

**DİJİTAL SİSTEM TABANLI PROGRAMLANABİLİR  
MEMRİSTÖR EMÜLATÖR DEVRE TASARIMI**

**DESIGN OF A DIGITAL SYSTEM BASED  
PROGRAMMABLE MEMRISTOR EMULATOR**

**MUSTAFA ASIM KARA**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ DİNÇER GÖKCEN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

Mustafa Asım KARA'nın hazırladığı "Dijital Sistem Tabanlı Programlanabilir Memristör Emülatör Devre Tasarımı" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Derya YILMAZ

Başkan



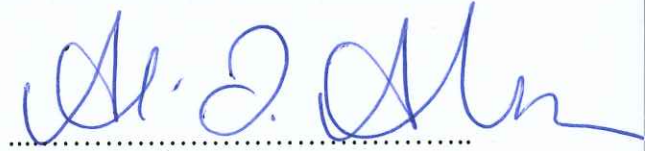
Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN

Danışman



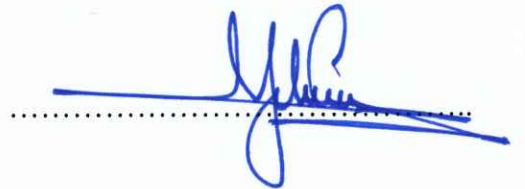
Prof. Dr. Ali Ziya ALKAR

Üye



Prof. Dr. Atila YILMAZ

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Yakup ÖZKAZANÇ

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak ..... / ..... /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18 / 10 / 2019



MUSTAFA ASİM KARA

## YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan "*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren .... ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.

18/10/2019

 (İmza)

MUSTAFA ASIM KARA

## ÖZET

# DİJİTAL SİSTEM TABANLI PROGRAMLANABİLİR MEMRİSTÖR EMÜLATÖR DEVRE TASARIMI

**Mustafa Asım KARA**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN**

**Ekim 2019, 85 sayfa**

Teorisi 1970’li yıllara dayanan fakat fiziksel uygulaması 2008 yılında HP (Hewlett Packard) mühendisleri tarafından duyurulan memristör, dördüncü temel pasif devre elemanı olarak tanımlanmaktadır. Akı ile yük arasındaki ilişkinin bir devre elemanı ile tanımı ilk olarak memristör ile gerçekleştirilmiştir. Memristörün akım-gerilim karakteristiği incelendiğinde ise doğrusal olmayan bir davranış sergilediği görülmektedir. Diğer bir önemli özelliği ise üzerine uygulanan gerilime göre direnç değerinin değişmesi ve uygulanan gerilim kaldırıldığında bile aldığı son direnç değerini korumasıdır. Fiziksel olarak nano boyutlarda bir cihaz olan memristörün gösterdiği bu özellikler sayesinde, kalıcı hafıza yapıları, nöromorfik devreler, dijital kapılar, kaos devreleri ve osilatör devreleri gibi geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Memristör araştırmalarının yaygın olarak devam etmesinin yanında üretimsel bazı nedenlerden dolayı ticari olarak kolaylıkla

ulaşılabilir seviyede değildir. Bu tez kapsamında HP memristör modelini gerçek ortam uygulamalarında gözlemleyebilmek adına dijital sistem tabanlı memristör emülatör devresi üzerinde çalışılmıştır. Emülatör devresinde mikrodenetleyici ve dijital potansiyometreden oluşan bir yapı kullanılmıştır. Memristör davranışlarını gözlemleyebilmek ve gerçek ortamda yapılacak çalışmalarda test ölçütü olarak kullanabilmek adına memristör emülatörü ilk olarak MATLAB Simulink ortamında tasarlanmıştır. Memristör emülatörü benzetim ortamında fonksiyon bloğu ve potansiyometre elemanı kullanılarak gerçek ortama yakın bir şekilde ele alınmış ve davranışları gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmalarını takiben donanım seviyesinde memristör emülatörünün tasarım ve üretimi gerçekleşmiştir. Gerçek ortamda yapılan testlerde memristör emülatörüne farklı sinyal girişleri uygulanmış ve benzetim ortamından alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tasarlanan emülatör devresi daha sonra memristör tabanlı kare dalga osilatörü devresinde kullanılmıştır. Sonuç olarak, çalışmalar tasarlanan programlanabilir memristör emülatörünün gerçek zamanlı uygulamalarda başarıyla çalıştığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Memristör, Dijital Sistem, Memristör Emülatörü, Memristör Tabanlı Osilatörler

## **ABSTRACT**

# **DESIGN OF A DIGITAL SYSTEM BASED PROGRAMMABLE MEMRISTOR EMULATOR**

**Mustafa Asım KARA**

**Graduate, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dinçer GÖKCEN**

**October 2019, 85 pages**

The theory of memristor dates back to the 1970s, but its first physical application was announced by HP (Hewlett Packard) engineers in 2008. Memristor is widely defined as the fourth basic passive circuit element since it realizes the relationship between the flux and the charge. Memristor exhibits non-linear behavior when its current-voltage characteristic is examined. Another crucial feature is that the resistance value changes according to the applied voltage and maintains the last resistance value even if the applied voltage is removed. Thanks to these features of the memristor, which is a physically nano-sized device, it has a wide range of applications such as non-volatile memory structures, neuromorphic circuits, digital gates, chaos circuits and oscillator circuits. Besides HP's announcement of memristor, commercial off the shelf products are limited due to some manufacturing issues. In this thesis, a digital system based memristor emulator circuit is

studied in order to observe HP memristor model in real-time applications. A structure consisting of a microcontroller and a digital potentiometer is used in the emulator circuit. A memristor emulator is first designed in MATLAB Simulink environment in order to observe memristor behavior and use it as a test criterion in hardware-based studies. Following the simulations, the emulator is designed and produced at the hardware level. In hardware-based tests, different signal inputs are applied to the memristor emulator and compared with the results obtained from the simulation environment. The designed emulator circuit is then used in a memristor-based square wave oscillator. Eventually, the studies show that the designed programmable memristor emulator functions successfully in real-time applications.

**Keywords:** Memristor, Digital System, Memristor Emulator, Memristor based oscillators.



## TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca eşsiz bilgi ve tecrübeleriyle bana ışık tutan hocalarıma, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde değerli bilgilerini benimle paylaşıp bana sabırla ve ilgiyle zaman ayıran danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN'e,

Hayatım boyunca her koşulda yanımda olup desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bana güvenen çok kıymetli annem, babam ve kardeşime,

Beni her koşulda motive eden ve anlayışla yaklaşan sevgili eşim Tuğba ve doğacak olan canım oğluma,

Sonsuz Teşekkürler...

Mustafa Asım KARA

Ekim 2019, Ankara

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER .....	x
SİMGELERVE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. MEMRİSTÖR.....	5
2.1. Memristörün Tanımı.....	5
2.2. Memristör Benzetimi .....	7
2.3. HP Memristörü .....	7
2.4. Memristör Özellikleri .....	9
2.5. Akı-Yük İlişkisi .....	9
2.6. Akım-Gerilim İlişkisi .....	10
2.7. Memristif Sistemler .....	11
3. MEMRİSTÖR MODELLERİ.....	13
3.1. Giriş .....	13
3.2. HP Modeli.....	13
3.3. Pencere Fonksiyonları .....	16
3.3.1. HP Pencere Fonksiyonu .....	16
3.3.2. Joglekar ve Wolf Pencere Fonksiyonu .....	17
3.3.3. Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu .....	18
3.3.4. Prodromakis Pencere Fonksiyonu.....	19
3.4. Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenmesi Modeli .....	20

4. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRÜ .....	23
4.1. MATLAB Simulink Benzetimi ve Sonuçlar .....	23
4.2. HP Modeli MATLAB Simulink Benzetimi ve Sonuçlar .....	25
4.3. Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Modeli MATLAB Simulink Benzetimi ve Sonuçlar .....	29
4.4. Memristör Emülatörü Gerçeklemesi ve Sonuçlar .....	32
4.5. HP Modeli Memristör Emülatörü Gerçeklemesi .....	35
4.6. Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Modeli Memristör Emülatörü Gerçeklemesi .....	42
5. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRÜ İLE KARE DALGA OSİLATÖR DEVRESİ GERÇEKLEMESİ .....	56
5.1. Kare Dalga Osilatörü Uygulaması MATLAB Simulink Benzetimi .....	58
5.2. Memristör Emülatörü ile Kare Dalga Osilatörü Gerçeklemesi .....	62
6. SONUÇLAR .....	69
KAYNAKLAR .....	72
EKLER .....	75
ÖZGEÇMİŞ .....	85

## ÇİZELGELER

Çizelge 1- Memristör Emülatörü HP Modeli Benzetim Parametreleri .....	25
Çizelge 2- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde Sinyal Girişine Karşı Farklı Frekanslarda Akım Tepe Değeri .....	27
Çizelge 3- Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Modeli Benzetim Parametreleri .....	29
Çizelge 4- Memristör Emülatörü Gerçeklemede Kullanılan Parametreler .....	34
Çizelge 5- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Ortalama Mutlak Hatalar .....	37
Çizelge 6 Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1.2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Ortalama Mutlak Hatalar .....	38
Çizelge 7- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar .....	40
Çizelge 8- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar .....	41
Çizelge 9- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar.....	45
Çizelge 10- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar.....	48
Çizelge 11- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar.....	52
Çizelge 12- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar.....	55
Çizelge 13- Osilatör Uygulaması Parametreleri.....	58
Çizelge 14- Memristör Tabanlı Osilatör Devresi Farklı $V_n$ Değerleri için Hesaplanan Frekans Değerleri .....	58
Çizelge 15- Farklı Testler Sonucu Benzetim Ortamı Verileri ile Gerçekleme Devresi Verileri Arasındaki Hesaplanan Ortalama Mutlak Hatalar .....	70

Çizelge 16- Kare Dalga Osilatör Devresinde Hesaplanan ve Ölçülen Frekans Değerleri .....	71
Çizelge 17- MATLAB Simulink Benzetiminde Kullanılan Yapılar .....	78

## ŞEKİLLER

Şekil 1- Memristör Uygulamaları [3].....	2
Şekil 2- Tasarımın Bileşenleri ve Akış .....	4
Şekil 3- Temel Devre Elemanları( [2]'den esinlenerek yeniden çizilmiştir.) .....	5
Şekil 4- Memristör Sembolü .....	5
Şekil 5- Memristör Modeli( [2]'den esinlenerek yeniden çizilmiştir) .....	8
Şekil 6- Memristör Modeli( [22]'dan esinlenerek yeniden çizilmiştir) .....	8
Şekil 7- HP Memristörünün Davranışı( [22]'dan esinlenerek yeniden çizilmiştir) .....	9
Şekil 8- Memristörün Örnek Akı-Yük Eğrileri [4] .....	10
Şekil 9- Memristörün Akım-Gerilim Karakteristiği [24].....	11
Şekil 10- Memristör üzerine farklı frekanslarda uygulanan 150µA genliğinde sinüs akım girişi için I-V grafiği [26]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur) .....	14
Şekil 11- 0,1mA Genliğinde 1Hz Kare Dalga Akım Girişi için I-V Grafiği( [26]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur) .....	15
Şekil 12- Memristöre 1.2V Genliğinde 1Hz Sinüs Gerilimi Uygulandığında Oluşan Memristans Grafiği .....	15
Şekil 13- $p$ 'nin Farklı Değerlerinde Joglekar ve Wolf Pencere Fonksiyonu( [27]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur) .....	17
Şekil 14- $p=2$ için Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Grafiği( [9]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur).....	19
Şekil 15- Değişen $p$ Değerine Göre Prodromakis Pencere Fonksiyonu ( $j=1$ )( [28]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur) .....	20
Şekil 16- Değişen $j$ Değerine Göre Prodromakis Pencere Fonksiyonu ( $p=20$ )( [28]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur) .....	20
Şekil 17- 1V Genliğinde Farklı Frekanslardan Oluşan Sinüs Girişi karşılığında oluşan I-V Grafiği( [26]'dan esinlenerek yeniden oluşturulmuştur).....	22
Şekil 18- 1V Genliğinde 0,8Hz Kare Dalga Girişi I-V Eğrisi ( [26]'dan esinlenerek yeniden oluşturulmuştur).....	22
Şekil 19- Benzetim Ortamı Memristör Emülatörü Blok Yapısı.....	24
Şekil 20 - Memristör Emülatörü Yazılım Algoritma Akış Diyagramı.....	24
Şekil 21- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	26

Şekil 22- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde Sinüs Sinyali Girişine Karşı Farklı Frekanslardaki I-V Grafiği .....	27
Şekil 23- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı w/D Oranı Değişim Grafiği .....	28
Şekil 24- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Direnç Değeri Değişimi Grafiği .....	28
Şekil 25- Emülatör Devresinde Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	30
Şekil 26- Emülatör Devresinde Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyon Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği.....	30
Şekil 27- Emülatör Devresinde Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	31
Şekil 28- Emülatör Devresinde Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği.....	31
Şekil 29- STM32F4 Discovery Kartı.....	32
Şekil 30- Mikrodenetleyici Çevre Birimlerinin Memristör Emülatöründe Kullanım Yapısı .....	33
Şekil 31- Memristör Emülatör Devresi Bağlantı Şeması.....	34
Şekil 32- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafiği.....	35
Şekil 33- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Akım-Gerilim Eğrisi .....	36
Şekil 34- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafikleri.....	37
Şekil 35- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1.2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafikleri.....	38
Şekil 36- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	39
Şekil 37- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	41

Şekil 38- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafiği .....	42
Şekil 39- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği .....	43
Şekil 40- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı w/D oranı ...	44
Şekil 41- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	45
Şekil 42- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafiği .....	46
Şekil 43- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Akım-Gerilim Grafiği.....	47
Şekil 44- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	48
Şekil 45- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafiği.....	50
Şekil 46- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği .....	50
Şekil 47- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri.....	51
Şekil 48- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafiği.....	53



Şekil 49- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolk ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği .....	53
Şekil 50- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolk Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri .....	54
Şekil 51- Memristör Tabanlı Reaktif Elemansız Kare Dalga Osilatörü Devresi ( [8]'den esinlenerek yeniden çizilmiştir.) .....	56
Şekil 52- Kare Dalga Osilatörü Blok Gösterimi .....	59
Şekil 53- Scope 5 $V_n=-0,5V$ Olması Durumunda Memristör Direnci Değişimi .....	59
Şekil 54- Scope 25 $V_n=-0,5V$ Olması Durumunda Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	61
Şekil 55- Scope 11 $V_n=-0,5V$ Olması Durumunda AND Kapısı Osilatör Çıkışı.....	61
Şekil 56- Scope 25 $V_n=-0,3V$ Olması Durumunda Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	62
Şekil 57- Scope 11 $V_n=-0,3V$ Olması Durumunda AND Kapısı Osilatör Çıkışı.....	62
Şekil 58- Schmitt Tetikleyici Devresi ve Üst-Alt Tetik Noktaları [35].....	63
Şekil 59- (-0,5V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	64
Şekil 60- (-0,5V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	65
Şekil 61- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması (-0,5V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	65
Şekil 62- (-0,3V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	66
Şekil 63- (-0,3V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	67
Şekil 64- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması (-0,3V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi .....	68
Şekil 65- Memristör Emülatörünün MATLAB Simulink Ortamında Benzetimi .....	75
Şekil 66- Memristör Emülatörlü Kare Dalga Osilatörü Matlab Simulink Benzetimi ....	76
Şekil 67- Memristör Emülatörlü Osilatör Devresi Şematik Gösterimi.....	77
Şekil 68- STM32F4 Mikrodenetleyici Veri Sayfası .....	80
Şekil 69- Dijital Potansiyometre Veri Sayfası .....	81

Şekil 70- İşlemsel Yükselteç Veri Sayfası .....	82
Şekil 71-AND Kapısı Veri Sayfası .....	83

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$v$	Voltaj
$i$	Akım
$q$	Yük
$\varphi$	Akı
$R$	Direnç
$C$	Kapasitör
$L$	İndüktör
$f$	Frekans
$M(q)$	Memristans
$W(\varphi)$	Memdüktans
Pt	Platin
$w$	Memristörde katkılı bölgenin uzunluğu
$D$	Memristörde titanyum dioksit filminin toplam genişliği
$R_{ON}$	$w$ değeri $D$ 'ye eşit olduğunda oluşan memristör direnci
$R_{OFF}$	$w$ değeri sıfıra eşit olduğunda oluşan memristör direnci
$R_{mn}$	Osilatör uygulamasında memristörün alacağı en düşük direnç
$R_{mp}$	Osilatör uygulamasında memristörün alacağı en yüksek direnç
$V_{oh}$	Osilatör devresinin yüksek seviye ( <i>İng.</i> High Level) gerilim çıkışı
$V_{ol}$	Osilatör devresinin düşük seviye ( <i>İng.</i> Low Level) gerilim çıkışı

$V_p$	Osilatör devresinde kullanılan pozitif referans gerilimi
$V_n$	Osilatör devresinde kullanılan negatif referans gerilimi
$TiO_2$	Titanyum dioksit
$TiO_{2-x}$	Oksijen eksikliği içeren titanyum dioksit
$p$	Pencere Fonksiyonu doğrusallık katsayısı
$j$	Pencere Fonksiyonunun maksimum değerini belirleyen kontrol katsayısı
$n$	Doğrusal olmayan iyon sürüklenme modelinde durum değişkeninin akıma olan etkisini belirleyen katsayı
$\mu_v$	Ortalama sürüklenme hareketliliği
$P$	Güç
$\Omega$	Ohm
$k\Omega$	Kiloohm
$M\Omega$	Megaohm

### **Kısaltmalar**

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken)
ReRAM	Resistive Random Access Memory (Rezistif Rasgele Erişimli Bellek)
NVRAM	Non-Volatile Random Access Memory (Kalıcı Rastgele Erişimli Bellek)
DRAM	Dynamic Random Access Memory (Dinamik Rastgele Erişimli Bellek)

HP	Hewlett-Packard
FPU	Floating Point Unit (Matematiksel İşlem Birimi)
ADC	Analog to Digital Converter (Analog-Dijital Dönüştürücü)
SPI	Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arayüz)
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Evrensel Asenkron Alıcı/Verici)
ARM	Acorn RISC Machine
CSV	Comma Separated Values (Virgülle Ayrılmış Değerler)
UTP	Upper Threshold Point (Üst Eşik Noktası)
LTP	Lower Threshold Point (Alt Eşik Noktası)



# 1. GİRİŞ

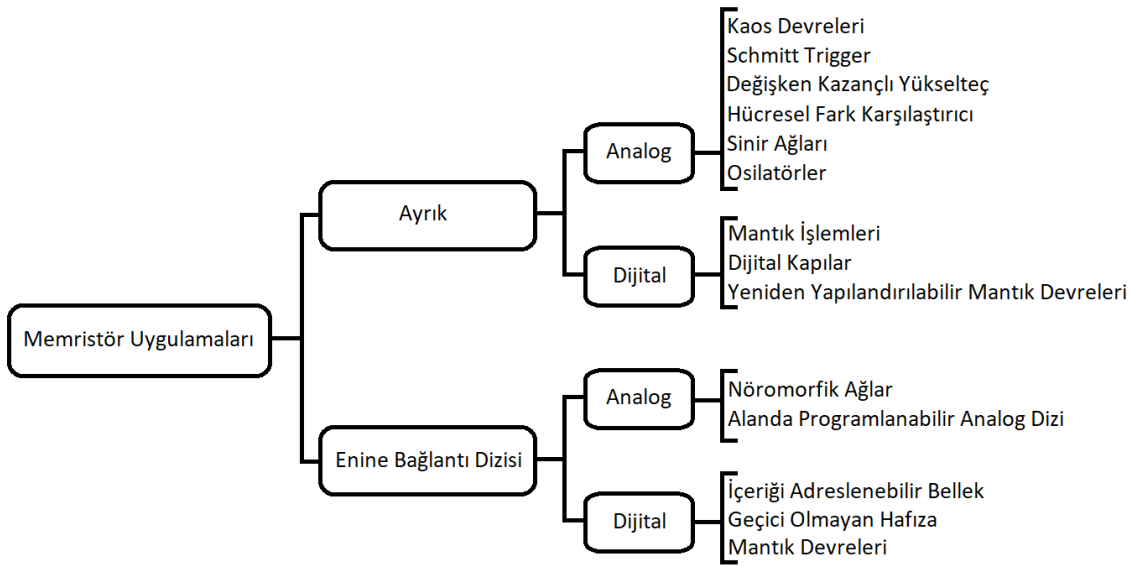
L. Chua 1971 yılında manyetik akı ve yük arasında bağlantıyı tamamlayan, iki uçlu pasif bir devre elemanın tanımlanması gerektiğini belirtmiştir [1]. Bu devre elemanını hafızası olan ve doğrusal olmayan bir direnç olarak tanımladığından, İngilizce hafıza (memory) ve direnç (resistor) kelimelerinin birleşimiyle memristör olarak adlandırılmıştır. Cihazdan geçen elektrik yük miktarı ile manyetik akı arasında ilişki bulunmaktadır [1]. 2008 yılında Hewlett Packard (HP) laboratuvarlarından bir grup bilim insanının nano boyutta memristör dizinlerini üretmiş ve akım-gerilim karakteristiğini ilk olarak modellemiştir [2]. Günümüzdeki uygulama alanları ve mikroelektronik endüstrisinin yeni malzemelere olan talebi memristör çalışmalarına hız katmıştır. Memristörün en temel özelliği üzerine uygulanan gerilime göre direncinin değişmesi ve uygulanan gerilim kaldırıldığında direnç değerinin sabit kalmasıdır [2].

Memristörün uygulama alanları üç temel sınıfa ayrılabilir. Bunlar kalıcı memristif hafıza yapıları, analog-dijital sistemler ve nöromorfik sistem uygulamalarıdır [3]. Memristörün son direnç değerini koruyabilmesi ve düşük güç tüketimiyle birlikte nanometre boyutunda olması, yüksek yoğunlukta hafıza yapılarında kullanılmasına imkân sağlamaktadır [4]. Kalıcı ReRAM bellekleri memristörün hafıza yapısı uygulamalarına örnek gösterilebilir. L. Chua, iki bacaklı kalıcı hafıza özelliği taşıyan direnç anahtarlama yapılarının, cihazın malzemesinden ve çalışma mekanizmasından bağımsız olarak memristör olarak kabul edilmesi gerektiğini belirtmiştir [5]. Direnç anahtarlama hafızalarının (ReRAM) sahip oldukları akım-gerilim histerezis döngüsünün memristörün akım-gerilim histerezis döngüsüne benzer davranış sergilemesi, bu hafıza tiplerinin aslında bir memristör olduğunun başka bir göstergesidir [5]. Bu tip hafızaların çalışma yapısı, “1” ve “0” olmak üzere iki farklı seviyedeki mantıksal değerden oluşur. Memristörün düşük direnç değerinde olması mantıksal seviyede “1” yani iletim durumuna karşılık gelir. Yüksek direnç değerinde olması mantıksal seviyede “0” yani tükama durumuna karşılık gelir [6].

Memristörün çalışma prensibi beyindeki sinir sisteminin yapıtaşı olan bir sinapsın işlevine oldukça benzediği için nöromorfik devrelerde kullanım alanları bulunmaktadır [4]. İnsanların beyindeki sinir ağları, güçlü veya zayıf bağlantılar oluşturabilir. Nöronların işlevlerinde doğrusal olmayan bağılıklar oluşabilmektedir. Nöronlardaki bu

doğrusal olmayan bağılıkları yapay zekâ alanında fiziksel devrelere aktarabilmek için en iyi aygıtın memristör olduğu düşünülmektedir [4].

Memristörün dijital ortam uygulamasına örnek olarak Lehtonen vd. [7] tarafından önerilen tüm Boolean fonksiyonlarının hesaplanmasında kullanılabilir, iki memristör elemanından oluşan yapı gösterilebilir. Memristörün düşük ve yüksek direnç durumları bu uygulamada mantıksal olarak “1” ve “0” seviyelerine karşılık gelmektedir. Analog devre uygulaması olarak, osilatör devreleri için de memristör kullanımı önerilmiştir [8]. Memristöre uygulanan gerilime göre direnç değerinin artıp azalma özelliği, reaktif elemanların dolma boşalma davranışına benzetmesinden dolayı bu tip devrelerde kullanılabilirliği ifade edilmiştir. Ayrıca memristörün direnç hafızası özelliğini bu devrelerde reaktif elemanların enerji depolama ihtiyacı için kullanılabilirliği belirtilmiştir [8]. Tez çalışması kapsamında tasarlanan memristör emülatörü, osilatör uygulamasında kullanılmıştır. Şekil 1’de çeşitli memristör uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 1- Memristör Uygulamaları [3]

Memristör üzerine gerek bilgisayar ortamındaki benzetim modelleri gerekse de emülatör devreleri ile davranışlarının gözlenebileceği alternatif çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları memristörlerin SPICE modelleri üzerine yapılmıştır [9-12]. Memristör özelliklerinin gerçekte de gözlenebilmesi için fiziksel olarak uygulanabilir memristör emülatör devreleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. A/D çevirici, dijital potansiyometre ve mikrodenetleyici kullanarak [13], FPGA tabanlı bir modelleme ile [14] ve analog devre tasarımı ile [15-19] emülatör devreleri tasarlanmıştır.

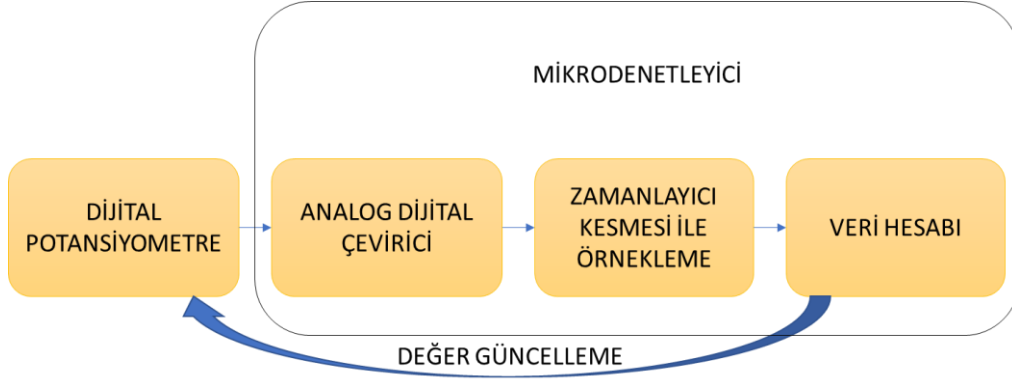


Bu çalışmada iki ana hedef belirlenmiştir. Bunlardan ilki dijital sistem tabanlı bir memristör emülatörünün MATLAB Simulink ortamında tasarımını yapmaktır. Benzetim ortamından alınan sonuçlar, gerçek ortamda uygulaması yapılacak olan memristör emülatörü devresinden alınacak sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Aynı zamanda benzetim ortamında kurgulanan devrenin ve memristör modeli algoritmasının, gerçek ortam uygulaması öncesi testleri yapılarak davranışları incelenebilecektir. İkinci hedef ise memristör emülatörünün gerçek ortamda uygulanması ve kare dalga osilatörü devresinde kullanarak devre içinde kullanılabilirliğinin gösterilmesidir.

Memristör emülatörünün kullanım açısından uygun olması için satın alınabilir ürünlerle uygulanabilir olması, memristörün kalıcı hafıza özelliğini uzun süreli veya sürekli taşıması, hem darbe hem sürekli giriş sinyalleriyle çalışabilmesi, giriş ve çıkış sinyallerinin sadece toprak referansına göre olmayan işlemleri de desteklemesi, geniş memristans direnç aralığının bulunması gibi özellikleri taşıması önemlidir [19].

Tez kapsamında memristör emülatör devresi, mikrodenetleyici ve dijital potansiyometre kullanılarak tasarlanmıştır. Potansiyometrenin değişebilen direnç özelliğine ek olarak dijital olarak kontrol sağlanabildiğinden, mikrodenetleyici üzerinde koşturulacak bir memristör modeli algoritması ile dijital potansiyometrenin devre içerisinde memristör elemanı gibi davranması sağlanabilmektedir. Ayrıca dijital potansiyometrenin hem darbe hem sürekli giriş sinyalleriyle çalışabilmesi, giriş çıkış sinyallerinin sadece toprak referansına göre olma zorunluluğunun bulunmaması, memristör direnç aralığının geniş olması ve programlanabilir olması sayesinde farklı memristör model ve parametrelerinin uygulanmasına açık bir yapısı olması, dijital sistem tabanlı tasarımın tercih sebeplerindedir.

Şekil 2’de tasarımı oluşturan bileşenlerin blok şeması görülmektedir. Bu şemada mikrodenetleyici içerisinde hangi yapıların kullanıldığı ve bunların hangi akışta çalıştığı ile birlikte dijital potansiyometre ile olan bağlantı da gösterilmiştir. Dijital potansiyometre üzerindeki gerilim ve/veya üzerinden geçen akım değeri mikrodenetleyicinin dahili analog dijital çeviricileri üzerinden dijital hale getirilerek ayarlanan zamanlayıcı kesmesi değerine göre belirli bir frekansta örneklenir. Mikrodenetleyici içerisinde gömülü yazılımda koşan memristör algoritması örneklenen bu gerilim değerini kullanarak direncin yeni değeri hesaplar ve dijital potansiyometreye haberleşme arayüzü üzerinden gönderilir.



Şekil 2- Tasarımın Bileşenleri ve Akış

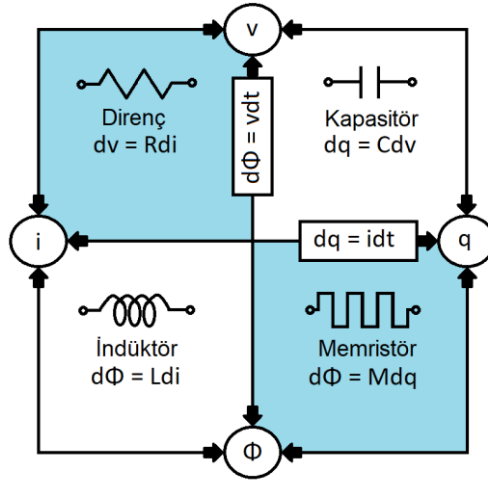
Çalışmanın ikinci bölümünde memristör konusu ele alınmıştır. Üçüncü bölümde memristör modelleri ve pencere fonksiyonları üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde, dijital sistem tabanlı memristör emülatörü üzerinde durulmuştur. Hem benzetim hem de gerçek ortamda kurulan devrelerden alınan sonuçlar incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde ise memristör emülatörü tabanlı kare dalga osilatör devresi üzerinde çalışılmıştır. Yine bu bölümde de hem benzetim hem de gerçek ortamda testler yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde ise elde edilen sonuçlar üzerinde durulmuş, tablolar halinde verilen hata farkları üzerinden uygulamaların başarı düzeyi ortaya konmuştur.

## 2. MEMRİSTÖR

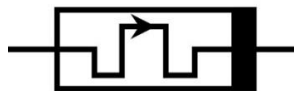
### 2.1. Memristörün Tanımı

Devre teorisinde gerilim ( $v$ ), akım ( $i$ ), yük ( $q$ ) ve akı ( $\phi$ ) olarak adlandırdığımız dört değişkenin birbiriyle altı farklı kombinasyonda ilişkisi bulunabilir. Bu kombinasyonlardan beşi için belirli bir tanım mevcuttur. Pasif devre elemanlarından direnç ( $R$ ) gerilim ve akım arasındaki, kapasitör ( $C$ ) gerilim ve yük arasındaki, indüktör ( $L$ ) akım ve akı arasındaki ilişkiyi tanımlar. Diğer iki kombinasyon ise Faraday kanunu ile tanımlanır. Bunlardan ilki yükün zamana göre türevinin akıma eşit olması, ikincisi ise manyetik akının zamana göre türevinin gerilime eşit olmasıdır. Burada tanımlanmayan tek bağlantı yük ( $q$ ) ve akı ( $\phi$ ) arasındaki bağlantıdır [1]. Bağlantıların şekil üzerinde gösterimi Şekil 3'te mevcuttur.

L.Chua 1971 yılında yük ( $q$ ) ve akı ( $\phi$ ) arasındaki bu bağlantıyı memristör adını verdiği iki uçlu pasif bir devre elemanı ile tanımlamıştır [1]. Memristörün bilim camiasında kabul görmüş olan sembolü Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3- Temel Devre Elemanları( [2]'den esinlenerek yeniden çizilmiştir.)



Şekil 4- Memristör Sembolü

Akı ile yükün arasındaki ilişki, yükün veya akımın bir fonksiyonu şeklinde ifade edilmesine bağlı olarak memristör, “yük kontrollü memristör” ve “akı kontrollü memristör” olmak üzere iki farklı şekilde ifade edilir [1, 5].

Yük kontrollü memristör için,

$$\varphi = f(q) \quad (1)$$

Eşitlik 1’in türevi alınır;

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{df(q)}{dq} \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de akı( $\varphi$ ) ve yükün ( $q$ ) zamana göre türevlerinin yerine gerilim ve akım ifadeleri yazılırsa;

$$v(t) = \frac{d\varphi}{dt} \text{ ve } i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (3)$$

$$v(t) = M(q)i(t) \quad (4)$$

$$M(q) = \frac{df(q)}{dq} \quad (5)$$

Eşitlik 4 ve Eşitlik 5’te  $M(q)$  ile gösterilen ifade memristans olarak adlandırılır ve dirence benzer olarak birimi  $\Omega$ ’dur.

Akı kontrollü memristör için eşitlikler ise aşağıdaki gibidir.

$$q = f(\varphi) \quad (6)$$

Eşitlik 6’nın türevi alınır;

$$\frac{dq}{dt} = \frac{df(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

Eşitlik 7’de yük ( $q$ ) ve akımın( $\varphi$ ) zamana göre türevlerinin yerine gerilim ve akım ifadeleri yazılırsa;

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \text{ ve } v(t) = \frac{d\varphi}{dt} \quad (8)$$

$$i(t) = W(\varphi)v(t) \quad (9)$$

$$W(\varphi) = \frac{df(\varphi)}{d\varphi} \quad (10)$$

Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'da  $W(\varphi)$  memdüktans olarak adlandırılır ve iletkenliğe benzer olarak birimi Siemens'tir.

Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'te bahsi geçen memristans ( $M$ ), sabit bir değer olarak düşünüldüğünde direnç ile aynı özelliktedir ve doğrusal bir davranış göstermektedir. Fakat yükün bir fonksiyonu olması sebebiyle memristans, doğrusal olmayan bir davranış sergiler [2].

Memristör direnci olan memristans ( $M$ ), yük ve manyetik akı arasındaki ilişkiyi olarak tanımlar. Memristans değeri, üzerinden geçen akımın bir yönde akması durumunda artarken, ters yönde akması durumunda azalır. Üzerine uygulanan gerilim kaldırıldığında direnç değeri son değerini korur [1, 5].

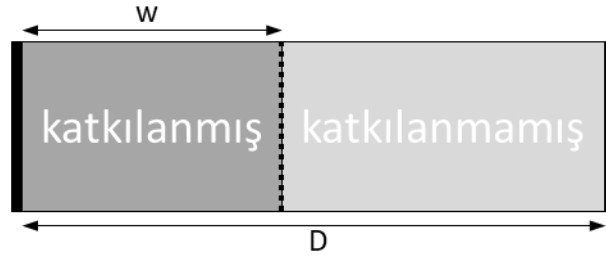
## 2.2. Memristör Benzetimi

Tanımı gereği, direnç, su taşıyan bir boruya benzetilebilir. Suyun kendisini elektrik yüküne, borunun girişindeki basınç uygulanan gerilime, suyun akış hızı akıma benzetilebilir. Devre elemanı olan dirençte olduğu gibi, eğer boru daha kısa ve/veya daha geniş çapa sahipse borudan geçen suyun hızı daha fazla olur. Memristör için de bu benzetim, içinden su geçtiği durumda genişleyen veya daralan su borusu şeklinde farklılaştırılabilir. Borunun içinden geçen su bir yönde akarken borunun çapı artar ve suyun geçişi hızlanır. Diğer yönde akarken ise borunun çapı azalır ve suyun geçişi yavaşlar. Su akışı tamamen kesildiği durumda, su yeniden gelene kadar borunun çapı en son değerinde kalır [20].

## 2.3. HP Memristörü

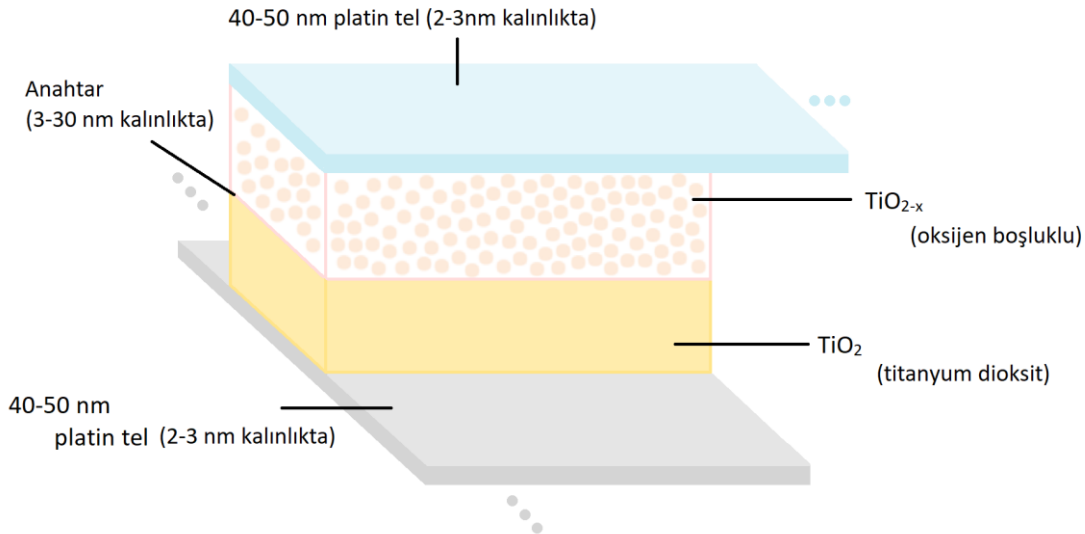
Leon Chua'nın [1] makalesinden sonra 2008 yılında HP Laboratuvarlarından bir grup bilim insanı memristörün üretildiğini kayıp devre elemanı tabirini kullanarak duyurdu [2]. HP ekibi, Chua'nın öngördüğü matematiksel formüllerine dayanarak memristörün temel devre modelini ortaya koydular. Geliştirdikleri model, iki platin (Pt) kontak arasına sıkıştırılmış  $TiO_2$  ince filminden oluşan bir aygıt için kullanılmıştır.  $TiO_2$ 'nin bir tarafı pozitif yüklü iyonlar olan oksijen boşluklarıyla katkılanmıştır. Dolayısıyla bu işlem, katkılı (düşük dirençli) ve katkısız (yüksek dirençli) olmak üzere iki farklı bölge ortaya çıkarmaktadır. Cihaz üzerine bir gerilim uygulandığında yüklü katkılanmış iyonların kaymasına neden olarak iki bölge arasındaki sınırı hareket ettirir. Şekil 5'teki memristör modelinde görülebileceği üzere katkılı bölgenin uzunluğu ( $w$ ) sifıra eşit olduğunda

yalıtkan bir kanal ( $R_{off}$ ),  $D$ 'ye eşit olduğunda ise iletken bir kanal ( $R_{on}$ ) oluşmaktadır [2, 21].



Şekil 5- Memristör Modeli( [2]'den esinlenerek yeniden çizilmiştir)

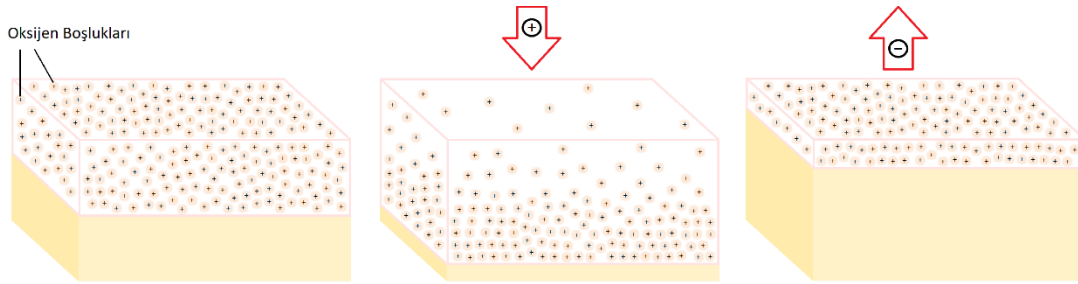
Şekil 6'daki modelde titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) iki katmandan oluşmaktadır. Yalıtkan olan alt  $TiO_2$  katmanı tam olarak 2'ye 1 oksijen-titanyum oranına sahiptir. Üst  $TiO_2$  katmanında ise 0,5 oranındaki oksijen azaltıldığından oksijen boşlukları bulunmaktadır. ( $TiO_{2-x}$ ). Boşluklar  $TiO_{2-x}$  malzemesinin metalik ve iletken olmasını sağlamaktadır [22].



Şekil 6- Memristör Modeli( [22]'dan esinlenerek yeniden çizilmiştir)

Şekil 7'de memristör modeline gerilim uygulanması durumundaki davranışı açıklanmaktadır. Memristöre pozitif gerilim uygulandığında pozitif yüklü oksijen boşlukları püskürtülerek metalik olan  $TiO_{2-x}$  katmanından, katkısız (yalıtkan)  $TiO_2$  katmanına doğru hareket ederler. Bu durum yalıtım yüzdesini dolayısıyla da direnci düşürür. Negatif bir gerilim uygulandığında ise pozitif yüklü oksijen boşlukları çekilerek

katkılı bölgeye doğru hareket ederler. Bu durum ise yalıtım yüzdesini artırarak direncin artmasına neden olur.



Şekil 7- HP Memristörünün Davranışı( [22]'dan esinlenerek yeniden çizilmiştir)

Gerilim uygulanmadığında ise iki bölge de son halinde sabit kalır. Bu durum memristöre hafıza özelliğini kazandırmaktadır [22].

HP tarafından çalışılmış memristans modeli Eşitlik 11'de verilmiştir:

$$M(q) = R_{OFF} \left( 1 - \frac{\mu_V R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (11)$$

$\mu_V$  değeri ortalama sürüklenme hareketliliği,  $D$  değeri titanyum dioksit filminin toplam genişliği,  $R_{ON}$  ve  $R_{OFF}$  değerleri sırasıyla  $w=D$  ve  $w=0$  olduğunda memristörün sınır direnç değerleri,  $q(t)$  ise memristör üzerinden geçen toplam yükü göstermektedir [2].

## 2.4. Memristör Özellikleri

## 2.5. Akı-Yük İlişkisi

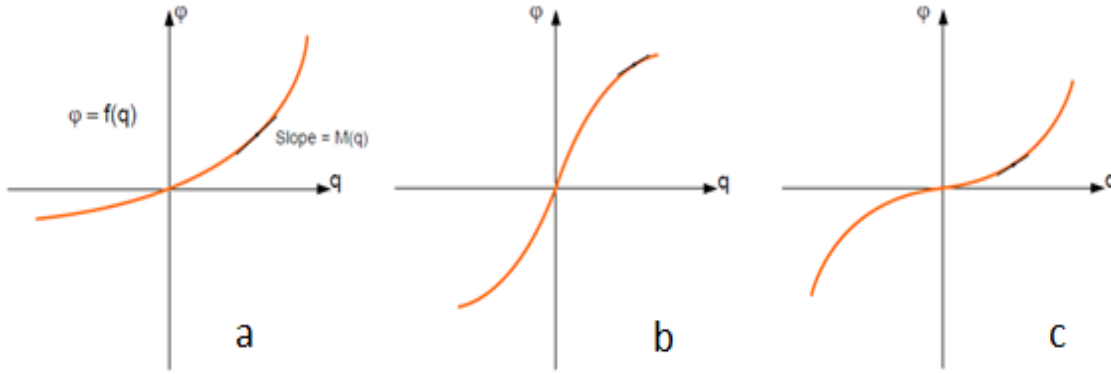
Pasiflik koşuluna göre, memristans sadece negatif olmayan bir değer aldığımda memristör pasif bir elemandır [23]. Memristör tarafından harcanan güç aşağıda verildiği gibidir:

$$P(i) = M(q)i(t)^2 \quad (12)$$

$M(q) \geq 0$  olduğundan, harcanan güç her zaman pozitifdir. Buradan memristörün enerjii depolayamadığı veya oluşturamadığını, sadece harcayabildiği dolayısıyla memristörün pasif bir eleman olduğu anlaşılmaktadır. Bu yüzden  $q$ - $\varphi$  eğrisi orijin noktasından geçmesi gerekmektedir. Doğrusal bir bağlantı standart direnç özelliği oluşturacağından dolayı  $q$  ve  $\varphi$  arasındaki ilişki doğrusal olmayan, eğimi memristans olan, monoton artan bir

karakteristiğe sahip olmalıdır. Hem memristans  $M(q)$  hem de memdüktans  $W(\varphi)$  sabit olmayan pozitif değerlidir [4, 23].

Şekil 8’de memristör akı-yük karakteristiğinin tipik üç farklı örneği verilmiştir. Bu grafiklerin ortak özelliği hepsinin monoton artan karakteristik göstermesidir.



Şekil 8- Memristörün Örnek Akı-Yük Eğrileri [4]

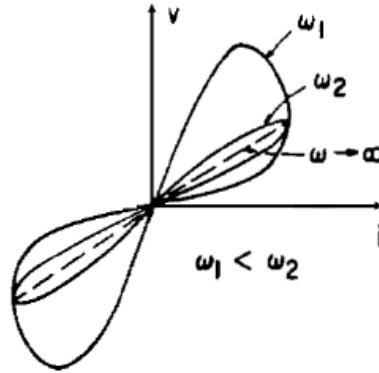
## 2.6. Akım-Gerilim İlişkisi

Memristörün akım-gerilim karakteristiği kendisinin doğrusal olmama özelliğini göstermektedir. Akım ve gerilim arasındaki doğrusal ilişki standart dirençler için geçerlidir. Fakat memristans değeri yüke bağlı bir fonksiyon olduğu için, akım-gerilim arasında doğrusal olmayan bir ilişki oluşturur. Şekil 9’da histerezis eğrisi olarak görülen bu şekil, memristör üzerine uygulanan sinyalin frekansına göre değişkenlik gösterir. Frekansı artırmak (Şekil 9’da  $\omega = 2\pi f$ ) histerezis döngüsünün daralmasına neden olur. Bunun sebebi şu şekilde açıklanabilir; Memristörün durum değişkeninin ( $w$ ) akım ile ilişkisi zamana bağlı bir fonksiyon olması sebebiyle frekansın artması memristör üzerinden geçen akımın süresinin azalmasına neden olur ve durum değişkeninin değişim hızı azalır. Durum değişkeninin değişim hızı azaldığında bu süre içerisinde memristörün direnç değişim miktarı azalır. Frekans sonsuza yakınsadığında durum değişkeni hiç değişmeyerek memristörün doğrusal direnç davranışı sergilemesine neden olur ve akım-gerilim histerezis eğrisi doğrusal bir görüntü oluşturur [4, 22].

Şekil 9’da gösterilen döngü, memristörün anahtarlama davranışı hakkında da bilgi vermektedir. Yüksek direnç ile başlayan cihazın üzerindeki gerilim arttıkça, akım değeri de yavaşça artar. Üzerinden yük geçtikçe direnç değeri düşer ve maksimum değerine ulaşıncaya kadar akım daha hızlı bir şekilde artmaya başlar. Sonrasında gerilim düştükçe



akım yavaşça azalmaya başlar çünkü cihazın üzerinden yük geçmeye devam etmekte ve direnç hala düşmektedir. Gerilim negatif değere döndüğünde cihazın direnci artar ve tıkama durumuna geçerek anahtarlama döngüsü oluşturur [4, 22].



Şekil 9- Memristörün Akım-Gerilim Karakteristiği [24]

## 2.7. Memristif Sistemler

Memristörün hafızaya sahip doğrusal olmayan bir direnç özelliği göstermesi bir dizi fiziksel cihazın ve sistemin modellenmesi sağlamıştır. Nitelikleri memristörün özelliklerine benzer, ancak memristör tarafından gerçekçi bir şekilde modellenemeyen daha geniş bir fiziksel cihaz ve sistemler bulunmaktadır. Bunun nedeni olarak memristörün, 1976'da L.Chua ve M.Kang tarafından memristif sistemler adı verilen genel bir dinamik sistem sınıfının özel bir durumu olduğu ifade edilmiştir [24]. Buna göre akım kontrollü memristif sistemler aşağıda Eşitlik 13 ve Eşitlik 14'te gösterilmiştir:

$$y = g(w, u, t)u \quad (13)$$

$$\frac{dw}{dt} = f(w, u, t) \quad (14)$$

Burada  $w$  durum değişkenini,  $u$  ve  $y$  ise sırasıyla sistemin girişi ve çıkışını ifade etmektedir.  $u$  ve  $y$  değişkenleri yerine akım ve gerilim kullanılarak akım kontrollü veya gerilim kontrollü memristif sistem eşitlikleri elde edilebilir [24]. Akım kontrollü memristif sistem Eşitlik 15 ve Eşitlik 16'daki gibi ifade edilebilir;

$$v = R(w, i, t)i \quad (15)$$

$$\frac{dw}{dt} = f(w, i, t) \quad (16)$$

Temel memristif sistem teoremine göre, herhangi bir frekansta doğru akım veya sinüs dalgası ile sürülen iki bacaklı bir cihaz, akım-gerilim karakteristiği Şekil 9'daki gibi histerezis döngüsü Şeklinde ise bir memristif sistemdir [5, 25].

### 3. MEMRİSTÖR MODELLERİ

#### 3.1. Giriş

Bu bölümde memristör modellerinden HP Modeli ve Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenmesi Modeli üzerinde durulmuştur. Farklı pencere fonksiyonlarından ise HP [2], Joglekar-Wolf [26], Biolek-Biolkova [9] ve Prodromakis [27] ele alınmıştır. Memristör emülatörünün gerçek ortam uygulamasında HP memristör modeli kullanılacaktır. Doğrusal olmayan iyon sürüklenme modelinin gerçek ortamda uygulanabilmesi için  $\sim 1M\Omega$  değerinde dijital potansiyometreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerde üretilen dijital potansiyometre modelleri bulunsa da bu üründen tedarik edilmemiştir. Sadece benzetim ortamında tasarlanan emülatör devresinde uygulaması yapılmıştır. Pencere fonksiyonlarından ise Biolek ve Biolkova pencere fonksiyonu memristör emülatörü uygulamasında kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılması, memristörün anahtarlama davranışlarını diğer pencere fonksiyonlarına göre daha iyi modellemesi gibi nedenlerden dolayı Biolek ve Biolkova pencere fonksiyonu tercih edilmiştir.

#### 3.2. HP Modeli

HP Laboratuvarları yayınladığı makalede [2], 2.3 başlığında da anlatılan kurdukları fiziksel yapıya uygun bir model ortaya koydu. Doğrusal iyon sürüklenme modeli olarak da adlandırılan bu modelde Şekil 5’te görülebileceği gibi fiziksel olarak toplam genişliği  $D$  olan ve iki bölgeden oluşur. Bir taraf katkılanmış pozitif oksijen iyonlarından oluşurken, diğer taraf katkılanmamış haldedir. Genişliği  $w$  ile gösterilen katkılanmış bölgenin direnci daha düşük, katkılanmamış bölgenin ise daha yüksektir. Ayrıca iletkenlik ve elektrik alan eşit dağılımlı, iyonların sürüklenmesi doğrusal ve iyonların ortalama iyon mobilitelerinin ( $\mu_v$ ) eşit olduğu varsayılmaktadır.  $R_{ON}$  değeri  $w=D$  olduğu durumdaki direnç değerini,  $R_{OFF}$  ise  $w=0$  olduğu durumdaki direnç değerini göstermektedir [2].

$$v(t) = \left( R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t) \quad (17)$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} i(t) \quad (18)$$

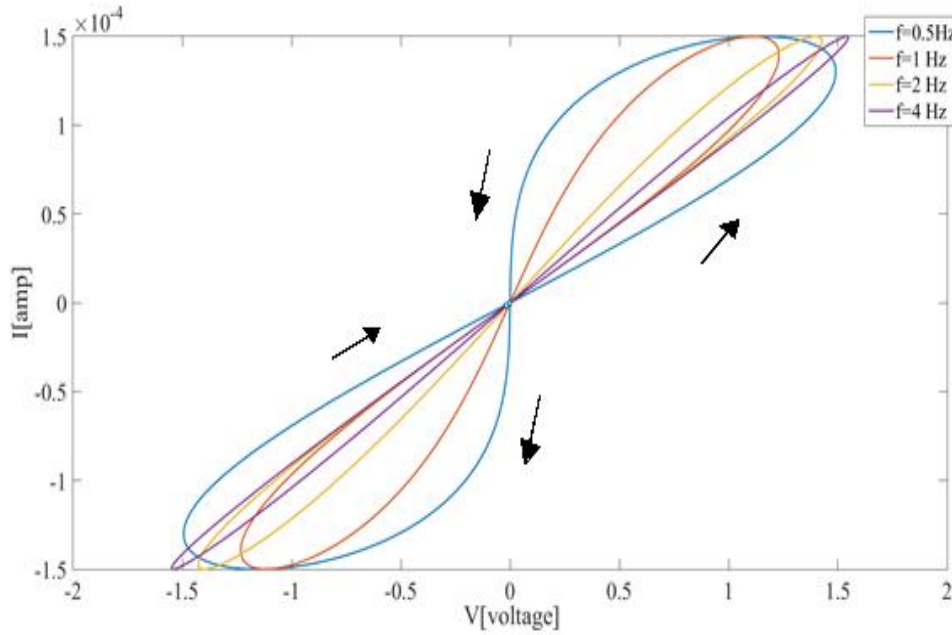
Eşitlik 18’de her iki tarafın integralini aldığımız durumda Eşitlik 19 ortaya çıkmaktadır:

$$w(t) = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (19)$$

Eşitlik 19’u Eşitlik 17’de yerine koyduğumuz durumda ve  $R_{ON} \ll R_{OFF}$  olarak kabul ettiğimiz durumda basitleştirilmiş şekliyle sistemin memristans değeri Eşitlik 20’de görülmektedir.

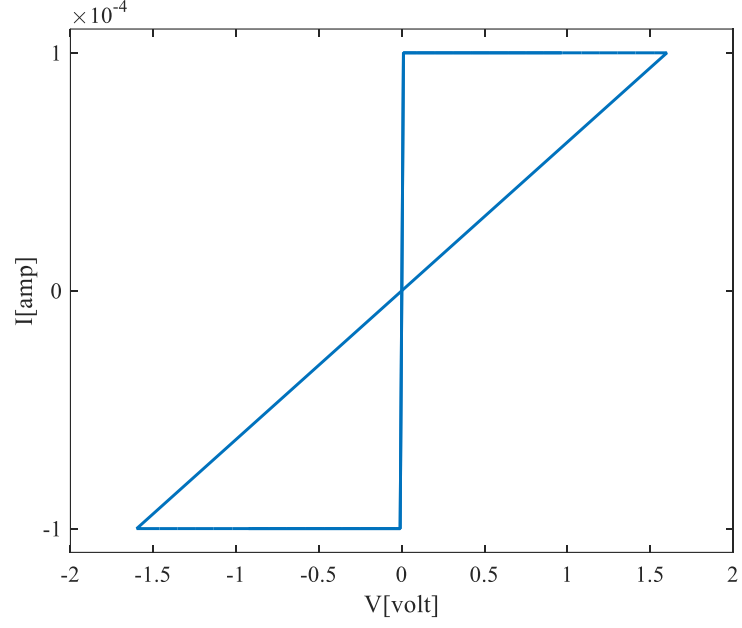
$$M(q) = R_{OFF} \left( 1 - \frac{\mu_V R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (20)$$

Şekil 10 ve Şekil 11’de doğrusal iyon sürüklenme modeli için memristörün akım-gerilim karakteristiği görülmektedir. Her iki şekilde de  $D=10\text{nm}$ ,  $R_{ON}=100\Omega$ ,  $R_{OFF}=16\text{k}\Omega$ ,  $\mu_V = 10^{-14}\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$  olarak alınmıştır [2].



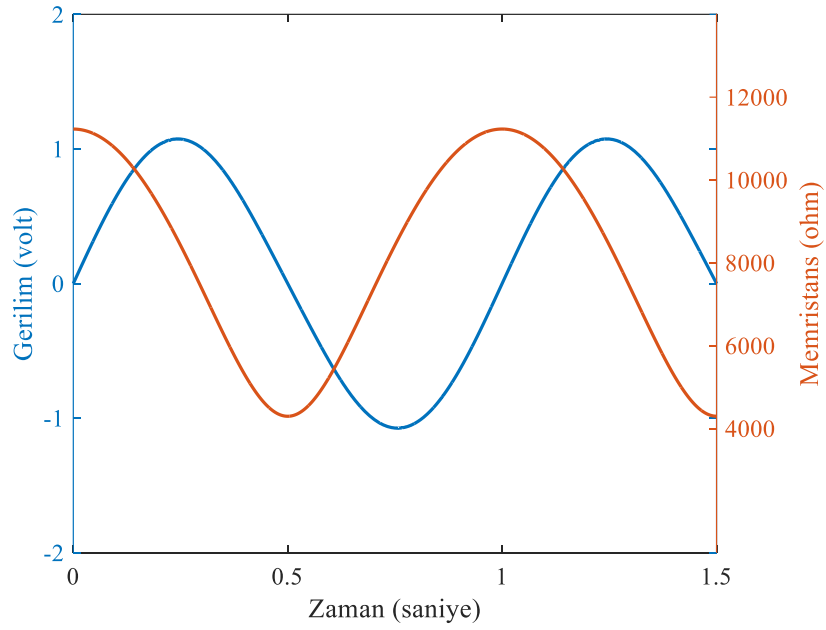
Şekil 10- Memristör üzerine farklı frekanslarda uygulanan  $150\mu\text{A}$  genliğinde sinüs akım girişi için I-V grafiği [26]’den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)

Şekil 10’da farklı frekanslarda uygulanan akım girişi sonucu oluşan akım-gerilim grafiği memristörün üzerinden geçen akıma göre direnç değerinin değiştiği, değişen direnç değerine göre de akım-gerilim arasında doğrusal olmayan bir davranışa neden olduğu görülebilir. Frekans arttıkça doğrusal olmama durumunda azalma mevcuttur. Frekans sonsuza yakınsadığında memristör, doğrusal bir direnç davranışı gösterir. Şekil 11’de ise memristör girişine  $0,1\text{mA}$  genliğinde  $1\text{Hz}$  kare dalga giriş sinyali uygulanmıştır. Kare dalga sinyalinde sabit olarak tek değerde akım verildiği için (pozitif ve negatif bölgelerde) memristör üzerinden zamana göre daha fazla yük geçmektedir. Bu durumda memristör direncinin değişimi daha fazla olmaktadır.



Şekil 11- 0,1mA Genliğinde 1Hz Kare Dalga Akım Girişi için I-V Grafiği( [26]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)

Şekil 12'de memristöre uygulanan 1,2V genliğinde 1Hz sinüs dalgası şeklindeki gerilim ile oluşan memristans grafiği görülmektedir. Memristör üzerindeki gerilim pozitif bölgede arttıkça memristörün direnci düşmeye başlar ve daha iletken bir yapı oluşur.



Şekil 12- Memristöre 1.2V Genliğinde 1Hz Sinüs Gerilimi Uygulandığında Oluşan Memristans Grafiği

Gerilim değeri negatif olduğu anda ise direnç değeri tekrar artmaya başlar. İyon sürüklenme hızındaki doğrusal olmayan davranışlar için önerilen pencere fonksiyonları 3.3 başlığında ele alınmıştır.

### 3.3. Pencere Fonksiyonları

Katkılı iyonların cihaz içerisinde dağılımını belirleyen durum değişkeni  $w$ ,  $[0, D]$  aralığında sınırlıdır. Nano boyuttaki cihazlarda, gerilimdeki ufak değişimler çok büyük elektrik alanların oluşmasına neden olabilir. Bu durum iyonların hareketlerinde doğrusal olmayan davranışlar meydana getirebilmektedir. Durum değişkeni  $w$ 'nin 0 veya  $D$  sınırlarına yakın olduğu noktalarda doğrusal olmayan iyon sürüklenme davranışlarını modellemek amacıyla (18)'de bulunan durum değişkeninin türevi eşitliğinin sağ tarafı bir pencere fonksiyonu ile çarpılmaktadır. Pencere fonksiyonunun memristör modeline uygulanmasıyla birlikte durum değişkeni 0 ve  $D$  sınırlarına yakın olduğunda sınırlara ulaşması için memristörün çok daha büyük bir yüke ihtiyacı olacaktır. Bunun için yine HP tarafından doğrusal olmayan bir iyon sürüklenme modeli sunmak amacıyla pencere fonksiyonu 3.3.1 başlığında önerilmiştir [2]. HP Pencere fonksiyonu haricinde önerilen Joglekar ve Wolf, Biolek ve Biolkova, Prodromakis pencere fonksiyonları sırasıyla 3.3.2, 3.3.3 ve 3.3.4 başlıklarında incelenmiştir. Tez kapsamında yapılacak olan uygulamada Biolek ve Biolkova Penceresi kullanılarak HP memristör modeline uygulanacaktır.

#### 3.3.1. HP Pencere Fonksiyonu

HP tarafından pencere fonksiyonu kullanılarak oluşturulan model ilk olarak Eşitlik 21'deki gibi ortaya konulmuştur [2].

$$\frac{dw}{dt} = \mu_V \frac{R_{ON}}{D} i(t) F(w) \quad (21)$$

$$F(w) = \frac{w(D - w)}{D^2} \quad (22)$$

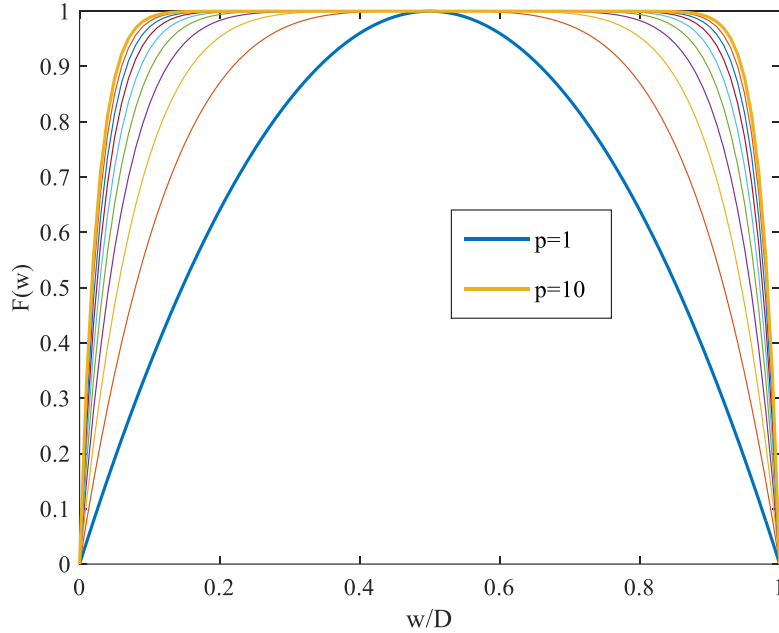
Eşitlik 22'de görüldüğü gibi durum değişkeni  $w$  değerinin 0 ve  $D$  noktalarına yaklaşması durumunda  $F(w)$  değeri azalmaktadır. Dolayısıyla  $F(w)$  değerinin azalması Eşitlik 21'deki değişimin hızını da sınır noktalarına doğru azaltmaktadır.  $w$  değeri 0 ve  $D$  noktalarına ulaştığında pencere fonksiyonu sıfır değerini alarak  $w$ 'nin sınır noktaları geçmesini engeller.

### 3.3.2. Joglekar ve Wolf Pencere Fonksiyonu

Eşitlik 18’de iyon sürüklenme hızına sınır bölgelerinin etkisinin değerlendirilmemesi dezavantaj oluşturmaktadır. Bu etkiyi modelleme amacıyla HP’nin önerdiği pencere fonksiyonundan sonra 2009 yılında Joglekar ve Wolf tarafından, fonksiyonun doğrusal olmama durumunu kontrol edebilmek için bir parametre ekleyerek, yeni bir pencere fonksiyonu önerildi [27].

$$F(w) = 1 - \left( \frac{2w}{D} - 1 \right)^{2p} \quad (23)$$

Durum değişkeni  $w$  sınır noktalarına ulaşması durumunda Eşitlik 23’teki fonksiyon “0” değerini alarak  $w$ ’nin sınır noktalarda kalmasını sağlamaktadır.  $\frac{w}{D} = \frac{1}{2}$  noktasına göre simetrik olup,  $0 \leq \frac{w}{D} \leq \frac{1}{2}$  aralığında monoton artan bir fonksiyondur.  $p$ , pozitif tam sayı olan bir kontrol parametresidir.  $p$  değeri arttıkça  $F_p(w)$  değeri  $\frac{w}{D} = \frac{1}{2}$  noktası çevresinde sabit değer almaya başlar,  $p=\infty$  değerini aldığındaki  $w=0, 1$  noktaları haricinde geriye kalan tüm  $w$  değerlerinde  $F_p(w)=1$  değerini alır [27].



Şekil 13-  $p$ ’nin Farklı Değerlerinde Joglekar ve Wolf Pencere Fonksiyonu( [27]’den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)

$p=1$  değerini alması durumunda memristörün bütün noktalarındaki iyon sürüklenme hızı eşit dağılımlı olmayacak şekilde birbirinden farklı olur.  $p=10$  değerini aldığı anda ise iyon sürüklenme hızı sınırların yakınlarında azalma eğilimi gösterir. Joglekar ve Wolf penceresi, farklı  $p$  değerleri ile memristör modelinin farklılaştırılmasını bu şekilde sağlamaktadır. Bu durum Şekil 13'te de görülebilir.  $p$ 'nin aldığı büyük değerler için pencere fonksiyonunun doğrusal olmama durumunda azalma meydana gelmektedir [27].

### 3.3.3. Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu

Eşitlik 22 ve Eşitlik 23'teki fonksiyona göre  $w$  değeri 0 ve  $D$  sınırlarından birine ulaştığında, Eşitlik 21'de  $w$ 'nin türevinin sıfır değeri almasına neden olur ve  $w$ 'nin değişmesine engel olur. Bu durumda dışarıdan herhangi bir sinyal bu durumu değiştiremez ve memristörün  $w$  değeri sürekli olarak bu sınır değerlerde kalır.

İlave olarak, memristörün üzerinden geçen yükü hatırlama özelliği vardır. Buna bağlı olarak durum değişkeni  $w$ 'nin herhangi bir  $w_0$  değerinden  $w_1$  değerine gelmesi için memristör üzerinde belli bir yük,  $w_1$  değerinden  $w_0$  değerine geri dönmesi için aynı yük miktarının ters işaretlisi gereklidir. Fakat bu özellik Eşitlik 22 ve Eşitlik 23'teki HP ile Joglekar-Wolf pencere fonksiyonlarının kullanılması durumunda sınır noktalarında kaybedilmektedir. Sınır noktalarda memristör üzerinden geçen akımın yönü değiştiğinde, geçmişte akımın geçtiği süreden bağımsız olarak durum değişkeni  $w$ , sınırın tersi yönde hareket etmeye başlar. Bu durum hafıza özelliğinin 0 ve  $D$  sınır değerlerinde kaybedilmesi demektir [9].

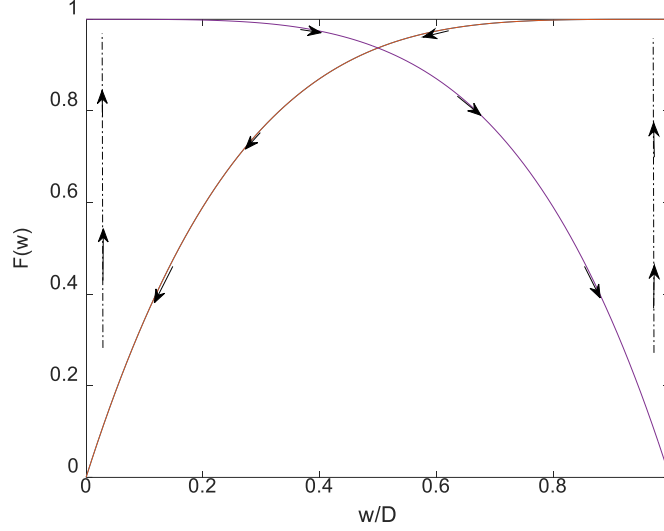
Modellemenin davranışı ile gerçek devre elemanının arasındaki bu uyumsuzluklar sınırlara yaklaşma ve uzaklaşma hızlarının farklı olduğu Eşitlik 24'te verilen yeni bir pencere fonksiyonu modeli ile çözülebilir [9]:

$$F(w) = 1 - \left( \frac{w}{D} - \text{stp}(-i) \right)^{2p} \quad (24)$$

$p$  pozitif bir tamsayıyı,  $i$  ise memristör üzerinden geçen akımı göstermektedir.

$$\text{stp}(i) = \begin{cases} 0, & i < 0 \\ 1, & i \geq 0 \end{cases} \quad (25)$$





Şekil 14-  $p=2$  için Biölek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Grafiği( [9]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)

Biölek ve Biolkova pencere fonksiyonunun  $p=2$  değeri için değişen  $w/D$  değerine göre  $F(w)$  grafiği Şekil 14'te verildiği gibidir. Biölek ve Biolkova pencere fonksiyonu modelinde  $p$ 'nin artmasıyla,  $w/D=0$  ve  $w/D=1$  noktalarında sıfıra dik olarak inen düz bir pencere fonksiyonu elde edilmektedir.

### 3.3.4. Prodromakis Pencere Fonksiyonu

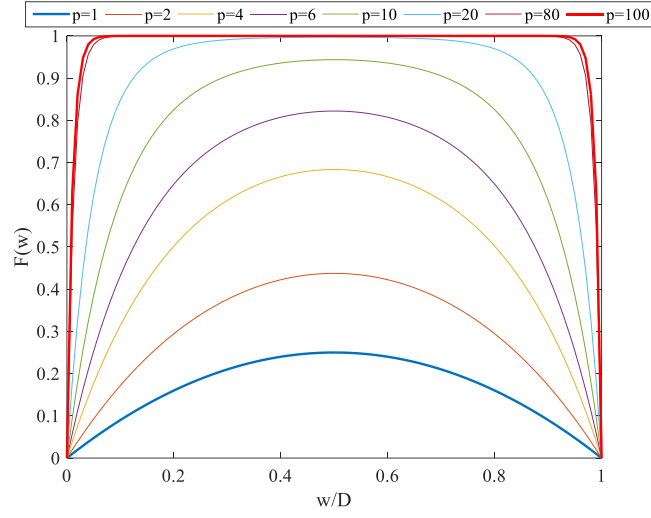
Önceki başlıklarda bahsedilen pencere fonksiyonlarının diğer bir problemi de ayarlanabilir olmamasıdır. Pencere fonksiyonunun maksimum değeri 1'den daha düşük veya yüksek bir sayı olamamaktadır. Eşitlik 26'da önerilen model bu sınırlamanın üstesinden gelmektedir [28].

$$F(w) = j \left( 1 - \left[ \left( \frac{w}{D} - 0.5 \right)^2 + 0.75 \right]^p \right) \quad (26)$$

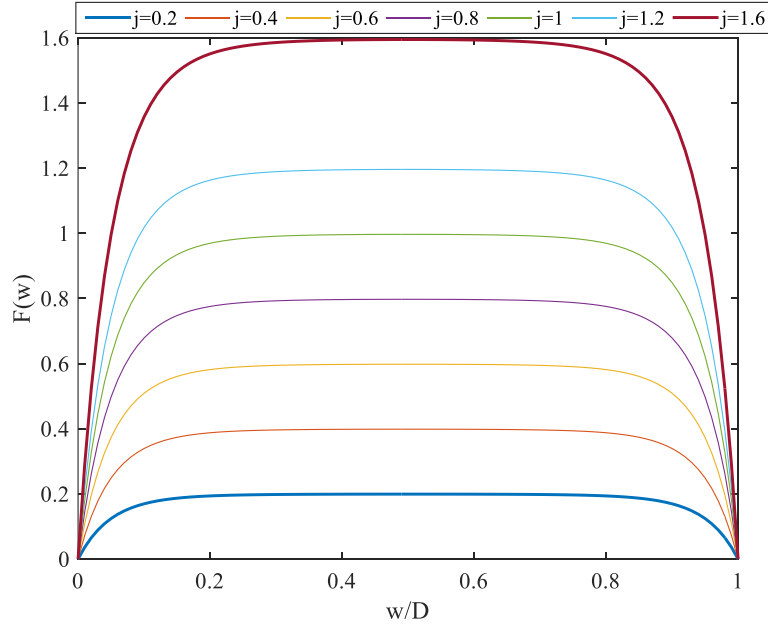
Burada  $j$ , pencere fonksiyonunun maksimum değerini belirleyen kontrol parametresidir. Şekil 15 ve Şekil 16'da değişen  $p$  ve  $j$  değerlerine göre oluşan pencere fonksiyonlarının grafikleri gösterilmiştir.

Pencere fonksiyonları sınır problemlerini azaltıp doğrusal olmayan modeller ortaya koymuşlardır. Fakat durum değişkeni olan  $w$ 'nin türevinin akım ile doğrusal olmayan bağıntısını hesaba katmadığından, tam anlamıyla doğrusal olmayan bir iyon sürüklenme davranışını sergilememektedir [26]. Bu sebeple 3.4 başlığında HP Modeli ve bu modele

uygulanan pencere fonksiyonlarına alternatif olarak farklı bir model ortaya konulmuştur [29].



Şekil 15- Değişen  $p$  Değerine Göre Prodnomakis Pencere Fonksiyonu ( $j=1$ )( [28]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)



Şekil 16- Değişen  $j$  Değerine Göre Prodnomakis Pencere Fonksiyonu ( $p=20$ )( [28]'den esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)

### 3.4. Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenmesi Modeli

Bu modelde gerilim kontrollü bir memristör ele alınarak, gerilim ile durum değişkeni  $w$ 'nin türevi arasında doğrusal olmayan bir bağlantı olduğu varsayılmıştır. Yapılan

deneylerde üretilen memristörlerin doğrusal olmayan davranışlar sergilediği görülmüştür [30, 31]. Doğrusal iyon sürüklenme modeli pencere fonksiyonları ile geliştirilse dahi yeterli doğrulukta sonuç vermemektedir [4].

DeneySEL sonuçlar temel alınarak aşağıda Eşitlik 27’de akım-gerilim ilişkisi modeli önerilmiştir [30]:

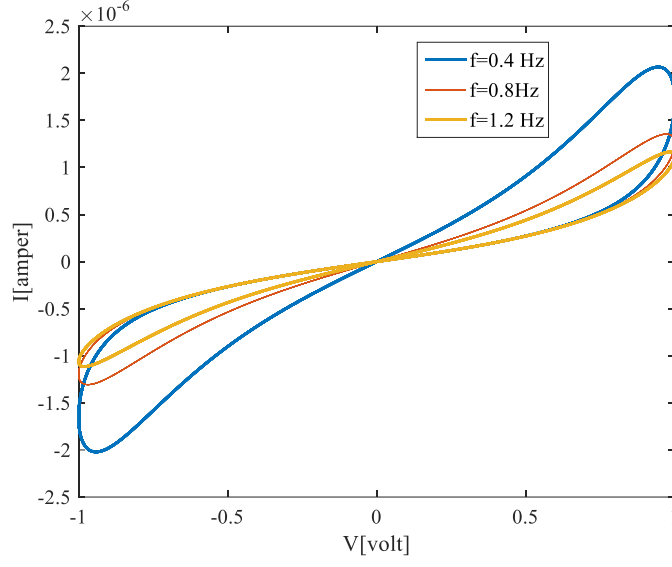
$$i(t) = w(t)^n \beta \sinh(\alpha v(t)) + \chi [\exp(\gamma v(t)) - 1] \quad (27)$$

Eşitlikte  $\alpha, \beta, \gamma$  ve  $\chi$  deneysel olarak uyarlanmış ve malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı katsayılardır.  $n$  ise durum değişkeninin akıma olan etkisini belirleyen katsayıdır. Cihaz iletim durumundayken Eşitlik 27’deki birinci terim akımın etken kısmını oluşturur. Tıkama durumunda ise ikinci terim akımın etken kısmını oluşturur. Eşitlikte birinci terim bir tünelleme olgusu, ikinci terim ise ideal diyot eşitliğinin benzeridir [26, 30]. Eşitlik 27’den yola çıkarak durum değişkeninin türev eşitliği ise Eşitlik 28 gibidir [29]:

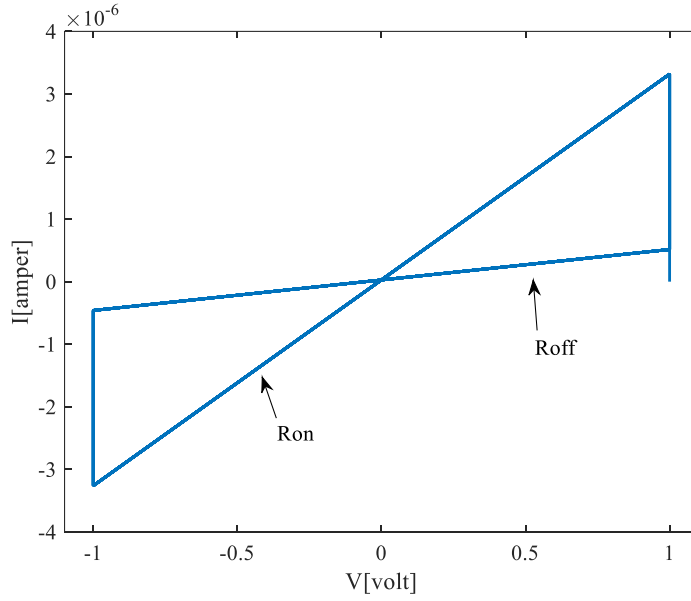
$$\frac{dw}{dt} = af(w)v(t)^m \quad (28)$$

$a$  ve  $m$  sabit,  $f(w)$   $[0,1]$  aralığında olmak üzere bir pencere fonksiyonu ve  $m$  tek bir tamsayıdır. [30]’da raporlanan memristör davranışına benzeyebilmek adına, durum değişkeni  $w$  ile gerilimin doğrusal olmayan bir bağlantısı bulunması gerekmektedir [29]. Eşitlik 28 bu bağlantı verilmiştir.

Ayrıca Eşitlik 27’de  $n$  değerinin büyük olması durumunda ufak ters gerilimlerin memristörü iletken durumdan yalıtkan duruma geçireceğinden, memristörün hafıza özelliğini kötü yönde etkilemektedir. Bu değer  $\{14, 22\}$  aralığında olması gerektiği belirtilmiştir [30]. Önceki başlıklarda bahsedilen sınır problemlerini önlemek için bu modelde  $w$  değeri  $[s1, s2]$  değerleri arasında  $w$ ’nin başlangıç değeri  $s1$  olacak şekilde  $(0 \leq s1 \leq s2 \leq 1)$  sınırlandırılmıştır [29]. Şekil 17 ve Şekil 18’de bu modele sinüs ve kare dalga şeklinde gerilim uygulandığında oluşan akım-gerilim grafikleri görülmektedir. Kullanılan parametre değerleri  $m=5, n=2, a=1 \text{ V}^{-m} \text{ s}^{-1}, \beta=0.9 \text{ } \mu\text{A}, \gamma=4 \text{ V}^{-1}, \chi=10^{-4}, \alpha=2 \text{ V}^{-1}$  şeklindedir. Şekil 17 ve Şekil 18’deki grafiklerin oluşturulmasında 4.1 başlığında MATLAB Simulink Benzetim ortamında tasarlanan memristör emülatörü kullanılmıştır.



Şekil 17- 1V Genliğinde Farklı Frekanslardan Oluşan Sinüs Girişi karşılığında oluşan I-V Grafiği ( [26]'dan esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)



Şekil 18- 1V Genliğinde 0,8Hz Kare Dalga Girişi I-V Eğrisi ( [26]'dan esinlenerek yeniden oluşturulmuştur)

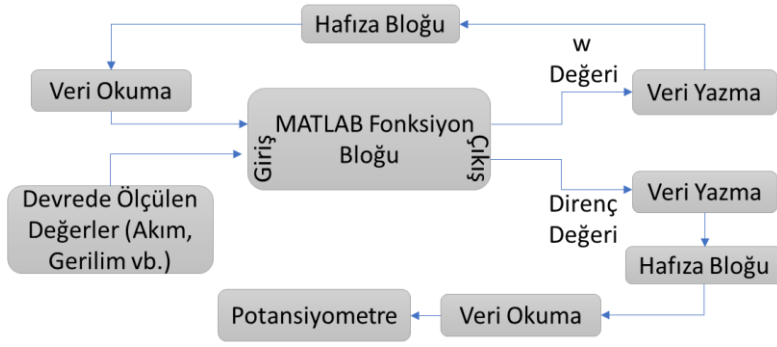
## 4. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRÜ

Tez kapsamında tasarlanan dijital sistem tabanlı memristör emülatörü MATLAB Simulink benzetim ortamı ve donanım ortamında uygulanmış ve elde edilen sonuçlar bu bölümde incelenmiştir. Benzetim ortamında Simulink kütüphanesinin elektriksel elemanları ve fonksiyon bloğu kullanılarak donanımsal tasarıma yakın bir benzetim kurgulanması hedeflenmiştir. Donanım tasarımında ise mikrodenetleyici ile birlikte dijital potansiyometre kullanarak memristör emülatörü devresi uygulanmıştır. Emülatör yapılarında HP modeli ile birlikte Biolek-Biolkova pencere fonksiyonu uygulanmış HP modeli incelenmiştir. Farklı gerilim ve farklı frekans değerleri uygulandığında elde edilen veriler ve grafikler ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar benzetim ortamından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu şekilde gerçek ortamdaki memristör emülatörünün doğruluğu incelenmiştir.

### 4.1. MATLAB Simulink Benzetimi ve Sonuçlar

MATLAB Simulink ortamında elektronik elemanlarla kurulan devreler fonksiyon bloklarıyla birleştirilebilmektedir. Bu özelliği kullanarak sinyal kaynakları, potansiyometre ve dirençlerle kurulan devreden alınan sinyal ve verilerin, içerisinde memristör modeli algoritmasının olduğu fonksiyon bloğuna bağlanması ile memristör emülatörü benzetim ortamında oluşturulmuştur. Ayrıca işlemlerin döngü halinde olabilmesi için Simulink kütüphanesinin hafıza elemanları kullanılmıştır.

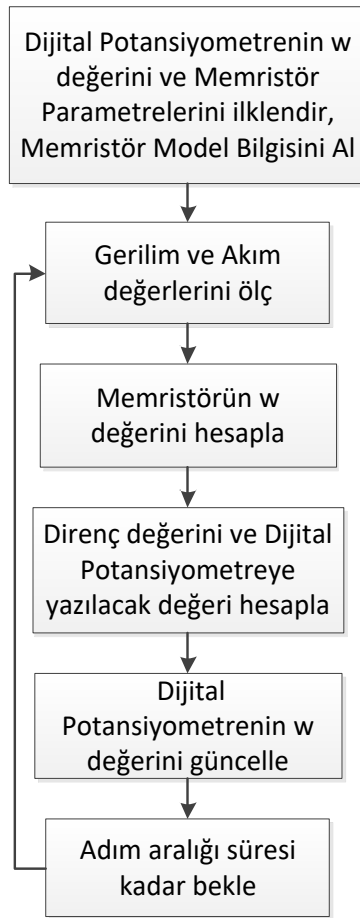
Benzetim ortamında potansiyometre kullanarak kurulan memristör emülatörü blok yapısı aşağıda Şekil 19'da verilmiştir. Devrede ölçülen gerilim ve akım değerleri, memristörün durum değişkeni olan  $w$  değeri ve memristör modeli bilgisi MATLAB fonksiyon bloğuna giriş sinyali olarak verilmektedir. Fonksiyon bloğu içerisinde koşan memristör algoritması memristörün yeni  $w$  değeri ile potansiyometreye yazılacak direnç değerini hesaplayarak çıkışına iletir. Çıkıştan alınan sinyaller hafıza bloklarına veri olarak yazılır. Daha sonra bu hafıza bloklarından tekrar okunarak potansiyometrenin direnç değeri değiştirilir.



Şekil 19- Benzetim Ortamı Memristör Emülatörü Blok Yapısı

Tez içerisindeki başlıklardan "EKLER" bölümünde MATLAB Simulink benzetim ortamında tasarlanan memristör emülatör devresi görülmektedir (Şekil 65). Benzetim ortamı devresinde kullanılan alt blokların açıklamaları Çizelge 17 **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterilmektedir.

MATLAB fonksiyon bloğunda Şekil 20'de görülen yazılım algoritma akışı koşturmaktadır.



Şekil 20 - Memristör Emülatörü Yazılım Algoritma Akış Diyagramı

İlk olarak memristör parametreleri ve hafıza bloğunda ilk değeri kaydedilen memristör durum değişkeni olan  $w$  değeri okunur. Giriş sinyallerinden olan memristör model seçimine göre hangi memristör modeli ve pencere fonksiyonunun kullanılacağına karar verilir. Devre üzerinden ölçülen gerilim ve akım değerlerini kullanarak memristörün  $w$  değeri hesaplanır. Elde edilen  $w$  değeri ile memristörün direnç değeri ve bu direnç değerine göre potansiyometreye yazılacak olan değer hesaplanır. Daha sonra adım aralığı kadar süre beklenerek döngü tekrarlanır.

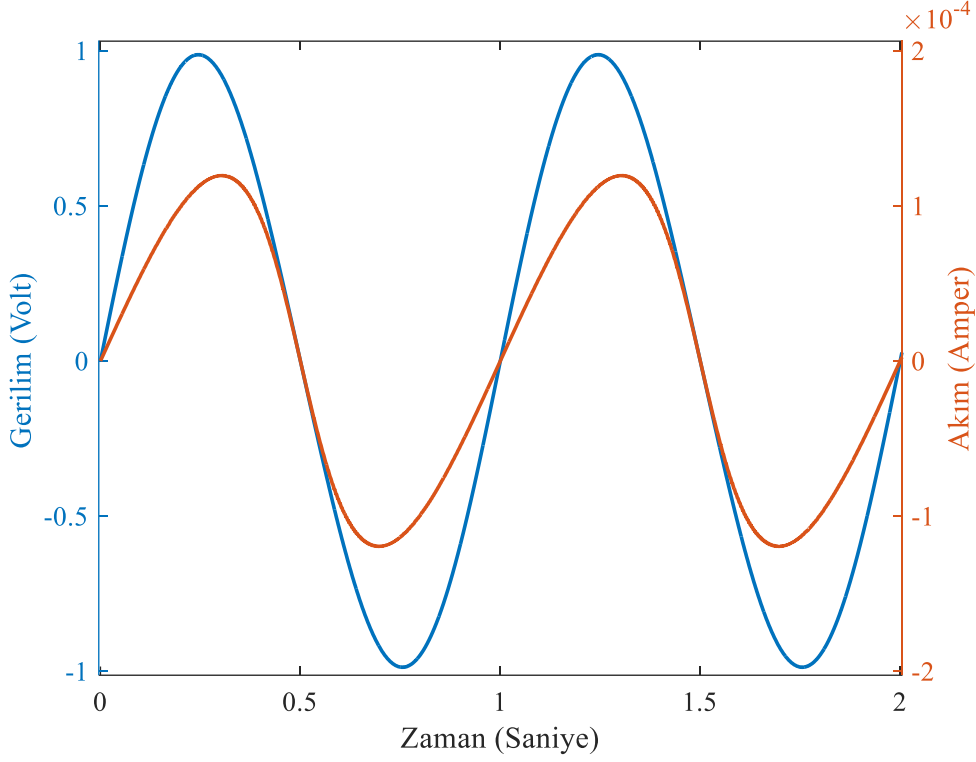
#### 4.2. HP Modeli MATLAB Simulink Benzetimi ve Sonuçlar

Devrede kullanılan parametreler ise aşağıda Çizelge 1’de verilmiştir:

Çizelge 1- Memristör Emülatörü HP Modeli Benzetim Parametreleri

Parametreler	Değer
$D$	10nm
$R_{ON}$	100 $\Omega$
$R_{OFF}$	16 k $\Omega$
$\mu_V$	$10^{-14}m^2s^{-1}V^{-1}$
Wbaşlangıç oranı	0,3

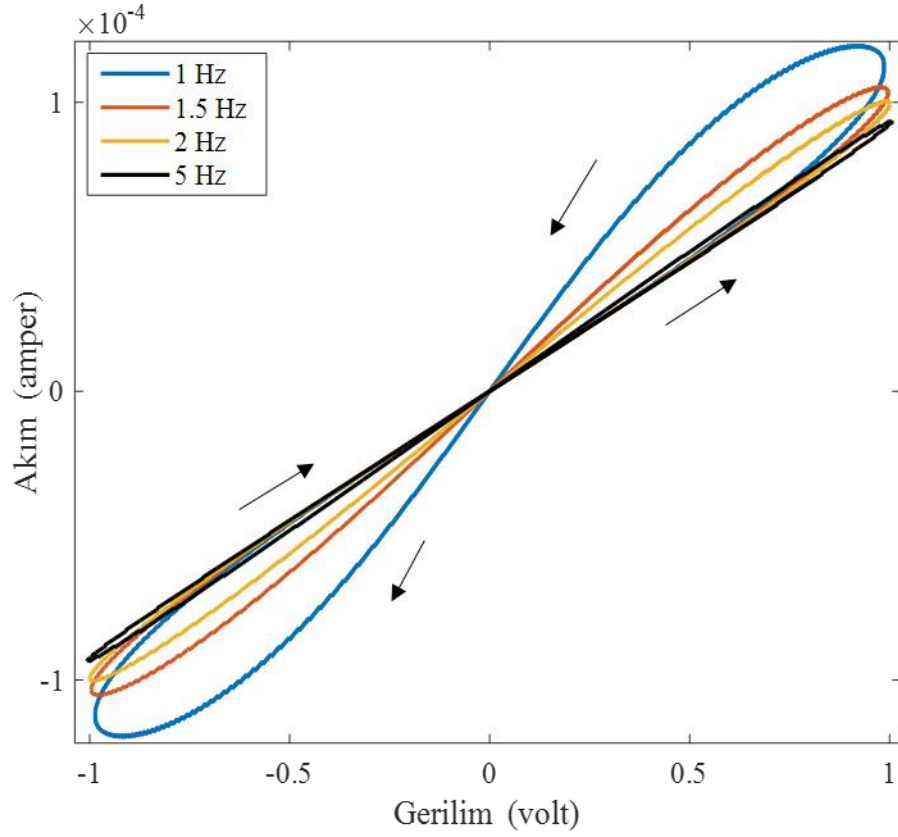
Şekil 21’de HP modelinin memristör emülatörü ile benzetim ortamında oluşturulan gerilim ve akım grafikleri görülmektedir. Memristör girişine 1V genliğinde 1Hz frekansında sinüs sinyali uygulanmıştır. Uygulanan sinüs sinyaline karşılık ölçülen akım değeri Şekil 21’de görülmektedir.



Şekil 21- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

Şekil 22’de ise yine 1V genliğinde farklı frekanslarda memristöre uygulanan sinüs sinyali gerilimine karşılık akım-gerilim eğrisi görülmektedir. HP memristör modelinin davranışına uygun olarak frekansın artmasıyla I-V eğrisinin daraldığı görülmektedir. Frekans yükseldikçe memristörün  $w/D$  oranı değişim miktarı azalır ve buna bağlı olarak direnç değerinin değişimi de azalır. Bu sebeple frekans arttıkça memristör direnci düşük değerlere inemez. Üzerinden geçen akım değeri de azalır. Çizelge 2’de 1V genliğinde farklı frekanslarda memristör üzerine uygulanan sinüs gerilimine göre üzerinden geçen akım değerinin tepe noktaları verilmiştir. Artan frekansa göre azalan akım değerleri açıkça görülmektedir.



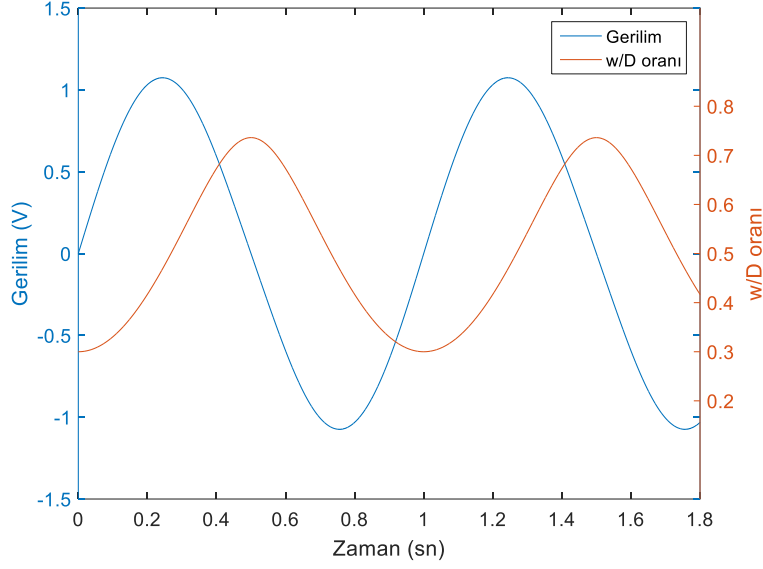


Şekil 22- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde Sinüs Sinyali Girişine Karşı Farklı Frekanslardaki I-V Grafiği

Çizelge 2- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde Sinyal Girişine Karşı Farklı Frekanslarda Akım Tepe Değeri

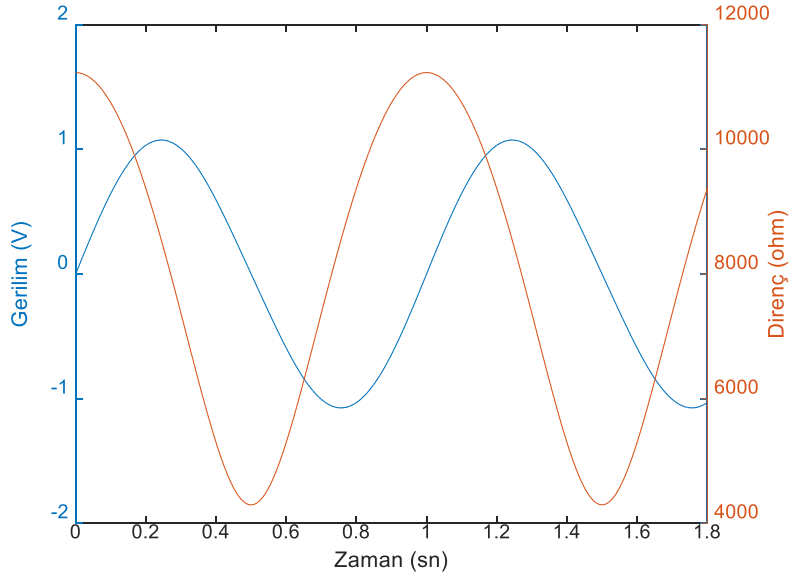
Frekans	Akım Tepe Değeri
1Hz	$1,2 \times 10^{-4}$ A
1.5Hz	$1,055 \times 10^{-4}$ A
2Hz	$1,006 \times 10^{-4}$ A
5Hz	$0,936 \times 10^{-4}$ A

Şekil 23'te memristör emülatör devresinde 1V genliğinde 1Hz sinüs sinyal gerilim girişine karşılık  $w/D$  oranı değişim grafiği görülmektedir. Memristör üzerindeki gerilimin artmasıyla  $w/D$  oranı artmaya başlamaktadır. Bu durum memristörü daha iletken bir hale getirmektedir. Gerilimin eksi bölgeye geçmesi ile birlikte  $w/D$  oranı azalmaya başlamaktadır.



Şekil 23- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı w/D Oranı Değişim Grafiği

Şekil 24’te memristör emülatör devresinde direnç değişiminin grafiği görülmektedir. Memristör üzerindeki gerilimin artmasıyla w/D oranı artmaya ve buna bağlı olarak memristör direnci azalmaya başlamaktadır. Bu durum memristörü daha iletken bir hale getirmektedir.



Şekil 24- Benzetim Ortamı Emülatör Devresinde HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Direnç Değeri Değişimi Grafiği

$w/D$  oranı ile memristör direnci arasında ters orantı olduğu Şekil 23 ve Şekil 24'e bakılarak görülebilir. Şekil 21, Şekil 22, Şekil 23 ve Şekil 24'te verilen bu grafikler, benzetim ortamında kurgulanan emülatör devresinde kullanılan HP memristör modelinin, 3.2 başlığında anlatılan memristör özellikleri ve davranışı ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Benzetim ortamında elde edilen veriler, memristör emülatörü gerçekleştirilmesinden elde edilen verilerle karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılacaktır.

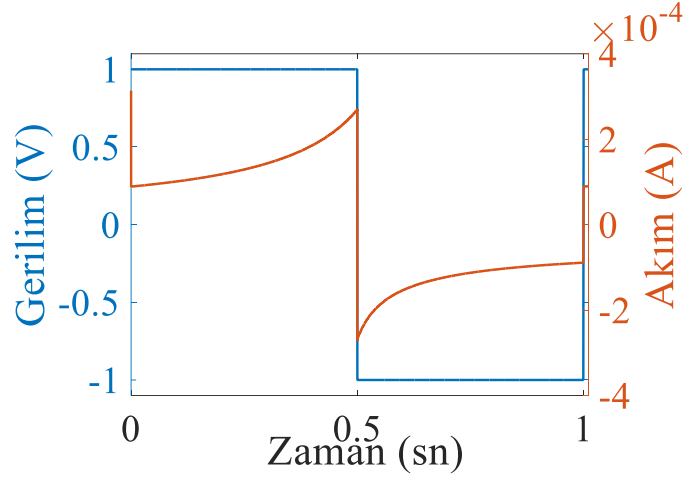
### 4.3. Biolak ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Modeli MATLAB Simulink Benzetimi ve Sonuçlar

Bir önceki başlıkta incelenen HP memristör modeline Biolak ve Biolkova pencere fonksiyonu uygulanarak, benzetim ortamındaki memristör emülatörü üzerinde davranışları incelenmiştir. Bu modele kare dalga giriş sinyali uygulanarak gerilim ve akım grafikleri oluşturulmuştur. Devrede kullanılan parametreler aşağıda Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3- Biolak ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Modeli Benzetim Parametreleri

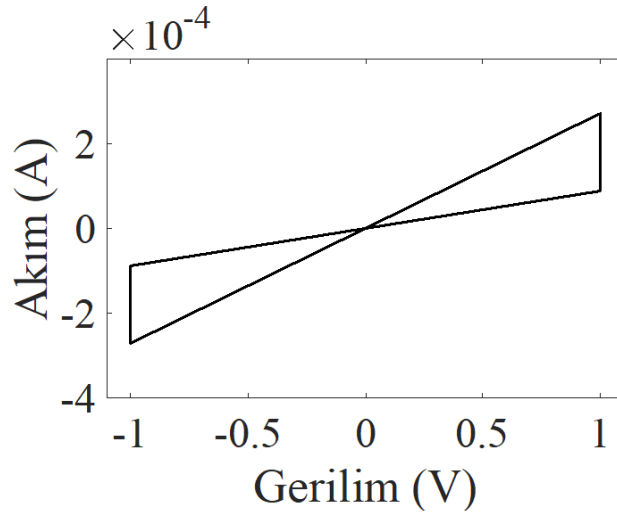
Parametreler	Değer
$D$	10nm
$R_{ON}$	100 $\Omega$
$R_{OFF}$	16 k $\Omega$
$\mu_V$	$10^{-14} m^2 s^{-1} V^{-1}$
$w_{başlangıç} oranı$	0,3
$p$	10

Şekil 25'te Biolak ve Biolkova pencere fonksiyonu uygulanmış HP memristör modeline, memristör emülatör devresinde kare dalga gerilimi uygulandığında zamana göre oluşan gerilim ve akım grafikleri görülmektedir. Memristör girişine 1V genliğinde 1Hz frekansında kare dalga sinyali uygulanmıştır. Memristör üzerindeki gerilim pozitif olması durumunda  $w/D$  oranı artmaya başlamaktadır. Bu durum memristör direncini düşürerek memristörü daha iletken bir hale getirmektedir. Sabit 1V gerilim ilk 0,5 saniyelik zaman süresince uygulandığında direncin azalmasıyla birlikte akımdaki artış Şekil 25'te görülmektedir. Gerilimin eksi bölgeye geçmesi ile birlikte  $w/D$  oranı azalmaya başlamaktadır. Bu durumda 0,5-1 saniye aralığında akım değeri azalmaktadır.



Şekil 25- Emülatör Devresinde Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

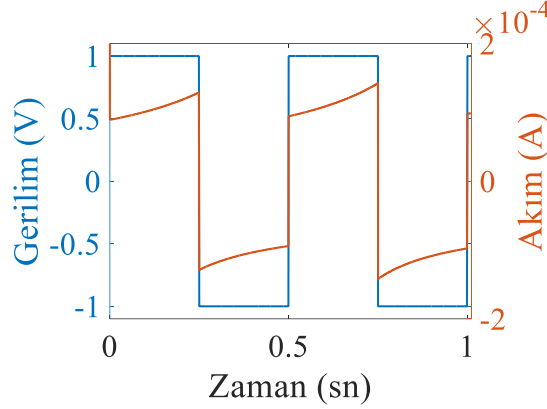
Şekil 26'da 1V genliğinde 1Hz kare dalga sinyal girişine karşılık oluşan akım-gerilim grafiği görülmektedir.



Şekil 26- Emülatör Devresinde Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyon Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği

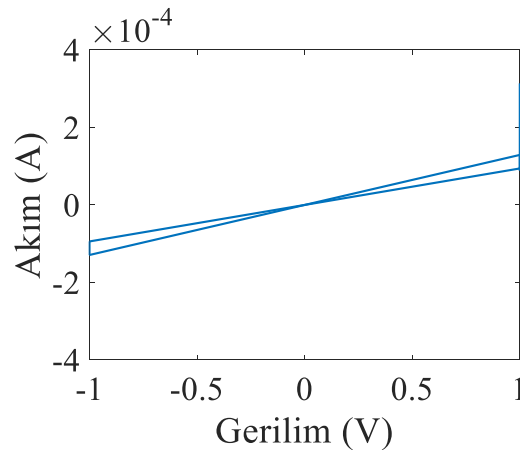
Benzetim ortamındaki memristör emülatörüne frekans değeri 2Hz yapılarak 1V genliğinde kare dalga sinyali uygulanarak Şekil 27'deki gerilim ve akım, Şekil 28'de akım-gerilim grafikleri elde edilmiştir. Diğer parametreler yine Çizelge 3'te verildiği gibi

kullanılmıştır. Sinüs gerilim sinyali uygulandığında oluşan duruma benzer olarak frekansın artması durumunda doğrusal olmama durumu azalarak akım grafiğinin eğiminin azaldığı Şekil 25 ve Şekil 27 karşılaştırıldığında görülmektedir.



Şekil 27- Emülatör Devresinde Bioklek ve Biokkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

Şekil 28’de ise frekansın 2Hz’e artırılmasıyla akım-gerilim histeresis grafiğinin Şekil 26 ile karşılaştırıldığında daraldığı görülmektedir. Frekansın artması ile birlikte gerilim ve akım arasındaki doğrusal olmayan bağlantının azaldığı, memristörün doğrusal özellikteki bir direnç özelliği göstermeye yaklaştığı yine bu grafikten yorumlanabilmektedir. Memristörün bu özelliği de benzetim ortamındaki emülatör devresinde gözlemlenebilmiştir.



Şekil 28- Emülatör Devresinde Bioklek ve Biokkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği

#### 4.4. Memristör Emülatörü Gerçeklemesi ve Sonuçlar

Benzetim ortamındaki memristör emülatörünün düzgün sonuçlar vermesi, gerçek ortamda aynı algoritma ve yapıların kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Dahili olarak ADC, SPI, UART gibi çevre birimlerini bulundurması, ARM mimarisine sahip olan aynı seviyedeki mikrodenetleyicilere göre saat frekansının daha yüksek olması gibi sebeplerle gerçek ortamdaki çalışmalarda mikrodenetleyici olarak STMicroelectronics firmasının 32bit FPU çekirdekli ARM Cortex® M4 mikroişlemciye sahip Şekil 29'da görülen STM32F4 Discovery kartı kullanılmıştır.

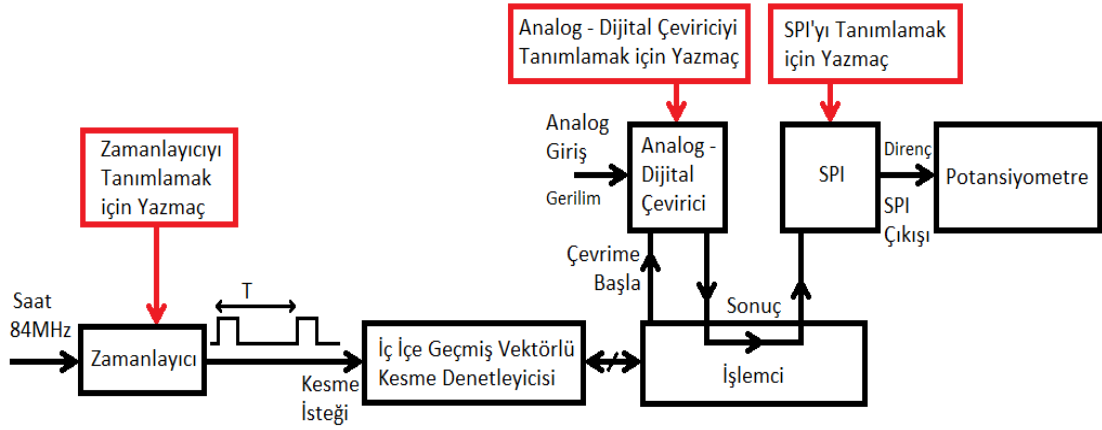


Şekil 29- STM32F4 Discovery Kartı

Dijital potansiyometre olarak da Analog Devices firmasının AD5293BRUZ-50 yongası kullanılmıştır. Benzer emülatör yapılarından farklı olarak [13], 256 pozisyonlu yerine 1024 pozisyonlu bir dijital potansiyometre seçilmiştir. Ayrıca bu yonganın bir diğer özelliği 1% tolerans gibi düşük bir direnç tolerans hatasına sahip olmasıdır. Yonganın bu özellikleri veri çözünürlüğünün bir miktar artırılmasını ve çözünürlükten doğan dezavantajların azaltılmasını sağlamaktadır. Yonga SPI haberleşme arayüzüne sahip olduğundan STM32F4 kartının dahili SPI arayüzü ile kontrol edilebilmektedir.

Şekil 30'da memristör emülatörünün mikrodenetleyici çevre birimleri ile kullanım senaryosunu anlatılmaktadır. Şekil 20'deki yazılım algoritma akışından da yola çıkarak, ilk olarak belirlenmiş zaman aralıklarında dahili ADC modülü üzerinden gerilim ölçümü yapılması ve hesaplama işlemlerinin mikrodenetleyici içerisinde tamamlanması için

dahili bir zamanlayıcı kesmesi tanımlanmıştır. Oluşan kesme sonucunda gerilim ölçümü ve hesaplama işlemleri yapıldıktan sonra dijital potansiyometreye SPI haberleşme arayüzü üzerinden yeni direnç değeri gönderilir. Zamanlayıcı kesmesi her oluştuğunda bu döngü tekrarlanır.



Şekil 30- Mikrodenetleyici Çevre Birimlerinin Memristör Emülatöründe Kullanım Yapısı

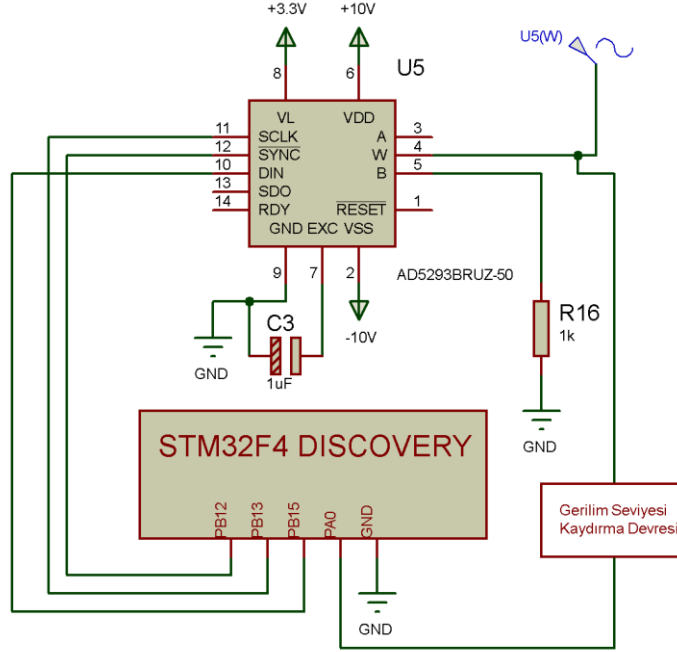
Bu yapıya ek olarak, devre üzerinden direkt olarak ölçülemeyen durum değişkeni  $w$ , memristör direnci gibi değişkenlerin değişimini gözlemleyebilmek için geliştirme kartının UART çıkışından bilgisayara veri aktarımı yapılmıştır. USB-UART dönüştürücü kullanarak bilgisayara aktarılan verilerin “SerialPlot” isimli ücretsiz yazılımla gerçek zamanlı olarak grafikleri çizdirilmekte ve .csv dosya formatıyla kaydedilmektedir [32].

Şekil 31’de memristör emülatör devresinin bağlantı şeması gösterilmektedir. Alınan osiloskop görüntülerinde akım grafiği, dijital potansiyometreye seri bağlanan 1 k $\Omega$  direnç üzerinden alınmaktadır. Mikrodenetleyicinin dahili ADC arayüzü negatif gerilim girişi kabul etmediği için, gerilim seviyesinin pozitif tarafa kaydırılması amacıyla ADC girişi öncesinde yükselteç devresi kullanılmıştır. Bağlantı şemasında mikrodenetleyici ile dijital potansiyometre arasındaki SPI arayüzü bağlantısı da gösterilmiştir. Dijital potansiyometre “A”, “W” ve “B” isimli direnç bacaklarından negatif gerilim girişine izin vermesi için, yonganın güç besleme bacakları pozitif ve negatif gerilimle beslenmelidir.

Farklı giriş sinyalleri uygulanarak memristör emülatörünün davranışı gerçek ortamda gözlemlenmiştir. Osiloskoptan .csv dosya uzantısı ile alınan verilerle oluşturulan grafikler benzetim ortamından alınan grafiklerle üst üste çizdirilerek, iki grafiği oluşturan noktalar arasındaki ortalama mutlak hata tablo şeklinde bu bölümde paylaşılmıştır. Ortalama Mutlak Hata (OMH) hesabı yapılırken Eşitlik 29’daki formül kullanılmıştır;

$$OMH = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (29)$$

Burada  $y_i$  ve  $x_i$  karşılaştırılan iki noktanın değerleri,  $n$  ise karşılaştırılan toplam nokta sayısıdır.



Şekil 31- Memristör Emülatör Devresi Bağlantı Şeması

Şekil 32 ve Şekil 33'te memristör emülatörünün üzerine uygulanan sinüs sinyali gerilimi sonucu oluşan gerilim ve akım grafiği ile akım-gerilim histerezis eğrisi görülmektedir. Kullanılan memristör parametreleri aşağıda Çizelge 4'te gösterilmiştir.

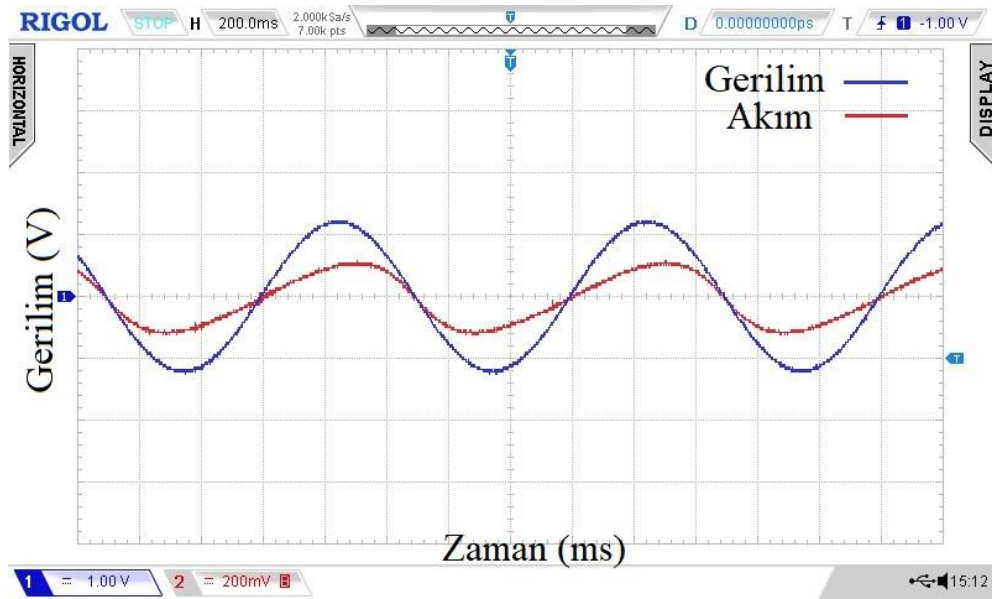
Çizelge 4- Memristör Emülatörü Gerçeklemede Kullanılan Parametreler

Parametreler	Değer
$D$	10nm
$R_{ON}$	100 $\Omega$
$R_{OFF}$	16 k $\Omega$
$\mu_V$	$10^{-14} m^2 s^{-1} V^{-1}$
<i>Wbaşlangıç oranı</i>	0,3
$p$	10



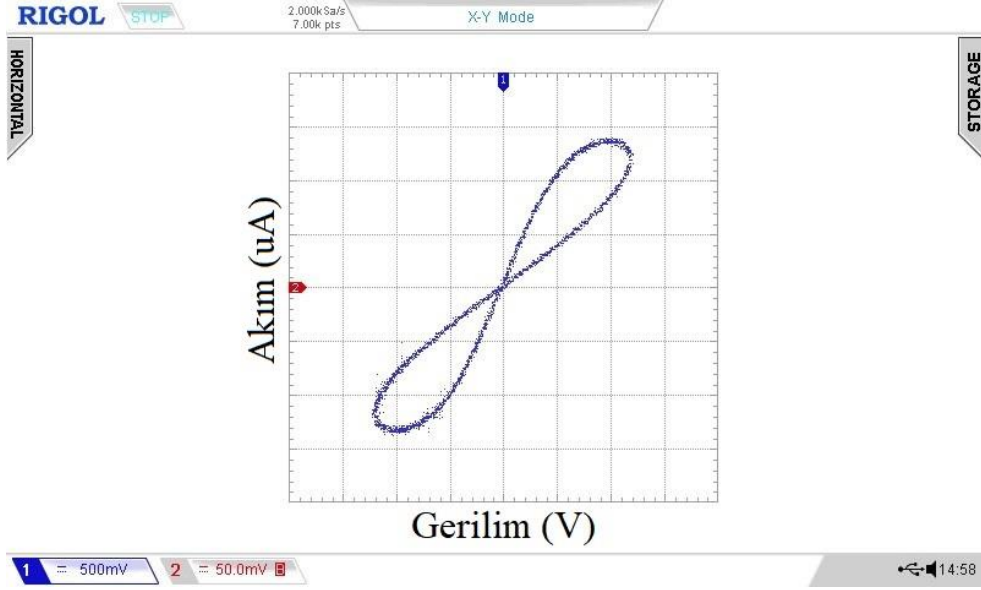
#### 4.5. HP Modeli Memristör Emülatörü Gerçeklemesi

Şekil 32’de memristör emülatörüne 1,2V genliğinde 1Hz frekansında sinüs sinyali gerilim girişi sonucu oluşan gerilim ve akım grafiği bulunmaktadır. Akım ile gerilim dalga şekillerinin arasında doğrusal olmayan bir bağlantı olduğu grafik üzerinden yorumlanabilir. 1 kΩ değerindeki direnç üzerinden ölçülen akım grafiğinde, tepe noktasının yaklaşık olarak 0,12V değerinde olması akımın da yaklaşık olarak  $1,2 \times 10^{-4}$  A değerinde olduğunu gösterir. Çizelge 2’deki değerlerle karşılaştırıldığında benzetim ortamındaki sonuçlarla tutarlılık gösterdiği görülmektedir.



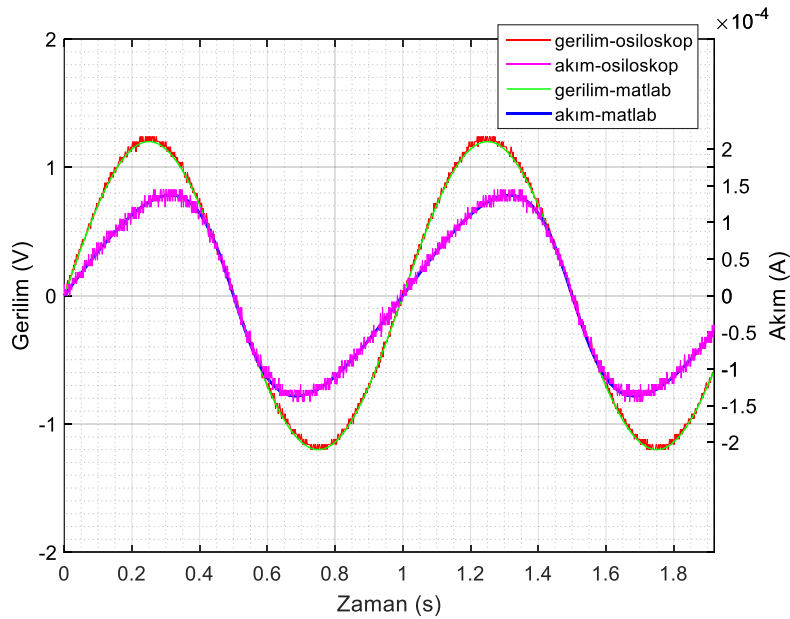
Şekil 32- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafiği

Şekil 33’te histerezis eğrisi şeklinde görülen akım-gerilim grafiği de memristör davranışını sergilemektedir. Memristif sistemlerin en önemli göstergelerinden biri olan Şekil 33’teki histerezis eğrisi, gerilim ve akım arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi ortaya koymaktadır. Zamana bağlı olarak uygulanan gerilim memristörün durum değişkeni  $w$ ’nin, toplam genişlik olan  $D$ ’ye olan oranını artırır.  $w$ ’nin değeri arttıkça direnç değeri de aynı şekilde sürekli olarak düşmektedir. Bu durum akım-gerilim grafiğinde doğrusal olmayan bir eğri oluşturmaktadır.



Şekil 33- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Akım-Gerilim Eğrisi

Bir önceki bölümde benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine 1,2V genliğinde 1Hz sinüs dalga sinyali verildiğinde, HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 34'te görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 34'te ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır.



Şekil 34- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafikleri

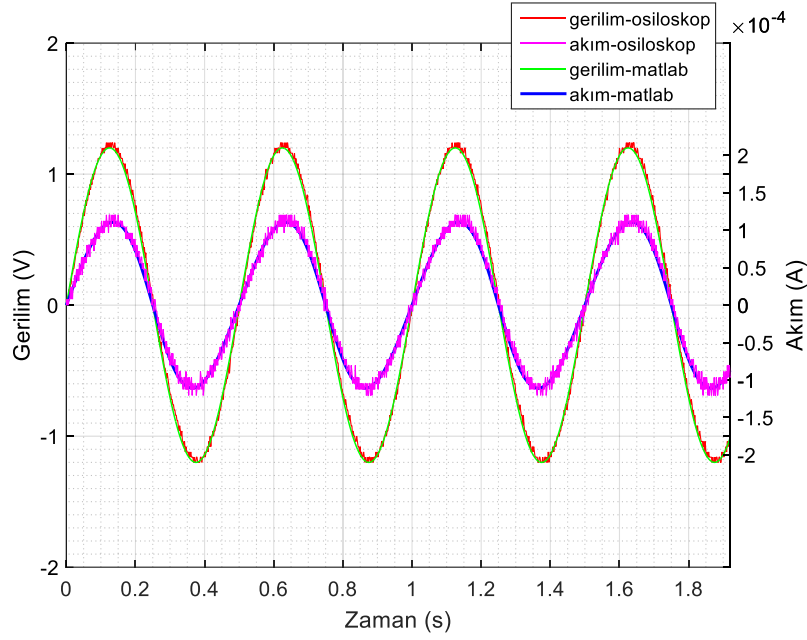
Şekil 34'teki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 5'te verilmiştir.

Şekil 34'te gerilim ve akım grafikleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu da hem benzetim ortamında hem de gerçek ortamda kurulan memristör emülatörü devreleriyle memristör özelliğinin ortaya konulabildiğini göstermektedir. Yine Şekil 34 ve Çizelge 5'e bakıldığında benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki devrenin arasındaki hata farkı oldukça azdır. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

Çizelge 5- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	22,2mV	6,4262µA
Test 2	29,6mV	6,6652µA
Test 3	29,2mV	6,4506µA
Test 4	32,6mV	6,6096µA
Test 5	36,4mV	7,0095µA
Ortalama Mutlak Hata	30mV	6,6322µA

Bir önceki testten farklı olarak frekans değeri artırılarak benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine 1,2V genliğinde 2Hz sinüs dalga sinyali verilmiştir. HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 35'te görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 35'te ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır. Şekil 35'teki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 6'da verilmiştir.



Şekil 35- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1.2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafikleri

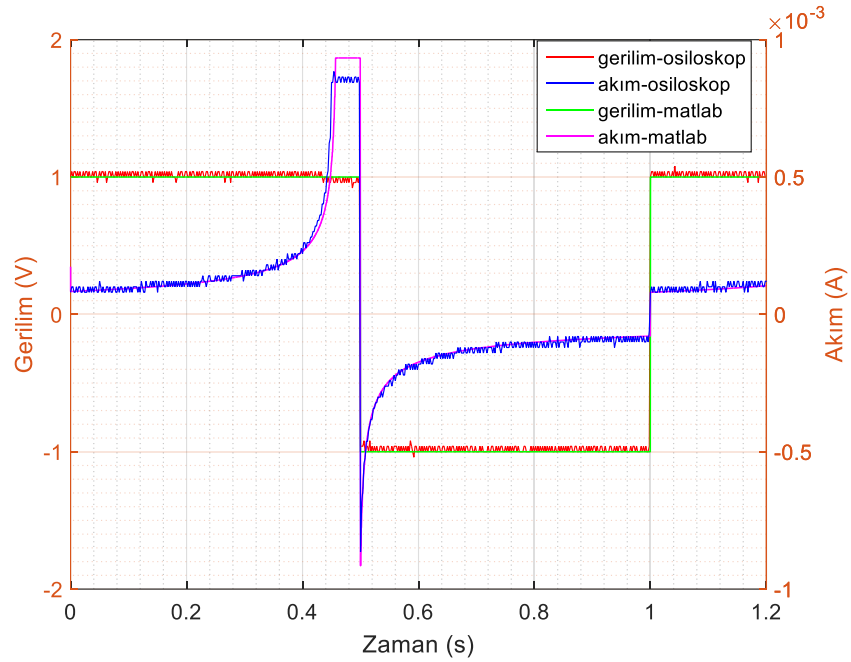
Şekil 35'te gerilim ve akım grafikleri arasında doğrusal olmayan ilişkinin, Şekil 34 ile karşılaştırıldığında azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise daha önceki bölümlerde bahsedilen memristör davranışının frekansın artmasıyla doğrusal olmayan özelliğini kaybetmeye başlamasındandır. Yine Şekil 35 ve Çizelge 6'ya bakıldığında benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki devrenin arasındaki hata farkı oldukça azdır. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

Çizelge 6 Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1.2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	33,6mV	7,0531µA
Test 2	23,4mV	6,3845µA
Test 3	28,6mV	6,4606µA
Test 4	33,2mV	6,2090µA
Test 5	24,8mV	6,2655µA

Test No	Ortalama Mutlak Hata	Ortalama Mutlak Hata
	(Gerilim(V))	(Akım(A))
Ortalama Mutlak Hata	28,72mV	6,4745 $\mu$ A

Sonraki adımda benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine 1V genliğinde 1Hz kare dalga sinyali verilmiştir. HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 36’da görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 36’da ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır. Şekil 36’daki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 7’de verilmiştir.



Şekil 36- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

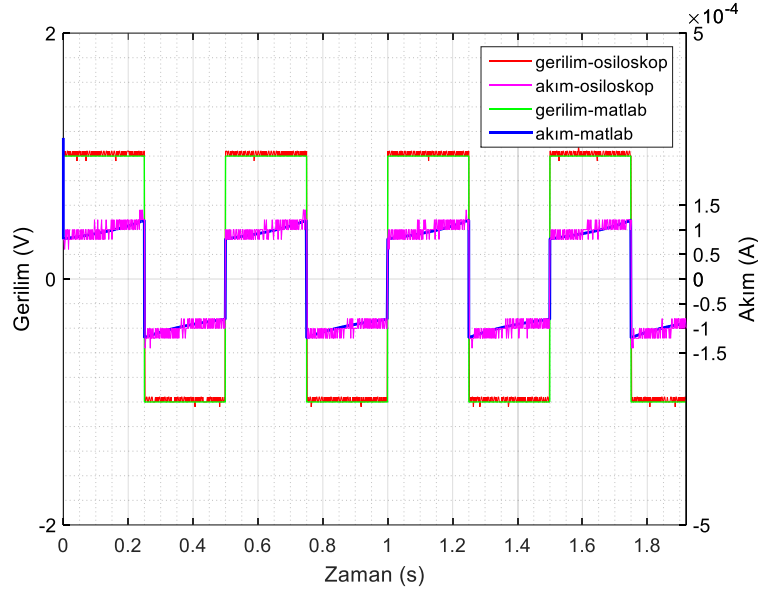
Şekil 36’da gerilim ve akım grafikleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmektedir. Sabit 1V gerilim uygulandığında memristörün direnç değeri düşmekte ve akım değeri sabit kalmayarak artmaktadır. Akımdaki bu artış, memristörün  $w$  değerinin sınırına ulaştığında direnç değişimi durduğu için, bir noktadan sonra durmaktadır ve gerilim negatif yönde uygulanıncaya kadar sabit değerini korumaktadır. Yine Şekil 36 ve Çizelge 7’ye bakıldığında benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki devrenin

arasındaki hata farkı oldukça azdır. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

Çizelge 7- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	23,8mV	17,160 $\mu$ A
Test 2	22,6mV	38,161 $\mu$ A
Test 3	24,2mV	19,792 $\mu$ A
Test 4	44,2mV	19,792 $\mu$ A
Test 5	29,3mV	13,201 $\mu$ A
Ortalama Mutlak Hata	24,0mV	20,829 $\mu$ A

Bir önceki adıma göre frekans değeri artırılarak, benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine 1V genliğinde 2Hz kare dalga sinyali verilmiştir. HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 37’de görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 37’de ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır. Şekil 37’deki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 8’de verilmiştir.



Şekil 37- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

Şekil 37’de gerilim ve akım grafikleri arasında doğrusal olmayan ilişkinin, Şekil 36 ile karşılaştırıldığında azaldığı görülmektedir. Sabit 1V gerilim uygulandığında memristörün direnç değeri düşmekte ve akım değeri sabit kalmayarak artmaktadır. Bunun nedeni ise daha önceki bölümlerde bahsedilen memristör davranışının frekansın artmasıyla doğrusal olmayan özelliğini kaybetmeye başlamasındandır. Ayrıca frekansın artmasıyla birlikte  $w$  değerindeki değişim miktarı azalmış ve direnç değeri sınır noktasına gelmemiştir. Bu durumda Şekil 36’dan farklı olarak memristör akımı belli bir süre sabit değer almamıştır. Yine Şekil 37 ve Çizelge 8’e bakıldığında benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki devrenin arasındaki hata farkı oldukça azdır. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

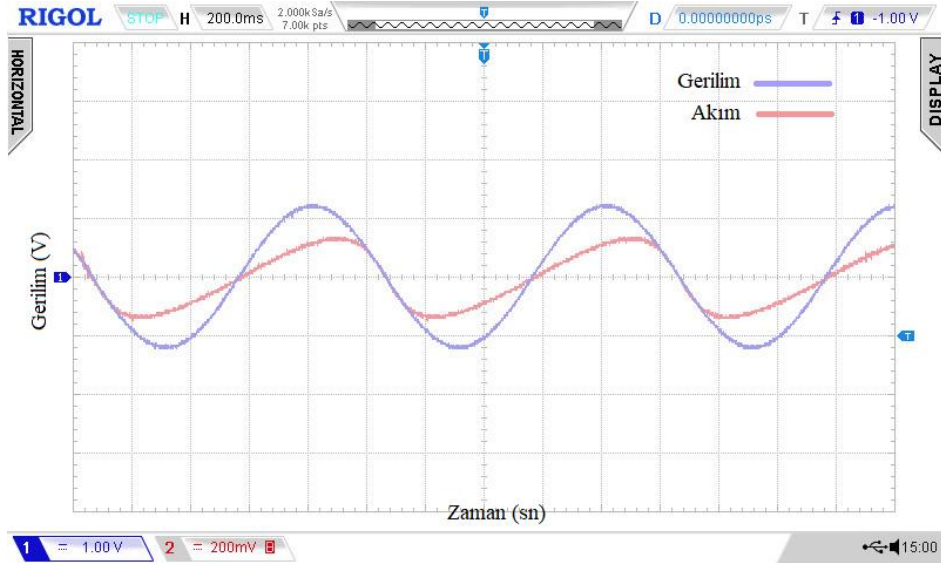
Çizelge 8- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	27,3mV	10,753 $\mu$ A
Test 2	26,8mV	10,701 $\mu$ A
Test 3	36,1mV	12,217 $\mu$ A

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 4	27,4mV	11,265μA
Test 5	27,3mV	11,007μA
Ortalama Mutlak Hata	28,9mV	11,189μA

#### 4.6. Biolenk ve Biolenkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Modeli Memristör Emülatörü Gerçeklemesi

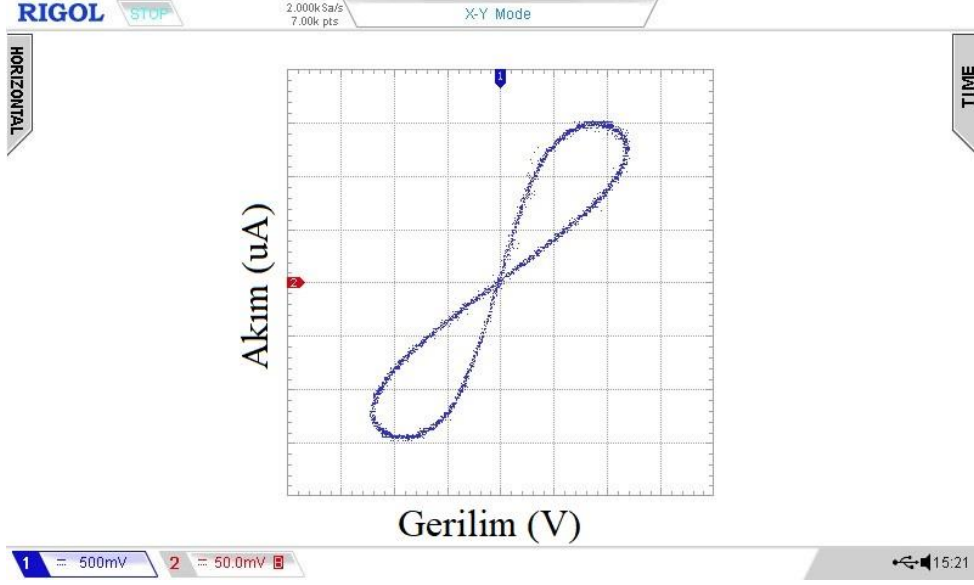
Şekil 38 ve Şekil 39’da Biolenk ve Biolenkova pencere fonksiyonunun uygulaması yapılmıştır. 1,2V genliğinde 1Hz frekansında sinüs sinyali gerilim girişine karşı oluşan gerilim ve akım grafiği ile akım-gerilim eğrileri görülmektedir. Şekillere bakıldığında uygulanan gerilime doğrusal olmayan şekilde bağımlı akım grafiği görülebilmektedir.



Şekil 38- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolenk Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafiği

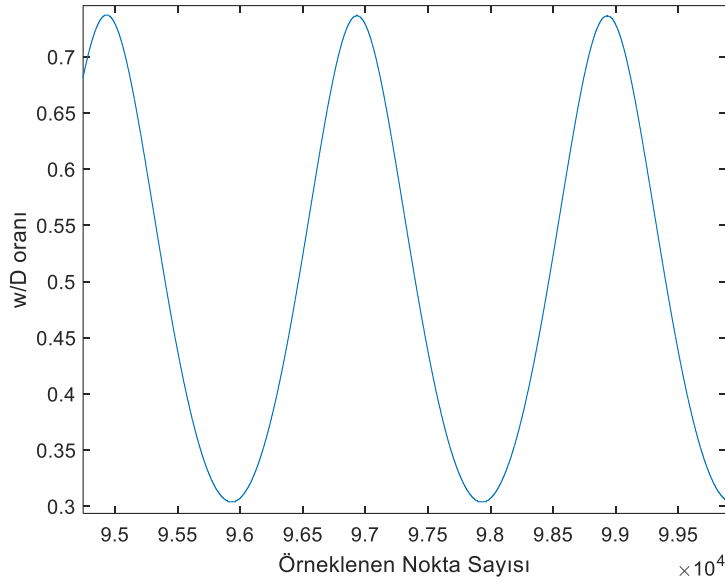
Şekil 39’daki histerezis eğrisi memristörün karakteristik davranışı hakkında bilgi vermektedir. Memristör durum değişkeni  $w$ ’nin üzerine uygulanan gerilime göre değişmesi, memristör direncinin sürekli olarak değiştirmektedir. Bu değişimin yöne uygulanan gerilimin pozitif veya negatif olma durumuna göre değişmektedir.





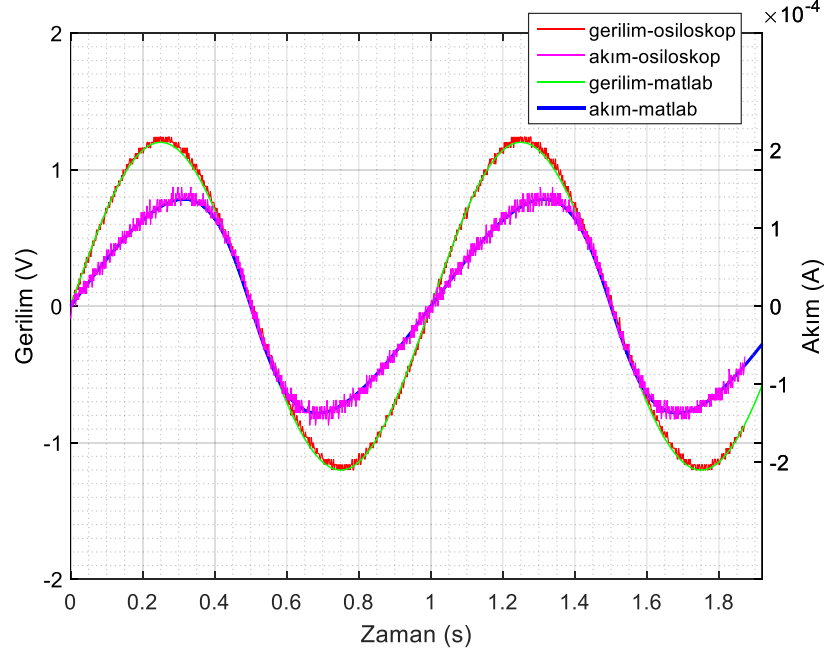
Şekil 39- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği

Gerilim pozitif yönde uygulandığında direncin devamlı olarak azalmasıyla birlikte akım ile gerilimin arasındaki bağlantı doğrusal olmama eğilimi göstermektedir. Memristörün durum değişkeni  $w$ 'yi gözlemlemek amacıyla, mikrodenetleyici kartının UART arayüzü üzerinden alınan veriler SerialPlot yazılımında .csv dosya formatında kaydedilerek MATLAB programında grafik olarak Şekil 40'ta görüldüğü üzere çizdirilmiştir. Kayıt için kullanılan yazılımın zamana bağlı kayıt yapmamasından dolayı elde edilen noktalar örneklenen nokta sayısına göre kaydedilmiştir. Memristöre uygulanan sinüs sinyalinde gerilim pozitifken  $w$  değeri artmaktadır. Gerilim negatif olduğu anda  $w$  değeri azalmaya başlar ve gerilim tekrar pozitif olana kadar azalmaya devam eder. Memristör emülatörü üzerine uygulanan gerilime göre  $w/D$  oranı grafiğinin sürekli olarak artması ve azalması, emülatör direncini de değiştirerek Şekil 38 ve Şekil 39'daki grafiklerin ortaya çıkmasında rol oynar.



Şekil 40- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı w/D oranı

Gerçek ortamdaki memristör emülatörünün hangi doğrulukta çalıştığının anlaşılabilmesi için benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile karşılaştırma yapılmıştır. Bir önceki bölümde benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine 1,2V genliğinde 1Hz sinüs dalga sinyali verildiğinde, Biolek-Biolkova pencere fonksiyonu uygulanmış HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 41’de görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 41’deki ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır. Şekil 41’deki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 9’da verilmiştir.



Şekil 41- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

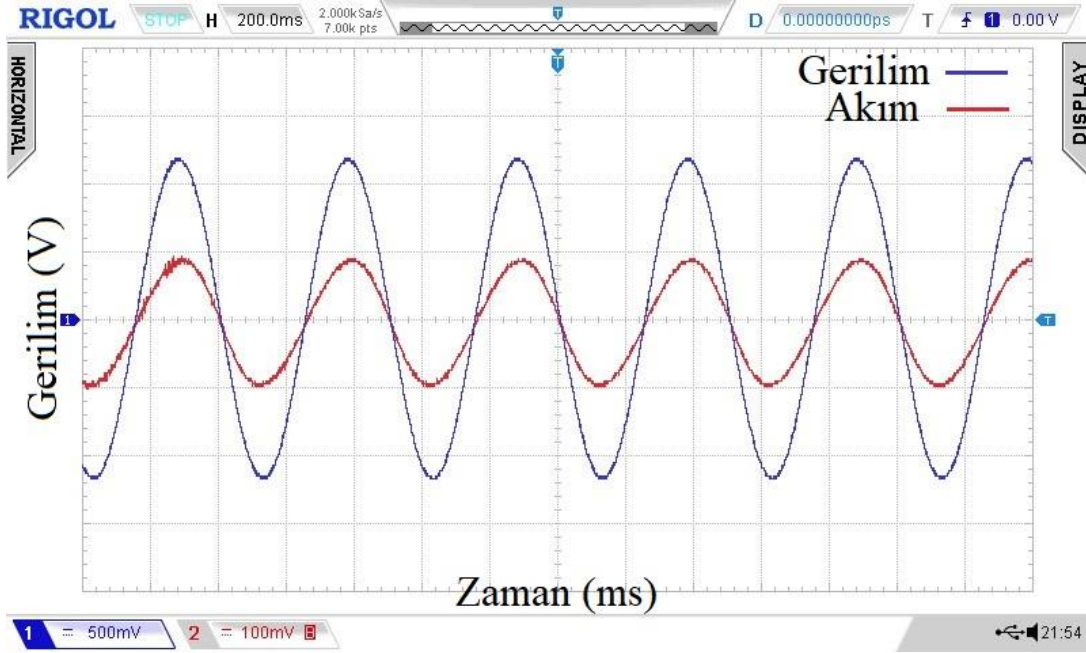
Şekil 41’de gerilim ve akım grafikleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu da hem benzetim ortamında hem de gerçek ortamda kurulan memristör emülatörü devreleriyle memristör özelliğinin ortaya konulabildiğini göstermektedir. Yine Şekil 41 ve Çizelge 9’a bakıldığında benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki devrenin arasındaki hata farkı oldukça azdır. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

Çizelge 9- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	26,8mV	6,8919µA
Test 2	33,8mV	6,6740µA
Test 3	31,4mV	6,8728µA

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 4	27,2mV	9,0475μA
Test 5	24,5mV	6,7361μA
Ortalama Mutlak Hata	28,7mV	7,2445μA

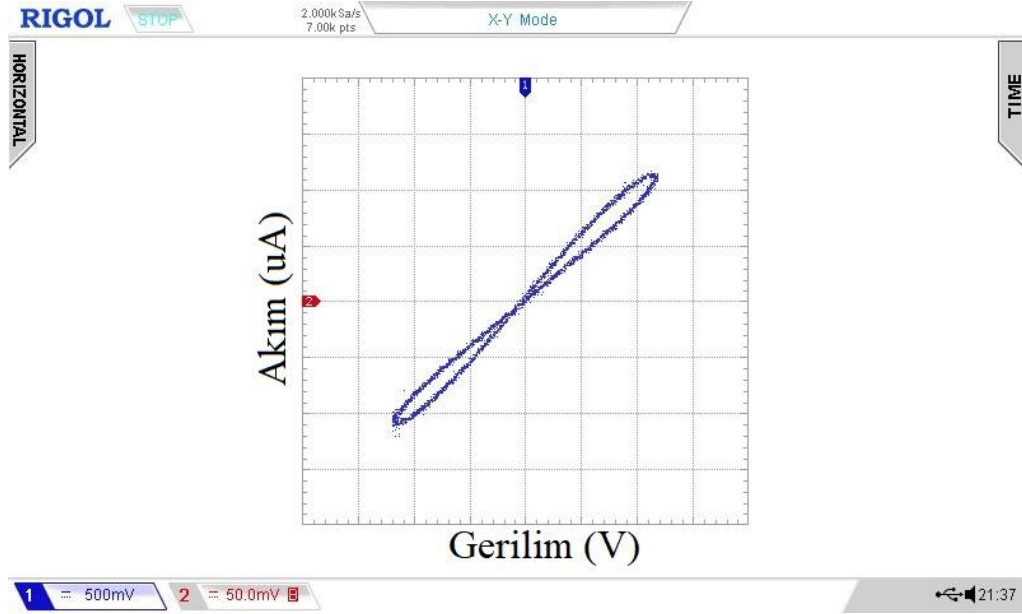
Şekil 42’de 1,2V genliğinde 2Hz frekansında sinüs sinyali gerilim girişi memristör emülatörüne uygulanmıştır. Beklendiği üzere memristöre uygulanan gerilim frekansının artmasıyla akım ile gerilim arasında doğrusal olmayan ilişkinin azaldığı görülmektedir. 2.6 Akım-Gerilim İlişkisi başlığında memristörün frekans ile ilişkisinden detaylı olarak bahsedilmiştir. Ayrıca Şekil 38 ile karşılaştırıldığında akımın genliğinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi ise yine frekansın artmasına bağlı olarak, direnç değişiminin az olmasından dolayı direnç değerinin daha yüksek seviyelerde kalarak akımı kısıtlamasıdır.



Şekil 42- Memristör Emülatörü Gerçekleşmesi Biölek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Gerilim ve Akım Grafiği

Şekil 43’teki akım-gerilim eğrisi Şekil 39 ile karşılaştırıldığında histerezis eğrisinin daraldığı görülmektedir. Bu durum memristörün üzerine uygulanan giriş gerilimi

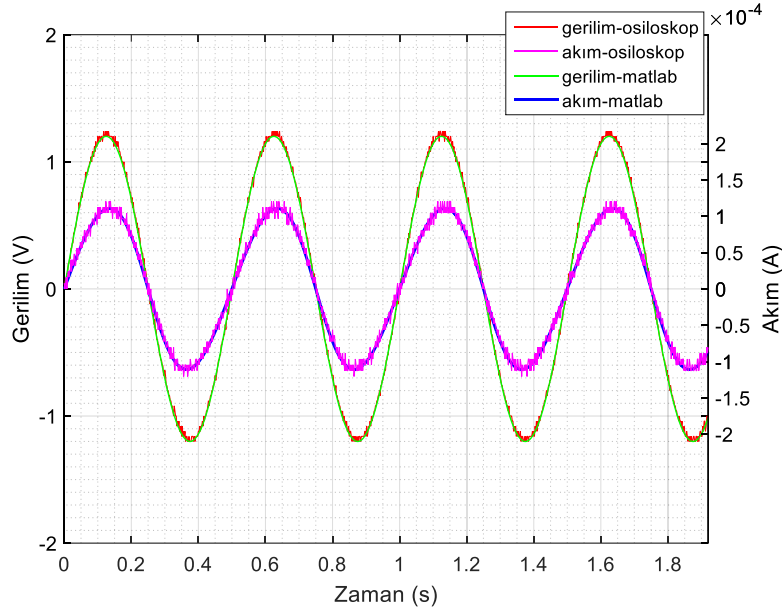
frekansının artmasıyla ortaya çıkmaktadır. Frekansın artmasıyla doğrusal özellikte bir direnç özelliği göstermeye başlayan memristör, frekansın sonsuza yakınsadığı durumda Şekil 43'teki grafik doğrusal bir direnç eğrisi gibi görülebilir. Beklendiği üzere memristör emülatörü gerçekleştirilmesinde bu durum da gözlemlenmiştir.



Şekil 43- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşılık Akım-Gerilim Grafiği

Frekans artırılarak benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine 1,2V genliğinde 2Hz sinüs dalga sinyali verildiğinde, Biolek-Biolkova pencere fonksiyonu uygulanmış HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 44'te görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Buradaki amaç yine bir önceki testte yapılan karşılaştırma gibi, gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin doğruluğunun ölçülmesidir. Test ölçütü olarak Simulink benzetim ortamında kurulan devreden alınan veriler kullanılmıştır.

Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 44'te ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır. Şekil 44'teki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 10'da verilmiştir.



Şekil 44- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

Şekil 44'te gerilim ve akım grafikleri arasında Şekil 41 ile karşılaştırıldığında doğrusal olmayan ilişkinin azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise daha önceki bölümlerde bahsedilen memristör davranışının frekansın artmasıyla doğrusal olmayan özelliğini kaybetmeye başlamasındandır. Şekil 41 ve Şekil 44'teki grafiklere bir önceki başlıktan farklı olarak pencere fonksiyonu uygulanmasına rağmen Şekil 34 ve Şekil 35'teki grafiklere göre önemli bir farklılık oluşmamıştır. Bunun sebebi ise pencere fonksiyonlarının memristörün sınır değerlerine yaklaşıldığında daha etkin bir rol oynamasıdır.

Yine Şekil 44 ve Çizelge 10'a bakıldığında benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki devrenin arasındaki hata farkı oldukça azdır. Hata farkına bakıldığında yapılan bu testte de gerçek ortamdaki memristör emülatör devresinin başarılı bir şekilde çalıştığı görülebilir. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

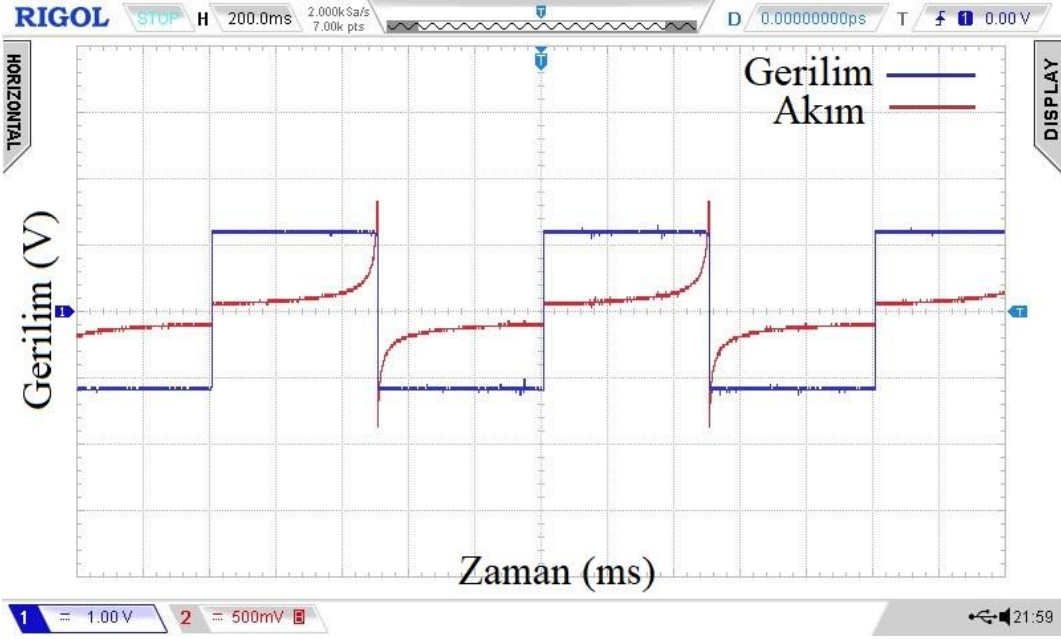
Çizelge 10- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	21,2mV	6,1193 $\mu$ A
Test 2	35,6mV	6,9712 $\mu$ A
Test 3	30,4mV	7,0905 $\mu$ A
Test 4	23,3mV	6,2212 $\mu$ A
Test 5	27,5mV	6,5335 $\mu$ A
Ortalama Mutlak Hata	27,6mV	6,5871 $\mu$ A

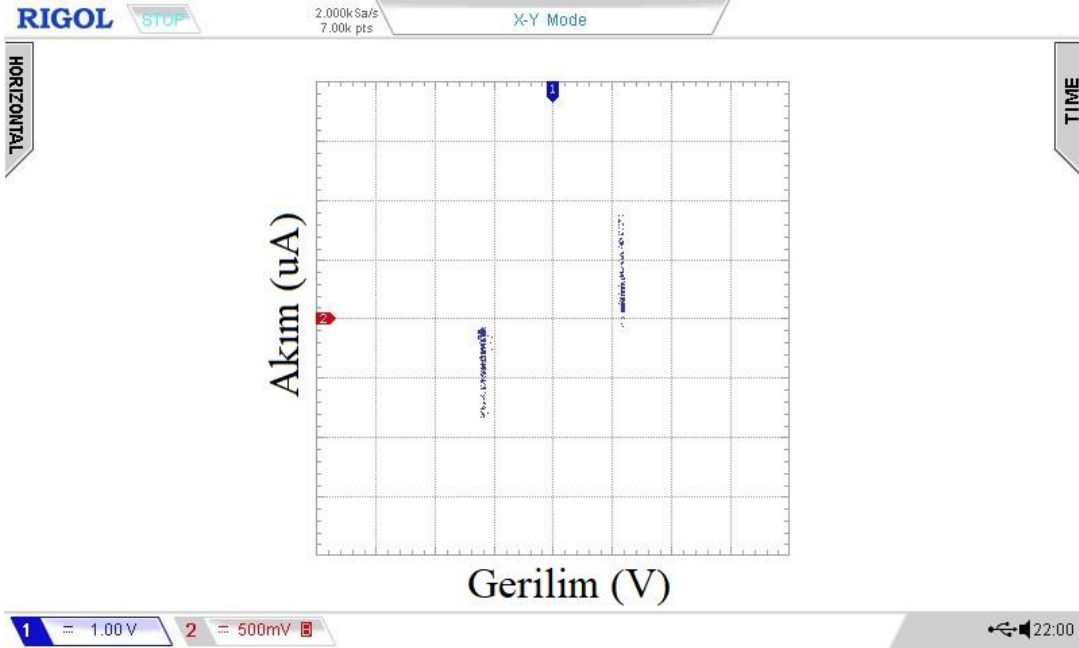
Memristör emülatörüne 1,2V genliğinde 1Hz kare dalga sinyali uygulanması sonucunda Şekil 45 ve Şekil 46'daki grafikler elde edilmiştir. Şekil 45'te gerilimin zamana bağlı grafiği ve uygulanan gerilime karşılık akımın zamana bağlı grafiği görülmektedir. Şekil 46'da ise akım-gerilim grafiği görülmektedir. Uygulanan sinyal kare dalga olduğu için sinüs dalgası şeklindeki sinyal girişinden farklı olarak, 1,2V ve -1,2V değerleri haricinde ara bir gerilim değeri emülatör üzerine uygulanmamaktadır. Osiloskobun X-Y grafik özelliğinde sadece nokta gösterimi olduğu için grafikte birbiriyle birleşmeyen iki ayrı bölgede noktalar görülmektedir. Şekil 46'da pozitif ve negatif bölgedeki noktaların tepe değerleri bir çizgi ile birleştirilirse Şekil 26'daki grafiğe benzediği görülebilir.

Şekil 45 'teki akım grafiği incelendiğinde gerilimin sabit bir şekilde belirli bir süre pozitif yönde uygulanması memristör direncinin düşmesine ve akımın doğrusal olmayan bir artış göstermesine sebep olduğu görülmektedir. Aynı şekilde gerilimin negatif yönde uygulanması durumunda akım değeri doğrusal olmayan şekilde düşmektedir.

Sinüs dalgası sinyal girişinden farklı olarak kare dalga sinyali memristör üzerine uygulandığında, akım değeri daha yüksek değerlere ve daha hızlı bir şekilde çıkabilmektedir. Bunun sebebi kare dalga sinyalinde sabit 1V civarındaki gerilime karşılık, sinüs dalgası sinyalinde gerilimin artarak aynı noktaya ulaşmasıdır. Bu durumda gerilim-zaman eğrisinin alanı kare dalga sinyalinde daha fazla olduğu için memristör üzerindeki etki artmaktadır. Sinüs dalgası ile karşılaştırıldığında, memristör direnci değişimi de kare dalga sinyali girişinde fazla olmaktadır.



Şekil 45- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafiği

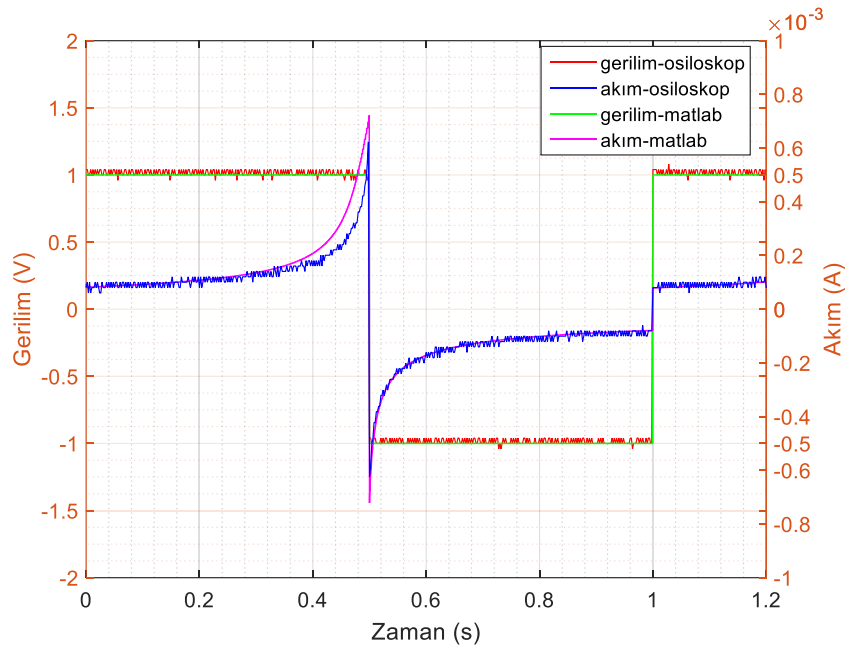


Şekil 46- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolek ve Biolkova Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği

Sonraki adımda gerçek ortamda memristör emülatörünün doğruluğunu gözlemleyebilmek için, benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile



gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine 1V genliğinde 1Hz kare dalga sinyali verilmiştir. Biolenk-Biolkova pencere fonksiyonu uygulanmış HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 47’de görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 47’de ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır. Şekil 47’deki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 11’de verilmiştir.



Şekil 47- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolenk Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

Şekil 47’de gerilim ve akım grafikleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu görülmektedir. Sabit 1V gerilim uygulandığında memristörün direnç değeri düşmekte ve akım değeri sabit kalmayarak artmaktadır. Modele pencere fonksiyonu uygulandığından, akımdaki bu artış hızı memristörün  $w$  değerinin sınıra yaklaşmasıyla Şekil 36 ile karşılaştırıldığında yavaşlamaktadır. Aynı giriş sinyallerinin uygulandığı bu iki şekil incelendiğinde pencere fonksiyonu uygulanmadığı durumda memristörün sınır değerlerine ulaşmasının daha hızlı olduğu görülmektedir. Şekil 36’da sınır değerine ulaşıldığında direnç değeri sabit kaldığından akım değerinin de sabit kaldığı görülmektedir. Şekil 47’de ise uygulanan pencere fonksiyonu sayesinde  $w$  değeri sınırlara

yaklaştıkça iyon sürüklenme hızı azaldığı için,  $w$  sınır değere ulaşmamış ve akım değeri herhangi bir zaman aralığında sabit değer almamıştır. Sınır değerlere ulaşılması durumu, memristörün hafıza özelliğinin olumsuz etkilenmesi gibi nedenlerden dolayı istenmediğinden, pencere fonksiyonu kullanımının gerekli hale geldiği bu karşılaştırma ile de görülebilmektedir. Yine Şekil 47 ve Çizelge 11'e bakıldığında benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki emülatör devresi arasındaki hata farkı oldukça azdır. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

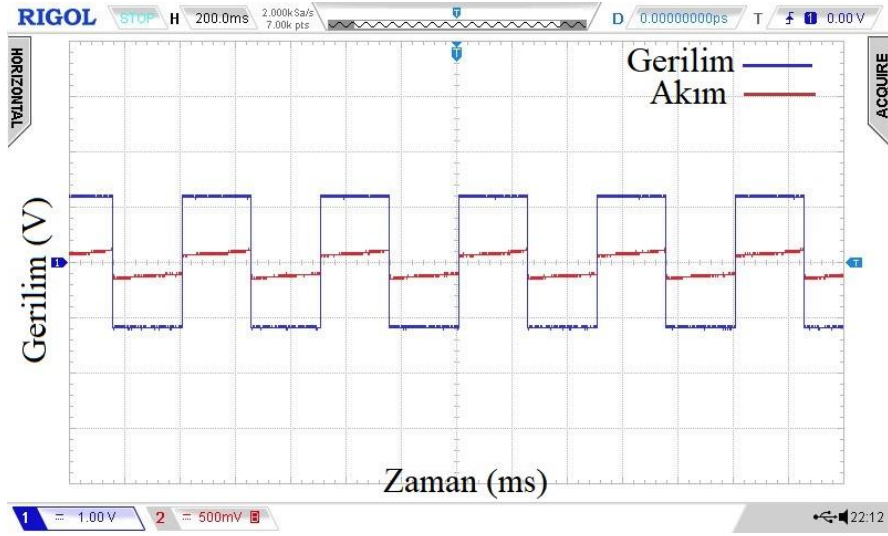
Çizelge 11- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	22,4mV	19,380 $\mu$ A
Test 2	24,2mV	21,185 $\mu$ A
Test 3	23,9mV	22,077 $\mu$ A
Test 4	24,1mV	20,419 $\mu$ A
Test 5	24,4mV	18,786 $\mu$ A
Ortalama Mutlak Hata	23,8mV	20,369 $\mu$ A

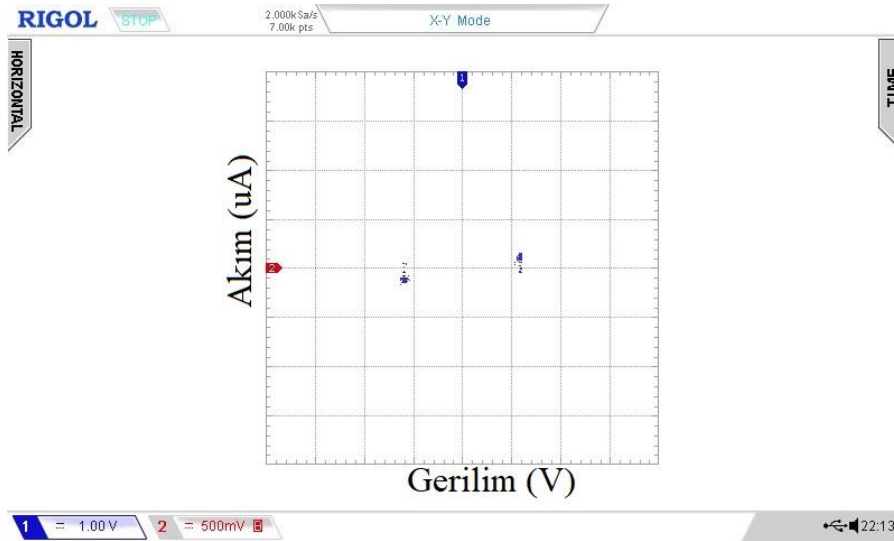
Şekil 48 ve Şekil 49'da bir önceki grafiklerden farklı olarak memristör emülatörüne 2Hz frekansında kare dalga sinyali uygulanmıştır. Pozitif ve negatif bölgelerde uygulanan sabit gerilimlerin süresi azaldığı için Şekil 48'de akım grafiğinin maksimum değerlerinin düştüğü ve doğrusal olmama özelliğinin azaldığı görülmektedir. Yine Şekil 49'da akım-gerilim grafiğinde frekansın artması sebebiyle  $y$  düzlemindeki (akım) noktaların birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu durum memristif sistemlerin karakteristiği ile uyumludur.

Frekansın artmasıyla memristör durum değişkeni  $w$ 'nin değişim miktarı daha önce de bahsedildiği üzere azalmaktadır. Bu durum direnç değişim miktarının azalmasına, buna bağlı olarak da akımdaki değişimin azalmasına yol açmaktadır. Frekansın daha yüksek değerlere çıkması, bu değişim miktarını daha da azaltacağı için, gerilim ile akım arasındaki ilişki memristif davranıştan uzaklaşarak doğrusal bir özellik göstermeye

başlar. Şekil 49 Şekil 46 ile karşılaştırıldığında, akım değerinin daha az değişmesi ve genliğinin daha düşük olması da bu sebepten dolayıdır.



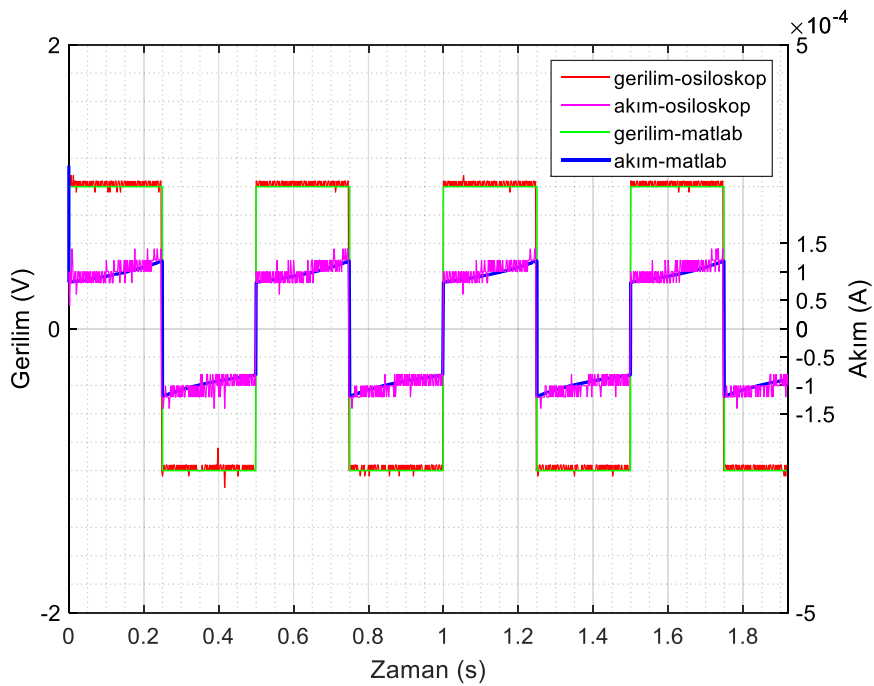
Şekil 48- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolenk ve Biolenk Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafiği



Şekil 49- Memristör Emülatörü Gerçeklemesi Biolenk ve Biolenk Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modelinin 1,2V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Girişine Karşı Akım-Gerilim Grafiği

Bir önceki adıma göre frekans değeri artırılarak, benzetim ortamında kurulan memristör emülatör devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatör devresinin girişlerine

1V genliğinde 2Hz kare dalga sinyali verilmiştir. Gerçek ortamda kurulan memristör emülatörünün doğruluğunu ortaya koymak için bu karşılaştırma yapılmıştır. Benzetim ortamında elde edilen veriler test ölçütü olarak kullanılmıştır. Biolek-Biolkova pencere fonksiyonu uygulanmış HP modeli için elde edilen zamana göre gerilim ve akım grafikleri Şekil 50’de görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Gerçek ortamdaki memristör emülatörü devresi üzerinde 5 ayrı test yapılarak veriler kaydedilmiştir. Şekil 50’de ise bu testlerin birinden alınan veriler kullanılmıştır. Şekil 50’deki gibi, diğer yapılan testlerden elde edilen verilerle tüm grafikler oluşturulmuş ve noktalar arasında ortalama mutlak hatalar hesaplanarak Çizelge 12’de verilmiştir.



Şekil 50- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Gerilim ve Akım Grafikleri

Şekil 50’de gerilim ve akım grafikleri arasında doğrusal olmayan ilişkinin, Şekil 47 ile karşılaştırıldığında azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise daha önceki bölümlerde bahsedilen memristör davranışının frekansın artmasıyla doğrusal olmayan özelliğini kaybetmeye başlamasındandır. Ayrıca frekansın artmasıyla birlikte  $w$  değerindeki değişim miktarı azalmış ve sınır noktasına yaklaşmadığından Şekil 47’ye oranla direnç değeri önemli miktarda azalmamıştır. Bu durum akım değerinde ani artış gözlemlenmemesinden de anlaşılmaktadır. Yine Şekil 50 ve Çizelge 12’ye bakıldığında

benzetim ortamındaki devre ile gerçek ortamdaki devrenin arasındaki hata farkı oldukça azdır. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları gibi nedenler sayılabilir.

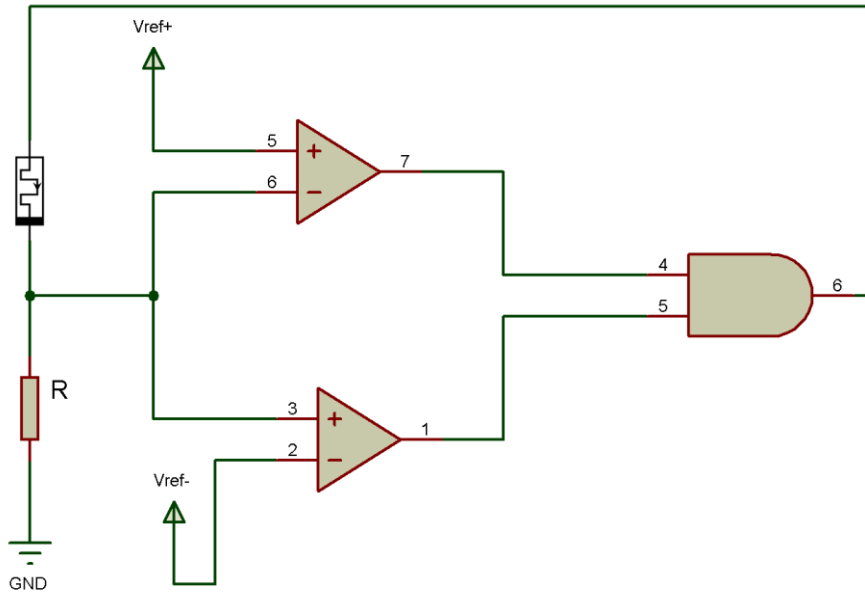
Çizelge 12- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması, Biolek Pencere Fonksiyonu Uygulanmış HP Memristör Modeli 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Sinyali Girişine Karşı Ortalama Mutlak Hatalar

Test No	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
Test 1	36,1mV	12,641 $\mu$ A
Test 2	26,0mV	6,5090 $\mu$ A
Test 3	26,7mV	6,1303 $\mu$ A
Test 4	35,3mV	6,8647 $\mu$ A
Test 5	26,8mV	5,9398 $\mu$ A
Ortalama Mutlak Hata	30,1mV	7,6170 $\mu$ A

Genel anlamda bu bölümde yapılan tüm testler göz önüne alındığında hata farklarının oldukça düşük miktarlarda kaldığı görülmektedir. Bu durum gerçekleşmesi kurulan dijital sistem tabanlı memristör emülatörü devresinin başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Doğrusal olmayan iyon sürüklenme modeli için kullanılması gereken dijital potansiyometre değeri yaklaşık 1 M $\Omega$  civarındadır. Bu sebeple bu modelin davranışı gerçek ortamda incelenmemiştir. Bunun yerine Simulink benzetim ortamında doğrusal olmayan iyon sürüklenme modeli devreye uygulanarak sonuç grafikleri 3.4 başlığında paylaşılmıştır.

## 5. MEMRİSTÖR EMÜLATÖRÜ İLE KARE DALGA OSİLATÖR DEVRESİ GERÇEKLEMESİ

Yapılan tez kapsamında, tasarlanan memristör emülatörün kullanım örneklerinden birini göstermek amacıyla bir kare dalga osilatörü tasarlanmıştır. Genel tip gevşeme osilatörleri yerine reaktif elemansız memristör tabanlı osilatör devresi çalışmaları mevcuttur [8]. Memristöre uygulanan gerilime göre direnç değerinin artıp azalma özelliği, reaktif elemanların dolma boşalma davranışına benzemesinden dolayı bu tip devrelerde kullanılabileceği ifade edilmiştir [8]. Önerilen devre Şekil 51’de gösterilmiştir.



Şekil 51- Memristör Tabanlı Reaktif Elemansız Kare Dalga Osilatörü Devresi ( [8]’den esinlenerek yeniden çizilmiştir.)

Eşitlik 30’da HP memristör modeline göre önerilen memristör direnci eşitliği bulunmaktadır [33]. Burada  $k'$  olarak ifade edilen parametre Eşitlik 31’de verildiği gibidir.

$$R_{mem}^2(t) = R_{init}^2 + 2k' \int_0^t V_{mem}(\tau) d\tau \quad (30)$$

$$k' = \frac{\mu_v R_{on}(R_{OFF} - R_{ON})}{D^2} \quad (31)$$

$R_{mem}$  ile ifade edilen değişken memristör direnci,  $R_{init}$  başlangıç direnci,  $V_{mem}$  ise memristör üzerine uygulanan gerilim değeridir.  $k'$  ile ifade edilen eşitlikte bulunan

değişkenlerden  $\mu_v$  ortalama sürüklenme hareketliliği,  $D$  değeri titanyum dioksit filminin toplam genişliği,  $R_{ON}$  ve  $R_{OFF}$  değerleri sırasıyla  $w=D$  ve  $w=0$  olduğunda memristörün sınır direnç değerlerini göstermektedir. Bu iki eşitlikten yola çıkarak memristör tabanlı osilatör devresinin frekansı Eşitlik 39'daki gibi hesaplanmıştır [8] [34].

$$T_H = \frac{R_{mp}^2 - R_{mn}^2 + 2R_1 (R_{mp} - R_{mn})}{2k'V_{oh}} \quad (32)$$

$$T_L = \frac{R_{mn}^2 - R_{mp}^2 + 2R_1 (R_{mn} - R_{mp})}{2k'V_{ol}} \quad (33)$$

Eşitlik 32 ve Eşitlik 33'te,  $T_H$  kare dalga sinyalinde gerilimin yüksek olduğu kısmın periyodunu,  $T_L$  değeri gerilimin düşük olduğu kısmın periyodunu simgelemektedir.  $R_{mp}$  ve  $R_{mn}$  salınım süresince memristör direncinin ulaşacağı sırasıyla en yüksek ve en düşük direnç değerlerini göstermektedir.  $R_l$  değeri Şekil 51'deki devrede bulunan sabit direnç değerini,  $V_{oh}$  ve  $V_{ol}$  sırasıyla kare dalga sinyalindeki en yüksek ve en düşük gerilim değerlerini göstermektedir.

$$R_{mn} = R_1 \frac{V_{oh} - V_p}{V_p} \quad (34)$$

$$R_{mp} = R_1 \frac{V_{ol} - V_n}{V_n} \quad (35)$$

Eşitlik 34 ve Eşitlik 35'te  $R_{mn}$  ve  $R_{mp}$ 'nin eşitlikleri verilmiştir. Burada  $V_p$  pozitif referans gerilimi olarak Şekil 51'deki devrede  $V_{ref+}$ 'yi,  $V_n$  ise negatif referans gerilimi olan  $V_{ref-}$ 'yi temsil etmektedir.  $R_{mn}$  ve  $R_{mp}$  değerleri Eşitlik 32 ve Eşitlik 33'te yerine konulduğunda Eşitlik 36 ve Eşitlik 37 elde edilmektedir. Bu iki eşitliğin toplanmasıyla birlikte ise bir tam periyot Eşitlik 38'deki gibi elde edilmektedir. Eşitlik 38  $f = \frac{1}{T}$  bağıntısına göre Eşitlik 39'daki gibi yazıldığında frekans eşitliği elde edilmektedir.

$$T_H = \frac{R_1^2 \left[ \frac{V_{ol}^2}{V_n^2} - \frac{V_{oh}^2}{V_p^2} \right]}{2k'V_{oh}} \quad (36)$$

$$T_L = \frac{R_1^2 \left[ \frac{V_{oh}^2}{V_p^2} - \frac{V_{ol}^2}{V_n^2} \right]}{2k'V_{ol}} \quad (37)$$

$$T_H + T_L = \frac{R_1^2 [V_{ol}^2 V_p^2 - V_{oh}^2 V_n^2] [V_{ol} - V_{oh}]}{2k'V_{oh} V_{ol} V_n^2 V_p^2} \quad (38)$$

$$f = \frac{2k'V_n^2 V_p^2 V_{oh} V_{ol}}{R_1^2 [V_{oh}^2 V_n^2 - V_{ol}^2 V_p^2] [V_{oh} - V_{ol}]} \quad (39)$$

Eğer  $V_{oh} = -V_{ol}$  olarak alınırsa Eşitlik 40 ifadesine ulaşılır.

$$f = \frac{k'V_n^2V_p^2}{R_1^2[V_p^2 - V_n^2]V_{oh}} \quad (40)$$

Osilatör uygulamasında sabit olarak kullanılan parametreler Çizelge 13'teki gibidir:

Çizelge 13- Osilatör Uygulaması Parametreleri

Parametreler	Değer
$D$	10nm
$R_{ON}$	100 $\Omega$
$R_{OFF}$	16 k $\Omega$
$\mu_V$	$10^{-14}m^2s^{-1}V^{-1}$
$V_p$	0,75V
$V_n$	-0,5V ve -0,3V
$V_{oh}$	1V
$V_{ol}$	-1V
$R_l$	5 k $\Omega$

Eşitlik 40'a göre Çizelge 13'teki parametreler kullanılarak farklı  $V_n$  değerleri için hesaplanan frekans değerleri Çizelge 14'te verilmiştir. Bu değerler sonraki bölümlerde benzetim ve gerçek ortamda yapılan uygulamalarda test ölçütü olarak kullanılacaktır.

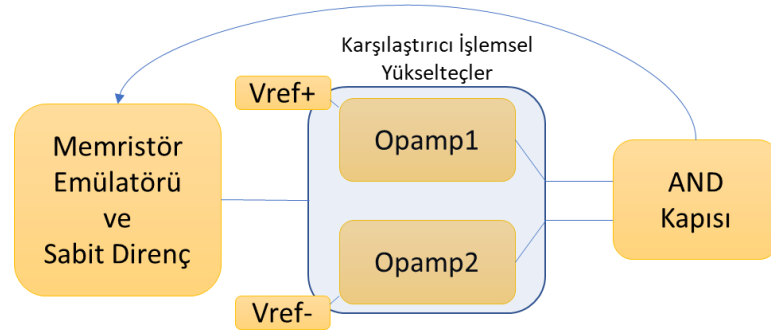
Çizelge 14- Memristör Tabanlı Osilatör Devresi Farklı  $V_n$  Değerleri için Hesaplanan Frekans Değerleri

$V_n$ Değeri	Hesaplanan Frekans Değeri
-0,3V	0,6814Hz
-0,5V	2,8620Hz

### 5.1. Kare Dalga Osilatörü Uygulaması MATLAB Simulink Benzetimi

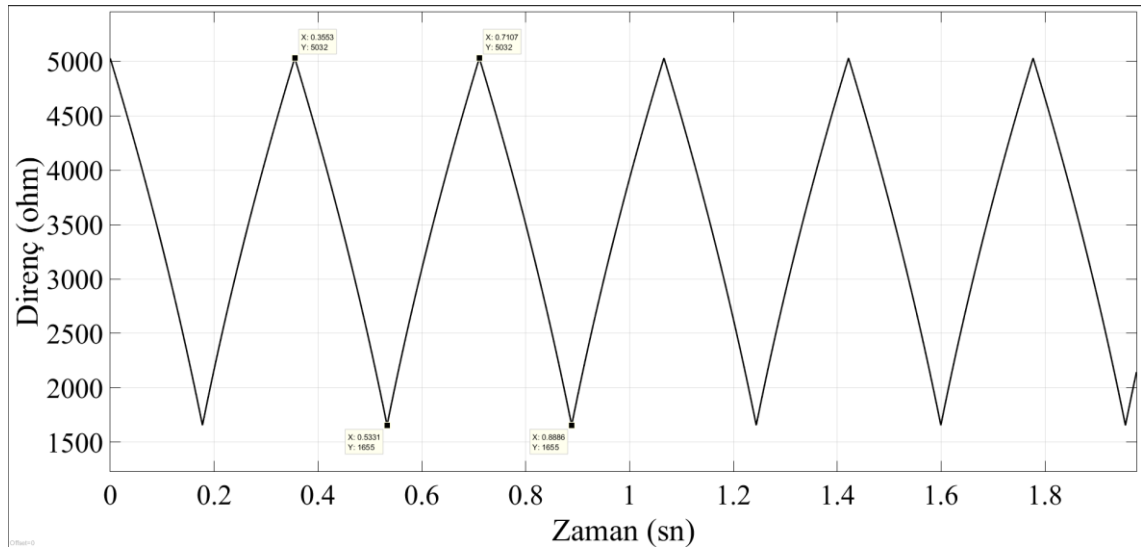
Simulink benzetim ortamında kurulan memristör emülatörü tabanlı kare dalga osilatörü devresi EKLER başlığında Şekil 66'da görülmektedir. Blok gösterim olarak da Şekil 52'de gösterilmiştir.





Şekil 52- Kare Dalga Osilatörü Blok Gösterimi

Opamp1 olarak adlandırılan işlemsel yükseltecin evirmeyen ucuna pozitif referans gerilimi, eviren ucuna da sabit direnç üzerinde oluşan gerilim giriş olarak verilmektedir. Opamp2 olarak adlandırılan işlemsel yükseltecin ise eviren ucuna negatif referans gerilimi, evirmeyen ucuna ise sabit direnç üzerinde oluşan gerilim giriş olarak verilmektedir. Referans gerilimlerinin değeri ise Çizelge 13'te verildiği üzere +0,75V ve -0,5V'tur. Simulink kütüphanesindeki AND kapısının çıkışı 0'dan küçük ve eşit olamadığı için çıkış sinyali 1-3V arasında salınım yapacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sinyal memristör üzerine gönderilmeden önce 2V kaydırma yapılarak -1V +1V seviyesine getirilmektedir. AND kapısı çıkışı +3V olduğu durumda memristör ve seri bağlı sabit direnç üzerinde +1V gerilim oluşmaktadır. Bu durumda memristörün durum değişkeni  $w$ 'nin değeri artmakta, memristör direnci ise azalmaktadır. Memristörün direnç değeri değişimi Şekil 53'te görülmektedir.

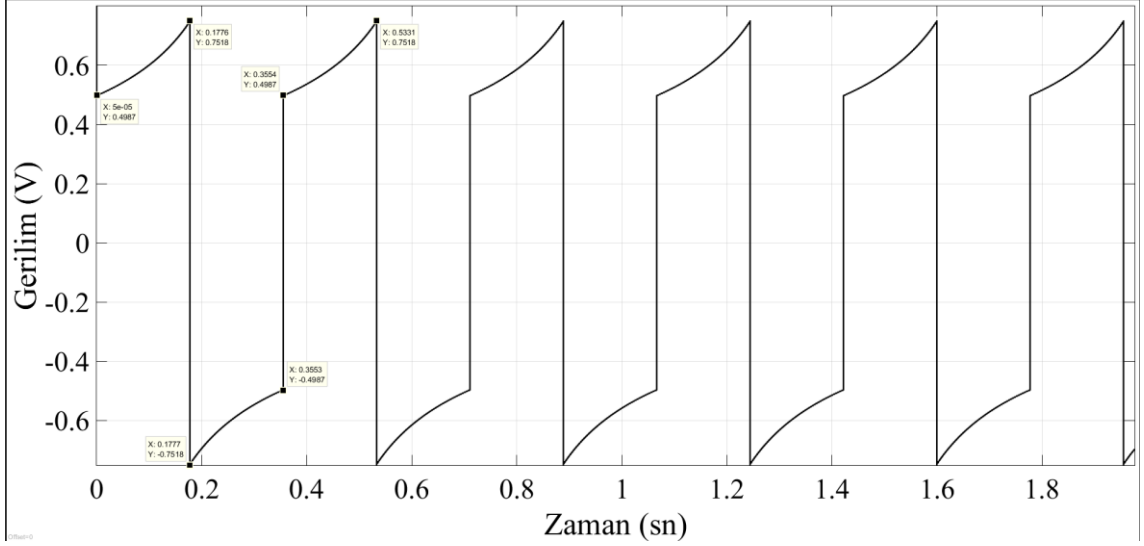


Şekil 53- Scope 5  $V_n = -0,5V$  Olması Durumunda Memristör Direnci Değişimi

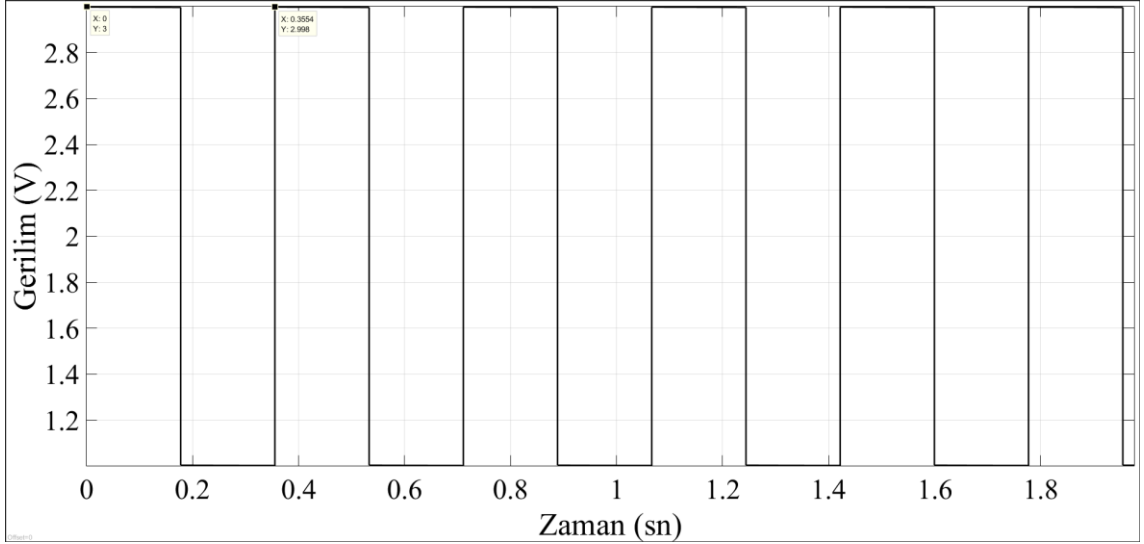
Memristör direnci azaldıkça, sabit direncin üzerindeki gerilim artmakta ve karşılaştırıcı yükselteçlerin girişlerine bu gerilim verilmektedir. Bu artış Şekil 52’de  $V_{ref+}$  olarak ifade edilen 0,75V referans gerilimi değerine kadar sürer. Sabit direnç üzerindeki gerilim bu referans noktasını geçtiği anda Opamp1’in çıkışı pozitif besleme geriliminden negatif besleme gerilimine düşer. Bu da AND çıkışının düşük seviye sinyal çıkışı vermesine sebep olur. Bu durumda memristör ve seri bağlı sabit direnç üzerinde -1V gerilim oluşmaktadır. Memristör son direnç değerini koruduğu için, sabit direnç üzerinde o anda yaklaşık -0,75V gerilim oluşmaktadır. Bu durumda Opamp1 işlemsel yükseltecinin çıkışı tekrardan pozitif besleme gerilimi, Opamp2 işlemsel yükseltecinin çıkışı ise negatif besleme gerilimi olmaktadır. Böylece AND kapısı çıkışı düşük seviye sinyal çıkışı vermeye devam edecektir. Farklı biçimde ifade edersek, Opamp1 işlemsel yükselteci AND kapısı çıkışının, düşük seviye sinyal çıkışına geçmesini tetiklemiş, Opamp2 ise bu şekilde düşük seviye sinyal çıkışı vermeye devam etmesini sağlamıştır.

Memristör emülatörü ve seri bağlı sabit direnç üzerinde -1V gerilim olduğu durumda  $w$  değeri azalmaya, memristör direnci değeri de artmaya başlamaktadır. Memristör direncinin artmasıyla birlikte sabit direnç üzerindeki gerilim ise azalmaya başlamaktadır. Gerilimin azalma durumu  $V_{ref-}$  olarak ifade edilen -0,5V referans değerine kadar devam edecektir. Bu referans gerilimini geçtiği anda ise Opamp2 çıkışını negatif besleme geriliminden pozitif besleme gerilimine çekmektedir. Opamp1 ise çıkışına pozitif besleme gerilimi vermeye devam etmektedir. Bu durumda AND kapısının çıkışı yeniden yüksek seviye sinyali olmaktadır. Bu döngü sürekli olarak devam edeceği için AND kapısı çıkışı kare dalga osilatör çıkışı halini almaktadır. Karşılaştırıcı işlemsel yükselteçlerin giriş gerilimindeki değişim grafiği Şekil 54’te görülmektedir. AND kapısı osilatör sinyal çıkışı ise Şekil 55’te görülmektedir

Kare dalga sinyalinin bir periyodu Şekil 55’e göre 0,3554 saniyedir. Buradan frekans 2,81Hz olarak hesaplanabilir. Çizelge 14’teki  $V_n = -0,5V$  değeri ile karşılaştırıldığında yaklaşık 0,05Hz hata payı ile benzetimin doğrulandığı görülebilir.



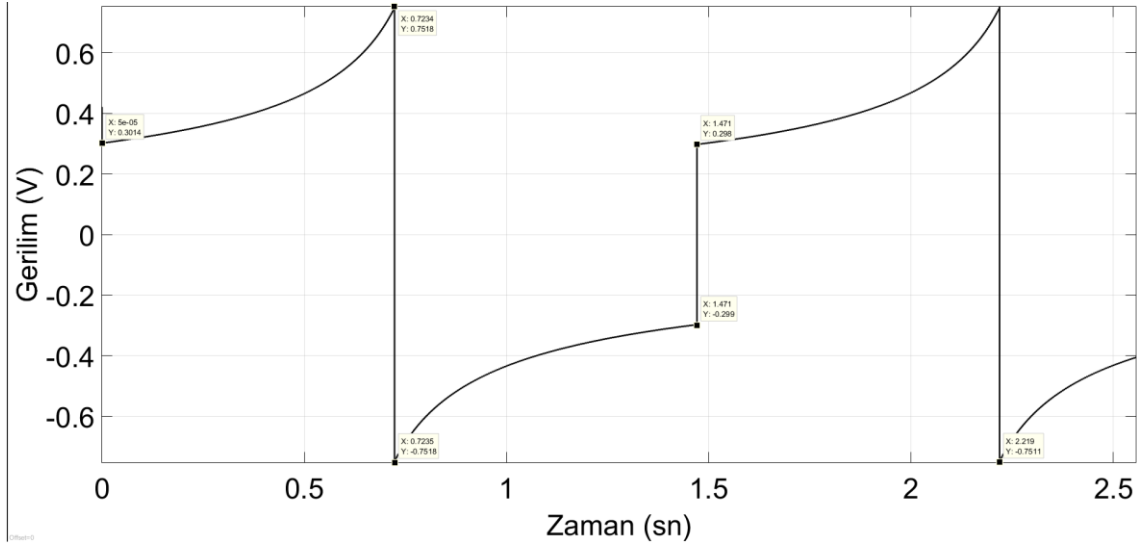
Şekil 54- Scope 25  $V_n=-0,5V$  Olması Durumunda Karşılaştırmalı İşlemsel Yükselteç Girişi



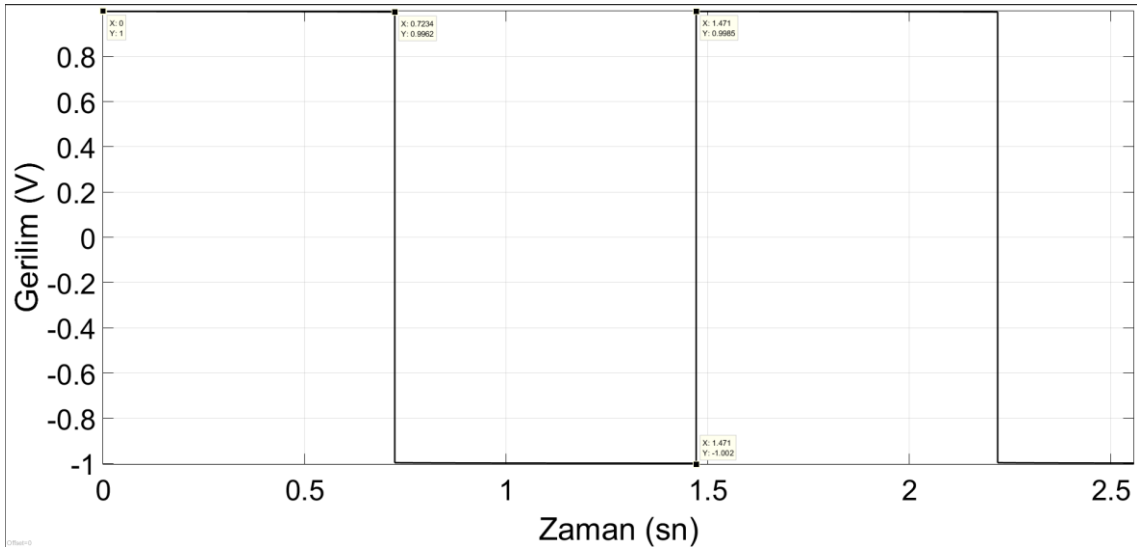
Şekil 55- Scope 11  $V_n=-0,5V$  Olması Durumunda AND Kapısı Osilatör Çıkışı

$V_n=-0,3V$  olarak değiştirildiğinde, karşılaştırmalı yükselteçlerin girişi ile AND kapısı çıkışının sinyal grafikleri Şekil 56 ve Şekil 57’de verildiği gibidir. Kare dalga sinyalinin bir periyodu Şekil 57’ye göre 1,4956 saniyedir. Buradan frekans 0,6686Hz olarak hesaplanabilir. Çizelge 14’teki  $V_n=-0,3V$  değeri ile karşılaştırıldığında yaklaşık 0,0128Hz hata payı ile benzetimin doğrulandığı görülebilir. Çıkış frekansının düşmesi demek memristör üzerine uygulanan gerilimin frekansının düşmesi demektir. Bu durumda Şekil 56’ya bakıldığında, Şekil 54 ile karşılaştırılması durumunda gerilim değerinin doğrusal olmayan şekilde arttığı görülür. Bu durumun nedeni frekansın düşmesiyle birlikte  $w$  değerinin ve direnç değerinin değişim miktarının artmasıdır. Direncin daha fazla miktarda

değişmesi ve daha yüksek/düşük değerlere gitmesi, sabit direnç ile kurduğu gerilim bölücü yapısında üzerine daha fazla değişkenlikte gerilim düşmesi demektir. Ayrıca bu durum memristör emülatörünün doğrusal olmama özelliğinin artmasını sağlamaktadır.



Şekil 56- Scope 25  $V_n=-0,3V$  Olması Durumunda Karşılaştırmalı İşlemsel Yükselteç Girişi

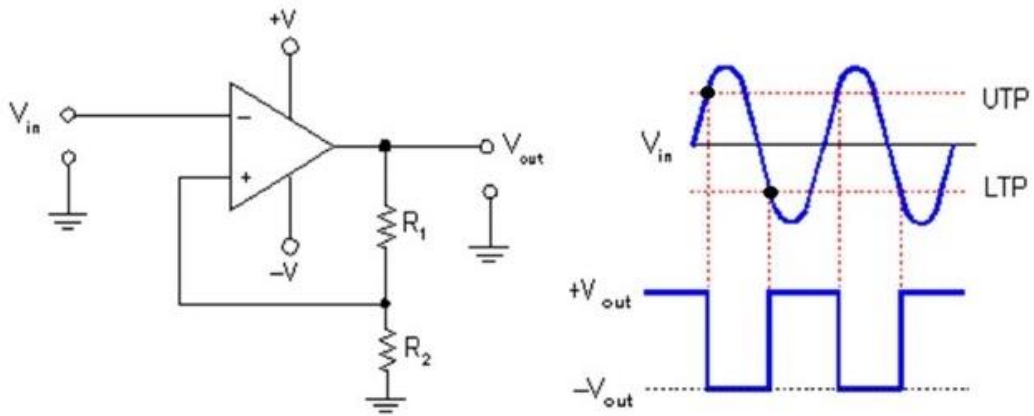


Şekil 57- Scope 11  $V_n=-0,3V$  Olması Durumunda AND Kapısı Osilatör Çıkışı

## 5.2. Memristör Emülatörü ile Kare Dalga Osilatörü Gerçeklemesi

EKLER başlığında gerçek ortamda tasarlanan memristör emülatör tabanlı kare dalga osilatörü devresi görülmektedir (Şekil 67). Geri besleme hattı karşılaştırmalı işlemsel yükselteçlere giriş sinyali olarak verildiğinden önerilen modelin gerçeklemede bazı problemlerle karşılaşmıştır. Şekil 67'de U2:A (Şekil 52'de Opamp1) olarak

isimlendirilen işlemsel yükseltecin referans noktası sabit +0,75V olarak verildiğinde, geri beslemeden gelen sinyal bu değeri geçtiği anda işlemsel yükselteç negatif besleme hattını çıkışa vermektedir. Fakat işlemsel yükseltecin ideal olmamasından bu negatif değere inmesi belli bir zaman almaktadır. Bu durumda iniş rampasındaki bir noktada geri besleme gerilimi işlemsel yükseltecin girişine tekrar geldiği anda, +0,75V referans geriliminden küçük olacağından dolayı, işlemsel yükselteç çıkışına tekrar pozitif besleme gerilimi verir. İşlemsel yükselteç çıkışına pozitif besleme gerilimi verdiği anda devre geri besleme ile memristör üzerine pozitif gerilim uyguladığından, işlemsel yükseltecin girişi tekrardan +0,75V referans geriliminden büyük olur ve işlemsel yükselteç çıkışına negatif besleme gerilimi vermeye çalışır. Bu durum sonsuz döngü içerisinde devam edecektir. Bu problemi çözme noktasında U2:A ile isimlendirilen işlemsel yükseltece Schmitt Tetikleyici devresi uygulanmıştır.



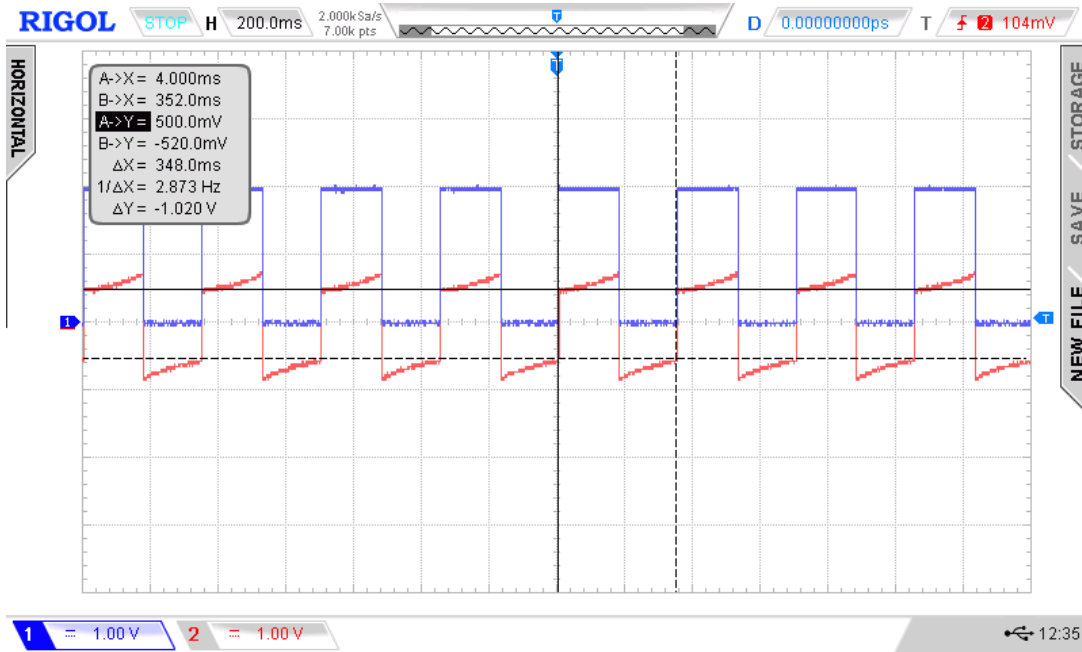
Şekil 58- Schmitt Tetikleyici Devresi ve Üst-Alt Tetik Noktaları [35]

$$UTP = +V \frac{R2}{R1 + R2} \quad (41)$$

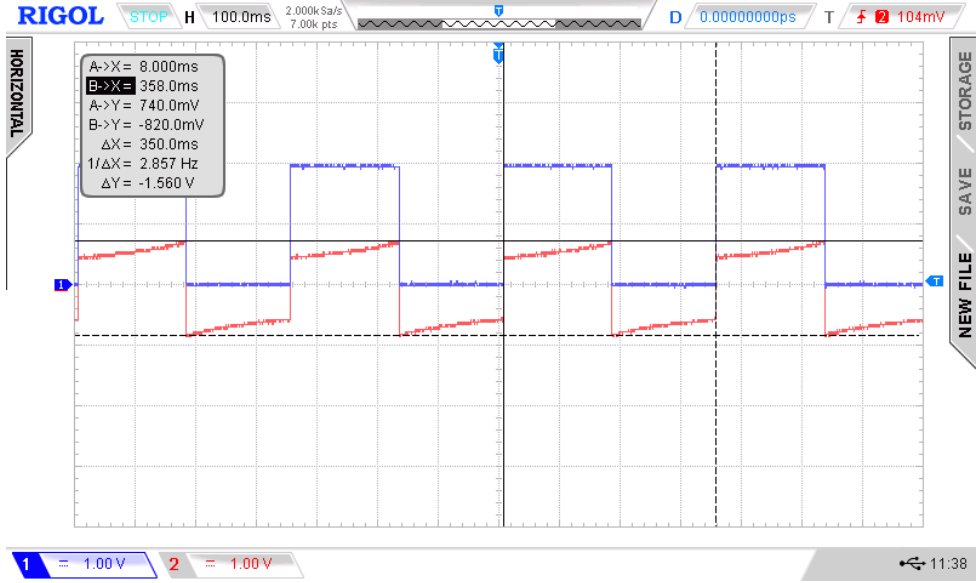
$$LTP = -V \frac{R2}{R1 + R2} \quad (42)$$

Eşitliklerde *UTP* üst tetik noktasını, *LTP* ise alt tetik noktasını, +V pozitif besleme gerilim seviyesini, -V negatif besleme sinyal seviyesini simgelemektedir. Pozitif referans gerilimimizi yeniden +0,75V yapabilmek için *R1* ve *R2* değerleri sırasıyla 17 kΩ ve 3 kΩ, işlemsel yükseltecin pozitif besleme gerilimi 6,33V, negatif besleme gerilimi -4,5V olarak seçilmiştir. Üst tetik noktası bu değerlerle yaklaşık olarak 0,75V olmaktadır. Bununla birlikte geri besleme hattı Schmitt Tetikleyici devresinin de düzgün çalışmasını

engellemeye devam ettiğinden işlemsel yükselteç girişine bir gecikme elemanı koymak gerekmektedir. Şekil 67’de görülen şematik bu değişiklikleri kapsamaktadır. Şekil 59 ve Şekil 60’ta yapılan değişiklikler sonrasında memristör emülatör tabanlı osilatör devresinin giriş ve çıkış sinyalleri görülmektedir. AND kapısının elemanının en düşük çıkış gerilimi 0V olduğu için geri besleme hattında 1V negatif yönde kaydırma işlemi yapan bir işlemsel yükselteç devresi daha bulunmaktadır. Bu yüzden grafiklerde çıkış gerilimi 0-2V arasında, karşılaştırıcı işlemsel yükselteçlerin girişi ise pozitif-negatif gerilim aralığında görülmektedir. Schmitt Tetikleyici yapısının U2:A isimli işlemsel yükseltece uygulanması sonucunda sabit +0,75V referans gerilimi devreden çıkarılarak, bu işlemsel yükseltecin referansı kendi çıkışından alınmıştır. Farklı frekanslarda dalga şekilleri alabilmek için Şekil 67’deki U2:A’nın referansı sabit bırakılarak sadece U2:B (Şekil 52’de Opamp2) işlemsel yükseltecinin negatif referans gerilimi üzerinde değişiklik yapılmıştır.

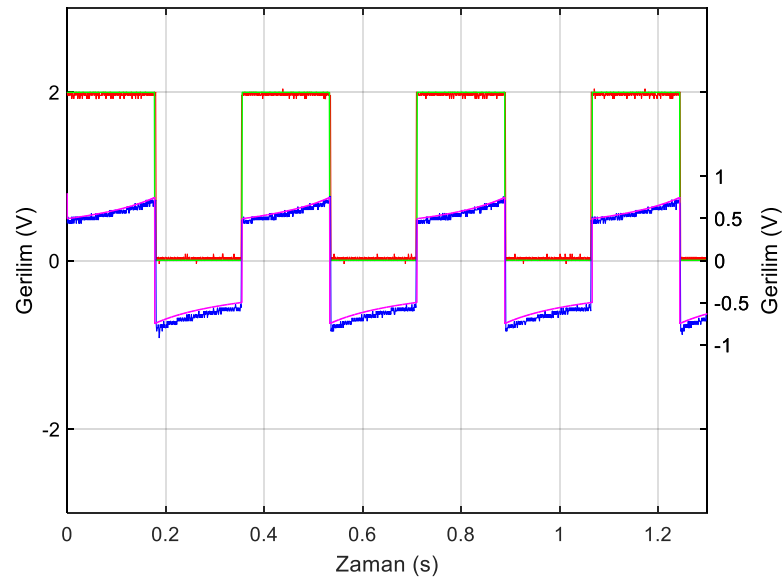


Şekil 59- (-0,5V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırıcı İşlemsel Yükselteç Girişi



Şekil 60- (-0,5V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi

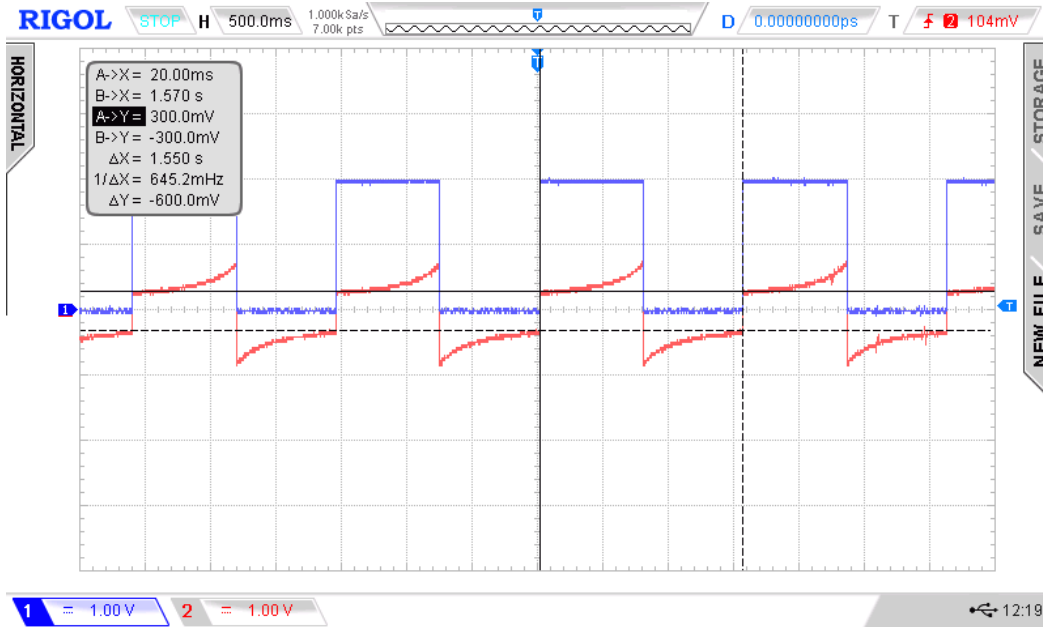
Sonraki adımda gerçek ortamda memristör emülatörünün doğruluğunu gözlemleyebilmek için, benzetim ortamında kurulan memristör emülatörü tabanlı kare dalga osilatörü devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatörü tabanlı kare dalga osilatörü devresi çalıştırılarak elde edilen zamana göre osilatör çıkışı ve işlemsel yükselteç girişi grafikleri Şekil 61’de görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 61- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması (-0,5V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi

Gerçekleme devresinde ölçülen kare dalga sinyal frekansı 2,873Hz değerindedir. Bu değer benzetim ortamında ölçülen 2,81Hz değeri ve frekans hesabı sonucu olan 2,8620Hz değeri ile uyumludur. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları ve gerçek ortamda sabit referans gerilimi yerine Schmitt Tetikleyici devresi kullanımı sonucu referans gerilimindeki sapmalar gibi nedenler sayılabilir.

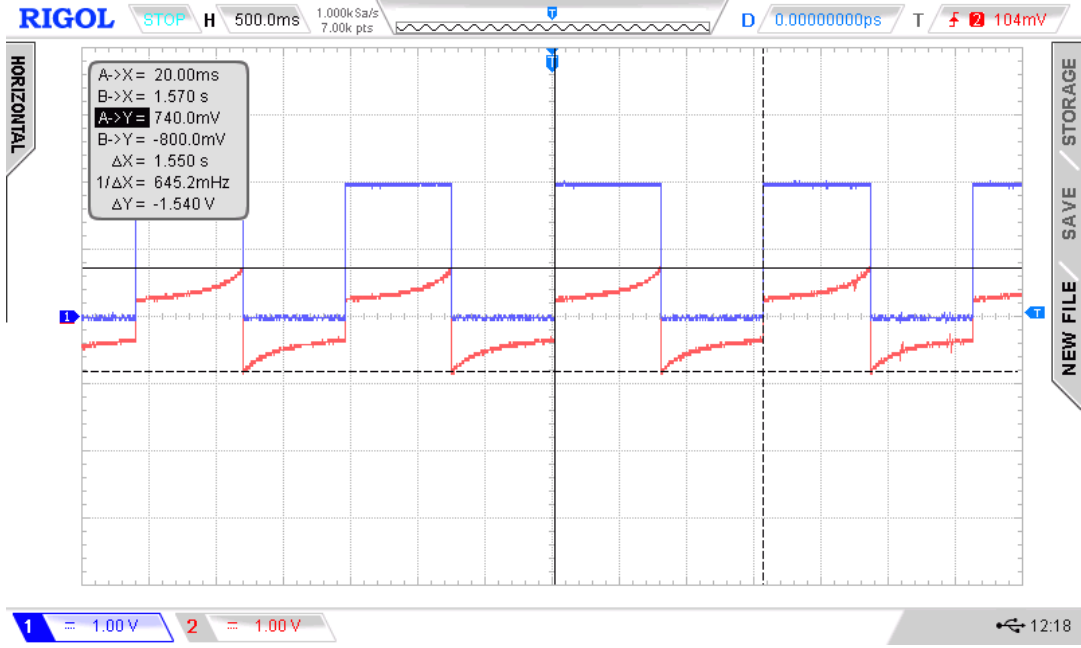
Şekil 62 ve Şekil 63'te negatif referans geriliminin -0,3V değerine çıkarılmasıyla frekansın  $\sim 0,65$ Hz değerlerine indiği görülmektedir. Frekansın düşmesi ile birlikte geri besleme gerilimi memristör emülatörünün üzerine uygulandığı için, düşük frekansta memristör emülatörünün doğrusal olmama özelliğinin arttığı şekillerdeki karşılaştırmalı işlemsel yükselteç giriş sinyallerine bakılarak anlaşılabilir.



Şekil 62- (-0,3V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmalı İşlemsel Yükselteç Girişi

Frekansın artmasıyla memristör emülatörünün doğrusal olmama durumundaki azalma, karşılaştırmalı işlemsel yükselteçlerin girişi grafiğinden görülmektedir. Devrede pozitif sinyal çıkışı olduğu durumda memristör üzerinde oluşan pozitif gerilim memristör direncini düşürmekte ve memristöre seri bağlı direncin gerilimini dolayısıyla karşılaştırmalı işlemsel yükselteçlerin girişi yükseltmektedir. Bu durum devrede negatif sinyal çıkışı olduğunda ise tam tersi şekilde gerçekleşir.

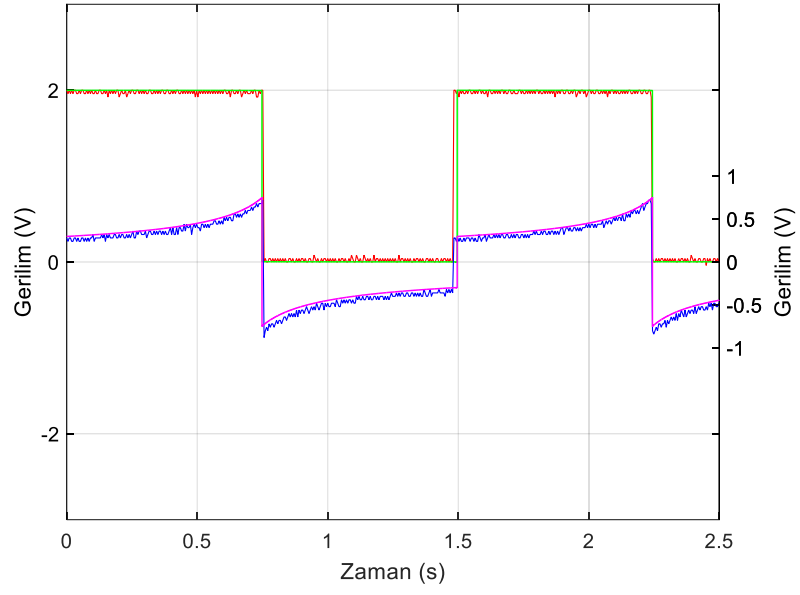




Şekil 63- (-0,3V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi

Gerçek ortamda memristör emülatörünün doğruluğunu gözlemleyebilmek için, benzetim ortamında kurulan memristör emülatörü tabanlı kare dalga osilatörü devresi ile gerçek ortamda kurulan memristör emülatörü tabanlı kare dalga osilatörü devresi çalıştırılarak elde edilen zamana göre osilatör çıkışı ve işlemsel yükselteç girişi grafikleri Şekil 64'te görüldüğü üzere üst üste çizdirilmiştir. Grafiğe bakıldığında verilerin üst üste geldiği görülmektedir. Bu da hata payının çok az olduğu hakkında bilgi verebilir.

Gerçekleme devresinde ölçülen kare dalga sinyal frekansı 0,645Hz değerindedir. Sayısal anlamda karşılaştırılırsa, bu değer benzetim ortamında ölçülen 0,6686Hz değeri ve frekans hesabı sonucu olan 0,6814Hz değeri ile uyumlu olduğu görülür. Bu durum farklı referans gerilimleri ile frekansın düzgün bir şekilde değiştirebildiğini de göstermektedir. Oluşan hata farkının nedenleri arasında ölçüm hataları, ortam gürültüsü, devrede kullanılan elektronik elemanların hata toleransları ve gerçek ortamda sabit referans gerilimi yerine Schmitt Tetikleyici devresi kullanımı sonucu referans gerilimindeki sapmalar gibi nedenler sayılabilir.



Şekil 64- Benzetim-Gerçek Ortam Karşılaştırması (-0,3V) Referans Gerilimi Sonucu Oluşan AND Kapısı Kare Dalga Çıkışı ve Karşılaştırmacı İşlemsel Yükselteç Girişi

## 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasının amacı programlanabilir yapısı sayesinde farklı memristör modellerin üzerinde çalışılabileceği, rafta hazır ürün olarak tedarik edilebilen elektronik elemanlardan oluşan, farklı devre elemanları ile bağlanarak devre uygulamalarında kullanılabilen bir memristör emülatör devresi tasarlanarak, memristör tabanlı örnek bir devre uygulamasında kullanılabilirliğinin gösterilmesidir. Bu çerçevede ADC, SPI gibi dahili çevre birimleri olan bir mikrodenetleyici ve dijital potansiyometre kullanılarak memristör emülatör devresinin gerçekleştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Tasarlanan dijital sistem tabanlı memristör emülatörünün MATLAB Simulink ortamında fonksiyon bloğu ve potansiyometre kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim şekli ile gerçekleştirilen devresine en yakın yapının kurulması hedeflenmiştir. Benzetim ortamından alınan veriler ve grafikler, gerçekleştirilen devresi için test ölçütü olarak da kullanılmıştır.

STMicroelectronics firmasının STM32F4 Discovery kartı ile Analog Devices firmasının AD5293 dijital potansiyometre yongası kullanılarak oluşturulan memristör emülatörü ile gerçek ortamda testler yapılmıştır. Literatürdeki benzer tasarımlarda kullanılan 256 adım aralıklı yüksek direnç tolerans oranına sahip dijital potansiyometreler yerine, 1024 adım aralıklı düşük direnç tolerans oranına sahip dijital potansiyometre tercih edilerek çözünürlük performansının geliştirilmesi hedeflenmiştir [13]. Yapılan testler sonrasında, benzetim ortamından alınan veriler ile çizdirilen grafikler, gerçekleştirilen devresinden elde edilen grafiklerle üst üste bindirilmiş ve grafikleri oluşturan noktalar arasında ortalama mutlak hata hesaplanmıştır. HP Modeli ve Biolak-Biolkova Penceresi uygulanmış HP Modeli üzerinde farklı frekanslarda 5'er farklı test yapılmış ve her test için ortalama mutlak hata ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çizelge 15'te farklı model ve frekanslarda yapılan 5'erli testlerin hata ortalaması verilmiştir. Benzetim ortamında elde edilen verilerle yapılan bu karşılaştırmalarda düşük bir hata farkına sahip, HP memristör modeline ve Biolak-Biolkova pencere fonksiyonuna uygun davranış sergileyen bir memristör emülatör devresinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesinin yapıldığı görülmüştür.

Çizelge 15- Farklı Testler Sonucu Benzetim Ortamı Verileri ile Gerçekleme Devresi Verileri Arasındaki Hesaplanan Ortalama Mutlak Hatalar

Model Adı-Giriş Sinyali	Ortalama Mutlak Hata (Gerilim(V))	Ortalama Mutlak Hata (Akım(A))
HP Modeli – 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Dalgası Sinyal Girişi	30mV	6,6322 $\mu$ A
HP Modeli – 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Dalgası Sinyal Girişi	28,72mV	6,4745 $\mu$ A
HP Modeli – 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Sinyal Girişi	24,0mV	20,829 $\mu$ A
HP Modeli – 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Sinyal Girişi	28,9mV	11,189 $\mu$ A
Biolek-Biolkova Penceresi Uygulanmış HP Modeli - 1,2V Genliğinde 1Hz Sinüs Dalgası Sinyal Girişi	28,7mV	7,2445 $\mu$ A
Biolek-Biolkova Penceresi Uygulanmış HP Modeli - 1,2V Genliğinde 2Hz Sinüs Dalgası Sinyal Girişi	27,6mV	6,5871 $\mu$ A
Biolek-Biolkova Penceresi Uygulanmış HP Modeli - 1V Genliğinde 1Hz Kare Dalga Sinyal Girişi	23,8mV	2,0369 $\mu$ A
Biolek-Biolkova Penceresi Uygulanmış HP Modeli - 1V Genliğinde 2Hz Kare Dalga Sinyal Girişi	30,1mV	7,617 $\mu$ A

Bununla birlikte doğrusal olmayan iyon sürüklenme modeli de benzetim ortamındaki emülatör devresi üzerinde uygulanmıştır. Alınan sonuçlar literatürdeki grafik değerleriyle karşılaştırıldığında modeline uygun bir davranış sergilediği görülmektedir. Gerçek

ortamda bu modeli emülatör yardımı ile gözlemleyebilmek için daha yüksek direnç değerine sahip ( $\sim 1 \text{ M}\Omega$ ) dijital potansiyometre kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple çalışma kapsamında gerçek ortamda bu model üzerine ayrıca çalışılmamıştır. Sunulan dijital memristör emülatörünün bu şekilde programlanabilir olması farklı memristör modellerinin de davranışlarını gözlemleyebilmek adına fayda sağladığı görülmektedir.

Son olarak memristör emülatörü ile memristör tabanlı kare dalga osilatörü devresinin benzetim ve gerçek ortamdaki uygulaması yapılmıştır. Osilatör devresi benzetim ortamında çalışmasına rağmen, gerçek ortamdaki kurulan devre üzerinde yapılan çalışmalarda bazı problemlerle karşılaşmıştır. Kare dalga osilatörü devresinde karşılaştırmacı işlemsel yükselteçlerin girişine gönderilen geri besleme sinyali yükseltecin karşılaştırma referans gerilimi değerini geçmesi durumunda işlemsel yükselteç çıkışını pozitif besleme geriliminden negatif besleme gerilim değerine çekmektedir. Fakat çıkıştaki bu gerilim değişimi, işlemsel yükselteçlerin gerçekte ideal olmayan davranışları sebebiyle belirli bir zaman süresinde olmaktadır. Geri besleme hattının bu süre içerisinde işlemsel yükselteçlerin girişini beslemeye devam etmesi, işlemsel yükselteç giriş geriliminin referans gerilimine göre yeniden düşük olmasına sebebiyet vermektedir. Bu durumda işlemsel yükselteç çıkışını tekrar pozitif besleme gerilimine çekerek istenmeyen bir salınım durumuna girmesine neden olmaktadır. Referans gerilimi noktasındaki bu istenmeyen salınımın önüne geçmek için devre üzerinde değişiklikler yapılarak bir işlemsel yükseltece eviren Schmitt Tetikleyici yapısı ile birlikte gecikme elemanı olarak direnç-kapasitör (RC) eklenmiştir. Memristör emülatörü ile yapılan testlerde devrenin davranışı ve osilatör frekansı gözlemlenmiştir. Frekans hesabından elde edilen değer ile benzetim ve gerçekleştirme devresinden ölçülen frekans değerleri Çizelge 16'da görülmektedir. Frekans değerleri incelendiğinde, değerlerin birbirleriyle uyumlu olduğu ve devrenin doğru şekilde çalıştığı görülmüştür.

Çizelge 16- Kare Dalga Osilatör Devresinde Hesaplanan ve Ölçülen Frekans Değerleri

$V_n$ (Negatif Referans Gerilimi) Değeri	Hesaplanan Frekans Değeri	Benzetim Ortamında Ölçülen Frekans Değeri	Gerçekleme Devresinde Ölçülen Frekans Değeri
-0,3V	0,6814Hz	0,6686Hz	0,645Hz
-0,5V	2,8620Hz	2,81Hz	2,873Hz

## KAYNAKLAR

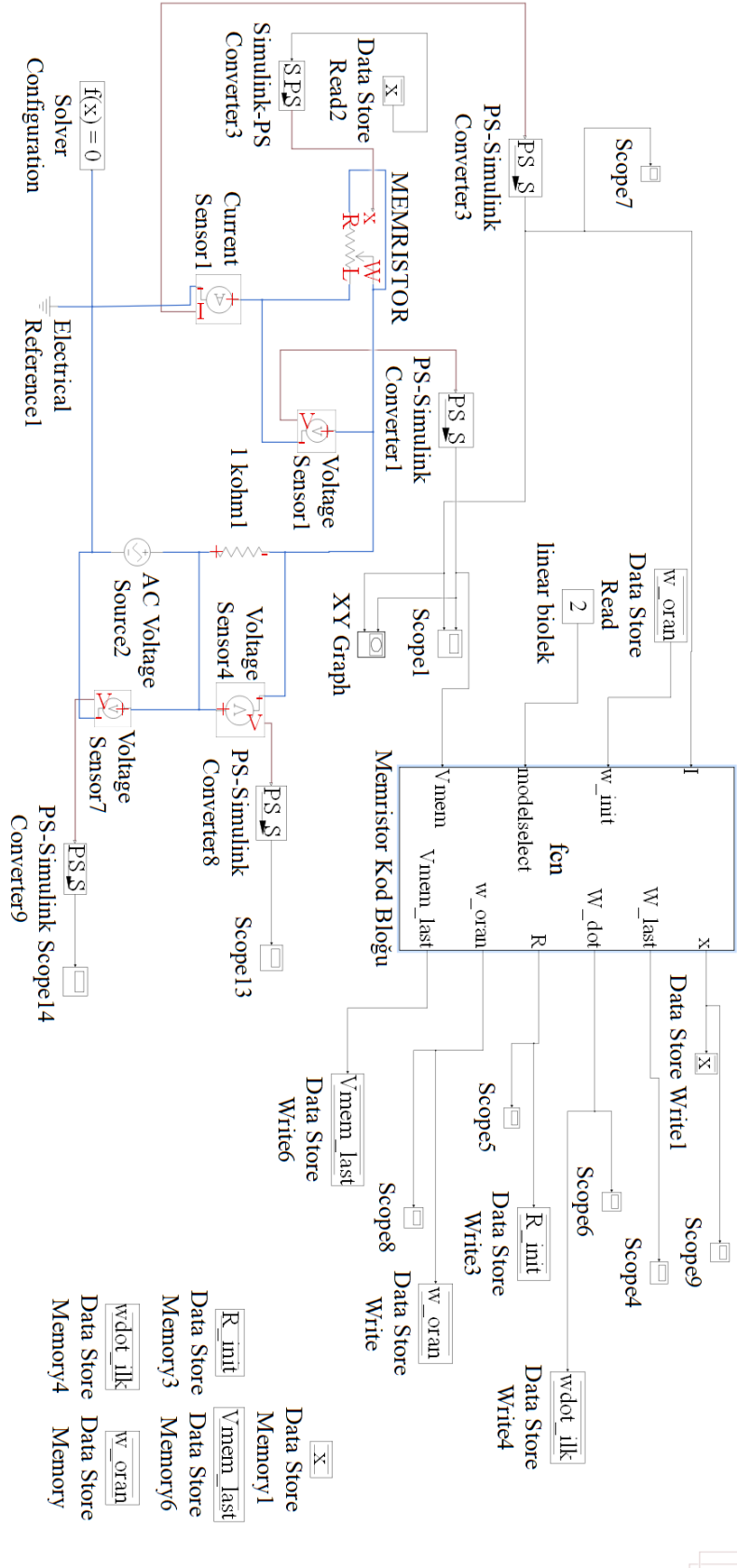
- [1] L. O.Chua, IEEE Transactions On Circuit Theory, 18-5 (1971) 507.
- [2] Dmitri B. Strukov, Gregory S. Snider, Duncan R. Stewart and R. Stanley Williams, Nature, 453 (2008) 80.
- [3] P. Mazumder, S. M. Kang, R. Waser, Proceedings of the IEEE, 100-6 (2012) 1911.
- [4] V. Keshmiri, A Study of the Memristor Models and Applications, Linköping University, Linköping, 2014.
- [5] L.Chua, Appl Phys A Mater. Sci. Process., 102-4 (2011) 765.
- [6] O. Kavehei, Memristive Devices and Circuits for Computing, Memory, and Neuromorphic Applications, Ph. D., The University of Adelaide, 2012.
- [7] E. Lehtonen, J. H. Poikonen, M. Laiho, Electronics Letters, 46-3 (2010) 239.
- [8] M. Affan Zidan, H. Omran, A.G. Radwan, K.N. Salama, Electronics Letters, 47-22 (2011) 1220.
- [9] Z. Biolek, D. Biolek, V. Biolková, Radioengineering, 18-2 (2009) 210.
- [10] Shahar Kvatinsky, Keren Talisveyberg, Dmitry Fliter, Avinoam Kolodny, Uri C. Weiser, Eby G. Friedman, Models of memristors for SPICE simulations, IEEE 27th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 14-17 November 2012, Eilat, Israel, 2012 .
- [11] S. Benderli, T.A. Wey, Electronics Letters, 45-7 (2009) 377.
- [12] H. Abdalla, Matthew D. Pickett , SPICE Modeling of Memristors, 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS), 15-18 May 2011, Rio de Janeiro, 2011.
- [13] Yuriy V. Pershin, M. Di Ventra , IEEE Transactions On Circuits And Systems—I: Regular Papers, 57-8 (2010) 1857.
- [14] G. Wang, D. Bai, X. Wang, Digital model of TiO<sub>2</sub> memristor for field-programmable gate array, The Journal of Engineering, 2014-14 (2014) 90

- [15] E. Karakulak, Reşat Mutlu, Emulator Circuit Of TiO<sub>2</sub> Memristor With Linear Dopant Drift Made Using Analog Multiplier, 2010 National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, Istanbul, **2010**.
- [16] J. Valsa, D. Biolek and Z. Biolek, International Journal Of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices And Fields, 24 (**2010**) 400.
- [17] H. Kim, M. Pd. Sah, C. Yang, S. Cho and Leon O. Chua, IEEE Transactions On Circuits And Systems—I: Regular Papers, 59-10 (**2012**) 2422.
- [18] A. Yeşil, Y. Babacan, F. Kaçar, Microelectronics Journal, 45-3 (**2014**) 282.
- [19] C. Yang, H. Choi, S. Park, M. Sah, H. Kim, L.O. Chua, Semiconductor Science and Technology, 30-1 (**2015**).
- [20] Anonim, HP Memristor FAQ, [https://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor\\_faq.html](https://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor_faq.html). (Erişim Tarihi: **17 Aralık 2018**).
- [21] O. Kavehei, A. Iqbal, Y. S. Kim, K. Eshraghian, S. F. Al-Sarawi and D. Abbott, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 466-2120 (**2010**).
- [22] R. S. Williams, IEEE Spectrum, (**2008**) 29.
- [23] L. Wei, W. Fa-Qiang and Ma Xi-Kui, Chin. Phys. B, 24-11 (**2015**).
- [24] S.M.Kang, L.O.Chua, Proceedings of the IEEE, 64-2 (**1976**) 209.
- [25] Anonim, 1st Symposium on Memristors and Memristive Systems, <https://www.youtube.com/watch?v=QFdDPzcZwbs> (Erişim tarihi: **10 Aralık 2018**).
- [26] S. Kvatinsky, E. G. Friedman, A. Kolodny and Uri C. Weiser, IEEE Transactions On Circuits And Systems—I: Regular Papers, 60-1 (**2013**) 221.
- [27] Yogesh N. Joglekar, Stephen J. Wolf, IOP Publishing European Journal Of Physics, 30 (**2009**) 661.
- [28] T. Prodromakis, B. Pin Peh, C. Papavassiliou, C. Toumazou, IEEE Transactions On Electron Devices, 58-9 (**2011**) 3099.
- [29] M. Laiho, E. Lehtonen, CNN Using Memristors for Neighborhood Connections, 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA), 3-5 Feb. 2010, Berkeley, CA, USA, **2010**.

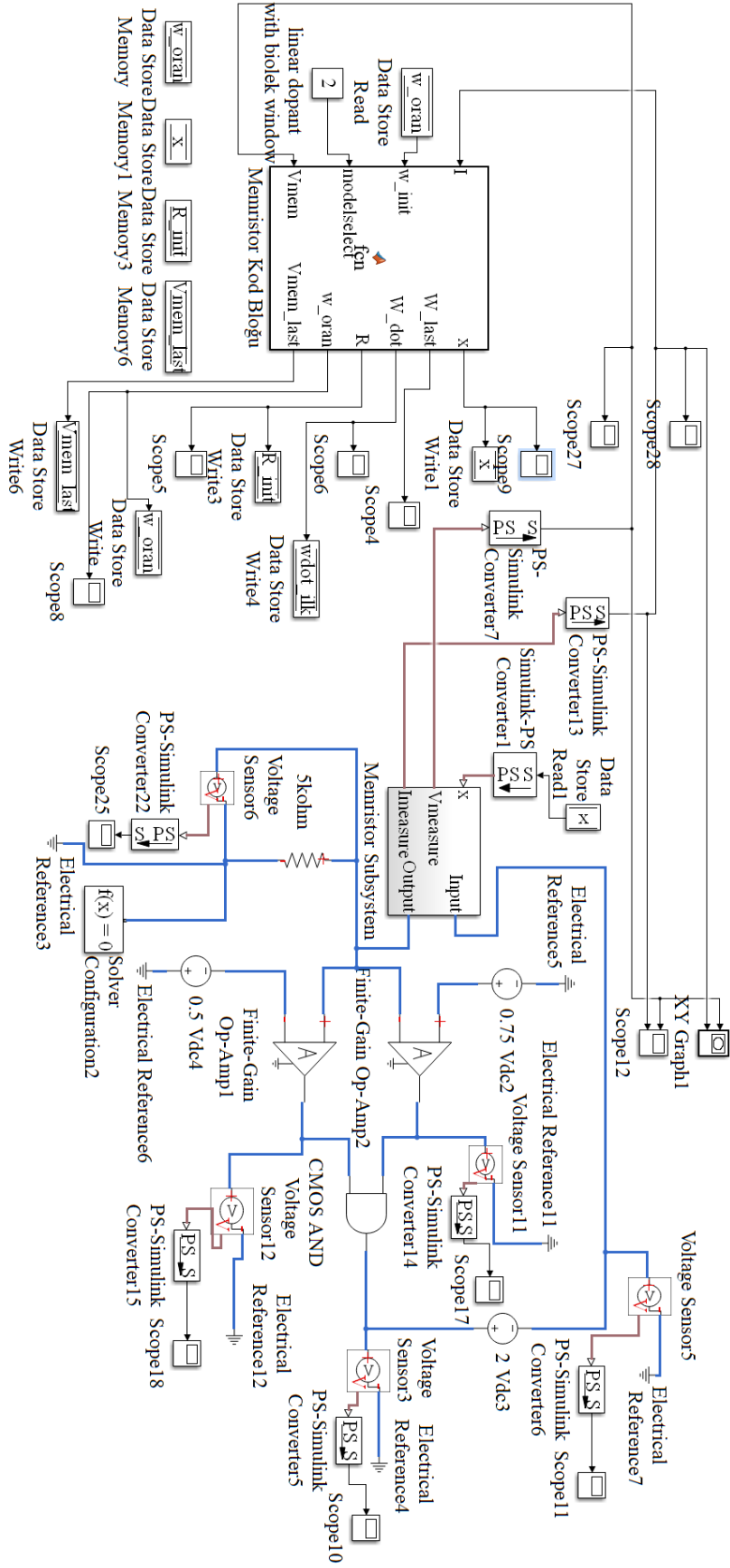
- [30] J. Joshua Yang, M. D. Pickett, X. Li, Douglas A. A. Ohlberg, D. R. Stewart and R. Stanley Williams , Nature Nanotechnology, 3 (2008) 429.
- [31] R. S. Williams, D. B. Strukov, Appl. Phys. A, Mater. Sci. Process, 94-3 (2009) 515.
- [32] H. Y. Özdeya, <https://hackaday.io/project/5334-serialplot-realtime-plotting-software> (Erişim Tarihi: **18 Ağustos 2019**).
- [33] A. G. Radwan, M. Affan Zidan, K. N. Salama, HP Memristor Mathematical Model for Periodic Signals and DC, 2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1-4 Aug. 2010, Seattle, WA, USA , **2010**.
- [34] E. Yumrukaya, Analysis And Design Of Oscillator Circuits Employing Memristor, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül University, İzmir, **2016**.
- [35] Anonim, Schmitt Trigger Applications, <https://www.elprocus.com/what-is-a-schmitt-trigger-working-and-applications/> (Erişim Tarihi: **15 Ağustos 2019**).



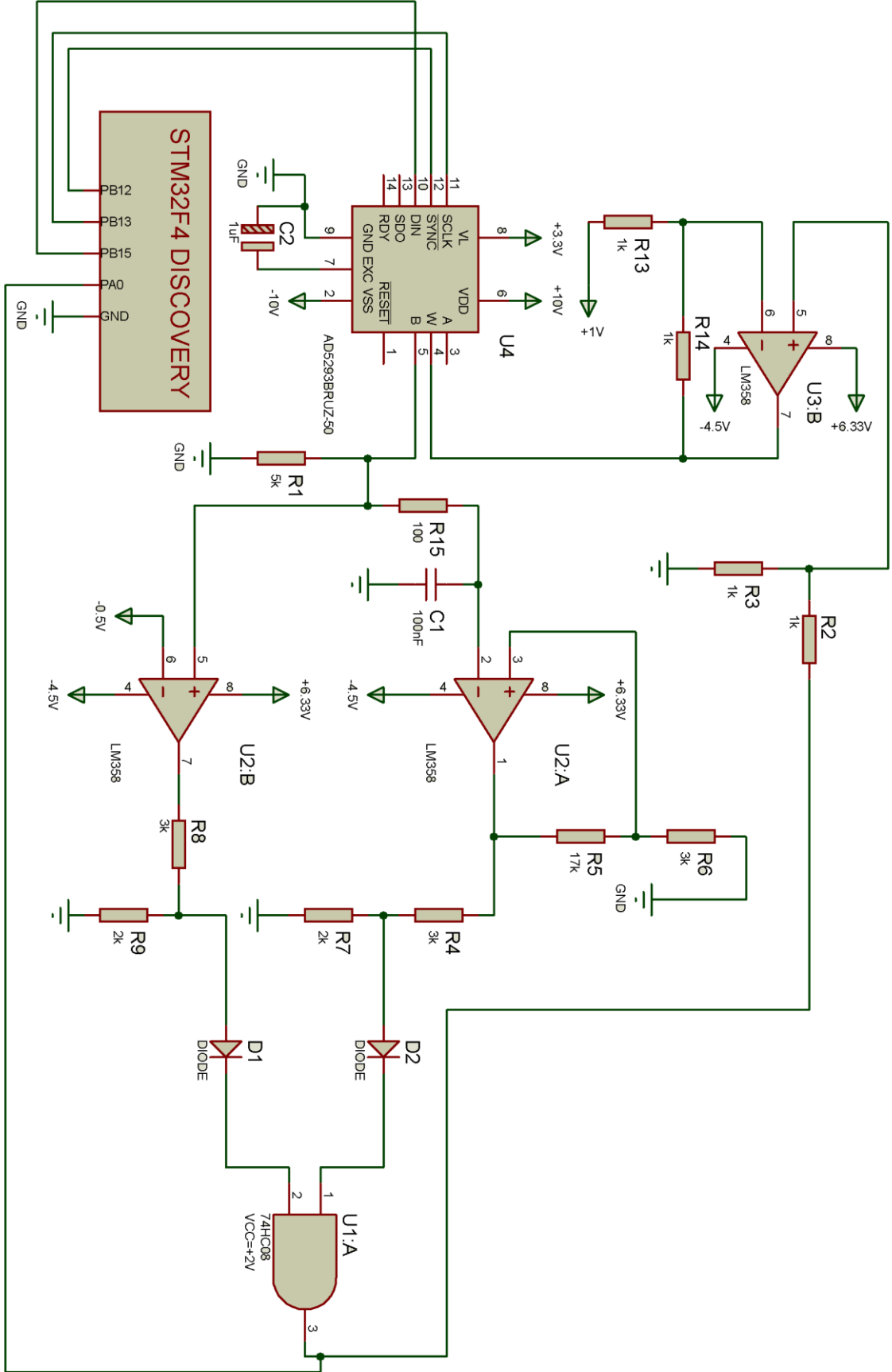
## EKLER



Şekil 65- Memristör Emülatörünün MATLAB Simulink Ortamında Benzetimi


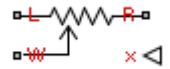







Şekil 66- Memristör Emülatörlü Kare Dalga Osilatörü Matlab Simulink Benzetimi

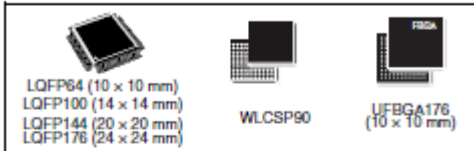


Şekil 67- Memristör Emülatörlü Osilatör Devresi Şematik Gösterimi

Çizelge 17- MATLAB Simulink Benzetiminde Kullanılan Yapılar

Benzetim ortamı eleman adı	Benzetim Simgesi	Açıklama
MATLAB Fonksiyon Bloğu		Bu fonksiyon bloğunun içerisine yazılan memristör algoritması, bloğun girişinden aldığı gerilim, akım, $\omega$ değeri, memristör model tipi gibi değişkenleri kullanarak potansiyometreye yazılacak direnç değerini ve yeni $\omega$ değerini hesaplar.
Potansiyometre		Memristör algoritmasının MATLAB fonksiyon bloğundan aldığı direnç değerlerine göre direncini ayarlayarak devre içerisinde memristör davranışı gösterir. Potansiyometrenin toplam direnç değeri ve direnç değişim adım aralığı ayarlanabilir olduğundan gerçekleştirme devresinde kullanılan potansiyometre ile aynı özellikte olacak şekilde ayarlanabilmektedir.
Fiziksel Sinyal-Simulink Sinyali Çevirici		Devre üzerindeki elektriksel sinyallerin MATLAB fonksiyon bloğuna giriş sinyali olarak verilebilmesi için bu sinyal çeviricinin kullanılması gerekmektedir.
Simulink Sinyali-Fiziksel Sinyal Çevirici		MATLAB fonksiyon bloğundan alınan çıkış sinyallerinin devre üzerinde kullanılabilmesi için bu sinyal çeviricinin kullanılması gerekmektedir.
Veri kaydetme hafıza bloğu		Kaydedilmek istenen değişkenlerin hafızada tutulmasını sağlayan blok yapısıdır. Aynı ismi taşıyan veri yazma ve veri okuma blokları kendi hafıza bloğuna ulaşarak yazma ve okuma işlemini gerçekleştirir. Değişkenin başlangıç değeri de bu hafıza bloğunda tanımlanır.

Benzetim ortamı eleman adı	Benzetim Simgesi	Açıklama
Veri yazma bloğu		MATLAB fonksiyon bloğunun çıkışları bu blok yapısına bağlanarak verinin aynı isimli hafıza bloğuna yazılması sağlanır.
Veri okuma bloğu		Bu blok yapısı aynı isimli hafıza bloğundan ilgili değişkenin son değerinin okunmasını sağlar.



## Features

- Core: ARM 32-bit Cortex™-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator™) allowing 0-wait state execution from Flash memory, frequency up to 168 MHz, memory protection unit, 210 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), and DSP instructions
- Memories
  - Up to 1 Mbyte of Flash memory
  - Up to 192+4 Kbytes of SRAM including 64-Kbyte of CCM (core coupled memory) data RAM
  - Flexible static memory controller supporting Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR and NAND memories
- LCD parallel interface, 8080/6800 modes
- Clock, reset and supply management
  - 1.8 V to 3.6 V application supply and I/Os
  - POR, PDR, PVD and BOR
  - 4-to-26 MHz crystal oscillator
  - Internal 16 MHz factory-trimmed RC (1% accuracy)
  - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
  - Internal 32 kHz RC with calibration
- Low power
  - Sleep, Stop and Standby modes
  - V<sub>BAT</sub> supply for RTC, 20×32 bit backup registers + optional 4 KB backup SRAM
- 3×12-bit, 2.4 MSPS A/D converters: up to 24 channels and 7.2 MSPS in triple interleaved mode
- 2×12-bit D/A converters
- General-purpose DMA: 16-stream DMA controller with FIFOs and burst support
- Up to 17 timers: up to twelve 16-bit and two 32-bit timers up to 168 MHz, each with up to 4

- IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
- Debug mode
  - Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
  - Cortex-M4 Embedded Trace Macrocell™
- Up to 140 I/O ports with interrupt capability
  - Up to 136 fast I/Os up to 84 MHz
  - Up to 138 5 V-tolerant I/Os
- Up to 15 communication interfaces
  - Up to 3 × I<sup>2</sup>C interfaces (SMBus/PMBus)
  - Up to 4 USARTs/2 UARTs (10.5 Mbit/s, ISO 7816 interface, LIN, IrDA, modem control)
  - Up to 3 SPIs (42 Mbits/s), 2 with muxed full-duplex I<sup>2</sup>S to achieve audio class accuracy via internal audio PLL or external clock
  - 2 × CAN interfaces (2.0B Active)
  - SDIO interface
- Advanced connectivity
  - USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY
  - USB 2.0 high-speed/full-speed device/host/OTG controller with dedicated DMA, on-chip full-speed PHY and ULPI
  - 10/100 Ethernet MAC with dedicated DMA: supports IEEE 1588v2 hardware, MII/RMII
- 8- to 14-bit parallel camera interface up to 54 Mbytes/s
- True random number generator
- CRC calculation unit
- 96-bit unique ID
- RTC: subsecond accuracy, hardware calendar

Table 1. Device summary

Reference	Part number
STM32F405xx	STM32F405RG, STM32F405VG, STM32F405ZG, STM32F405OG, STM32F405OE
STM32F407xx	STM32F407VG, STM32F407IG, STM32F407ZG, STM32F407VE, STM32F407ZE, STM32F407IE

## FEATURES

- Single-channel, 1024-position resolution
- 20 k $\Omega$ , 50 k $\Omega$ , and 100 k $\Omega$  nominal resistance
- Calibrated 1% nominal resistor tolerance (resistor performance mode)
- Rheostat mode temperature coefficient: 35 ppm/ $^{\circ}$ C
- Voltage divider temperature coefficient: 5 ppm/ $^{\circ}$ C
- Single-supply operation: 9 V to 33 V
- Dual-supply operation:  $\pm$ 9 V to  $\pm$ 16.5 V
- SPI-compatible serial interface
- Wiper setting readback

## APPLICATIONS

- Mechanical potentiometer replacement
- Instrumentation: gain and offset adjustment
- Programmable voltage-to-current conversion
- Programmable filters, delays, and time constants
- Programmable power supply
- Low resolution DAC replacements
- Sensor calibration

## GENERAL DESCRIPTION

The AD5293 is a single-channel, 1024-position digital potentiometer (in this data sheet, the terms digital potentiometer and RDAC are used interchangeably) with a <1% end-to-end resistor tolerance error. The AD5293 performs the same electronic adjustment function as a mechanical potentiometer with enhanced resolution, solid state reliability, and superior low temperature coefficient performance. This device is capable of operating at high voltages and supporting both dual-supply operation at  $\pm$ 10.5 V to  $\pm$ 15 V and single-supply operation at 21 V to 30 V.

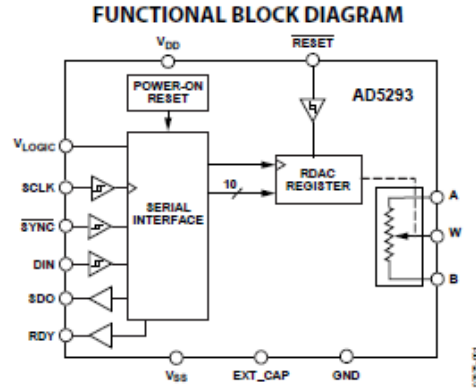


Figure 1.

The AD5293 offers guaranteed industry-leading low resistor tolerance errors of  $\pm$ 1% with a nominal temperature coefficient of 35 ppm/ $^{\circ}$ C. The low resistor tolerance feature simplifies open-loop applications as well as precision calibration and tolerance matching applications.

The AD5293 is available in a compact 14-lead TSSOP package. The part is guaranteed to operate over the extended industrial temperature range of  $-40^{\circ}$ C to  $+105^{\circ}$ C.

Rev. E

[Document Feedback](#)

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 ©2009–2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved.  
[Technical Support](#) [www.analog.com](http://www.analog.com)



## LM358

### LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

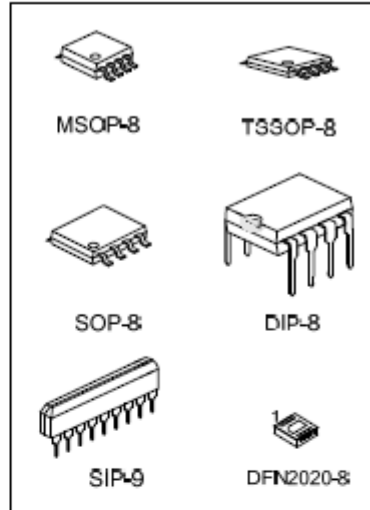
## DUAL OPERATIONAL AMPLIFIER

### DESCRIPTION

The UTC LM358 consists of two independent high gain, internally frequency compensated operational amplifier. It can be operated from a single power supply and also split power supplies.

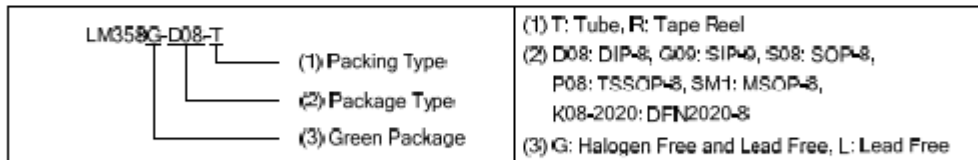
### FEATURES

- \*Internally frequency compensated for unity gain.
- \*Wide power supply range 3V - 32V.
- \*Input common-mode voltage range include ground.
- \*Large DC voltage gain.

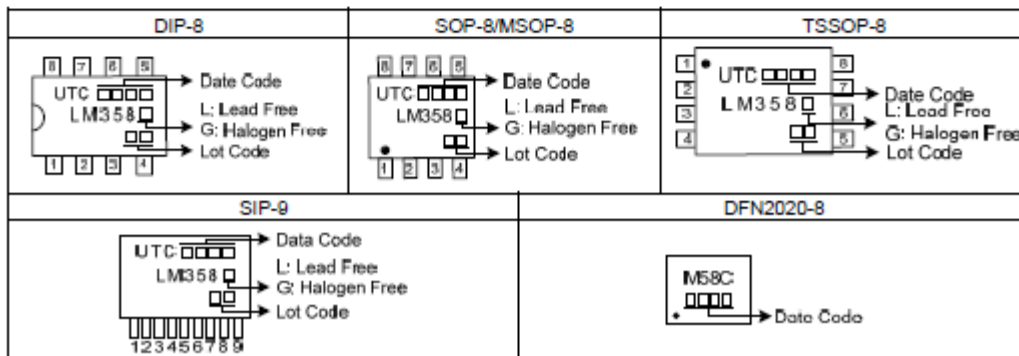


### ORDERING INFORMATION

Ordering Number		Package	Packing
Lead Free	Halogen-Free		
LM358L-D08-T	LM358G-D08-T	DIP-8	Tube
LM358L-L08-T	LM358G-G08-T	SIP-9	Tube
LM358L-P08-R	LM358G-P08-R	TSSOP-8	Tape Reel
LM358L-S08-R	LM358G-S08-R	SOP-8	Tape Reel
LM358L-SM1-R	LM358G-SM1-R	MSOP-8	Tape Reel
LM358L-K08-2020-R	LM358G-K08-2020-R	DFN2020-8	Tape Reel



### MARKING



Şekil 70- İşlemsel Yükselteç Veri Sayfası



## SNx4HC08 Quadruple 2-Input Positive-AND Gates

### 1 Features

- Wide Operating Voltage Range of 2 V to 6 V
- Outputs Can Drive up to 10 LSTTL Loads
- Low Power Consumption: Maximum  $I_{CC}$  20  $\mu$ A
- Typical  $t_{pd}$  = 8 ns at 6 V
- $\pm$ 4-mA Output Drive at 5 V
- Low Input Current of 1  $\mu$ A (Maximum)

### 2 Applications

- Servers
- LED Displays
- Network Switches
- I/O Expanders
- Base Station Processor Boards

### 3 Description

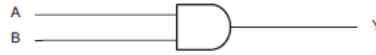
The SNx4HC08 devices contain four independent 2-input AND gates. They perform the Boolean function  $Y = A \bullet B$  or  $Y = \bar{A} + \bar{B}$  in positive logic.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
SN74HC08D	SOIC (14)	8.65 mm × 3.90 mm
SN74HC08DB	SSOP (14)	6.30 mm × 5.30 mm
SN74HC08N	PDIP (14)	19.34 mm × 6.35 mm
SN74HC08NS	SO (14)	10.30 mm × 5.30 mm
SN74HC08PW	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm
SN54HC08	LCCC (20)	1.83 mm × 8.89 mm
	CDIP (14)	19.56 mm × 6.67 mm
	CFP (14)	9.21 mm × 5.97 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

#### Functional Diagram



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Şekil 71-AND Kapısı Veri Sayfası



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/~~DOKTORA~~ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 17/10/2019

Tez Başlığı / Konusu: Dijital Sistem Tabanlı Programlanabilir Memristör Emülatör Devre Tasarımı

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 85 sayfalık kısmına ilişkin, 17/10/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimededen daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Mustafa Asım KARA  
Öğrenci No: N13122205  
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği  
Programı: Tezli Yüksek Lisans  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

17.10.2019

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa Asım KARA  
Doğum Yeri : Silivri/ İSTANBUL  
Doğum Tarihi : 07.07.1990  
Medeni Hali : Evli  
Yazışma adresi : Yunus Emre Mah. Özgen Sok. No:10/5 Yenimahalle/ANKARA  
Telefon : 0535 306 82 51  
E-posta Adresi : masimkara@gmail.com  
Yabancı Dili : İngilizce

### EĞİTİM DURUMU

Lisans : Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği

İş Tecrübesi : 2013-... AR-GE, Kıdemli Uzman Mühendis,  
ROKETSAN A.Ş. - ANKARA