

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI MEMRİSTÖR EMÜLATÖRLERİNİN ELEKTRONİK DEVRELER
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

**Sevgi GÜRSUL
36173615011**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI

TEMMUZ 2020

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI MEMRİSTÖR EMÜLATÖRLERİNİN ELEKTRONİK DEVRELER
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

**Sevgi GÜRSUL
36173615011**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI

TEMMUZ 2020

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi tez çalışmam süresince de yanımda manevi güçlerini hissettiğim aileme ve sevdiklerime,

Bu tez çalışmasının her aşamasında tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI'ya,

Lisansüstü öğretimim boyunca tecrübe ve bilgileriyle bana her konuda destek olan İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümündeki tüm hocalarıma,

FYL-2019-2012 numaralı Yüksek Lisans Tez Projesi ile sağlanan destek nedeniyle İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine

Teşekkürlerimi sunarım.



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Farklı Memristör Emülatörlerinin Elektronik Devreler Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Sevgi Gürsul



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	x
ABSTRACT	xiii
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bilgiler.....	1
1.2 Literatür Özeti	2
2. MEMRİSTİF DİRENÇ: MEMRİSTÖR.....	9
2.1 Memristörün Tarihçesi.....	9
2.2 Memristörün Tanımı	14
2.3 Memristör Modelleri.....	17
2.3.1 Hp memristör modeli (doğrusal iyon sürüklenmesi modeli)	17
2.3.2 Doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modeli.....	19
2.3.3 Simmons tünel bariyer modeli	20
2.3.4 Eşik uyarlamalı memristör modeli	20
2.4 Memristör Emülatör Devreleri.....	21
2.4.1 Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı memristör emülatörleri.....	21
2.4.2 Muthuswamy'nin tasarladığı memristör emülatörü	22
2.4.3 Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörleri	23
2.4.4 Pershin ve Di Ventra'nın tasarladığı memristör emülatörü	24
2.4.5 Kim ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü	25
2.4.6 Milan Stork'un tasarladığı memristör emülatörü	26
2.4.7 Sodhi ve Gandhi'nin tasarladığı memristör emülatörü	27
2.4.8 Babacan ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü	28
2.4.9 Lopez ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü	29
2.4.10 Kalomirov ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü	30
2.5 Diğer Memristif Sistemler	31
2.5.1 Memkapasitör.....	31
2.5.2 Memindüktör.....	32
3. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRLERİNİN SİMÜLASYONDA VE LABORATUVAR ORTAMINDA ELDE EDİLMESİ.....	34
3.1 Mutlu ve Karakulak Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları	34
3.2 Muthuswamy Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları	36
3.3 Alharbi ve Arkadaşlarının Gerilim Kontrollü Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları	37
3.4 Alharbi ve Arkadaşlarının Akım Kontrollü Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları	39
3.5 Kalomirov ve Arkadaşlarının Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları.....	40
4. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRLERİNİN GERÇEKLENMESİ VE ELEKTRONİK DEVRELERDEKİ UYGULAMALARI.....	42
4.1 Elektronik Filtrelerin Özellikleri ve Memristör Emülatörlerinin Alçak Geçiren Filtredeki Performans Karşılaştırması	42
4.1.1 Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatörün filtre devresine etkisi.....	45
4.1.2 Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörün filtre devresine etkisi.....	47
4.1.3 Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü emülatörün filtre devresine etkisi.....	49

4.1.4 Kalomirov ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün filtre devresine etkisi.....	51
4.1.5 Standart direncin filtre devresine etkisi.....	53
4.2 Osilatör Devrelerinin Özellikleri ve Memristör Emülatörlerinin Faz Kaydırıcı Osilatördeki Performans Karşılaştırması	55
4.2.1 Standart dirençli ve Mutlu-Karakulak'ın tasarladığı emülatörlü osilatör karşılaştırması	58
4.2.2 Standart dirençli ve Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörlü osilatör karşılaştırması	61
4.2.3 Standart dirençli ve Alharbi vd gerilim kontrollü emülatörlü osilatör karşılaştırması	63
4.2.4 Standart dirençli ve Alharbi vd akım kontrollü emülatörlü osilatör karşılaştırması	66
4.3 Mantık Kapılarının Özellikleri ve Memristör Emülatörlerinin Mantık Kapıları ile Performans Karşılaştırması.....	69
4.3.1 Standart dirençli ve Mutlu-Karakulak emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması	72
4.3.2 Standart dirençli ve Muthuswamy emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması	75
4.3.3 Standart dirençli ve Alharbi vd gerilim kontrollü emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması	77
4.3.4 Standart dirençli ve Alharbi vd akım kontrollü emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması	80
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ	94

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1 : Simüle edilmiş osilatör devrelerinin; frekans, gerilim, akım ve güç değerleri.	68
Çizelge 2 : Laboratuvarda deneyimlenmiş osilatör devrelerinin; frekans, gerilim, akım ve güç değerleri.	69
Çizelge 3 : Simüle edilmiş mantık devrelerinin; gerilim, ortalama akım ve güç değerleri.	83
Çizelge 4 : Laboratuvarda deneyimlenmiş mantık devrelerinin; gerilim, ortalama akım ve güç değerleri.	83



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1 : Chua'nın tasarladığı memristör emülatörü (Chua, 1971).	9
Şekil 2. 2 : Memristörün ϕ -q eğrileri (Chua, 1971)	10
Şekil 2. 3 : Memristör akım-gerilim karakteristiği (Chua ve Kang, 1976).	10
Şekil 2. 4 : Temel nonlinear devre elemanları diyagramları (Chua, 1980).	12
Şekil 2. 5 : Temel lineer elektronik elemanlar ve aralarındaki bağıntılar	13
Şekil 2. 6 : Çapraz bağlantıyla oluşturulmuş nano boyutta 17 adet memristör.....	15
Şekil 2. 7 : Memristörün sembolü (solda) ve tasarlanmış memristör elemanı (sağda).	15
Şekil 2. 8 : Memristörün uygulanan akıma göre davranışı	16
Şekil 2. 9 : HP memristör modeli.....	18
Şekil 2. 10 : I-V grafiğinde memristans aralığının değişimi.	18
Şekil 2. 11 : HP memristörün artı ve eksi gerilim uygulandığındaki durumları gerilim uygulanmamışken (a). artı gerilim uygulanıyorken (b). eksi gerilim uygulanıyorken (c). (Kerur, 2010).	19
Şekil 2. 12 : Simons tünel bariyer yöntemi.	20
Şekil 2. 13 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı analog çarpıcı memristör emülatörü (Mutlu ve Karakulak, 2010)	21
Şekil 2. 14 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı doğrultucu memristör emülatörü (Mutlu ve Karakulak, 2009)	22
Şekil 2. 15 : Muthuswamy'nin tasarladığı memristör emülatörü (Muthuswamy, 2010)....	22
Şekil 2. 16 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü memristör emülatörü (Alharbi ve diğ, 2015).	23
Şekil 2. 17 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü memristör emülatörü (Alharbi ve diğ, 2016).	23
Şekil 2. 18 : Alharbi ve arkadaşlarının gerilim kontrollü emülatör devresinin deneysel sonuçları 200 Hz frekansta histerezis eğrisi (a). 1.5kHz frekansta histerezis eğrisi (b). 3kHz frekansta histerezis eğrisi (c). 5kHz frekansta histerezis eğrisi (d). (Alharbi ve diğ, 2016).	24
Şekil 2. 19 : Persin ve Di Ventra'nın tasarladığı memristör emülatörü (Persin ve Di Ventra, 2010).	24
Şekil 2. 20 : Kim ve arkadaşlarının tasarladığı artan konfigürasyonlu memristör emülatörü (Kim ve diğ, 2012).	25
Şekil 2. 21 : Kim ve arkadaşlarının tasarladığı azalan konfigürasyonlu memristör emülatörü (Kim ve diğ, 2012).	26
Şekil 2. 22 : Kim ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün frekansa bağlı I-V karakteristikleri (Kim ve diğ, 2012)	26
Şekil 2. 23 : Milan Stork'un tasarladığı farklı kombinasyonlu memristör emülatörleri paralel R_2C (a). seri R_2C (b). (Stork, 2018).	27
Şekil 2. 24 : Milan Stork emülatörü $f=200-500$ Hz Arasındaki Akım Gerilim Karakteristikleri (Stork, 2018).	27
Şekil 2. 25 : Soldi ve Gandhi tarafından tasarlanan memristör emülatörü (Sodhi ve Gandhi, 2010).	28

Şekil 2. 26 : Soldi ve Gandhi'nin tasarladığı emülatörün farklı frekanslardaki I-V karakteristikleri $f=20$ Hz (a). $f=100$ Hz (b). (Sodhi ve Gandhi, 2010).....	28
Şekil 2. 27 : Babacan ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü (a). OTA elemanının iç yapısı (b). (Babacan ve Kaçar, 2017).....	29
Şekil 2. 28 : Lopez ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü (Sánchez-López ve diğ, 2014).....	30
Şekil 2. 29 : Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü (Kalomiros ve diğ, 2016).....	30
Şekil 2. 30 : Memkapasitörün farklı frekanslardaki akım-gerilim karakteristikleri (Ventra ve diğ, 2009).....	32
Şekil 2. 31 : Memindüktörün histerezis eğrisi (Fouda ve Radwan, 2014).	33
Şekil 3. 1 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatörün simülasyonu (a).akım-gerilim karakteristiği (b).	35
Şekil 3. 2 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	35
Şekil 3. 3 : Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	36
Şekil 3. 4 : Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	37
Şekil 3. 5 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	38
Şekil 3. 6 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	38
Şekil 3. 7 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	39
Şekil 3. 8 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	40
Şekil 3. 9 : Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	41
Şekil 3. 10 : Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).	41
Şekil 4. 1 : Elektronik filtrelerin sınıflandırılması	43
Şekil 4. 2 : Alçak geçiren filtre devreleri pasif (a). aktif (b).	44
Şekil 4. 3 : Pasif alçak geçiren filtrenin frekansa bağlı kazanç eğrisi (Alkan, 2020)	44
Şekil 4. 4 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması	46
Şekil 4. 5 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü filtre devresinin gerçekleşmesi.	46
Şekil 4. 6 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.	47
Şekil 4. 7 : Muthuswamy emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması.	48
Şekil 4. 8 : Muthuswamy emülatörlü filtre devresinin gerçekleşmesi.....	48
Şekil 4. 9 : Muthuswamy emülatörlü filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.	49
Şekil 4. 10 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması.	50

Şekil 4. 11 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü filtre devresinin gerçekleşmesi.	50
Şekil 4. 12 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.	51
Şekil 4. 13 : Kalomiros ve diğ emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması.	52
Şekil 4. 14 : Kalomiros ve diğ emülatörlü filtre devresinin gerçekleşmesi.	52
Şekil 4. 15 : Kalomiros ve diğ emülatörlü filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.	53
Şekil 4. 16 : Standart RC alçak geçiren filtre devresinin simülasyon şeması.	54
Şekil 4. 17 : Standart RC alçak geçiren filtre devresinin gerçekleşmesi.	54
Şekil 4. 18 : Standart RC filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.	54
Şekil 4. 19 : Tüm devrelerin gerilim kazancı-frekans eğrisi simülasyon sonuçları.	55
Şekil 4. 20 : Tüm devrelerin gerilim kazancı-frekans eğrisi laboratuvar sonuçları.	55
Şekil 4. 21 : Osilatör devresi blok şeması.	56
Şekil 4. 22 : RC osilatör blok diyagramı.	57
Şekil 4. 23 : Faz kaydırıcı osilatör devresinin simülasyon şeması.	58
Şekil 4. 24 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.	59
Şekil 4. 25 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleşmesi.	59
Şekil 4. 26 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim(yeşil) değerleri.	60
Şekil 4. 27 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin laboratuvarında ölçülen akım- gerilim değerleri.	60
Şekil 4. 28 : Muthuswamy emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.	61
Şekil 4. 29 : Muthuswamy emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleşmesi.	62
Şekil 4. 30 : Muthuswamy emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim(yeşil) değerleri.	62
Şekil 4. 31 : Muthuswamy emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin ölçülen akım- gerilim değerleri.	62
Şekil 4. 32 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.	64
Şekil 4. 33 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleşmesi.	64
Şekil 4. 34: Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim(yeşil) değerleri.	65
Şekil 4. 35 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin ölçülen akım- gerilim değerleri.	65
Şekil 4. 36 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.	66
Şekil 4. 37 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleşmesi.	67
Şekil 4. 38 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim (yeşil) değerleri.	67
Şekil 4. 39 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin ölçülen akım- gerilim değerleri.	67
Şekil 4. 40 : TTL ve CMOS giriş-çıkış lojik gerilim seviyeleri.	70

Şekil 4. 41 : MOSFET ile tasarlanmış NAND mantık kapısı.	71
Şekil 4. 42 : NAND kapısı sembolü (sol üstte), çalışma tablosu (sol altta) ve giriş çıkış gerilim seviyeleri (sağda).	71
Şekil 4. 43 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.	73
Şekil 4. 44 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleşmesi.	73
Şekil 4. 45 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.	74
Şekil 4. 46 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.	74
Şekil 4. 47 : Muthuswamy emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.....	75
Şekil 4. 48 : Muthuswamy emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleşmesi.....	76
Şekil 4. 49 : Muthuswamy emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.	76
Şekil 4. 50 : Muthuswamy emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.	77
Şekil 4. 51 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.	78
Şekil 4. 52 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleşmesi.	78
Şekil 4. 53 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.	79
Şekil 4. 54 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.	79
Şekil 4. 55 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.	80
Şekil 4. 56 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleşmesi.	81
Şekil 4. 57 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.	81
Şekil 4. 58 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.	82

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

TiO₂	: Titanyum dioksit
HP	: Hewlett Packard
PWL	: Parça parça doğrusal
R_{MEM}	: Memristörün toplam direnci
R_{OFF}	: Memristörün saf titanyum dioksit kısmının direnci
R_{ON}	: Memristörün katkılanmış titanyum dioksit kısmının direnci
TEAM	: Eşik uyarlamalı memristör modeli
VTEAM	: Gerilim eşiği uyarlamalı memristör modeli
AGF	: Alçak geçiren filtre
VO₂	: Vanadyum dioksit
MoS₂	: Molibden sülfür
OTA	: İşlemsel geçiş iletim yükselteci
CCII	: İkinci nesil akım taşıyıcı
DDCC	: Diferansiyel fark akım taşıyıcı
LDR	: Işığa bağımlı direnç
ADC	: Analog dijital dönüştürücü
AND	: Ve mantık kapısı
OR	: Veya mantık kapısı
NAND	: Ve değil mantık kapısı
XOR	: Özel veya mantık kapısı
RTL	: Direnç-transistor lojiği
DTL	: Diyot-transistor lojiği
TTL	: Transistor-Transistor Lojiği
ECL	: Emiter-kuplajlı Lojik
FET	: Alan etkili transistor
CMOS	: Bütünleyici metal oksit yarı iletken
MOS	: Metal oksit yarı iletken
MC	: Memristör ve kondansatörden oluşan devre
RC	: Direnç ve kondansatörden oluşan devre
ZnO	: Çinko oksit
I-V	: Akım-gerilim
AC	: Alternatif Akım
MRL	: Memristör oranlı mantık

CFOA	: Akım geri beslemeli işlemsel yükselteç
OPAMP	: İşlemsel yükselteç
FPGA	: Alan programlanabilir kapı dizisi
ReRAM	: Rezistif rastgele erişimli bellek
OTA	: İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi
Al	: Alüminyum
Pt	: Platinyum
Ω	: Ohm
F	: Farad
W	: Watt
V	: Volt
A	: Amper
Hz	: Hertz
L	: Bobin
M	: Memristör
A_v	: Kuvvetlendirici kazancı
B	: Geri besleme devresi kazancı
Φ	: Manyetik akı
Q	: Elektriksel yük
w	: Açısal hız

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI MEMRİSTÖR EMÜLATÖRLERİNİN ELEKTRONİK DEVRELER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ SEVGİ GÜRSUL

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

94+XIII sayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI

Hafızalı direnç kelimelerinin kısaltması olarak tanımlanan memristör elemanı direnç, kondansatör ve bobinden sonra dördüncü pasif devre elemanı olarak literatürde yerini almıştır. Böyle bir pasif elemanın var olması gerekliliği ilk kez 1971 yılında Berkeley Üniversitesi araştırmacılarından Prof. Leon O. Chua tarafından teorik olarak ispat edilmiştir. Bununla birlikte, memristörün fiziksel olarak gerçekleştirilmesi uzun bir zaman almıştır. 2008 yılında HP laboratuvarlarında R. Stanley Williams ve ekibi doğrusal iyon sürüklemeli bir memristör modeli elde etmiştir. Memristörün modellenmesinden sonra bu konuya olan ilgi sürekli artmış, böylece birçok yeni memristör modeli ve emülatör tasarımı rapor edilmiştir. Bu model ve emülatörler kullanılarak memristör elemanının elektronik devreler, sinyal işleme, kaotik sistemler, yapay sinir ağları ve kontrol sistem tasarımı gibi birçok alanda avantajlar sağladığı gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında literatürde memristör için verilen farklı emülatör devreleri tanıtılarak bu emülatörlerin örnek olarak seçilen filtre, osilatör ve mantık kapısı devrelerinde performanslarının karşılaştırılması yapılmıştır. Memristörün ticari olarak satışının yaygın olmaması ve yüksek maliyetli olmasından ötürü tercih edilen bu memristör emülatörleri farklı elektronik devreler üzerinde standart direnç yerine kullanılmıştır. Filtre, osilatör ve mantık kapı devresine uygulanan memristifliğin kesim frekansı, bant genişliği ve güç tüketimi gibi bazı teknik özellikler üzerine etkileri hem benzetim hem de deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Böylelikle hem standart dirençli devre ile memristif devrenin performans karşılaştırması hem de memristör emülatörlerinin birbirleriyle performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçları göz önüne alındığında, standart direnç elemanı yerine elektronik devrelerde memristör emülatörü kullanımının bant genişliğini daraltmada, kesme frekansını ayarlama ve güç tüketimini azaltmada önemli faydalar sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Memristör, Memristör emülatörü, Memristiflik, Filtre devreleri, Osilatör devreleri, Mantık devreleri

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT MEMRİSTÖR EMULATORS ON ELECTRONIC CIRCUITS SEVGİ GÜRSUL

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronic Engineering
94+XIII pages

2020

Supervisor: Prof. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI

The memristör element, which is defined as the abbreviation of MEMory ResISTOR, has taken its place in the literature as the fourth passive circuit element after resistance, capacitor and inductor. The necessity of the existence of such a passive element was theoretically proved in 1971 by Prof Leon O. Chua, a researcher at Berkeley University. However, it took a long time to realize the memristör element physically. In 2008, R. Stanley Williams and his team obtained a linear dopand drift memristör model at HP laboratories. After modeling the memristör element, the interest in this subject has increased continuously, so many new memristör models and emulator designs have been reported. Using these model and emulators, it has been shown that the memristör element provides advantages in many fields such as electronic circuits, signal processing, chaotic systems, artificial neural networks and control system design.

In this thesis, different emulator circuits given for the memristör in the literature are introduced and a comparison of the performance of these emulators in selected filter, oscillator and logic gate circuits is made. These memristör emulators, which are preferred due to the fact that the sales of the memristör is not common and high cost, are used instead of standard resistance on different electronic circuits. The effects of memristivity applied to the filter, oscillator and logic gate circuits on some specifications such as cut-off frequency, bandwidth and power consumption were investigated by both simulation and experimental studies. Thus, the performance comparisons of both the standard resistive circuit and the memristive circuit and also amongst the memristör emulators were carried out. Considering the results of the studies, it has been observed that the use of the memristör emulator in electronic circuits instead of the standard resistance element provides significant benefits in narrowing the bandwidth, adjusting the cutting frequency and reducing the power consumption.

Keywords: Memristör, Memristör emulator, Memristivity, Filter circuits, Oscillator circuits, Logic circuits

1.GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Elektrik devrelerinde kullanılan temel elektriksel büyüklükler akım, gerilim, yük ve akı olmak üzere dört temel başlık altında tanımlanır. Bu büyüklüklerin birbirleriyle olan bağlantılarını sağlayan devre elemanları literatürde pasif devre elemanları olarak da bilinen direnç, kondansatör ve bobin olmak üzere üç temel elemana karşılık gelir. Direnç gerilimin akıma göre davranışını ($R = dv/di$), kondansatör gerilimin elektriksel yüke göre davranışını ($C = dv/dq$) ve bobin ise manyetik akının akıma göre davranışını ($L = d\phi/di$) temsil eder. Bu durumda son denklem olan manyetik akı ile elektriksel yük arasındaki bağlantı ($d\phi/dq = ?$) eksik olup fiziksel olarak ne manaya geldiği konusu karanlık kalmıştır. 1971 yılında Prof. Leon O. Chua teorik olarak bu iki temel büyüklük arasındaki bağlantının farklı bir devre elemanını işaret ettiğini ispat ederek literatüre sunmuştur (Chua, 1971). Chua bahsettiği bu elemana İngilizcesi memory-resistor yani hafızalı direnç anlamına gelen memristör adını vermiştir. Bu şekilde isimlendirilmesinin nedeni akımın değişimi ile memristörün direnç değerinin de değişmesi ve akım kesildiğinde memristörün aldığı son direnç değerini muhafaza ederek devreye yeniden akım verildiğinde bu direnç değerini yeniden gösterebilmesidir. Chua sonraki yıllarda memristör üzerine çalışmalar sunmaya devam etmiş ancak memristörü somut olarak elde edememiştir.

Memristör elemanı üzerine yapılan çalışmalar, 2008 yılında Hewlett Packard laboratuvarlarında çalışan bir grup araştırmacının memristörü fiziksel olarak gerçekleştirmesiyle farklı bir boyut kazanmıştır (Strukov ve diğ, 2008). HP Memristör Modeli veya diğer adıyla Doğrusal İyon Sürüklenmesi Modeli olarak adlandırılan bu ilk gerçekleştirmeden sonra konu üzerine ilgi sürekli artmış, çok sayıda araştırmacı kendi tasarladıkları farklı memristör modelleri ve memristör emülatör devrelerini literatüre sunmuşlardır.

Memristör elemanına artan bu ilgi, beraberinde yapılan ve yapılacak birçok akademik araştırma ve çalışmayı da yanında getirmiştir. Bu çalışmalar daha çok nöromorfik sistemler,

kaotik sistemler, gizli haberleşme, kontrol sistem tasarımı, işaret işleme, elektronik devre tasarımı, kalıcı hafızalar ve lojik devre tasarımı başlığı altında sınıflandırılabilir.

1.2 Literatür Özeti

Chua'nın 1971 yılındaki memristör önerisinden önce literatürde konu üzerine bazı ön çalışmalara rastlanılmaktadır. Örneğin, 1960 yılında "memistör" isimli bir devre elemanı önerilmiş, bu elemanın elektriksel yük ile kontrol edilen üç terminalli bir devre elemanı olduğu ve memistör yapay sinir modelinin temel elemanını oluşturduğu rapor edilmiştir (Widrow, 1960). 1967'de ise elektron yakalama olayının altın ile katkılanmış silikon oksit ince filmdeki direncin anahtarlanmasıyla gözlemlendiği bir çalışmaya rastlanılmaktadır (Simmons ve Verderber, 1967).

Direnç, kondansatör ve bobinden sonra dördüncü temel devre elemanı olma özelliğine sahip olan "memristör" çalışması ilk kez Chua tarafından önerilmiş olup, manyetik akı ile elektriksel yük arasında daha önce ifade edilmemiş olan bağıntı teorik olarak belirlenerek memristör elemanı eşdeğer devresiyle birlikte tanımlamıştır (Chua, 1971). Chua bir diğer çalışmasında ise az sayıda elemanla oluşturduğu memristör modeli ile bir diyot tasarımı yaparak bu memristif diyotun karakteristik özelliklerini incelemiştir (Chua ve Tseng, 1974). İlerleyen yıllarda memristörle ilgili çalışmalarına devam eden Chua, memristif sistemlerin tanımlanması (Chua ve Kang, 1976), memristör ve diğer temel nonlinear devre elemanları kullanılarak devrelerin modellenmesi (Chua, 1980) vb gibi çalışmalarla çok sayıda yeni sonuçlar yayınlamıştır.

Chua'nın başlattığı memristör çalışmaları üzerine başka araştırmacılar da literatüre çeşitli katkılar sağlamıştır. Memristörün bond-graf modelinin tanımlanması (Oster ve Auslander, 1972), memristör içeren nonlinear devrelerin analizi (Lam, 1972), memristif diyot modelinin dinamik analizi (Liu, 1975), ters Lagrangian denklemlerle memristörün ifade edilmesi (Milić ve Novak, 1979), alternatif bir memristif diyot modeli tasarımı (Buot ve Rajagopal, 1994), histerezis yapı özellikleri memristörün histerezisine benzeyen ince oksit filmlerde yeniden üretilebilen direnç anahtarlama davranışının tanımlanması (Beck ve diğ, 2000) ve memristif nano aygıtların örüntü tanımada kullanılması (Snider, 2007) göze çarpan çalışmalar olarak sıralanabilir. Bu çalışmaların ortak özelliği memristör üzerine yapılmış teorik çalışmalar olmasıdır.

Yapılan tüm bu çalışmalar memristörün modellenmesi ve somut olarak elde edilmesi konusundaki merakı artırdığından literatüre birçok memristör modelleme çalışması eklenmiştir. Bunlardan ilki olan Strukov ve Williams'ın öncülüğündeki HP laboratuvar ekibi, uzun uğraşlar sonucunda fiziksel olarak memristör elde etmeyi başararak Chua'nın bulduğu memristör akım-gerilim histerezisine benzeyen ve frekans arttıkça lineer direnç gibi davranan akım-gerilim histerezi elde etmişlerdir (Strukov ve diğ, 2008). Literatürdeki memristör modellerinden doğrusal olmayan memristör modeli ise Prodromakis ve arkadaşları tarafından tasarlanmıştır (Prodromakis ve diğ, 2010). Bir diğer memristör modeli 2009 yılında literatüre sunulan Simmons tünel bariyer modelidir (Pickett ve diğ, 2009). Eşik uyarlamalı memristör modelinin tasarlandığı bir çalışmada ise önerilen modelin doğrusal iyon sürüklenmesi, doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi ve Simmons tünel bariyer modeli gibi memristör modellerine uyarlanabileceği açıklanmıştır (Kvatinsky ve diğ, 2013). Kavehei ve ekibi diferansiyel denklemleri kullanarak memristör modelleme çalışmaları yapıp Chua'nın memristörü matematiksel olarak tanımlamada kullandığı Maxwell denklemlerinden yararlanarak memristör teorisini incelemişlerdir (Kavehei ve diğ, 2009). Bir diğer modelleme çalışmasında ise yeni bir akı kontrollü memristör modeli ve buna karşılık gelen eşdeğer devresi sunulmuştur. Bu devre ile sinüs biçimli voltaj uyarınlı yeni memristörün tipik olarak sıkışmış histerezis döngü özelliklerine sahip olduğu gösterilmiş, eşdeğer devreye dayanılarak oluşturulan devre simülasyonlarının ve deneysel gözlemlerin, teorik sonuçları doğruladığı açıklanmıştır (Xu ve Bao, 2013). Analog devreler için bir memristör spice modeli tasarlanarak memristör aygıtlarının fiziksel ve davranışsal özelliklerinin araştırılması ve karakterize edilmesinde önerilen memristör modellerinin analiz edildiği çalışma ise Adzmi ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Adzmi ve diğ, 2012). Biolek ve arkadaşları farklı modelleme yöntemleriyle memristör elemanını modelleyip, modellemede kullanılan pencere fonksiyonlarında durum değişkenleri seçerek çeşitli hata analizleri yapmışlardır (Biolek ve diğ, 2014).

Literatürde yerini almış memristör modelleri kullanılarak birçok farklı alanda incelemeler yapılmıştır. Örneğin Yang ve arkadaşlarının oluşturmuş olduğu bir çalışmada metal/oksit sistemlerdeki memristif elektriksel anahtarlama modellenerek farklı yapılarda Pt ve TiO₂ kontak yapıları gerçekleştirilmiş ve her bir kontak yapısının elektriksel özellikleri incelenmiştir (Yang ve diğ, 2008). Memristörün anahtarlama mekanizmalarının Simmons tünel bariyer modeli kullanılan bir diğer çalışmada anahtarlama sırasında durum değişkeni olarak tünel bant genişliği ve bu bant genişliğinin değişmesiyle devrenin rezistansının

değişimi anlatılmıştır (Pickett ve diğ, 2009). Bir diğer çalışmada ise Pt/TiO₂/TiO_{2-x}/Pt yapıda oluşturulan memristörün üst elektrotta birden fazla platinyum kullanılarak TiO₂/TiO_{2-x} bölgeleri arasında gerçekleşen yük akışı yorumlanmıştır (Do ve diğ, 2009). Shadaram ve arkadaşları doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modelini göz önüne alarak mantık uygulamalarında kullanılmak üzere yeni bir memristör modeli elde etmişlerdir (Shadaram ve diğ, 2011). Ascoli ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise Biolek modeli, sınır koşullu memristör modeli, eşik uyarlamalı memristör modeli ve Pickett modelinde gözlemlenen dinamiklerin karşılaştırılması için farklı devrelerde analizler yapılmıştır. (Ascoli ve diğ, 2013). Memristör modellerinden biri olan HP memristör modelinin MATLAB ortamına uyarlanıp farklı incelemelerin yapıldığı çalışmalar da literatürde mevcuttur (Singh ve Kakade, 2014). Yener ve arkadaşlarının çalışmasında ise doğrusal sürüklenmeli memristör modeli baz alınarak iki farklı tip memristör temelli Sallen-Key süzgeç analiz edilip bunlara ilişkin benzetim sonuçları MATLAB programında incelenmiştir (Yener ve diğ, 2015). Başka bir yayında ise TEAM modeli kullanılarak üç girişli memristör tabanlı min-max devreleri tasarlanarak memristörlü devrenin kapsamlı bir analizi sunulmuş ve memristifliğin umut verici olduğuna değinilmiştir (Amer ve diğ, 2017). SPICE memristör modelinin dört farklı anahtarlama davranış tipine uyması ve buna ek olarak uyarlanabilir ve ayarlanabilir olması için modelin esnekliği kanıtlayan Ghedira ve arkadaşları; bipolar, unipolar, unutma etkisine sahip bipolar ve bipolar-unipolar etki arasındaki geri dönüşümlü etki ve anahtarlama davranışlarını açıklamışlardır (Ghedira ve diğ, 2017). Metal oksit yarı iletkenler kullanılarak, Al/TiO₂/Al ince film yapısına sahip bir memristör cihazı tasarlanıp giriş sinyalinin yönüne bağlı olarak histerezis şekli başarıyla elde edilerek farklı simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Gül, 2018). Bahloul ve arkadaşları TEAM yöntemini kullanarak mevcut referans jeneratörlerinde kullanılabilecek basit bir programlanabilir memristör tabanlı devre literatüre sunmuşlardır (Bahloul ve diğ, 2018). AC gerilim altında, lineer sürüklenme hızlı TiO₂ memristörün ortalama güç formülü çeşitli denklem ve formülizasyonlar kullanılarak Mutlu tarafından türetilmiştir (Mutlu, 2018). LT-SPICE programı kullanılarak yeni bir memristör spice modelinin tasarlandığı çalışmada ise memristör modelinin analizleri yapıp fabrikasyon bir memristör modeli ile benzer özelliklerde olduğu doğrulanmıştır. Ek olarak bu memristör spice modeli ile mantık kapıları tasarlanarak doğru çalıştıkları analiz edilmiştir (Mokhtar ve Abdullah, 2014). Wang ve çalışma arkadaşları memristörde anahtarlamanın bir zaman gecikmesi ile gerçekleştiğini ve bunun çapraz çubuk dizisinde istenen herhangi bir bellek hücrelerini seçici olarak ele almak için kullanılabileceğini göstermişlerdir (Wang ve diğ, 2015). MATLAB ve Simulink

ortamlarında geliştirilen memristör devrelerinin keşfi için yeni bir öğretici araç kutusu sunmakta olan bir çalışma da literatürde rastlanan kaynaklar arasındadır (Walsh ve diğ, 2013).

Memristörün yüksek maliyetli olması ve ticari olarak satışının yaygın olmaması araştırmacıları memristör görevini üstlenebilecek farklı emülatör devreleri tasarlamaya yönlendirmiştir. Bu çalışmalardan biri doğrultucu, integral alıcı ve türev alıcı opamp devreleri kullanılarak oluşturulan bir memristör emülatör devresi olup az sayıda aktif ve pasif eleman içermesi bakımından avantajlıdır (Mutlu ve Karakulak, 2009). Bir diğeri ise Pershin ve Di Ventra tarafından bilim dünyasına sunulan bir analog dijital dönüştürücü ve mikrokontrolör kullanılarak tasarlanan memristör emülatörüdür (Pershin ve Di Ventra, 2010). Yine Pershin ve Di Ventra tarafından üniversitelerde memristörün deneysel olarak öğrencilere öğretilmesi amaçlanarak tasarlanan başka bir emülatör çalışması da literatüre kazandırılmıştır (Pershin ve Di Ventra, 2012). OTA ve CCII kullanılarak yeni bir memristör emülatör devresi, Sözen ve Çam'ın yapmış olduğu çalışmada tasarlanıp özellikleri incelenmiştir (Sözen ve Çam, 2015). Chilukuri ve Jung'un yapmış oldukları akademik çalışmada ise yüksek frekanslarda çalışabilen bir memristör emülatör devresi tasarlanmıştır (Chilukuri ve Jung, 2015). Bir diğerk çalışmada ise ikinci dereceden aktif bir bant geçiren filtresi baz alınarak az sayıda aktif elemanlar kullanılan bir memristör emülatör devresi yapılmış ve bu emülatör devresi kaos devrelerinde kullanılmıştır (Bao ve diğ, 2016). Araştırma ve eğitim amacıyla literatüre sunulmuş yeni tip memristör emülatörlerinin yapıldığı bir çalışmada ise bazı memristör ve memristif sistemlerin hatırı sayılır bir eşik değerine sahip olduğu bildirilip çalışmada diyotlar devreye alınarak simetrik veya asimetrik eşik gerilimleri olan farklı memristör emülatörlerine yer verilmiştir (Mutlu ve diğ, 2018). Binary eşik tipli memristörün dinamiklerini taklit etmek için bir memristör emülatörünün sunulduğu akademik çalışma ise Liang ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Liang ve diğ, 2019). TiO_2 memristörünü taklit eden bir MOS (metal oksit yarı iletken) tabanlı devre modelinde TiO_2 nin görevini 4 adet CMOS (bütünleyici metal oksit yarı iletken) kullanarak elde eden memristörün, gerekli histeretik döngüye sahip olduğu ve memristif tabanlı devrelerde uygulanabilir olduğu açıklamıştır (Gül, 2019). ZnO bazlı yarı iletken ince film memristör cihazının incelendiği bir diğerk çalışmada ise metalik üst ve alt elektrotlar kullanılarak üretilen yapının memristif özellikleri ve histerezis döngüleri gözlenmiştir. İlave olarak sadece dört MOS transistörüne sahip olan memristör emülatör devresi de önerilip bu devrenin genel memristör tabanlı uygulamalarda kullanılması için uygun olduğu kanısına

varılmıştır (Babacan ve diğ, 2018). Muthuswamy'nin yaptığı çalışmada ise bir memristör tasarlanıp bu memristörün histeretik eğrileri incelenmiştir. Ayrıca kondansatör ve bobin gibi parazit etkilerinin memristörün akım-gerilim karakteristiği üzerindeki etkileri incelenmiştir (Muthuswamy ve diğ, 2014).

Memristörlerin filtre, osilatör, mantık kapıları vb gibi farklı elektronik devrelerdeki etkileri de ayrı bir araştırma konusu olmuş ve bu konuda da birçok akademik çalışma yapılmıştır. Örneğin filtre devrelerinde lineer direnç yerine kullanılan memristörün devre üzerindeki filtreleme etkileri Weidon ve arkadaşları tarafından incelenip yorumlanmıştır (Weidon ve diğ, 2009). Mahvash ve Parker tarafından bir memristör devresinin tasarlandığı akademik çalışmada ise memristör devresi bir alçak geçiren filtre uygulamasında kullanılıp ulaşılan sonuçlar yorumlanmıştır (Mahvash ve Parker, 2010). VO_2 'nin (Vanadyum dioksit) memristif özellikleri kullanılarak deneysel olarak uyarlanabilir bir filtre özelliği gösteren bir devrenin seçilen frekans sinyallerinin uygulanmasına tepki verdiği ve böylece giriş dalga formuna göre öğrenme özelliği gösterdiği yapılan akademik yayınlar arasındadır (Driscoll ve diğ, 2010). Memristörün kalıcı hafıza özelliği kullanılarak programlanabilir bir analog filtre tasarlanan çalışma Xiao-Bao ve And Hui tarafından yapılmıştır (Xiao-Bo ve And Hui, 2013). Memristör kullanılarak yeni programlanabilir yükselteç, filtre ve osilatörlerin tasarlanabileceği şeklinde yola çıkılan çalışmada ise doğrusal iyon sürüklenmeli memristör modeli kullanılarak bir memristör tabanlı biquad analog filtresi oluşturup gerekli analizler verilmiştir (Yener ve diğ, 2014). Uygun bir memristör modeli tanımlanarak memristörün kendisinin ve memristör tabanlı mantık kapılarının güç özelliklerinin araştırıldığı bir çalışma ise Dofe ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Dofe ve diğ, 2015). Bir dizi memristör, zener diyot ve CMOS kapıları kullanılarak dendrit hücreleri tasarlanan çalışmada, doğrusal olmayan nöron modellerinin, XOR gibi doğrusal olarak ayrılamayan fonksiyonları hesaplayamayan nöronların doğrusal ikili modellerinin sınırlamalarının üstesinden geldiği açıklanmıştır (Zhanbossinov ve diğ, 2016). Başka bir çalışmada ise Şahin ve Güler, memristör ile yüksek geçiş filtresini açıklamak için bir emülatör kullanarak memristör tabanlı yüksek geçiren filtre modelleyip, filtre dalga formları ve performansı simülasyonlarla zaman ve frekans eksenlerinde analiz edip devre kazancı ve faz sonuçlarını vermişlerdir (Şahin ve Guler, 2017). AND, OR ve XOR mantık kapılarının, memristör kullanılarak simüle edilip, memristör tabanlı tasarımlar ve bilinen CMOS tabanlı tasarımlar arasında karşılaştırmalarının yapıldığı çalışma ise İbrahim ve arkadaşları tarafından sunulmuştur (İbrahim ve diğ, 2018). Memristör tabanlı bir osilatörün tasarımı ve uygulamasının

anlatıldığı bir çalışma ise Hsieh ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Hsieh ve diğ, 2019). Memristör emülatör devrelerinin ele alınıp bu emülatörlerin düşük geçişli filtre devresindeki etkilerini inceleyen bir çalışmada ise ek olarak standart bir direnç ile memristör emülatörlerinin sinyal filtreleme ve bant genişliği performansları mukayese edilmiştir (Gürsul ve Hamamcı, 2019). Gürsul ve Hamamcı'nın yapmış oldukları başka bir çalışmada ise faz kaydırıcı osilatör devresi ele alınarak farklı memristör emülatörlerinin güç tüketimi minimizasyonuna bağlı olarak performans karşılaştırması yapılmıştır (Gürsul ve Hamamcı, 2020). Memristör içeren devrelerin Multisim programında simüle edilmesi ise başka bir akademik çalışmanın konusudur (Song ve diğ, 2013).

Memristörün temel uygulama alanlarından birisi de kaotik devrelerdir. Chua devresinde lineer olmayan direnç yerine parça parça doğrusal olarak modellenen memristör kullanımı Lin ve Wang tarafından çalışılmıştır (Lin ve Wang, 2009). Muthuswamy ise kübik nonlineer bir fonksiyonla modellediği memristörü Chua tabanlı kaotik sisteme uygulamıştır (Muthuswamy, 2010). Şahin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada bir memristör modeli kullanılarak kaotik devreler ve haberleşme sistemleri üzerinde simülasyonlar ve devre uygulamaları yapılmıştır (Şahin ve diğ, 2019). İletişim sisteminde sinyallerin modülasyon ve demodülasyonu için NI Multisim programında simüle edilen ve deneysel olarak gerçekleştirilen memristör tabanlı kaotik devrenin özellikleri de ayrıca incelenmiştir (Mishra ve diğ, 2020).

Geçen zaman içinde, memristiflik konusu sadece direnç açısından değil farklı elemanlar üzerinde de incelenmiştir. Örneğin Pershin ve arkadaşları çalışmalarında elektronların ve iyonların dinamik özelliklerinin en azından belirli zaman ölçeklerinde sistemin geçmişine bağlı olabileceği iddiasında bulunup memristifliği kondansatör ve bobin üzerinde incelemişlerdir (Di Ventra ve diğ, 2009). Başka bir çalışmada ise opampların büyük kazanç, düşük çıkış direnci ve yüksek giriş direnci gibi yararlı özellikleri nedeniyle eşik mantık devreleri ile kullanım için en iyi aday olarak işlev göreceği mantığına dayanılarak bir memristif opamp tasarlanmıştır. Tasarlanan bu memristif opamp nöromorfik uygulamalarda kullanılmıştır (Ibrayev ve diğ, 2014). Sangwan ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ise MoS₂ kullanılarak çok terminalli memristif bir transistör tasarlanmıştır. Tasarlanan memtransistörün büyük direnç derecelerinin yanı sıra büyük anahtarlama oranları, yüksek çevrim dayanıklılığı gibi faydalarına değinilip MoS₂ memtransistörlerinin iki terminalli memristörler kullanılarak elde edilemeyen geçitle ayarlanabilen heterosinaptik işlevselliğe sahip olduğu incelenmiştir (Sangwan ve diğ, 2018). Memristif sistem kullanılarak memdiyet

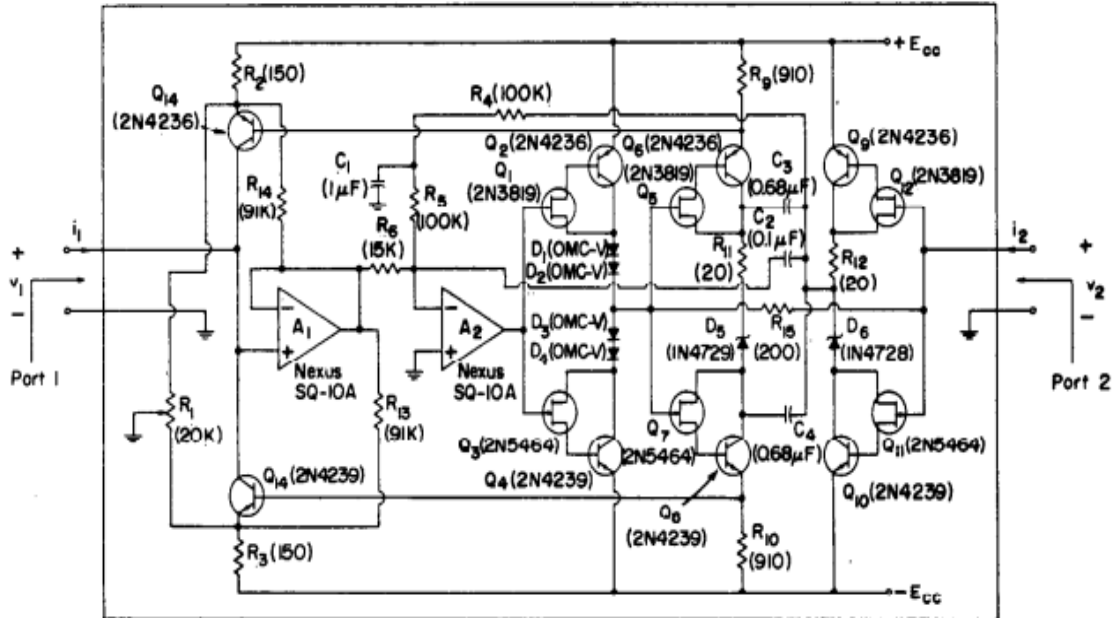
tasarımı yapan Shank ve çalışma arkadaşları oluşturdukları memdiyotun özelliklerini inceleyip nöromorfik sistemlerde bu memristifliğin kullanılmışlardır (Shank ve diğ, 2018).

Memristör tabanlı nöromorfik sistemler de literatürde kendilerine önemli ölçüde yer bulmuşlardır. Örneğin beyin konuşma biçimini ve görüntüsünü taklit edebilen nöromorfik memristör çapraz çubukları kullanılarak gelecekte bu konuda memristör devrelerinin kullanılabileceği gösterilmiştir (Truong ve diğ, 2016). Kesir dereceli memristör tabanlı sinir ağlarının zaman gecikmesi ile küresel stabilizasyonunun ele alındığı çalışma ise Jia ve arkadaşları tarafından literatüre sunulmuştur. Ek olarak memristif bir kontrolör tasarımı basitleştirmek için bu makalede iki sonuç önerilmekte olup ilerleyen çalışmalarda bunun geliştirilebilir olduğu konusu açıklanmıştır (Jia ve diğ, 2020). Yapay sinir ağlarının farklı platformlardaki avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak memristiflik konusunu ele alan Zheng ve Mazumder, düşük güçlü yüksek performanslı FPGA tabanlı yapay sinir ağı hızlandırıcıları oluşturma stratejilerini açıklayarak memristifliğin bu bağlamda önemli olduğunu vurgulamışlardır (Zheng ve Mazumder, 2020). Yang ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ise memristif sinir ağları konusu işlenmiş olup memristif sinir ağlarının parametre belirsizlikleri nedeniyle, farklı varsayımlar altında yeni ve uyarlanabilir bir kontrol stratejisi olarak kullanılabileceği gösterilmiştir (Yang ve diğ, 2020). Çok seviyeli bir memristördeki ara memristif durumları ayırt etmenin zorluğu nedeniyle memristif durumları dinamik bir şekilde tanımlamak için bulanık bir modelleme yönteminin önerildiği çalışmalara da rastlanılmaktadır (Zhang ve diğ, 2020). Verileri tespit, yerinde işleme ve depolama fırsatı sunan hücresel doğrusal olmayan ağı tabanlı mikro işlemcilerin düşük çözünürlük problemini memristifliğe dayalı olarak çözmeyi sunan bir akademik çalışma ise Ascoli ve arkadaşları tarafından literatüre sunulmuştur (Ascoli ve diğ, 2019).

2. MEMRİSTİF DİRENÇ: MEMRİSTÖR

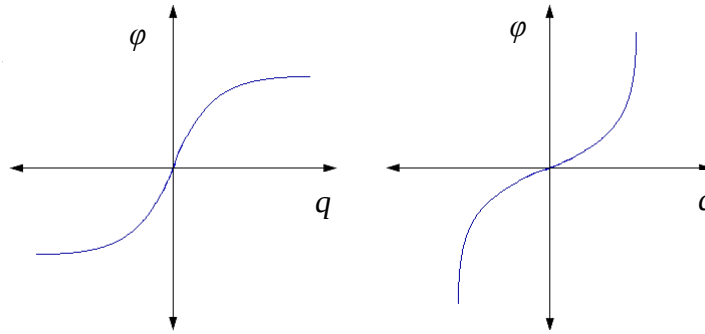
2.1 Memristörün Tarihçesi

Berkeley Üniversitesi araştırmacılarından Profesör Leon O. Chua elektronikteki temel büyüklükler olan gerilim, akım, yük ve manyetik akı arasındaki bağıntıları incelerken elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki tanımlamanın eksik olduğunu fark ederek bu eksikliği gidermek adına birçok çalışma yapmıştır. Ancak bu eksiklik direnç, kondansatör, bobin veya bunların değişik kombinasyonları ile tanımlanamayan bir durumdur. Bu da elektronik elemanlara eklenecek dördüncü bir pasif eleman olması gerektiği sinyalini vermektedir. Hareketli yükler akım oluşturduğundan ve değişen manyetik akı gerilim ürettiğinden, yeni eleman bir direncin yaptığı gibi, akımdan voltaj üretecektir ancak bu voltaj daha karmaşık ve dinamik bir şekilde üretilecektir. Uzun zamanda yapılan çalışmalar sonucunda Chua, elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki oranlamayı memristör yani hafızalı direnç elemanı olarak tanımlamıştır. Yayımladığı bir makalesinde farklı elektronik elemanlar kullanarak şekildeki memristör devresini elde etmiştir (Chua, 1971)(Şekil 2.1). Chua'nın memristörü dirençler, kondansatörler, bobinler ve yükselteçlerin bir kombinasyonundan oluşmaktadır.

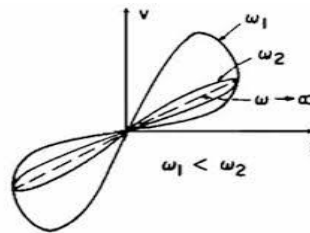


Şekil 2. 1 : Chua'nın tasarladığı memristör emülatörü (Chua, 1971).

Chua memristör emülatörünü oluşturduğu bu çalışmasında memristörün pasiflik kriterine de değinmiştir. Yaptığı çalışmalara göre diferansiyel yük kontrollü φ - q eğrisiyle karakterize edilen bir memristörün memristansı negatif olmayan bir değere sahipse yani $M(q) \geq 0$ ise φ - q eğrisi pozitifdir. Bu durumda anlık güç $p(t) = M(q(t))[i(t)]^2$ denklemiyle ifade edilip $M(q) \geq 0$ olduğu sürece devre güç harcar dolayısıyla memristör elemanı pasiftir (Chua L. O., 1971). Bu teorem φ - q eğrisinin sürekli türevlenebilir bir fonksiyon ile karakterize edildiği sürece geçerlidir ve bu kriter yalnızca monoton olarak artan bir φ - q eğrisi ile karakterize edilen memristörlerin, dahili güç kaynakları olmadan bir cihaz formunda mevcut olabileceğini göstermektedir. Aşağıdaki şekilde memristörün bahsedilen φ - q eğrileri gösterilmiştir (Şekil 2.2). Başka bir çalışmasında ise Chua, Kang ile birlikte şekilde gösterilen memristörün akım-gerilim karakteristiğini elde etmiştir (Chua ve Kang, 1976). Bu karakteristiğe göre memristör elemanının devreye uygulanan frekans değerine göre iki farklı (alt ve üst değerler) direnç değeri arasında salınım yapan bir histeretik eğriye sahip olduğu aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 2.3). Frekans değeri arttıkça histeretik alan daralır ve frekans sonsuza yaklaştığında ise bu karakteristik doğrusal bir direnç karakteristiğine bezer bir hal alır. İlerleyen yıllardaki başka bir çalışmasında Chua, cihaz modellemesinde yararlı olan bazı temel kavramlara memristör elemanını da dahil ederek, temel yaklaşım - fiziksel yaklaşım ve kara kutu yaklaşımı sonuçlarını ve tekniklerini sunmaktır (Chua, 1980).



Şekil 2. 2 : Memristörün φ - q eğrileri (Chua, 1971)



Şekil 2. 3 : Memristör akım-gerilim karakteristiği (Chua ve Kang, 1976).

Chua yaptığı araştırmalar esnasında incelediği sinapsların yapısının memristiflikle ilgisi olduğunun farkına varmıştır. Her sinir hücresinin zarları arasındaki potasyum ve sodyum iyonlarının karmaşık elektriksel tepkilerini fark etmiştir. Sinapsların, sinyallerin frekansına ve gücüne göre tepkilerini değiştirmesine izin vermesi memristörün sisteme vereceği cevaba oldukça benzemektedir. Chua fark ettiği bu benzerlikle bilim dünyasında çığır açabilecek bir yeniliğe imza atmıştır. Zira memristör elemanı da üzerinden geçen akımın yönüne ve büyüklüğüne bağlı olarak sahip olduğu direnci artırıp azaltabilmektedir. Bu bağlamda memristör elemanının literatüre sunulmasından sonra yıllardır bilimsel çalışmalara konu olan yapay zeka teknolojisine büyük oranda katkıda bulunması söz konusudur (Mullins, 2009).

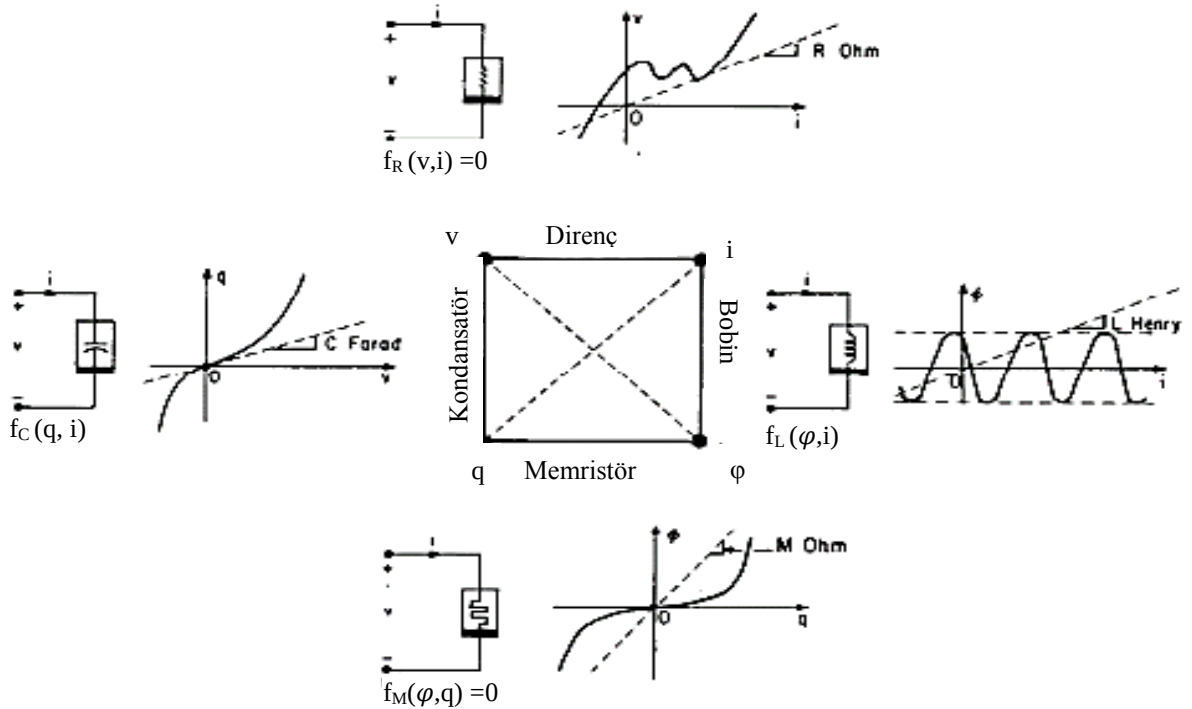
Elektronikte iki terminalli elemanlarla ilişkilendirilmiş temel devre değişkenleri olan gerilim, akım, yük ve manyetik akının $\{v, i, q \text{ ve } \phi\}$ altı farklı ikili kombinasyonu mevcut olmasına rağmen, büyüklüklerden ikisinin $\{v, \phi\}$ ve $\{i, q\}$ ilişkileri bakımından dinamik olarak bağımlı oldukları denklem 2.1 ve 2.2 den görülmektedir. Ancak kalan dört kombinasyon $\{v, i\}$, $\{\phi, i\}$, $\{q, v\}$ ve $\{\phi, q\}$ henüz ilişkili olmayıp her bir değişken çifti arasındaki herhangi bir ilişki sadece iki terminalli eleman tarafından uygulanmalıdır. Bahsedilen iki terminalli eleman rezistör, kondansatör, bobin ve memristör olarak adlandırılırsa sembolik olarak verilen cebirsel ilişki $f_R\{v,i;t\}=0$, $f_L\{\phi,i;t\}=0$, $f_C\{q,i;t\}=0$ ve $f_M\{\phi,q;t\}=0$ olup yalnızca $\{v,i\}$, $\{\phi,i\}$, $\{q,v\}$ ve $\{\phi,q\}$ değişkenlerini içerir (Chua, 1980). Bahsi geçen cebirsel ilişkiden kasıt, çözümünü herhangi bir zamanda $v-i$, $\phi-i$, $q-v$ ve $\phi-q$ 'de nokta altkümesi veren kesinlikle cebirsel işlemleri (farklılaşma, entegrasyon, zaman gecikmesi vb.) içeren herhangi bir denklem veya denklem sistemidir.

$$\phi(t) = \phi(0) + \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

$$q(t) = q(0) + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

Şekilde gösterilen dört elemanlı diyagram, temel devre elemanlarını tanımlamak için aksiyomatik yaklaşımı sunmaktadır (Şekil 2.4). Her eleman için ilgili elektriksel büyüklükler belirtilmiştir. Elektronik eleman başlangıç noktasına göre simetrik olmak zorunda olmadığı için her sembole koyu bant gereklidir. Doğrusal RLC ağ teorisinde, direnç, bobin ve kondansatör terimleri genellikle ilgili direnç, indüktans ve kapasitans terimleriyle belirsizlikler olmadan kullanılabilir. Bununla birlikte, doğrusal olmayan ağ teorisinde, bu kullanım belirsiz hale gelir ve sadece elemanın adı (direnç, endüktör, kondansatör veya

memristör) kullanılmalıdır. Şekle göre, eğri üzerinde bir Q noktasından başlangıç noktasına doğru çizilen veya Q noktasına teğet olarak çizilmiş düz çizginin eğimini, Q noktasında artımlı direnç, indüktans, kapasitans ve memristans olarak tanımlamak uygundur (Şekil 2.4). Yük kontrollü bir memristörün $v = R(q)i$ ile de tarif edilebildiği gözlemlenir ve $R_q = d\phi(q)/dq$ memristans olarak adlandırılır. Burada herhangi bir zamandaki rezistans, elemanın t anındaki toplam yüküne bağlıdır. Formülizasyonlardan da anlaşılacağı üzere doğrusal bir memristör ($\phi = Mq$) doğrusal bir dirençle ($R = M_0$ iken) eşdeğerdir (Chua, 1980). Bir diğer şekilde ise bahsedilen bu ilişkilendirme lineer elemanlarla oluşturulmuştur (Şekil 2.5). Lineer olmayan ve lineer durumlarda verilen şekillerdeki büyüklüklerden ilk olarak elektrik yükü ele alınırsa bu yükte zamanla, daha iyi belirlenen bir akım değişikliği oluşmaktadır. İkinci elektriksel büyüklük olan akım manyetik alanlar yaratarak, alanın gücünü karakterize eden üçüncü bir değişken olan manyetik akıyı oluşturur. Son olarak, manyetik akı zamanla değişir ve voltaj dediğimiz büyüklüğü meydana getirir. Direnç, içinden akım geçirildiğinde bir voltaj oluşturan bir eleman iken, belirli bir voltaj için bir kondansatör belirli bir miktarda yük depolamaktadır ve üçüncü olarak bir akımı bir bobinden geçirince ise manyetik bir akı oluşturmaktadır (Mullins, 2009). Dolayısıyla direnç; gerilim-akım ilişkisini, kondansatör; gerilim-yük ilişkisini ve bobin ise akım-akı ilişkisini temsil eder. Memristör ise yük ve manyetik akı arasındaki eksik bağıntıyı temsil eder.



Şekil 2. 4 : Temel nonlinear devre elemanları diyagramları (Chua, 1980).

	yük (q)	akım (i)	gerilim (v)	manyetik akı (φ)
yük (q)		$q = \int i \, dt$	kapasitans $q = Cv$ 	memristans $q = \frac{\varphi}{M}$ 
akım (i)	$i = \frac{dq}{dt}$		rezistans $i = \frac{v}{R}$ 	indüktans $i = \frac{\varphi}{L}$ 
gerilim (v)	kapasitans $v = \frac{q}{C}$ 	rezistans $v = Ri$ 		$v = \frac{d\varphi}{dt}$
manyetik akı (φ)	memristans $\varphi = Mq$ 	indüktans $\varphi = Li$ 	$\varphi = \int v \, dt$	

Şekil 2. 5 : Temel lineer elektronik elemanlar ve aralarındaki bağıntılar

Chua günün koşullarından dolayı memristör elemanını fiziksel olarak elde edememiştir. 2008 yılına gelindiğinde ise Hewlett Packard (HP) Laboratuvarları'ndan bir grup araştırmacı memristörün fiziksel olarak gerçekleştirildiğini ilan etmişlerdir (Strukov ve diğ., 2008). Yapılan çalışmalara göre memristör, iki platin (Pt) tabaka arasında yer alan saf ve katkılanmış titanyum dioksitten (TiO_2) oluşmaktadır. Saf ve katkılanmış TiO_2 alanlarının oranına göre memristörün direnci artırılıp azaltılabilir. TiO_2 yarı iletken bir malzemedir ve saf haldeki direnci oldukça yüksektir. TiO_2 oksijen atomlarıyla katkılanarak saf halden çıkarılıp direnci düşürülmektedir.

Memristörün HP laboratuvarlarında somut olarak modellenenbilmesinin ardından birçok araştırmacı bu konu üzerine eğilimlenmiş ve daha farklı modellemeler yaparak başka memristörler elde etmişlerdir. Dahası bu elemanı farklı elektronik devrelerde kullanarak memristörün kullanım alanlarını oldukça genişletmişlerdir. Dolayısıyla memristör bilim dünyasında henüz yeni sayılabilecek bir konu iken oldukça fazla alanda çalışmalara dahil olmuştur. Memristörün kullanım alanlarını ayrıntılı biçimde ele alan çalışmalar literatürde mevcuttur (Nithya ve Paramasivam, 2020).

Memristörün fiziksel olarak yeni keşfedilen bir eleman olmasından dolayı üretim standartlarının yaygın olmaması araştırmacıları temel olarak memristörün modellenmesine ve memristör öykünücü devrelerin tasarlanmasına yöneltmiştir.

2.2 Memristörün Tanımı

Memristör, üzerinden geçen akıma göre direncini artırıp azaltabilen bir devre elemanıdır. Daha açık ifade etmek gerekirse devreye bir yönden akım verildiğinde verilen akım süresince direncini azaltıp akımın daha çok geçmesini sağlayan, tersi yönde akım uygulandığında ise direncini artıran elektronik bir elemandır. Devreye uygulanan akım kesildiğinde yük geçişini durduran; tekrardan akım uygulandığında ise gösterdiği dirence kaldığı yerden devam eden bir eleman olduğundan hafızalı olarak nitelendirilmektedir. Memristörün memristansı, uygulanan gerilimin büyüklüğüne, polaritesine ve gerilimin uygulandığı süreye bağlıdır. Bu eleman, uygulanan frekansa bağlı olarak, iki farklı alt ve üst sınırlarda birçok direnç değerine sahiptir. Memristörün akım gerilim karakteristiği, aynı anda sıfır noktasından geçen çift yapraklı bir yoncaya benzemektedir. Devreye uygulanan gerilimin frekansı arttıkça bu yapraklar daralıp frekans sonsuza doğru gittiğinde ise memristör akım-gerilimi standart bir direnç karakteristiğine yani lineer bir çizgiye dönüşmektedir. Akım-gerilim karakteristiğinin aynı anda sıfır noktasından geçmesi memristörün üzerinde herhangi bir enerji depolamadığı anlamına gelmektedir. Bu bağlamda da dirence benzer özellikler sergilemekte olup birimi ohm (Ω) dur. M harfi ile gösterilir.

Chua'nın 1980 yılında yayımladığı makalesinde tek portlu bir memristörün özellikleri aşağıda incelenmiştir (Chua, 1980):

$$\dot{x} = f(x, i) \quad (2.3)$$

$$R = v(x, i)i \quad (2.4)$$

Denklem 2.3 ve 2.4 te $f(\cdot): \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^n$ ve $R(\cdot): \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}^1$ olan sürekli fonksiyonlardır. Denklemler dikkate alınırsa $f(\cdot)$ ve $R(\cdot)$ 'nin tüm $(x, i) \in \mathbb{R}^{n+1}$ için değiştirilebilir fonksiyonlar olduğunu varsayarsak, akım kontrollü tek port memristif elemanın nitelikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Sıfır DC akım sapması altında, memristif elemanın küçük sinyal empedansı, zamanla değişmeyen bir lineer dirence eşdeğerdir.
2. Sıfır olmayan akım sapması altında, memristif elemanın küçük sinyal empedansı, zamanla değişmeyen lineer RC basamağına eşdeğerdir.
3. Büyük sinyalli DC akım uyarımı altında, küresel ve asimptotik olarak kararlı bir memristif eleman, zamanla değişmeyen doğrusal olmayan bir direnç ile eşdeğerdir.

4. Büyük sinyal sinüzoidal akım uyarımı altında, periyodik voltaj yanıtı $v(t)$ ve uyarma akımı $i(t)$ ile ilişkili Lissajous figürü genellikle başlangıç noktasından geçen çift değerli bir fonksiyondur.

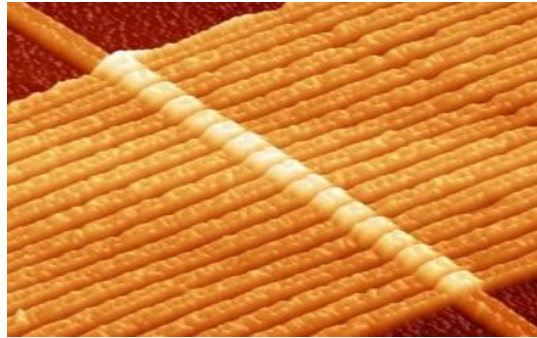
5. Çok yüksek frekanslı ($\omega \rightarrow \infty$) periyodik büyük sinyal akımı uyarımı altında, memristif eleman, direnci periyodik gerilim cevabına neden olan başlangıç durumuna $x(0)$ bağlı olan, zamanla değişmeyen lineer direnç ile eşdeğerdir.

6. Tek port memristif elemanın herhangi bir voltaj-akım sinyal çifti aynı zaman diliminde sıfır noktasından geçmelidir..

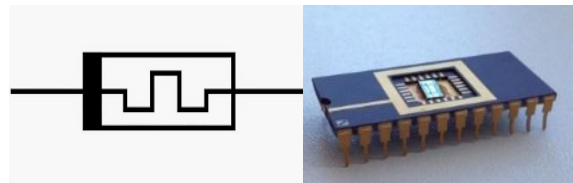
7. Memristif eleman, her $(x, i) \in \mathbb{R}^{n+1}$ için ancak $R(x, i) > 0$ ise pasiftir.

8. Pasif bir memristif eleman sadece enerjiyi dağıtabilir; yani daha sonraki geri kazanım için enerji depolayamaz.

Chua'nın 1971'deki makalesinde bahsettiği bu eleman tam 37 yıl sonra laboratuvar ortamında nano boyutlarda elde edilmiştir ve nano boyutlardaki memristörün çapraz bağlantısı şeklinde gösterilmiştir (Strukov ve diğ., 2008) (Şekil 2.6). Memristör elemanının matematiksel ifadesi denklem 2.5 ve denklem 2.6 da gösterilmiştir. Denklemde ϕ manyetik akı, q elektriksel yük, t zaman ve M ise memristördür. Memristörün sembolü ve memristör elemanı ise aşağıda verilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2. 6 : Çapraz bağlantıyla oluşturulmuş nano boyutta 17 adet memristör

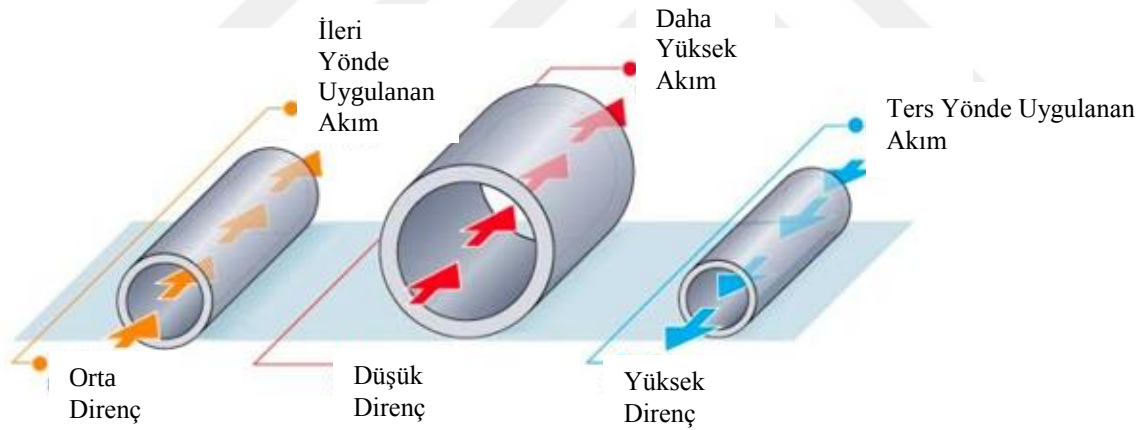


Şekil 2. 7 : Memristörün sembolü (solda) ve tasarlanmış memristör elemanı (sağda).

$$M(q(t)) = \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{dq}{dt}} = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (2.5)$$

$$M(q) = \frac{d\varphi}{dq} \quad (2.6)$$

Memristörün doğrusal olmayan özelliğini daha rahat kavrayabilmek için su mantığı kullanılabilir. Bir su borusundan aynı hızda su geçtikçe normal olarak borunun iç çapı değişmez. Boru suya her durumda aynı direnci gösterir. Bu durum doğrusal direnci temsil edecek olurken; borunun içinden su akmaya devam ettikçe borunun iç çapının arttığını varsayalım. İç çap arttıkça daha çok su geçecek ve direnç düşecektir. Suyu ters yönde uyguladığımızda ise borunun iç çapı daralacak ve içinden akan suya daha fazla direnç gösterecektir. Dolayısıyla uygulanmaya devam eden suya göre boru direnci doğrusal olmayan bir tutum sergileyecektir. Bahsedilen bu ikinci durum da lineer olmayan direnci yani memristörü temsil etmektedir. Zira memristör; su topolojisi açıklamasından ve ilgili şekilden de anlaşılacağı gibi üzerine akım uygulandıkça direnç değerini değiştirebilen bir elemandır (Şekil 2.8).



Şekil 2. 8 : Memristörün uygulanan akıma göre davranışı

Memristör elemanının bazı karakteristik özellikleri aşağıda verilmiştir.

- İki terminalli bir devre elemanıdır.
- AC ve pasif bir elemandır.
- Lineer olmayan bir manyetik akı- yük eğrisine sahiptir.
- Akım-gerilim karakteristiği sıkışmış bir histerezis özelliği gösterir.
- Karakteristiğinde akım ve gerilim aynı anda sıfırdan geçtiği için üzerinde enerji depolamaz.

- Uygulanan güç kesildiğinde üzerindeki en son direnç değerini hafızasında tutar.
- Devreye tekrardan güç uygulandığında çalışmaya en son kaldığı direnç değerinden devam eder.
- Uygulanan akımın gücü ve hızına göre direnç davranışı miktarını değiştirir.

Herhangi bir aygıtı memristör olarak adlandırmak için, diğer aygıtlardan ayıran bazı önemli parametreler gereklidir:

- I-V düzleminde sıkışmış bir Histerezis döngüsü,
- Frekans arttıkça azalan bir histerezis döngü alanı,
- Sonsuz frekansta hiçbir döngünün olmaması,
- Memristans değişiminin sinüzoidal olmasıdır (Adhikari ve diğ, 2013).

2.3 Memristör Modelleri

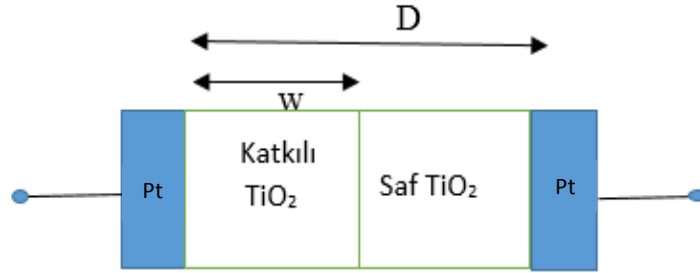
Somut olarak memristörün keşfedilmesi henüz yeni sayılabilecek bir durum olduğundan ticari olarak üretim standartları yeterince gelişmemiştir. Bu durumdan ötürü araştırmacılar farklı memristör modellemeleri ve memristör özelliği gösterebilecek farklı memristör emülatör devreleri uygulamalarına yönelmişlerdir. Bu modellerden aşağıda bahsedilecektir.

2.3.1 Hp memristör modeli (doğrusal iyon sürüklenmesi modeli)

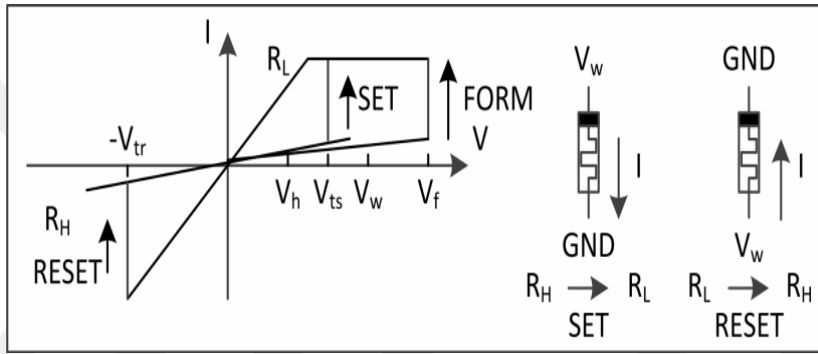
Hp laboratuvarlarında bir grup araştırmacı deneyler yaparken bir elemanın farklı davranışlar sergilediğini gözlemlemişlerdir. Daha kapsamlı bir inceleme yaptıklarında ise bu elemanın aslında 1971 yılında L. Chua tarafından keşfedilen kayıp eleman olduğunun bilincine varmışlardır (Chua, 1971). Daha sonra yayımladıkları dergide “Kayıp Eleman Bulundu” ifadesine yer vererek yıllardır gizemini koruyan memristör konusuna bir açıklık getirmişlerdir (Strukov ve diğ, 2008). Böylelikle memristörü fiziksel olarak elde etmeyi başarmışlardır. Bilim dünyasının tanıklık etmiş olduğu bu modelleme ve modellemeye göre memristörün akım-gerilim karakteristiğindeki memristif değişim sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 2.9 ve Şekil 2.10).

Denklem 2.7 de verilenlere göre “ R_{MEM} ” memristörün toplam direncini, “ R_{ON} ” memristörün katkılanmış TiO_2 kısmını, “ R_{OFF} ” memristörün saf TiO_2 kısmını, ‘x’ katkılı TiO_2 kısmının bütün TiO_2 katmanına oranını, ‘w’ katkılı TiO_2 kısmını, ‘D’ ise bütün TiO_2 katmanını ifade

eder. x 'in sıfır veya bir olması durumlarındaki memristans değeri denklem 2.8 de; x 'e ait orantı ise denklem 2.9 da verilmiştir.



Şekil 2. 9 : HP memristör modeli.



Şekil 2. 10 : I-V grafiğinde memristans aralığının değişimi.

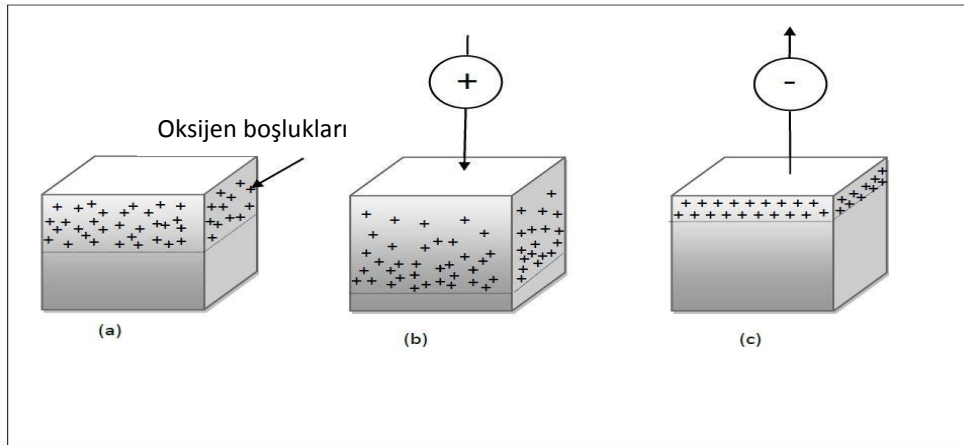
$$R_{MEM}(X) = R_{ON} * x + R_{OFF} * (1 - x) \quad (2.7)$$

$$R_{MEM}(X) = \begin{cases} x=0 \text{ ise } R_{MEM} = R_{OFF} \\ x=1 \text{ ise } R_{MEM} = R_{ON} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$x = \frac{W}{D} \quad (2.9)$$

Hp memristör modeline göre Williams ve ekibi, TiO_2 'den yapılan iki küçük direnci birbiri üzerine yerleştirerek, birindeki akımı kullanarak bir şekilde diğer tabakadaki direnci açıp kapamak için hızlı, düşük bir güç anahtarı oluşturmayı hedeflemişlerdir. Bu iki platinyum tabaka arasında saf ve katkılanmış TiO_2 tabakaları mevcuttur. TiO_2 yarı iletken bir maddedir ve saf halde yüksek dirence sahiptir. Başka elementlerle katkılanarak direnci düşürülebilmektedir. Katkılı TiO_2 tabakasının oksijeni (TiO_{2-x}) yüzde 0.5'i eksik olduğundan, x , yaklaşık olarak 0.05'dir. Saf TiO_2 kısmının direnci katkılanmış kısmın direncine göre daha yüksektir. Pozitif yönde uygulanan akıma göre oksijen atomları yer değiştirerek katkılı kısımdan saf kısma doğru geçiş yaparlar. Böylelikle katkılı kısmın alanı

genişler. Devreden daha fazla akım akmaya başlar. Benzer olarak karşı yönden bir akım uygulandığında ise saf kısımdan katkılı kısma oksijen atomları geçişi olur ki bu durum da memristörün memristansının yani direncinin artmasına sebep olur. Bahsedilen aşamalar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.11). Modelde 3nm kalınlığında iki platin tabaka arasına TiO₂ yerleştirilip TiO₂ tabakasının bir bölümünde, normalde oksijen atomlarının olması gereken artı yüklü boşluklar varken bu boşluklara yakın bir elektroda alternatif akım uygulanarak artı ve eksi yük şeklinde dağılmıştır (Buğdaycı, 2012). Elektrot artı yüklüyken yüklü boşlukları ittirip akımın ikinci elektroda doğru akmasını sağlamakta olup akım verilmesi durdurulduğunda ise boşluklar hareket etmemektedir.



Şekil 2.11 : HP memristörün artı ve eksi gerilim uygulandığındaki durumları gerilim uygulanmamışken (a). artı gerilim uygulanıyorken (b). eksi gerilim uygulanıyorken (c). (Kerur, 2010).

2.3.2 Doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modeli

Doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modeli gerilim kontrollü bir memristör modelidir. Gerilim ile iç durum türevinin doğrusal olmadığı esasına dayanır. Bazı elektronik devreler için doğrusal olmayan analizler gerektiği için bu model daha faydalı olabilecektir. Nano boyutlardaki bir memristöre 1 volt gibi küçük bir gerilim dahi uygulansa büyük bir elektrik alan oluşur. Dolayısıyla bu durumda iyonların taşınması büyük ölçüde doğrusallıktan çıkar. Bu doğrusal olmayan iyon modelini Lehtonen ve arkadaşları önermişlerdir (Lehtonen ve Laiho, 2010). Denklem 2.10 da gösterildiği gibi memristördeki iyonlar doğrusal olmayan parametrelere bağlıdır.

$$i(t) = w(t)^n * \beta \sinh(av(t)) + x[\exp(\gamma v(t)) - 1] \quad (2.10)$$

Denkleme göre w durum değişkeni 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Memristör ON durumundayken w kısmı 1'e yaklaşır böylelikle denklemin 1. kısmı etkin olur. Aksi durumda w değişkeni 0'a yakınsar ve denklemin ikinci kısmı daha baskın olur. Denklemdaki α , β , γ ve x terimleri deneysel parametrelerdir.

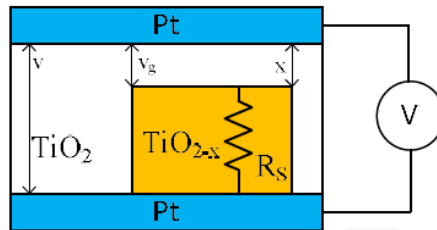
2.3.3 Simmons tünel bariyer modeli

Bu model Pickett ve arkadaşlarının 2009 yılında literatüre sundukları bir memristör modelidir (Pickett ve diğ, 2009). Diğer iki memristör modelinin aksine bu çalışmada saf veya katkılı TiO_2 parametresine dayalı bir yöntem sunulmamıştır. Bu modelde, HP'nin modelindeki seri olarak bağlı iki direnç yerine, bir direnç ve bir elektron tüneli bariyeri seri bağlıdır. Modeldeki iyonlaşmış katkılایıcı hareketlerin exponansiyel olması nedeniyle sistem asimetrik anahtarlama davranışı göstermektedir. Denklem 2.11 de akım; 2.12 de ise gerilim ifadesi formülize edilmiştir.

$$i(t) = \ddot{A}(x, Vg) \phi_1(Vg, x) \exp(-B(Vg, x) \phi_1(Vg, x)^{0.5}) - \ddot{A}(x, Vg) (\phi_1(Vg, x) + e|Vg|) \exp(-B(Vg, x) (\phi_1(Vg, x) + eVg)^{0.5}) \quad (2.11)$$

$$v_g = v - i(t)R_s \quad (2.12)$$

Denklemlere göre x tünel bariyer genişliğini, Vg oksitlenmiş bölge gerilimini, v elemanın iç gerilimini, R_s kanal direncini temsil eder. Şekilde Simmons Tünel bariyer modeli gösterilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2. 12 : Simons tünel bariyer yöntemi.

2.3.4 Eşik uyarlamalı memristör modeli

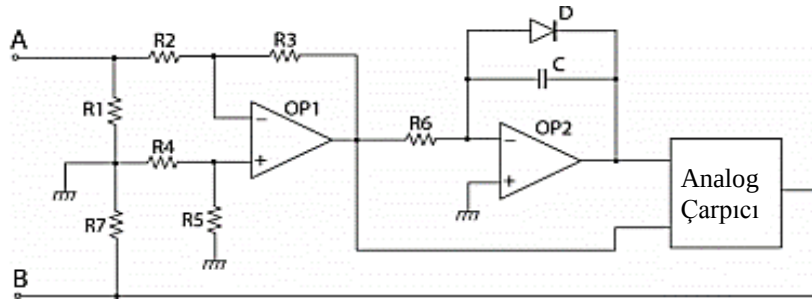
Simmons tünel bariyer modeli ile aynı fiziksel modele sahiptir. Avantajı ise daha sade ve genel bir modeldir. Bu model, Kvatinsky ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Kvatinsky ve diğ, 2013) Bu model farklı memristör modellerine uyarlanabilirliği açısından avantaj sağlayabilir. Durum değişkeni ile memristör akımı arasında üssel ilişki yerine, bir polinom ilişkisi vardır. Durum değişkeni ise belli bir eşikğin aşağısında değişmez.

2.4 Memristör Emülatör Devreleri

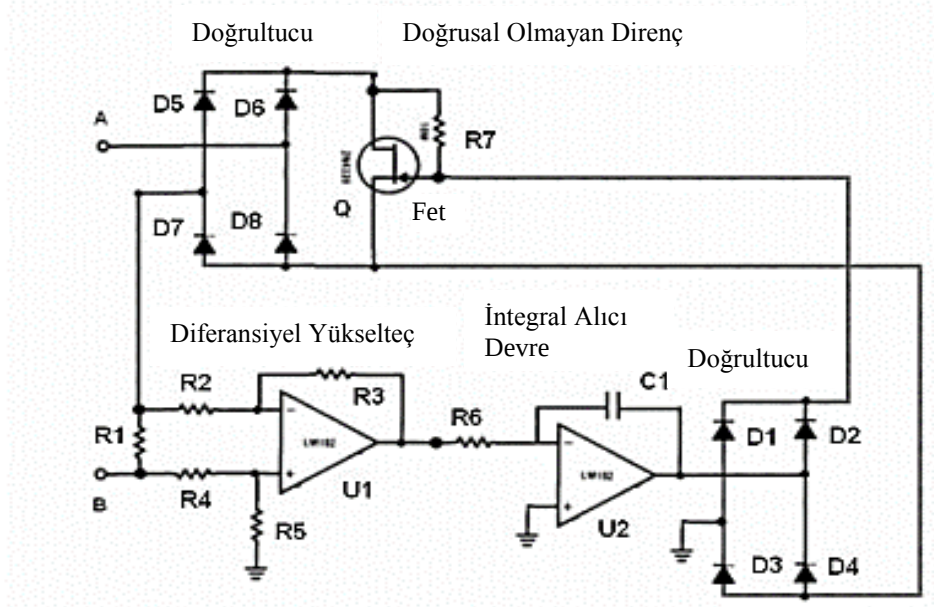
Elektronik devrelerdeki memristif cihazların dinamiklerini deneysel olarak keşfetmek için memristör gerekmemekte olup memristör elemanının ticari olarak kullanımının henüz yaygınlaşmamasından mütevellit bu elemanın özelliklerini taşıyabilen emülatör devreleri kullanılmaktadır. Bu sebeple literatürde farklı metodolojiler ve topolojiler kullanılarak çok sayıda memristör emülatör devresi tasarlanmıştır. Bu modellemeler teorik bilginin pratiğe dönüşmesi esnasında yapılan çalışmaların doğruluk oranını test etmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla emülatör devrelerinin literatürde yer almasıyla birlikte memristör tabanlı birçok sistemin bu emülatörler ile tasarımı ve gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. İlk analog memristör emülatörü Chua tarafından önerilip bu emülatörün ayrıntılı incelenmesi bölüm 2.1 de gösterilmiştir (Şekil 2.1). Bu bölümde ise farklı metodlarla tasarlanan birçok emülatör devresi ayrıntılı olarak incelenecektir.

2.4.1 Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı memristör emülatörleri

Mutlu ve Karakulak tarafından literatüre sunulan iki adet emülatör devresi bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi fark kuvvetlendiricisi, integral alıcı ve analog çarpıcı kullanılarak elde edilmiş bir emülatördür (Mutlu ve Karakulak, 2010) (Şekil 2.13). Analog çarpıcı; akım ve yükün çarpımını ifade ettiğinden devrenin çıkışı nonlineerlik özelliği sergilemektedir. Ek olarak devrede diyot kullanılması negatif yük geçişine izin verilmemesi amacını taşımaktadır. Tasarladıkları bir diğer emülatör ise doğrultucu, fark kuvvetlendirici, integral alıcı ve nonlineer direnç kullanılarak şekildeki gibi tasarlanmıştır (Mutlu ve Karakulak, 2009) (Şekil 2.14). Devre çıkışında negatif yüke izin verilmemesi için integral alıcı bölümün sonuna doğrultucu eklenmiştir. Bu devrenin nonlineerlik özelliğini FET sağlamakta olup FET'in iletim direnci doğrultucu ile sürüldüğünden devre akımı değiştikçe ve integral alıcı opamp doymadıkça değişmektedir.



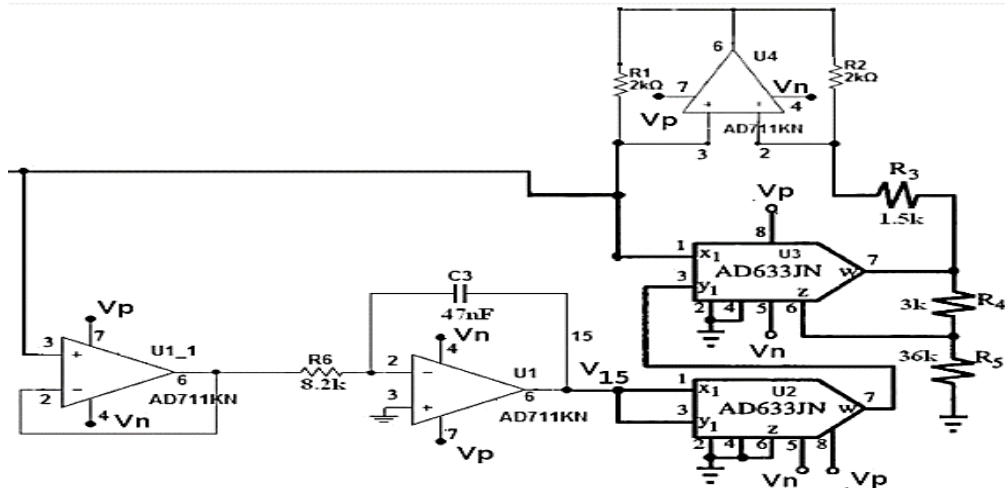
Şekil 2. 13 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı analog çarpıcılı memristör emülatörü (Mutlu ve Karakulak, 2010)



Şekil 2. 14 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı doğrultuculu memristör emülatörü (Mutlu ve Karakulak, 2009)

2.4.2 Muthuswamy'nin tasarladığı memristör emülatörü

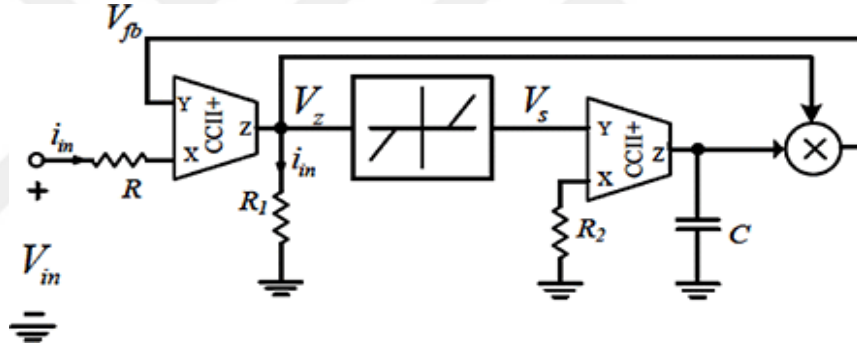
Bharathwaj Muthuswamy'nin önerdiği bu memristör emülatör devresi özellikle kaos devrelerinde kullanılmak üzere tasarlanmış olup farklı elektronik devrelerde de memristör yerine kullanılabilmektedir (Muthuswamy, 2010). Bu devrede integral alıcı ve diferansiyel yükselteç, AD711 opamp ve AD633 analog çarpıcı elemanları kullanılmıştır. İntegral operatörü, fonksiyonun gerilim değerlerini hatırladığı anlamına gelmektedir. AD711 opamp ise akım invertörü olarak görev yapmaktadır. Şekilde emülatörün devre şeması incelenmiştir (Şekil 2.15).



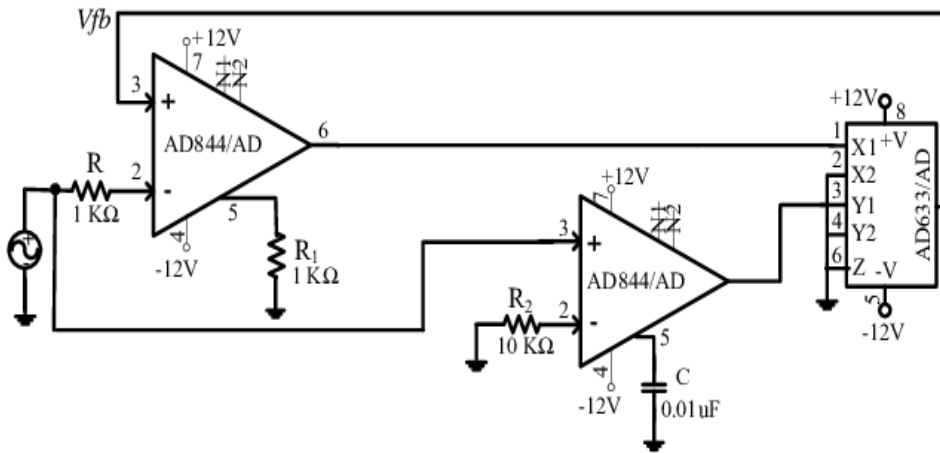
Şekil 2. 15 : Muthuswamy'nin tasarladığı memristör emülatörü (Muthuswamy, 2010).

2.4.3 Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörleri

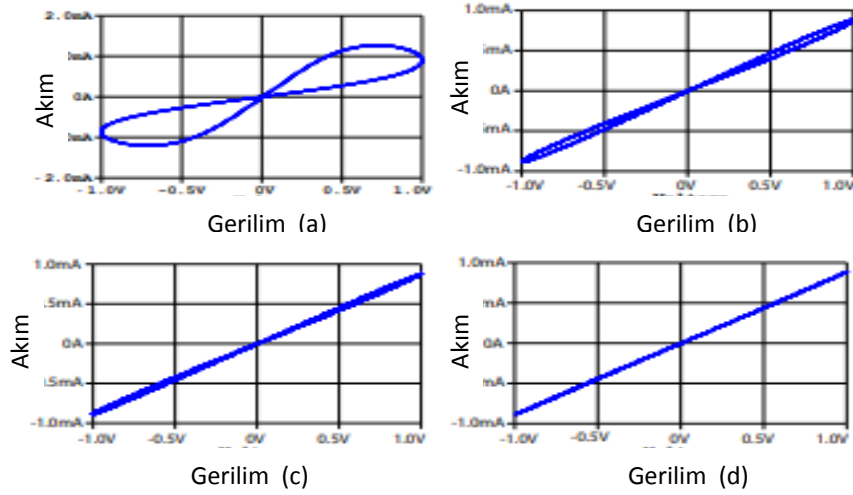
Abdullah G. Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı emülatör devresi akım kontrollü olup memristörün histeretik özelliklerini sergileyebilmektedir (Alharbi ve diğ., 2015). Emülatör, bir integratör ve üstel amplifikatör ile tasarlanmıştır. İntegratör, şekilde gösterildiği gibi CCII +, kondansatör ve direnç kullanılarak üretilmiştir (Şekil 2.16). Buna ek olarak, üstel amplifikatör, memristif davranış için gerekli nonlinerliği sağlamak için kullanılmıştır. Alharbi ve arkadaşlarının önerdiği bir başka emülatör devresi ise gerilim kontrollü bir devredir (Alharbi ve diğ., 2016). AD844 işlemsel kuvvetlendirici, AD633 analog çarpıcı ve CCII (ikinci nesil akım konveyörleri) temeline dayanan bu devre az elemanla oluşturulmuş bir memristör emülatörü olması açısından avantajlıdır. AD844, CFOA (akım geri besleme işlemsel yükselteçleri) tarafından oluşturulmuştur. Emülatör devresinin şeması ve emülatörün farklı frekans değerlerindeki histerezis eğrileri ise sırasıyla aşağıdaki şekillerde incelenmiştir (Şekil 2.17 ve Şekil 2.18).



Şekil 2. 16 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü memristör emülatörü (Alharbi ve diğ., 2015).



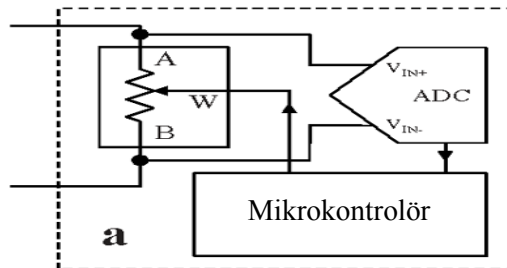
Şekil 2. 17 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü memristör emülatörü (Alharbi ve diğ., 2016).



Şekil 2. 18 : Alharbi ve arkadaşlarının gerilim kontrollü emülatör devresinin deneysel sonuçları 200 Hz frekansta histerezis eğrisi (a). 1.5kHz frekansta histerezis eğrisi (b). 3kHz frekansta histerezis eğrisi (c). 5kHz frekansta histerezis eğrisi (d). (Alharbi ve diğ., 2016).

2.4.4 Pershin ve Di Ventura'nın tasarladığı memristör emülatörü

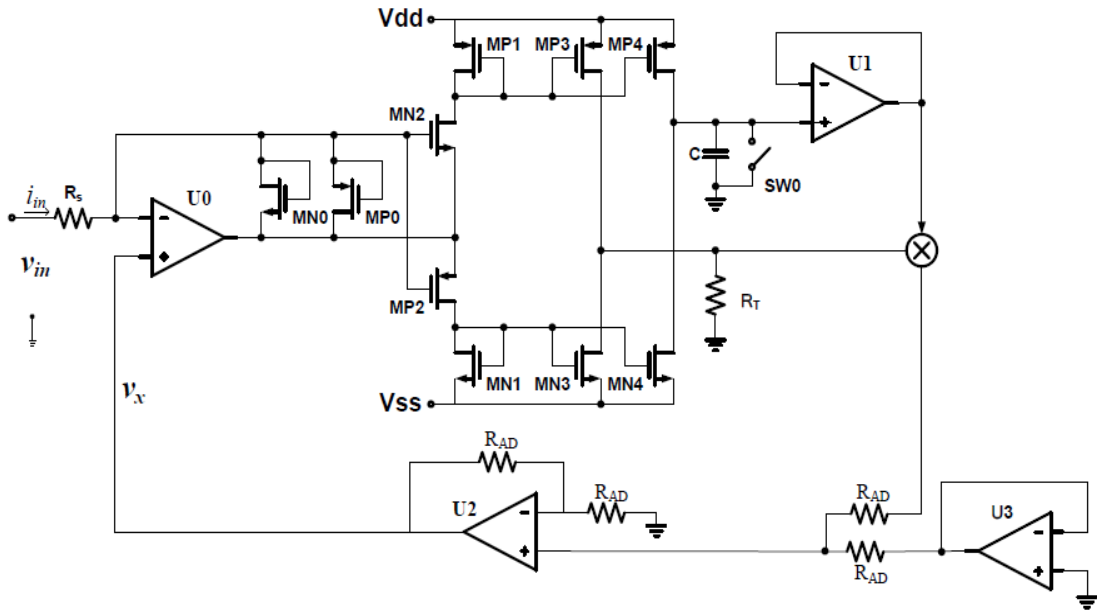
Pershin ve Di Ventura memristörü yeni bir bakış açısıyla öykünecek farklı ve programlanabilen bir emülatör devresi elde etmişlerdir (Pershin ve Di Ventura, 2010). Bir ADC (analog-dijital dönüştürücü), bir mikroişlemci ve bir dijital potansiyometre içeren bu devrenin blok diyagramı ve emülatörün sahip olduğu histerezis eğrisi şekilde verilmiştir (Şekil 2.19). Devreye uygulanan analog sinyal analog-dijital dönüştürücü vasıtasıyla dijital bir sinyale çevrilir ve mikroişlemciye iletilir. Mikroişlemci ise bu sinyali alıp dijital potansiyometreye aktararak potansiyometreyi gerekli direnç değerlerine ulaştırmaktadır. Farklı memristans değer aralığı parametresi dikkate alınacak olursa bu emülatörün farklı devrelere uygulanabilirliğinin yüksek ihtimalli olması bu emülatörü diğer emülatörlere nazaran üstün kılabilmektedir. Öte yandan bu emülatörün çalışma frekans bant aralığının dar olması bir dezavantaj teşkil etmektedir.



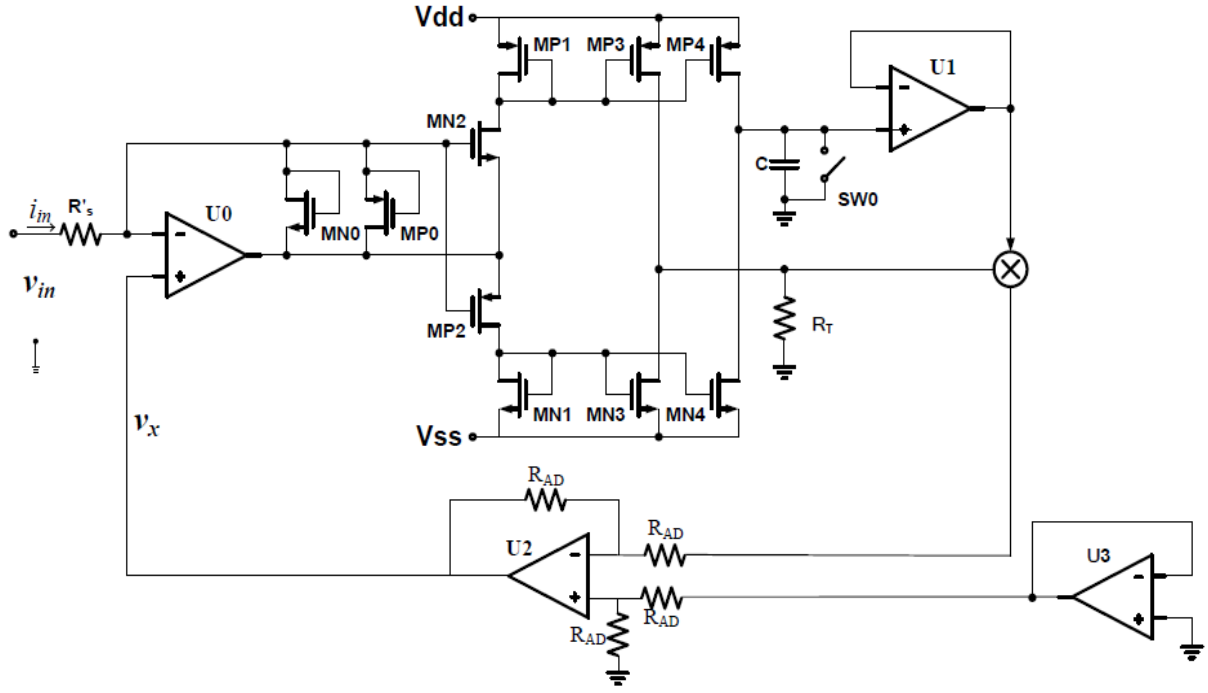
Şekil 2. 19 : Persin ve Di Ventura'nın tasarladığı memristör emülatörü (Pershin ve Di Ventura, 2010).

2.4.5 Kim ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü

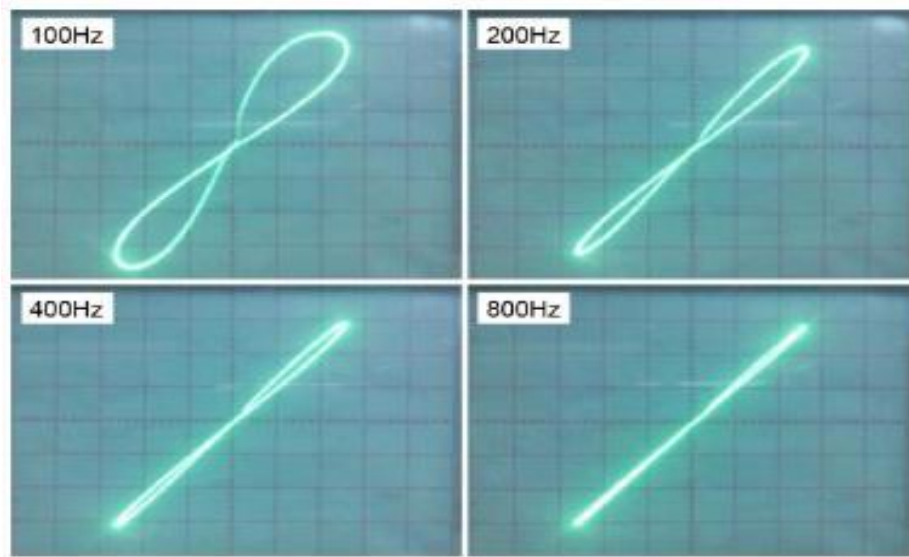
Kim ve arkadaşlarının tasarladığı emülatör devresinde, bir memristörün değişken direnci, opampın kapalı döngü devresinin giriş direnci kullanılarak inşa edilmiştir (Kim ve diğ., 2012). Artan eğilimli ve azalan eğilimli olarak iki farklı tipte emülatör sunulmuştur. Devrenin giriş terminaline pozitif voltaj uygulandığında akımın zamana göre integrali ile orantılı olarak memristans değeri artmaktadır (Şekil 2.20). I_{in} akımı birçok kısımda kullanıldığı için akım aynaları vasıtasıyla çoğaltılmıştır. Şekilde akımın MN_0 ve MN_2 akım aynaları ile kopyalanan pozitif kısmı, MP_1 ile akım aynası oluşturan MP_3 ve MP_4 elemanları tarafından R_T direnci ve C kondansatörüne doğru akarken, akımın negatif kısmı ise MN_1 ile akım aynaları oluşturan MN_3 ve MN_4 transistör elemanları ile R_T direnci ve C kondansatörüne doğru akış gösterir. Bu devreye çok yüksek voltaj uygulandığında memristans değeri azaldığından ötürü bu emülatör yapısı ise azalan eğilimli memristör emülatörü olarak tanımlanmıştır. Kim ve arkadaşlarına göre devre bağlantılarının basitçe değiştirilmesiyle azalan veya artan konfigürasyonda memristör emülatörü tasarlamak mümkündür. Azalan eğilimli memristör emülatörü ise aşağıda verilmiştir (Şekil 2.21). Tasarlanan memristör emülatörünün frekansa bağlı olarak değişen akım- gerilim karakteristikleri de verilmiştir (Şekil 2.22).



Şekil 2. 20 : Kim ve arkadaşlarının tasarladığı artan konfigürasyonlu memristör emülatörü (Kim ve diğ., 2012).



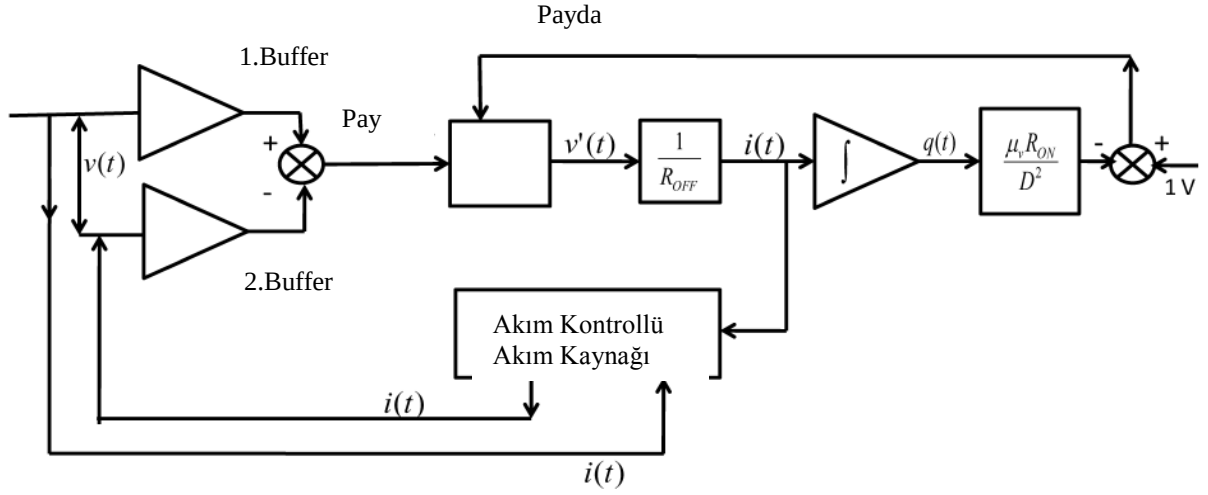
Şekil 2. 21 : Kim ve arkadaşlarının tasarladığı azalan konfigürasyonlu memristör emülatörü (Kim ve diğ, 2012).



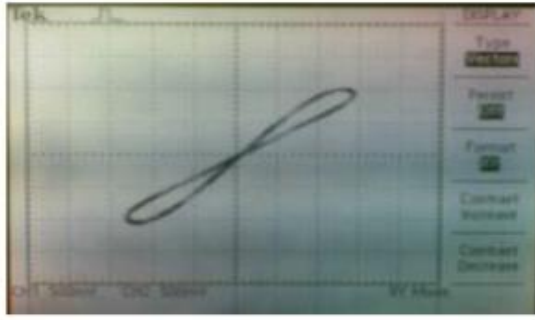
Şekil 2. 22 : Kim ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün frekansa bağlı I-V karakteristikleri (Kim ve diğ, 2012)

2.4.6 Milan Stork'un tasarladığı memristör emülatörü

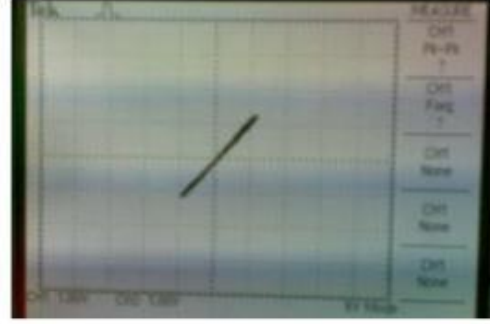
Milan Stork'un literatüre sunduğu bu emülatör devresi genel olarak operasyonel amplifikatörler, analog çarpıcılar ve negatif dirençten meydana gelmiş olup bu memristör emülatör devresi wien köprü osilatöründe standart direnç yerine kullanarak memristifliğin bu devreye etkileri incelemiştir (Stork, 2018). Ayrıca Stork, emülatör devresini iki farklı



Şekil 2. 25 : Soldi ve Gandhi tarafından tasarlanan memristör emülatörü (Sodhi ve Gandhi, 2010).



(a)

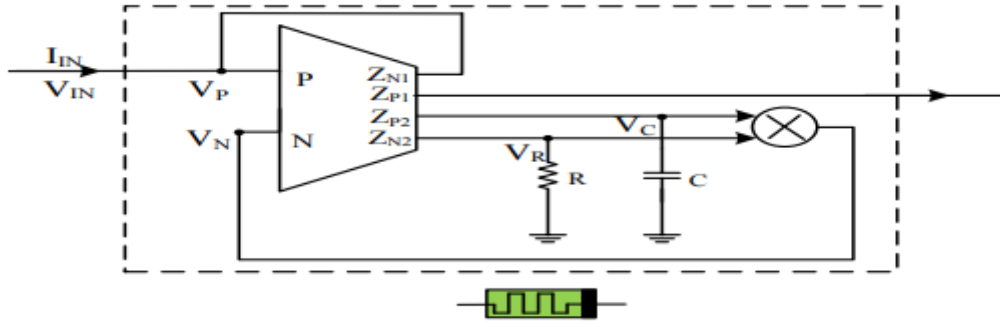


(b)

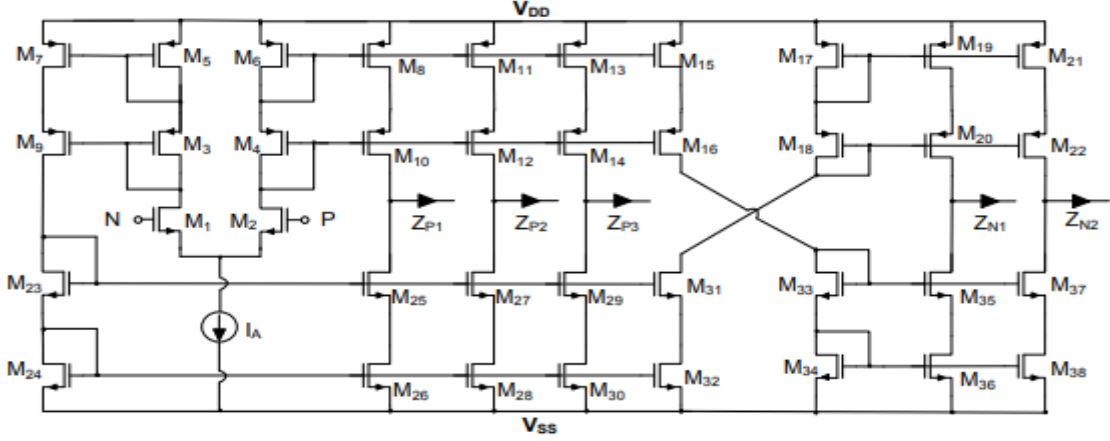
Şekil 2. 26 : Soldi ve Gandhi'nin tasarladığı emülatörün farklı frekanslardaki I-V karakteristikleri f=20 Hz (a). f=100 Hz (b). (Sodhi ve Gandhi, 2010).

2.4.8 Babacan ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü

Babacan ve arkadaşlarının tasarladığı azalan yapıda olan emülatör devresi OTA (işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi) kullanılarak elde edilip kaos devrelerine uygulanmıştır (Babacan ve Kaçar, 2017). OTA devre elemanının pozitif girişi memristör girişi olarak kullanılmıştır. Kondansatör ve direnç üzerindeki gerilimler ise çarpılıp OTA'nın negatif girişine bağlanılarak memristörün lineer olmama özelliği elde edilmiştir. Devrede bulunan direnç memristansın değişim aralığını kontrol etmektedir ve kondansatör ise memristörün hafıza özelliğinin sağlanmasında kullanılır. Kondansatör üzerinde buluna yükler herhangi bir yol üzerinden boşalmazsa kondansatör üzerindeki gerilim sabit olur. Dolayısıyla direnç ve kondansatör üzerindeki gerilimlerin çarpımı sabit kalır ve istenen hafıza özelliği gerçekleştirilmiş olur. Aşağıdaki şekilde tasarlanan emülatörün devre şeması ve OTA elemanının MOS transistörlerden oluşan içyapısı gösterilmiştir (Şekil 2.27).



(a)

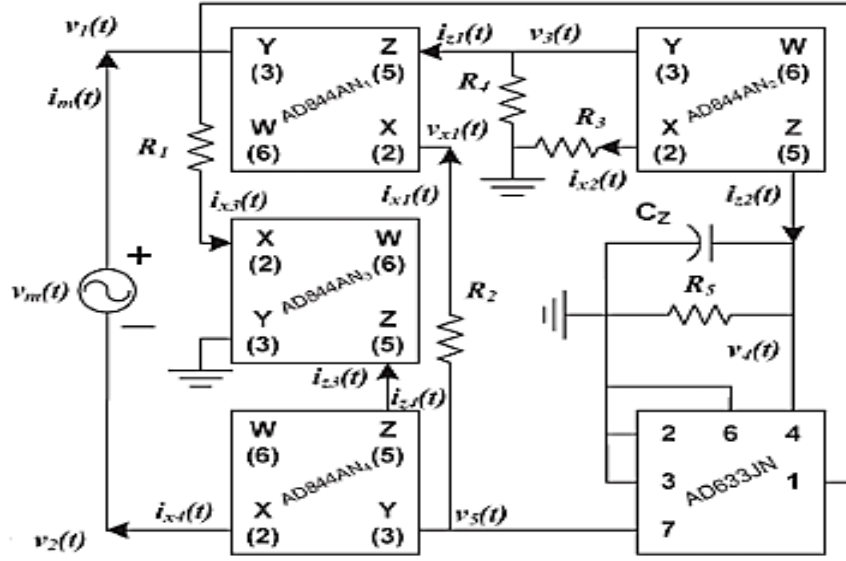


(b)

Şekil 2. 27 : Babacan ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü (a). OTA elemanının iç yapısı (b). (Babacan ve Kaçar, 2017)

2.4.9 Lopez ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü

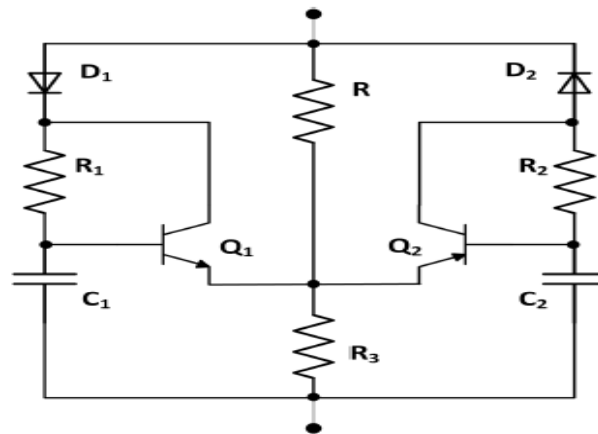
Sanchez Lopez ve arkadaşlarının önerdiği memristör emülatörü akı kontrollü bir devre olmakla birlikte çok fazla eleman içermemesinden dolayı avantajlıdır (Sánchez-López ve diğ., 2014). $CCII \pm$ yani ikinci nesil akım taşıyıcıları; doğrusal ve doğrusal olmayan devreleri tasarlamak için yaygın olarak kullanılmakta olduklarından bu memristör emülatöründe de $CCII +$ kullanılmıştır. Her AD844AN'nin terminallerindeki akım, sırasıyla her bir aktif cihazın sayısı ile etiketlenir. AD844AN₃ ve AD844AN₄'ün akım takip edici olarak kullanıldığı düşünülebilir, böylece R_1 kanalından dolayı $i_m(t)$, $i_{x4}(t)$ 'ye eşittir. Bu; AD844AN₁, R_2 ve R_4 ile bir diferansiyel voltaj yükselticisinin tasarlandığı anlamına gelir. Devredeki R_5 direnci yüksek değerdedir ve pratikte, devrenin entegrasyonunun sıfır voltaj düşüşünden korunmasını önler. Değişken davranışlı bir memristif sisteme ulaşmak için $V_1(t)$ ve (5)'in çarpımıyla $V_2(t)$ 'yi elde etmek gerekmektedir. Bu durum AD633JN analog çarpımıyla elde edilmiştir. Devrenin şeması şekilde verilmiştir (Şekil 2.28).



Şekil 2. 28 : Lopez ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü (Sánchez-López ve diğ, 2014).

2.4.10 Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü

Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı emülatör ideal olmayan bir memristör emülatörü olup iki transistör, iki diyot, direnç ve kondansatör ile gerçekleştirilmiştir (Kalo, 2016). Az sayıda elektronik eleman içermesi devrede bir avantaj olarak addedilmektedir. Diyotların ve transistörlerin pasif bir modda çalışması dikkat çekicidir. Önerilen emülatör belirli bir frekans aralığında sinüzoidal bir sinyal ile sürüldüğünde, sıkıştırılmış bir histeretik döngü göstermiştir ve böylece ideal olmayan bir memristör olarak çalıştığı doğrulanmıştır. Devrenin şeması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.29).



Şekil 2. 29 : Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörü (Kalomiros ve diğ, 2016).

Literatürde yukarıda sıralanan memristör emülatörleri gibi daha birçok emülatör bulunmaktadır. DDCC integratör, çarpıcı ve toplayıcı devreler ile tasarlanmış CMOS tabanlı

bir biçimde oluşturulmuş Yener ve Kuntman devresi bunlardan biridir (Yener ve Kuntman, 2012). Bir diğeri ise Wang ve arkadaşlarının tasarladığı ve dizaynında LDR kullanılmış bir emülatördür (Wang ve diğ, 2012). OTA ve CCII kullanılarak tasarlanan ve yüksek frekanslarda dahi verimli çalışabilen bir akı kontrollü emülatör devresi de yapılan çalışmalar arasındadır (Raj ve diğ, 2020).

2.5 Diğer Memristif Sistemler

2.5.1 Memkapasitör

Memristif sistemlerin bir parçası olan memkapasitör, memristör gibi; doğrusal olmama, ikili ve çoklu bellek durumları ve nanometre geometrileri gibi tipik özellikler göstermektedir. Bir n. mertebeden voltaj kontrollü memkapasitif sistemi, 2.13 ve 2.14 teki denklemler kullanılarak tanımlanabilir (Ventra ve diğ, 2009):

$$q(t) = C_M(x, v, t)v(t) \quad (2.13)$$

$$\dot{x} = f(x, v, t) \quad (2.14)$$

$v(t)$, yarı kapasitif sistem boyunca aşırı gerilimdir. $q(t)$ ise t zamandaki kapasitif sistem üzerindeki yükü belirtirken C_M , sistemin memkapasitansdır. n. mertebeden yük kontrollü bir memkapasitif sistemin ifadesi ise denklem 2.15 ve 2.16 da gösterilmiştir:

$$v(t) = D_M(x, q, t)i(t) \quad (2.15)$$

$$\dot{x} = f(x, v, t) \quad (2.16)$$

D_M ters memkapasitanstır.

Gerilim kontrollü ve yük kontrollü memkapasitörler sırasıyla aşağıdaki denklem 2.17 ve 2.18 de olduğu gibi, birinci dereceden memkapasitif sisteminin bir alt sınıfı olarak tanımlanabilir:

$$q(t) = C_M(\int_0^t v(\tau)d\tau)v(t) \quad (2.17)$$

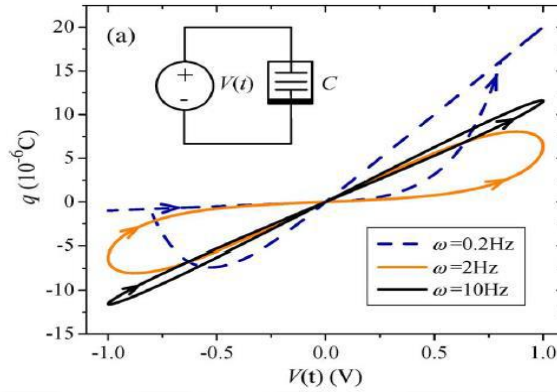
$$v(t) = D_M(\int_0^t q(\tau)d\tau)i(t) \quad (2.18)$$

İlk boşalma enerjisi sıfır olduğu için ilk zaman momenti sıfır olarak seçilir. Zamanın integralinin denklem 2.19 da verilen şekilde tanımlanması durumunda denklem 2.18; denklem 2.20 ya döner.

$$\sigma(t) = \int_0^t q(\tau) d\tau \quad (2.19)$$

$$v(t) = D_M \sigma(t) \quad (2.20)$$

Memkapasitör elemanı, memristör elemanının da sahip olduğu monoton olarak artan $\phi - \sigma$ eğrisine sahiptir. Memkapasitans değeri $\phi - \sigma$ eğrisinin eğimi ile belirlenir. Denklem 2.13 ten de anlaşılacağı üzere, $I = 0$ koşulunun $q = 0$ anlamına gelmediği açıktır. Bu nedenle memkapasitör elementi enerji depolar (Şekil 2.30).



Şekil 2. 30 : Memkapasitörün farklı frekanslardaki akım-gerilim karakteristikleri (Ventra ve diğ, 2009)

2.5.2 Memindüktör

Memristif sistemlerin bir diğer elemanı memindüktördür. Memkapasitif sistemine benzer şekilde, birinci dereceden akım kontrollü memindüktif sistemin akı denklemi 2.21 de ve denklemin net hali 2.23 te, x fonksiyonu denklemi 2.22 de verilmiştir (Ventra ve diğ, 2009).

$$\varphi(t) = L_M(x, i, t) i(t) \quad (2.21)$$

$$\dot{x} = f(x, i, t) \quad (2.22)$$

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t q(t) i(t) \quad (2.23)$$

Denklem 2.21 e göre $i(t)$ akımı; $\varphi(t)$ akıyı; L_M ise memindüktansı ifade eder. Benzer şekilde, birinci dereceden akı kontrollü memristif sistem denklem 2.24 ve 2.25 teki gibi tanımlanabilir:

$$i(t) = \Lambda_M(x, \varphi, t) \varphi(t) \quad (2.24)$$

$$\dot{x} = f(x, \varphi, t) \quad (2.25)$$

Λ_M ters memindüktansı ifade etmektedir. Akım kontrollü ve akı kontrollü memindüktörler, sırasıyla aşağıdaki denklem 2.26 ve 2.27 de olduğu gibi, birinci dereceden memindüktif sistemin bir alt sınıfı olarak tanımlanabilir:

$$\varphi(t) = L(\int_0^t i(\tau) d\tau) i(t) \quad (2.26)$$

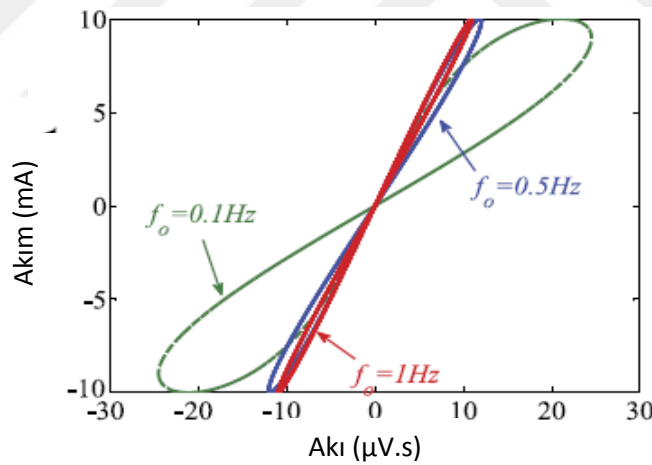
$$i(t) = \Lambda(\int_0^t \varphi(\tau) d\tau) \varphi(t) \quad (2.27)$$

İlk boşalma enerjisi sıfır olduğu için ilk zaman momenti sıfır olarak seçilir. Denklem 2.28 deki akının zamana göre integralinin denklem 2.27 'de verilen şekilde tanımlanması halinde denklem 2.29 a döner.

$$\rho(t) = \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \quad (2.28)$$

$$i(t) = \Lambda(\rho) \varphi(t) \quad (2.29)$$

Memindüktör elemanı da monoton olarak artan $q - \rho$ eğrisine sahiptir. Memristans değeri, $q - \rho$ eğrisinin eğimi ile belirlenir. Denklem 2.21 de $V = 0$ koşulunun $\varphi = 0$ anlamına gelmediği açıktır. Bu nedenle, memristif eleman enerji depolar (Şekil 2.31).



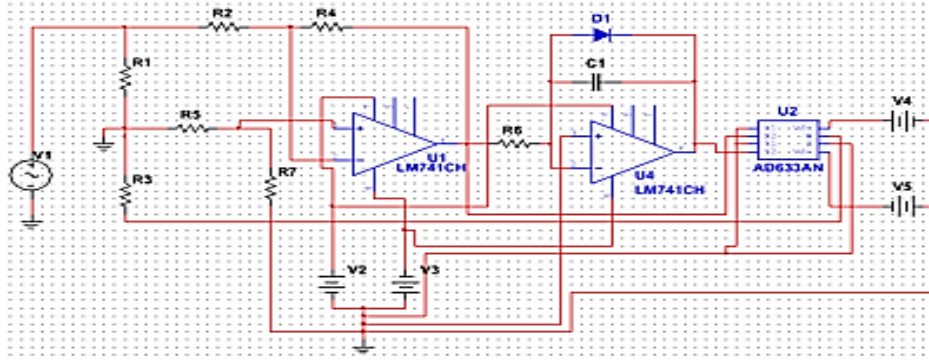
Şekil 2. 31 : Memindüktörün histerezis eğrisi (Fouda ve Radwan, 2014).

3. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRLERİNİN SİMÜLASYONDA VE LABORATUVAR ORTAMINDA ELDE EDİLMESİ

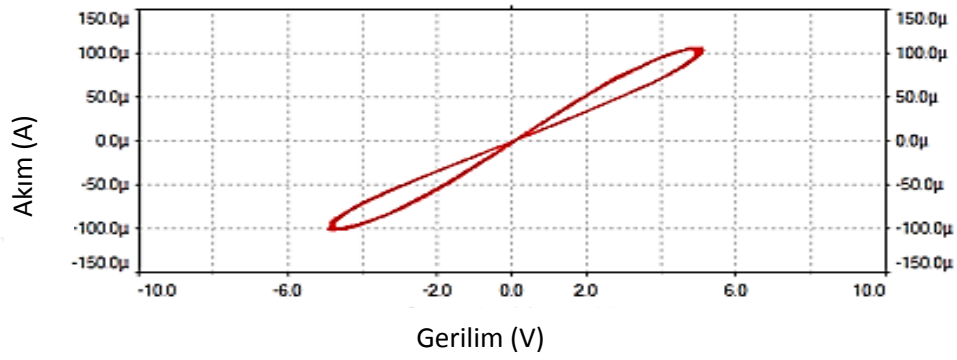
Bu bölümde literatürde bulunan farklı memristör emülatörleri bilgisayar ortamında simüle edilecektir. Ayrıca bu devreler laboratuvar ortamında kurularak elde edilmesi gereken memristör akım-gerilim histerezisine ulaşılabilecektir. Benzetim ve deneysel sonuçlara bakılarak her bir memristör emülatörünün histerezis eğrisi incelenip gerekli memristif özellikleri taşıyıp taşımadıkları değerlendirilecektir. Gerçeklenen bu emülatörlerin çalışma mantıkları ve devresel özellikleri ayrıca olarak ikinci bölümde verildiği için bu bölümde ayrıca değinilmeyecektir.

3.1 Mutlu ve Karakulak Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları

İlk olarak incelenen devre Mutlu ve Karakulak'ın literatüre sunduğu memristör emülatörüdür (Mutlu ve Karakulak, 2010). Aşağıdaki şekilde Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı memristör emülatör devresinin Multisim programında elde edilen simülasyonu ve bu simülasyondan elde edilen akım-gerilim karakteristiği görülmektedir (Şekil 3.1). Simülasyondan ulaşılan sonuçlara göre bu emülatörün memristans değeri yaklaşık olarak 24.485 k Ω olarak incelenmiştir. Şekildeki devrenin frekansı 30 Hz olup daha düşük frekanslarda histerezis eğrisinin yaprakları daha geniştir. Artan frekanslarda bu histerezis eğrisi daralmakta ve frekans değeri oldukça arttığında ise memristör emülatörünün histerezis eğrisi artık standart bir direncin histerezis eğrisi gibi davranmaktadır. Diğer şekilde ise bu emülatörün laboratuvar ortamında kurulmuş devre şeması ve akım gerilim karakteristiği gösterilmiştir (Şekil 3.2). Laboratuvarda deneyimlenen Mutlu ve Karakulak emülatörünün memristans değeri yaklaşık olarak 23.405 k Ω olup devreye uygulanan frekans değeri ise 30 Hz'dir. Her iki şekilden de anlaşılabileceği üzere emülatörlerden elde edilen akım-gerilim karakteristikleri memristörün sağlaması gereken özellikleri karşılamaktadır. Daha açık ifade etmek gerekirse bu emülatör, akım ve gerilimi aynı anda sıfırdan geçen iki yapraklı bir yoncaya benzeyen ve frekans değeri arttıkça bu yaprakların daraldığı bir yapıdadır. Frekans sonsuza doğru ilerledikçe akım- gerilim karakteristiğinin lineer direnç gibi davrandığı incelenmiştir. Bu durum memristif davranışın bir gereğidir.

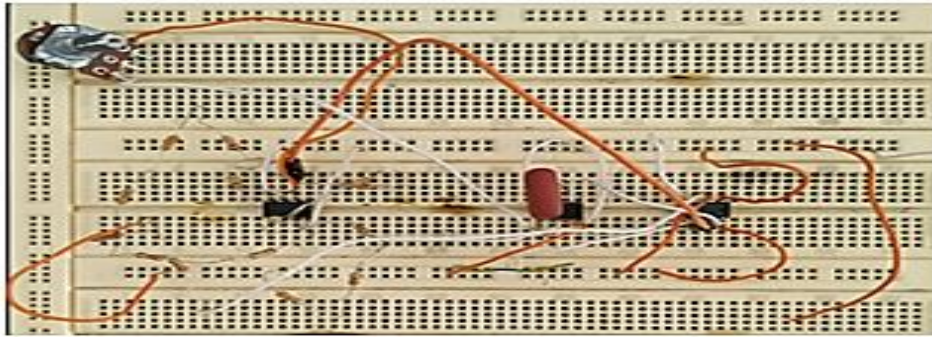


(a)

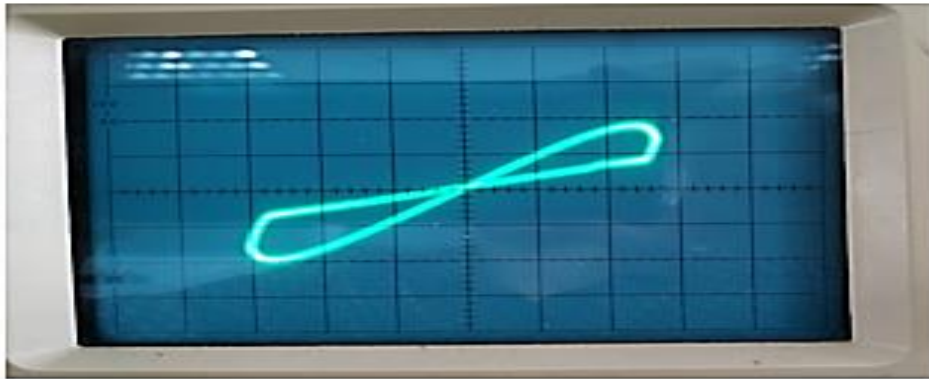


(b)

Şekil 3. 1 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatörün simülasyonu (a).akım-gerilim karakteristiği (b).



(a)

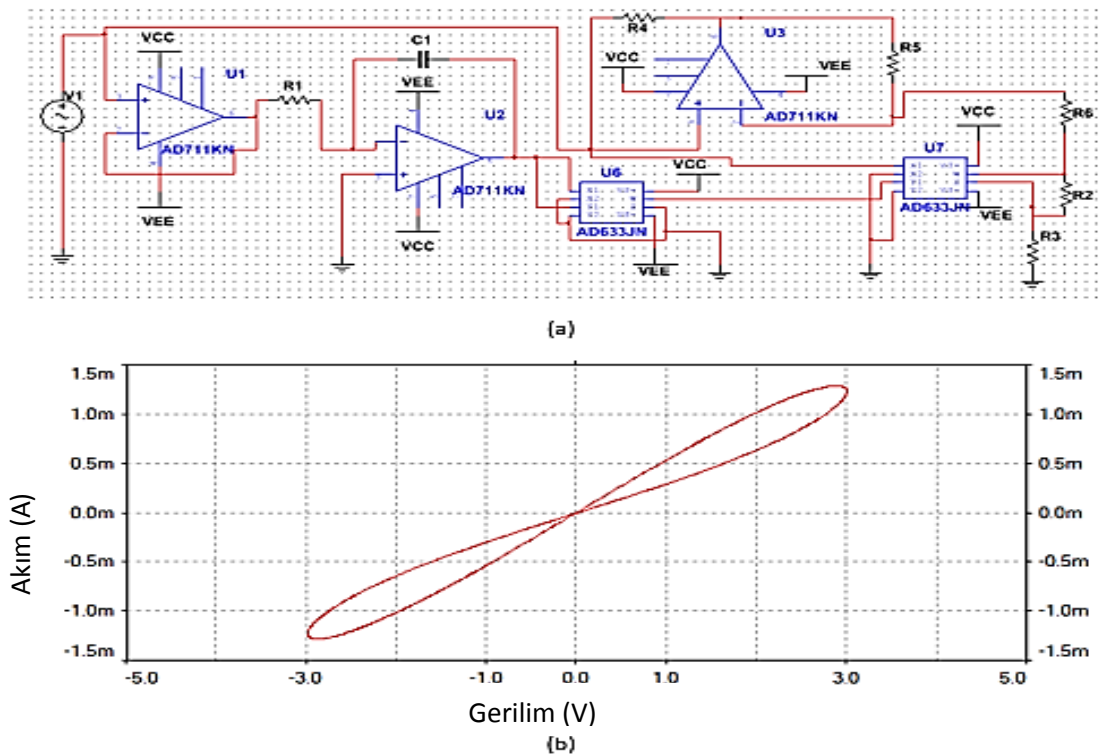


(b)

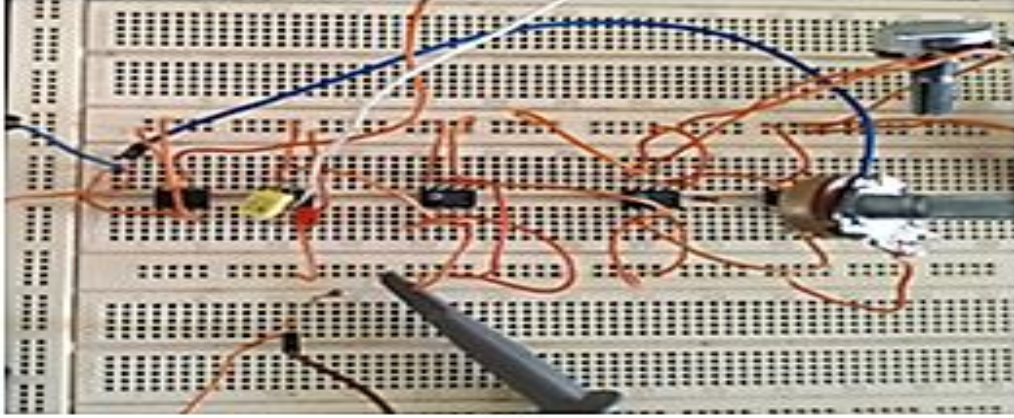
Şekil 3. 2 : Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatörün laboratuvarda kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).

3.2 Muthuswamy Emülatörünün Benzetim ve Deneyisel Sonuçları

İkinci memristör emülatörü ise bölüm ikide ayrıntılarıyla işlenen Brathway Muthuswamy'nin tasarladığı memristör emülatör devresidir (Muthuswamy, 2010). Bu memristör emülatörü kaotik devrelerde kullanılmak üzere literatüre sunulmuştur. Devrenin simülasyon şeması ve simülasyondan elde edilen histerezis eğrisi aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.3). Elde edilen benzetim sonuçlarına göre emülatörün ortalama memristans değeri $25.23 \text{ k}\Omega$ olup emülatöre uygulanan gerilimin frekans değeri ise $f=30 \text{ Hz}$ 'dir. Deneyisel olarak elde edilen devre şeması ve histerezis eğrisi de aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.4). Laboratuvarda gerçekleştirilen devrenin memristans değeri yaklaşık olarak $20.5 \text{ k}\Omega$ olarak bulunmuştur. Deneyisel olarak kullanılan elektronik malzemelerin tolerans değerleri ve ölçüm aletlerinin hassasiyetinden kaynaklı olabilecek küçük bir memristans farkı emülatörün benzetim ve deneyisel sonuçları arasında mevcuttur. Emülatörün girişine uygulanan gerilimin frekans değeri $f=103 \text{ Hz}$ 'de akım-gerilim karakteristiği daha belirgin bir memristör eğrisi gözlenmiştir. Artan frekanslarda bu akım-gerilim karakteristiğinin daralmakta olduğu deneyimlenmiştir. Emülatörün akım-gerilim karakteristiği standart bir memristörün sahip olması gerektiği gibi bir histeretik eğriye sahiptir.



Şekil 3. 3 : Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).



(a)

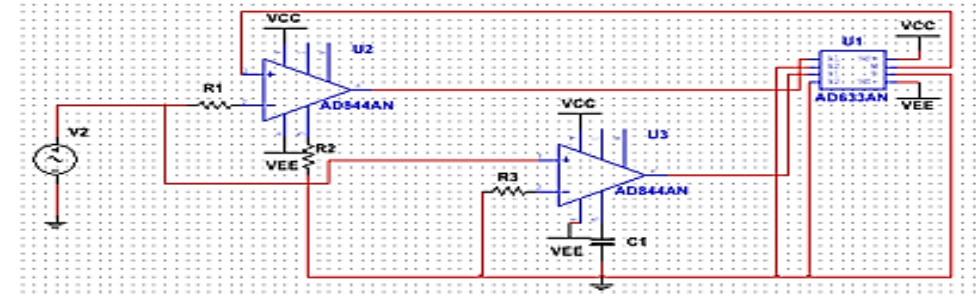


(b)

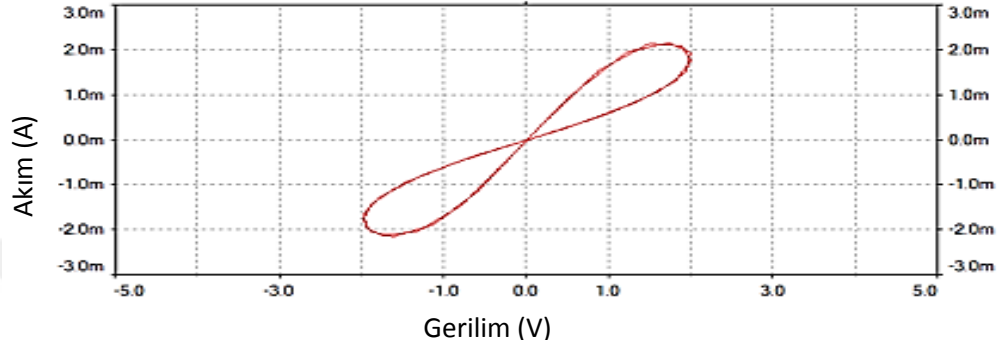
Şekil 3. 4 : Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).

3.3 Alharbi ve Arkadaşlarının Gerilim Kontrollü Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları

Bir diğer memristör emülatörü ise Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü devredir (Alharbi ve diğ, 2016). AD844 işlemsel kuvvetlendirici, ikinci nesil akım konveyörleri (CCII) ve AD633 analog çarpıcı temeline dayanan bu devre az elemanla oluşturulmuş bir memristör emülatörü olması açısından avantajlıdır. Devrenin simülasyon şeması ve simülasyondan türetilen akım-gerilim karakteristiği aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.5). Elde edilen benzetim sonuçlarına göre memristörün memristans değeri yaklaşık olarak $1.38 \text{ k}\Omega$ 'dur ve histerezis eğrisi frekansın 500 Hz olduğu durumda alınmıştır. Deneysel devre şeması ve histerezis eğrisi de yine aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.6). Laboratuvarında ulaşılan somut verilere göre emülatör $1.33 \text{ k}\Omega$ 'luk bir memristans değerine sahiptir. Bu devrede frekans değeri 950 Hz 'dedir. Frekansın daha artırıldığı durumlarda histerezis eğrisinin daraldığı da incelenmiştir.

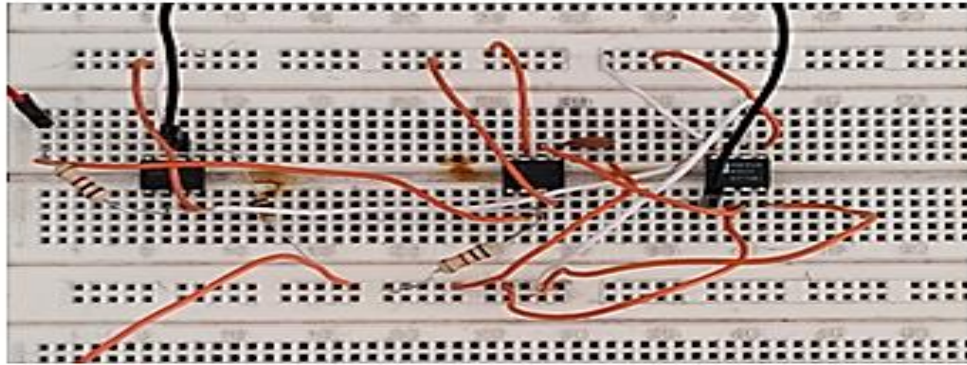


(a)

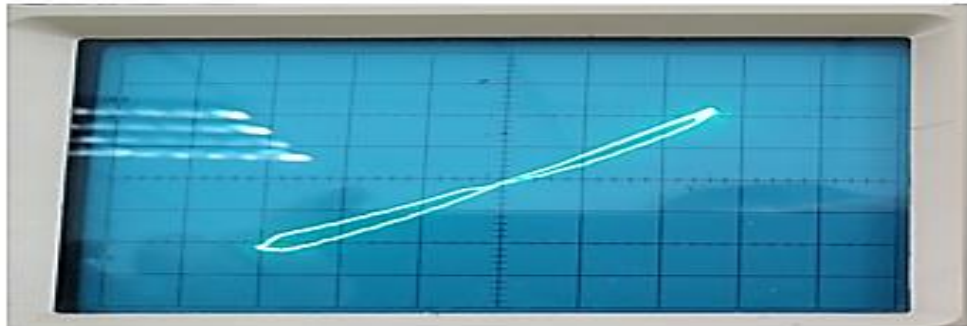


(b)

Şekil 3. 5 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).



(a)

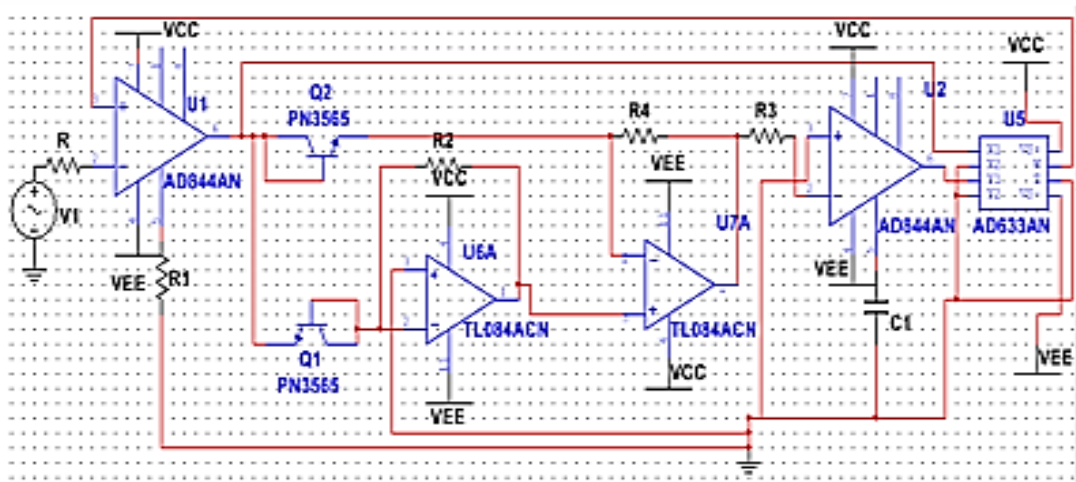


(b)

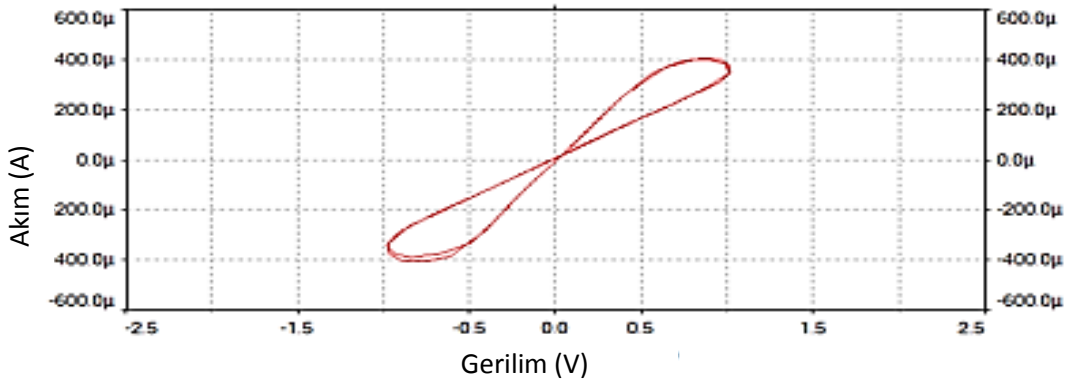
Şekil 3. 6 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).

3.4 Alharbi ve Arkadaşlarının Akım Kontrollü Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları

Alharbi ve arkadaşlarının literatüre sundukları bir başka memristör emülatörü ise akım kontrollüdür (Alharbi ve diğ, 2015). Devrenin simülasyonu ve histerezis eğrisi aşağıdaki şekilde incelenmiştir (Şekil 3.7). Simülasyon sonuçlarına göre devrenin memristans değeri yaklaşık $2.5 \text{ k}\Omega$ olarak bulunup bu emülatöre uygulanan gerilimin frekans değeri ise 20 Hz 'dir. Devreye artan frekanslar değerleri de uygulanmıştır ve bir memristör özelliği olan yüksek frekanslarda yaprakların yavaş yavaş daralması özelliği gözlemlenmiştir. Somut ortamda gerçekleşen akım kontrollü emülatörün şeması ve histerezis eğrisi ise şekilde verilmiştir (Şekil 3.8). Emülatörün memristans değeri $2.3 \text{ k}\Omega$ olup uygulanan gerilimin frekans değeri ise 264 Hz 'dir. Gerçeklenen devreden elde edilen deneysel sonuçlara göre de gerekli olan memristiflik özellikleri sağlanmıştır.

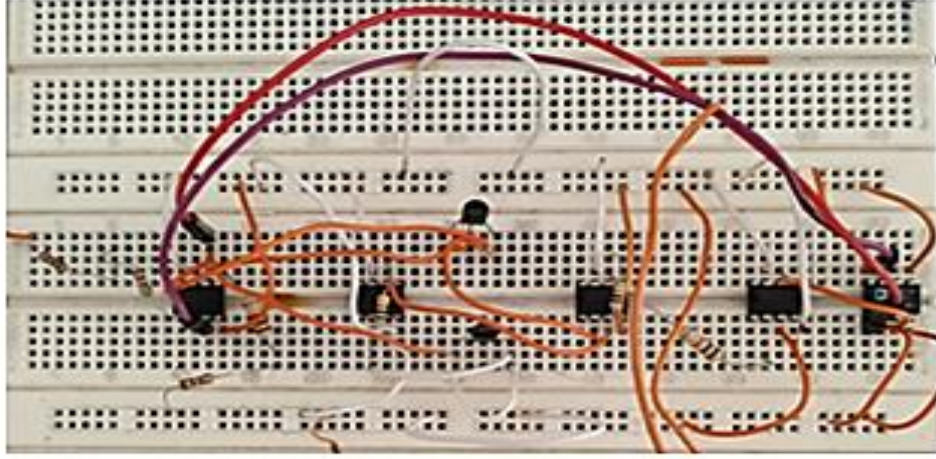


(a)



(b)

Şekil 3. 7 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).



(a)

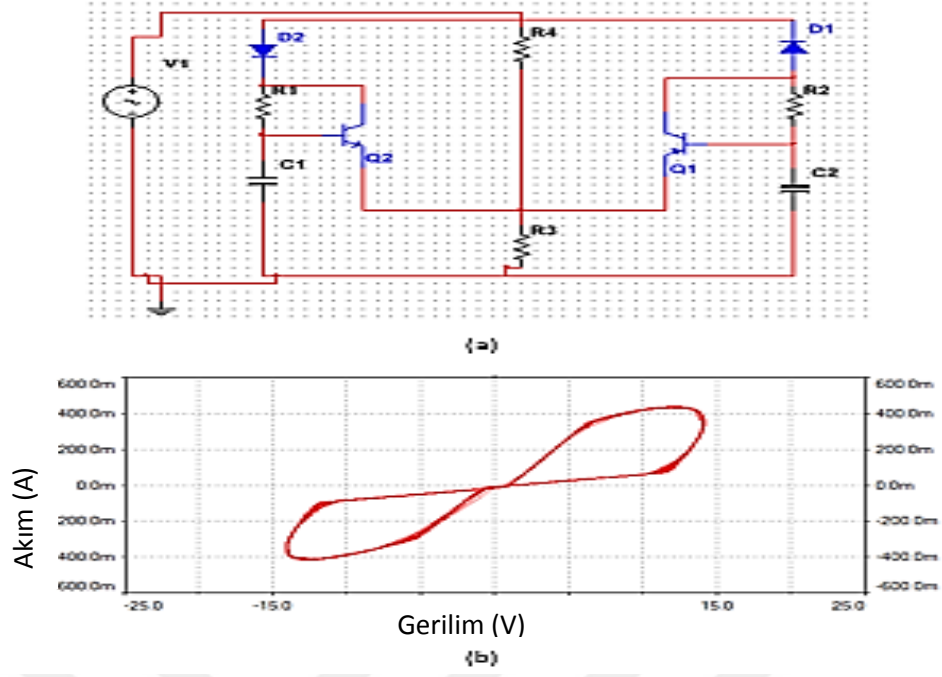


(b)

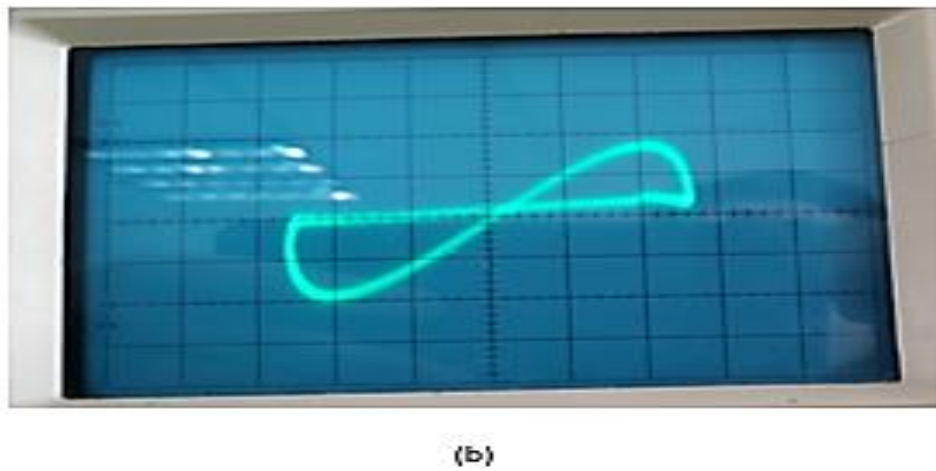
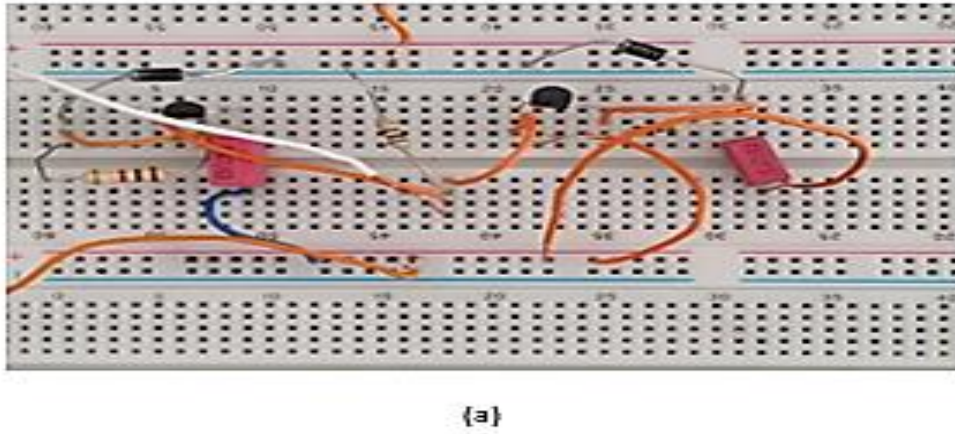
Şekil 3. 8 : Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü emülatörün laboratuvarda kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).

3.5 Kalomiros ve Arkadaşlarının Emülatörünün Benzetim ve Deneysel Sonuçları

İki transistör, iki diyot, direnç ve kondansatör ile gerçekleştirilen bu emülatörü John Kalomiros ve arkadaşları tasarlarken histerezis döngüsü için iki özdeş kondansatörün lüzumlu olduğunu belirleyip devrede harici bir besleme voltajı kullanmamışlardır (Kalomiros ve diğ, 2016). Dolayısıyla diyot ve transistörler devrede pasif eleman gibi rol almışlardır. Devreye ait simülasyon şeması ve akım-gerilim karakteristiği şekilde incelenmiştir (Şekil 3.9). Emülatör devresinin laboratuvarda kurulmuş şeması ve histeretik döngüsü de aşağıda verilmiştir (Şekil 3.10). Simülasyonda görülen memristans değeri 161 Ω 'dur. Laboratuvarda kurulan devrenin memristans değeri ise yaklaşık olarak 186 Ω 'dur. Emülatörün her iki akım-gerilim karakteristiğine bakılırsa gerekli memristif özelliği gösterdiği aşıkardır.



Şekil 3. 9 : Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün simülasyonu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).



Şekil 3. 10 : Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün laboratuvarında kurulumu (a). akım-gerilim karakteristiği (b).

4. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRLERİNİN GERÇEKLENMESİ VE ELEKTRONİK DEVRELERDEKİ UYGULAMALARI

Bu kısımda, simülatif ve deneysel olarak memristifliği kanıtlanmış olan memristör emülatörleri kullanılarak bu emülatörlerin farklı elektronik devreler üzerindeki etkileri incelenecektir. Elde edilen emülatörler alçak geçiren filtre devresinde standart direnç yerine devreye dahil edilip emülatörlerin hem standart dirence göre hem de birbirlerine göre sinyal filtreleme performanslarının karşılaştırılması yapılacaktır. İkinci olarak memristör emülatörleri RC faz kaydıran osilatör devresinde standart direnç yerine kullanılarak devredeki güç tüketimini minimize etmeye bağlı olarak performans değerlendirilmesi yapılacaktır. Son olarak MOSFET teknolojisiyle tasarlanmış lojik kapılarda standart direnç ve memristör kullanımının performans karşılaştırılması yapılacaktır. Ulaşılan grafiklere ve nihai karşılaştırma sonuçlarına alt bölümlerde sırasıyla değinilecektir.

4.1 Elektronik Filtrelerin Özellikleri ve Memristör Emülatörlerinin Alçak Geçiren Filtredeki Performans Karşılaştırması

Filtre devreleri, haberleşme sistemlerinin en önemli elemanlarından biridir. Belirli bir frekans bölgesinde istenilen bir zayıflama ya da geciktirme karakteristiğini sağlayan devrelerdir. Hemen hemen haberleşme sistemlerinin tümünde bulunan filtreler, belli bir frekans bandının geçmesine izin verirken bu bant dışında kalan frekansların ise zayıflatılmasını sağlarlar ve bu amaç için tasarlanırlar.

Filtreler genellikle doğru bileşenlerin süzülmesinde, gürültü azaltmada, rezonanstan kaçınmada, rezonans oluşturmada, işaret biçimlendirmede, işaret zayıflatmada ve güç faktörü düzeltmede kullanılırlar. Aşağıdaki şekilde filtrelerin sınıflandırılması verilmiştir (Şekil 4.1).

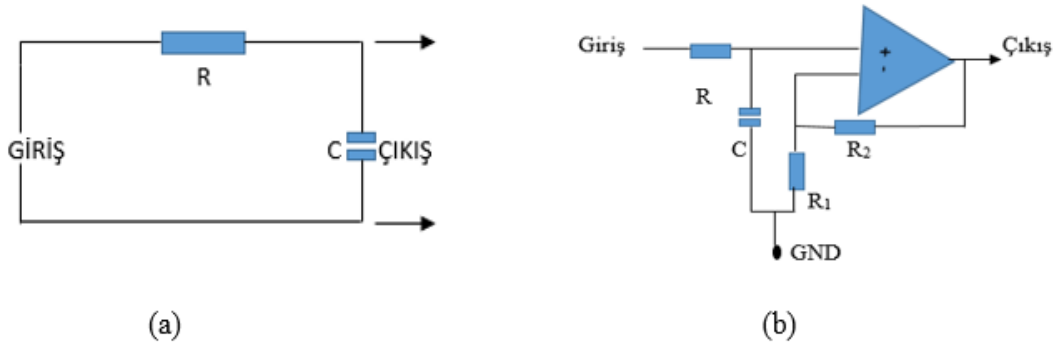


Şekil 4. 1 : Elektronik filtrelerin sınıflandırılması

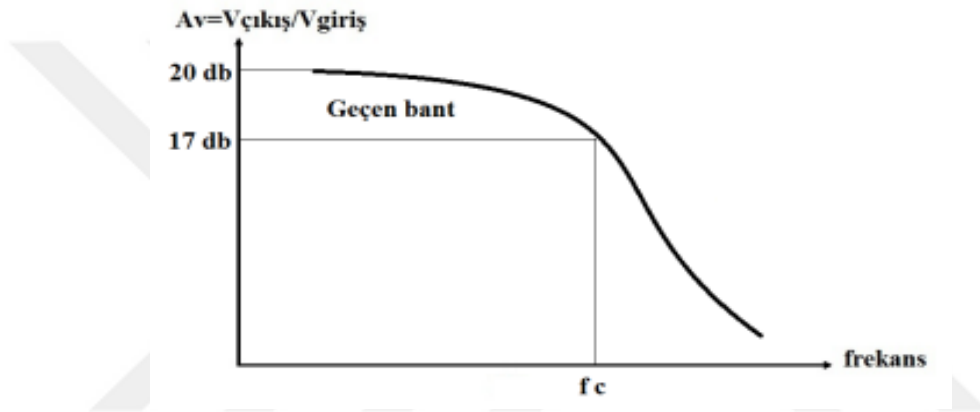
Bu tez çalışmasının uygulama kısmında alçak geçiren filtre devresi kullanılacağı için bu devrenin özellikleri ayrı olarak açıklanmıştır. Kondansatör elemanının yüksek frekansta kısa devre gibi alçak frekansta ise açık devre gibi davrandığı göz önüne alınırsa kondansatörün paralel ya da seri kolda yer almasının filtrenin özelliklerini ortaya koyduğu da görülür. Eğer kondansatör paralel kolda ise yüksek frekanslı sinyaller topraklanır yani bastırılmış olur. Alçak frekanslı sinyaller ise kondansatörün varlığından etkilenmez. Bahsedilen filtrenin pasif elemanlarla oluşturulmuş hali ve aktif elemanlarla oluşturulmuş hali aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.2). Gerilim kazancı-frekans grafiğine bakılacak olunursa düşük gerilim değerlerinde gerilim seviyesi yaklaşık olarak aynı kalırken frekans arttıkça gerilim kazancı giderek düşmektedir (Şekil 4.3). Burada f_c kesim frekansını temsil etmekte olup bu frekanstan sonra sistemin cevabı hızlıca azalmaktadır. Yani kesim frekansından sonraki sinyalin çıkış gerilimi değeri mümkün mertebe bastırılıp yok edilmeye yöneliktir. Devrenin frekans ve faz cevabı denklem 4.1 ve denklem 4.2’de verilmiştir. Denklem 4.2 deki ϕ faz kaymasını ifade etmektedir.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.1)$$

$$\phi = -\arctan(2\pi f RC) \quad (4.2)$$



Şekil 4. 2 : Alçak geçiren filtre devreleri pasif (a). aktif (b).



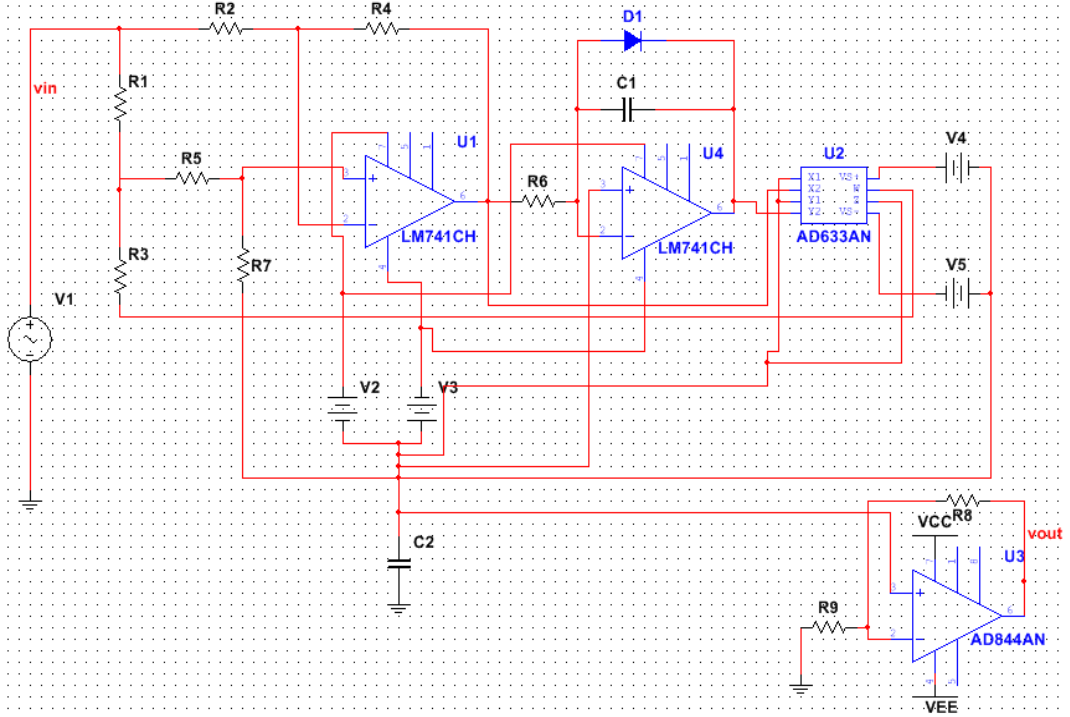
Şekil 4. 3 : Pasif alçak geçiren filtrenin frekansa bağlı kazanç eğrisi (Alkan, 2020)

Literatürde alçak geçiren filtreler hatrı sayılır miktarda incelenip makalelerde kendine yer bulmuştur. Dahası bu tez çalışmasının da konusu olan memristörlerle veya memristör emülatörleriyle tasarlanmış filtre devreleri son zamanlarda oldukça fazla çalışmaya konu olmuştur. Bunlardan biri Şahin ve Güler'in bir çalışması olan yüksek geçiren bir filtrenin memristör emülatörüyle tasarlanıp kazanç ve faz eğrilerinin incelenmesine yöneliktir (Şahin ve Guler, 2017). Bir diğer çalışmada ise Yener ve arkadaşları tarafından memristör tabanlı alçak ve yüksek geçiren filtre devreleri analiz edilip devrelerin frekans-zaman özellikleri, filtrelerin kazancı ve toplam harmonik bozulması incelenmiştir (Yener ve diğ, 2014). Vishnu ve arkadaşlarının çalışmasında ise yüksek geçişli, düşük geçişli ve bant geçişli filtrelerin simülasyonu, ayarlanabilir yük olarak gerilim eşiği uyarlamalı memristör (VTEAM) modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Vishnu ve diğ, 2016). Memristör tabanlı alçak geçiren filtre devrelerinin incelenip kesim frekansının kontrol edilebilirliği ise literatüre sunulmuş başka bir çalışmadır (Li, 2020). Alt bölümlerde, gerçekleştirilen emülatörler aktif alçak geçiren filtre devresinde standart direnç yerine kullanılacaktır. Filtre devresinin kazancı 2 olarak

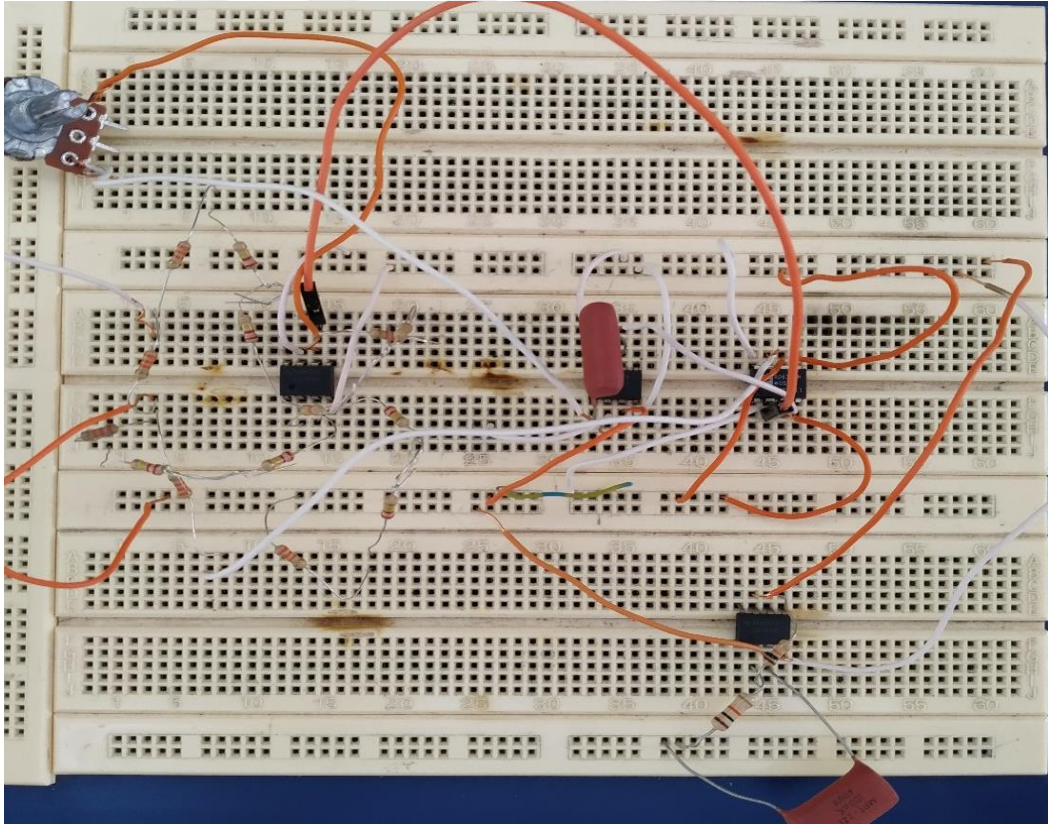
belirlenip emülatörlerin kullanıldığı tüm filtre devrelerinin kesim frekansı eşit olacak şekilde kondansatör değerleri ayarlanacaktır. Bir alçak geçiren filtreleme devresinin amacının belirli bir frekanstan sonraki sinyalleri bastırmaya yönelik olduğu parametresi göz önüne alınarak memristör emülatörlerinin standart dirence ve birbirlerine göre performans karşılaştırması yapılacaktır.

4.1.1 Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatörün filtre devresine etkisi

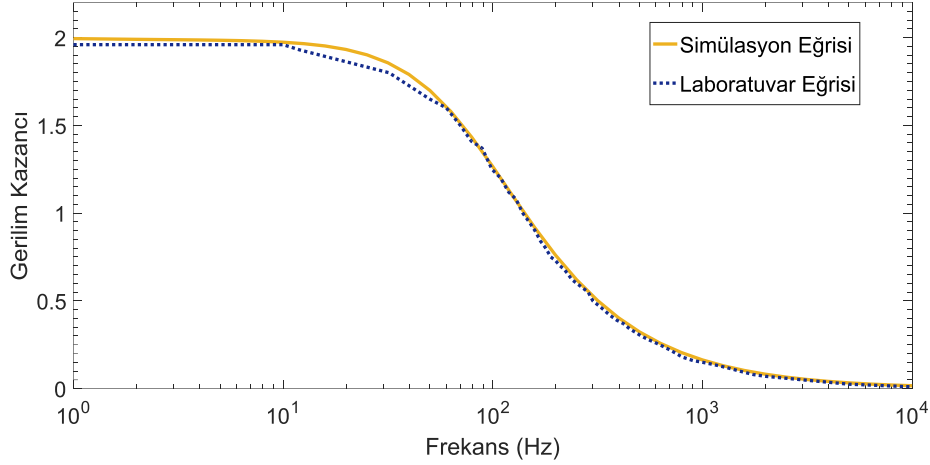
Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatör devresi memristif bir histerezis özelliğine sahip olmakla birlikte okul laboratuvarlarında öğrencilere öğretilmek amacıyla ulaşılabilir olmaya elverişli malzemelerle tasarlanması açısından pratik bir emülatör özelliği taşımaktadır (Mutlu ve Karakulak, 2010). Oluşturulan emülatör iki uçlu bir memristörü temsil ettiğinden aktif bir alçak geçiren filtre devresinde standart direncin yerine uygulanabilecektir. Gerçeklenen emülatör devresine göre $M = 24.49 \text{ k}\Omega$ olarak bulunduğundan devrenin kesim frekansı yaklaşık 79.58 Hz olarak alındığı takdirde üçüncü parametre olan kondansatörün kapasitans değeri denklem 4.1 e göre $C = 81.25 \text{ nF}$ olarak hesaplanmıştır. Alçak geçiren filtre devresinin gerilim kazanç oranı 2 olarak alınmıştır. Multisim programında filtre devresi simüle edilerek AC sweep analizi oluşturulmuştur. Memristörlü filtre devresinin simülasyonu şekilde verilmiştir (Şekil 4.4). Laboratuvar da gerçekleştirilen memristör emülatörünün memristans değeri $23.405 \text{ k}\Omega$ çıkmıştır; dolayısıyla aynı kesim frekansını ($f = 79.58 \text{ Hz}$) yakalamak için kondansatörün kapasitans değeri ise 85.45 nF olarak belirlenmiştir. Kurulan devrede kazancın yine 2 olacağı şekilde direnç değerleri ayarlanıp giriş ve çıkış voltajları incelenmiştir. Osiloskop ekranında doğrudan gerilim kazancı-frekans eğrisini görmek mümkün olmadığı için kazançla aynı değerde yani 2 olan çıkış gerilimi grafiğinden, 50 farklı frekans değerine karşılık gelen gerilim kazanç değeri hassas bir şekilde incelenip not edilmiştir. Elde edilen bu değerler Matlab programında çizdirilip gerekli gerilim kazancı-frekans grafiği elde edilmiştir. Laboratuvar da gerçekleştirilmiş devre şeması da aşağıdaki şekilde ayrıntılı olarak incelenmiştir (Şekil 4.5). Simüle edilen ve somutlanan devrelerin gerilim kazancı-frekans eğrileri şekilde verilmiştir (Şekil 4.6). Ulaşılan sonuçlara göre gerilim kazancı-frekans eğrisinde devrenin kesim frekansı olan 79.58 Hz değerinden sonra eğim artmaktadır. Bu da demektir ki devre kesim frekansından sonraki sinyalleri sönmölemeye çalışmıştır. Dolayısıyla alçak geçiren filtrenin gayesi olan belli bir frekanstan sonraki sinyalleri filtreleme yeteneği somutlaştırılmıştır. Son olarak standart dirençli RC filtre devresi ile memristif MC filtre devrelerinin karşılaştırılması bölüm 4.1.5'te verilecektir.



Şekil 4. 4 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması



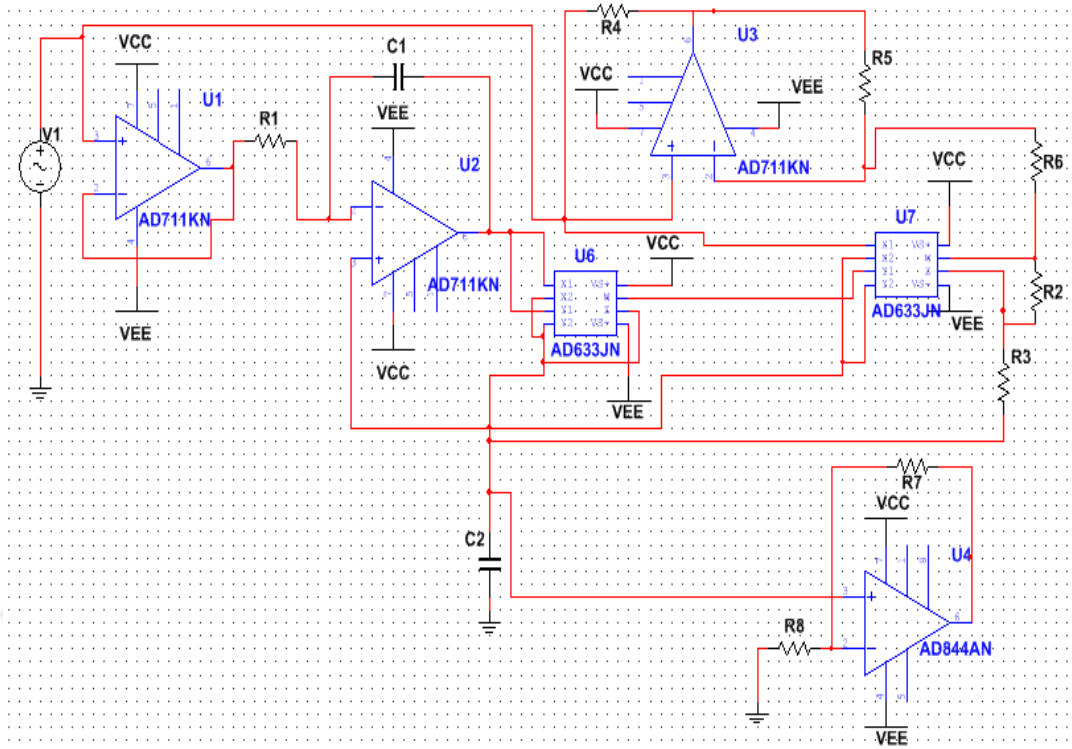
Şekil 4. 5 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü filtre devresinin gerçekleştirilmesi.



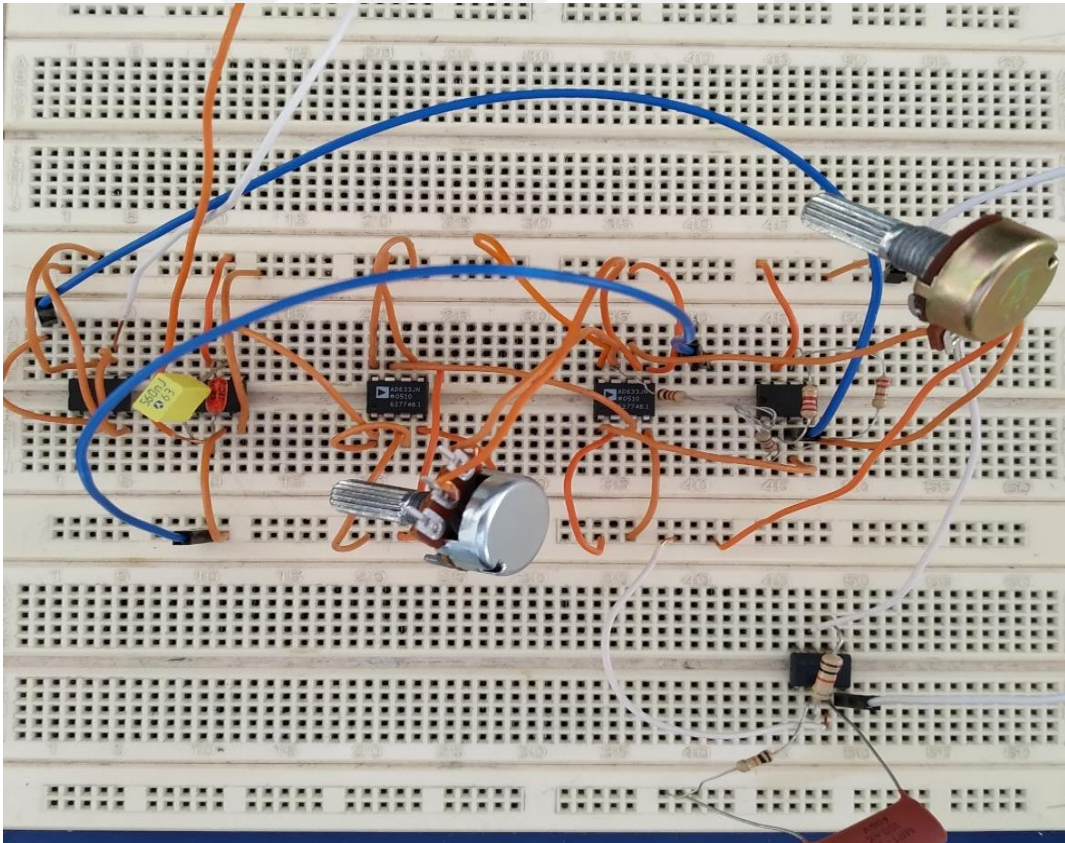
Şekil 4. 6 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.

4.1.2 Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörün filtre devresine etkisi

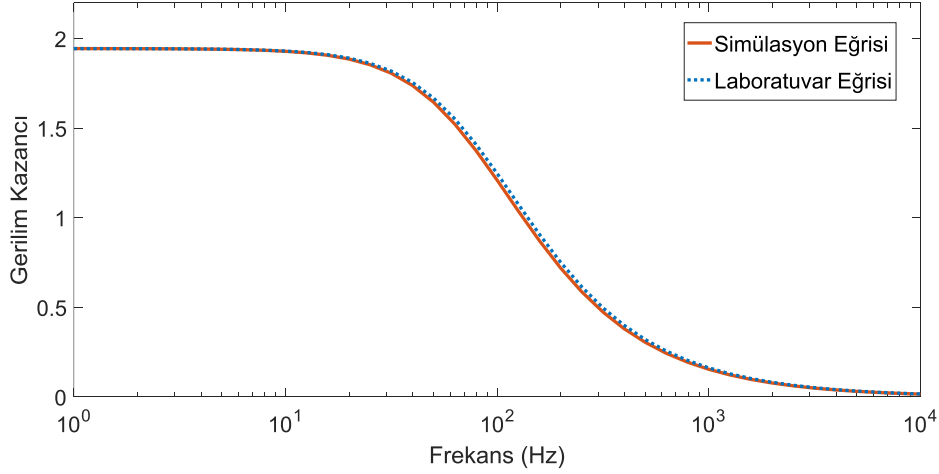
Aktif bir alçak geçiren filtre devresi tasarlanarak devrenin filtrelemeye etkisi olan standart direncin yerine Muthuswamy'nin tasarladığı bu memristör emülatörü kullanılmıştır (Muthuswamy, 2010). Emülatörün memristans değeri $M=25.23 \text{ k}\Omega$ olduğu dikkate alınır, bölüm 4.1.1. 'deki Mutlu ve Karakulak devresinin de kesim frekansı olan 79.58 Hz'lik bir frekansa sahip olması için, bu devrede 78.86 nF'lık bir kondansatör kullanılmıştır. Memristanslı alçak geçiren filtre devresinin simüle edilmiş devre şeması şekilde verilmiştir (Şekil 4.7). Emülatörün laboratuvar ortamında kurulması sonucundaki memristans değeri 20.5 k Ω olarak çıktığından ötürü diğer devrelerle aynı kesim frekansını yakalamak için kondansatör değeri 97.56 nF olarak seçilmiştir. Elde edilen 50 farklı frekans değerine karşılık gelen gerilim kazancı not edilerek Matlab programında çizdirilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen devre şeması ve devrelerin benzetim ve deneysel gerilim kazancı-frekans eğrileri sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Elde edilen eğrilere göre Muthuswamy emülatörünün gerilim kazancı yaklaşık olarak 2'dir. Hem simülasyonda hem de somutlanan devrede kesim frekansı olan 79.58 Hz'den sonra grafik önceki frekanslara nazaran daha dik bir eğimle sönümlenmeye meyillidir.



Şekil 4. 7 : Muthuswamy emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması.



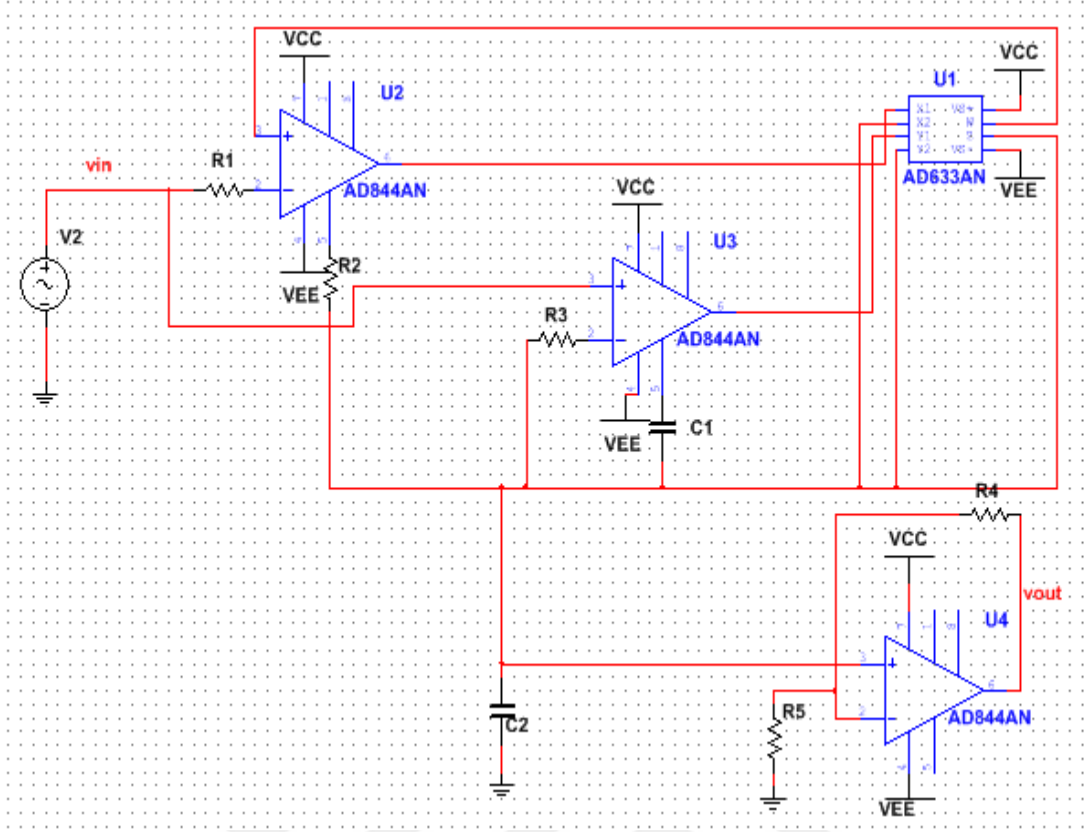
Şekil 4. 8 : Muthuswamy emülatörlü filtre devresinin gerçekleştirilmesi.



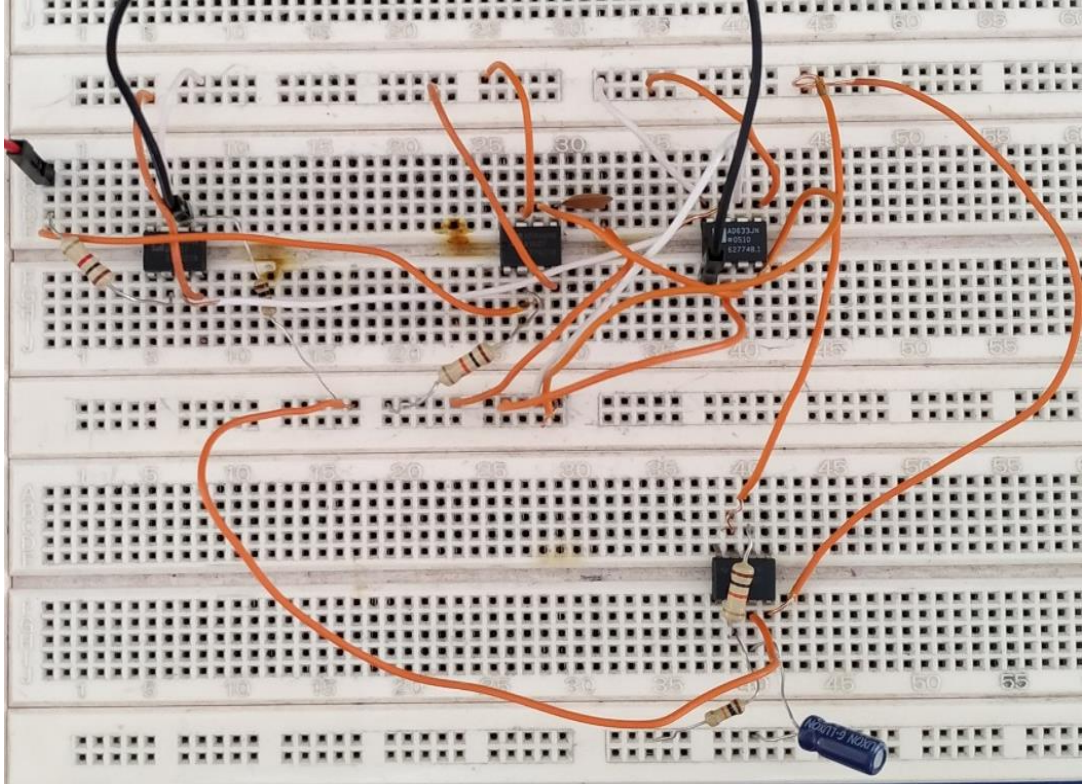
Şekil 4. 9 : Muthuswamy emülatörlü filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.

4.1.3 Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü emülatörün filtre devresine etkisi

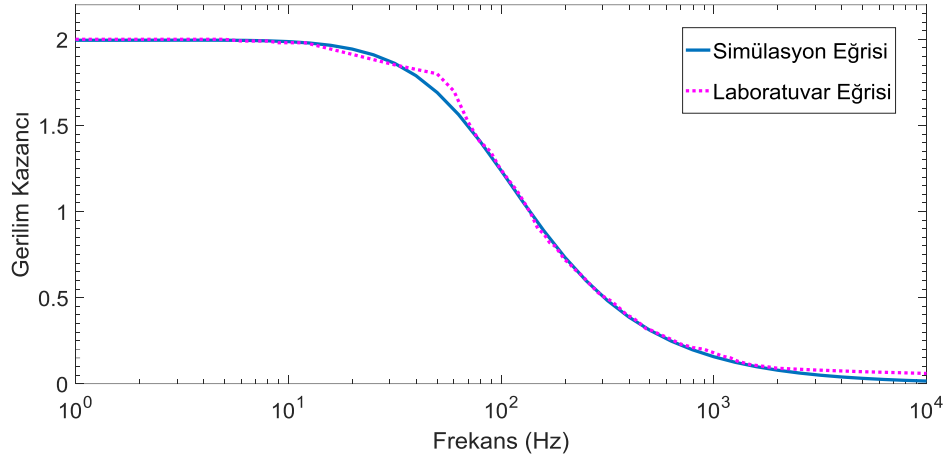
Alharbi ve arkadaşlarının önerdiği emülatör devresi gerilim kontrollü bir devredir (Alharbi ve diğ., 2016). Bu emülatör devresinin de memristif özelliklere sahip olduğu ve bir memristör taklitçisi olduğu deneyimlenmiştir. Dolayısıyla alçak geçiren filtre devresinde standart direnç yerine bu memristör emülatörünün kullanılabileceği aşıkardır. Emülatöre göre memristans değeri yaklaşık olarak 1.38 k Ω 'dur. Filtre devresinin kesim frekansı diğer devrelerde olduğu gibi 79.58 Hz alınmıştır. Bu kesim frekansının elde edilmesi için gereken kondansatör değeri ise 1.45 μ F olarak işleme alınmıştır. Gerilim kazancı 2 olarak belirlenip devrenin simülasyonu ve reel ortamda kurulmuş devre şeması sırasıyla şekillerde incelenmiştir (Şekil 4.10 ve Şekil 4.11) Gerçeklenen memristanslı aktif alçak geçiren filtre devresindeki memristans değeri de simülasyonla neredeyse aynı olduğundan (1.33 k Ω); 79.58 Hz'lik bir kesim frekansı için yaklaşık olarak simülasyondaki ile aynı değerde bir kondansatör kullanılmıştır. Laboratuvar da somutlanan devrenin gerilim kazancı-frekans eğrisi; sinyal jeneratöründen alınan gerilimin farklı frekans değerleri baz alınarak bu frekans değerlerine karşılık gelen gerilim değerleri not edilip bir grafik olarak Matlab programında çizdirilmiştir. Simüle edilen ve gerçekleşen devrelerin gerilim kazancı-frekans eğrileri aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.12). Elde edilen benzetim sonuçlarına ve deneysel sonuçlara göre kesim frekansından sonraki frekans değerlerinde sinyal oldukça iyi bir eğimle sönümlenmeye doğru giderek bu anlamda verimli bir eğri elde edilmiştir.



Şekil 4. 10 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması.



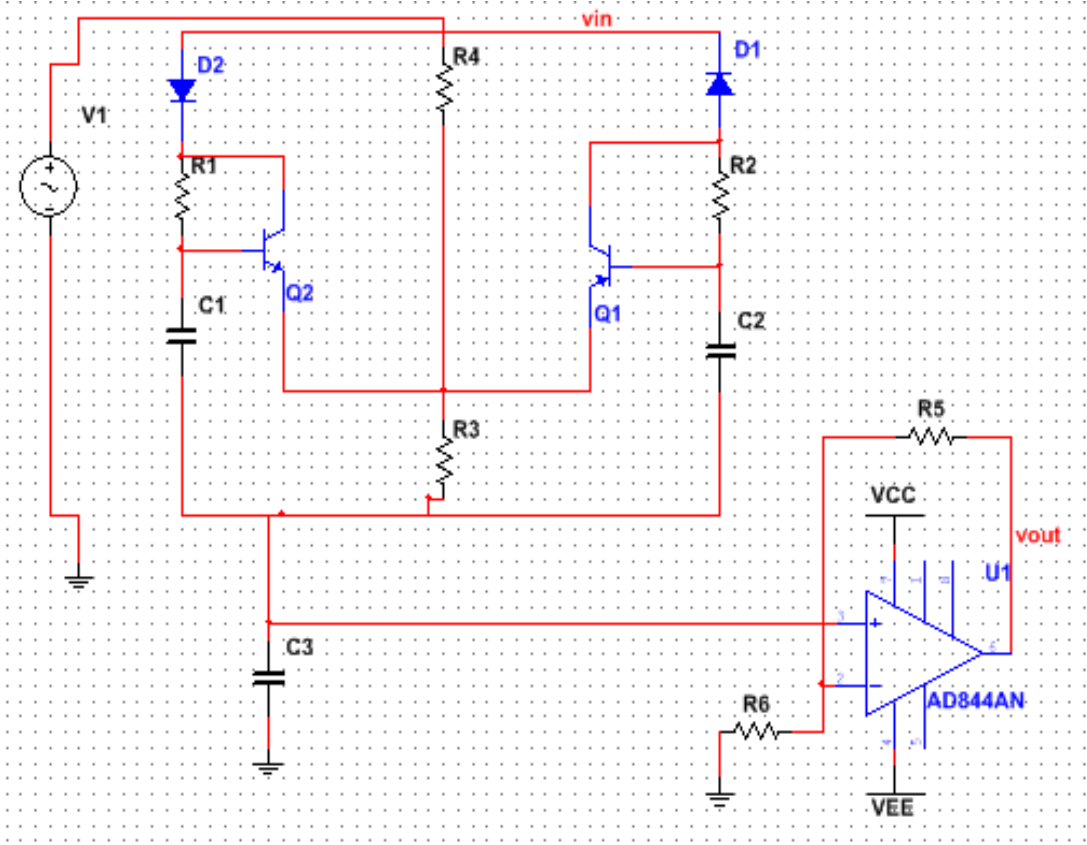
Şekil 4. 11 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü filtre devresinin gerçekleştirilmesi.



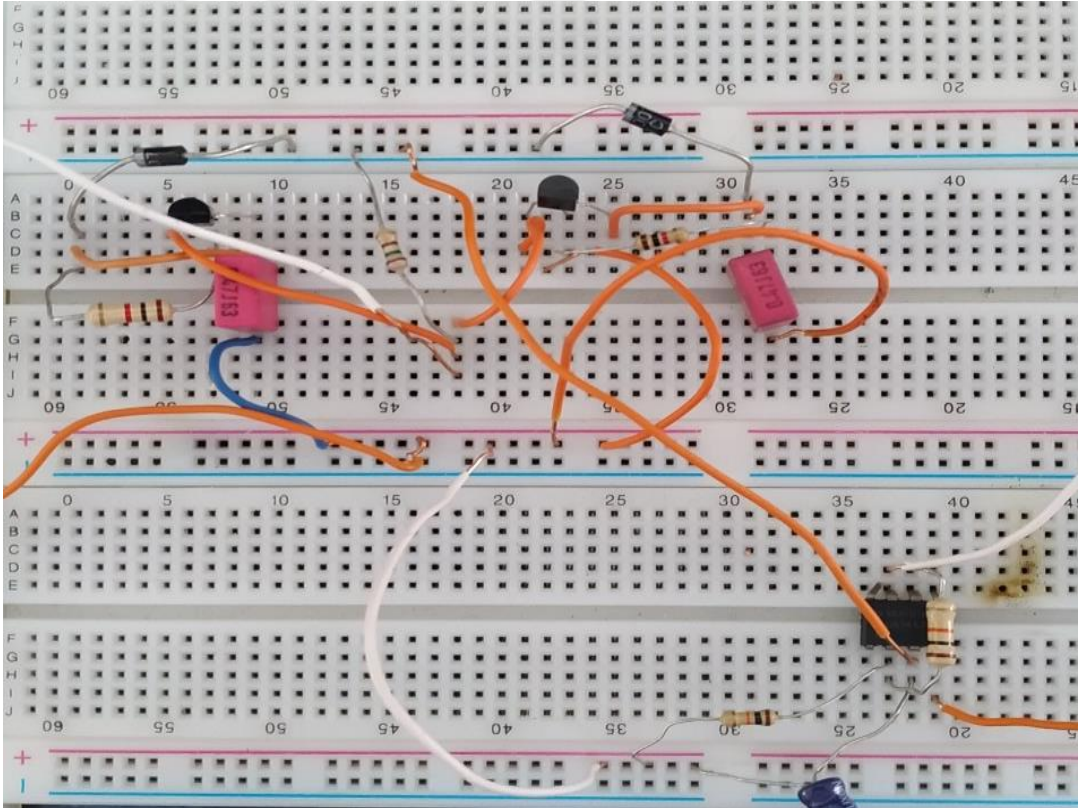
Şekil 4. 12 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü filtre devresinin filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.

4.1.4 Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörün filtre devresine etkisi

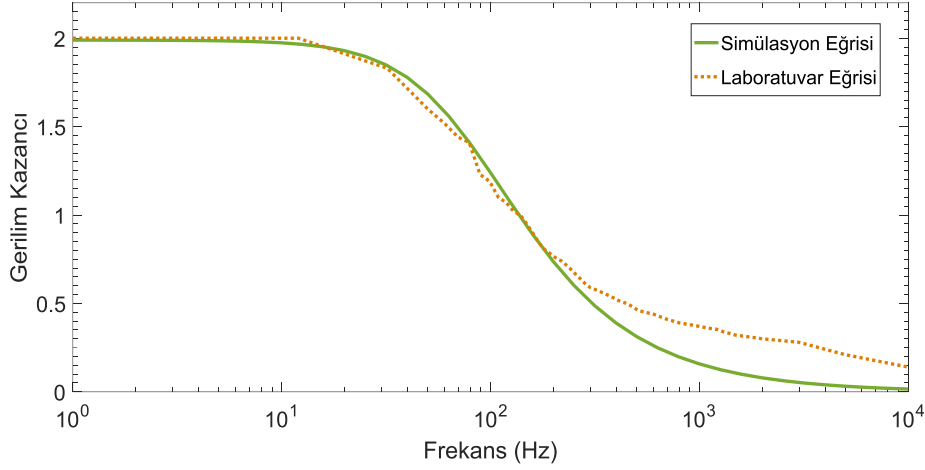
Ulaşılan bulgulara bakılarak bu memristör emülatöründen elde edilen memristans değeri yaklaşık olarak 161Ω 'dur. Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı bu emülatör devresi de üçüncü bölümde bahsi geçen diğer dört emülatör gibi alçak geçiren filtre devresinde standart direnç yerine kullanılmıştır (Kalomiros ve diğ, 2016). Devrenin filtreleme etkisi incelenmiştir. Kesim frekansının emsal teşkil etmesi gerektiğinden frekans 79.58 Hz olarak belirlenmiştir. Dahası frekansı belirleyen iki elemandan biri olan memristörün değeri de bilindiği için geriye kondansatör değerini saptamak kalmıştır. Denklem 4.1 dikkate alınarak kapasitans değeri $12.49 \mu F$ olarak belirlenmiştir. Memristif alçak geçiren filtre devresinin simülasyonu aşağıdaki şekilde incelenmiştir (Şekil 4.13). Daha sonra diğer memristif filtre devrelerinde olduğu gibi bu devre de laboratuvar da gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde memristansı 186Ω iken tüm devreler için de geçerli olan kesim frekansını sağlamak için gerekli kapasitans değeri ise $10.75 \mu F$ seçilmiştir. Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörlü alçak geçiren filtre devresinin deneysel şeması şekilde verilmiştir (Şekil 4.14). Osiloskoptan tek tek alınmış frekansa karşı gerilim değerlerinin grafiksel eğrisi ve simüle edilen devreden alınmış gerilim kazancı-frekans eğrisi ise aşağıda verilmiştir (Şekil 4.15). Hem simülasyonun hem de laboratuvar da oluşturulmuş devrenin gerilim kazancı- frekans eğrisinin eğiminin kesim frekansından yüksek değerlerde oldukça arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 13 : Kalomirov ve diğ emülatörlü filtre devresinin simülasyon şeması.



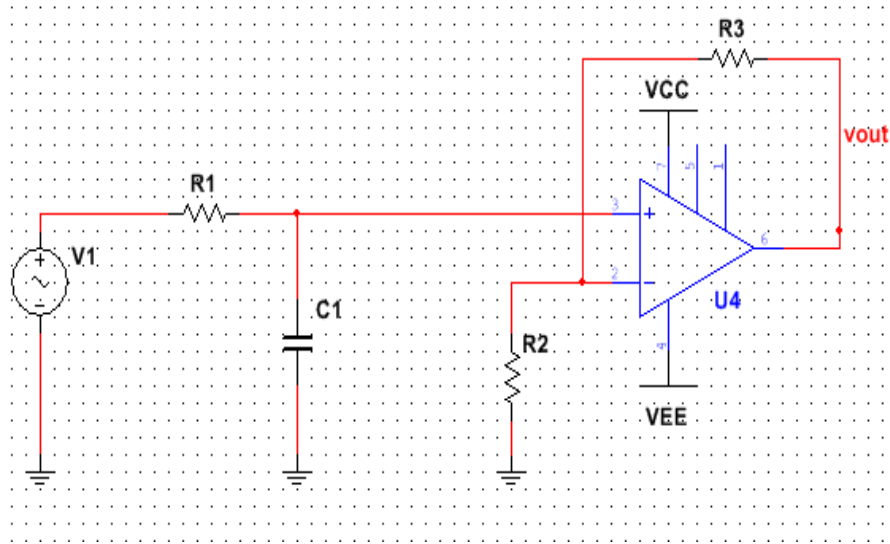
Şekil 4. 14 : Kalomirov ve diğ emülatörlü filtre devresinin gerçekleştirilmesi.



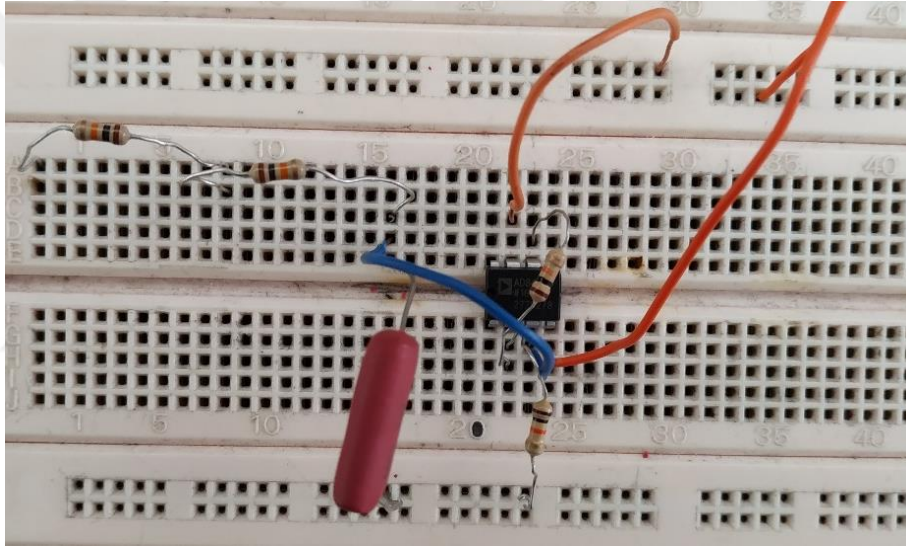
Şekil 4.15 : Kalomiros ve diğ emülatörlü filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.

4.1.5 Standart direncin filtre devresine etkisi

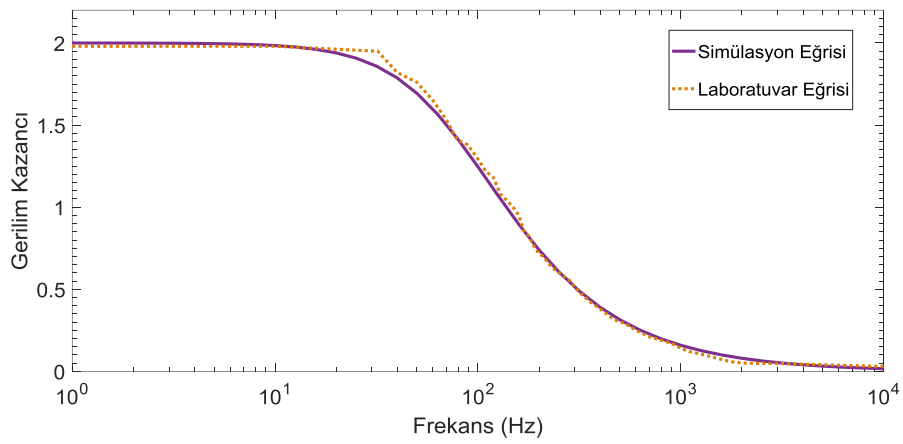
İncelenen dört farklı memristif filtre devresine müteakiben devrelerin performans karşılaştırmasını daha belirgin yapabilmeye yönelik olarak aynı kesim frekansında standart direnç ve kondansatör kullanılan bir aktif alçak geçiren filtre devresi tasarlanmıştır. Bu devrede direnç değeri 20 k Ω , kondansatör değeri ise 100 nF olarak belirlenmiştir. Böylelikle istenilen kesim frekansı olan 79.58 Hz'e ulaşılmıştır. Simüle edilen devre şeması şekilde verilmiştir (Şekil 4.16). Devre, aynı direnç ve kondansatör değeri kullanılarak laboratuvar ortamında somutlanmıştır. Laboratuvarda kurulan standart dirençli aktif alçak geçiren filtre devresinin şeması ise aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.17). Laboratuvardan elde edilen değerlerle çizdirilmiş gerilim kazancı-frekans eğrisi ve simüle edilmiş gerilim kazancı-frekans eğrisi tek grafikte aşağıdaki şekillerde incelenmiştir (Şekil 4.18). Şekilden de anlaşılabacağı üzere kesim frekansından sonra devrenin gerilim kazancı, umulduğu gibi, daha hızlı bir düşüş yaşamıştır. Bu bölümde bahsedilen dört tanesi memristif bir tanesi ise standart dirençli olan toplam beş tane alçak geçiren filtre devresinin simülasyonu tek grafikte verilmiştir (Şekil 4.19) . Bir diğer şekilde ise bu beş devrenin laboratuvar sonuçlarından elde edilen grafiklerin toplu çizdirilmiş hali mevcuttur (Şekil 4.20). Her iki şekilden de anlaşılabacağı üzere devrelerin gerilim kazancı-frekans eğrilerinin benzetim ve deneysel sonuçları büyük oranda örtüşmektedir. Hem rezistif-memristif devrelerin hem de memristif-memristif devrelerin amaçlanan filtreleme yeteneği bakımından performans karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Kimi memristif filtre devreleri, kesim frekansından sonraki sinyalleri bastırmak adına, rezistif filtre devresine göre daha iyi performans sergilemiştir. Bunlara örnek olarak Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü emülatör devresi ve Kalomiros ve arkadaşlarının tasarladığı emülatör devresi verilebilir.



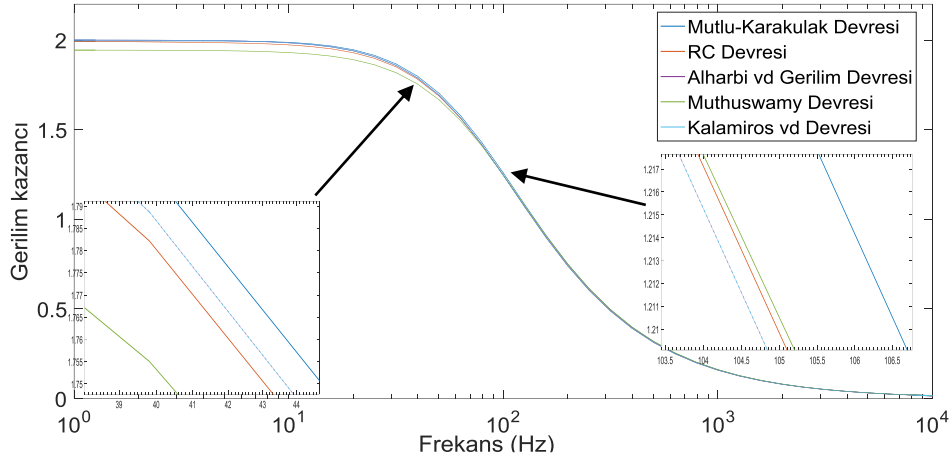
Şekil 4. 16 : Standart RC alçak geçiren filtre devresinin simülasyon şeması.



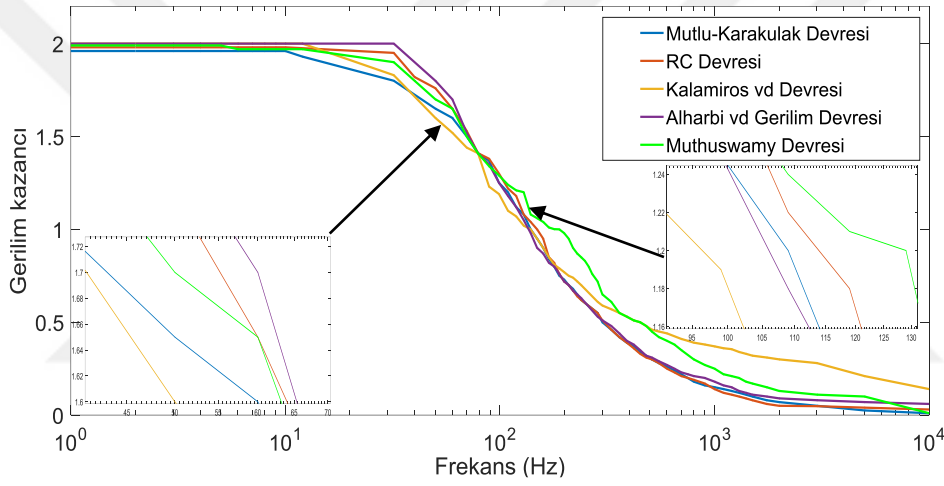
Şekil 4. 17 : Standart RC alçak geçiren filtre devresinin gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 18 : Standart RC filtre devresinin gerilim kazancı-frekans eğrisi.



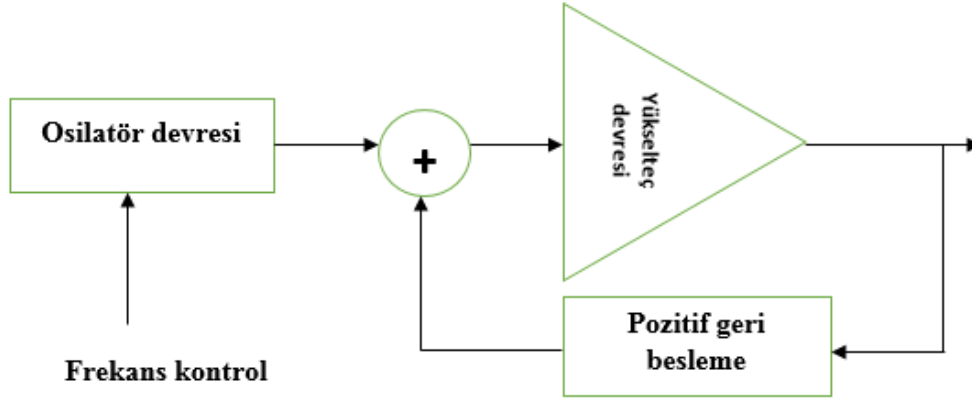
Şekil 4. 19 : Tüm devrelerin gerilim kazancı-frekans eğrisi simülasyon sonuçları.



Şekil 4. 20 : Tüm devrelerin gerilim kazancı-frekans eğrisi laboratuvar sonuçları.

4.2 Osilatör Devrelerinin Özellikleri ve Memristör Emülatörlerinin Faz Kaydıran Osilatördeki Performans Karşılaştırması

Zaman içerisinde yönü ve şiddeti belli bir düzen içerisinde değişen yani belli bir periyoda sahip olan elektrik sinyallerine osilasyon denir. Osilatörler; elektronik devrelerde belli frekanslarda kare, üçgen, sinüs veya testere dişi şeklinde elektrik sinyalleri üreten, geri beslemeli amplifikatör devreleridir (<https://www.elektrikrehberiniz.com>, 2019). Diğer bir ifade ile kendi kendine sinyal üretebilen elektronik elemana “osilatör” denir. Bir osilatör devresinin meydana getirdiği sinyallerin veya osilasyonların devam edebilmesi için birtakım özelliklerin sağlanması gerekir. Bunlar; şekilden de görüldüğü üzere sinyali yükseltme, pozitif geri besleme ve frekansa bağımlı olma özellikleridir (Şekil 4.21).



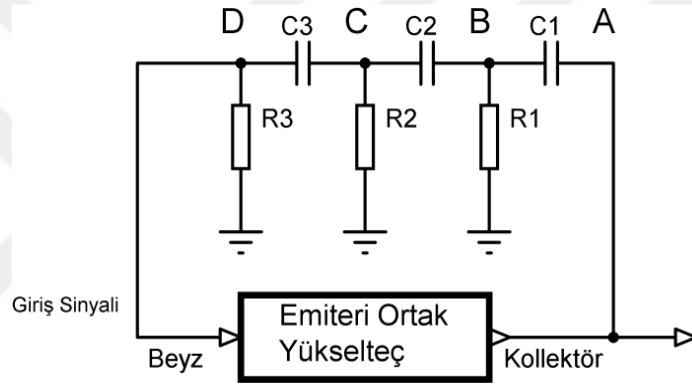
Şekil 4. 21 : Osilatör devresi blok şeması.

Osilatör çeşitleri, sinüzoidal osilatörler (harmonik osilatör) ve sinüzoidal olmayan (gevşeme osilatörü) osilatörler olmak üzere iki gruba ayrılır. İlk grubun adından da anlaşılacağı gibi devrenin çıkışında sinüzoidal dalga üreten osilatörlere sinüzoidal yani harmonik osilatör denir. Devre çıkışında kare, üçgen, testere dişi, dikdörtgen sinyaller elde edilen osilatörlere ise sinüzoidal olmayan yani gevşeme osilatörü adı verilmektedir.

Literatürde farklı özel isimlere sahip osilatör devreleri bulunmaktadır. LC Armstrong osilatör, colpits osilatör, hartley osilatör, RC faz kaymalı osilatör, wien köprü osilatör, clapp osilatörü, gecikmeli hat osilatörü, pierce osilatörü (kristal), vačkář osilatörü, opto-elektronik osilatör bu devrelere örnek olarak verilebilir. Literatürde osilatör devrelerinde memristiflik konusu da işlenmiştir. Bir çalışmada wien köprü osilatöründe dirençlerin yerine memristörler kullanılarak Matlab-simscape ortamında güç tüketiminin minimizasyonuna bağlı performans incelemeleri yapılmıştır (Ghosal ve Mohanty, 2015) Bir diğer çalışmada ise memristör emülatörü kullanılarak wien köprü osilatöründe kaotik sinyaller incelenmiştir (Abuelma'atti ve Khalifa). Benzer olarak memristör tabanlı kolpitts devreleri de bir başka çalışmanın konusu olmuştur (Deng ve Wang, 2017). Memristör tabanlı RC faz kaydırıcı ve kolpits osilatörünün voltaja bağlı olarak değişen osilasyon frekansı konusu ise başka bir çalışmada ele alınmıştır (Anand ve diğ, 2019). Bir memristör emülatörünün tasarımı ve farklı elektronik devrelere ve Chua osilatörüne uygulanışı da yapılan akademik çalışmalar arasındadır (Ranjan ve diğ, 2019). Bu tez çalışmasında ise osilatör devrelerinden faz kaydırıcı osilatör devresi kullanılarak analizler yapılacaktır.

Bu tez çalışmasında RC faz kaydırmalı osilatör devresi kullanılacağından devre ayrı olarak açıklanmıştır. Genel olarak alçak frekanslı osilatör tiplerinde frekans tespit edici devre için

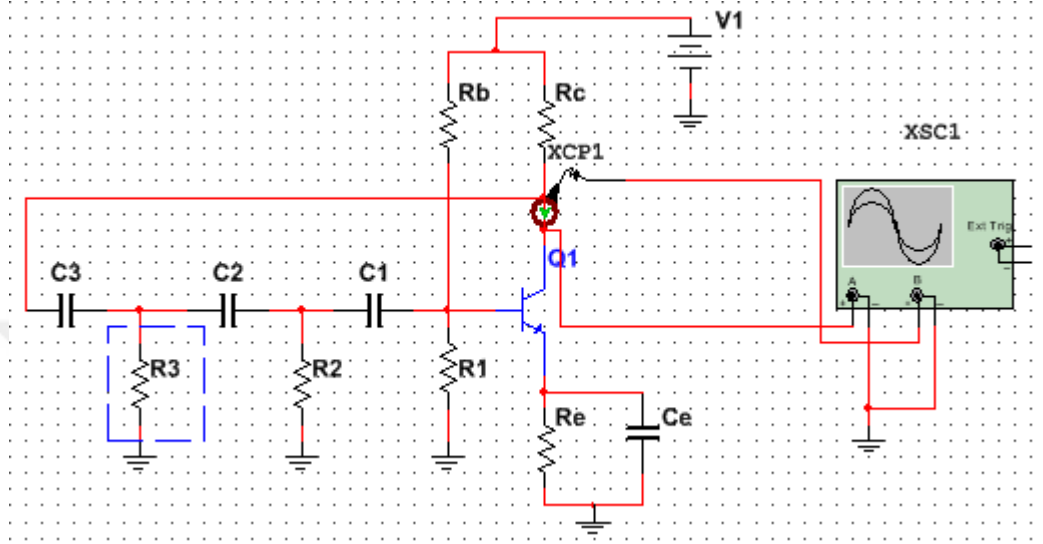
direnç ve kondansatörler kullanılıp bu osilatör tiplerine “RC Osilatör” denilmektedir. Bu osilatörler, 20 Hz – 20 kHz arasındaki ses frekans sahasında geniş uygulama alanına sahiptir. Blok diyagramdaki emiteri ortak yükselteç devresinin, A noktasındaki kollektör sinyali ile beyz üzerindeki sinyaller arasında 180° faz farkı vardır. C_1 kondansatörü üzerinden R_1 direnci üzerine sinyal uygulandığında yaklaşık 60° olan bir faz kayması oluşur ve fazda kayma meydana geldiği için genlikte de bir miktar azalma olup B noktasındaki sinyal C_2 üzerinden R_2 'ye uygulanır ve böylece yaklaşık 120° lik bir faz kayma meydana gelir, genlikte de azalma olup son olarak C noktasındaki sinyal C_3 üzerinden D noktasındaki R_3 'e uygulanırken 180° faz kaydırma gerçekleşir (MEB, 2012) (Şekil 4.22). Üç adet RC devresinin her biri yaklaşık 60° faz kaydırıp toplam 180° lik faz kaydırılmış olur. D noktasındaki sinyal, transistörün beyzine uygulanan pozitif geri besleme sinyalidir.



Şekil 4. 22 : RC osilatör blok diyagramı

Transistörlü RC faz kaydırıcı devrede ise C_1 - R_1 , C_2 - R_2 , C_3 - R_3 frekans belirleyici elemanlar ve fazı çeviren kısımdır (Şekil 4.23). R_E emiter direnci, C_E by-pass kondansatörü, R_C ise kollektör yük direnci olup geri beslemedeki genlik kontrolünü sağlar. Transistörlü faz kaydırıcı devrenin osilasyon frekansı her bir direnç-kondansatör çiftinin eşit olarak alındığı durumda denklem 4.3 teki gibidir. Fakat direnç-kondansatör çiftinin eşit olarak alınmadığı durumlarda ise çevre akımları yöntemi kullanılarak çeşitli işlemler sonucunda denklem 4.4 teki gibi bir osilasyon frekansı formülize edilmiştir. Denklemde R_1 , R_2 , R_3 ve R_C dirençleri, C ise eşit değerde alınan kondansatörü ifade eder. Alt bölümlerde faz kaydırıcı osilatör devresinde, faz kaydırmayı belirleyen standart dirençlerden birinin yerine dört farklı memristör emülatörü tek tek uygulanacaktır. Kullanılacak olan faz kaydırıcı osilatör devresi aşağıdaki şekilde verilmiş olup R_3 direnci üzerinden işlemler yapılacaktır (Şekil 4.23). Her bir devre farklı memristans değerine sahip olduğundan osilatör devresinde ilkin farklı memristör emülatörleri denenecek ve daha sonra bu dört emülatörün memristans değerine

eşit dört tane rezistans değeri ele alınarak faz kaydırıcı devreye uygulanacaktır. Toplamda sekiz adet olan bu osilatör devrelerinin osilasyon frekanslarının formülizasyon çıkarımı yapılacaktır. Son olarak her bir devrenin çıkış akım ve gerilim değerleri ölçülerek denklem 4.5 e göre harcadıkları güçler hesaplanacaktır. Ulaşılan nihai sonuçlar alt bölümlerde ayrıca incelenecektir.



Şekil 4.23 : Faz kaydırıcı osilatör devresinin simülasyon şeması

$$f = \frac{1}{2\pi RC \sqrt{6 + 4 \frac{R_C}{R}}} \quad (4.3)$$

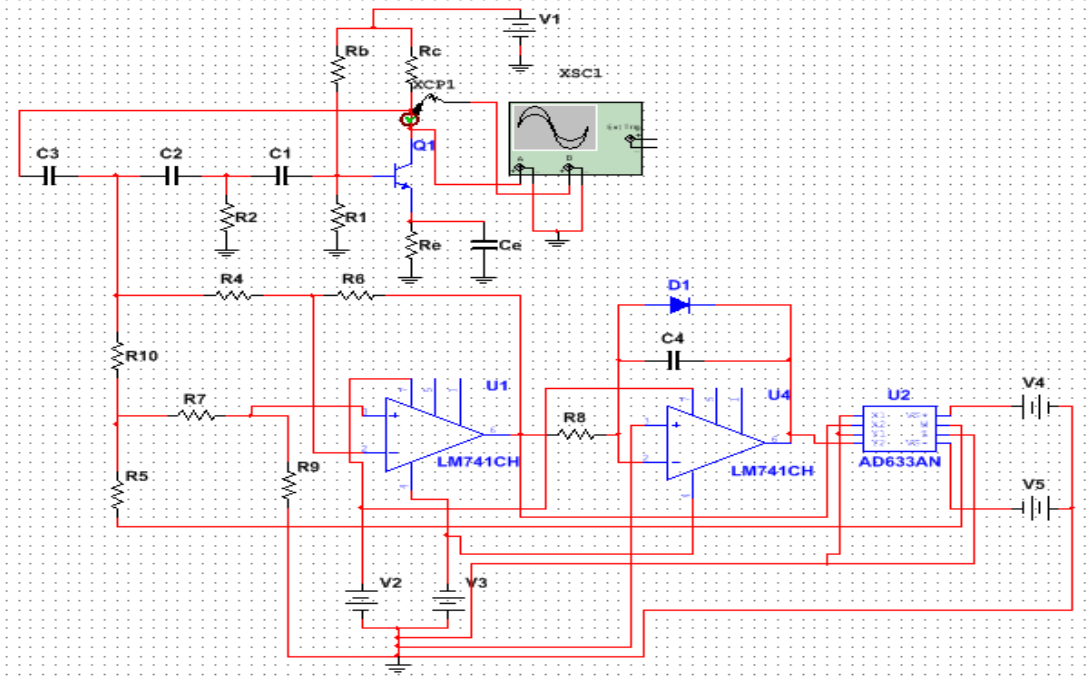
$$f_c = \frac{1}{2\pi C \sqrt{2R_1R_3 + R_2R_3 + R_3R_C + 3R_1R_2 + 2R_2R_C + R_1R_C}} \quad (4.4)$$

$$P = I \times V \quad (4.5)$$

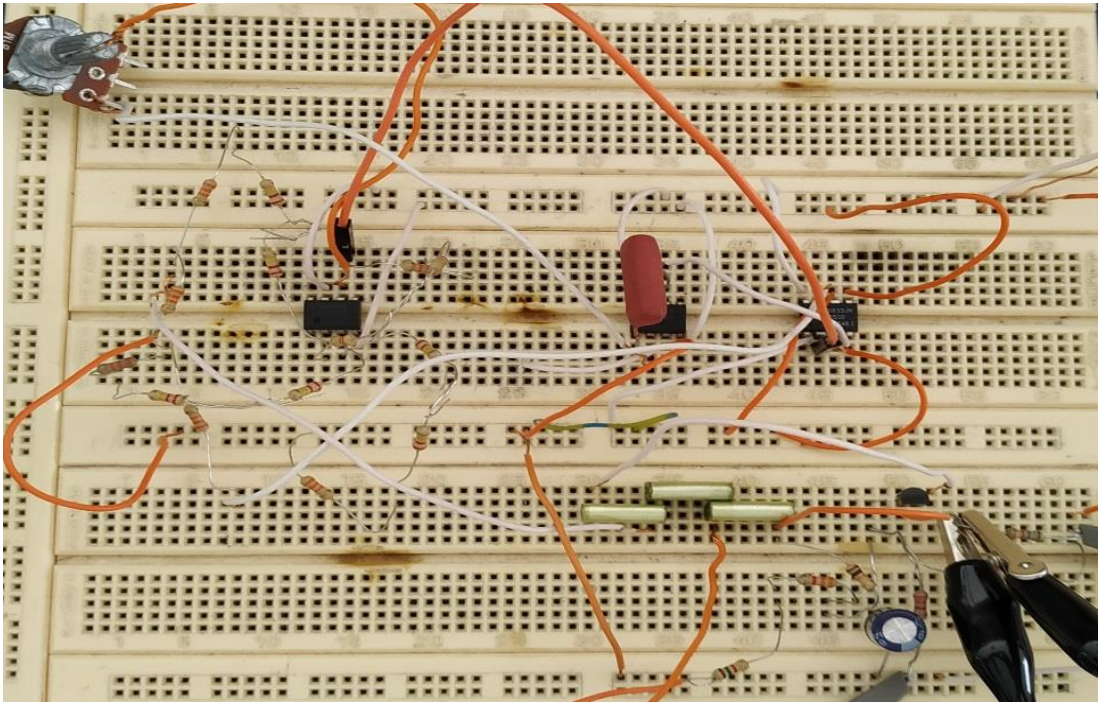
4.2.1 Standart dirençli ve Mutlu-Karakulak'ın tasarladığı emülatörlü osilatör karşılaştırması

Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı bu emülatör devresinin uygulama adımına üçüncü bölümde değinilmiştir (Mutlu ve Karakulak, 2010). Emülatörün kullanılacağı transistörlü faz kaydırıcı osilatör devresi ise bölüm 4.2 de ayrıntılarıyla işlenmiştir. Osilatör devresinde faz kaydırmasını sağlayan üç adet direnç- kondansatör çifti bulunmaktadır. Memristör emülatörü ise bu standart dirençlerden R_3 direnci yerine devreye müdahil olmuştur. Simüle edilmiş ve laboratuvarında gerçekleştirilmiş memristif devre şemaları sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.24 ve Şekil 4.25). Bu şekilde hem memristif faz kaydırıcı hem de memristans değerine eşit rezistansa sahip rezistif faz kaydırıcı osilatör devrelerinin ilkin osilasyon frekansı belirlenmiştir. Faz kaydırıcı devrenin çıkışta harcadığı güç önce

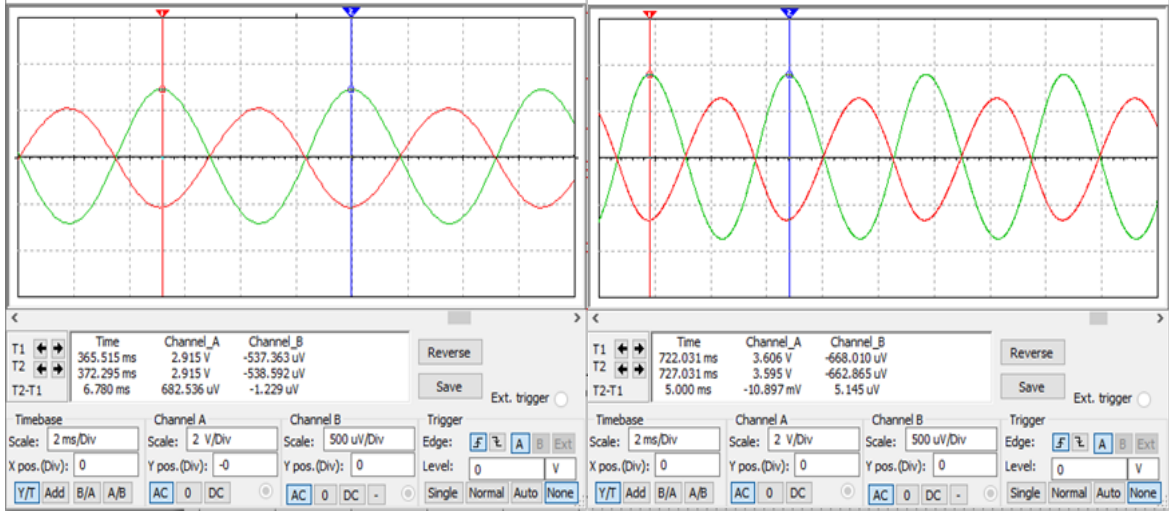
simülasyon olarak daha sonra ise laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir. Devrede harcanan gücü temsil eden çıkış akım ve gerilim sinyallerinin rezistif ve memristif karşılaştırılmasının benzetim ve deneysel sonuçları sırasıyla aşağıdaki şekillerde incelenmiştir (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27). Böylelikle rezistif ve memristif faz kaydırıcı osilatör devrelerinin çıkışta harcadıkları güç belirlenmiştir.



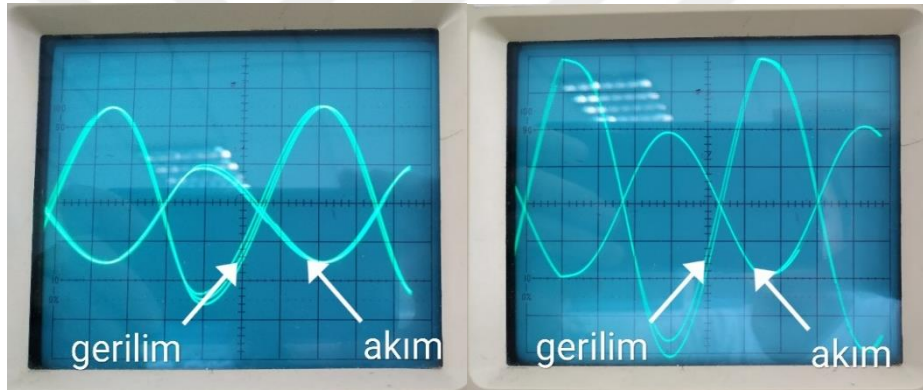
Şekil 4. 24 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.



Şekil 4. 25 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 26 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim(yeşil) değerleri.



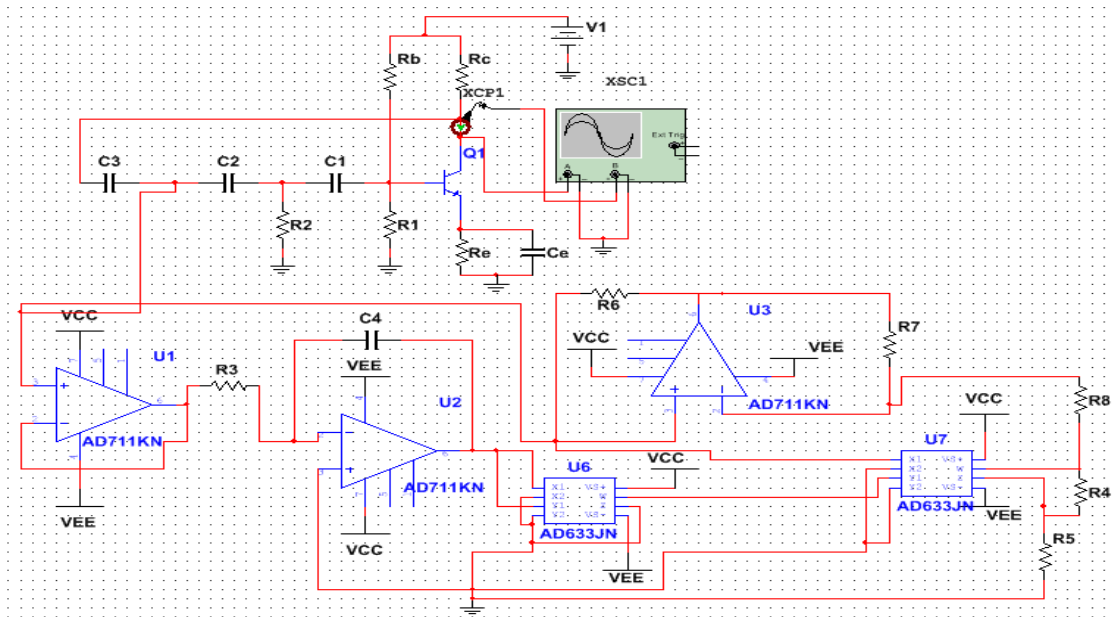
Şekil 4. 27 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin laboratuvarında ölçülen akım- gerilim değerleri.

Şekilde verilen memristif faz kaydırıcı osilatör devresinin çıkış akımı değeri $537 \mu A$, çıkış gerilim değeri ise $2.915 V$ 'tur (Şekil 4.26). Böylelikle denklem 4.5 te verilen güç formülizasyonuna dayanılarak devrenin çıkışta harcadığı güç $1.522 mW$ olarak belirlenmiştir. Devre çıkışındaki akım ve gerilim değerleri verilmiş olup faz kaydırıcı devrenin özelliğinden mütevellit 180° faz farkına sahiptir. İkinci olarak R_3 direnci yerine uygulanan $24.485 k\Omega$ 'luk standart dirençli faz kaydırıcı da aynı şekil üzerinde verilmiştir (Şekil 4.26). İncelenen standart dirençli osilatör devresinin ise çıkış akımı $668 \mu A$, çıkış gerilimi $3.6 V$ olarak görülmüştür. Dolayısıyla devrede harcanan güç denklem 4.5 e göre $2.315 mW$ olarak gözlemlenmiştir. Laboratuvarında uygulanmış memristif ve rezistif faz kaydırıcı osilatörlerin çıkış gerilim ve akım değerleri ise yukarıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.27). Memristif devrenin çıkış gerilim değeri $2.5 V$; çıkış akımı değeri ise $504 \mu A$ olarak

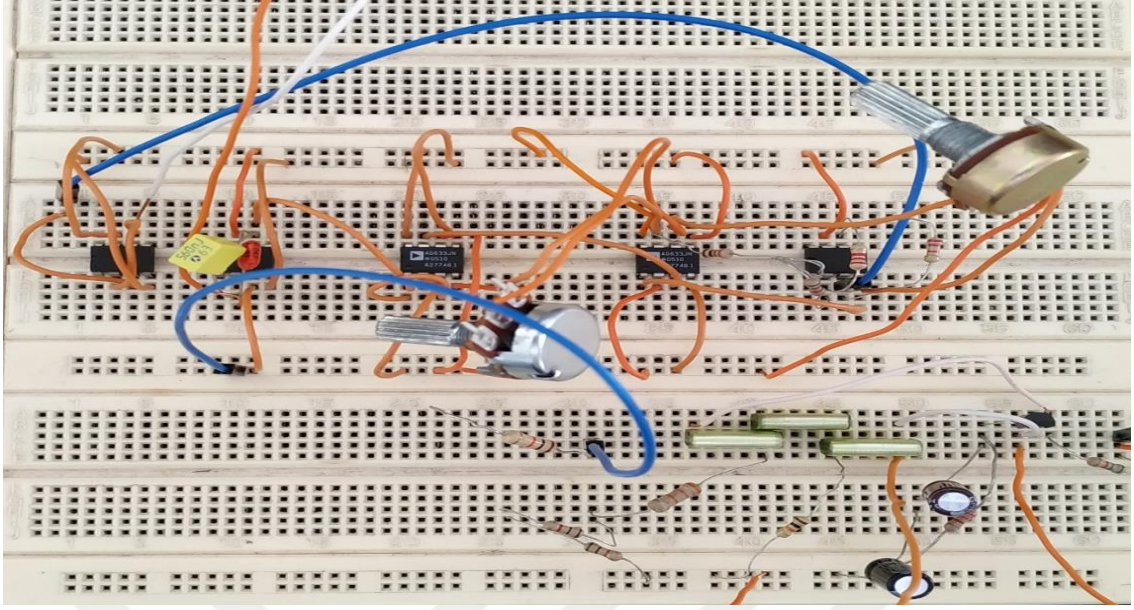
ölçülmüştür. Dolayısıyla devrede harcanan güç 1.3mW olarak hesaplanmıştır. Standart dirençli osilatörün laboratuvarda oluşturulmuş gerilim değeri ise 3.8 V olup çıkış akımı değeri de $750\mu\text{A}$ olarak ölçülmüştür. Devrede harcanan güç 2.85mW olarak bulunmuştur. Simülasyon ile laboratuvar ölçümlerinde küçük bir miktar farklılık görülmesinin yanında her iki sonucun da büyük oranda örtüştüğü aşıkardır. Umumi sonuca bakılacak olunursa Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı memristör emülatörlü osilatör devresi standart dirençli osilatör devresine göre daha az güç tüketmiştir. Bu nedenle güç tüketiminin minimizasyonuna bağlı olarak Mutlu ve Karakulak emülatörünün kullanıldığı memristif faz kaydırıcı osilatör; standart direncin kullanıldığı rezistif faz kaydırıcı osilatöre göre daha avantajlıdır.

4.2.2 Standart dirençli ve Muthuswamy'nin tasarladığı emülatörlü osilatör karşılaştırması

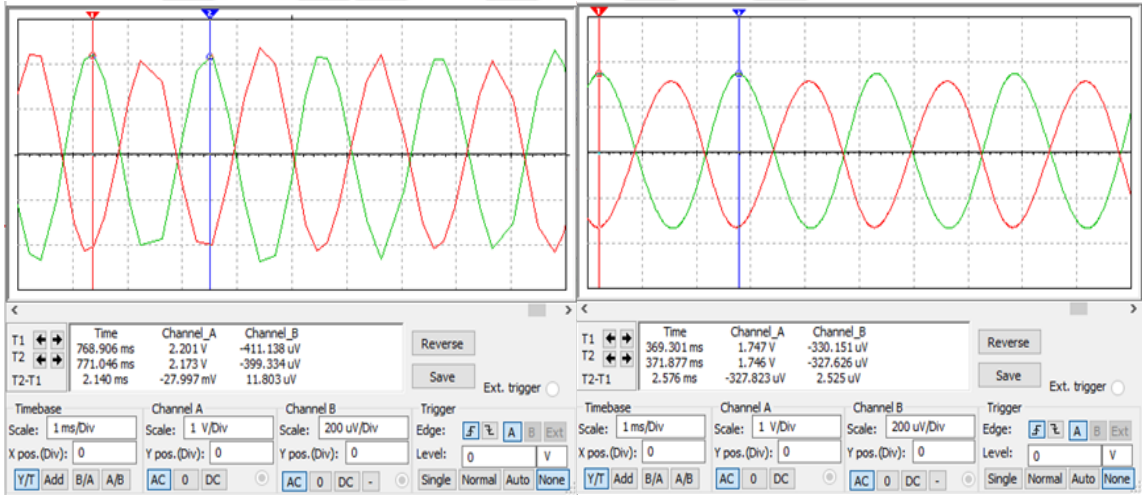
Brathway Muthuswamy'nin literatüre sunduğu bu memristör emülatörünün gerçekleşmesi ve devre hakkındaki ayrıntılı bilgiler bölüm üçte verilmiştir (Muthuswamy, 2010). Bu emülatör de benzer olarak bir RC faz kaydırıcı osilatör devresinde standart direnç yerine devreye müdahil olmuş ve bu durumun osilatör üzerindeki etkilerine değinilmiştir. Ek olarak karşılaştırma yapabilmek adına osilatör devresi standart dirençle de kurulup devrenin osilasyon frekansı ve çıkışta tükettiği güç incelenmiştir. Memristif faz kaydırıcı devrenin simülasyon şeması ve deneysel görüntüsü sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.28 ve Şekil 4.29). Rezistif ve memristif osilatör devrelerinin harcadığı gücü bulmaya yönelik olan akım gerilim sinyallerinin simülasyon sonuçları ve laboratuvar sonuçları ise sırasıyla aşağıdaki şekillerde incelenmiştir (Şekil 4.30 ve Şekil 4.31).



Şekil 4. 28 : Muthuswamy emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.



Şekil 4. 29 : Muthuswamy emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 30 : Muthuswamy emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim(yeşil) değerleri.

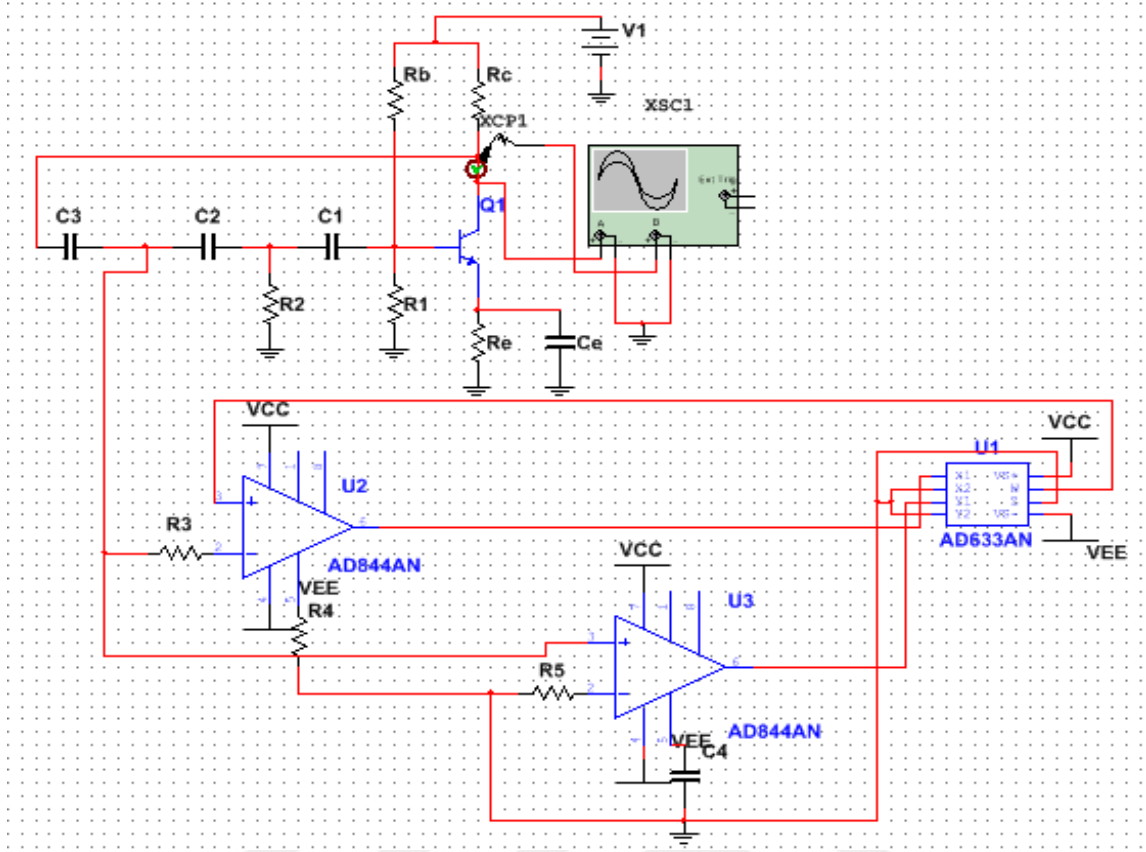


Şekil 4. 31 : Muthuswamy emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin ölçülen akım- gerilim değerleri.

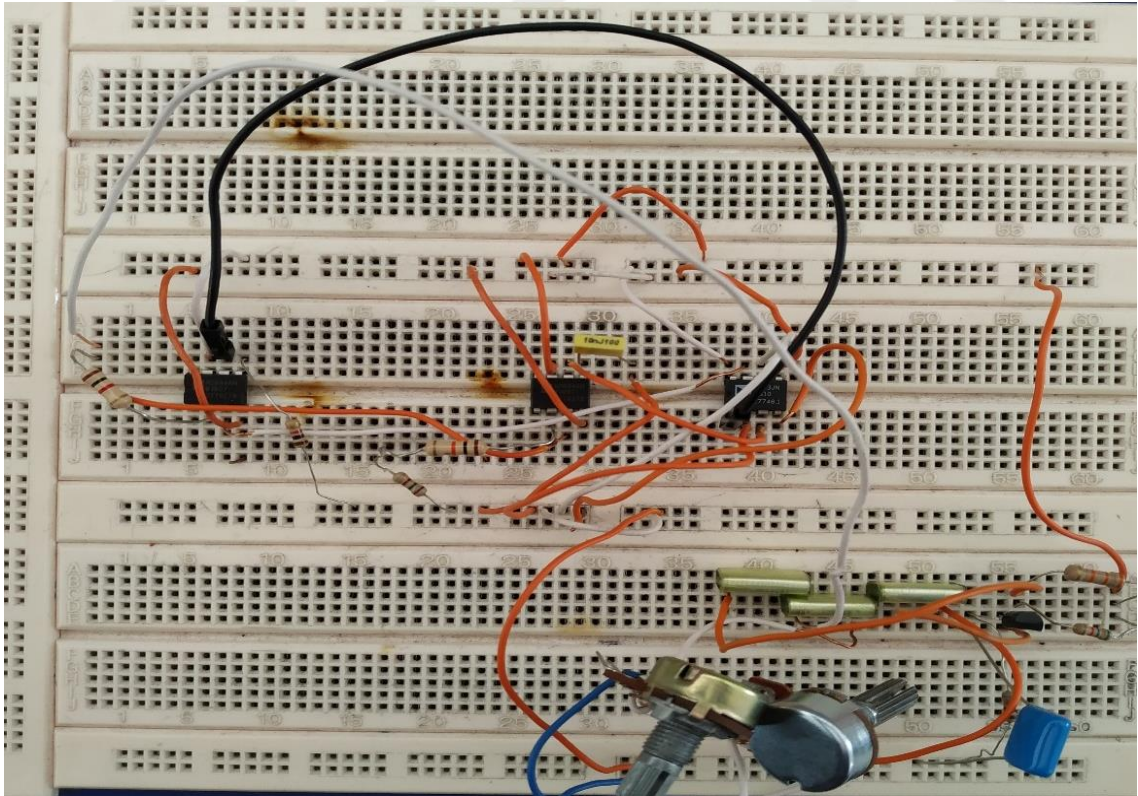
Simülasyon sonuçlarına göre osilatör devresinin çıkış gerilimi 2.201 V olurken çıkış akımı ise 432 μ A'dır. Gerilim ve akımın çarpımından elde edilen çıkış gücü ise 0.950 mW'tır. Devre osilasyon sağlamakta olup akım ve gerilim eğrileri arasında 180° faz farkı bulunmaktadır. Standart direnç kullanılan devrenin osilasyon frekansı, akım ve gerilim grafikleri incelenmiştir. Devrenin çıkışta tükettiği gerilim 1.75 V olup çıkışta harcanan akım ise 315 μ A'dır. Sonuç olarak devrede harcanan çıkış gücü 0.55 mW olarak hesaplanmıştır. Verilen laboratuvar sonuçlarına göre ise memristif osilatör devresinin çıkış gerilimi değeri simülasyondakiyle eşit olarak 2.2 V olarak ölçülmüştür. Akım değeri ise 435 μ A olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla memristif osilatörün harcadığı güç 0.957mW'tır. Laboratuvarda gerçekleştirilen rezistif osilatör devresinin çıkış gerilimi 2.2V; çıkış akımı ise 434 μ A'dır. Harcanan çıkış gücü ise 0.954mW'tır. Rezistif devrenin simülasyon ve laboratuvar sonuçlarında reelde kullanılan malzemelerin tolerans değerleri, ölçüm aletlerinin iç dirençleri ve iç frekanslarından ötürü bir miktar farklılık görülse de memristif devrenin simülasyon grafiği ve somutlanmış grafiği örtüşmüştür. Güç tüketimine bağlı olan değerlendirme göz önüne alınırsa Muthuswamy memristör emülatörü kullanılan osilatör devresinin çıkış gücü standart direnç kullanılan devrenin harcadığı güce göre daha fazladır.

4.2.3 Standart dirençli ve Alharbi vd gerilim kontrollü emülatörlü osilatör karşılaştırması

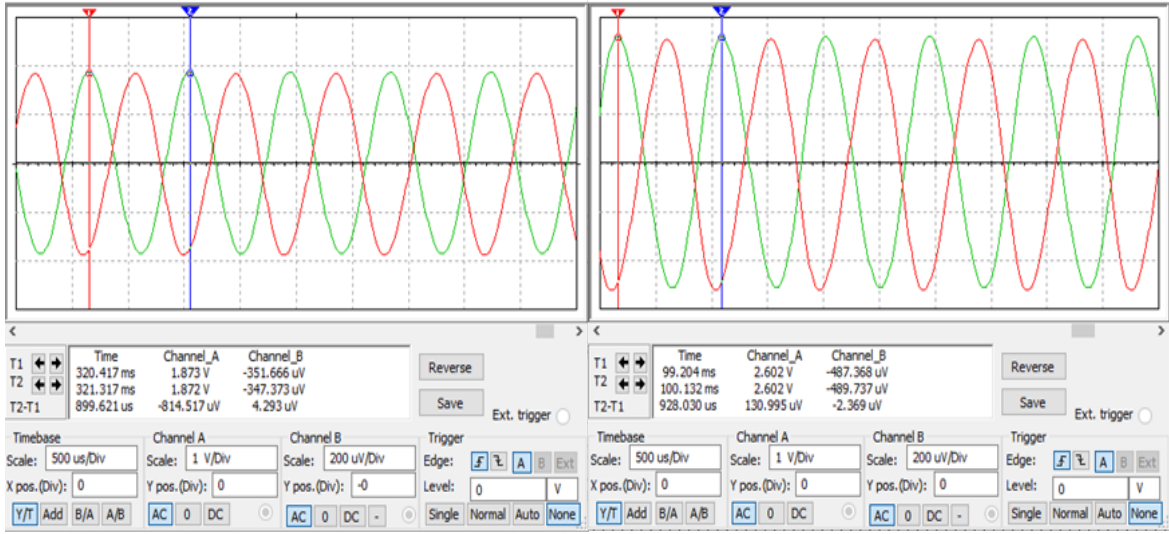
Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü olan bu memristör emülatör devresi hakkında ayrıntılı bilgiler bölüm üçte verilmiştir (Alharbi ve diğ, 2016). Emülatörün sahip olduğu memristans değeri yaklaşık olarak 1.38 k Ω 'dur. Bu bölümde ise diğer memristör emülatörlerinde olduğu gibi Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı emülatör de faz kaydırıcı osilatörde standart direnç yerine kullanılarak devreye etkileri incelenmiştir. Emülatörün sahip olduğu memristans değerine eşit rezistans değerindeki ($R= 1.38 \text{ k}\Omega$) bir standart direnç aynı osilatör devresinde kullanılıp devreye olan etkileri gözlemlenmiştir. Her iki devrenin de osilasyon frekansı, çıkış gerilimi, çıkış akımı ve çıkış gücü incelenmiştir. Memristif osilatör devresinin simülasyon şeması ve laboratuvarda kurulmuş şeması sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.32 ve Şekil 4.33). Memristif ve rezistif osilatör devrelerinin akım-gerilim işaretlerinin simülasyon grafikleri ve laboratuvarda elde edilmiş ölçüm grafikleri ise yine aşağıda verilmiştir (Şekil 4.34 ve Şekil 4.35).



Şekil 4. 32 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.



Şekil 4. 33 : Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 34: Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim(yeşil) değerleri.



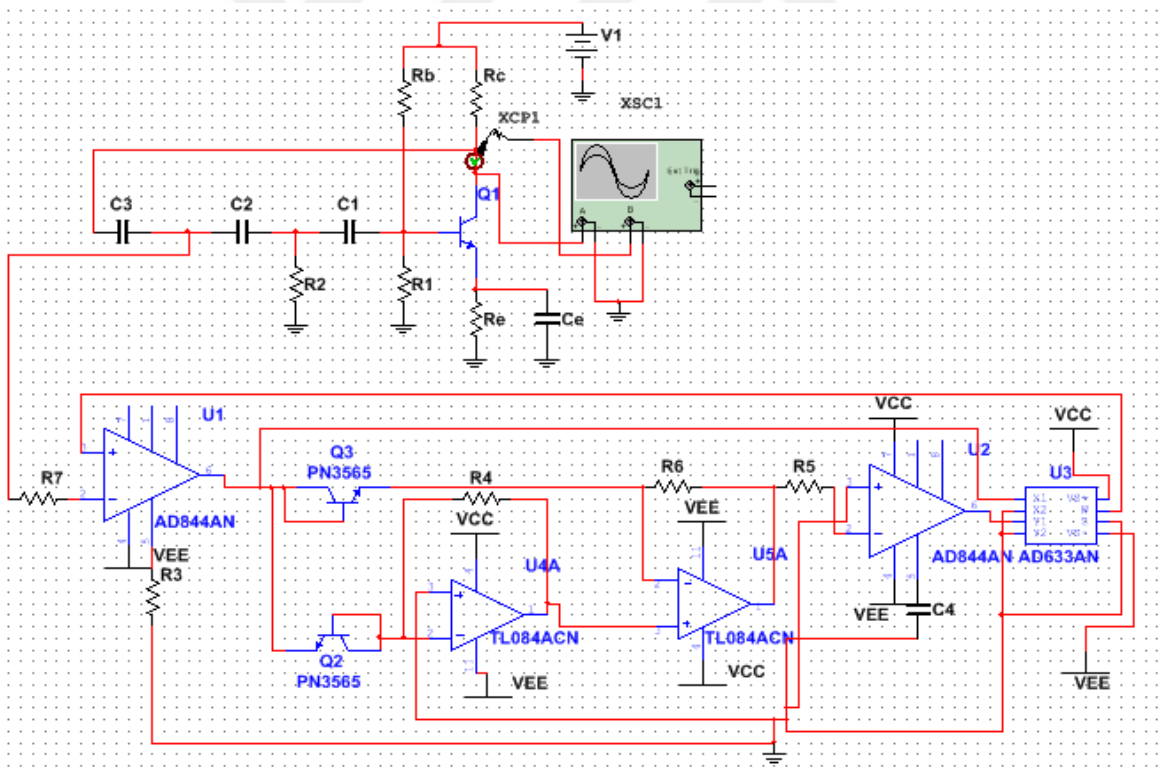
Şekil 4. 35 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin ölçülen akım- gerilim değerleri.

Simüle edilmiş devrelerden ulaşılan sonuçlara göre memristif devrenin çıkış gerilimi 1.873V olup çıkış akımı ise 370 μ A'dır. Tabiatıyla bu iki değerden elde edilen çıkış gücü 0.693 mW olarak bulunmuştur. Devrede elzem olan bir özellik olarak akım ve gerilim arasında 180°'lik bir faz farkı da mevcuttur. Simüle edilen rezistif osilatör devresinin çıkışında harcanan akım ve gerilim değerleri sırasıyla 508 μ A ve 2.601 V olarak görülmüştür. Bu değerlere bağlı olarak tüketilen güç değeri ise 1.321 mW'tır. Laboratuvarda gerçekleştirilmiş memristif devrenin gerilim değeri 1.7 V olup akım değeri de 335 μ A'dır. Devrede harcanan güç 0.570 mW olarak hesaplanmıştır. Rezistif devrenin laboratuvarda ölçülen gerilim ve akım değerleri ise sırasıyla 2.5 V ve 520 μ A olarak bulunup güç değeri ise 1.3 mW civarında hesaplanmıştır. Grafiklerden alınan veriler ışığında benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar büyük oranda örtüşmektedir. Performans karşılaştırılması yapılan

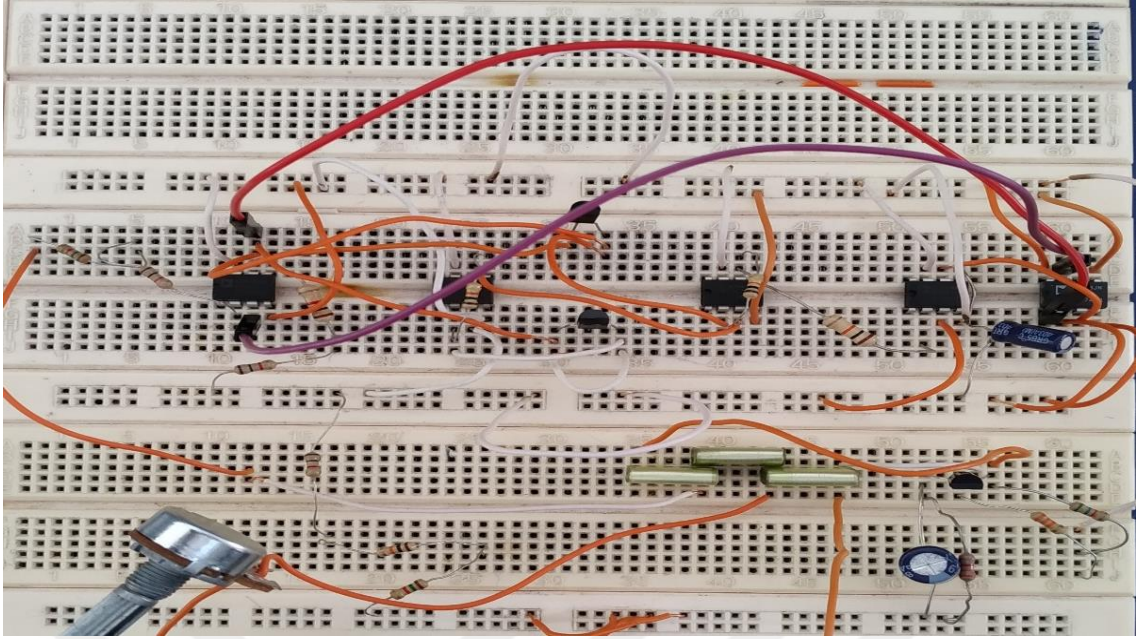
Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı emülatörlü memristif osilatör devresi ile standart dirençli rezistif osilatör devresi harcanan güç tüketimi baz alınarak incelenmiştir. Sonuç olarak memristif devrenin güç tüketiminin bariz bir şekilde daha az olduğu kanısına varılıp memristif devrenin ilgili konu bakımından daha avantajlı olduğu görülmüştür.

4.2.4 Standart dirençli ve Alharbi vd akım kontrollü emülatörlü osilatör karşılaştırması

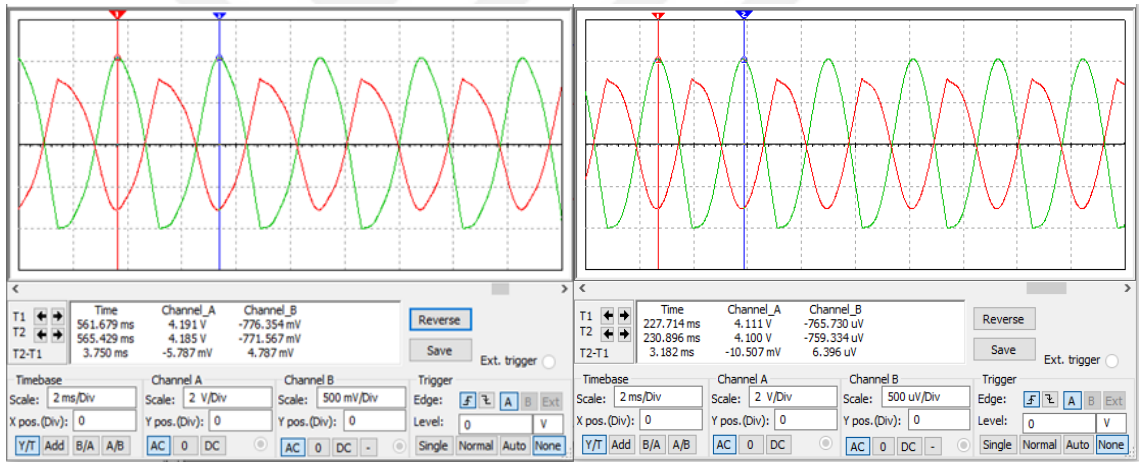
Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı bir diğer memristör emülatörü olan bu devre akım kontrollüdür (Alharbi ve diğ, 2015). Emülatör devresi üstte belirtilen diğer üç emülatör gibi standart direnç yerine osilatör devresinde kullanılmıştır. Daha sonra memristör emülatörü devreden çıkarılıp aynı değerinde bir lineer direnç devreye alınmıştır. Bu şekilde memristif ve rezistif olan iki farklı tipteki faz kaydırıcı osilatörün performans karşılaştırması hem simüle edilmiş hem de gerçekleşmiştir (Şekil 4.36 ve Şekil 4.37). Simüle edilmiş ve laboratuvarında gerçekleşmiş rezistif-memristif osilatör devrelerinin akım-gerilim sinyalleri sırasıyla aşağıdaki şekillerde incelenmiştir (Şekil 4.38 ve Şekil 4.39).



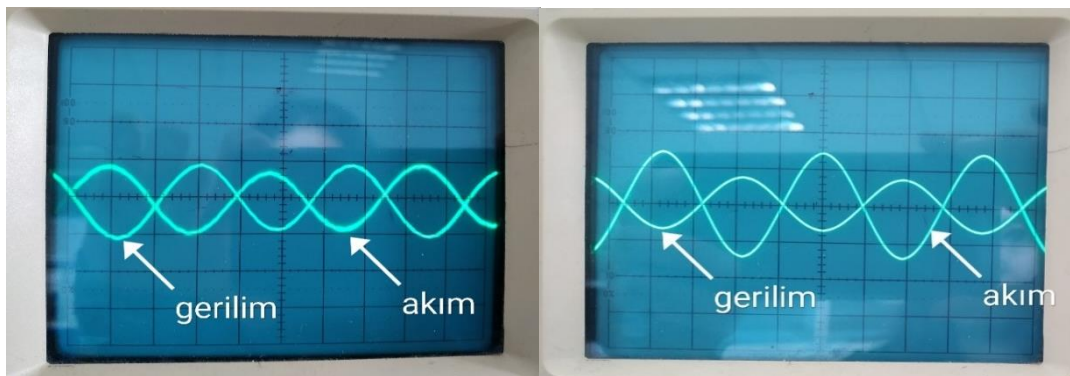
Şekil 4. 36 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün simülasyon şeması.



Şekil 4. 37 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü faz kaydırıcı osilatörün gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 38 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin akım (kırmızı)- gerilim (yeşil) değerleri.



Şekil 4. 39 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü (solda) ve standart dirençli (sağda) osilatörlerin ölçülen akım- gerilim değerleri.

Simülasyon grafiklerinden ulaşılan verilere göre memristif devrenin çıkış akımı 781 μA olup çıkış gerilimi ise 4.191 V'tur. Akım ve gerilimin çarpımından elde edilen çıkış gücü ise 3.273mW olarak hesaplanmıştır. Faz kaydırıcı devrenin özelliği olarak Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü emülatörlü osilatör devresinde de gerilim ve akım arasında 180° faz farkı mevcuttur. Rezistif osilatör devresinin simülasyonundan ulaşılan verilere göre bu osilatörün çıkış akımı 791 μA ve çıkış gerilimi 4.111V olarak gözlemlenmiştir. Bu bilgiler ışığında elde edilen diğer bir parametre ise tüketilen gücün 3.252 mW olmasıdır. Laboratuvarında elde edilen grafiklerden görüldüğü üzere memristif devrenin çıkış akımı ve gerilim değerleri sırasıyla 750 μA ve 4.2 V iken rezistif devrenin çıkış akım ve gerilim değerleri sırasıyla 4V ve 750 μA civarında ölçülmüştür. Dolayısıyla memristif osilatörün çıkış gücü 3.15 mW iken rezistif osilatörün çıkış gücü ise 3 mW olarak hesaplanmıştır. Devrede harcanan gücün minimizasyonuna bağlı olarak burdaki karşılaştırmada rezistif osilatör, memristif osilatöre göre çok küçük bir farkla daha avantajlı görülmektedir.

Dört farklı memristör emülatörüyle tasarlanmış faz kaydırıcı osilatör devresi ve bunların ohm (Ω) değeri olarak muadili olan dört farklı standart dirençle tasarlanmış faz kaydırıcı osilatör devresi gerek simülasyonda gerekse laboratuvar ortamında incelenmiştir. Her bir devrenin osilasyon frekansı, faz evirmesi ve tüketilen güç değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre faz kaydırıcı osilatör devresinde standart direnç yerine kimi memristör emülatörlerini kullanmak güç tüketimi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Sonuçların daha net anlaşılabilmesi için benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir (Çizelge 1 ve Çizelge 2).

Çizelge 1 : Simüle edilmiş osilatör devrelerinin; frekans, gerilim, akım ve güç değerleri.

Osilatör Devreleri	Frekans (Hz)	Gerilim (V)	Akım (μA)	Güç (mW)
Mutlu ve diğ emülatörlü osilatör (M=24.49 k Ω)	148	2.905	524	1.522
Mutlu ve diğ emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=24.49 k Ω)	200	3.606	642	2.315
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü osilatör (M=1.383 k Ω)	1111	1.873	370	0.693
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=1.383 k Ω)	1077	2.601	508	1.321
Muthuswamy emülatörlü osilatör (M=25.23k Ω)	467	2.201	432	0.950
Muthuswamy emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=25.23k Ω)	388	1.747	315	0.551
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü osilatör (M=2.5 k Ω)	266	4.191	781	3.273
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=2.5 k Ω)	314	4.111	791	3.252

Çizelge 2 : Laboratuvarda deneyimlenmiş osilatör devrelerinin; frekans, gerilim, akım ve güç değerleri.

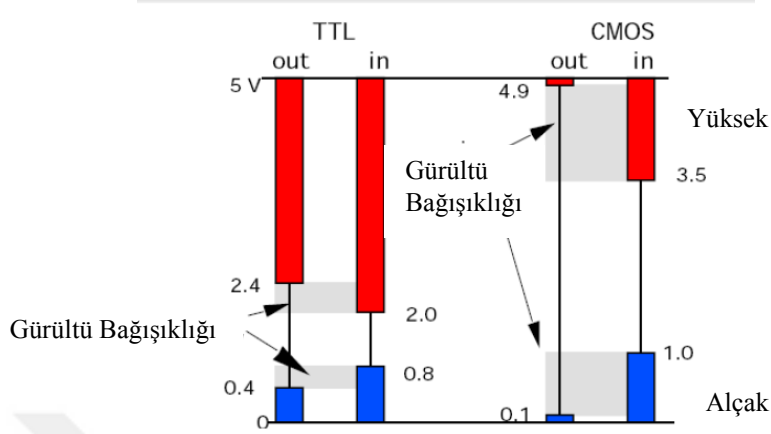
Osilatör Devreleri	Frekans (Hz)	Gerilim (V)	Akım (μ A)	Güç (mW)
Mutlu ve diğ emülatörlü osilatör (M=23.4 k Ω)	160	2.5	504	1.3
Mutlu ve diğ emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=23.4 k Ω)	185	3.8	750	2.85
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü osilatör (M=1.33 k Ω)	714	1.7	335	0.57
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=1.33 k Ω)	1190	2.5	520	1.3
Muthuswamy emülatörlü osilatör (M=20.5 k Ω)	484	2.2	435	0.957
Muthuswamy emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=20.5 k Ω)	392	2.2	434	0.954
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü osilatör (M=2.3 k Ω)	261	4.2	750	3.15
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörüne denk rezistanslı osilatör (R=2.3 k Ω)	305	4	750	3

4.3 Mantık Kapılarının Özellikleri ve Memristör Emülatörlerinin Mantık Kapıları ile Performans Karşılaştırması

Genel olarak entegre veya tümdevre kavramı tanımlanacak olunursa; direnç, kondansatör, diyot, transistör gibi elektronik elemanlar barındıran ve belirli bir düzende oluşturulan yeni bir elemandır. Entegreler; yapılarında kullanılan eleman çeşidine göre, bünyesindeki transistör sayısına göre ve teknolojisine göre sınıflandırılmaktadırlar. Analog ve sayısal olmak üzere iki çeşit entegre devre yapısı bulunmaktadır. Analog işaret kullanan devreler; işlemsel kuvvetlendiriciler, gerilim regülatörleri, osilatörler, frekans çoğullayıcılar, modülatörler ve benzerleri olarak sıralanabilir. Sayısal entegre devreler ise; saklayıcılar, lojik kapılar, kodlayıcılar, bellek elemanları, kod çözücüler gibi sayısal işaretleri kullanan devrelerdir. Sayısal entegre devrelerde genelde aşağıda belirtilen üretim teknolojileri kullanılır:

- RTL- Direnç-Transistör Lojiği
- DTL- Diyot-Transistör Lojiği
- TTL- Transistör-Transistör Lojiği
- ECL- Emite-kuplajlı Lojik
- MOS- Metal-Oksitli yarı iletken
- CMOS- Tümle Metal-Oksitli yarı iletken

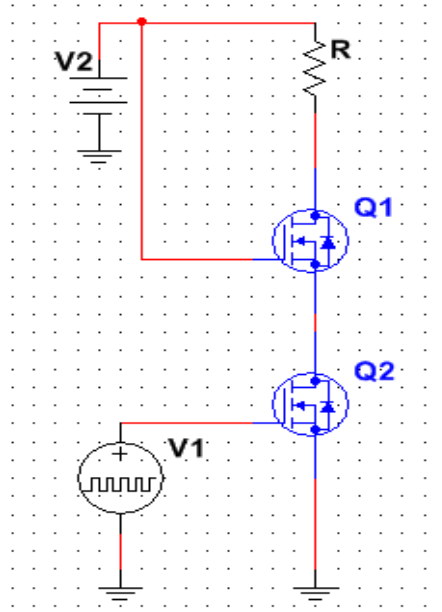
Yukarıda sıralanan devrelerden en sık kullanılanlar TTL ve MOS (CMOS) ailesinden oluşan entegrelerdir. Her lojik ailenin lojik 0 ve lojik 1 seviyesi farklı olup şekilde 5V'a göre giriş ve çıkış gerilim seviyeleri verilmiştir (Şekil 4.40).



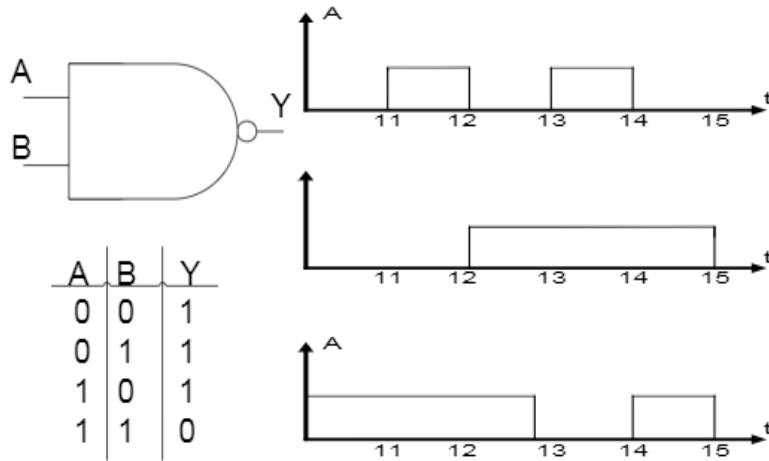
Şekil 4. 40 : TTL ve CMOS giriş-çıkış lojik gerilim seviyeleri.

Lojik entegrelerin birçok özelliği bulunmaktadır. Bu özellikler; hız, gürültü bağışıklığı, güç tüketimi, çıkış kapasitesi, giriş kapasitesi, besleme voltajı, yayılım gecikmesi ve lojik gerilim seviyeleri olarak sıralanabilir. İyi bir lojik entegre hızlı çalışmalı, az miktarda güç harcamalı, maliyeti az olmalı ve çevre koşullarına karşı az duyarlı olmalıdır.

Aşağıdaki şekilde MOSFETlerle tasarlanmış bir NAND lojik kapısı verilmiştir (Şekil 4.41). NAND kapısının çalışma mantığı voltaj girişlerinden herhangi birinin 0 olması durumunda çıkışın lojik “1”; her iki girişin de 1 olması durumunda çıkışın lojik “0” olması şeklindedir. Şekildeki MOSFET ile tasarlanmış NAND kapısının çalışma kriteri ise; her iki girişe 0 verildiği takdirde hem üstteki hem de alttaki MOSFET kesime gider. Dolayısıyla R direncinin hemen altındaki çıkış ifadesi lojik “1” olur. A ve B girişlerinden ikisinin de 1 olması durumunda n kanallı olan her iki MOSFET de ilettime geçeceğinden çıkış ifadesi lojik “0” olur. Girişlerden herhangi birinin 0 olması durumunda ilgili MOSFET kesimde olup toprak kısmına kadar iletim sağlanamayacağından çıkış ifadesi yine lojik “1” olmaktadır. Girişlerin lojik seviyelerine göre çıkış ifadesinin tablosu ve grafik hali aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.42).



Şekil 4. 41 : MOSFET ile tasarlanmış NAND mantık kapısı.



Şekil 4. 42 : NAND kapısı sembolü (sol üstte), çalışma tablosu (sol altta) ve giriş çıkış gerilim seviyeleri (sağda).

Denklem 4.6 ya göre besleme kaynağından çekilen güç (P_{Dis}), besleme gerilimi (V_{DD}) ile beslemeden çekilen akımın (I_{DD}) çarpımı ile elde edilmektedir. Hesaplama yapılırken lojik kapı çıkışının lojik 0 veya 1 olmasına göre çekilen akım değeri değişeceğinden kapı çıkışının lojik 0 ve 1 durumlarında çektiği akımların ortalaması alınır.

$$P_{Dis} = V_{DD} \times I_{DD} \quad (4.6)$$

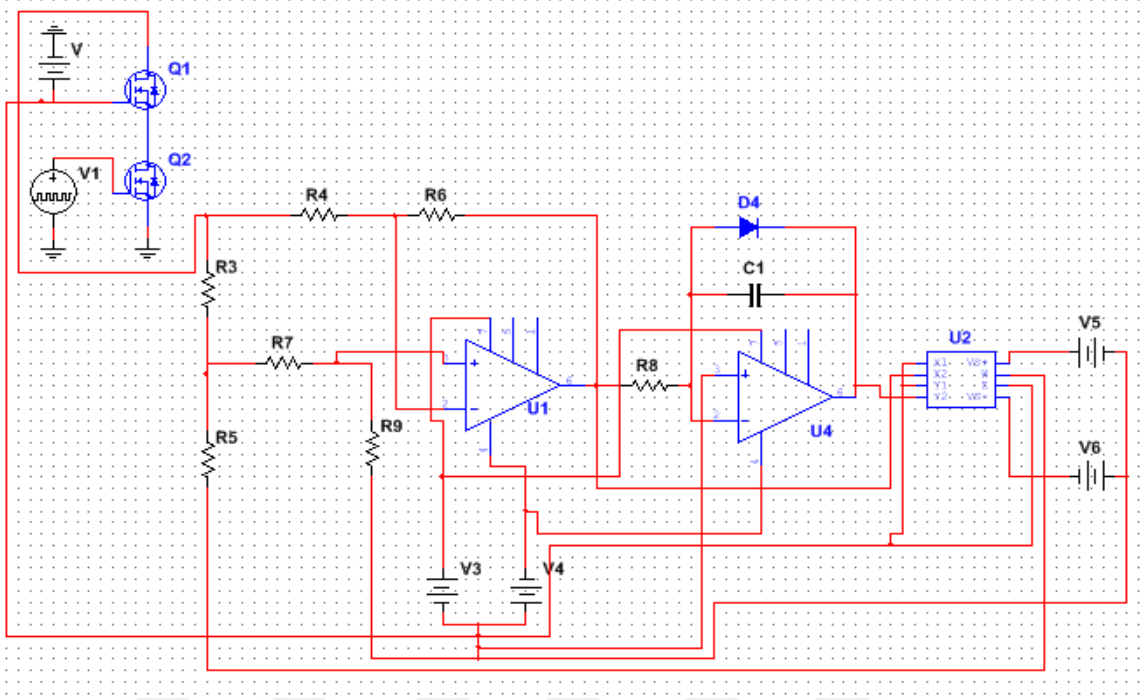
Lojik kapılarda da tüm elektronik elemanlarda olduğu gibi bir miktar enerjinin ısıya dönüşmesi kaçınılmazdır. Entegrenin yıpranmasına sebep olan bu ısı devrede fiziksel hataların oluşmasına da sebep olabilmektedir. Bu yüzden entegre tasarımlarında, genellikle güç tüketimi daha az olan ve aynı zamanda geniş ölçekli tasarımları destekleyen teknolojiler

kullanılır. Literatürde memristörlerle tasarlanmış mantık kapıları çalışmaları mevcuttur. Bunlardan biri memristörlerle tasarlanmış MOS tabanlı mantık kapılarının performans incelemesine dayalıdır (Xu ve diğ, 2017). Bir başka çalışmada ise İMemComp (Akıllı bellek bilgi işlem) VEYA kapısı geliştirilmiş ve diğer mantık kapılarına uygulanması konusu işlenmiştir (Wei ve diğ, 2020). Bulanık mantıkla derin öğrenme konusu da memristif olarak ele alınan başka bir çalışmadır (Zhang ve diğ, 2020).

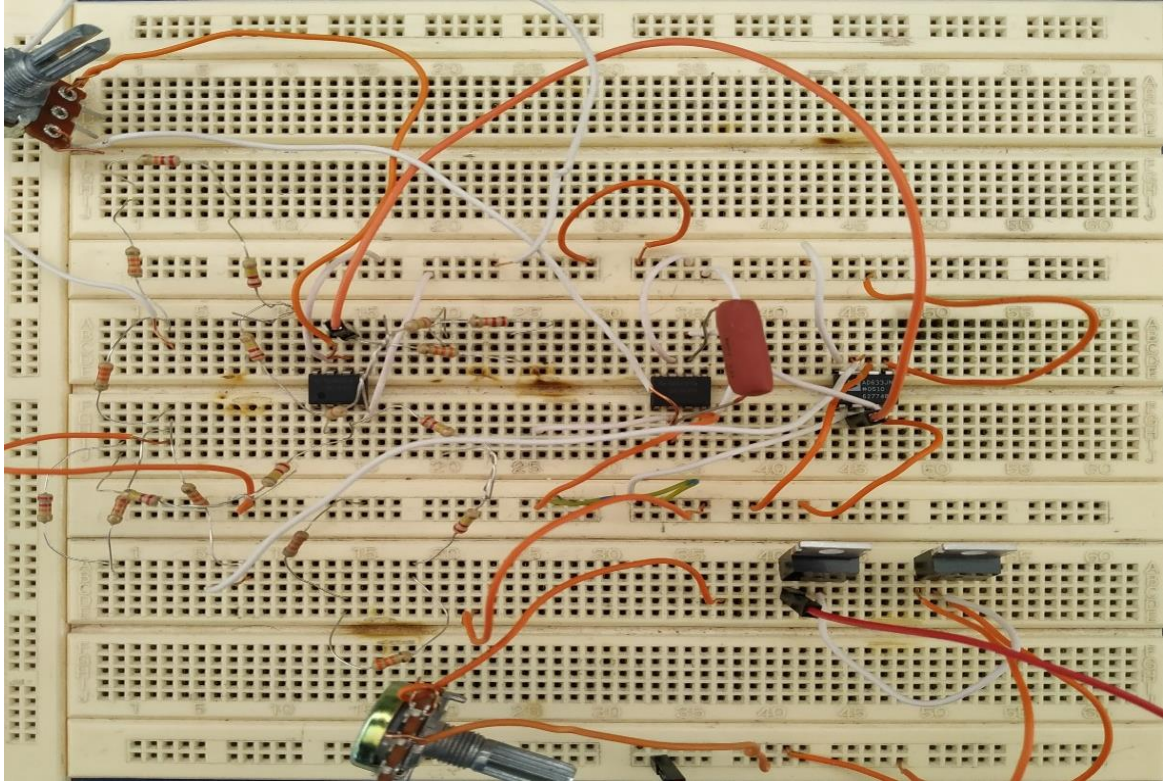
Bu tez çalışmasının alt bölümlerinde MOS teknolojisiyle tasarlanmış mantık kapılarından NAND kapısının rezistif ve memristif şekilde kurulmuş devre yapılarının güç tüketimi açısından performans karşılaştırılması yapılacaktır. Mantık devresinin yapısında transistör bulunduğu kurulan devrelerde seçilen direnç veya memristans değerinin çok yüksek olmamasına dikkat edilmiştir. Zira lojik kapı devrelerinde R direncinin artırılması durumunda V_{gs} sabit olduğundan I_{ds} azalacaktır. Buna bağlı olarak V_{ds} 'nin azalacağı aşıkarak bilinmektedir. Fakat direncin çokça büyütülmesi ile akım iyice azalacağından saturasyon bölgesinden çıkılacak ve FET'in yükselteç olarak çalıştırılan omik bölgesine girilecektir. Oysa FET'lerin lojik kapı olması için mümkün olduğunca lineer bölgeden uzaklaşılması gerekir. Dolayısıyla devrelerde transistörlerin saturasyon bölgesinde çalışmasına dikkat edilmiştir.

4.3.1 Standart dirençli ve Mutlu-Karakulak emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması

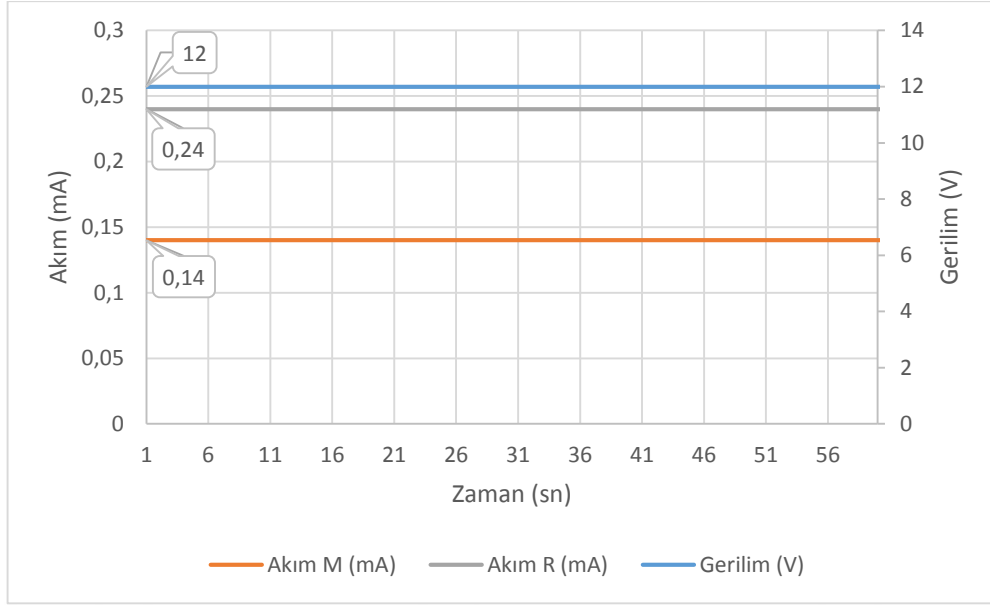
Mutlu ve Karakulak tarafından tasarlanan memristör emülatörünün MOSFET ile tasarlanmış NAND mantık kapısı devresinde standart direnç yerine kullanılmış olarak simülasyon ve laboratuvar şemaları sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.43 ve Şekil 4.44). (Mutlu ve Karakulak, 2010). MOSFET girişlerinden birinci giriş kaynak gerilimine bağlanmak suretiyle ikinci girişe 0 ile 12 V tepe değerlerinde kare dalga uygulanmıştır. NAND kapısının çalışma mantığı olan girişlerden birinin sıfır olması durumunda çıkışın lojik 1 olmasının gereği olarak kare dalga minimum tepe noktasındayken çıkış lojik 1; maksimum tepe noktasındayken ise çıkış lojik 0 olmalıdır. Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı emülatör devresi ile oluşturulmuş bu memristif NAND kapısı da istenildiği ölçüde aynı çalışma mantığını sağlamıştır. Daha sonra memristans değerine eşit rezistans değeri kullanılmak suretiyle standart dirençli bir NAND mantık kapısı da oluşturulmuştur. Her iki devrenin güç tüketimi simülasyon ve deney halinde incelenmiştir. Elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.45 ve şekil 4.46).



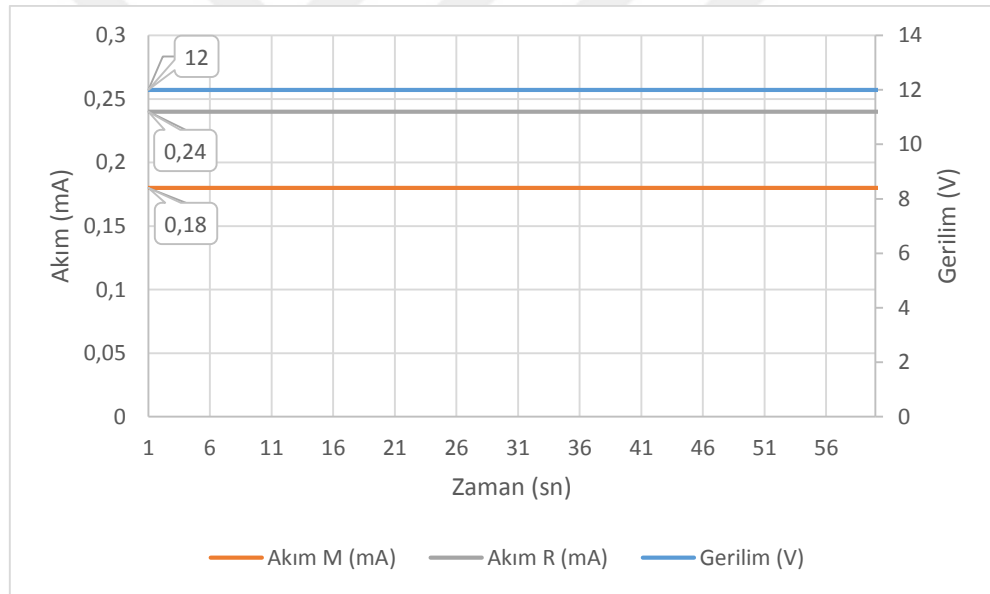
Şekil 4. 43 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.



Şekil 4. 44 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 45 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.

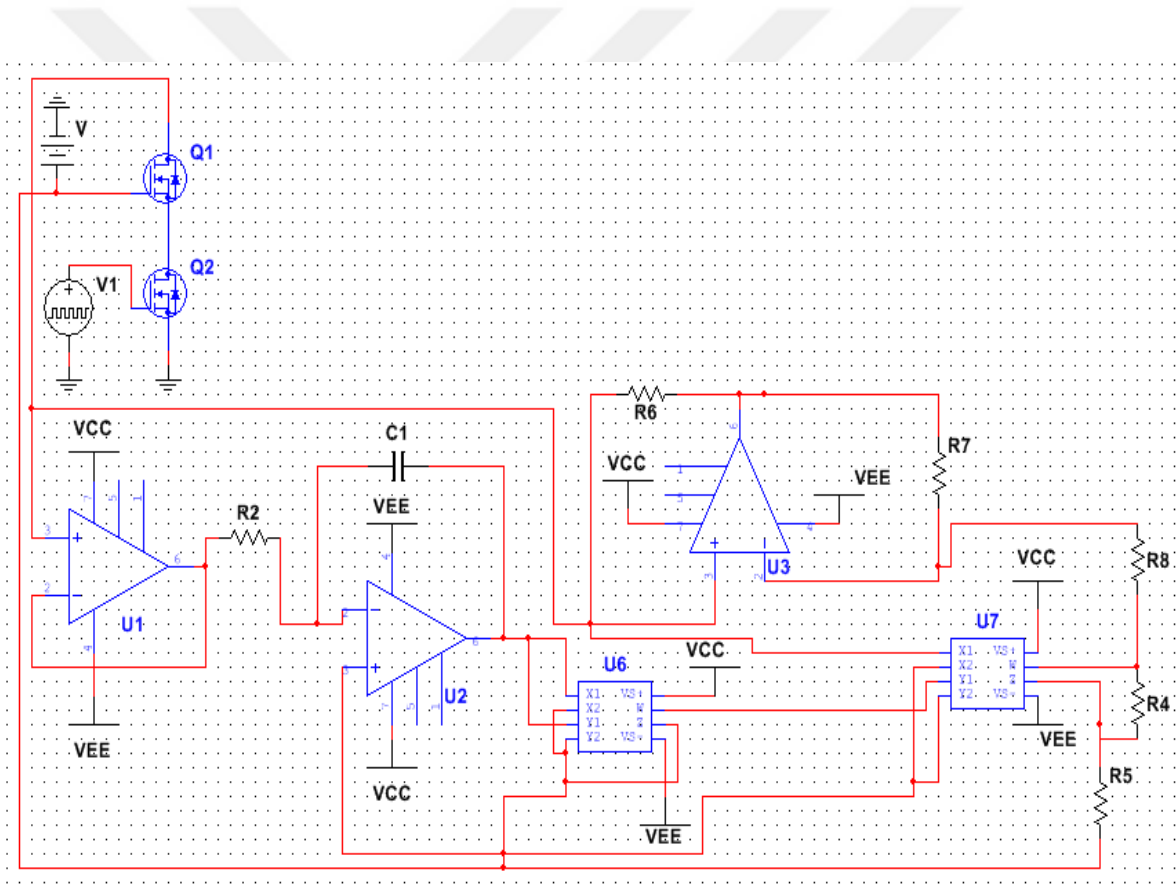


Şekil 4. 46 : Mutlu ve Karakulak emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.

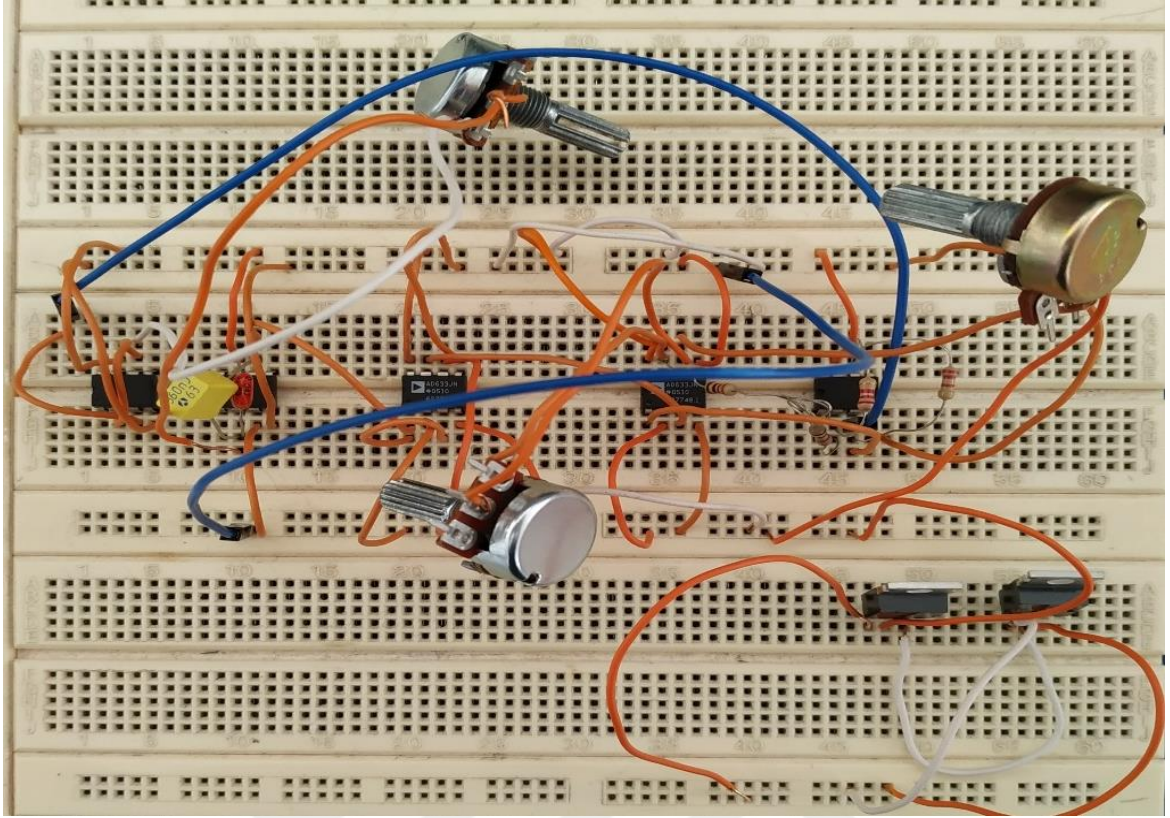
Grafiklerde verilenlere dayanılarak memristör emülatörüyle kurulmuş mantık kapısının standart dirençle kurulmuş mantık kapısına oranla daha az güç tükettiği aşıkardır. Simüle edilen memristif lojik kapı devresi rezistif lojik kapı devresine nazaran daha az güç tüketmiştir. Deneysel verilere göre de memristif lojik kapı devresi rezistif lojik kapı devresine göre daha az güç harcamıştır. Hem simülasyondaki sonuçlar hem de deneysel sonuçlardan anlaşılmaktadır ki memristiflik mantık devresinin güç tüketimini azaltmayı sağlamıştır. Bu özellik de her entegrede olduğu gibi lojik kapılarda da devre performansı açısından elzem bir durumdur.

4.3.2 Standart dirençli ve Muthuswamy emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması

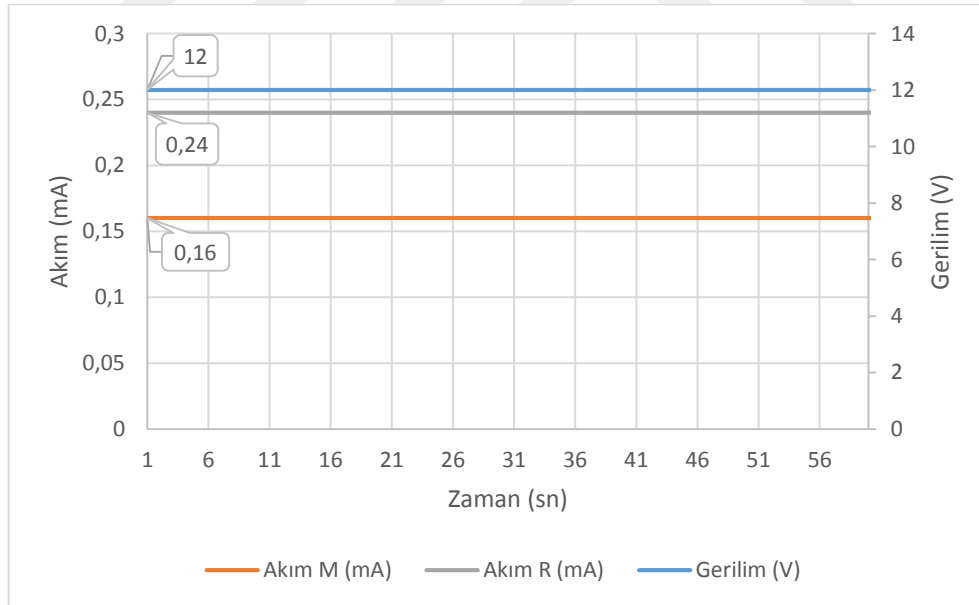
Bu tez çalışmasında incelenen bir diğer memristör emülatör devresi olan Muthuswamy'nin tasarladığı devre de NAND lojik kapı tasarımında standart direnç yerine devreye müdahil olmuştur (Muthuswamy, 2010). Devrenin simüle edilmiş şeması ve deneysel board üzerinde kurulmuş hali sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.47 ve Şekil 4.48). Her iki devrenin de NAND kapısı özelliklerinin mantığını sağladığı görülmüştür. Daha sonra incelenen emülatörün memristans değerine eşit rezistansta standart direnç ile NAND kapısı hem simüle edilmiş hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Devrelerde harcanan güç incelenmek üzere elde edilen simülasyon ve laboratuvar grafikleri sırasıyla aşağıdaki şekillerde incelenmiştir (Şekil 4.49 ve Şekil 4.50).



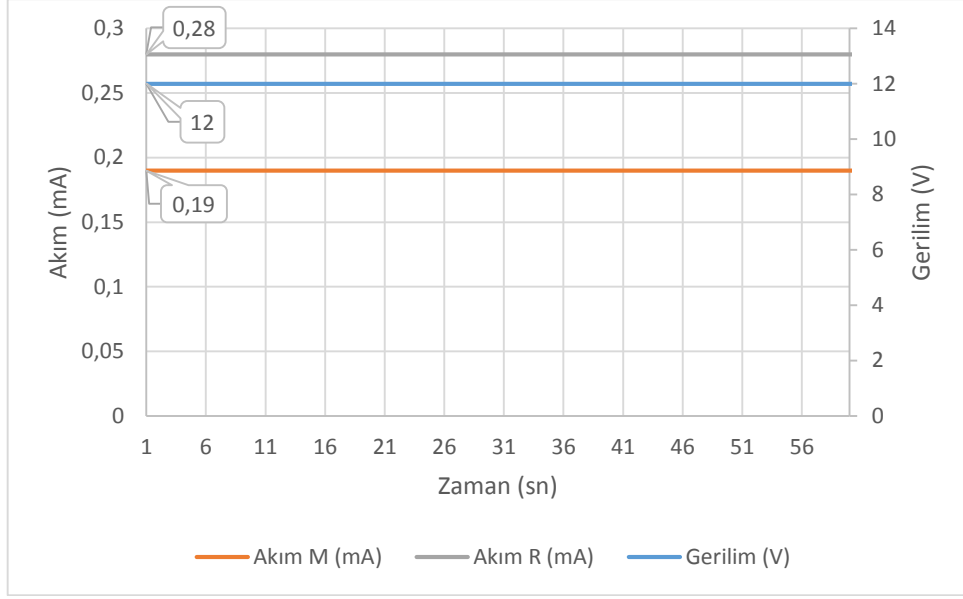
Şekil 4. 47 : Muthuswamy emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.



Şekil 4. 48 : Muthuswamy emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 49 : Muthuswamy emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.

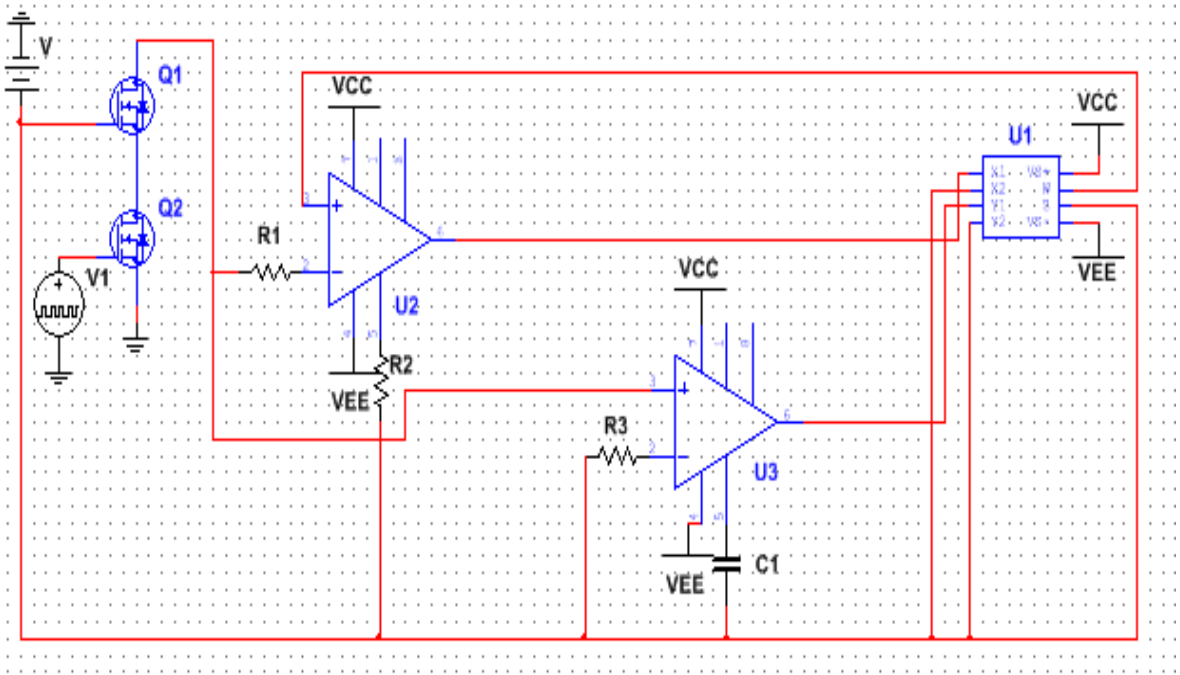


Şekil 4. 50 : Muthuswamy emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.

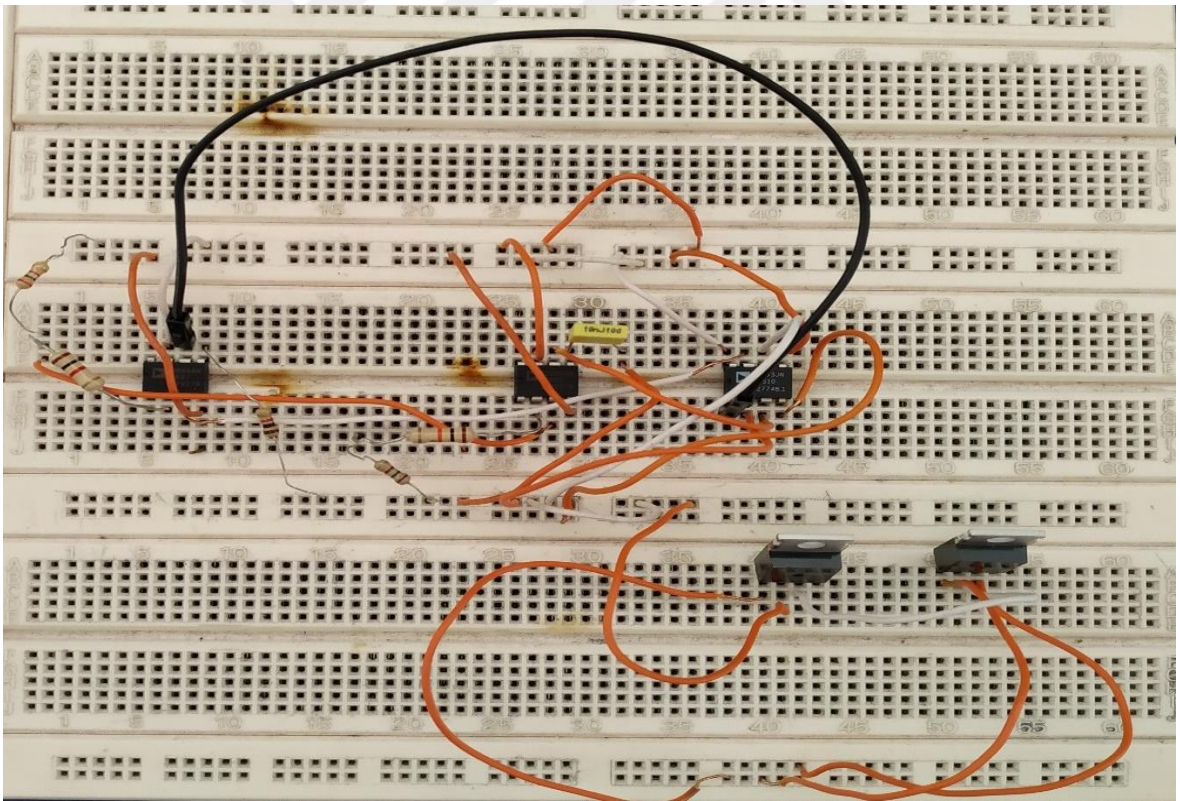
Şekillerde verilen rezistif ve memristif NAND mantık kapılarının simülasyon sonuçlarına göre, umulduğu gibi, memristör emülatörüyle tasarlanmış lojik kapının güç tüketim miktarı aynı değerdeki standart dirençle tasarlanmış devrenin güç tüketim miktarına oranla daha azdır. Benzer olarak laboratuvar da deneyimlenmiş memristif lojik kapı devresi de yine laboratuvar ortamında deneyimlenmiş rezistif devreye nazaran daha az güç harcamıştır.

4.3.3 Standart dirençli ve Alharbi vd gerilim kontrollü emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması

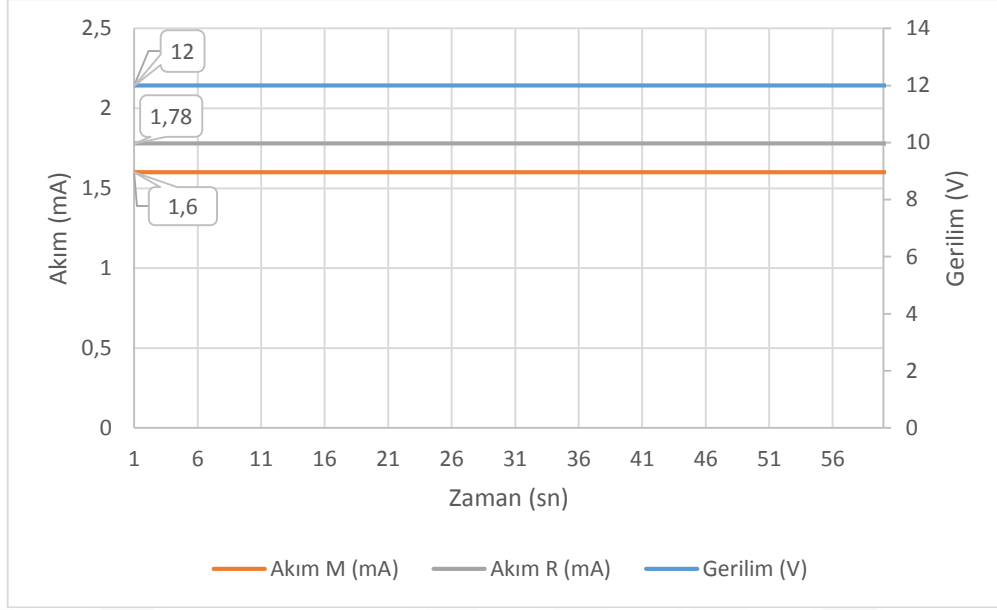
Çalışmada incelenen emülatörlerden biri de Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı devredir (Alharbi ve diğ, 2016). Bahsedilen emülatör de diğer emülatörler gibi MOSFETli NAND lojik kapısının tasarımında standart direnç yerine kullanılmıştır. Devrenin simülasyon şeması ve deneysel olarak gerçekleşmiş hali sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.51 ve Şekil 4.52). Memristör emülatörünün memristans değerine eşit rezistansta bir standart dirençle de kurulan NAND mantık kapısı simüle edilmiş ve laboratuvar da deneyimlenmiştir. Hem memristif hem de rezistif devrelerin performans karşılaştırması yapıp gereken sonuçlara ulaşılmıştır. Güç tüketim grafiklerinin benzetim ve deneysel sonuçları sırasıyla aşağıdaki şekillerde incelenmiştir (Şekil 4.53 ve Şekil 4.54).



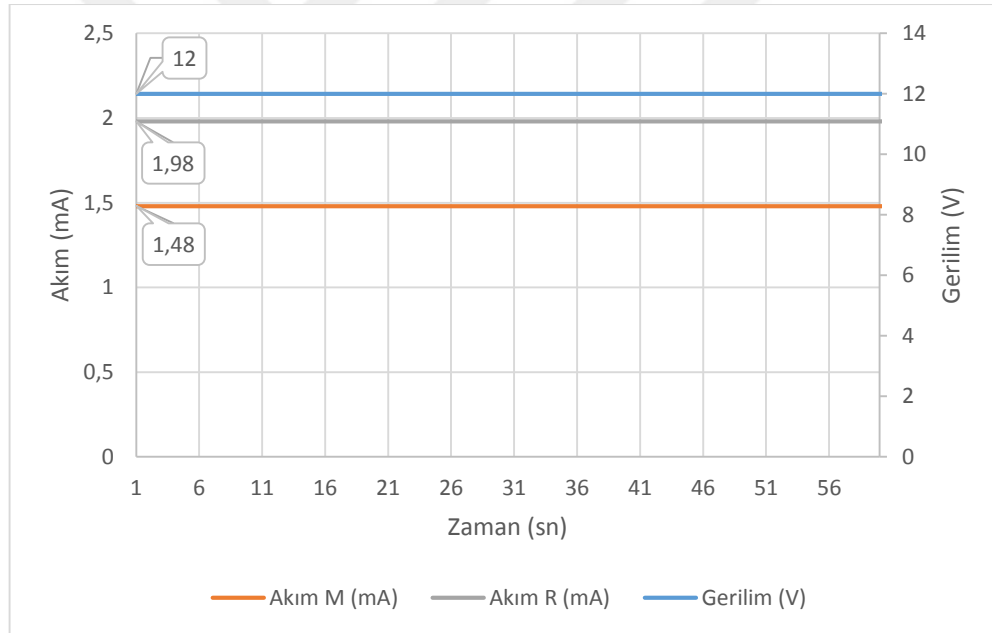
Şekil 4. 51 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.



Şekil 4. 52 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 53 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.

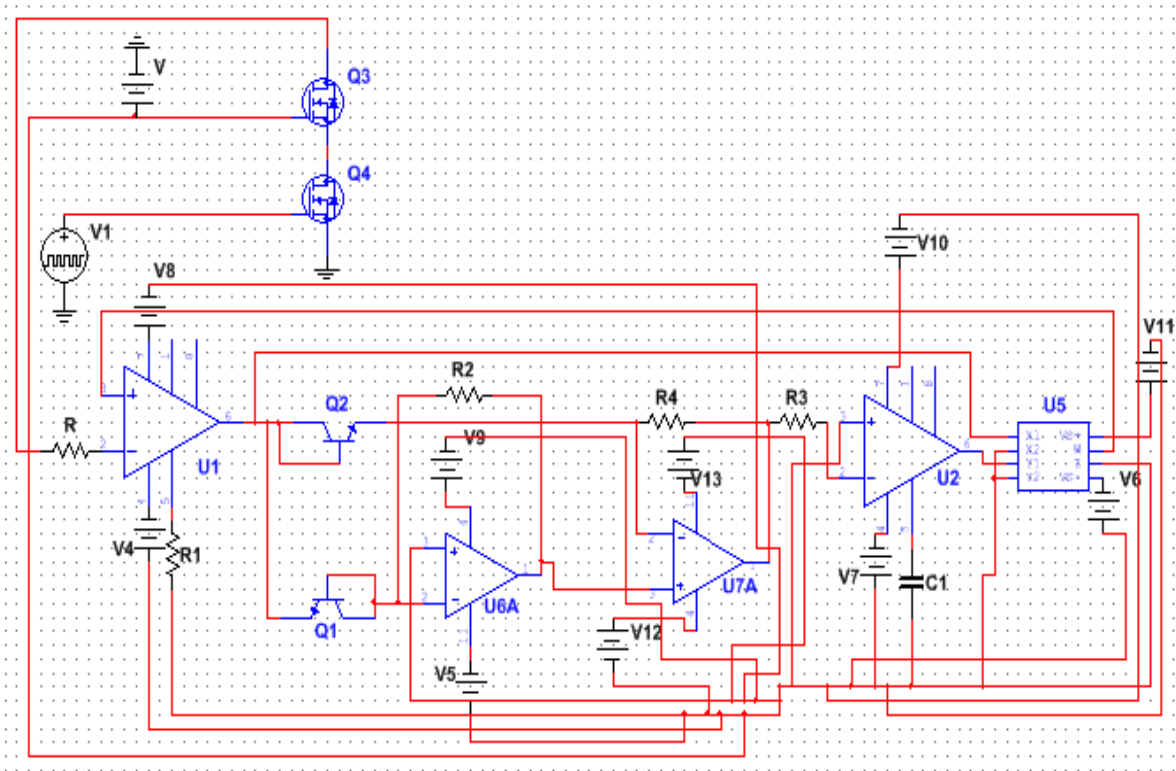


Şekil 4. 54 : Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.

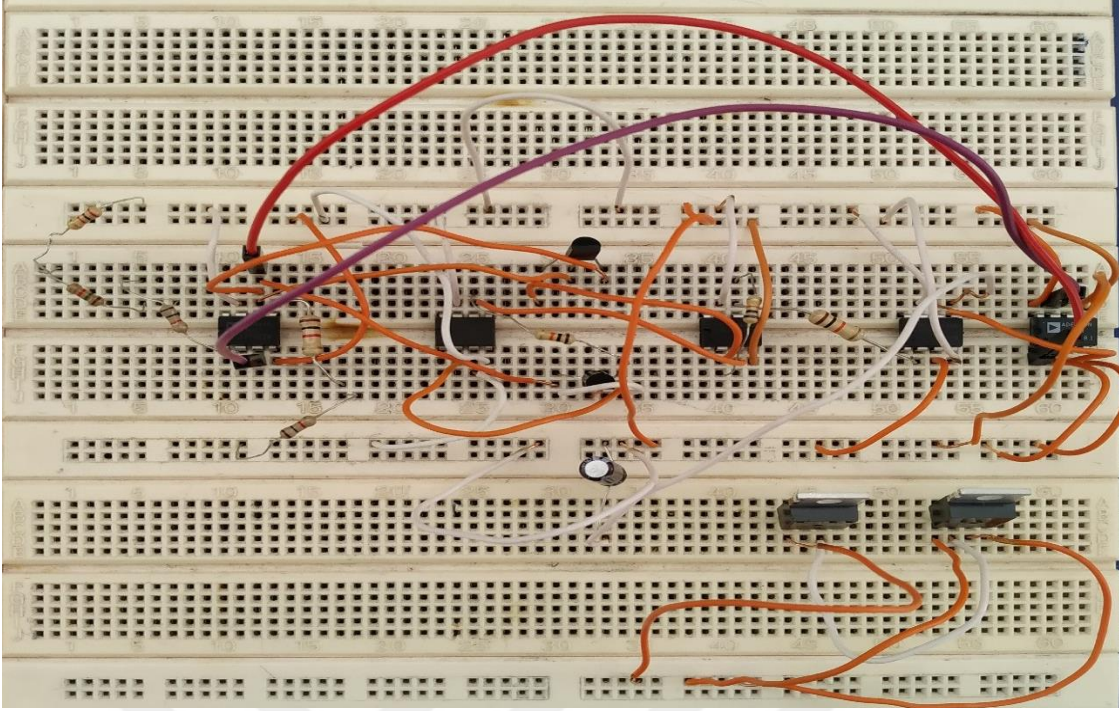
Simülasyon ve deney sonuçları gösterilen grafiklere dayanılarak Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü memristör emülatörüyle oluşturulmuş mantık kapısının harcadığı güç; standart rezistör ile oluşturulmuş mantık kapısının harcadığı güçten daha azdır. Simülasyon ve deney sonuçlarında bir miktar ufak farklılık olması olağan olmakla birlikte sonuçlar büyük oranda örtüşmektedir.

4.3.4 Standart dirençli ve Alharbi vd akım kontrollü emülatörlü mantık kapılarının karşılaştırılması

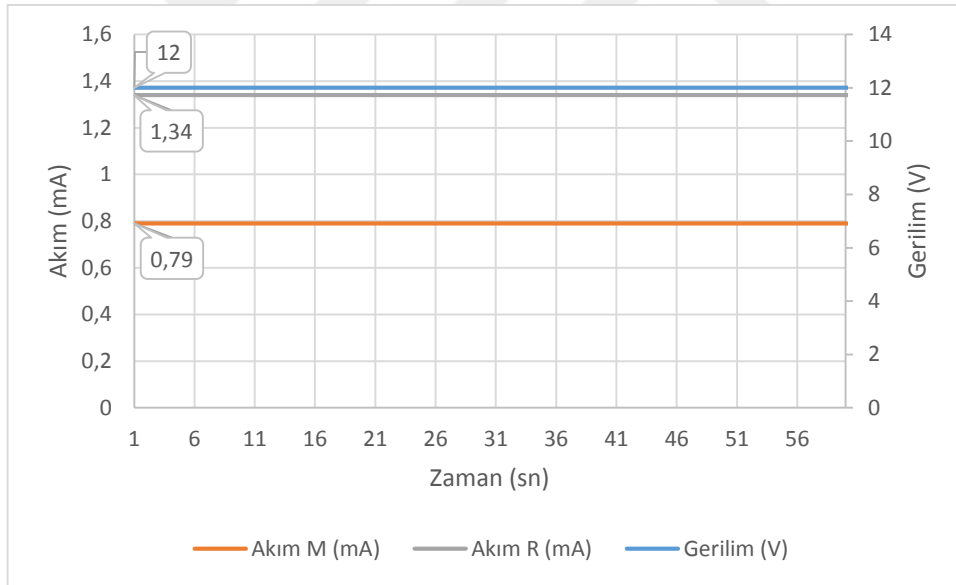
Memristif ve rezistif devrelerin mantık kapıları üzerinde karşılaştırılmasının yapıldığı son emülatör devresi ise Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı akım kontrollü devredir (Alharbi ve diğ, 2015). Diğer mukayeselerde olduğu gibi bu kısımda da memristans değerine eşit rezistans değeri seçilmiştir. NAND kapısını oluşturan devre hem memristör emülatörü ile hem de standart direnç ile kurularak kapının mantıksal işlevi incelenmiştir. İlgili simülasyon şeması ve deneysel kurulum sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.55 ve Şekil 4.56). NAND kapısının mantıksal işlevini gerçekleştirebilen bu memristif ve rezistörlü devrelerin güç tüketimleri incelenip ölçülmüştür. Ulaşılan sonuçların simülasyon grafiği ve deneysel grafiği sırasıyla aşağıda verilmiştir (Şekil 4.57 ve Şekil 4.58).



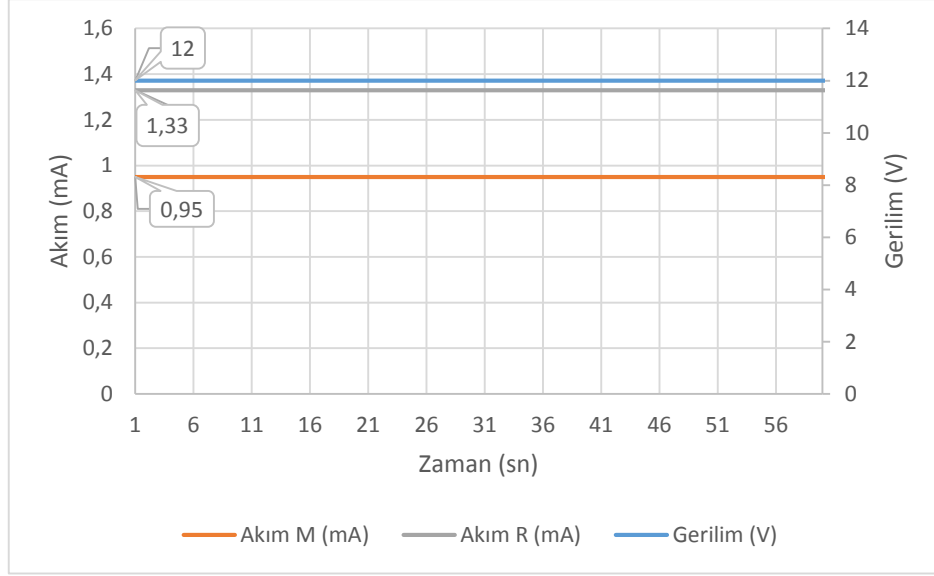
Şekil 4. 55 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının simülasyon şeması.



Şekil 4. 56 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü NAND mantık kapısının gerçekleştirilmesi.



Şekil 4. 57 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının simülasyon akım-gerilim değerleri.



Şekil 4. 58 : Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü ve standart dirençli NAND mantık kapısının deneysel akım-gerilim değerleri.

Simülasyon grafiğinden ulaşılan bilgiler ışığında memristanslı devrenin güç tüketimi rezistanslı devrenin güç tüketimine oranla daha azdır. Benzer olarak laboratuvarında deneyimlenmiş memristörlü mantık kapısı devresi rezistörlü mantık kapısı devresine kıyasla daha az güç harcamıştır. Simüle edilen ve laboratuvarında ölçülen sonuçlar büyük oranda örtüşmekte olup dahası istenen şekilde memristif devrenin performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Bu bölümde incelenen dört çift mantık kapısı devresinin güç tüketimi bilgilerinin benzetim ve deneysel sonuçları sırasıyla aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir (Çizelge 3 ve Çizelge 4). İncelenen grafikler ışığında NAND mantık kapısında standart direnç yerine kullanılan dört memristör emülatörü de lineer dirence göre daha az güç tüketmiştir.

Çizelge 3 : Simüle edilmiş mantık devrelerinin; gerilim, ortalama akım ve güç değerleri.

Mantık Devreleri	Gerilim (V)	Ortalama Akım (μA)	Güç (mW)
Mutlu ve diğ emülatörlü NAND kapısı (M=24.49 k Ω)	12	140	1.70
Mutlu ve diğ emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=24.49 k Ω)	12	249	2.99
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü NAND kapısı (M=1.383 k Ω)	12	1600	19.27
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=1.383 k Ω)	12	1780	21.33
Muthuswamy emülatörlü NAND kapısı (M=25.23k Ω)	12	160	1.92
Muthuswamy emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=25.23k Ω)	12	243	2.9
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü NAND kapısı (M=2.5 k Ω)	12	792	9.5
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=2.5 k Ω)	12	1340	16.07

Çizelge 4 : Laboratuvarda deneyimlenmiş mantık devrelerinin; gerilim, ortalama akım ve güç değerleri.

Mantık Devreleri	Gerilim (V)	Ortalama Akım (μA)	Güç (mW)
Mutlu ve diğ emülatörlü NAND kapısı (M=23.4 k Ω)	12	186	2.19
Mutlu ve diğ emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=23.4 k Ω)	12	248	2.93
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörlü NAND kapısı (M=1.33 k Ω)	12	1480	17.76
Alharbi ve diğ gerilim kontrollü emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=1.33 k Ω)	12	1980	23.82
Muthuswamy emülatörlü NAND kapısı (M=20.5 k Ω)	12	190	2.2
Muthuswamy emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=20.5 k Ω)	12	284	3.4
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörlü NAND kapısı (M=2.3 k Ω)	12	950	11.4
Alharbi ve diğ akım kontrollü emülatörüne denk rezistanslı NAND kapısı (R=2.3 k Ω)	12	1330	15.9

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektronikte dört temel büyüklük olan gerilim, akım, yük ve manyetik akı arasındaki ilişkileri tanımlayan çeşitli bağıntılar mevcuttur. Bu denklemlerden elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki bağıntı 1971'e kadar netleşmemiştir. Leon O. Chua tarafından fark edilen bu eksiklik tamamlanıp memristör kelimesi ile elektronikte yeni bir eleman literatüre kazandırılmıştır. Fakat günün koşullarından ötürü somut olarak gerçekleştirilemeyen memristörü yıllar sonra HP laboratuvarlarındaki bir grup araştırmacı elde etmiştir. Bununla birlikte memristör elektronik uygulamalarda kendine oldukça fazla alanda yer bulmuştur.

Bu tez çalışmasında ilk olarak memristör, memristif sistemler ve memristör emülatörleri tanıtılmıştır. Her bir memristör emülatörü hem simüle edilmiş hem de laboratuvar ortamında deneyimlenmiştir. Elde edilmesi gereken memristör karakteristiklerine ulaşılmıştır. Daha sonra bu memristör emülatörleri; aktif alçak geçiren filtre devresinde, faz kaydırıcı osilatör devresinde ve MOS ile tasarlanan NAND mantık kapılarında standart direnç yerine kullanılmıştır. Bir alçak geçiren filtre devresinin amacı belli bir frekans değerinden sonraki sinyalleri bastırıp sönmüleme eğilimidir. Filtre devresinde standart direnç yerine kullanılan memristör emülatörleri de kesim frekansından sonraki sinyalleri bastırma performansına dayalı olarak karşılaştırılmıştır. Hem benzetim hem de deney sonuçlarına göre Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü memristör emülatörü ile Kalomirov ve arkadaşlarının tasarladığı memristör emülatörünün standart direnç nazaran filtreleme yetenekleri daha üstündür. İkinci olarak faz kaydırıcı osilatör devresinde standart direnç yerine kullanılan memristör emülatörleri ise devrede harcanan güç parametresi bakımından karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda Mutlu ve Karakulak'ın tasarladığı memristör emülatörü ile Alharbi ve arkadaşlarının tasarladığı gerilim kontrollü memristör emülatörü; standart direncin kullanıldığı faz kaydırıcı osilatöre nazaran daha az güç tüketmiştir. Üçüncü olarak ise MOS tabanlı NAND mantık kapısında standart direnç yerine kullanılan emülatör devrelerinin performans karşılaştırılması yapılmıştır. Bu mukayeseye göre simüle edilen ve laboratuvar ortamında deneyimlenen dört emülatör devresi de (Mutlu ve Karakulak emülatörü, Muthuswamy emülatörü, Alharbi ve diğ. gerilim kontrollü emülatör, Alharbi ve diğ. akım kontrollü emülatör) standart dirençle kıyasla daha az güç tüketmiştir.

Elektronik devrelerde kesim frekansı, bant genişliği ve güç tüketimi devre kalitesi açısından önemli parametrelerdir. Bu tez çalışmasında bahsedilen parametreler bakımından incelenen memristörlü ve dirençli devrelerin karşılaştırılması yapıp hangi elektronik devrelerde hangi

memristör emülatörünün standart direnç yerine kullanılabileceği konusu aydınlatılmıştır. Dolayısıyla az bir maliyetle ve az sayıda elektronik elemanla oluşturularak memristör görevini üstlenen emülatörlerin, kimi elektronik devrelerde kullanımının performansa sağladığı katkılar açıklığa kavuşturulmuştur. Böylelikle memristifliğin devre performansına olan katkıları doğrultusunda hangi memristör emülatörünün kullanılabileceği ilerleyen çalışmalara ışık tutabilmektedir. Benzer olarak ilerleyen çalışmalarda farklı elektronik devrelerde de memristifliğe dayalı hız, güç ve benzeri açılardan performans karşılaştırmaları yapılarak kullanılacak memristör emülatörü ile devrelerin çalışma verimleri artırılabilir.



KAYNAKLAR

- Abuelma'atti, M., & Khalifa, Z. (2015). A Memristor Based Wien-Bridge Sinusoidal/Chaotic Oscillator.
- Adhikari, S. P., Sah, M. P., Kim, H., & Chua, L. O. (2013). Three fingerprints of memristor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 60 (11): 3008-3021.
- Adzmi, A. F., Nasrudin, A., Abdullah, W. F., & Herman, S. H. (2012). Memristor Spice model for designing analog circuit. *In Research and Development (SCORED)* (s. 78-83). 2012 IEEE Student Conference on.
- Alharbi, A. G., Fouda, M. E., & Chowdhury, M. H. (2015). Memristor emulator based on practical current controlled model. *IEEE 58th International Midwest Symposium In Circuits and Systems (MWSCAS)* (s. 1-4). IEEE.
- Alharbi, A. G., Fouda, M. E., Khalifa, Z. J., & Chowdhury, M. H. (2016). Simple generic memristor emulator for voltage-controlled models. *2016 IEEE 59th International Midwest Symposium* (s. 1-4). In Circuits and Systems (MWSCAS).
- Alkan, M. (2020, 05 17). *Elektronik Filtreler*. <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/elektronik-filtreler-1-bolum-elektrikport-akademi/17069#ad-image-0>. adresinden alındı
- Amer, S., Madian, A., Sayed, H., Emara, A., & Amer, H. (2017). Design and analysis of memristor-based min- max circuits. *Advances in Memristors, Memristive Devices and Systems* (s. 187-205). Studies in Computational Intelligence.
- Anand, A., Aggarwal, B., & Singh, K. (2019). Memristor Based Oscillator. *2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)* (s. 89-92). NCR New Delhi, India: IEEE.
- Ascoli, A., Corinto, F., Senger, V., & Tetzlaff, V. (2013). Memristor Model Comparison. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 13(2):89-105.
- Ascoli, A., Messaris, I., Tetzlaff, R., & Chua, L. (2019). Theory of Cellular Nonlinear Networks with Analogue Dynamic Memristors. *2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)* (s. 498-501). Genoa, Italy: IEEE.
- Babacan, Y., & Kaçar, F. (2017). FCS Based Memristor Emulator with Associative Learning Circuit Application. *IU-JEEE*, 3433-3437.
- Babacan, Y., Yeşil, A., & Gül, F. (2018). The fabrication and MOSFET-only circuit implementation of semiconductor memristor. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1625-1632.
- Bahloul, M., Bouraoui, M., Barraaj, J., Fouda, M., & Masmoudi, M. (2018). Memristor Based Programmable Current Reference Generator. *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, (s. pp. 1051-1054). Hammamet: SSD.

- Bao, B., Wang, N., Xu, Q., Wu, H., & Hu, Y. (2016). A Simple Third-Order Memristive Band Pass Filter Chaotic Circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*.
- Beck, A., Bednorz, J. G., Gerber, C., Rossel, C., & Widmer, D. (2000). Reproducible switching effect in thin oxide films for memory applications. *Journal of Applied Physics*, 77(1):139-141.
- Biolek, D., Biolek, Z., Biolkova, V., & Kolka, Z. (2014). Modeling of TiO₂ memristor: from analytic to numerical analysis. *Semiconductor Science and Technology*, 29(12), 125008.
- Buğdaycı, İ. (2012). Elektroniğin Kayıp Halkası. *Fizik Dünyası*, 1-8.
- Buot, F. A., & Rajagopal, A. K. (1994). Binary information storage at zero bias in quantum-well diodes. *Journal of Applied Physics*, 76(9):5552-5560.
- Chilukuri, M., & Jung, S. (2015). A high frequency memristor emulator circuit. *2015 IEEE Dallas Circuits and Systems Conference (DCAS)* (s. pp. 1-4). Dallas, TX,: IEEE.
- Chua, L. O. (1971). Memristor-The Missing Circuit Element. *IEEE Transactions On Circuit Theory*, 18(5):507-519.
- Chua, L. O. (1980). Device modeling via nonlinear circuit elements. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 27(11); 1014-1044.
- Chua, L. O., & Kang, S. M. (1976). Memristive devices and systems. *Proceedings of the IEEE*, 64(2):209-223.
- Chua, L., & Tseng, C. (1974). A memristive circuit model for p- n junction diodes. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 367-389.
- Deng, H., & Wang, D. (2017). Circuit simulation and physical implementation for a memristor-based colpitts oscillator. *AIP ADVANCES* 7, 7(3):035118/8.
- Di Ventra, M., Pershin, Y., & Chua, L. (2009). Circuit Elements With Memory: Memristors, Memcapacitors, and Meminductors. *Proceedings of the IEEE*, 97(10): 1717-1724.
- Do, Y., Kwak, J., Bae, Y., Jung, K., Im, H., & Hong, J. (2009). Hysteretic bipolar resistive switching characteristics in TiO₂/TiO_{2-x} multilayer. *Applied Physics Letters*, 95(093507), 1-3.
- Dofe, J., Frey, J., Nsengiyumva, P., & Yu, O. (2015). Investigating power characteristics of memristor-based logic gates and their applications in a security primitive. *2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, (s. pp.1-4). Fort Collins,CO: IEEE.
- Driscoll, T., Quinn, J., Klein, S., Kim, H. T., Kim, B. J., Pershin, Y. V., & Basov, D. N. (2010). Memristive adaptive filters. *Applied Physics Letters*, 97 (9): 093502.
- Fouda, M., & Radwan, A. (2014). Meminductor response under periodic current excitations. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 33(5), 1573–1583.

- Ghedira, S., Rzig, F., Mbarek, K., & Besbes, K. (2017). Dynamical resistive switching of a generic memristor model: Analysis and simulation. *2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*, (s. 1-5). Monastir: IEEE.
- Ghosal, P., & Mohanty, S. (2015). Power Minimization of a Memristor-Based Wien Bridge Oscillator through a Simscape Framework. *2015 IEEE International Symposium on Nanoelectronic and Information Systems* (s. 83-88). IEEE.
- Gül, F. (2018). Carrier transport mechanism and bipolar resistive switching behavior of a nano-scale thin film TiO₂ memristor. *Ceramics International*, 11417-11423.
- Gül, F. (2019). Circuit Implementation of Nano-Scale TiO₂ Memristor Using Only Metal-Oxide-Semiconductor Transistors. *IEEE Electron Device Letters*, 40(4): pp. 643-646.
- Gürsul, S., & Hamamcı, S. (2019). Comparison of Different Memristor Emulators on Low-Pass Filter Circuit. *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (s. 1-4). Ankara: IEEE.
- Gürsul, S., & Hamamcı, S. E. (2020). Performance Comparison of Various Memristor Emulators on a Phase Shifting Oscillator Circuit. *2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)* (s. 23-27). Antalya: IEEE.
- Hsieh, P., Tang, M., Hsu, S., Lin, M., & Chen, Y. (2019). Design and Implementation of a Memristor-Based Oscillator. *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (s. 1-4). Sapporo, Japan: IEEE.
- <https://www.elektrikrehberiniz.com>. (2019, 12 05).
<https://www.elektrikrehberiniz.com/osilator/osilator-nedir-10019/>. adresinden alındı
- Ibrahim, N., Salah, S., Safar, M., & El-Kharashi, M. (2018). Digital Design using CMOS and Hybrid CMOS/Memristor Gates: A Comparative Study. *2018 13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)* (s. pp. 225-229). Cairo, Egypt: ICCES.
- Ibrayev, T., Fedorova, I., Maan, A., & James, A. (2014). Memristive operational amplifiers. *Timur Ibrayev, Irina Fedorova, Akshay Kumar Maan, Alex Pappachen James*, 114-119.
- Jia, J., Huang, X., Li, Y., Cao, J., & Alsaedi, A. (2020). Global Stabilization of Fractional-Order Memristor-Based Neural Networks With Time Delay. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(3): 997-1009.
- Kalomiros, J., Stavrinides, S., & Corinto, F. (2016). A two-transistor non-ideal memristor emulator. *2016 5th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASIT)* (s. 1-4). Thessaloniki: IEEE.
- Kandemir, K. (2019, 12 07). <https://kaankandemir.wordpress.com/>.
<https://kaankandemir.wordpress.com/?s=barkhausen+kriteri#>. adresinden alındı
- Kavehei, O., Kim, Y., Iqbal, A., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S., & Abbott, D. (2009). The fourth element. *Insights into the memristor 2009 International Conference On Communications, Circuits and Systems*, 921-927.

- Kerur, K. (2010). *A Study Of The Memristor, The Fourth Circuit Element*. KANSAS STATE UNIVERSITY, Manhattan, Kansas, 13.
- Kim, H., Sah, M., Yang, C., Cho, S., & Chua, L. (2012). Memristor emulator for memristor circuit applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2422-2431.
- Kvatinsky, S., Friedman, E. G., Kolodny, A., & Weiser, U. C. (2013). TEAM: threshold adaptive memristor model. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60 (1): 211-221.
- Lam, Y.-F. (1972). Formulation of normal form equations of nonlinear networks containing memristors and coupled elements. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 19(6); 585-594.
- Lehtonen, E., & Laiho, M. (2010). CNN using memristors for neighborhood connections. *2010 12th International Workshop (s. 1-4). Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA),*.
- Li, D. e. (2020). A Family of Binary Memristor-Based Low-Pass Filters With Controllable Cut-Off Frequency. *IEEE Access*, (8): 60199-60209.
- Liang, Y., Lu, Z., Wang, G., Yu, Y., & Iu, H. (2019). Threshold-Type Binary Memristor Emulator Circuit. *IEEE Access*, 180181-180193.
- Lin, Z., & Wang, H. (2009). Image encryption based on chaos with PWL memristor in Chua's circuit. *Compact modeling and corner analysis of spintronic memristor* (s. 7-12). San Francisco: NANOARCH'09, IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures,.
- Liu, K.-C. (1975). *Dynamic behavior of a memristive circuit model for long-base P-N junction diodes*. Northridge: California State University, Master of Science Engineering Project Report.
- Mahvash, M., & Parker, A. C. (2010). A memristor SPICE model for designing memristor circuits. *53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, (s. 989-992). Seattle: MWSCAS, 2010.
- MEB. (2012). *Osilatörler ve filtre devreleri*. Ankara.
- Milić, M., & Novak, L. (1979). The anti-Lagrangian equations: A missing network description. *Journal of the Franklin Institute*, 307(3); 183-191.
- Mishra, A., Sehra, K., Sahil, S., Joshi, A., Kasturi, P., & Saxena, M. (2020). Memristor Based Cryptographic Information Processing for Secured Communication Systems. *2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)* (s. 167-171). Coimbatore, India: IEEE.
- Mokhtar, S., & Abdullah, W. (2014). Re-model fabricated memristor behavior in LT-SPICE and applied in logic circuit. *2014 IEEE Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE)* (s. 106-110). Penang: IEEE.

- Mullins, J. (2009). Memristor Minds: The Future of Artificial Intelligence. *New Scientist*, 42-45.
- Muthuswamy, B. (2010). Implementing memristor based chaotic circuits. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20(5):1335-1350.
- Muthuswamy, B., & diğ., v. (2014). Memristor modelling. *2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (s. 490-493). Melbourne VIC,: IEEE.
- Mutlu, R. (2018). AC Power Formula for Unsaturated TiO₂ Memristors with Linear Dopant Drift, Small Signal AC Power Formula for All Memristors, and Some Applications for These Formulas. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 51-58.
- Mutlu, R., & Karakulak, E. (2009). Mühendislik eğitiminde kullanılabilecek bir memristör (hafızalı direnç) taklit devresi,. 13. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi*, (s. 311-314).
- Mutlu, R., & Karakulak, E. (2010). Emulator circuit of TiO₂ memristor with linear dopant drift made using analog multiplier. *2010 National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering* (s. 380-384). Bursa: Electrical, Electronics and Computer Engineering (ELECO).
- Mutlu, R., Üstünel, T., & Karakulak, E. (2018). Memristor emulators with symmetric and asymmetric threshold voltages. *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (s. 1-5). Ankara: IEEE.
- Nithya, N., & Paramasivam, K. (2020). A Comprehensive Study on the Characteristics, Complex Materials and Applications of Memristor. *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)* (s. 171-176). Coimbatore, India: IEEE.
- Oster, G., & Auslander, D. (1972). The Memristor: A New Bond Graph Element. *Transactions of ASME*, 72;1-4.
- Pershin, Y. V., & Di Ventra, M. (2012). Teaching memory circuit elements via experimentbased. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 12 (1), 64-74.
- Pershin, Y., & Di Ventra, M. (2010). Practical approach to programmable analog circuits with memristors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 57(8):1857-1864.
- Pickett, M. D., Strukov, D. B., Borghetti, J. L., Yang, J. J., Snider, G. S., & Stewart, D. R. (2009). Switching dynamics in titanium dioxide memristive. *Journal of Applied Physics*, 106 (7), 074508.
- Prodromakis, T., Michelakis, K., & Toumazou, C. (2010). Fabrication and electrical characteristics of memristors with TiO₂/TiO₂+X active layers. *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems* (s. 1520-1522). Paris: ISCAS.

- Raj, N., Ranjan, R. K., & Khateb, F. (2020). Flux-Controlled Memristor Emulator and Its Experimental Results. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 28(4): 1050-1061.
- Ranjan, R., Sagar, S., Roushan, S., Kumari, B., Rani, N., & Khateb, F. (2019). R. K. Ranjan, S. Sagar, S. Roushan, B. Kumari, N. Rani and F. Khateb, High-frequency floating memristor emulator and its experimental results. *IET Circuits, Devices & Systems*, 13(3): 292-302.
- Sánchez-López, C., Mendoza-López, J., Carrasco-Aguilar, M., & Muñoz-Montero, C. (2014). A floating analog Memristor emulator circuit. *IEEE Trans Circuits Syst II Express Briefs*, 309–313.
- Sangwan, V., Lee, H., Bergeron, H., Balla, I., Beck, M., Chen, K., & Hersam, M. (2018). Multi-terminal memtransistors from polycrystalline monolayer MoS₂. *Nature*, 500-554.
- Shadaram, A., Mirzakuchaki, S., & Zakerian, F. (2011). Non-Linear, Ionic Drift, Spice. *Proc. Int. Conf. Circuits, Syst. Simulation*, 242-246.
- Shank, J., Tellekamp, M., Wahila, M., & al., e. (2018). Scalable Memdiodes Exhibiting Rectification and Hysteresis for Neuromorphic Computing. *Scientific Reports*.
- Simmons, J. G., & Verderber, R. R. (1967). New conduction and reversible memory phenomena in thin insulating films. *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 301(1464):77-102.
- Singh, J. L., & Kakade, M. S. (2014). Memristors MATLAB Modeling. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 191-194.
- Snider, G. (2007). Self-organized computation with unreliable, memristive nanodevices. *Nanotechnology*, 18(36):365202.
- Sodhi, A., & Gandhi, G. (2010). Circuit mimicking TiO₂ memristor: a plug and play kit to understand the fourth passive element. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2537-2545.
- Song, D., Ren, X., Lv, M., Li, M., Zhou, H., & Zu, Y. (2013). The Realization and Working Conditions of Memristor Based on Multisim. *Journal of Computer and*, 1 (06), 5.
- Sözen, H., & Çam, U. (2015). New memristor emulator circuit using OTAs and CCIIIs. *2015 9th International Conference on (s. 10-14). Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*.
- Stork, M. (2018). Properties of one type memristor emulator. *2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)* (s. 1-6). Prague: IEEE.
- Strukov, D. B., Snider, G., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). The missing memristor found. *Nature*, 453 (7191), 80-83.
- Şahin, M., & Guler, H. (2017). The design of memristor based high pass filter circuit. *2017 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)* (s. pp. 494-497). Batumi: IEEE.

- Şahin, M., Çam Taşkıran, Z., Güler, H., & Hamamcı, S. (2019). Simulation and implementation of memristive chaotic system and its application for communication systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 107-118.
- Truong, S., Pham, K., Yang, W., & Min, K. (2016). Sequential memristor crossbar for neuromorphic pattern recognition. *IEEE Transactions and nanotechnology*, 5(6):922-930.
- Ventra, M., Pershin, Y., & Chua, L. (2009). Circuit elements with memory: memrsitors, memcapacitors and meminductors. *IEEE*, 97(10), 1717-1724.
- Vishnu, S., Saji, S., Rohit, R., & Ramakrishnan, V. (2016). Application of memristors in active filters. *2016 3rd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)* (s. 84-88). Coimbatore: IEEE.
- Walsh, A., Carley, R., Feely, O., & Ascoly, A. (2013). Memristor Circuit Investigation through a new tutorial toolbox. *IEEE ECCTD Germany 2013*, (s. 1-4).
- Wang, D., Hu, Z., Yu, X., & Yu, J. (2009). A PWL model of memristor and its application. *Communications, Circuits and Systems, 2009* (s. 932-934). ICCCAS 2009.
- Wang, X., Fitch, A., Herbert, H., Sreeram, V., & Qi, W. (2012). Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor. *Chinese Physics B*, 21(10):108501.
- Wang, Z., Chua, L., & Helian, N. (2015). Memristor-based random access memory: The delayed switching effect could revolutionize memory design. *2015 15th Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS)* (s. 1-8). Beijing: IEEE.
- Wei, F., Cui, X., & Cui, X. (2020). An Improved iMemComp OR Gate and its Applications in Logic Circuits. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, (8);57-61.
- Weidon, W., Yu, Q., Xu, C., & Cui, Y. (2009). Study of filter characteristics based on PWL memristor. *Communications, Circuits and Systems, 2009* (s. 969-973). ICCCAS 2009.
- Widrow, B. (1960). *An Adaptive ADALINE Neuron Using Chemical MEMISTORS*. Stanford University: Technical Report, Stanford, 28 s.
- Xiao-Bo, T., & And Hui, X. (2013). The design and simulations of a titanium oxide memristor-nased programmable analog fitler in a simulation program with integrated circuit emphasis. *Chinese Physics B*, 22 (8), 088501.
- Xu, D., & Bao, B. (2013). Modeling analysis and equivalent circuit realization of a flux-controlled memristor. *2013 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)* (s. 495-497). Chengdu: ICCCAS.
- Xu, X., Cui, X., Luo, M., Lin, Q., Luo, Y., & Zhou, Y. (2017). Design of Hybrid Memristor-MOS XOR and XNOR Logic Gates. *2017 International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)* (s. 1-2). Hsinchu: IEEE.

- Yang, J. J., Pickett, M. D., Li, X., Ohlberg, D. A., Stewart, D. R., & Williams, R. S. (2008). Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices. *Nature nanotechnology*, 3 (7), 429-433.
- Yang, Z., Luo, B., Liu, D., & Li, Y. (2020). Adaptive Synchronization of Delayed Memristive Neural Networks With Unknown Parameters. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 50(2): 539-549.
- Yener, Ş. Ç., Mutlu, R., & Kuntman, H. H. (2014). Performance Analysis of a Memristor-Based Biquad Filter Using a Dynamic Model. *Informacije Midem-Journal Of Microelectronics Electronic Components And Materials*, 44 (2): 109-118.
- Yener, Ş. Ç., Mutlu, R., & Kuntman, H. H. (2015). Memristor Temelli Sallen-Key Süzgeçler. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (2).
- Yener, Ş., & Kuntman, H. (2012). A new CMOS based memristor implementation. *2012 International Conference on Applied Electronics* (s. 345-348). Pilsen: IEEE.
- Yener, Ş., Mutlu, R., & Kuntman, H. (2014). Frequency and time domain characteristics of memristor-based filters. *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (s. 2027-2030). Trabzon: IEEE.
- Zhanbossinov, A., Smagulova, K., & James, A. (2016). CMOS-memristor dendrite threshold circuits. *2016 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)* (s. pp. 131-134). Jeju: IEEE.
- Zhang, Y., Cui, M., Shen, L., & Zeng, Z. (2020). Memristive Fuzzy Deep Learning Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1-1.
- Zheng, N., & Mazumder, P. (2020). Artificial Neural Networks in Hardware. *Learning in Energy-Efficient Neuromorphic Computing: Algorithm and Architecture Co-Design* (s. 61-118). içinde Wiley: IEEE Press.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sevgi Gürsul
Doğum Tarihi ve Yeri : 1993- Malatya
E-posta : sevgi.gursul@inonu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2020, İnönü Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- Gürsul, S., & Hamamcı, S. (2019). Comparison of Different Memristör Emulators on Low-Pass Filter Circuit. *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (s. 1-4). Ankara: IEEE.
- Gürsul, S., & Hamamcı, S. E. (2020). Performance Comparison of Various Memristör Emulators on a Phase Shifting Oscillator Circuit. *2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)* (s. 23-27). Antalya: IEEE.