mV olmaktadır [61].

Nöral sistemlere ait modellemelerin memristör taklit devreleriyle yapılabilmesi mümkündür. Memristöre ait tipik özelliklerden olan lineer olmama durumu, eşik-altı bölgede çalışan CMOS transistörler ile tasarlanan taklit devreler sayesinde elde edilebilir ve bu tip devreler biyomedikal uygulamaları gerçekleştirmek için oldukça uygundur.

Tez aşamasında gerçekleştirilen bütün analizler esnasında 0.18 μ m TSMC CMOS parametreleri kullanılmış olup, bu parametreler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Analizlerde kullanılan 0.18 μ m TSMC CMOS parametreleri.

NMOS VE PMOS TRANSİSTÖRLERE AİT PARAMETRELER

.MODEL CMOSN NMOS

(LEVEL = 7, VERSION = 3.1, TNOM = 27, TOX = 4.1E-9, XJ = 1E-7, NCH = 2.3549E17, VTH0 = 0.3725327, K1 = 0.5933684, K2 = 2.050755E-3, K3 = 1E-3, K3B = 4.5116437, W0 = 1E-7, NLX = 1.870758E-7, DVT0W = 0, DVT1W = 0, DVT2W = 0, DVT0 = 1.3621338, DVT1 = 0.3845146, DVT2 = 0.0577255, U0 = 259.5304169, UA = -1.413292E-9, UB = 2.229959E-18, UC = 4.525942E-11, VSAT = 9.411671E4, A0 = 1.7572867, AGS = 0.3740333, B0 = -7.087476E-9, B1 = -1E-7, KETA = -4.331915E-3, A1 = 0, A2 = 1, RDSW = 111.886044, PRWG = 0.5, PRWB = -0.2, WR = 1, WINT = 0, LINT = 1.701524E-8, XL = 0, XW = -1E-8, DWG = -1.365589E-8, DWB = 1.045599E-8, VOFF = -0.0927546, NFACTOR = 2.4494296, CIT = 0, CDSC = 2.4E-4, CDSCD = 0, CDSCB = 0, ETA0 = 3.175457E-3, ETAB = 3.494694E-5, DSUB = 0.0175288, PCLM = 0.7273497, PDIBLC1 = 0.1886574, PDIBLC2 = 2.617136E-3, PDIBLCB = -0.1, DROUT = 0.7779462, PSCBE1 = 3.488238E10, PSCBE2 = 6.841553E-10, PVAG = 0.0162206, DELTA = 0.01, RSH = 6.5, 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 = 8.53E-10, CGSO = 8.53E-10, CGBO = 1E-12, CJ = 9.513993E-4, PB = 0.8, MJ = 0.3773625, CJSW = 2.600853E-10, PBSW = 0.8157101, MJSW = 0.1004233, CJSWG = 3.3E-10, PBSWG = 0.8157101, MJSWG = 0.1004233, CF = 0, PVTH0 = -8.863347E-4, PRDSW = -3.6877287, PK2 = 3.730349E-4, WKETA = 6.284186E-3, LKETA = -0.0106193, PU0 = 16.6114107, PUA = 6.572846E-11, PUB = 0, PVSAT = 1.112243E3, PETA0 = 1.002968E-4, PKETA = -2.906037E-3)

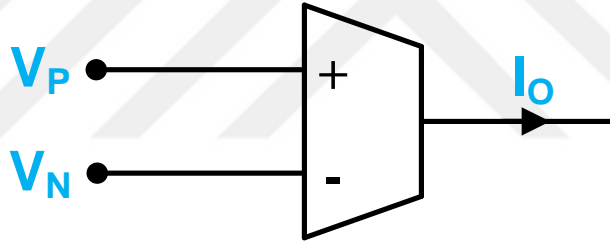
.MODEL CMOSP PMOS

(LEVEL = 7, VERSION = 3.1, TNOM = 27, TOX = 4.1E-9, XJ = 1E-7, NCH = 4.1589E17, VTH0 = -0.3948389, K1 = 0.5763529, K2 = 0.0289236, K3 = 0, K3B = 13.8420955, W0 = 1E-6, NLX = 1.337719E-7, DVT0W = 0, DVT1W = 0, DVT2W = 0, DVT0 = 0.5281977, DVT1 = 0.2185978, DVT2 = 0.1, U0 = 109.9762536, UA = 1.325075E-9, UB = 1.577494E-21, UC = -1E-10, VSAT = 1.910164E5, A0 = 1.7233027, AGS = 0.3631032, B0 = 2.336565E-7, B1 = 5.517259E-7, KETA = 0.0217218, A1 = 0.3935816, A2 = 0.401311, RDSW = 252.7123939, PRWG = 0.5, PRWB = 0.0158894, WR = 1, WINT = 0, LINT = 2.718137E-8, XL = 0, XW = -1E-8, DWG = -4.363993E-8, DWB = 8.876273E-10, VOFF = -0.0942201, NFACTOR = 2, CIT = 0, CDSC = 2.4E-4, CDSCD = 0, CDSCB = 0, ETA0 = 0.2091053, ETAB = -0.1097233, DSUB = 1.2513945, PCLM = 2.1999615, PDIBLC1 = 1.238047E-3, PDIBLC2 = 0.0402861, PDIBLCB = -1E-3, DROUT = 0, PSCBE1 = 1.034924E10, PSCBE2 = 2.991339E-9, PVAG = 15, DELTA = 0.01, RSH = 7.5, MOBMOD = 1, PRT = 0, UTE = -1.5, KT1 = -0.11, KT1L = 0, KT2 = 0.022, UA1 = 4.31E-9, UB1 = -7.61E-18, UC1 =

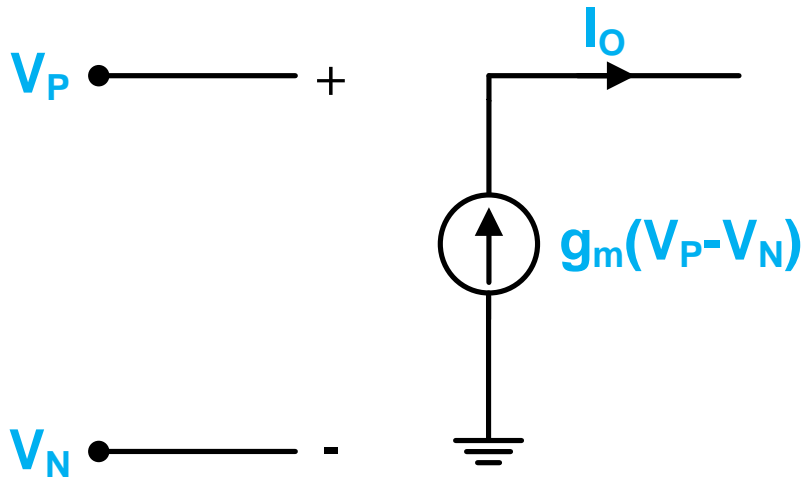
= -5.6E-11, AT = 3.3E4, WL = 0, WLN = 1, WW = 0, WWN = 1, WWL = 0, LL = 0, LLN = 1, LW = 0, LWN = 1, LWL = 0, CAPMOD = 2, XPART = 0.5, CGDO = 6.28E-10, CGSO = 6.28E-10, CGBO = 1E-12, CJ = 1.160855E-3, PB = 0.8484374, MJ = 0.4079216, CJSW = 2.306564E-10, PBSW = 0.842712, MJSW = 0.3673317, CJSWG = 4.22E-10, PBSWG = 0.842712, MJSWG = 0.3673317, CF = 0, PVTH0 = 2.619929E-3, PRDSW = 1.0634509, PK2 = 1.940657E-3, WKETA = 0.0355444, LKETA = -3.037019E-3, PU0 = -1.0227548, PUA = - 4.36707E-11, PUB = 1E-21, PVSAT = -50, PETA0 = 1E-4, PKETA = -5.167295E-3)

3.2. İŞLEMSEL GEÇİŞ İLETKENLİĞİ KUVVETLENDİRİCİSİ (OTA)

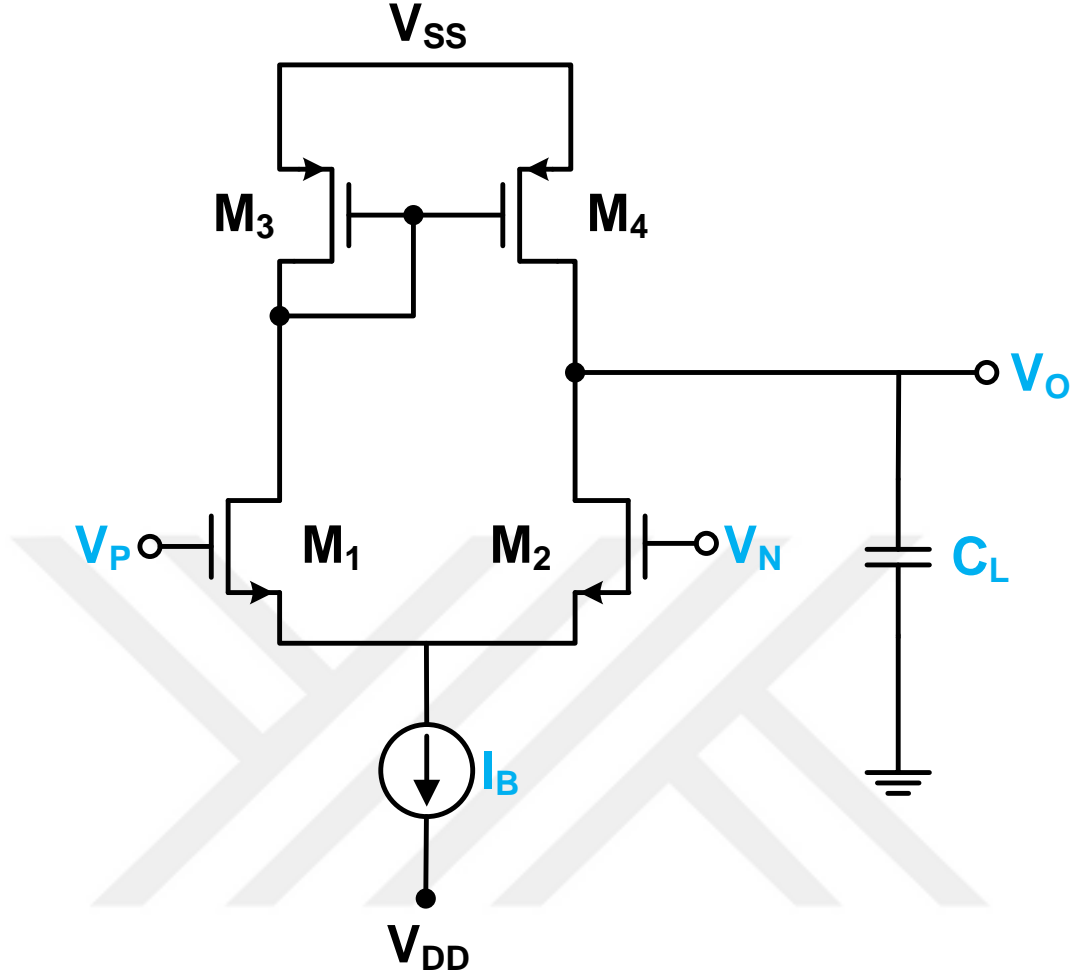
OTA, girişine uygulanan gerilimlerin farkını g_m olarak ifade edilen geçiş iletkenliği katsayısı ile çarptıktan sonra bu sonucu akım olarak çıkış veren aktif bir devre elemanıdır. OTA devre elemanının sağladığı geniş bant sebebiyle yüksek frekansta çalışan osilatör ve aktif filtre devrelerinde kullanılması uygundur. Akım modlu olarak çalışan OTA'nın sahip olduğu g_m değeri devrede bulunan kutuplama akımı vasıtasıyla rahatlıkla değiştirilebilir. Şekil 3.2(a)'da OTA'ya ait devre sembolü, Şekil 3.2(b)'de ideal OTA'nın eşdeğer devresi ve Şekil 3.2(c)'de basit CMOS OTA devresi verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

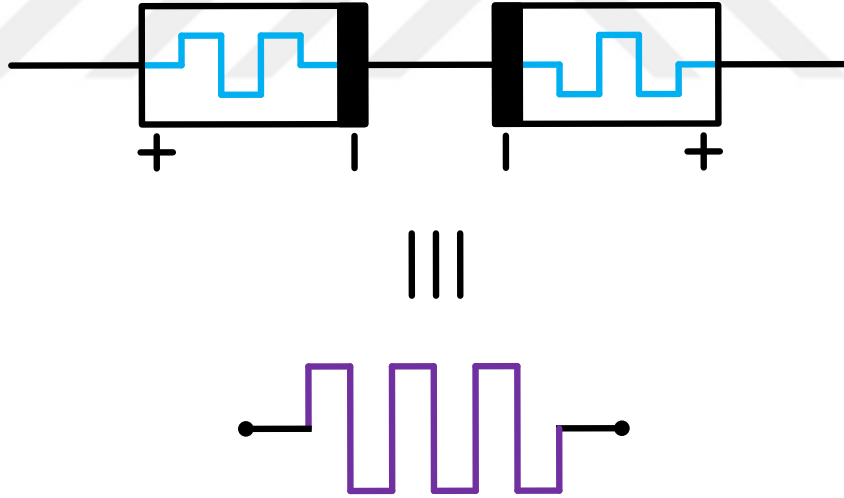
Şekil 3.2: OTA'nın (a) devre sembolü (b) ideal eşdeğer devresi (c) basit bir CMOS devresi. OTA devresi, girişine gerilim uygulanıp çıkışından da akım elde edildiğinden ötürü gerilim kontrollü akım kaynağı karakteristiği göstermektedir. Girişine gerilim uygulandığı için ve çıkışının da akım elde edildiğinden ötürü hem giriş hem de çıkış empedansı yüksektir. Şekil 3.2(c)'de kutuplama akımı I_B ile gösterilmiştir. Devreye ait g_m eşitliği Denklem (3.2)'de,

$$g_m = \frac{I_O}{V_P - V_N} \quad (3.2)$$

şeklinde verilir [62].

3.3. MEMRİSTÖR FUSE YAPISI

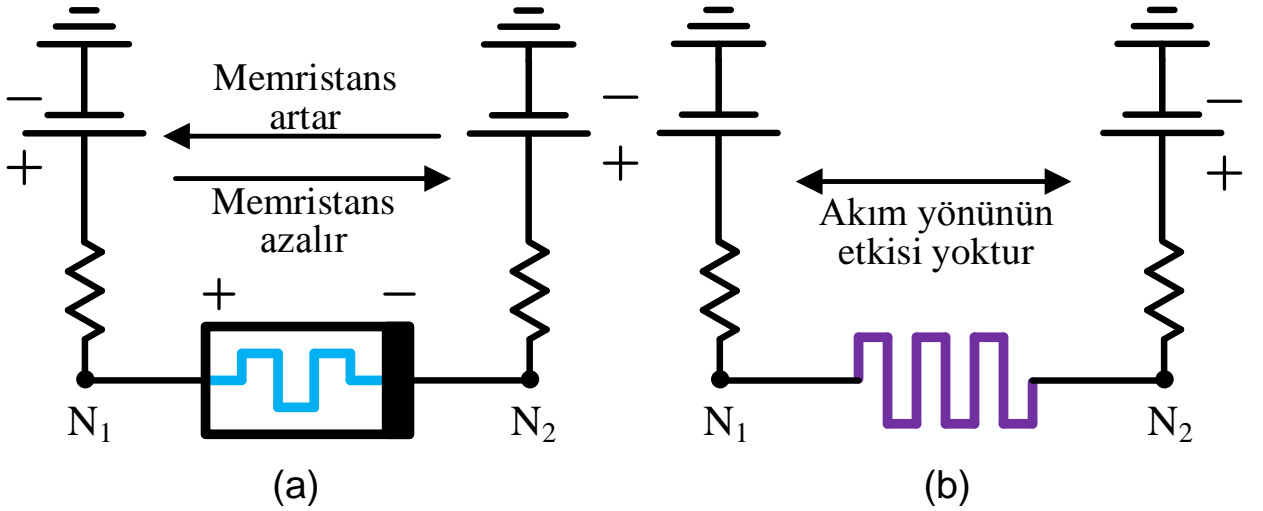
Daha önceki kısımlarda da bahsedildiği üzere memristör kutuplu bir devre elemanı olduğundan 16x16 pikselden oluşan retinomorfik analog devre blok için kutupsuz özelliğe sahip memristör fuse yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.3’de gösterildiği gibi tasarımı yapılan iki eş memristör, zıt kutuplu olarak birbirine seri olarak bağlanarak memristör fuse yapısı elde edilmiştir. Bu alanda önceden yapılan tüm akademik çalışmalarda memristör fuse yapısında kullanılan memristör yapıları SPICE modeli olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmada ilk kez memristör fuse yapısını elde etmek için yararlanılan memristör yapısı elektronik devre olarak tasarlanmış olup, bu durum çalışmanın özgün olmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmada önceki bir çalışmada [15] önerilen lineer olmayan direnç karakteristiğinden faydalanılmıştır. Memristörleri zıt kutuplu olarak birbirlerine bağlama sebebi memristör fuse yapısının giriş ve çıkış terminallerinin aynı kutup olmasını sağlamaktır. Böylelikle her bir pikselin çıkış düğümleri arasına yerleştirilen memristör fuse yapısının kutuptan (memristör akımının aktığı yönden) bağımsız olması sağlanmıştır.



Şekil 3.3: Memristör fuse yapısı.

Şekil 3.4’de okların yönü devre elemanı üzerinden akan akımların yönlerini göstermektedir. N_1 ve N_2 grid mimaride bulunan iki farklı piksel çıkış düğümlerini temsil etmektedir. Bu şekil grid yapıda niçin memristör fuse yapısını kullanmanın zorunlu olduğunu anlatmaktadır. Şekil 3.4(a)’dan görüleceği gibi N_1 düğümüne ait gerilim değerinin N_2 düğümüne ait gerilim değerinden büyük olması durumunda ($N_1 > N_2$) memristör üzerinde N_1 ’den N_2 ’ye doğru akım akışı olmaktadır. Bu durumda memristans değeri memristörün ileri yönde kutuplanmasına bağlı olarak azalmaktadır. Tam tersi durumda (N_1 ve N_2 arasında potansiyel farkın mutlak değeri bir

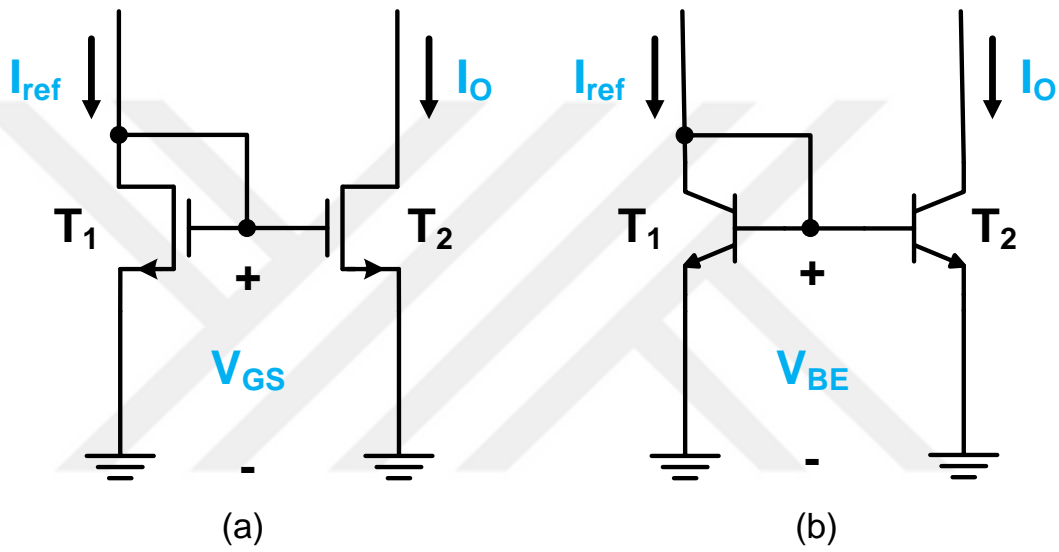
önceki durumla aynı olacak şekilde) yani N_1 düğümüne ait gerilim değerinin N_2 düğümüne ait gerilim değerinden küçük olması halinde ($N_1 < N_2$) ise memristör üzerinde N_2 'den N_1 'ye doğru akım akışı olmaktadır. Bu durumda memristans değeri memristörün geri yönde kutuplanmasına bağlı olarak artmaktadır. Her iki durum için N_1 ve N_2 düğümleri arasında potansiyel farkın mutlak değeri aynı olmasına rağmen iki düğüm arasında meydana gelen difüzyon miktarı memristans değerinin artıp azalmasına bağlı olarak farklı olacaktır. Yani grid yapıda memristör kullanıldığı zaman devrenin girişine verilen herhangi bir görüntüye ait piksel çıkışı sonuçları ile bu görüntünün koordinat düzleminde y eksenine göre simetriği alınmış hali olan görüntüye ait piksel çıkışı sonuçları farklı olacaktır. Bu durumda grid yapıda kutuplu bir devre elemanı kullanmak dezavantajlı bir hal alacaktır. Ancak Şekil 3.4(b)'de verilen memristör fuse yapısı tercih edilirse akımın yönündeki değişim memristans değerini değiştirmeyecektir. Buna bağlı olarak düğümler arasındaki potansiyel farkın mutlak değerinin aynı olması durumunda aynı miktarda difüzyon olayı meydana gelecektir. Yani memristör fuse kullanıldığında $N_1 > N_2$ ya da $N_1 < N_2$ olması memristör kullanımında olduğu gibi düğümler arasında meydana gelen difüzyon miktarını etkilemeyecektir. Bu sebepten dolayı grid mimarisi için memristör fuse yapısı oldukça uygundur. Akımın yönünün değişimi memristör kullanıldığı zaman etki yapmasına rağmen, memristör fuse kullanıldığı zaman herhangi olumsuz etkisi olmamaktadır. Bu sebepten dolayı grid yapıda memristör fuse tercih edilecektir.



Şekil 3.4: Grid mimaride (a) memristör ve (b) memristör fuse kullanmanın memristans değerine olan etkisi.

3.4. AKIM AYNASI VE AKIM ÇIKARICI DEVRE YAPISI

Akım aynasının temel görevi, herhangi bir kaynaktan verilen akımı istenen katsayı oranında yükselterek ya da azaltarak kopyalamaktır. Basit akım aynası devreleri Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekil 3.5(a) NMOS transistörlerden meydana akım aynası devresini göstermekte olup, Şekil 3.5(b) bipolar transistörlerden oluşturulan akım aynası devresini göstermektedir. Bilindiği üzere MOS transistörlerin gate uçları sahip oldukları yüksek empedans değerine bağlı olarak akım çekmezler ancak bipolar transistörlerin base uçları akım çekmektedir.



Şekil 3.5: (a) NMOS (b) bipolar transistörlerden oluşan basit akım kaynağı yapısı.

Şekil 3.5(a)'daki devre yapısı için I_{ref} ve I_o akımları için denklemler,

$$I_{ref} = \frac{\mu \cdot C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)_1 [V_{GS} - V_T]^2 \quad (3.3)$$

$$I_o = \frac{\mu \cdot C_{OX}}{2} \left(\frac{W}{L} \right)_2 [V_{GS} - V_T]^2 \quad (3.4)$$

şeklinde verilmiştir. M_1 ve M_2 NMOS transistörlerinin aynı fabrikasyon işlemlerinden geçtiği varsayılırsa bu durumda I_{ref} ve I_o akımları arasındaki oran,

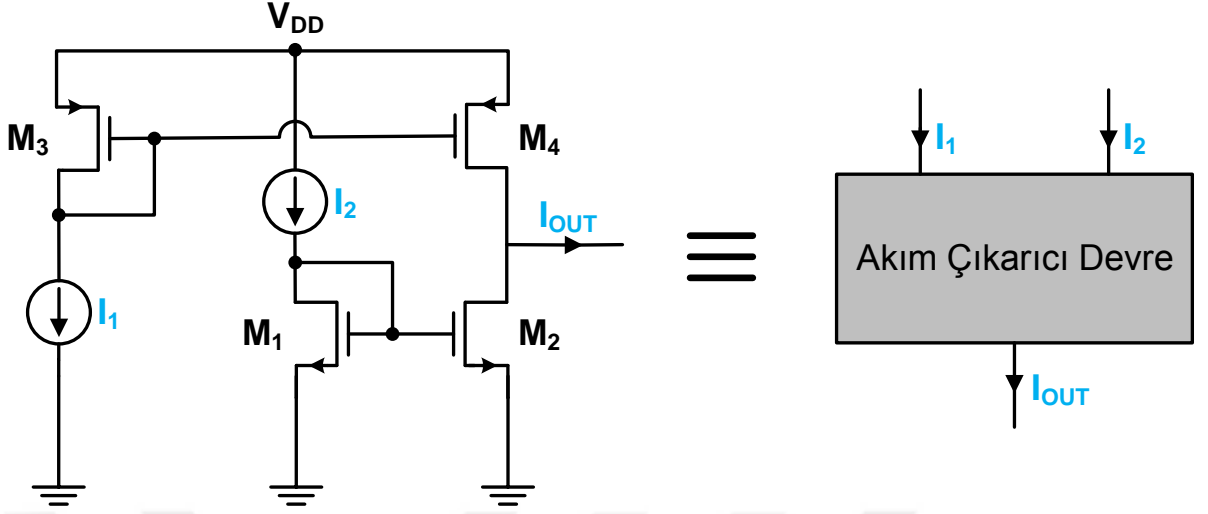
$$\frac{I_o}{I_{ref}} = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_2}{\left(\frac{W}{L}\right)_1} \quad (3.5)$$

şeklinde verilir. $(W/L)_1=(W/L)_2$ olması halinde Denklem (3.5)'te verilen oran 1 olarak elde edilir ve referans olarak verilen I_{ref} akımı aynı şekilde I_o çıkışında kopyalanmış olur. Fakat Şekil 3.5(a) verildiği gibi NMOS transistörler değil de Şekil 3.5(b)'de olduğu gibi bipolar transistörler kullanılırsa base uçları akım çekeceği için bu durumda I_{ref} ve I_o akımları arasındaki oran,

$$\frac{I_o}{I_{ref}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}} \quad (3.6)$$

şeklinde olur. β , bipolar transistör için akım kazancını ifade etmektedir. Denklemde payda kısmı 1'den büyük olacağı için bu oran 1'den küçük çıkacaktır. Yani diğer bir tabirle referans olarak verilen I_{ref} akımı daha küçük olacak şekilde I_o çıkışında kopyalanmış olur. Bunun sebebi bipolar transistörlerin base uçlarının akım çekmesinden dolayıdır. Akım aynası devresinde bipolar transistörler kullanmanın dezavantajlı olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra MOS transistörde W/L oranı değiştirilerek rahatlıkla istenen oranda akım değerleri kopyalanabilmektedir. Fakat akım aynasında bipolar transistörler kullanılmak istenildiğinde kopyalanacak akım oranını artırmak için transistör sayılarını artırıp, bunları birbirlerine paralel bağlamak gereklidir. Bu sebeplerden ötürü akım aynası yapısında MOS transistör tercih etmek avantaj sağlamaktadır.

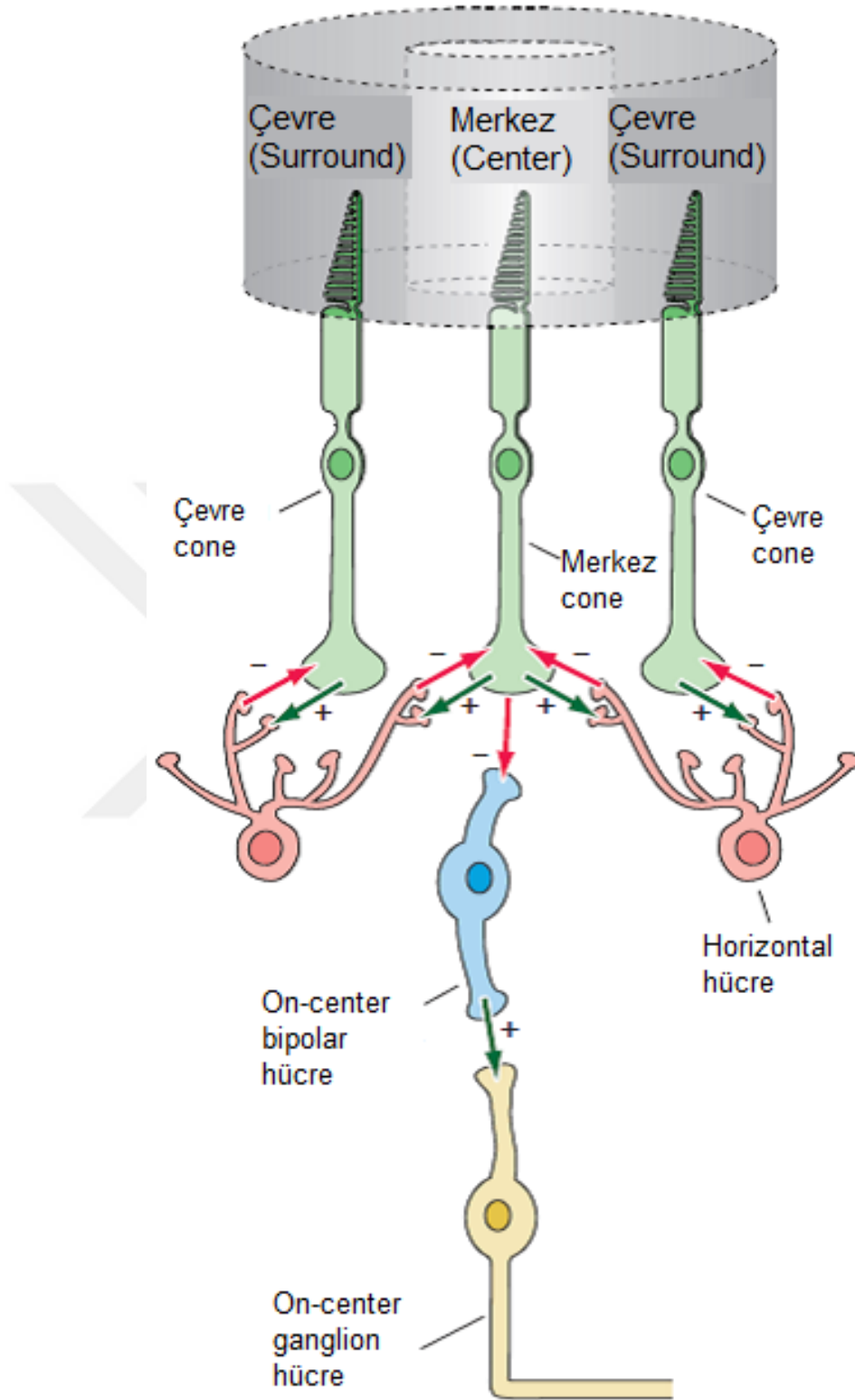
Şekil 3.6'da ise akım çıkarıcı devrenin temel konsepti verilmiştir. M_1 ile M_2 transistörlerinin ve M_3 ile M_4 transistörlerinin W/L oranlarının birbiriyle eşit olması durumunda devrenin çıkışından elde edilecek akım değeri $I_{out}=I_1-I_2$ olacaktır. Yani bu yapı, devrede bulunan iki farklı akımın farkını çıkışa yansıtarak akım çıkarıcı devre olarak görev yapmaktadır. Bölüm 4.2 ve 4.3'de yer alan ve konvolüsyon tekniği yardımıyla görüntü işleme özelliğini gerçekleştiren devre mimarisi, maske katsayılarında yer alan negatif değerlerden dolayı akım çıkarıcı devre yapısına ihtiyaç duymaktadır. Bölüm 4.2 ve 4.3'de yer alan iki devre mimarisinde de akım aynası devresi ve akım çıkarıcı yapısı kullanılacaktır.



Şekil 3.6: Akım çıkarıcı devre yapısının temel konsepti.

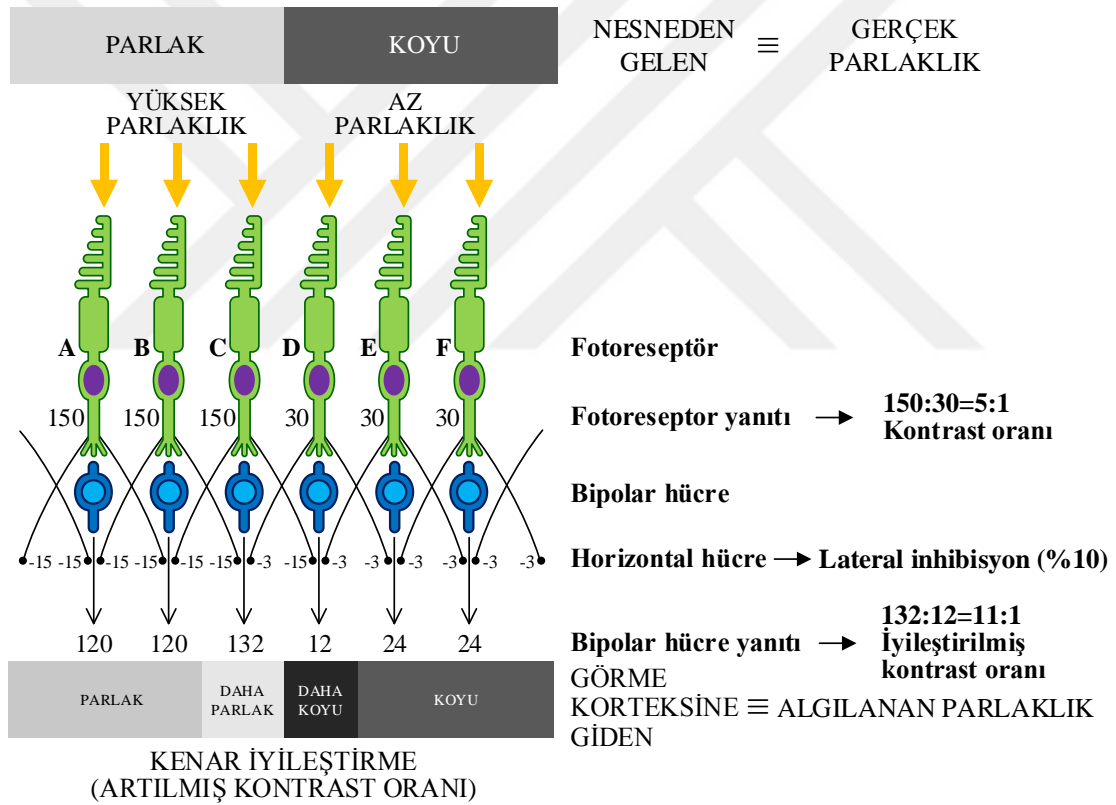
3.5. LATERAL İNHİBİSYON BİYOLOJİK OLAYI

Lateral inhibisyon merkezi sinir sisteminde meydana gelen biyolojik bir olay olarak bilinir ve alıcı bölgenin kendi merkezinden uyarım alması eksitasyona sebep olurken, alıcı bölgenin kendi komşuluklarından uyarım alması ise inhibisyona sebep olur. Bipolar hücrelerin fotoreseptörlerden aldıkları uyarım türü eksitasyon iken horizontal hücrelerden bipolar hücrelere gelen uyarım biçimi inhibisyondur. Horizontal kelime anlamı itibariyle aynı zamanda lateral anlamına geldiğinden ve horizontal hücreler inhibe edici özelliğe sahip olduklarından dolayı, horizontal hücreler tarafından gerçekleştirilen bu biyolojik olay lateral inhibisyon olarak adlandırılmıştır. Lateral inhibisyonun oluşturduğu etki özellikle kenar bölgelerinde dana net bir şekilde görülür. Kenar, bir nesnenin iki farklı bölgesi arasındaki sınır olarak tanımlanabilir (görüntüye ait piksellerin yoğunluğunda ani değişimin olduğu yerler). Lateral inhibisyon sayesinde nesnenin kenar bölgesindeki kontrast oranı artar ve böylelikle görüntüde iyileştirme sağlanmış olur. Önceki kısımda lateral inhibisyon biyolojik olayının horizontal ve amakrin hücreleri tarafından gerçekleştirildiği belirtilmişti. Bu çalışma sadece horizontal hücre kaynaklı lateral inhibisyon olayından bahsedilecektir. Horizontal hücreler, fotoreseptörleri hiperpolarize duruma getirmesinden dolayı (inhibitör özelliği) reseptif bölgede merkez (center) ile çevre (surround) arasında kontrastın (karşıtlık) yani başka bir deyişle her iki kısım arasında parlaklık farkının artırılmasını sağlar. Bununla doğru orantılı olarak cisimlere ait kenarların tespit edilmesi daha kolay hale gelmektedir.



Şekil 3.7: Retinal hücrelerdeki merkez-çevre reseptif alanı yapısı [59].

Şekil 3.7’de retinal hücrelerdeki merkez-çevre reseptif alanı yapısı gösterilmiştir. ON ve OFF ganglion hücrelerinin faaliyet göstermesi benzer yapıdadır. Şekilde gösterilen + işareti eksitasyonu belirtirken, – işareti ise inhibisyonu göstermektedir. Merkezde bulunan fotoreseptör hücrelerinin yoğun olarak uyarı alması merkezde bulunan fotoreseptör kadar uyarı almayan komşu fotoreseptör hücrelerinin horizontal hücreler tarafından merkez fotoreseptöre göre daha fazla inhibe edilmesini sağlar. Yani merkezdeki fotoreseptör ile komşularında bulunan fotoreseptörler arasında yoğunluk farkı olması durumunda, inhibisyon olayı bu farkın daha da artmasına ve böylelikle kenar bölgelerinde kontrast oranının inhibisyon olmadan önceki duruma göre artmasına sebep olmaktadır.

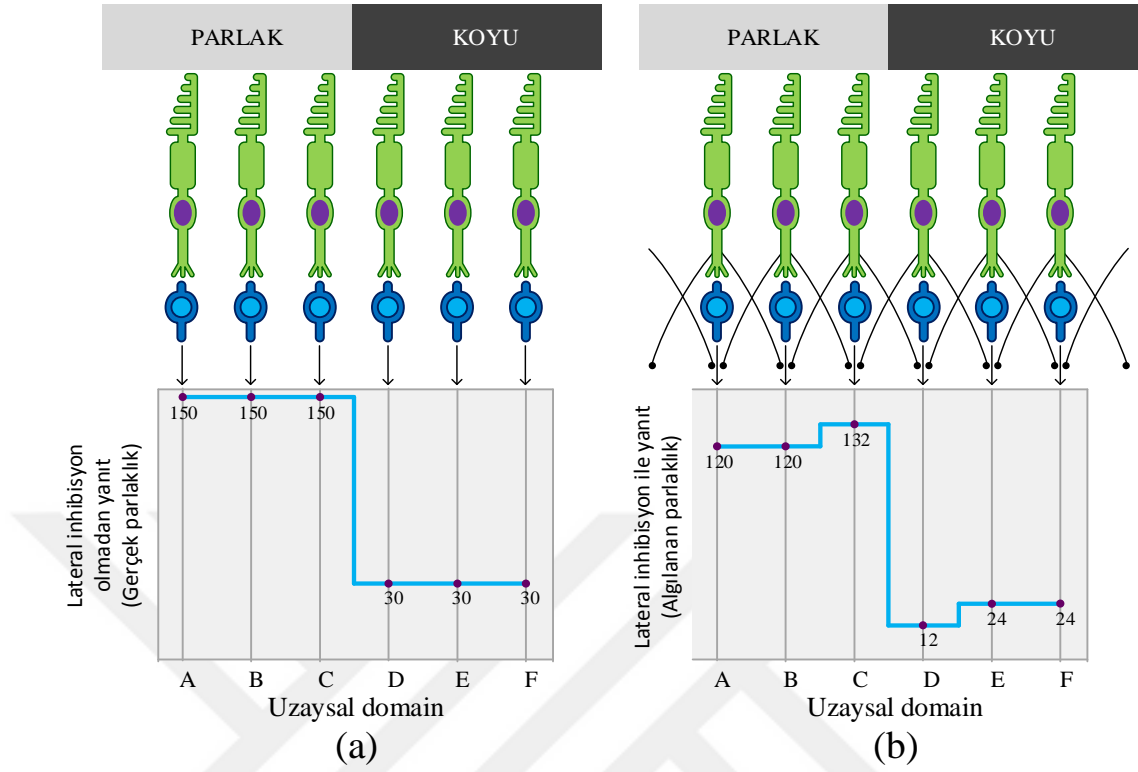


Şekil 3.8: Retinada meydana gelen lateral inhibisyonun mekanizması ve matematiksel olarak açıklanması.

Lateral inhibisyona ait mekanizmanın iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için gerekli matematiksel açıklama Şekil 3.8’deki örnekte sunulmuştur. Bu şekilde verilen sayısal örnekte 0-255 parlaklık aralığında 150 değerine sahip parlak ve 30 değerine sahip koyu kısımdan oluşan nesnede, %10’luk lateral inhibisyon sonucu oluşan ve beynin görme merkezi tarafından algılanan parlaklık değerleri verilmiştir. A ve B piksellerinin sağında ve solunda yer alan pikseller parlak

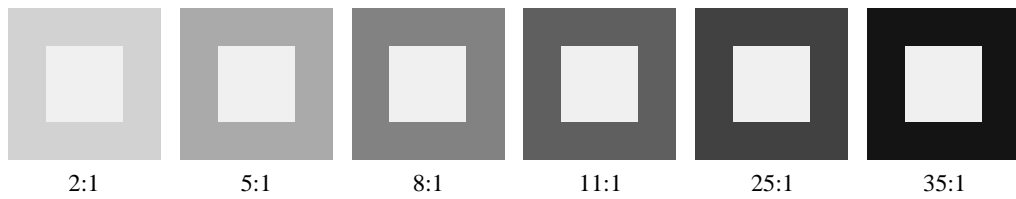
olduğundan komşu piksellerden gelen inhibisyon değerleri $150 \times 10\% = 15$ olacaktır. Yani A ve B piksellerinin bipolar hücre çıkışlarından $150 - (15 + 15) = 120$ değeri elde edilecektir. Benzer şekilde E ve F piksellerinin sağında ve solunda yer alan pikseller koyu olduğundan komşu piksellerden gelen inhibisyon değerleri $30 \times 10\% = 3$ olacaktır. Yani E ve F piksellerinin bipolar hücre çıkışlarından $30 - (3 + 3) = 24$ değeri elde edilecektir. C ve D piksel komşuluklarının bir tarafında koyu piksel bir tarafında ise parlak piksel bulunduğundan ötürü, C pikseline ait bipolar hücre çıkışı $150 - (15 + 3) = 132$ ve D pikseline ait bipolar hücre çıkışı $30 - (15 + 3) = 12$ olacaktır. Görüleceği üzere lateral inhibisyon sonrasında soldan sağa doğru 120, 120, 132, 12, 24 ve 24 parlaklık değerlerine sahip görüntü elde edilmiştir. Yani kenar bölgesinde lateral inhibisyon öncesinde kontrast oranı $150:30=5:1$ iken, lateral inhibisyon sonucu $132:12=11:1$ olmuştur. Daha önceden de bahsedildiği üzere lateral inhibisyon kenar bölgelerinde kontrast oranının yükselmesini ve kenar bölgesinin daha belirgin bir biçimde beyin tarafından algılanmasını sağlamıştır. Göze gelen görüntünün parlaklığı gerçek parlaklık, lateral inhibisyon sonucunda beyne gönderilen görüntünün parlaklığı ise algılanan parlaklık diye adlandırılır ve bu iki parlaklığının aynı olmadığı açık bir biçimde ortadadır. O halde herhangi bir nesne için algılanan parlaklık aslında nesnenin gerçek parlaklığı değildir. Her zaman görme merkezi tarafından aslında nesnenin kontrastı daha yüksek olan hali algılanmaktadır.

Şekil 3.9(a)'da retinanın lateral inhibisyon olmasaydı vereceği yanıt ve Şekil 3.9(b)'de lateral inhibisyondan dolayı verdiği yanıt görülmektedir. Şekil 3.9(a) nesneden retinaya gelen parlaklık değerlerinde, hem kenar bölgesi hem de kenar bölgeleri için lateral inhibisyon işlemi olmaması durumunda değişiklik olmayacağını buna bağlı olarak da gerçek parlaklıklar ile algılanan parlaklıkların aynı kalacağını göstermektedir. Diğer bir yandan Şekil 3.9(b) ise beyin tarafından algılanan görsel sinyal parlaklıklarının lateral inhibisyon olayına bağlı olarak kenar bölgesinde ve kenar olmayan bölgelerde nesnenin gerçek parlaklıklarından farklı olduğunu göstermektedir. Buradan anlaşılacağı üzere lateral inhibisyon sayesinde beyin tarafından nesnenin gerçek parlaklıkları algılanmayıp, kenar bölgesinde parlak kısımlar daha parlak, karanlık kısımlar ise daha karanlık olarak algılanmaktadır.



Şekil 3.9: Retinanın (a) lateral inhibisyon olmadan ve (b) lateral inhibisyon ile verdiği yanıt.

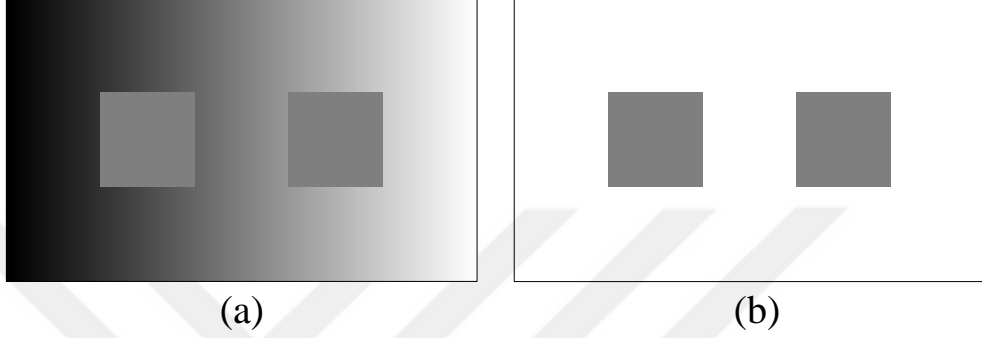
Şekil 3.10'de aynı görüntünün farklı kontrast oranlarına sahip halleri verilmiştir. Görüleceği üzere kontrast oranının artmasıyla birlikte görüntüdeki kenarların daha net ve kolay algılandığı görülmektedir. Lateral inhibisyon olayı algılanan görsel sinyalin kontrast oranını artırdığı için görüntüde bulunan tüm kenarların insan beyni tarafından daha net biçimde algılanmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.10: Kontrast oranlarının farklılığının kenarların belirginliğine etkisi.

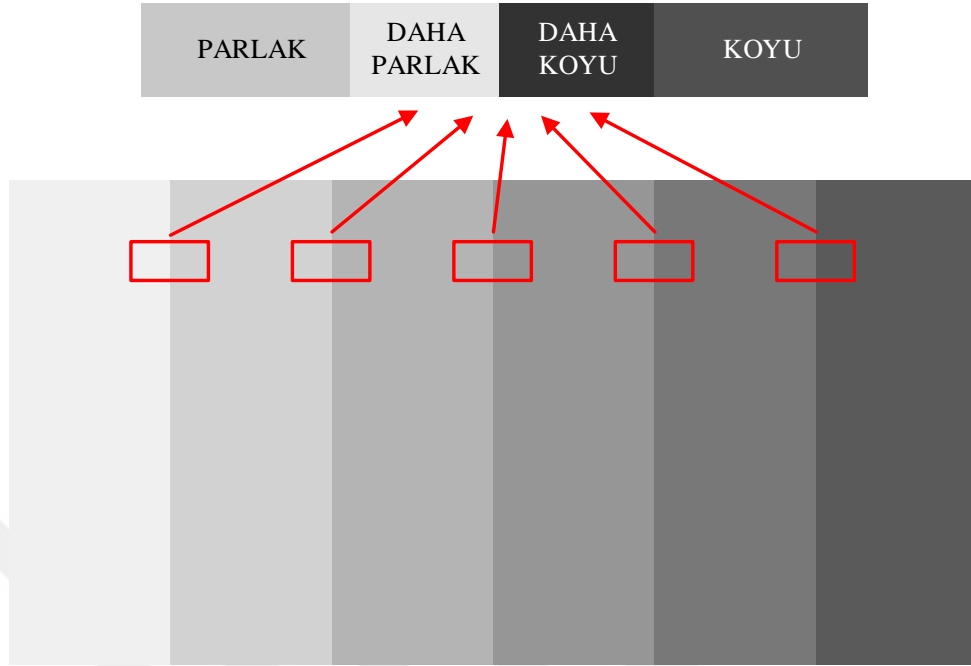
Şekil 3.11(a)'da soldan sağa doğru koyudan açığa doğru değişen gri arka plan üzerinde iki adet kare şekli bulunmaktadır. Dikkatli olarak bakıldığında soldaki karenin sağda bulunan kareye göre daha açık renkte algılandığı görülmektedir. Ancak eğer arka plan silinip Şekil 3.11(b)'deki gibi beyaz arka planlı hale getirilirse o zaman dikdörtgenin içinde bulunan her iki karenin de tam olarak aynı gri tonda olduğu görülecektir. İki adet özdeş karenin neden değişen gri arka

planda farklı olarak görünme sebebi şudur. Lateral inhibisyon olayı daha koyu arka planda, üzerinde bulunan karenin (Şekil 3.11(a)'da solda bulunan kare) daha parlak, daha açık planda ise üzerinde bulunan karenin (Şekil 3.11(a)'da sağda bulunan kare) daha koyu biçimde görünmesini sağlamaktadır. Diğer bir tabirle Şekil 3.11(a)'da kenar bölgesindeki yoğunluk farkı yada kontrast oranı lateral inhibisyondan dolayı artmıştır.



Şekil 3.11: İçinde iki adet kare şekli bulunan dikdörtgen (a) kademeli olarak gri arka planlı ve (b) beyaz arka planlı.

Şekil 3.12'de grinin 6 farklı tonuna sahip bir görüntü verilmiştir ve parlaklık soldan sağa doğru azalmaktadır. Eğer görüntüye dikkatli bir biçimde bakılırsa lateral inhibisyon ile alakalı açıklaması yapılan durumun olduğu görülecektir. Normalde her gri ton kendi içerisinde sabit bir ton rengine sahip olmasına rağmen her sınır bölgesinde parlak kısımlar daha parlak olarak ve koyu kısımlar ise daha koyu olarak görülmektedir. Bunun sebebi lateral inhibisyon biyolojik olayından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.12: 6 farklı gri tonundan oluşan görüntü.

3.6. LAPLACIAN FİLTRELEME YÖNTEMİ

Sayısal görüntü işlemenin temel amacı görüntünün kalitesini artırmak ve görüntüden gerekli bilgiyi alabilmektir. Bu işlem çok farklı filtreleme metotları vasıtasıyla uygulanabilmektedir. Sayısal görüntü işlemede kullanılan metotlardan biri kenar algılama işlemleri için tercih edilen metotlardan biri olan Laplacian filtrelemedir. Bu filtreleme yöntemi görüntü üzerindeki kenarları belirgin hale getirip, kenarların daha kolay algılanmasını sağlamaktadır. İmge iyileştirme ve yüz algılama bu tip filtreleme tekniği kullanılarak yapılabilmektedir. Tipik olarak, Laplacian filtreleme için 3x3'lük boyuta sahip maske kullanılmaktadır. 3x3'lük maskenin tam ortasında bulunan merkez katsayı yüksek bir değerde pozitif ya da negatif olarak seçilmelidir. Ayrıca maskenin merkezinde bulunan katsayı haricindeki tüm diğer komşuluklarında bulunan 8 adet katsayı küçük ve merkezdeki katsayıya göre ters işaretli olarak seçilmelidir [35]. Katsayıların bu şekilde seçilme nedeni, merkezde bulunan negatif ya da pozitif olarak büyük bir değere sahip katsayının görüntüde bulunan kenarları daha belirgin hale getirmesinden dolayıdır.

Laplacian filtrenin maske katsayıları, görüntünün ikinci dereceden türevini alarak da elde edilebilir. İmgenin ikinci dereceden türevine ilişkin dikey ve yatay maskeler sırasıyla Denklem (3.7) ve (3.8)'de ifade edilmiştir.

$$Dikey\ maske = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$Yatay\ maske = [1 \quad -2 \quad 1] \quad (3.8)$$

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (3.9)$$

Laplacian operatörüne, ∇^2 , ait tanım ifadesi Denklem (3.9)'da verilmiştir. Açıkça görüleceği üzere Laplacian operatörü bir görüntünün x'e ve y'ye (dikey ve yatay bileşenlere) göre ikinci dereceden türevlerinin toplamından elde edilebilir. Yukarıda ifade edilen dikey ve yatay bileşenlere ait maskelerin her ikisi de 1 boyutludur. Bu iki bileşene ait maskeler birbiriyle toplandığı zaman 2-boyutlu Laplacian filtre maskesinin ters işaretli hali elde edilir. Bahsedilen 2-boyutlu Laplacian filtre maskesi Denklem (3.10)'da verilmiştir. 2-boyutlu Laplacian filtrenin daha karmaşık hali olan ve Denklem (3.11)'de gösterilen diğer bir 2-boyutlu Laplacian filtre, her 2 köşegene ait maskeler de toplanarak elde edilebilir.

$$Laplacian\ filtre\ için\ maske = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$Laplacian\ filtre\ için\ maske = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Yukarıda verilenlere ek olarak, Denklem (3.10) ve (3.11)'den görüleceği üzere maske katsayılarının toplamı kenar algılama olayını gerçekleştirebilmek için sıfır olacak şekilde ayarlanmalıdır. Maske katsayılarının toplamının sıfır olmasından dolayı, konvolüsyon işlemi

sonrasında görüntü üzerinde bulunan kenar bölgesindeki piksel değerleri sıfır haricinde bir değer alırken (pozitif ya da negatif bir değer), pikseller arası yoğunluk değişiminin olmadığı kenar olmayan bölgede yer alan piksellere ait değerler sıfır olur. Denklem (3.10)'da gösterilen Laplacian filtreye ait maske retina-ilhamlı devreye uygulanmıştır. Tasarımı yapılan devrede maske olarak Denklem (3.11)'de verilen filtre seçilmesi durumunda devrenin eleman sayısı Denklem (3.10)'da verilen filtrenin kullanıldığı devreye göre daha fazla olacaktır. Bu sebepten ötürü devrenin daha karmaşık bir yapıya sahip olmaması için Denklem (3.10)'da verilen maske tercih edilmiştir.

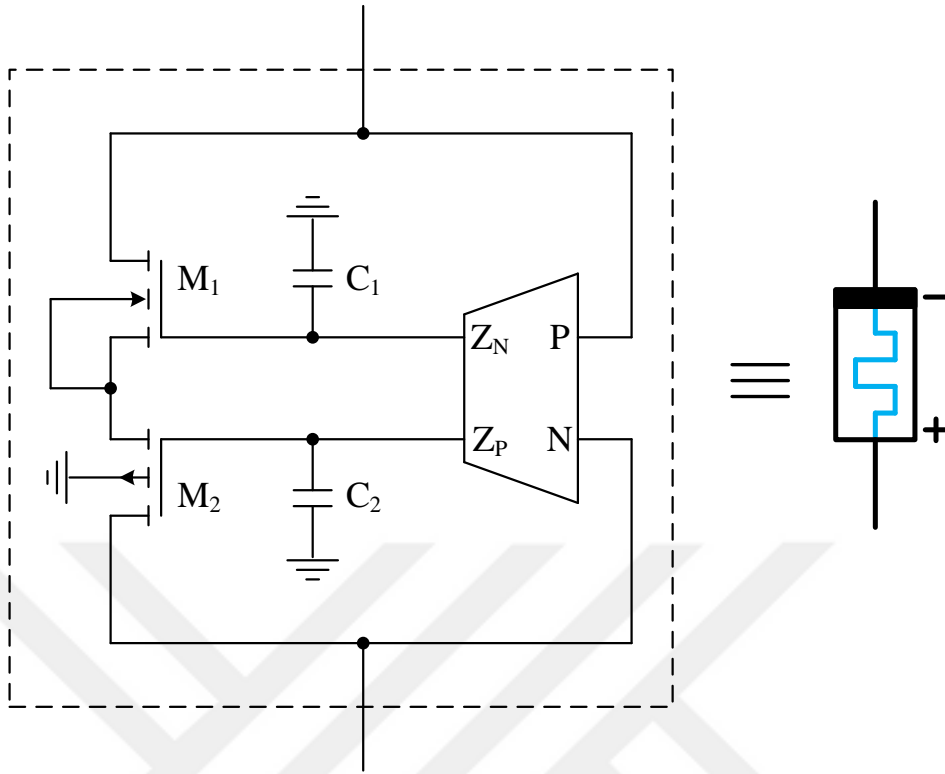


4. BULGULAR

4.1. MEMRİSTÖR TABANLI RETİNOMORFİK GRID MİMARİSİ

4.1.1. Yeni Memristör Taklit Devresi Tasarımı

Bu kısımda, tez çalışması kapsamında önerilen [63] yeni memristör taklit tasarımından ve kullanılan memristör fuse yapısından bahsedilecektir. Önerilen özgün memristör yapısı Şekil 4.1'de verilmiş olup, sadece iki adet MOS transistör (1 adet NMOS, 1 adet PMOS), iki adet kapasitör ve bir adet çift-çıkışlı (pozitif ve negatif akım çıkışlı) OTA (Dual-Output OTA, DO-OTA) ile gerçekleştirilmiştir. Devrenin analizleri sırasında ideal gerilim bağımlı akım kaynağı, OTA devresi olarak kullanılmıştır. Memristör için istenen V-I karakteristiğini oluşturmak için NMOS transistörün Bulk ucu Source ucuna bağlanırken, PMOS transistörün Bulk ucu toprağa bağlanmıştır. Önceden bahsedildiği gibi transistör eşik-altı bölgede lineer olmayan davranış sergiler. Bundan ötürü devre tasarımında yer alan her iki transistör de memristörün lineer olmayan karakteristiğini sağlayabilmek için eşik-altı gerilim bölgesinde çalıştırılır. Bu durumda lineer olmayan davranışın elde edilebilmesi için devrede çarpıcı devresi ya da herhangi bir farklı bloğa ihtiyaç duyulmamaktadır. Devreye giriş gerilimi uygulandığı zaman OTA devresinin akım çıkışı kapasitörlerin dolmasını sağlar ve sonrasında da MOS transistörlerin gate uçlarına uygulanan kapasitörlerdeki gerilim MOS transistörlerden akım akmasına sebep olur. Memristör hafızalı bir devre elemanı olduğundan bu özellik taklit devresinde kapasitör ile sağlanır. Devreye uygulanan giriş gerilimi kesildiği zaman MOS transistörlerin gate uçları yüksek giriş empedansına bağlı olarak akım çekemezler ve kapasitörler de MOS transistörler üzerinden boşalamazlar. Yani kapasitörler sahip oldukları gerilim değerlerini korurlar. Diğer bir tabirle giriş gerilimi uygulanmadığı zaman memristans değeri değişiklik göstermez ve hafıza özelliği kazanılmış olur.

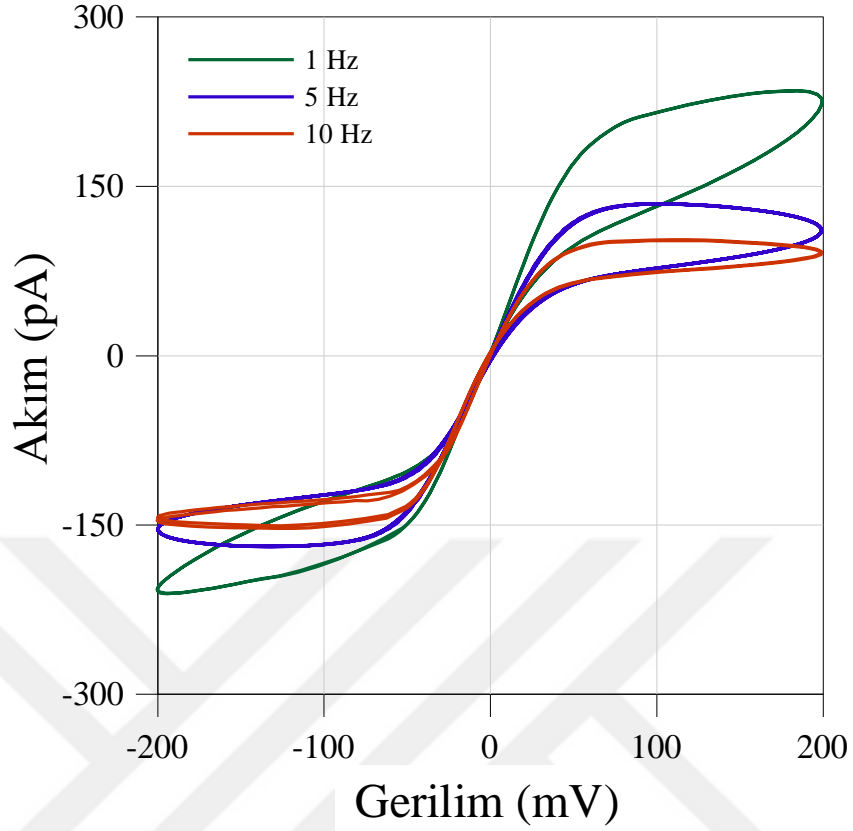


Şekil 4.1: Önerilen yeni memristör taklit tasarımı ve kutupları [63].

Devre elemanları ve giriş gerilimi değerleri Tablo 4.1’de listelenen memristör devresi analiz edilmiştir. Analiz sonuçları esnasında giriş sinyali olarak 1Hz, 5Hz ve 10Hz frekanslarında sinüzoidal işaret uygulanmıştır.

Şekil 4.2’de verilen analiz sonuçları, önerilen taklit devresinin farklı frekanstaki giriş sinyalleri için memristöre ait histeresis eğrisine uygun olarak gerilim-akım değerleri verdiğini ortaya çıkarmıştır. Buradan görüleceği üzere taklit devresi tıpkı memristör gibi özellik göstermektedir.

Bilindiği üzere, memristör elemanı artı ve eksi olmak üzere iki farklı kutba sahip olduğundan kutuplu bir devre elemanıdır. Yani memristör devre elemanının besleme yönü değiştirildiğinde diğer bir tabirle memristörün üzerinden akan akımın yönü değiştirildiğinde memristans (memristörün direnci) değeri artar ya da azalır. Diğer bir taraftan 16x16 piksellik grid yapısında memristör yapıları piksel çıkışlarına ait düğüm noktalarının arasına konulacağı için memristörün akım yönü değişiminden etkilenmemesi istenir. Bu nedenden dolayı grid yapısında kutupsuz bir devre elemanı kullanma gerekliliği ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.2: 1Hz, 5Hz ve 10Hz frekansları için memristöre ait histerezis eğrisi [63].

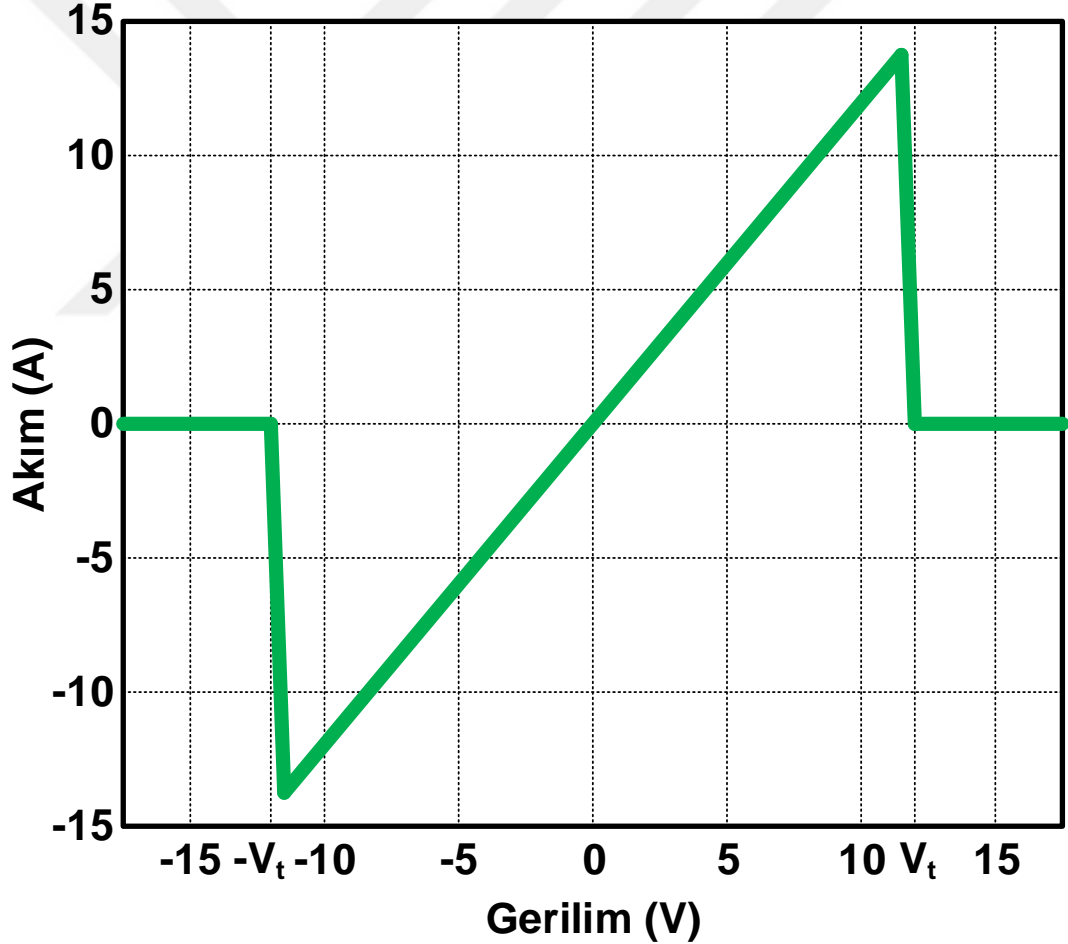
Tablo 4.1: Memristör devresine ait bileşenler ve giriş gerilim değerinin listesi [63].

g_m (OTA)	1pS
M_1 ve M_2 için W/L	100 μ m/1 μ m
C_1 ve C_2	10nF
Gerilimin genlik değeri	200mV

4.1.2. Lineer Olmayan Direnç Olarak Memristör Fuse Kullanılması

Şekil 4.3'te önceki bir çalışmada [15] kullanılan lineer olmayan dirence ait gerilim-akım karakteristiği gösteriyor ki eşik geriliminin (V_t) altındaki gerilim için bu direnç lineer özelliğe sahipken, eşik gerilimin (V_t) üzerindeki gerilim değerleri için bu direnç yapısına ait akım değerleri 0A olmaktadır. Bu durum için lineer olmayan direnç elemanı eşik gerilimin (V_t) altında küçük bir direnç değeri göstererek akımın akmasına izin verirken, eşik gerilimin (V_t) üzerinde ise büyük bir direnç değeri göstererek akımın akmasına izin vermez. Yani eşik gerilimin altında direnç değeri R_{ON} iken, eşik değerinin üzeri için direnç değeri R_{OFF} şeklindedir. Bu direnç yapısı Şekil 4.6'da verilen grid yapısına benzer bir yapıda, her bir piksel

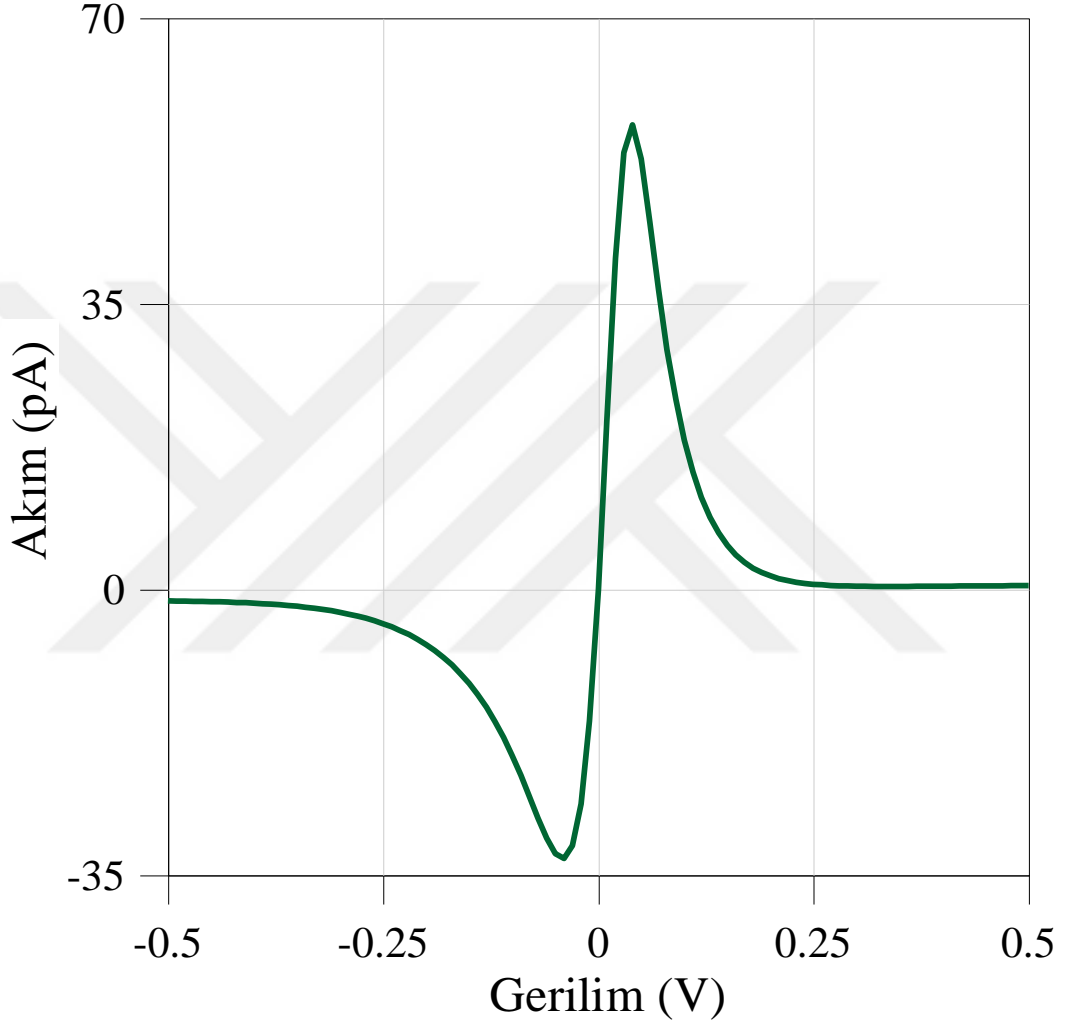
çıkışına ait düğüm noktaları arasında kullanılabilir. Herhangi bir düğüm ile komşuluğunda bulunan düğüm noktaları arasında eşik geriliminin üzerinde bir gerilim farkı olması durumunda (kenar bölgesi) direnç R_{OFF} durumuna geçecek ve düğümler arasında difüzyon olayı olmayacağından (düğümler arası akan akım sıfır olacağından) kenarın durumunu korunması sağlanacaktır. Bunun tam tersi eğer belirtilen düğümler arasında eşik geriliminin altında bir gerilim farkı olması durumunda (kenar olmayan bölge ve/veya gürültü bölgesi) direnç R_{ON} durumuna geçip, düğümler arasında difüzyon olayı olacağından dolayı düğümler arasında akım akışı olacaktır. Bu durum o bölgedeki görüntünün daha yumuşak hale gelmesi, yani gürültünün temizlenmesi anlamına gelmektedir. Bu yüzden görüntü işleme özelliğine sahip devrede lineer olmayan davranış sergileyen direnç yapısı kullanılmalıdır.



Şekil 4.3: Lineer olmayan dirence ait V-I karakteristiği.

Şekil 4.4'te ise Şekil 4.1'te önerilen memristör fuse yapısına ait V-I karakteristiği verilmiştir. Şekil 4.4'ten görüleceği üzere önerilen memristör fuse yapısına -500mV ile 500mV aralığında giriş gerilimi verilmiştir. Şekil 4.3'te elde edilen karakteristiğe benzer bir sonuç elde edilmiştir.

Memristör fuse yapısına ait gerilim-akım grafiğine göre, yaklaşık -50mV ile 50mV aralığında memristör taklit devresi lineer bir özellik göstererek memristöre ait memristans değeri R_{ON} durumunda olup, -300mV ile 300mV gerilim değerlerinin üstü değerler için memristör fuse akımı 0A olduğundan dolayı memristöre ait memristans değeri R_{OFF} durumunda olacaktır.

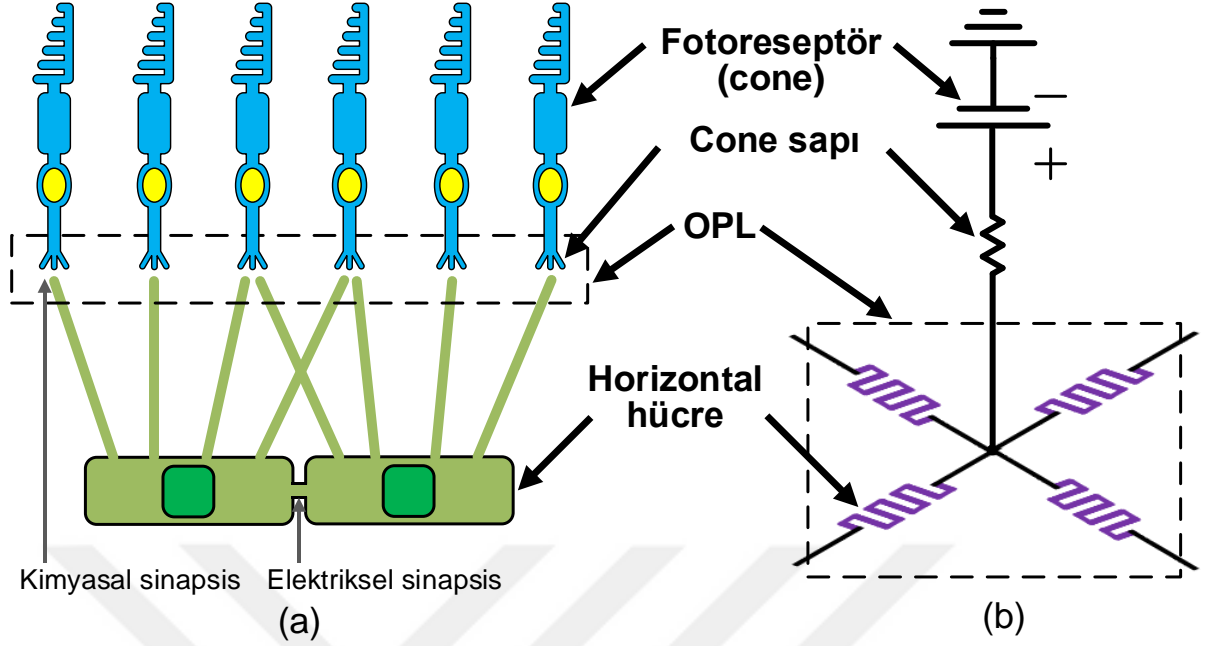


Şekil 4.4: Önerilen memristör fuse yapısına ait V-I karakteristiği [63].

4.1.3. Retina-İlhamlı Pksel Devresi

Retina, insan gözünün ışığa duyarlı kısmıdır. Göze giren ışık kornea ve lens aracılığıyla retinaya ulaşır. Daha sonra bir takım elektriksel ve kimyasal süreçlerden geçer. Retinadaki hücrelerden biri olan fotoreseptör, gelen ışığı sinir sistemi için anlamlı bir enerji formuna dönüştürür. Rod ve cone olmak üzere iki tip fotoreseptör hücresi bulunmaktadır. Rod hücreler düşük ışık durumunda aktif olup, gece görüşünden (skotopik görüş) ve çevresel (periferik) görmeden

(hareketli ya da hareketsiz nesnelerin retinanın merkez kısmı olan makulanın dış kısmı tarafından algılanma durumu) sorumludur. Ayrıca bu hücrelerin renkli görmeye karşı yetenekleri bulunmamaktadır. Cone hücreleri ise yüksek miktardaki ışık koşullarında aktif olup, çevresel değil merkezi görmeden sorumludur. Bunun yanı sıra fotopik (gün ışığı görüşü) görüş ve renkli görüş sağlamaktadır. Horizontal hücre ise görsel bilgi akışının yatay bir şekilde olmasını sağlar ve fotoreseptör hücreleri arasında sinaptik bir bağlantı kurar. Bu hücreler yatay bir biçimde konumlandığı için horizontal hücre olarak adlandırılmıştır. Horizontal hücreler dış nükleer tabakada (outer nuclear layer-ONL) yer alan fotoreseptör aksonları ile iç nükleer tabakada (inner nuclear layer-INL) yer alan bipolar hücrelerin dendrit kısımları arasında ara bağlantının yapıldığı yer olan dış pleksiform tabaka (outer plexiform layer-OPL) için önemli bir yere sahiptir. Horizontal hücreler birbirlerine elektriksel sinapsisler yardımıyla bağlanır. Ancak horizontal hücre ile cone hücreleri sapı arasında kimyasal bir bağlantı bulunmaktadır. Herhangi bir fotoreseptör ile komşuluklarında bulunan fotoreseptörler aynı ışık yoğunluğuna maruz kalmaları durumunda bağlı buldukları horizontal hücrelerin de uyarılması eşit seviyede olur. Bu durumda düğüm gerilimleri eşit potansiyele sahip olacağı için komşu düğümler arasında akım akışı da olmayacaktır. Fakat fotoreseptör ile komşu fotoreseptörlerin ışık yoğunlarının aynı olmaması halinde ise bu kez düğümler arasında akım akışı ortaya çıkacaktır. Bu durumda OPL'de bulunan komşu düğümler arasında potansiyel fark akım akışına bağlı olarak difüzyon olayından dolayı azalacaktır ve böylelikle lokal Gaussian filtre davranışı göstererek istenmeyen gürültünün giderilmesi ve yumuşatılmış bir görüntü elde edilmesi sağlanacaktır. Lokal Gaussian filtreleme yardımıyla istenmeyen gürültünün ortadan kaldırılmasının yanında önerilen grid mimarisi kenar koruma özelliğine de sahiptir [14].

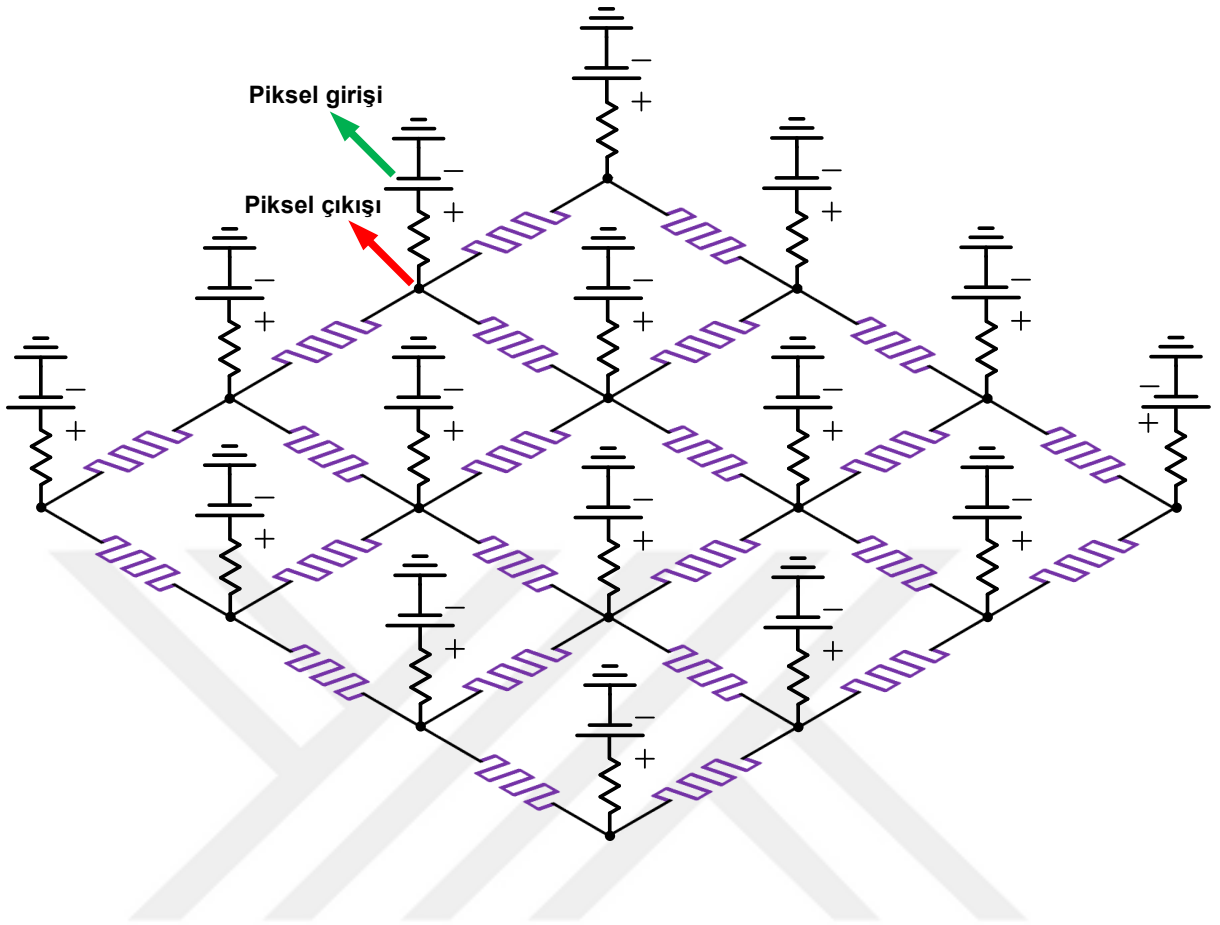


Şekil 4.5: (a) İnsan retinasındaki OPL yapısı (b) bu yapının elektronik devre elemanlarıyla taklit edilmesi [63].

Şekil 4.5(a) insan retinasında bulunan OPL yapısındaki horizontal ve fotoreseptör hücrelerinin birleşim yerini göstermekte olup, Şekil 4.5(b) ise bu OPL mimarisinin elektronik devre elemanları yardımıyla nasıl taklit edilebileceğini göstermektedir. Görüleceği üzere fotoreseptör (piksel girişi) olarak gerilim kaynağı, cone sapı olarak direnç ve horizontal hücre yapısı olarak da memristör fuse kullanılmıştır. Memristör fuse yapıları ile direncin birleşim noktası OPL olarak görev yapmaktadır. Ayrıca her bir düğüm memristör fuse yapısı aracılığıyla komşuluğunda bulunan düğüme bağlanır.

4.1.4. Memristif Retinomorfik Grid Yapısı

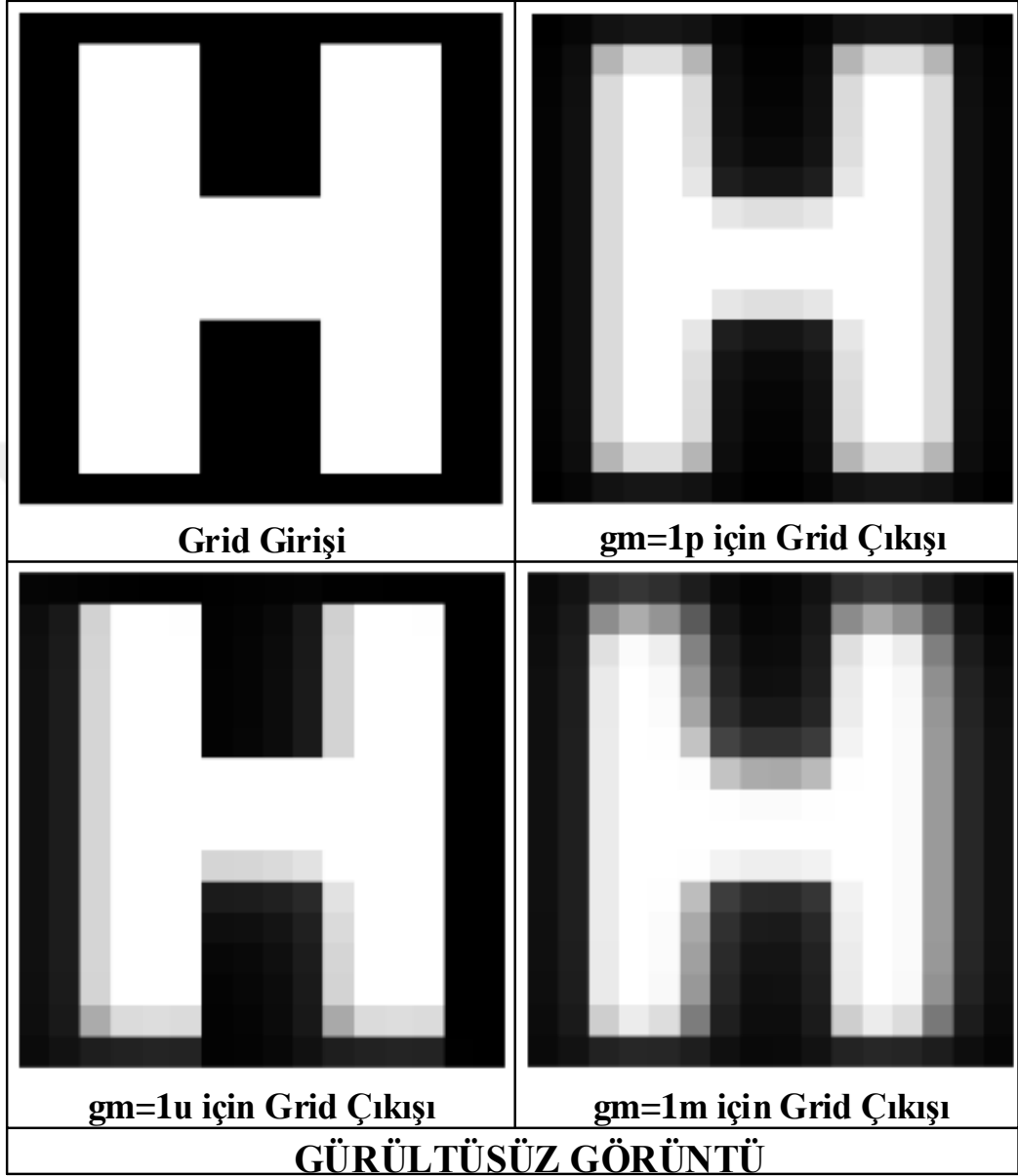
Bu kısımda 16x16 pikselden meydana gelen grid mimari Şekil 4.6'da prototipi verilen yapıya benzer şekilde oluşturulmuştur. Şekil 4.6'da gösterilen her bir düğüm noktası her bir pikselin çıkışını oluşturmaktadır. Yapıda kullanılan gerilimi kaynakları her bir piksele ait giriş gerilimini temsil etmektedir. Görüldüğü üzere piksel girişleri ve düğüm noktaları lineer direnç ile birbirine bağlanırken, düğümler ise birbirlerine memristör fuse yapısıyla bağlanmıştır.



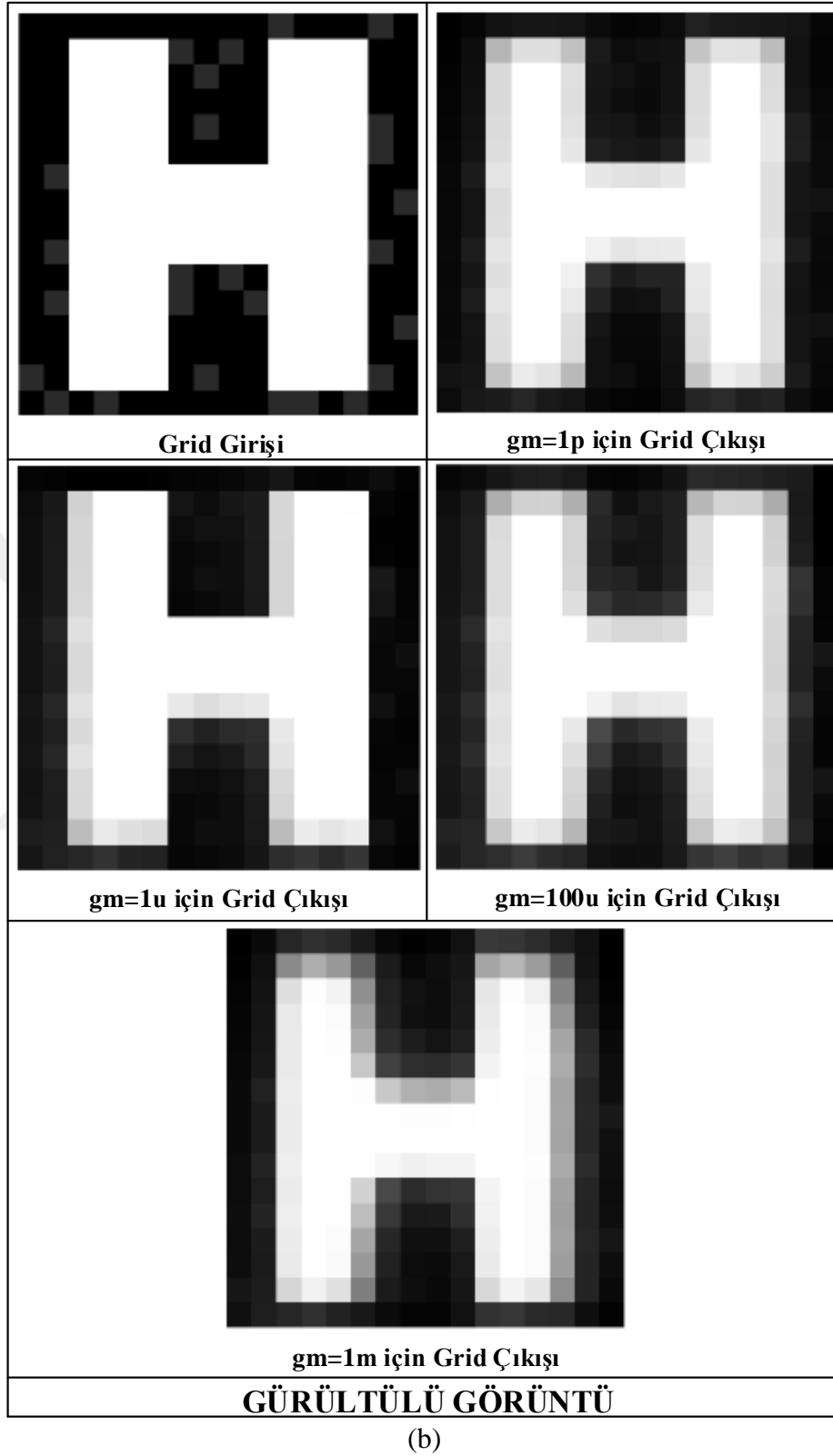
Şekil 4.6: Retinaya ait retinomorfik grid devre yapısı [15].

Analiz aşamasında Şekil 4.6’da verilen yapıda görüntü girişı olarak “H” harfi kullanılmış olup, bu harfi oluşturan görüntüdeki her bir piksel değerine karşılık gelen gerilim değeri retinomorfik devredeki 256 tane piksel girişine uygulanmıştır. “H” harfinin bulunduğu kısımlara (parlak pikseller) giriş gerilimi olarak 300mV, geriye kalan tüm piksellere (koyu pikseller) ise giriş gerilimi olarak 0V uygulanmıştır.

4.1.5. Analiz Sonuçları



(a)



Şekil 4.7: Memristör taklit devresindeki OTA'ya ait g_m değişiminin görüntüye etkisi (a) gürültüsüz giriş görüntüsü için (b) gürültülü giriş görüntüsü için [63].

Şekil 4.7(a)'da önerilen memristör fuse yapısında bulunan çift-çıkışlı OTA için g_m (iletkenlik katsayısı) değeri sırasıyla $1pS$, $1\mu S$ ve $1mS$ alınarak çıkış görüntüsü elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar “H” harfinde bulunan kenarların korunduğunu göstermiştir. Ancak artan g_m değerlerine bağlı olarak kenarların daha da yumuşak bir hal aldığı görülmektedir. Çünkü g_m değerindeki artış, iletkenliğin artmasına sebep olmaktadır. Diğer bir tabirle artan g_m değeri komşu pikseller arasındaki difüzyon olayının artmasına neden olmaktadır.

Şekil 4.7(b)'de, Şekil 4.7(a)'dan farklı olarak giriş görüntüsüne gürültü eklenerek, grid yapının gürültü temizle işlevini yerine getirip getirmediği incelenmiştir. 256 adet pikselden oluşan görüntünün rastgele olarak seçilen %10'luk kısmına (26 adet piksel) $50mV$ 'luk gürültü pikselleri eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar gösteriyor ki Şekil 4.4'te önerilen memristör fuse yapısına ait V-I karakteristiğine uygun bir biçimde gürültüden arındırma ve kenarların korunma özelliği yerine getirilmiştir. Yine Şekil 4.7(a)'da elde edilen sonuçlara benzer şekilde artan g_m değerlerine (komşu düğümler arası artan difüzyon olayı) bağlı olarak kenar bölgesinin de görüntü açısından yumuşamaya uğradığı gözlemlenmiştir [63].

4.2. LATERAL İNHİBİSYON OLAYINI GERÇEKLEŞTİREN RETİNOMORFİK DEVRE YAPISI

4.2.1. Lateral İnhibisyon Olayına Ait Maske Katsayıların Elde Edilmesi

Lateral inhibisyon ile ilgili Bölüm 3.5'te anlatılan açıklamalar doğrultusunda aslında her fotoreseptör hücresinin kendisine ait olan bipolar hücreyi pozitif olarak etkilediği, ancak bipolar hücrelerin komşuluğunda bulunan fotoreseptör hücrelerden horizontal hücrelerden dolayı negatif olarak etkilendiği görülecektir. Buradan yola çıkarak lateral inhibisyon olayını gerçekleştiren maske için gerekli olan katsayılar rahatlıkla elde edilebilir. Eğer lateral inhibisyon olayını gerçekleştiren maske için 3×3 'lük matris elde etmek istenirse horizontal hücrelerin negatif etkisinden ötürü merkez pikselin sağında ve solunda bulunan piksellere ait katsayının negatif olması gerekmektedir. Bu sebepten ötürü bahsedilen katsayılar, i lateral inhibisyon oranı olmak üzere $-i$ olarak tanımlanabilir. Lateral inhibisyon oranı %100'den büyük olamayacağı için i sayısı 1'den büyük seçilmemelidir. Bunun yanında fotoreseptör, kendisine ait bipolar hücreyi pozitif olarak kendi miktarı kadar etkilediği için matrisin merkezinde bulunan piksel katsayısı 1 olarak belirlenir. 3×3 piksellik matriste geriye kalan 6

katsayı 0 olarak alınır. Bu doğrultuda 3x3'lük matris şeklindeki lateral inhibisyon maskesi Şekil 4.8'te verilmiştir.

0	0	0
-i	1	-i
0	0	0

Şekil 4.8: Lateral inhibisyon maskesine ait katsayılar.

Şekil 4.8'te katsayıları verilen maske yardımıyla lateral inhibisyon işleminin rahatlıkla gerçekleştirilmesi mümkün olacaktır. Sayısal görüntü işlemede kullanılan maskeleme yöntemi için konvolüsyon işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Lateral inhibisyon olayı analog devre ile gerçekleştirilmek isteniyorsa, konvolüsyon işlemini gerçekleştirebilen devre tasarımını yapmak gerekmektedir.

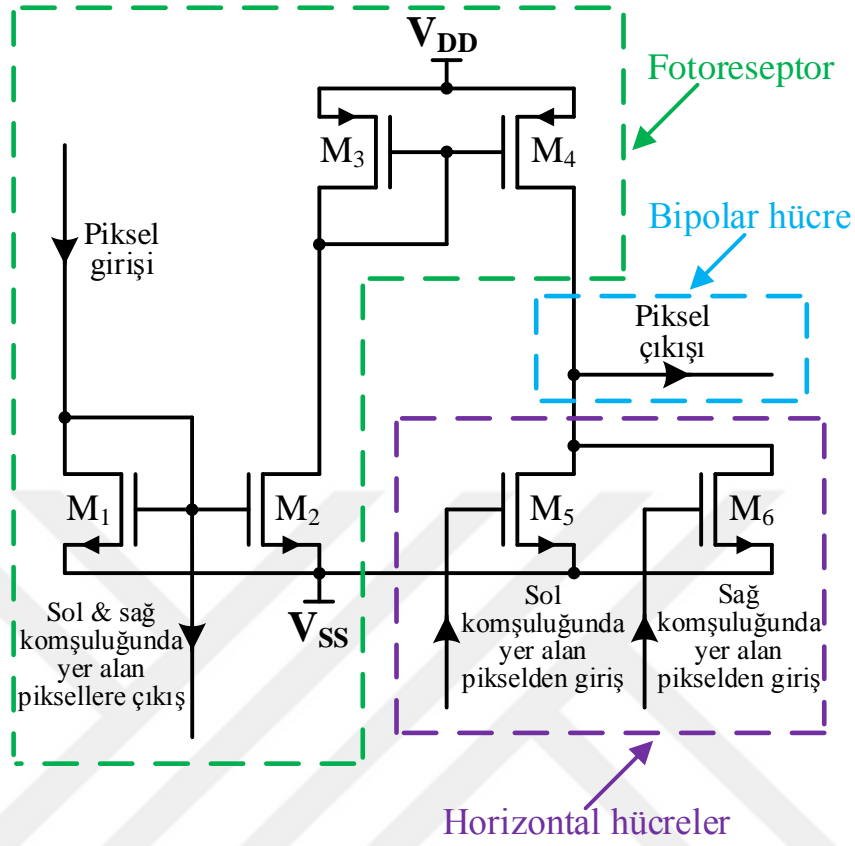
Hayret verici durum ise şudur ki insan beyni her koşulda lateral inhibisyondan ötürü nesnelere inhibe edilmiş ışık yoğunluklu halini algılar. Yani aslında insan gözü tarafından nesnelere gerçek parlaklığı görülememektedir!

Sayısal görüntü işleme ile analog görüntü işleme arasında lateral inhibisyon olayına ait maske katsayılarının elde edilmesiyle ilgili ilk kez bir bağlantı yapılmıştır. Bu mimari için sadece MOS transistörlerden meydana gelen özgün ve basit bir devre önerilmiştir.

4.2.2. Retina-İlhamlı Tek Bir Piksel Devresi

Bir görüntü dikdörtgen yapıdaki pikseller topluluğundan oluşmaktadır. İmgenin en küçük yapısı piksel olarak adlandırılmaktadır. Her bir piksel kare şeklinde olup, sabit ve belirli ışık yoğunluğuna sahiptir. İmgenin temel yapısı piksel olduğundan dolayı öncelikle tek bir piksel yapısı için analog devre tasarımı yapılacaktır. Bu tek bir piksel tasarımını yaparken de insan retinasının gerçek yapısından ilham alınacaktır. Devre tasarımı, Şekil 2.7'de verilen konvolüsyon teorisi, Şekil 3.9'da verilen retinada meydana gelen lateral inhibisyon olayı ile bu olayın matematiksel olarak açıklanması ve Şekil 4.8'de verilen lateral inhibisyon maskesine ait katsayıları göz önüne alınarak yapılacaktır. Konvolüsyonun matematiksel açıklamasından yola çıkarak devrenin en az çarpma ve toplama işlemini yerine getirmesi gerektiği görülmektedir.

Ancak maske katsayılarının negatif de olabileceği göz önüne alınmalıdır. Bu sebepten tasarımını yapılacak devrenin çarpma ve toplama işlemlerinin yanı sıra çıkarma işlemini de yapabilme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Bahsedilen bu devreyi sadece MOS transistörler vasıtasıyla gerçekleştirmek mümkündür. Çarpma işlemini gerçekleştirmek için akım aynasından faydalanılacaktır. Bu kısım retina-ilhamlı devrenin fotoreseptör kısmını oluşturacaktır. Bipolar hücre, fotoreseptörden gelen sinyal ile horizontal hücrelerden gelen sinyalin farkını aldığından dolayı bipolar hücrenin akım çıkarıcı devre ile taklidi yapılacaktır. Toplama işlemi için MOS transistörlerin birbirine paralel bir biçimde bağlanması gerekecek ve böylelikle retinaya ait horizontal hücrenin taklidinin yapılması sağlanacaktır. Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda Şekil 4.9'da verilen ve sadece 6 adet MOS transistörden oluşan analog devre ile retina taklit edilerek yapılan piksel devresi elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere önerilen devre 5 farklı giriş ve çıkış portuna sahiptir. Bunlar piksel giriş portu, piksel çıkış portu, sağ & sol komşuluklarda bulunan piksellere çıkış portu, sol komşuluktan gelen giriş portu ve sağ komşuluktan gelen piksel giriş portudur. Devrede bulunan MOS transistörlere ait W/L oranları değiştirilerek lateral inhibisyona ait maskede bulunan katsayıların kolay bir biçimde düzenlenmesi mümkün olmaktadır. Bu bakımdan retinadan ilham alınarak tasarlanan devre hem karmaşık olmayan hem de esnek bir yapıya sahiptir.



Şekil 4.9: Retina-ilhamlı tek bir piksel devre tasarımı.

İnsan gözü, lateral inhibisyon sayesinde kenar bölgesinde kontrast oranı arttığı için kenar iyileştirme özelliğine sahiptir. Tablo 4.2’de lateral inhibisyon olayına bağlı olarak kenar iyileştirme özelliğine sahip analog devreye ait parametreler verilmiştir. Kenar iyileştirme devresi için inhibisyon oranı (i) 0.1 yani %10 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.2: Kenar iyileştirme devresi için devre parametreleri.

M_1 ve M_2 için W/L	100 $\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$
M_3 için W/L	300 $\mu\text{m}/1\mu\text{m}$
M_4 için W/L	280 $\mu\text{m}/1\mu\text{m}$
M_5 ve M_6 için W/L	10 $\mu\text{m}/0.5\mu\text{m}$
$V_{DD} = -V_{SS}$	1.5V
İnhibisyon oranı (i)	0.1
Soldan sağa doğru 255 üzerinden giriş parlaklık değerleri	210, 120 ve 30

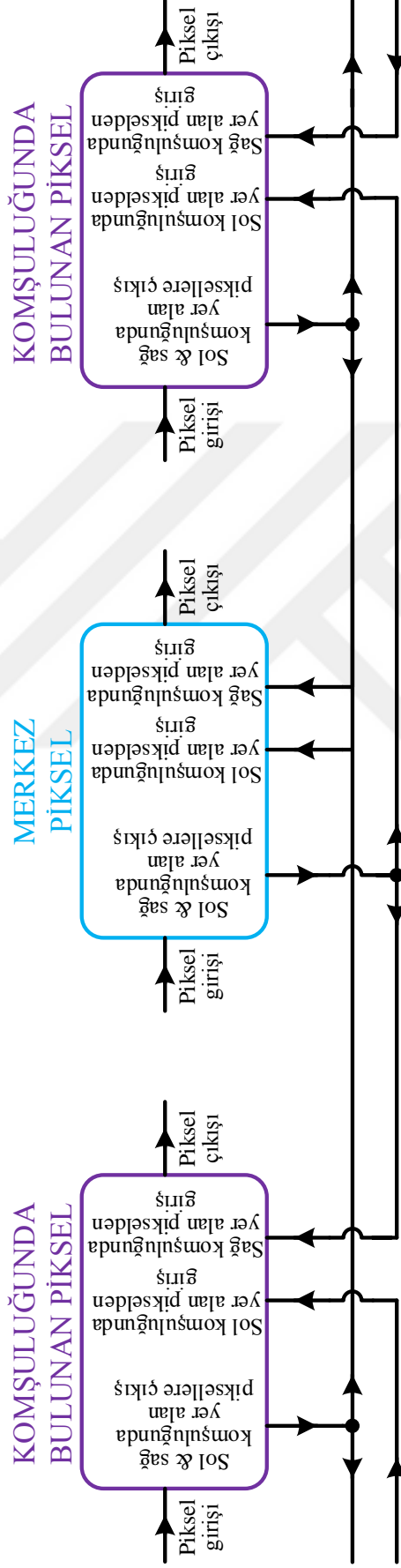
Önceki bölümlerde maskeye ait katsayılar değiştirilerek farklı görüntü çıkışları elde edebildiğinden bahsedilmişti. Bu bakımdan lateral inhibisyon özelliğine sahip devre ile kenar iyileştirme yapılabildiği gibi lateral inhibisyon devresine ait katsayıları değiştirerek bu kez kenar algılama özelliğine sahip devre yapısı da elde edilebilir. Bunun için maskeye ait katsayıların toplamının 0 olması gerekmektedir. Maske katsayıları toplamı 0 olduğunda herhangi bir nesne üzerinde kenar olmayan bölgelerde yani sabit bir renk tonu için (pikselin siyah, beyaz ya da grinin herhangi bir tonu olması fark etmeksizin) maskeleme sonucu 0 olarak elde edilir. Yani böyle durumda bu tip bir maske ile konvolüsyon sonucunda sadece kenar bölgeleri 0'dan farklı değer alacaktır. Kenar bölgesi haricindeki yerler yani sabit bir renk tonuna sahip bölgeler ise 0 değerini alacaktır. Böylelikle bu kısımlar siyah renkte görülecektir. Şekil 4.8'de verilen maske katsayıları için eğer katsayı toplamı 0 olan bir maske elde edilmek isteniyorsa inhibisyon oranı 0.5 seçilmelidir ($1-i-i=1-0.5-0.5=0$). Kenar algılama özelliğine sahip devre için parametre değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Kenar algılama devresi için devre parametreleri.

M ₁ ve M ₂ için W/L	100µm/0.5µm
M ₃ için W/L	300µm/1µm
M ₄ için W/L	280µm/1µm
M ₅ ve M ₆ için W/L	46µm/0.5µm
V _{DD} = -V _{SS}	1.5V
Inhibisyon oranı (i)	0.5
Soldan sağa doğru 255 üzerinden giriş parlaklık değerleri	150, 120 ve 90

4.2.3. Grid Yapıda Retina Mimarisi

Bu kısımda önceki bölümlerde önerilen piksel devrelerinden oluşan retinomorfik devre mimarisinden bahsedilecektir. Bu amaç için grid yapısından faydalanılmıştır. Ayrıca basit bir anlatım olması açısından bu mimari Şekil 4.10'da gösterildiği gibi 1x3 piksellik grid yapıda sunulmuştur. Şekilden görüleceği üzere her bir piksel devresi için solundaki ve sağındaki piksellerden giriş bağlantısı bulunmakta ve aynı zamanda solundaki ve sağındaki piksellere çıkış bağlantısı bulunmaktadır. Yapılan bu bağlantılar sayesinde önerilen grid yapısı, uzaysal domainde giriş görüntüsünün konvolüsyonunu alabilme özelliğine sahip silikon devre özelliğini göstermektedir. Yani çıkış görüntüsü=giriş görüntüsü*lateral inhibisyon maskesi eşitliği analog devre ile gerçekleştirilmiş olunacaktır.



Şekil 4.10: Önerilen devre için grid yapıya sahip retina mimarisi.

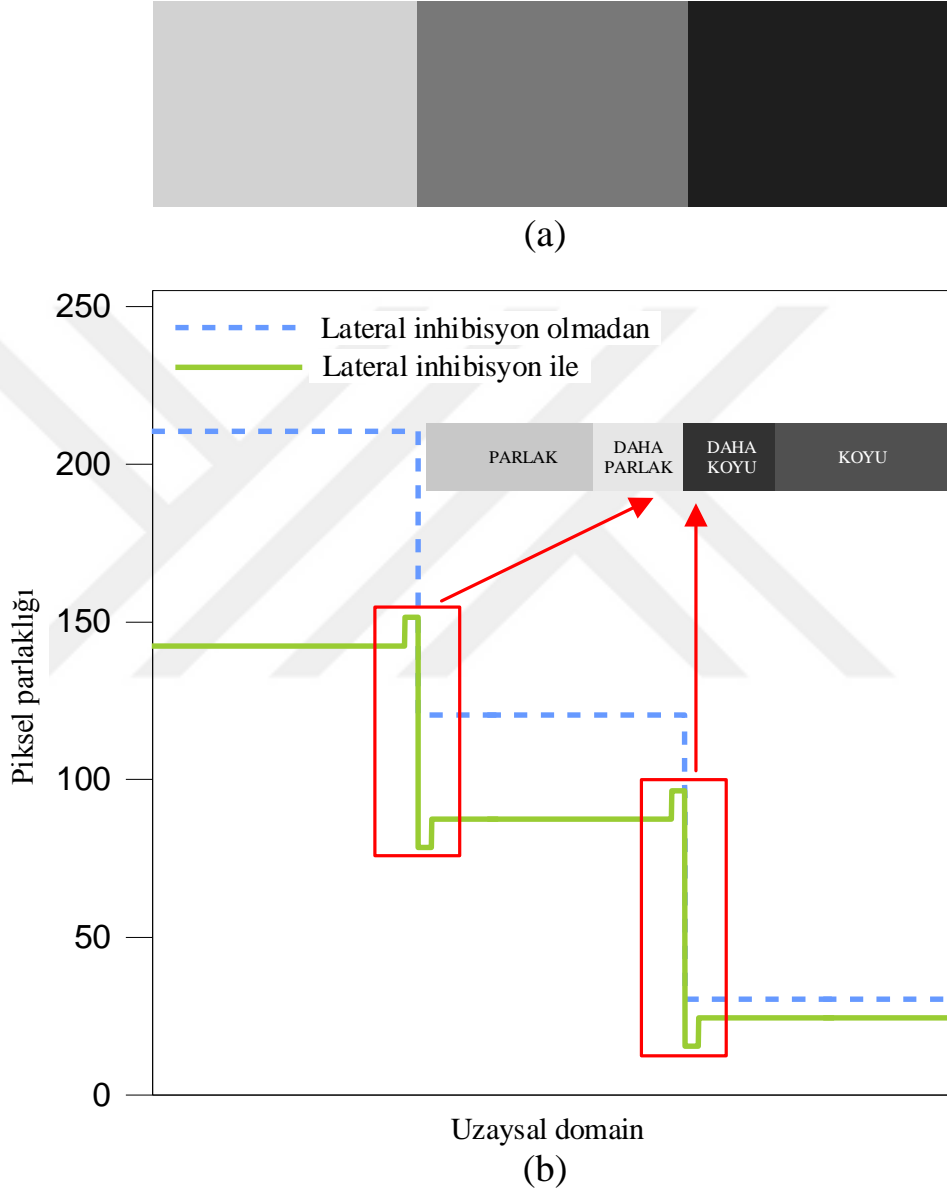
4.2.4. Analiz Sonuçları

Önceki bölümlerde bahsedilen kenar belirginleştirme ve kenar algılama özelliklerine sahip devrelere ait analiz sonuçları bu kısımda verilmiştir. Kenar iyileştirme devresi kenarlardaki kontrast oranının artmasına sebep olurken, kenar olmayan bölgelerdeki kontrast oranının ise sabit kalmasını sağlar. Diğer bir yandan, kenar algılama metodunda ise kenar bölgelerindeki pikseller hariç görüntüde yer alan tüm diğer piksellerin çıkış değerleri maske katsayılarından dolayı 0 olur. Böylelikle kenar bölgelerinin rahatlıkla algılanması sağlanacaktır.

4.2.4.1. Kenar İyileştirme

İlk analiz retinada gerçekleşen lateral inhibisyon olayını sağlayan ve kenar iyileştirme özelliğine sahip devre için yapılacaktır. Bu devrenin analizini yapabilmek için Tablo 4.2’de verilen devre parametreleri kullanılmıştır. Analizi yapılan bu devre ile basit bir elektronik devrenin lateral inhibisyon karakteristiğine sahip olup olamayacağı ispat edilecektir. Bu amaç için Şekil 3.13’te verilen görüntüye benzer ancak kolaylık olması açısından 3 farklı gri tonuna sahip görüntünün analizi yapılacaktır. 3 farklı gri tonuna ait parlaklık değerleri 255 üzerinden soldan sağa doğru sırasıyla 210, 120 ve 30 (Şekil 4.11(b)’deki kesikli çizgi bu değerleri göstermektedir.) şeklinde seçilmiştir. Şekil 4.11(a) giriş görüntüsünü göstermekte olup, Şekil 4.11(b) ise lateral inhibisyon öncesinde ve lateral inhibisyon sonrasında oluşan parlaklıkları uzaysal domainde göstermektedir. Yapılan devre ile lateral inhibisyon olayının nesnelere bulunan kenarlardaki kontrast oranını artırıp artırmadığı görülecektir. Şekil 4.11(b)’deki düz çizgilerden görüleceği gibi sınır bölgesinde parlak olan pikseller daha parlak, koyu olan pikseller ise daha koyu olarak görülür. Kenar bölgesinde piksellerin parlak olduğu kısımda inhibisyon hem parlak hem de koyu pikselden gelmektedir. Kenar olmayan bölgede ise inhibisyon sadece parlak piksellerden gelmektedir. Ancak kenar olmayan bölgede inhibisyon yani parlaklıkta azalma kenar bölgesine göre daha fazla olduğundan kenar bölgesindeki parlak olan pikseller daha parlak olarak algılanır. Benzer şekilde kenar bölgesinde piksellerin koyu olduğu kısımda inhibisyon hem parlak hem de koyu pikselden gelmektedir. Kenar olmayan bölgede ise inhibisyon sadece koyu piksellerden gelmektedir. Ancak kenar bölgesinde inhibisyon yani parlaklıkta azalma kenar olmayan bölgeye göre daha fazla olduğundan kenar bölgesindeki koyu olan pikseller daha koyu olarak algılanır. Görüldüğü üzere 3 farklı gri tonunun sınır kısımlarında bulunan 2 farklı kenar bölgesinde lateral inhibisyon sonucunda kontrast artma durumu ortaya çıkmıştır. Şekil 4.11(b)’de yer alan küçük resimde normalde

insan gözünde meydana gelen algılama olayı resmedilmiş olup, analiz sonuçları da bu doğrultuda olduğundan başarılı analiz sonuçları elde edildiği görülmektedir. Yani insan gözünde meydana gelen durumun aynısı basit bir analog yapı ile devre haline dönüştürülmüştür.



Şekil 4.11: (a) Giriş görüntüsü (b) lateral inhibisyon öncesinde ve lateral inhibisyon sonrasında oluşan parlaklık değişiminin uzaysal domainde gösterimi.

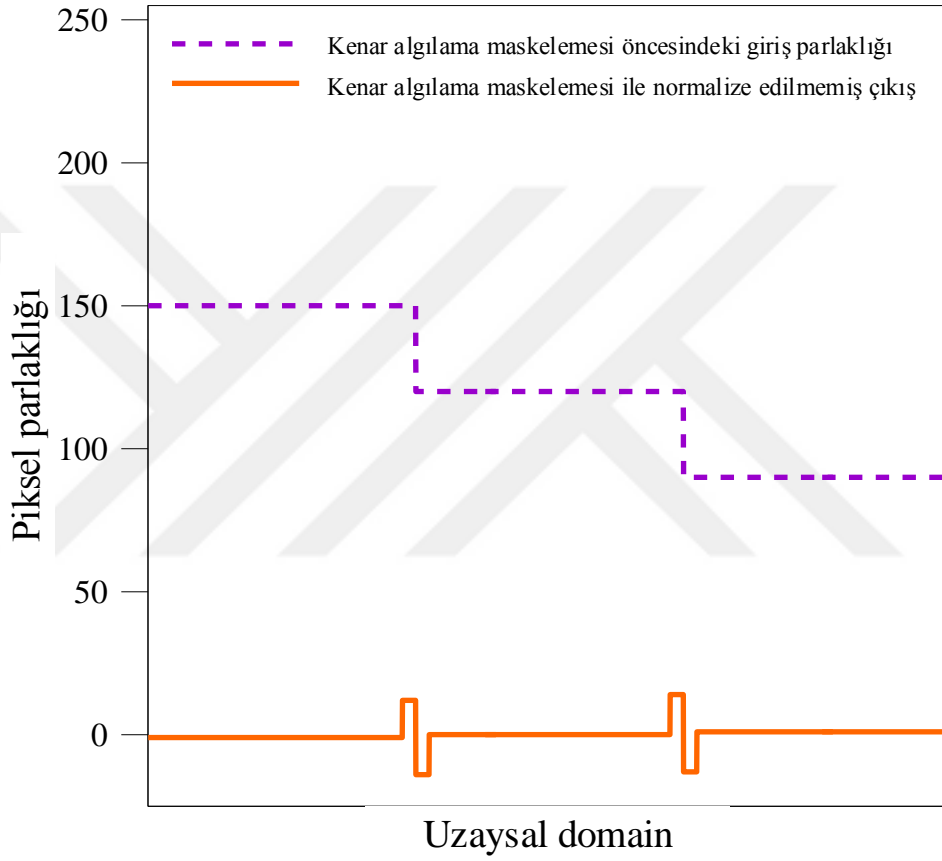
4.2.4.2. Kenar Algılama

Bu bölümde ise bir önceki bölümden farklı olarak başka bir maske kullanarak kenar iyileştirme yerine kenar algılama uygulaması yapılacaktır. Bunun için katsayı toplamlarının 0 olduğu bir

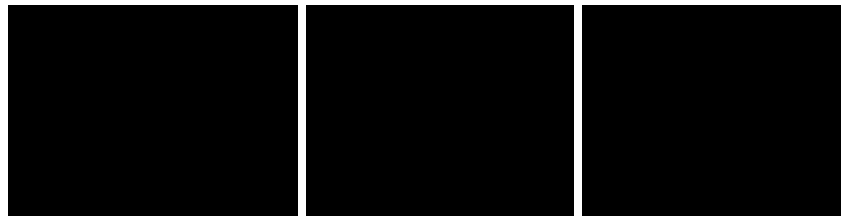
maske filtre olarak tercih edilecektir. Kenar algılama özelliğinin altında yatan sebep şudur. Eğer görüntü üzerindeki herhangi bir pikselin sahip olduğu ışık yoğunluğu komşuluğundaki pikselin ışık yoğunluğundan farklı ise (kenar bölgesi olma durumu), konvolüsyon sonucunda elde edilen pikselin yeni ışık yoğunluğu sıfırdan farklı değer olacaktır (Negatif ya da pozitif değerler olabilmektedir). Bunun tam tersi durumda, eğer görüntü üzerindeki herhangi bir pikselin sahip olduğu ışık yoğunluğu komşuluğundaki pikselin ışık yoğunluğu ile aynı ise (kenar olmayan bölgede), konvolüsyon sonucunda elde edilen pikselin yeni ışık yoğunluğu maskeye ait katsayılar toplamı sıfır olduğu için sıfır olacaktır. Devrenin çalışma şeklini kenar iyileştirmeden kenar algılamaya çevirmek için Şekil 4.9'daki horizontal hücre kısmında bulunan M_5 ve M_6 transistörlerine ait W/L oranları kenar iyileştirme devresine göre değiştirilmiştir. Böylece retinomorfik devre dikey kenarları algılama özelliğine sahip olacaktır. Analiz, Tablo 4.3'te verilen devre parametreleriyle ve maske katsayıları ile gerçekleştirilmiştir. 3 farklı gri renk tonu için 150, 120 ve 90 değerleri seçilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12(a) giriş görüntüsünü, Şekil 4.12(b) kenar algılama maskelemesi öncesinde ve sonrasında ortaya çıkan normalize edilmemiş parlaklık değerlerini ve Şekil 4.12(c) ise normalize edilmiş çıkış görüntüsünü göstermektedir. Bu maske yardımıyla konvolüsyon işlemi gerçekleştirildiği zaman grinin hangi renk tonu olursa olsun çıkış görüntüsünde kenar olmayan bölgeler 0 olacak ve kenar olan bölgeler ise 0'dan farklı bir değer alacaktır. Maske katsayılarından dolayı çıkış görüntüsünün kenar bölgelerinde pikseller negatif değerlere de sahip olmaktadır. Eğer negatif olan değerler 0 olacak ve pozitif olan değerler 255 yani beyaz olacak şekilde normalizasyon işlemi gerçekleştirilseydi Şekil 4.12(c) de olduğu gibi sadece siyah ve beyaz renklere oluşan bir görüntü elde edilirdi. Görüldüğü üzere sadece kenar bölgeleri beyaz renkte olup diğer kısımlar siyah renkte olacaktır. Böylelikle lateral inhibisyon olayında kullanılan maskenin sadece katsayıları değiştirilerek kenar algılama işlemi gerçekleştirilebilmektedir.



(a)



(b)



(c)

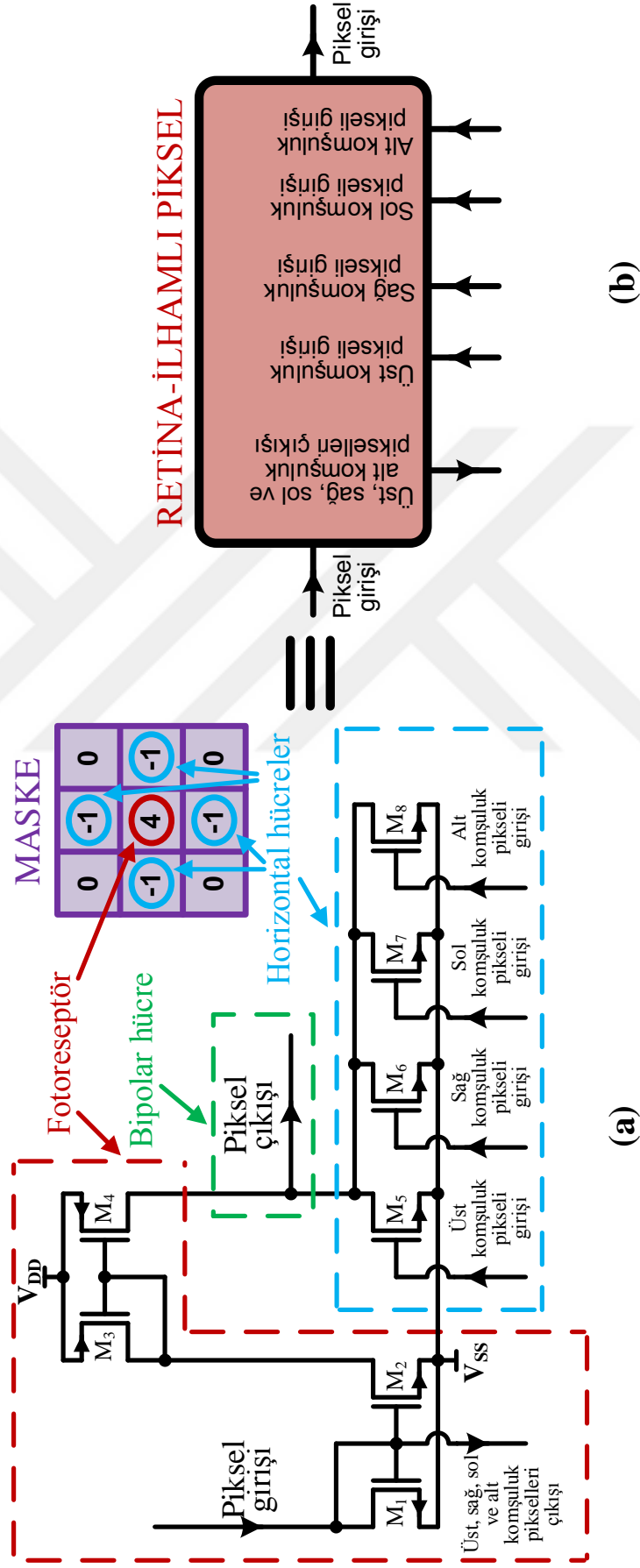
Şekil 4.12: (a) Giriş görüntüsü (b) kenar algılama maskeleyesi öncesinde ve sonrasında ortaya çıkan normalize edilmemiş parlaklık değerleri (c) normalize edilmiş çıkış görüntüsü.

4.3. LAPLACIAN FİLTRELEME METODU TABANLI RETİNOMORFİK ANALOG GÖRÜNTÜ İŞLEME DEVRESİ

4.3.1. Retinanın Taklit Edilmesi Yardımıyla Oluşturulan Pksel Devre Mimarisi

Bir görüntü iki boyutlu $f(x,y)$ fonksiyonu şeklinde olup, fonksiyondaki x ve y uzaysal düzlemi göstermektedir. Herhangi bir görüntü üzerindeki en küçük nokta piksel olarak tanımlanmaktadır ve f fonksiyonuna ait her bir piksele ait genlik değeri piksel yoğunluğu olarak adlandırılmaktadır. Her piksel kare şeklinde olup, dikdörtgen şeklinde oluşturulan pikseller grubu görüntüyü oluşturur. Bu nedenle, retina-ilhamlı grid mimarisini elde edebilmek için öncelikle bir piksele ait yapının tasarımının yapılması gerekmektedir. Şekil 2.7’de açıklanan konvolüsyon teorisine ait genel kavram ve Denklem (3.10)’da verilen Laplacian filtresine ait maske katsayıları, konvolüsyon işlemini gerçekleştirebilen bir elektronik devrenin tasarlanabileceğini ortaya çıkarmaktadır. Konvolüsyon işleminin temeli matematik olduğundan ötürü tasarımı yapılacak olan devrenin matematiksel işlemleri yerine getiriyor olması gerekmektedir. Konvolüsyon teorisinin genel konseptinden yola çıkacak olursak, tasarımı yapılan devrenin çarpma ve toplama işlemlerini yapıyor olması gerekmektedir. Bunun haricinde Laplacian filtrenin maskesinde bulunan katsayıların bir kısmı negatif değere sahiptir. Bu sebepten ötürü, önerilen devre ile çıkarma işleminin de yapılabilmesi gerekmektedir. Çarpma işlemi, akım aynası vasıtasıyla kolaylıkla gerçekleştirilir. MOS transistörler birbirine paralel bağlandığı zaman, bu yapı toplama işlemini gerçekleştiren devre şeklinde davranış gösterir. Bunlara ek olarak, çıkarma işlemi ise akım çıkarıcı devre yapısı sayesinde yapılabilir. Anlaşılacağı üzere, konvolüsyon işlemini gerçekleştiren devre mimarisi sadece MOS transistörler kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu da devrenin çok sade bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Tasarımı yapılan devrenin basit olmasının yanında, bu devre ile aynı zamanda retinanın organizasyon yapısının taklidi de yapılabilir. Daha önceden bahsedildiği üzere, retinanın kısımlarından olan dış retina yapısının benzeri elektronik devre sayesinde elde edilecektir. Bipolar hücrelerin temel görevi fotoreseptör hücrelerinden gelen sinyal ile inhibisyon özelliğine sahip horizontal hücreler tarafından hesaplanan ortalama sinyalin farkını almaktır [12]. Buradan anlaşılacağı üzere, bipolar hücre tam anlamıyla Laplacian filtre davranışı sergilemektedir. Denklem (3.10)’da verilen Laplacian filtreye ait maskenin merkez katsayısı fotoreseptör hücre ile gerçekleştirebilirken, bu maskenin komşuluğunda bulunan 4 katsayı ise horizontal hücre yapıları ile rahatlıkla elde edilebilir. Horizontal hücrelerin sahip

oldukları inhibisyon karakteristiğinden ötürü, bu hücre tipi çıkarma işlemini gerçekleştirmek için kullanılabilir. Önerilen devrede yalnızca 8 adet MOS transistör kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, devre 3 özgün özelliği aynı anda sunmaktadır. Bunlar; devrenin sadece MOS transistörden meydana gelmesi, insan dış retina yapısının taklit edilmesi ve Laplacian filtre maskesi vasıtasıyla konvolüsyon işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu alanda yapılan çalışmalar arasında ilk kez bu 3 önemli özellik aynı devre ile sağlanmıştır. Önerilen retina-ilhamlı piksel devresi Şekil 4.13(a)'da ve bu devreye ait sembol Şekil 4.13(b)'de verilmiştir. Tasarımı yapılan devrenin toplamda 7 adet giriş ve çıkış portu bulunmaktadır. Bu portlardan 1 tanesi piksel giriş portu, 1 tanesi piksel çıkış portu, 4 tanesi komşu piksellerden gelen giriş terminali ve 1 tanesi de komşu piksellere çıkış terminali olarak görev yapmaktadır. Retina-ilhamlı piksel yapısına ait devre için değerler ve giriş akım aralıkları Tablo 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13: (a) Retina-ilhamlı piksel devresi (b) sembolü.

Tablo 4.4: Retina-ilhamlı piksel devresine ait devre bileşenleri ve giriş akımına ait aralıklar.

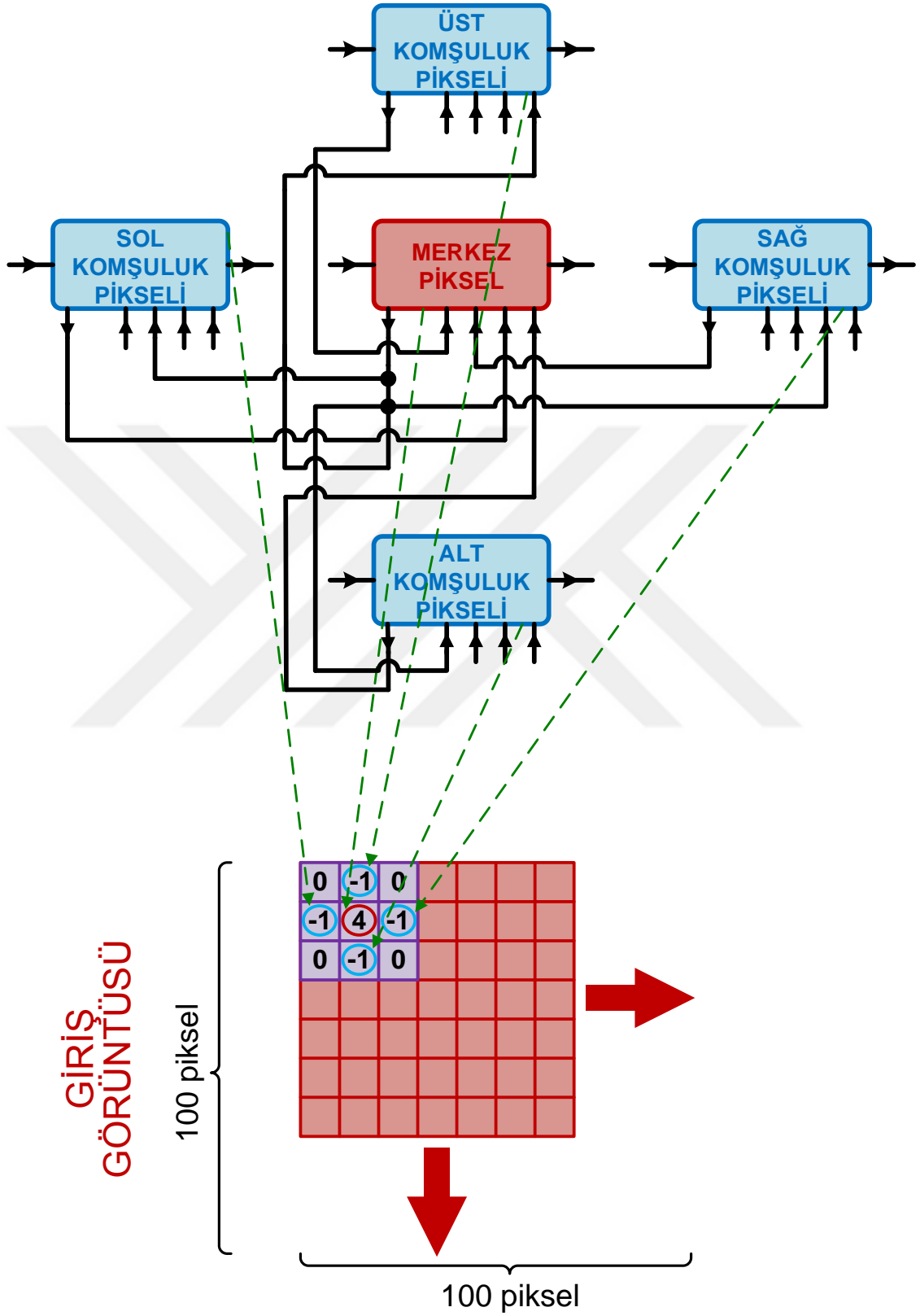
M_1, M_2, M_5, M_6, M_7 ve M_8 için W/L	9 μ m/1 μ m
M_3 için W/L	25 μ m/1 μ m
M_4 için W/L	96 μ m/1 μ m
$V_{DD} = -V_{SS}$	1.5V
Giriş akım aralıkları	250 μ A'den 300 μ A'e

4.3.2. Konvolüsyon İşlemini Gerçekleştiren Retina-İlhamlı Laplacian Filtre Tabanlı Analog İmge İşleyici

Bu kısımda, konvolüsyon teorisinin altında yatan matematiksel konsept karmaşık olmayan 100x100 piksellik grid yapı ile kolay bir şekilde sağlanmıştır. Şekil 4.13(a)'da verilen piksel devresinin alt kısımda bulunan 5 adet komşu pikseller arasındaki ara bağlantılar uygun bir biçimde yapılmıştır. Bu bağlantılar sayesinde önerilen grid yapısı konvolüsyon işlemini gerçekleştirebilme özelliğine sahiptir. Tasarlanan özgün grid mimarisi Şekil 4.14'de verilmiştir. Bu mimaride Şekil 4.13(b)'de verilen retina-ilhamlı piksel sembolünden 5 tane kullanılmıştır. Bu gösterim sayesinde merkez piksel ile bu pikselin 4 komşuluğunda bulunan pikseller arasındaki organizasyon konsepti olarak ifade edilmiştir. Daha anlaşılabilir olması adına sadece 1 piksel ve komşuluğunda bulunan 4 piksel arasındaki bağlantılar verilmiş olup, geriye kalan bağlantılar ise verilmemiştir. Şekil 4.14'de verilen Laplacian filtreleme maskesinden görüleceği üzere, maske katsayılarının 0 olmasından dolayı merkez pikselin 4 köşesinde yer piksellerden herhangi bir bağlantı bulunmamaktadır. Tüm diğer bağlantılar Şekil 4.14'te verilen konseptte uygun olarak 100x100 piksellik devre için yapıldığı zaman konvolüsyon alma özelliğine sahip devre yapısı merkez piksel ve komşu pikseller arasındaki yapılan bağlantılardan ötürü elde edilmektedir. Maskede bulunan katsayılar NMOS ve PMOS transistörlerin W/L oranlarına bağlıdır. Tek yapılması gereken devrede bulunan fotoreseptör kısmı ile horizontal hücrelerin bulunduğu kısımlardaki MOS transistörlere ait W/L oranlarını uygun bir biçimde ayarlamaktır. Laplacian filtreye ait maske katsayıları incelenecek olunursa, giriş piksel sinyalinin akım aynası yapısı sayesinde maskenin merkez katsayı değeri olan 4 ile çarpıldığı görülecektir. Bu sayede dış retinada bulunan fotoreseptör yapısı taklit edilmektedir. 4 katı alınan giriş piksel sinyal akımı M_4 transistörünün drain kısmından akacaktır. Bunun yanı sıra, çarpım katsayısının 1 olması için M_1, M_2, M_5, M_6, M_7 ve M_8 transistörlerinin W/L oranları aynı değerde olmalıdır. Akım çıkarıcı devre mimarisinden faydalandığından dolayı bu çarpım katsayısı -1 olur. Merkez pikselin 4 komşuluğunda bulunan katsayıların -1 olabilmesi için M_5, M_6, M_7 ve M_8 MOS transistörlerinin birbirine paralel bağlanması gereklidir. 4 piksel komşuluğundan gelen

akımlar M_5 , M_6 , M_7 ve M_8 transistörlerinin drain uçlarından akar. Paralel kollardan gelen akımlar toplanacağı için 4 komşuluktan gelen akımlar negatif olarak toplanmış olur. Konvolüsyon işlemindeki -1 katsayısını sağlayan bu kısım retinadaki horizontal hücre organizasyonunu taklit etmektedir. Çünkü horizontal hücreler inhibe edici özelliğe sahiptirler (Fotoreseptör üzerinde azaltıcı etki). Negatif katsayı vasıtasıyla bu özellik sağlanmış olur. Dahası merkez piksel, üstünde, sağında, solunda ve yukarısında bulunan komşu piksellere sinyal alıp, aynı piksellere sinyal göndermektedir.





Şekil 4.14: Konvolüsyon işlemini gerçekleştirebilmek amacıyla yapılan merkez piksel ve komşuluğunda bulunan pikseller arasındaki bağlantı.

Önemli bir detay olarak belirtmek gerekirse, Laplacian filtreye ait maskede 4 köşede bulunan katsayı 0 olduğundan dolayı, bu 4 farklı pikselden merkez piksele herhangi sinyal akışı olmamaktadır. Dış retina yapısının bir özelliği olarak fotoreseptörden gelen sinyal ile horizontal hücrelerden gelen sinyallerin farkı alınır. Devredeki bu kısım piksel çıkışı olarak akım cinsinden değer verir ve böylelikle bipolar hücre yapısı başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

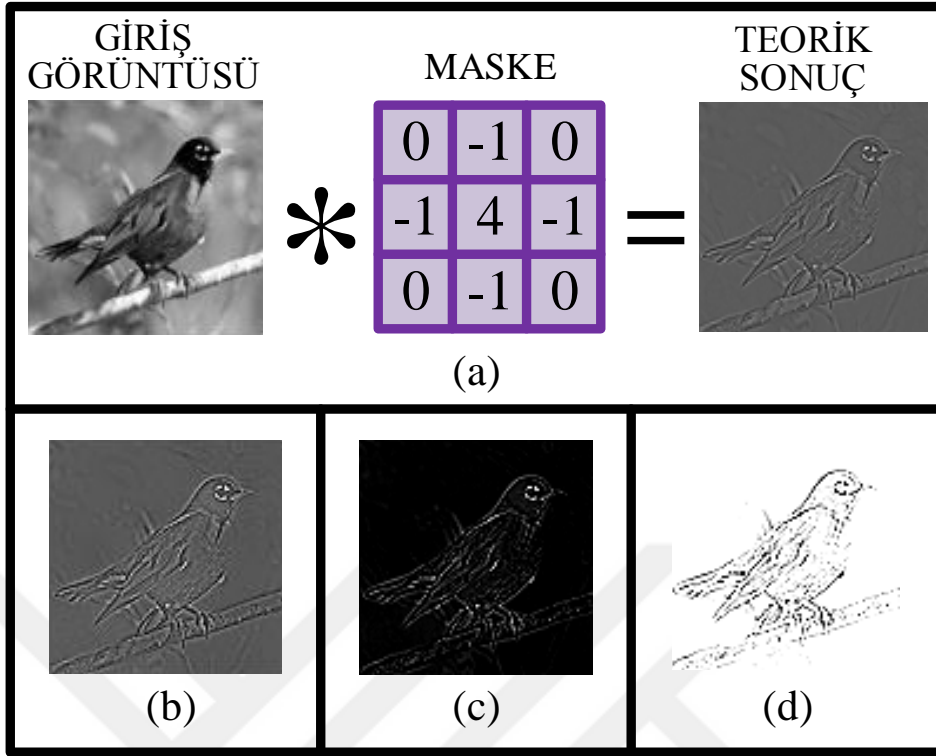
4.3.3. Analiz Sonuçları

Bu kısımda, detaylı analiz sonuçları verilmiştir. Bu amaç doğrultusunda gri skalada 4 farklı giriş görüntüsü analiz edilmiştir. İlk olarak, her bir görüntüye ait Laplacian filtre için teorik sonuçlar verilmiş olup, ardından analiz sonuçları gösterilmiştir. Analiz sonuçları ile teorik sonuçların benzerliği de karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarını elde etme aşamasında giriş sinyali olarak akım kaynağı kullanılmıştır. Tasarımı yapılan devre için giriş akım değer aralığı $250\mu\text{A}$ ile $300\mu\text{A}$ arasında değişmektedir. Konvolüsyon teorisinin temelinde yatan matematiksel sebepten dolayı, teorik sonuç olarak gri arka planlı çıkış görüntüsü olması gerektiğinden analiz sonucu olarak gri arka plana sahip çıkış görüntüsü elde edilmiştir. Buna ek olarak çıkış görüntüleri, çıkış akım değerlerini normalize ederek ve çıkış akım yönünü uygun şekilde alarak beyaz ve siyah arka planlı olarak da başarıyla oluşturulmuştur. Çıkış görüntüsü gri ve siyah arka planda çıkış akım yönünü geri yönde alarak elde edilmiştir. Daha sonra piksel çıkış akım yönü ileri yönde alınarak siyah piksellerin beyaz, beyaz piksellerin ise siyah olması sağlanır. Bu şekilde görüntüdeki arka plan rengi siyahtan beyaza kolay bir şekilde dönüştürebilir. Tablo 4.5'te gri, beyaz ve siyah arka planlı filtrelenmiş görüntü elde etmek için gereken normalizasyon değerleri ve çıkış akım yönleri verilmiştir. Bilindiği üzere bir pikselin değeri 0 ile 255 arasında değişmektedir. Bu sebepten ötürü, 0-255 aralığında olan piksel yoğunluğu değerini $250\mu\text{A}$ ile $300\mu\text{A}$ aralığında olan bir akım değerine normalize etmek gerekmektedir. 0 olan piksel değeri $250\mu\text{A}$ 'e karşılık gelirken, 255 olan piksel değeri ise $300\mu\text{A}$ 'e karşılık gelmektedir. 0-255 aralığındaki diğer tüm piksel değerleri ise $250\mu\text{A}$ ile $300\mu\text{A}$ aralığında bir değere karşılık gelecektir.

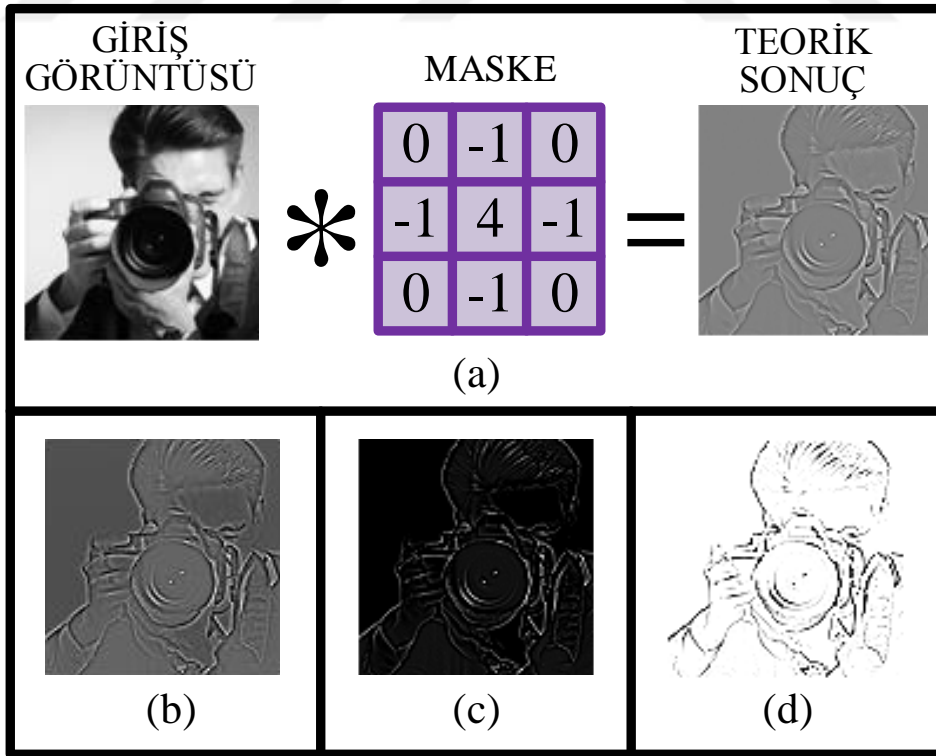
Tablo 4.5: Akım çıkışları için normalizasyon değerleri ve akım yönleri listesi.

ARKA PLAN RENKLERİ	NORMALİZASYON DEĞERLERİ (MİN/MAKS)	AKIM YÖNLERİ
Gri	$-50\mu\text{A} / 50\mu\text{A}$	Geri yönde
Siyah	$-15\mu\text{A} / 50\mu\text{A}$	Geri yönde
Beyaz	$-10\mu\text{A} / 10\mu\text{A}$	İleri yönde

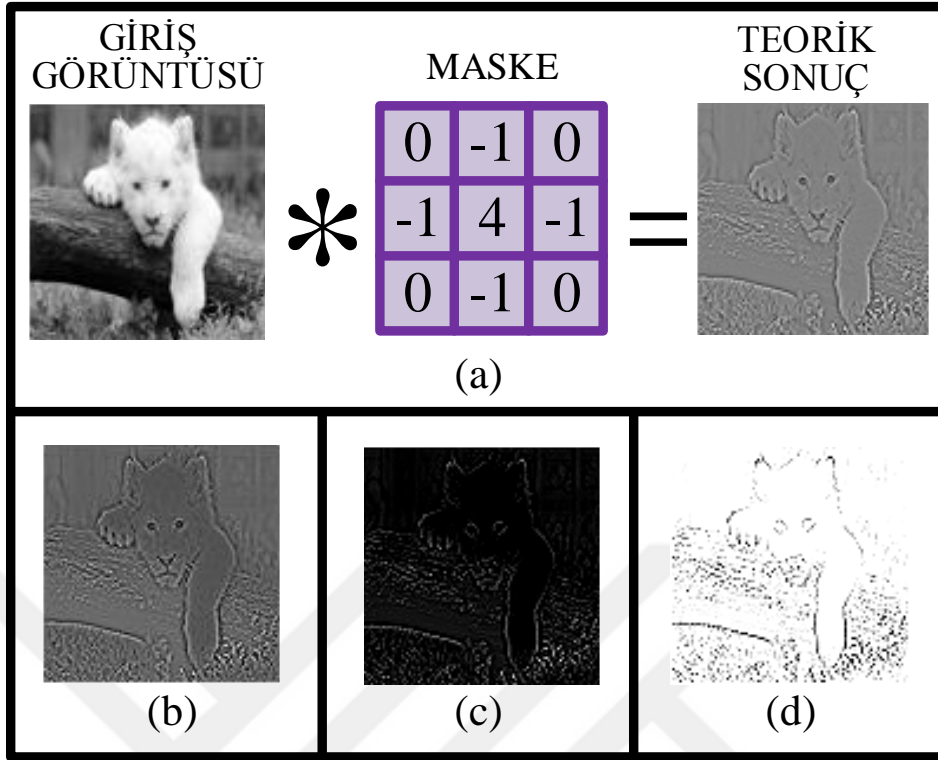
Önceden bahsedildiği üzere giriş görüntüsünde bulunan her bir piksel yoğunluğu retina-ilhamlı devreye uygulanmadan önce piksel yoğunluğundan akım değerine çevrilmelidir. Önerilen grid devre analizi yapıldıktan sonra, devrenin çıkışından akım değeri elde edilir. Bu çıkış akımı, Laplacian filtre faydalanılarak oluşturulan maskelenmiş çıkış görüntüsünü elde etmek için piksel yoğunluğuna çevrilmelidir. Piksel devresinin çıkış akım değerlerine ilişkin önemli bir husus şudur ki kullanılan maskenin katsayılarının toplamı sıfır olduğu için bu değerler pozitif ya da negatif olup, sıfıra çok yakın bir değerdedir. Bu durumdan dolayı, çıkış akım değerlerini piksel yoğunluğuna çevirmek için $250\mu A$ ile $300\mu A$ aralığının dışında olan bir aralıktaki akım değerleri normalizasyon işlemi için tercih edilmelidir. Gri skalada verilen, kuşa, fotoğrafçıya, yavru aslana ve sincaba ait 4 resme ait teorik ve analiz sonuçları Şekil 4.15, 4.16, 4.17 ve 4.18'de verilmiştir. Her bir görüntü için (a) kısmı Laplacian maske temelli filtrelemeye ait teorik konvolüsyon sonuçlarını gösterirken, (b), (c) ve (d) kısımları ise sırasıyla gri arka plana sahip teorik sonuca benzer analiz sonucunu ve normalizasyon ile edilen siyah ve beyaz arka planlı analiz sonuçlarını göstermektedir.



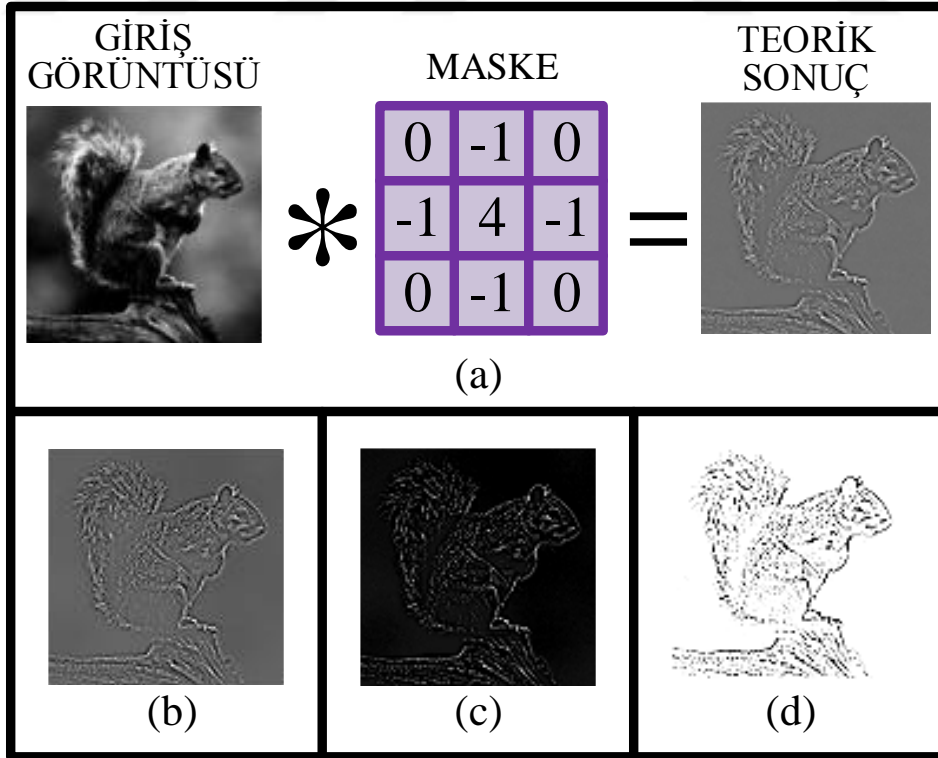
Şekil 4.15: (a) Kuş görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.



Şekil 4.16: (a) Fotoğrafçı görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.



Şekil 4.17: (a) Yavru aslan görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.



Şekil 4.18: Sincap görüntüsüne ait teorik sonuç ve çeşitli arka planlı analiz sonuçları (b) gri (c) siyah (d) beyaz.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tez çalışması süresince nöromorfik yapılar ile alakalı farklı devre tasarımları ve yeni uygulamalar yapılmıştır. Nöromorfik yapıların tasarlanmasında duyu organı olan gözün önemli bir parçası olan retina yapısından yararlanılmış ve tıpkı retinada olduğu gibi insan beynine gönderilmeden önce görüntü üzerinde meydana iyileştirmeler retinomorfik analog devreler vasıtasıyla başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Tezde birinci olarak gerçekleştirilen çalışmada duyu organlarından biri olan göze ait retina yapısı grid şeklinde bir mimari olarak tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan biyo-ilham grid yapıda yer alan her bir piksel devresi için memristif bir yapı kullanılmıştır. Retina yapısındaki işleyişten esinlenerek gerçekleştirilen nöromorfik devre tasarımı sayesinde görüntüde gürültüyü giderme ve kenarların korunması mümkün kılınmıştır. Önerilen grid yapıda birbirine seri ve ters yönde bağlanan 2 adet özdeş memristörden oluşan memristör fuse yapısından faydalanılmıştır. Yapılan çalışmanın en ayırt edici özelliği elektronik devreden oluşan memristör fuse yapısının ilk kez kullanılmasıdır. Çünkü önceki bilimsel çalışmaların tamamında SPICE modellerinden meydana gelen memristör fuse yapısı kullanılmıştır. Dahası, bu grid mimaride retinomorfik devreler üzerine yapılan önceki çalışmalardan farklı olarak basit yapıya özgün bir memristör devresinden faydalanılmıştır. Önerilen memristör taklit devresinde 2 adet MOS transistör, 2 adet kapasitör ve 1 adet çift çıkışlı OTA (DO-OTA) olmak üzere toplam 5 devre bileşeni bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, özgün memristör devresinde topraklı elemanlardan yararlanılmıştır. Topraklı elemanlar yapılan devre tasarımlarını ve analizleri kolaylaştırdığından ötürü elektronik devre tasarlayan kişilerin ilgisini çekmiştir. Bu açıdan önerilen devrenin avantajlı bir konumu mevcuttur.

Tezde ikinci olarak yapılan devre yapısında, insan görme duyusunda meydana gelen lateral inhibisyona benzer karakteristik özelliğe sahip biyo-ilham kenar iyileştirme devre mimarisi önerilmiştir. Bunun yanı sıra maske katsayılarının değiştirilmesiyle elde edilen ve kenar algılama özelliği gösteren devre teorik sonuçlara benzer sonuçlar vermiştir. Görme duyu organındaki retinal hücrelere ait yapı, lateral inhibisyonun nasıl meydana geldiğini derinlemesine olarak anlamak için açıklanmıştır. İlk kez lateral inhibisyon olayına ait maske katsayıları elde edilmiştir ve kullanılan bu özgün devre yapısı sadece MOS transistörler kullanılarak tasarlanmıştır. Bu özellikler ile tasarlanan devre, önceki çalışmalarda önerilen

lateral inhibisyonla alakalı çalışmalara karşı üstünlük sağlamıştır. Lateral inhibisyon özelliği görüntünün kenarlarının daha iyileştirilmesini sağlamıştır. Kenar iyileştirme özelliğine ek olarak, kenar algılayan silikon devre yapısını elde etmek için maske katsayıları modifiye edilmiştir. Bu özelliği sağlayabilmek için katsayılarının toplamı sıfır olan maske kullanılmıştır. Böylelikle kenar algılama devre yapısı ile sadece kenar bölgeleri görünür olan ve kenar olmayan bölgelerdeki parlaklığın sıfır olduğu görüntü başarıyla elde edilmiştir.

Tezde nc olarak yapılan tasarımıda, sadece MOS transistörler kullanılarak ve biyolojik sistemden esinlenilerek elde edilen bir analog retina grid devresi önerilmiştir. Bu devre fotoreseptör, horizontal ve bipolar hücreler bakımından gerçek insan retina organizasyonu ile benzer özellikler göstermektedir. Buna ek olarak önerilen devre, yapılan uygun piksel bağlantıları sayesinde sayısal görüntü işleme teknikleri için çok önemli bir yere sahip olan maskeleme yöntemi ile konvolüsyon işlemine gerçekleştirme özelliğine sahiptir. Ayrıca sayısal görüntü işleme yöntemlerinde ihtiyaç duyulan yazılım kısmına gerek olmadan basit bir analog devre tasarımıyla konvolüsyon işleminin yapılabilirliği ispatlanmış olmuştur. Gri skaladaki 4 farklı görüntü için analiz sonuçları sadece gri arka planda değil (Teorik maskeleme sonuçlarında görüntü gri arka planlı olarak elde edilir.), ayrıca siyah ve beyaz arka planlı olarak da görüntü sonuçları oluşturulmuştur. Maskelenmiş görüntüleri farklı arka planlı olarak elde etmek için normalizasyon değerleri ve çıkış akım yönleri uygun olarak ayarlanmıştir. Elde edilen sonuçlar gösteriyor ki analiz sonuçları belirgin bir biçimde Laplacian filtreleme teorisini doğrulamıştır. Tasarımı yapılan devreye özgün 3 özellik olan sadece MOS transistörlerden meydana gelme, dış retina yapısının taklit edilmesi ve Laplacian filtre tabanlı konvolüsyon işleminin gerçekleştirilmesi olayları ilk kez aynı devre mimarisi ile başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak, tez çalışması ile gerçekleştirilen nöromorfik devre tasarımlarından elde edilen sonuçların literatürde mevcut olan eksikliklere katkı sağlayacağı ve retina ile alakalı olarak analog görüntü işleme alanında ileride yapılacak çalışmalara yol göstereceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]. Indiveri, G., Linares-Barranco, B., Hamilton, T.J., Van Schaik, A., Etienne-Cummings, R., Delbruck, T., et al., 2011, Neuromorphic silicon neuron circuits, *Frontiers in Neuroscience*, 5, 73.
- [2]. Mead, C., 1990, Neuromorphic electronic systems, *Proceedings of the IEEE*, 78(10), 1629-1636.
- [3]. Andreou, A.G. and Boahen, K.A., 1994, A 48,000 pixel, 590,000 transistor silicon retina in current-mode subthreshold CMOS. in: *Circuits Syst. 1994., Proc. 37th Midwest Symp., IEEE*, 97-102.
- [4]. Boahen, K., n.d., Retinomorphic vision systems i: Pixel design. in: *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., Citeseer*, 14-19.
- [5]. Boahen, K., 1996, Retinomorphic vision systems. in: *Microelectron. Neural Networks, 1996., Proc. Fifth Int. Conf., IEEE*, 2-14.
- [6]. Boahen, K.A., 2004, A burst-mode word-serial address-event link-I: Transmitter design, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 51(7), 1269-1280.
- [7]. Mhani, A., Bouvier, G., and Herault, J., 1995, A contrast and motion-sensitive silicon retina. in: *Solid-State Circuits Conf. 1995. ESSCIRC'95. Twenty-First Eur., IEEE*, 326-329.
- [8]. Zaghoul, K.A. and Boahen, K., 2007, Circuit designs that model the properties of the outer and inner retina. in: *Vis. Prosthes. Ophthalmic Devices, Springer*, 135-158.
- [9]. Mahowald, M.A. and Mead, C., 1991, The silicon retina, *Scientific American*, 264(5), 76-82.
- [10]. Boahen, K., 2002, A retinomorphic chip with parallel pathways: Encoding INCREASING, ON, DECREASING, and OFF visual signals, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 30(2), 121-135.
- [11]. Zaghoul, K.A. and Boahen, K., 2004, Optic Nerve Signals in a Neuromorphic Chip I: Outer and Inner Retina Models, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(4), 657-666.
- [12]. Zaghoul, K.A. and Boahen, K., 2004, Optic nerve signals in a neuromorphic chip II: Testing and results, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(4), 667-675.
- [13]. Zaghoul, K.A. and Boahen, K., 2006, A silicon retina that reproduces signals in the optic nerve, *Journal of Neural Engineering*, 3(4), 257.
- [14]. Gelencser, A., Prodromakis, T., Toumazou, C., and Roska, T., 2012, Biomimetic model of the outer plexiform layer by incorporating memristive devices, *Physical Review E*, 85(4), 41918.

- [15]. Jiang, F. and Shi, B.E., 2009, The memristive grid outperforms the resistive grid for edge preserving smoothing. in: *Circuit Theory Des. 2009. ECCTD 2009. Eur. Conf., IEEE*, 181-184.
- [16]. Lim, C.K.K. and Prodromakis, T., 2013, computing motion with 3D memristive grid, *ArXiv Preprint ArXiv:1303.3067*.
- [17]. Serb, A., Khiat, A., and Prodromakis, T., 2016, Practical Demonstration of a Memristive Fuse, *ArXiv Preprint ArXiv:1609.02410*,.
- [18]. Wolpert, S. and Micheli-Tzanakou, E., 1993, Silicon models of lateral inhibition, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 4(6), 955-961.
- [19]. Cook, P.B. and McReynolds, J.S., 1998, Lateral inhibition in the inner retina is important for spatial tuning of ganglion cells, *Nature Neuroscience*, 1(8), 714.
- [20]. Von Békésy, G., 1967, Man as Sensor.(Book Reviews: Sensory Inhibition), *Science*, 158, 1296-1298.
- [21]. Andreou, A.G., Boahen, K.A., Pouliquen, P.O., Pavasovic, A., Jenkins, R.E., and Strohhahn, K., 1991, Current-mode subthreshold MOS circuits for analog VLSI neural systems, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2(2), 205-213.
- [22]. Wolpert, S. and Micheli-Tzanakou, E., 1989, Experiments with lateral inhibition in two-dimensional photoreceptor arrays. in: *Bioeng. Conf. 1989., Proc. 1989 Fifteenth Annu. Northeast, IEEE*, 181-182.
- [23]. Mead, C.A. and Mahowald, M.A., 1988, A silicon model of early visual processing, *Neural Networks*, 1(1), 91-97.
- [24]. Marcus, C.M., Waugh, F.R., and Westervelt, R.M., 1991, Connection Topology and Dynamics in Lateral Inhibition Networks. in: *Adv. Neural Inf. Process. Syst. 3*, 98-104.
- [25]. Moody, J.E., 1990, Dynamics of lateral interaction networks. in: *Int. Neural Netw. Conf., Springer*, 1001-1004.
- [26]. Werblin, F.S., 1973, The control of sensitivity in the retina, *Scientific American*, 228(1), 70-79.
- [27]. Shepherd, G.M., 2003, *The synaptic organization of the brain*. Oxford University Press.
- [28]. van Hateren, J.H., 1992, A theory of maximizing sensory information, *Biological Cybernetics*, 68(1), 23-29.
- [29]. Siskos, S., 2010, Low voltage analog median filters implementation. in: *2010 IEEE Int. Conf. Imaging Syst. Tech. IST 2010 - Proc.*, 166-170.
- [30]. Taguchi, T., Ogawa, M., and Shibata, T., 2003, An analog image processing LSI employing scanning line-parallel processing, *European Solid-State Circuits Conference*, 65-68.

- [31]. Matsumoto, T. and Abidi, A.A., n.d., Analog CMOS Signal Processor for Image Contrast Enhancement, 163-166.
- [32]. Vornicu, I. and Goraş, L., 2010, Image processing using a CMOS analog parallel architecture, *CAS 2010 Proceedings (International Semiconductor Conference)*, 461-464.
- [33]. Marr, D. and Hildreth, E., 1980, Theory of Edge Detection, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 207(1167), 187-217.
- [34]. Hildreth, E.C., 1980, Implementation of a Theory of Edge Detection, (AITR-579).
- [35]. Almazrooie, M. and Venkat, I., 2014, Parallel Laplacian Filter Using CUDA on GP-GPU, 60-65.
- [36]. Hajiaboli, M.R., Ahmad, M.O., and Wang, C., 2012, An edge-adapting laplacian kernel for nonlinear diffusion filters, *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(4), 1561-1572.
- [37]. Shen, D.F., Chiu, C.W., and Huang, P.J., 2006, Modified Laplacian Filter and intensity correction technique for image resolution enhancement, *2006 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME 2006 - Proceedings*, 2006, 457-460.
- [38]. Gonzalez, R.C. and Woods, E. R., 2002, *Digital Image Processing*, EUA: Prentice Hall, Nova Jersey.
- [39]. Chua, L., 1971, Memristor---the missing circuit element, *IEEE Trans Circuit Theory*, 18(5), 507-519.
- [40]. Strukov, D.B., Snider, G.S., Stewart, D.R., and Williams, R.S., 2008, The missing memristor found, *Nature*, 453(7191), 80.
- [41]. Yakopcic, C., Taha, T.M., Subramanyam, G., and Pino, R.E., 2012, Memristor SPICE modeling. in: *Adv. Neuromorphic Memristor Sci. Appl.*, Springer, 211-244.
- [42]. Batas, D. and Fiedler, H., 2011, A memristor SPICE implementation and a new approach for magnetic flux-controlled memristor modeling, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 10(2), 250-255.
- [43]. Chua, 1976, Memristive devices and systems, *Proceedings of IEEE*, 64(2), 209-223.
- [44]. Liu, G., Cheng, Z., Zhou, T., Dong, Z., Ke, H., and Wang, G., 2015, Design and fabrication of tunneling magnetic flux controlled memristor emulator. in: *Commun. Technol. (ICCT), 2015 IEEE 16th Int. Conf.*, IEEE, 349-352.
- [45]. Joglekar, Y.N. and Wolf, S.J., 2009, The elusive memristor: properties of basic electrical circuits, *European Journal of Physics*, 30(4), 661.
- [46]. Bielek, Z., Bielek, D., and Biolkova, V., 2009, SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift, *Radioengineering*, 18(2).

- [47]. Zhang, Y., Zhang, X., and Yu, J., 2009, Approximated SPICE model for memristor. in: Commun. Circuits Syst. 2009. ICCCAS 2009. Int. Conf., IEEE, 928-931.
- [48]. Babacan, Y., Kaçar, F., and Gürkan, K., 2016, A spiking and bursting neuron circuit based on memristor, *Neurocomputing*, 203, 86-91.
- [49]. Yeşil, A., Babacan, Y., and Kaçar, F., 2014, A new DDCC based memristor emulator circuit and its applications, *Microelectronics Journal*, 45(3), 282-287.
- [50]. Kim, H., Sah, M.P., Yang, C., Cho, S., and Chua, L.O., 2012, Memristor emulator for memristor circuit applications, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 59(10), 2422-2431.
- [51]. Babacan, Y. and Kaçar, F., 2017, Floating memristor emulator with subthreshold region, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 90(2), 471-475.
- [52]. Negrov, D., Karandashev, I., Shakirov, V., Matveyev, Y., Dunin-Barkowski, W., and Zenkevich, A., 2017, An approximate backpropagation learning rule for memristor based neural networks using synaptic plasticity, *Neurocomputing*, 237, 193-199.
- [53]. Shi, X., Duan, S., Wang, L., Huang, T., and Li, C., 2015, A novel memristive electronic synapse-based Hermite chaotic neural network with application in cryptography, *Neurocomputing*, 166, 487-495.
- [54]. Wang, X., She, K., Zhong, S., and Cheng, J., 2017, Exponential synchronization of memristor-based neural networks with time-varying delay and stochastic perturbation, *Neurocomputing*, 242, 131-139.
- [55]. Wu, H., Li, R., Yao, R., and Zhang, X., 2015, Weak, modified and function projective synchronization of chaotic memristive neural networks with time delays, *Neurocomputing*, 149, 667-676.
- [56]. Xavier, G.M.T., Castañeda, F.G., Nava, L.M.F., and Cadenas, J.A.M., 2018, Memristive recurrent neural network, *Neurocomputing*, 273, 281-295.
- [57]. Xiao, S., Xie, X., Wen, S., Zeng, Z., Huang, T., and Jiang, J., 2018, GST-memristor-based online learning neural networks, *Neurocomputing*, 272, 677-682.
- [58]. Xie, X., Wen, S., Zeng, Z., and Huang, T., 2018, Memristor-based circuit implementation of pulse-coupled neural network with dynamical threshold generators, *Neurocomputing*, 284, 10-16.
- [59]. Purves, D., Augustine, G.J., Fitzpatrick, D., Hall, W.C., Lamantia, A.-S., Mcnamara, J.O., et al., 2004, Neuroscience.
- [60]. Levitt, S.P. and Dwolatzky, B., 2002, An implementation of generalised convolution for image processing. in: Africon Conf. Africa, 2002. IEEE AFRICON. 6th, IEEE, 311-316.
- [61]. Ferain, I., Colinge, C.A., and Colinge, J.-P., 2011, Multigate transistors as the future of classical metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, *Nature*, 479(7373), 310.

- [62]. Geiger, R.L. and Sanchez-Sinencio, E., 1985, Active Filter Design using Operational Transconductance Amplifiers: A Tutorial, *IEEE Circuits and Devices Magazine*.
- [63]. Yildirim, M., Babacan, Y. and Kacar, F., 2018, Memristive RetinomorphiC Grid Architecture Removing Noise and Preserving Edge, *International Journal of Electronics and Communications*, doi:<https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.10.001>.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Melih YILDIRIM
Doğum Yeri	İzmir
Doğum Tarihi	29.07.1988
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	melih.yldrm@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Kocaeli Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	30.06.2010

Yüksek Lisans	
Üniversite	Nottingham Üniversitesi - İngiltere
Enstitü Adı	Mühendislik Fakültesi
Anabilim Dalı	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Programı	Elektromanyetik Tasarım

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	
1. Yıldırım, M., Babacan, Y. and Kacar, F., 2018, Memristive Retinomorphc Grid Architecture Removing Noise and Preserving Edge, <i>International Journal of Electronics and Communications</i> , doi:https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.10.001.	