



**KARBON VE TUNGSTEN TABANLI  
MEMRİSTÖR İÇEREN KONDANSATÖR  
DEVRELERİNİN YÖN BAĞIMLI  
DOLMASI VE BOŞALMASININ İNCELENMESİ**

**Ceylan DALMIŞ**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği**

**Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Reşat MUTLU**

**2021**

**T.C**  
**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KARBON VE TUNGSTEN TABANLI MEMRİSTÖR İÇEREN KONDANSATÖR  
DEVRELERİNİN YÖN BAĞIMLI DOLMASI VE BOŞALMASININ İNCELENMESİ**

**Ceylan DALMIŞ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. Reşat MUTLU**

**TEKİRDAĞ-2021**

**Her Hakkı Saklıdır**





# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

## KARBON VE TUNGSTEN TABANLI MEMRİSTÖR İÇEREN KONDANSATÖR DEVRELERİNİN YÖN BAĞIMLI DOLMASI VE BOŞALMASININ İNCELENMESİ

**Ceylan DALMIŞ**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Reşat MUTLU

Memristör (Hafızalı Direnç) doğrusal olmayan bir devre elemanıdır. 1971’de Dr. Leon Chua tarafından ortaya atılmıştır. Dr. Chua akı ile yük arasında bir bağlantı varsa, bunun o ana kadar literatürde bahsedilmeyen memristör adını verdiği elemanı tanımlayacağını iddia etmiştir. 2008 yılında, bir HP laboratuvarında memristör gibi davranan bir memristif sistem bulunmuştur. Bu buluşla birlikte, memristör popüler bir araştırma konusu olmuştur. Yeni bir nonlineer devre elemanı olan memristörün diğer devre elemanları ile birlikte davranışının incelenmesi oldukça önemlidir. Literatürde memristör ve kondansatörün (M-C) birlikte analiz edildiği az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, bir kondansatör ve memristör devresinin yani M-C seri devresinin yöne bağımlı şarjı ve deşarjı hem analitik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışma ayrıca literatürde bir M-C şarj ve deşarj devresinin deneysel olarak ilk kez incelenecek olması açısından önemlidir. Devrelerde Knowm firmasının ürettiği Karbon ve Tungsten tabanlı memristörler kullanılmıştır. Analiz ve deneyler memristörlerin kataloğunda belirtildiği gibi seri bir koruma direnci kullanılarak yapılmıştır. Bu kaynaklı ve kaynaksız M-C devrelerinin Biolek memristör modeli kullanılarak analitik çözümlerinin var olup olmadığı araştırılmıştır. Ardından, bu devreler laboratuvar ortamında kurularak deneysel sonuçlar alınmıştır. Deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Memristör, Karbon-Tabanlı Memristör, Tungsten-Tabanlı Memristör,

Deşarj Devresi, Devre Teorisi

**2021, 139 sayfa**

## **ABSTRACT**

MSc. Thesis

### **EXAMINATION OF POLARITY-DEPENDENT CHARGING AND DISCHARGING OF CAPACITOR CIRCUITS CONTAINING CARBON AND TUNGSTEN BASED MEMRISTORS**

**Ceylan DALMIŞ**

Tekirdağ Namık Kemal University

Graduate School of Naturel and Applied Sciences

Department of Electronic and Communications Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Reşat MUTLU

Memristor (Memory Resistor) is a nonlinear circuit element. In 1971, it was proposed by Dr. Leon Chua. Dr. Chua claimed that if there were a relation between flux and charge, it would define the element, called memristor by him, which has not been mentioned in the literature until then. In 2008, a memristive system behaving as a memristor was found in an HP Laboratory. With this discovery, the memristor has become a popular research subject. It is very important to examine the behavior of memristor, which is a new nonlinear circuit element, with other circuit elements. There are few studies in the literature in which memristor and capacitor (M-C) are analyzed together. In this thesis, polarity dependent charge and discharge of a capacitor and memristor circuit, namely M-C series circuit, is investigated both analytically and experimentally. This study is also important since it is the first experimental study of an M-C charge and discharge circuit in the literature. Carbon and Tungsten based memristors produced by Knowm company are used in the circuits. Analysis and experiments are done using a series protection resistor as specified in the catalog of the memristors. It has been examined whether the analytical solutions of these M-C circuits with and without a source exist by using the Biolek memristor model. Then, the circuit was set up in the laboratory and experimental results are obtained.

**Keywords:** Memristor, Carbon-based Memristor, Tungsten-based Memristor,

Discharge Circuit, Circuit Theory



5.1.1 Kaynaksız Kondansatör-İleri Yönde Kutuplanmış Memristör- $R_s$ Koruma Direnci Seri Devresinin (C-Mİleri-RS) Analizi.....	28
5.1.2 Kaynaksız Kondansatör-Ters Yönde Kutuplanmış Memristör- $R_s$ Koruma Direnci Seri Devresinin (C-Mİleri-RS) Analizi.....	37
5.2 DC Gerilim Kaynaklı Kondansatör-Memristör- $R_s$ Koruma Direnci Seri Devresinin Analizi.....	45
5.2.1 Kaynaksız Kondansatör-İleri Yönde Kutuplanmış Memristör- $R_s$ Koruma Direnci Seri Devresinin (C-Mİleri-RS) Analizi.....	45
5.2.2 Kaynaksız Kondansatör-Ters Yönde Kutuplanmış Memristör- $R_s$ Koruma Direnci Seri Devresinin (C-Mİleri-RS) Analizi.....	53
<b>6. DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>	<b>61</b>
6.1 Karbon Tabanlı Memristör ile Yapılan Deneylerin Sonuçları.....	65
6.2 Karbon Tabanlı Memristör ile Yapılan Deneylerin Sonuçları.....	84
<b>7. DENEY SONUÇLARININ YORUMLAMASI.....</b>	<b>103</b>
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>111</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>114</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>119</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>125</b>



## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Temel devre eleman ve değişkenleri arasındaki ilişkiler .....	7
Çizelge 2.2. Farklı 'p' parametresi değerleri ve her iki akım yönü için Biolek Pencere Fonksiyonu .....	16
Çizelge 3.1. Kaynaksız M-C devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri .....	20
Çizelge 3.2. Kaynaklı M-C devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri .....	22
Çizelge 5.1. C-M <sub>ileri</sub> -R <sub>S</sub> seri devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri .....	34
Çizelge 5.2. Kaynaklı C-M <sub>ileri</sub> -R <sub>S</sub> seri devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri .....	50
Çizelge 6.1: Deney parametreleri ve değerleri .....	64
Çizelge 6.2. Memristör tipleri ve ölçülen direnç değerleri .....	64



## ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 2.1. Dört temel devre değişkeni, aralarındaki ilişkiler ve tanımladıkları devre elemanları.....6
- Şekil 2.2. Memristörün eklenmesiyle birlikte, temel devre değişkenleri arasındaki ilişkiler ve bu ilişkilerin tanımladıkları devre elemanları .....6
- Şekil 2.3. Memristörün orijinden geçen, frekansa bağlı çimdiklenmiş histeresis eğrisi .....9
- Şekil 2.4. HP Laboratuvarı tarafından verilen  $TiO_2$  memristör fotoğrafı .....10
- Şekil 2.5. a)  $TiO_2$  Memristör Topolojisi ve b) Memristör Sembolü .....11

Şekil 2.6. a) İleri yönde kutuplanan $TiO_2$ memristörün gerilim kaynağı altında uyarılması, b) Katkılanmış bölge $w$ uzunluğunda iken direncin değeri, c) $w=D$ iken memristörün düşük (minimum) direnç durumu, d) $w=0$ iken memristörün yüksek (maksimum) direnç durumu	12
Şekil 2.7. Akım pozitif iken ( $i(t) > 0$ ), farklı $p$ değerleri için çizdirilen Biolek pencere fonksiyonu grafikleri.....	16
Şekil 2.8. Akım negatif iken ( $i(t) \leq 0$ ), farklı $p$ değerleri için çizdirilen Biolek pencere fonksiyonu grafikleri.....	17
Şekil 2.9. Akım pozitif ve negatif iken ( $i(t) > 0$ ve $i(t) \leq 0$ ), farklı $p$ değerleri için çizdirilen Biolek pencere fonksiyonu grafikleri.....	17
Şekil 3.1. Kaynaksız M-C seri devresi.....	18
Şekil 3.2. Kaynaksız M-C devresindeki memristörün yükünün zamana göre değişimi	20
Şekil 3.3. DC kaynağı tarafından beslenen M-C seri devresi.....	21
Şekil 3.4. Kaynaklı M-C devresindeki memristörün yükünün zamana göre değişimi.....	23
Şekil 4.1. İçerisinde 8 ayrı Kendinden Kanal Oluşturmalı a) Karbon(C) ve b) Tungsten(W) Tabanlı Memristör Bulunan Knowm Entegreleri	24
Şekil 4.2. İçerisinde 8 ayrı Kendinden Kanal Oluşturmalı Memristör bulunan Knowm Memristör Entegresi bacak bağlantıları	24
Şekil 4.3. a) Karbon(C) ve b) Tungsten(W) tabanlı Knowm Memristörü topolojileri	25
Şekil 4.4. Kendinden Kanal Oluşturmalı Karbon(C) Tabanlı memristörde sinüzoidal gerilim altında, a) 20 Hz ve b) 1 kHz frekans değerlerinde gözlemlenen histeresis eğrileri	26

Şekil.4.5. Kendinden Kanal Oluşturmalı Tungsten(W) Tabanlı memristörde sinüzoidal gerilim altında, a) 20 Hz ve b) 1 kHz frekans değerlerinde gözlemlenen histeresis eğrileri .....26

Şekil 5.1. Kaynaksız a) Kondansatör, ileri yönlü kutuplanmış Tungsten ya da Karbon memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{İleri}-R_S$ ) seri bağlı devresi ve b) Kondansatör, ters yönlü kutuplanmış Tungsten ya da Karbon memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{Ters}-R_S$ ) seri bağlı devresi .....27

Şekil 5.2. DC gerilim kaynaklı a) Kondansatör, ileri yönlü kutuplanmış memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{İleri}-R_S$ ) seri bağlı devresi ve b) Kondansatör, ters yönlü kutuplanmış memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{Ters}-R_S$ ) seri bağlı devresi .....28

Şekil 5.3. Kaynaksız  $C-M_{İleri}-R_S$  seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin  $x(t)$ 'ye göre değişim grafikleri.....35

Şekil 5.4. Kaynaksız  $C-M_{İleri}-R_S$  seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnç gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri .....36

Şekil 5.5. Kaynaksız  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin  $x(t)$ 'ye göre değişim grafikleri.....43

Şekil 5.6. Kaynaksız  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnç gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri .....44

Şekil 5.7. DC gerilim kaynaklı C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin x(t)'ye göre değişim grafikleri .....51

Şekil 5.8. DC gerilim kaynaklı C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnç gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri .....52

Şekil 5.9: DC gerilim kaynaklı C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin x(t)'ye göre değişim grafikleri.....59

Şekil 5.10. DC gerilim kaynaklı C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnç gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri .....60

Şekil.6.1. Laboratuvar ortamında incelenmek üzere kurulan a) C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> ve b) C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devrelerinin şemaları.....63

Şekil.6.2. Laboratuvar ortamında board üzerine kurulan deney düzeneği (Deneyler, her iki memristör için ayrı ayrı yapılmıştır.) .....64

Şekil 6.3. Sinüsoidal gerilimle beslenen Karbon tabanlı memristörün 5 Hz kaynak frekansında elde edilen iki farklı histeresis eğrisi .....65

Şekil 6.4. Sinüsoidal gerilimle beslenen Karbon tabanlı memristörün 20 Hz kaynak frekansında elde edilen iki farklı histeresis eğrisi .....66

Şekil 6.5. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....68

Şekil 6.6. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....69

Şekil 6.7. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....70

Şekil 6.8. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....71

Şekil 6.9. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....72

Şekil 6.10. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....73

Şekil 6.11. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....74

Şekil 6.12. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....75

Şekil 6.13. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....76

Şekil 6.14. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....77

Şekil 6.15. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....78

Şekil 6.16. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....79

Şekil 6.17. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....80

Şekil 6.18. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri .....81

Şekil 6.19. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak

frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi  
.....82

Şekil 6.20. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi  
.....83

Şekil 6.21. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi  
.....86

Şekil 6.22. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi  
.....87

Şekil 6.23. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi  
.....88

Şekil 6.24. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi  
.....89

Şekil 6.25. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi  
.....90

Şekil 6.26. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi  
.....91



Şekil 6.27. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....92

Şekil 6.28. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....93

Şekil 6.29. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi .....94

Şekil 6.30. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi .....95

Şekil 6.31. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....96

Şekil 6.32. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi .....97

Şekil 6.33. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi .....99

Şekil 6.34. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak

frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi  
.....100

Şekil 6.35. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C- $M_{Ters}$ - $R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi  
.....101

Şekil 6.36. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C- $M_{Ters}$ - $R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi  
.....102

Şekil 7.1. Tepe değeri 1 V olan 5 Hz frekansındaki Kare dalga ile beslenen D2 düğümünün ( $V_{MRs}$ ) ve memristör koruma direnci gerilimlerinin ( $V_{Rs}$ ) zamana göre değişimi  
.....104

Şekil 7.2. Tepe değeri 1 V olan 10 Hz frekansındaki Kare dalga ile beslenen D2 düğümünün ( $V_{MRs}$ ) ve memristör koruma direnci gerilimlerinin ( $V_{Rs}$ ) zamana göre değişimi  
.....104

Şekil 7.3. Tepe değeri 1 V olan 20 Hz frekansındaki Kare dalga ile beslenen D2 düğümünün ( $V_{MRs}$ ) ve memristör koruma direnci gerilimlerinin ( $V_{Rs}$ ) zamana göre değişimi  
.....105

Şekil 7.4. Tungsten memristörün 100 kHz frekansında çizdirilen histeresis eğrisi  
.....105

Şekil 7.5. Tepe değeri 1 V olan a) 5 Hz, c) 10 Hz ve e) 20 Hz frekanslarındaki Kare dalga ile beslenen Tungsten memristörün geriliminin ve akımının zamana göre değişimi ve b) 5 Hz, d) 10 Hz ve f) 20 Hz frekanslarındaki histeresis eğrileri (V-I grafikleri)  
.....107

Şekil 7.6. Lineer zamanla değişmeyen bir R-C devresi  
.....108

Şekil 7.7. Bir R-C devresinin a) akım ve gerilim grafiği ve b) V-I Lissajous eğrisi  
.....108

Şekil 7.8. Karbon ve Tungsten tabanlı memristör topolojilerinin düşünölen eşdeğer devresi  
.110



### **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

- C : Kapasitör  
D : Memristör uzunluğu  
F<sub>S</sub> : Kaynak Frekansı  
HP : Hewlett Packard  
Hz : Hertz  
i : Akım  
M : Memristör

- $p$  : Biolek Memristör Modeli katsayısı
- $q$  : Yük
- $q_{sat}$  : Doyum anındaki memristör yükü
- $R$  : Direnç
- $R(x)$  : Memristörün memristans değeri
- $R_{ON}$  : Memristörün minimum direnç değeri
- $R_{OFF}$  : Memristörün maksimum direnç değeri
- $TiO_2$  : Titanyumdioksit
- $V$  : Gerilim
- $w$  : Memristörün Katkılanmış Bölge Uzunluğu
- $W$  : Tungsten
- $\varphi$  : Akı
- $\omega$  : Açısal Hız

## TEŞEKKÜR

Öncelikle tüm öğrenim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her aşamada yanımda olduklarını hissettiren aileme çokça teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında, elindeki hiçbir teknik ekipmanı esirgemeyerek ölçümleri rahatça yapabilmemi sağlayan, bir laboratuvar ortamını aratmayacak kadar düzen sağlayarak destekçi olan Sayın Dr. Ertuğrul KARAKULAK hocama çok çok teşekkür ederim.

Aklımda Yüksek Lisans yapma fikri yok iken; teşvikleriyle Yüksek Lisans programına başladığım sayın hocam Doç. Dr. Reşat MUTLU'ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum. Kendisi gibi yüzlerce eğiticinin var olduğunu umarak; bu yüzlercesinin, binlerce insanın hayatına dokunması, binlerce hayata ışık olması dileğiyle...

Ocak, 2021

Ceylan DALMIŞ

Elek. ve Hab. Mühendisi



## 1. GİRİŞ

Neredeyse yarım asır öncesine kadar elektrik devrelerini oluşturan üç adet temel devre elemanı olduğu düşünülüyordu. Bu temel devre elemanları elektrik akımının geçmesine karşı zorluk gösteren direnç, enerjiyi elektrik alanda depolayan (elektrik yükü biriktiren) kondansatör ve enerjiyi manyetik alanda depo eden endüktördür. Günümüzde elektrik ve elektronik devrelerin çoğunda bu elemanlar hala yaygınca kullanılmaktadır. 1971’de Berkeley’deki California Üniversitesi’nde (University of California, Berkeley) görev yapan ve doğrusal olmayan devre kuramının öncülerinden biri olan Dr. Leon Chua akım, gerilim, akı ve yük gibi devre değişkenleri ile mevcut devre elemanları arasındaki ilişkileri incelerken, o güne kadar varlığından hiç bahsedilmeyen kayıp bir devre elemanının olması gerektiğini öne sürmüştür [1]. Dr. Chua, akım ve gerilim arasındaki ilişkinin (Ohm Kanununun) direnci tanımlıyor olmasına benzer şekilde; yük ve akı arasında bir ilişkinin var olması ve bu ilişkinin tanımladığı yeni bir temel devre elemanı olması gerektiğini iddia etmiştir. Akı ile yük arasında bir bağlantı olduğunu kabul ederek kurduğu teori sonucunda, bu kayıp devre elemanını nonlinear bir dirence benzetmiş ve bu elemanın direnç değerinin, üzerinden akan akımın integraline, yani elemanın “yüküne” ya da iletkenlik değerinin geriliminin integraline yani elemanın “akısına” bağlı olarak değişiyor olması gerektiğini göstermiştir. Dr. Chua bu devre elemanına İngilizce memory (hafıza) ve resistor (direnç) kelimelerinin kısaltılması ile oluşan “memristor” adını vermiştir ve bu eleman dilimize memristör ya da hafızalı direnç olarak geçmiştir [2]. 1971 senesinde, Memristör, Dr. Chua’ ya göre, bir gün bulunabilecek bir devre elemanıydı ve [1]’deki makalesinde bir memristörün modelleyebileceği devre elemanlarına örnek olarak E-cell ve amorf ovonik eşik gerilimli anahtar isimli devre elemanlarını örnek vermiştir. Dr. Chua memristörün (yüke bağlı) son direnç değerini hafızasında tutuyor olması sayesinde, memristörün bir gün bulunması durumunda, normal dirençlerle ve diğer temel devre elemanları ile yapılamayan bazı devre uygulamalarının memristörle yapılabileceğini iddia etmiştir [1].

Memristörü diğer dirençlerden ayıran en büyük fark belleğinin olmasıdır. Çalışır vaziyetteki devrenin kaynak gerilimi ya da akımı kesildiğinde; memristör, kaynağın tekrar bağlanmasına kadar sahip olduğu bu direnç değerini unutmayarak bu direnç değerinde kalacaktır. Böyle bellekli bir devre elemanının birçok alanda yenilik sağlayacağı umulmaktadır [3-9]. İçindeki bilgiyi hem saklayan hem de lojik işlemler yapabilen memristör tabanlı flip-flop gibi devreler yapılması mümkün gözükmektedir [10,11]. Mesela memristör tabanlı hafızaya sahip bir bilgisayar istenildiğinde anında kapatılıp istenildiğinde anında

başlatılabilecektir. Memristör tabanlı bilgisayar hafızası gerilim kesildiğinde sahip olduğu veriyi RAM hafızalarının aksine, güç tüketmeksizin çok uzun süre saklayabilir. Gerilim tekrar verildiğinde ise, aradan çok uzun zaman geçse bile, bilgisayarın yeniden açılması için bekleme ve enerji tüketimi bir sorun olmaktan çıkacak ve kullanıcı kaldığı yerden başlayabilecektir [12]. Böyle bir bilgisayarın içindeki tüm dosya ve belgeler, aradan uzun bir zaman geçse dahi bırakıldıkları gibi bulunacaktır.

Ortaya atılmasından 37 yıl sonra, HP laboratuvarındaki bir grup mühendis ince film bir sistemin memristör gibi davrandığını fark ederek; keşiflerini “Kayıp Memristör Bulundu” diye dünyaya duyurmuştur [13]. Stanley Williams ve arkadaşlarından oluşan bu ekip  $TiO_2$  ince filmler üzerine çalışırken, yaptıkları ince filmin davranışını modellemekte zorluk çekmişlerdir. Yaptıkları literatür taraması esnasında, Dr. Chua'nın [1] ve [3]'teki makalelerine rast gelen bu ekip, bu buldukları aygıtın, bir memristör gibi davranan memristif bir sistem olduğunu anlamıştır [13]. Böylece, 1971'de ilk kez varlığından bahsedilen memristör, günümüzde, birçok araştırmacı için popüler bir araştırma sahası olmuştur [4-25]. Bu araştırmacılara göre, memristörün; analog filtreler, analog kuvvetlendiriciler, osilatörler gibi programlanabilir elektronik devreler, bilgisayar hafızaları, yapay sinir ağları devreleri gibi birçok alanda kullanımı muhtemel görülmektedir [4,14-25].

[13]'te Williams ve Ark. verdikleri HP memristör modelinde, memristörün oksijen iyonlarının yoğun bulunduğu katkılanmış bölgesinin, lineer sürüklenme hızında genişlediğini veya daraldığı iddia etmiştir. Onlar  $TiO_2$  ve  $TiO_{2-x}$  bölgelerin içinde oluşan elektrik alanların homojen olduğunu kabul ederek, modellerini homojen iyon mobilitesi varsayımları ile kurdular. Bu varsayımlar gerçeklikle uyuşmadığından, HP memristör modelinin ilerleyen zamanlarda geçersiz yani eksik ve hatalı olduğu kabul edilmiş ve farklı araştırmacılar tarafından bu eksiklikleri gidermeye çalışan yeni modeller verilmiştir [26-29]. Bu sebeple, araştırmacılar nonlineer iyon sürüklenme hızına sahip ve pencere fonksiyonu kullanılan memristör modellerini geliştirmişlerdir [26-29]. Bu çalışmada, nonlineer sürüklenme hızına sahip memristör modellerinden biri olan Biolek memristör modeli kullanılacaktır [27].

Literatürde memristör devre elemanının diğer devre elemanlarıyla kullanılması analitik olarak fazlaca incelenmemiştir. Memristörün kullanım sahasının genişlemesi açısından, aktif ve pasif devre elemanları ile birlikte kullanıldığı devrelerinin davranışının, teorik olarak incelenmesi ve deneysel olarak doğrulanması önem arz etmektedir. Literatürde memristör-kondansatör devresi, memristör tabanlı alçak ve yüksek geçiren filtre ve osilatör

devrelerinde yaygınca karşımıza çıkmaktadır [14, 17, 18, 20, 26, 30]. Literatürde bir memristör ve bir kondansatörün birlikte bulunduğu devrenin yani M-C devresinin şarj ve deşarjının analizi ilk defa Joglekar ve Ark. tarafından yapılmıştır [26]. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalardan bir diğeri ise, yine HP memristör modeli kullanılarak sabit gerilim ile uyarılan,  $TiO_2$  memristörü ve kondansatör seri bağlı devresinin analizidir [30]. Bahsedilen çalışmada önce  $TiO_2$  memristörünün ve kondansatörün seri bağlandığı devrenin analizi yapılmış ve bu analiz memristör-tabanlı bir relaksasyon osilatörünün frekansının hesabına uygulanmıştır [30]. Urgan ve Ark. [26] ve [30]'daki HP memristör modeli kullanan bu devrelerde, memristör doymada değil ise memristör yükünün Lambert W fonksiyonu kullanılarak ifade edilebileceğini göstermiştir [31]. Yapılan literatür araştırmasına göre, [26] ve [30]'daki memristör-kondansatör (M-C) şarj ve deşarj devrelerinin Biolek modeli kullanarak analizi ve deneysel olarak incelenmesi yapılmamıştır. Bu yüksek lisans çalışmasında, yön bağımlı olarak bir memristör-kondansatör seri devresinde, kondansatörün dolup boşalması analitik ve deneysel olarak incelenecektir. Kaynaklı ve kaynaksız bu M-C devrelerinin analitik çözümlerinin olup olmadığı araştırılacaktır. Bazı firmalar memristör üretmeyi ve bu yeni devre elemanı için bir piyasa oluşturmayı amaçlamaktadır [32,33]. Knowm firması, memristör entegre devreleri üretmeyi başararak, bunları piyasaya sunmuştur [33]. Literatürde Knowm memristör kullanarak yapılan çalışmalar mevcuttur [34-41]. Bu çalışmada yapılacak olan deneylerde de Knowm firmasından tedarik edilen Karbon ve Tungsten tabanlı memristörler kullanılmıştır. Deneysel olarak her iki memristör için ayrı ayrı incelenecek olan memristör-kondansatör seri devrelerine, memristör kataloğunda önerildiği üzere, seri bir koruma direnci de bağlanacaktır [33]. Deneylerde kaynak olarak, kare dalga ve saat sinyali kaynağı kullanılacaktır. Bu çalışmada yapılan bir grup deneyde, saat sinyali ile kondansatörün her bir memristör tipi için tek yönlü (kutuplu) dolma (şarjı) ve boşalması (deşarjı) incelenecek olup, ardından yapılan diğer bir grup deneyde de kare dalga sinyali kullanarak çift yönlü dolma ve boşalma durumu incelenecektir. Ayrıca, saat sinyali kaynağı kullanan deneylerde, memristörün devredeki yönü değiştirilerek, kondansatörün şarj ve deşarjının yöne bağıllığı da incelenecektir. Bu dolma ve boşalma devrelerinin deneysel sonuçları yorumlanacaktır ve Biolek modeli ile bu deneysel sonuçların elde edilip edilemeyeceği tartışılacaktır. Bu çalışma, ileride seri bağlı kondansatör-memristörlerin kullanılacağı devrelerin analizi açısından önem taşımakta ve bir örnek teşkil etmektedir.

Bu tez şu takip eden şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde ideal memristör elemanı, memristif sistemler, ilk memristör modeli olan HP memristör modeli ve bu çalışmada



memristörü modellemek için kullanımı tercih edilen Biolek'in memristör modeli kısaca tanıtılacaktır. Üçüncü bölümde literatürdeki DC kaynaklı ve kaynaksız memristör-kondansatör dolma ve boşalma devreleri kısaca özetlenecektir. Dördüncü bölümde deneylerde kullanılan Kendinden Kanal Oluşturmalı Karbon ve Tungsten tabanlı memristörlerin özelliklerinden bahsedilecektir. Beşinci bölümde, üzerinde çalışılan memristör-kondansatör dolma ve boşalma devreleri verilecek, bu devreleri tanımlayan diferansiyel denklemler türetilen ve bu devrelerin yarı-analitik çözümleri yer alacaktır. Altıncı bölümde yapılan deneylerin deneysel sonuçları verilecektir. Yedinci bölümde elde edilen deneysel sonuçların Biolek modeli ile elde edilip edilemeyeceği ve Karbon ve Tungsten tabanlı Known memristörlerinin Biolek modeli ile modellenip modellenemeyeceği tartışılacaktır. Tez sonuç bölümü ile sonlandırılacaktır.

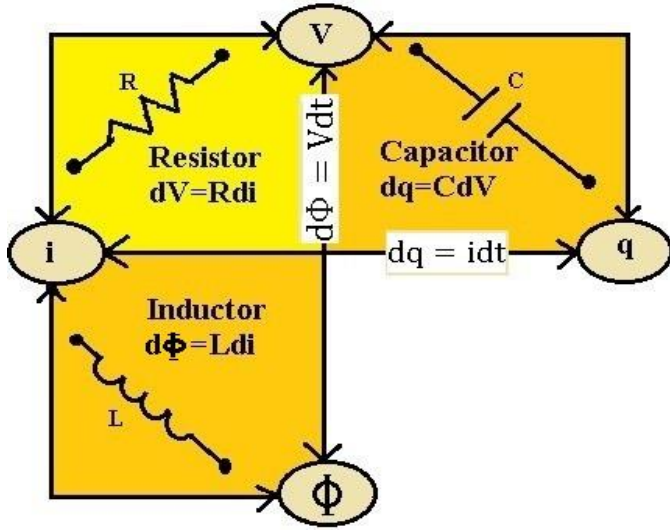


## 2. MEMRİSTÖR, MEMRİSTİF SİSTEMLER, HP MEMRİSTÖR VE BİOLEK PENCERE FONKSİYONU KULLANILARAK YAPILAN MEMRİSTÖR MODELİ

Bu bölümde önce memristör devre elemanı ve memristif sistemler denklemleri verilerek tanıtılacaktır. Ardından HP firması tarafından verilen dünyadaki ilk memristör modeli olan HP memristör modeli [13] ve bir pencere fonksiyonuna sahip daha gelişmiş bir memristör modeli olan Biolek memristör modeli verilecektir [27].

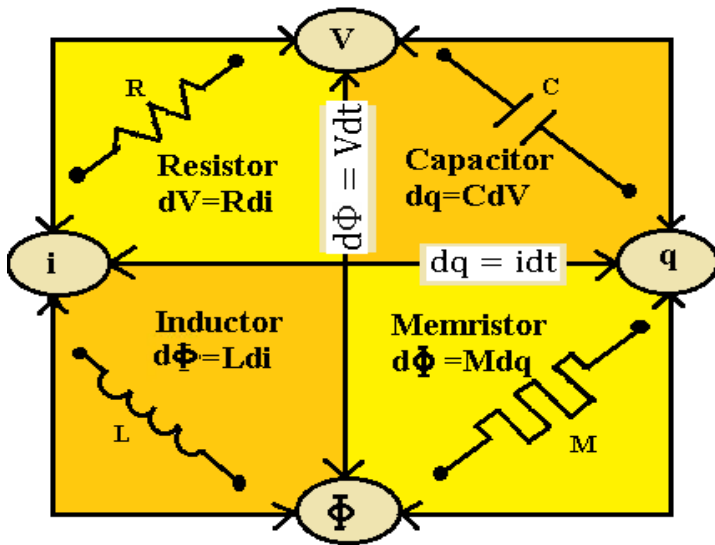
### 2.1. Memristör

Elektrik devrelerini tanımlamak için kullanılan akım, yük, gerilim ve akı olmak üzere dört temel devre değişkeni bulunmaktadır. Şekil 2.1’de dört temel devre değişkeninin birbirleri arasındaki bağıntılar gösterilmiştir. Bu temel devre değişkenlerini birbirine bağlayan matematiksel bağıntılar kullanılarak üç temel devre elemanı olan direnç, kondansatör ve endüktörün tanımlanabildiği Devre Teorisi dersi alanlarca bilinmektedir. Burada direnç devre elemanı, gerilim ve akım arasındaki ilişki ile; kondansatör devre elemanı, gerilim ve yük arasındaki ilişki ile; endüktör devre elemanı ise akım ve manyetik akı arasındaki ilişki ile tanımlanmaktadır. Ancak yük ile manyetik akı arasındaki ilişkiyi ifade eden bir devre elemanı bulunmamaktadır. 1971’de, bu devre değişkenleri arasındaki ilişkileri inceleyen Dr. Chua’ nın dikkatini her bir temel devre değişkeni çifti arasında bir bağıntı bulunurken, akı ve yük arasında bir bağıntının olmaması ve bu bağıntının tanımladığı bir elemanın bulunmaması çekmiştir. Bundan dolayı Dr. Chua yük ve manyetik akı arasında da diğer devre değişkenleri arasında olduğu gibi bir bağıntının ve bunun tanımladığı bir temel devre elemanının olması gerektiğini iddia etmiştir [1]. Dr. Chua kuramsal çalışmaları sonucu, bu hipotetik devre elemanının doğrusal olmayan bir direnç gibi davrandığını, bu elemanın yüke bağımlı bir elektriksel direnci olduğunu ve üzerindeki enerjinin kesilmesiyle son direnç değerini hafızasında tuttuğunu tahmin etmiştir [1].



Şekil 2.1. Dört temel devre değişkeni, aralarındaki ilişkiler ve tanımladıkları devre elemanları

Dr. Chua memristör devre elemanının, güç tükettiğini ve memristörün direncinin, memristörün akısının yükü göre türevi olduğunu [1]'de göstermiştir. Dr. Chua bu elektriksel dirence yani memristörün direncine İngilizce “memory resistance” kelimelerinden türettiği “memristance” ismini vermiştir [1]. Bu terim Türkçeye “memristans” olarak geçmiştir [2]. Dr. Chua memristörün direncini yani memristörün memristansını  $M(q)$  ile göstermiştir [1]. Burada  $q$  memristörün yükünü göstermektedir. Şekil 2.1'deki eksiklik Şekil.2.2'ye eklenen  $M(q)$  sembolü ile gösterilen memristör ile giderilmiştir. Bu şekilde elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki ilişki memristörün memristansı kullanılarak,  $d\Phi = M(q)dq$  bağıntısı ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.2. Memristörün eklenmesiyle birlikte, temel devre değişkenleri arasındaki ilişkiler ve bu ilişkilerin tanımladıkları devre elemanları

Dr. Chua tarafından memristans memristörün akısının yüküne göre türevi ve tersi olan memdüktans ise memristörün yükünün akısına göre türevi olarak tanımlanmıştır. Memristans ve memdüktans formülleri ve bunların birimleri aşağıdaki gibi verilir:

$$M(q) = \frac{d\Phi(q)}{dq} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

ve

$$W(\Phi) = \frac{dq(\Phi)}{d\Phi} \quad [1/\Omega] \quad (2.2)$$

Memristör devre elemanının eklenmesiyle tamamlandığı düşünülen temel devre elemanları ve devre değişkenleri arasındaki matematiksel ilişkiler Çizelge 2.1’de de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Temel devre eleman ve değişkenleri arasındaki ilişkiler

<b>Temel Devre Elemanı</b>	<b>Diferansiyel Formda Verilen Değişkenler Arasındaki İlişki</b>
Direnç (R)	$dv = Rdi$
Kondansatör (C)	$dq = Cdv$
Endüktör (L)	$d\varphi = Ldi$
Memristör (M)	$d\Phi = M(q)dq$

Şekil 2.2’de verildiği gibi yüke bağlı akı değerinin zamana göre türevi gerilime eşittir:

$$v(t) = \frac{d\Phi(q)}{dt}$$

(2.3)

Burada zincirleme türev kuralı kullanılarak,

$$v(t) = \frac{d\Phi(q)}{dq} \frac{dq(t)}{dt}$$

(2.4)

eşitliği yazılabilir. Memristörün yükünün zamana göre türevi memristörün akımına eşittir:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

(2.5)

Denklem (2.5) kullanılarak,

$$v(t) = \frac{d\Phi(q)}{dq} i(t)$$

(2.6)

denklemini elde edilecektir. Böylece, Memristörün uç denklemi yani Denklem (2.6),

$$v(t) = M(q(t))i(t) = M(q)i(t)$$

(2.7)

olarak yazılabilir. Bu denklemden memristörün nonlineer bir direnç gibi davrandığı açıkça görülmektedir. Denklemde  $v(t)$  geriliminin birimi 'Volt',  $i(t)$  akımının birimi 'Amper' olduğundan memristansın yani  $M(q)$ 'nin biriminin, direnç birimi olan  $\Omega$  olduğu görülebilir.

İdeal memristörler, gerilim ve akım kontrollü olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Akım kontrollü memristörler,

$$v(t) = \frac{d\Phi(q)}{dq} i(t) = M(q)i(t)$$

(2.8)

$$\frac{dq(t)}{dt} = i(t)$$

(2.9)

olarak verilirler. Gerilim kontrollü memristörler ise

$$i(t) = \frac{dq}{d\Phi} v(t) = W(\Phi(t))v(t) = W(\Phi)v(t)$$

(2.10)

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = v(t)$$

(2.11)

olarak verilirler. Burada  $W(\Phi)$ 'nin yani memristörün memdükantsının biriminin Siemens yani  $\text{Ohm}^{-1}$  olduğu rahatlıkla görülebilir.

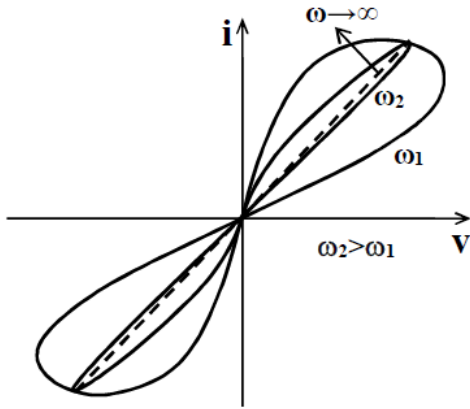
1976'da Dr. Chua ve Kang [3] memristör henüz keşfedilmemiş olsa da keşfedilmiş olsaydı memristörün hangi özelliklere sahip olacağından bahsederek, memristöre benzer özellikler taşıyan sistemlere memristif sistemler adını verdiler. Bu sistemleri tanımlayan denklemleri vererek, memristör gibi sıfırdan (orijinden) geçen bir histeresis eğrisine sahip

olmaları gerektiğini gösterdiler. Adhikari ve Ark. memristöre ait üç belirleyici özelliğin olduğunu iddia ederek, bu özellikleri “memristörün üç parmak izi” olarak adlandırdılar [42].

Memristörün üç parmak izi özelliğine göre;

- Memristör akım-gerilim grafiği; yani histeresis eğrisi orijinden geçiyor olup, memristörün hem akımı hem gerilimi aynı anda sıfır olmalı (Akım-gerilim histeresis eğrisi Orijinde sıfır olup, küçük sinyallerde çimdiklenmiş bir balonu andırmalı),
- Memristörün histeresis eğrisi frekansa bağlı olmalı
- Memristörün Histeresis eğrisinin alanı frekans değeri azaldıkça genişlemeli, frekans değeri arttıkça daralarak bir doğruya dönüşmeli yani yüksek frekanslarda lineer bir direnç gibi davranmalıdır.

Chua ve Kang tarafından [3]'te verilen ve bu kurala uyan bir histeresis eğrisi Şekil.2.3'de görülebilir.



Şekil 2.3. Memristörün orijinden geçen, frekansa bağlı çimdiklenmiş histeresis eğrisi [3]

## 2.2. Memristif Sistemler

İdeal memristör hala bulunmamıştır [43]. Günümüzde artık pek çok memristif sistem de memristör diye isimlendirilmektedir. Williams ve Ark.'nın bulduğu memristör de aslında ince film bir memristif sistemdir [13]. Bu yüzden memristif sistemlerin tanıtılması da önemlidir ve bu kısımda yapılacaktır. Dr. Chua ve öğrencisi Kang [3]'teki makalelerinde memristif sistemleri tanımlayan denklemleri vermişlerdir. Memristif sistemlerin modern tanımı Ventrone ve Ark., tarafından yapılmıştır [44]. Ventrone ve Ark., n. dereceden akım kontrollü bir memristif sistemi,

$$v(t) = R(x(t), i(t), t) \cdot i(t) \quad (2.12)$$

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), i(t), t) \quad (2.13)$$

olarak tanımlamıştır.

Burada  $v(t)$  memristif sistemin gerilimi,  $x(t)$  memristörün  $n$  boyutlu durum değişkeni,  $R(x(t), v(t), t)$   $x(t)$  durum değişkenine bağlı memristans ya da memristif sistemin direnç değeri,  $i(t)$  ise memristif sistemin akımıdır.

$x(t)$  durum değişkeni memristif sistemin  $v(t)$ 'ye ve zaman  $t$ 'ye bağlı iç durumunu tanımlamaktadır.  $x(t)$ 'nin zamana göre değişimi Denklem 2.13'te verilmiştir.  $x(t)$ 'nin zamana göre değişimi,  $R(x(t), v(t), t)$  direncinin değişimine neden olmakta yani memristifliği meydana getirmektedir.

### 2.3. HP Memristör Modeli

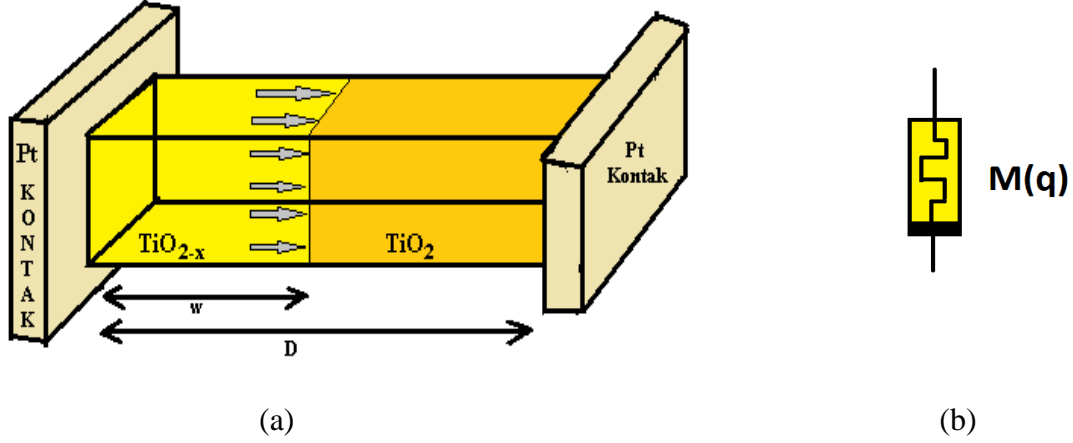
HP laboratuvarında, araştırmacı Stanley Williams ve çalışma arkadaşları, 2008 yılında yaptıkları bir araştırmada Platinyum kontaklar arasına sıkıştırılan, nano boyutlardaki  $TiO_2$  (Titanyumdioksit) ince filmin davranışını bir memristöre benzettiler [13]. Bu araştırmada çalışma bölgesi göz önünde bulundurulduğunda; HP memristör direnci ileri veya ters yönlü gerilim altında iken,  $R_{ON}$  ve  $R_{OFF}$  değerleri arasında herhangi bir değeri alabilmektedir ve üzerine düşen gerilim kesildiği anda aldığı en son değerinde kalmaktadır. Williams ve Ark. buldukları memristörün direncinin akımın integraline bağlı olduğunu iddia ettiler ve literatürde HP memristör modeli olarak bilinen modeli verdiler [13]. Bu sayede, HP memristör, tarihte memristör gibi davrandığı anlaşılan ilk (ince-film) memristif sistem oldu. Bu bulunan nanometre boyutundaki  $TiO_2$  memristör Şekil 2.4'te görülebilir [13].



Şekil 2.4. HP Laboratuvarı tarafından verilen  $TiO_2$  memristör fotoğrafı [13]

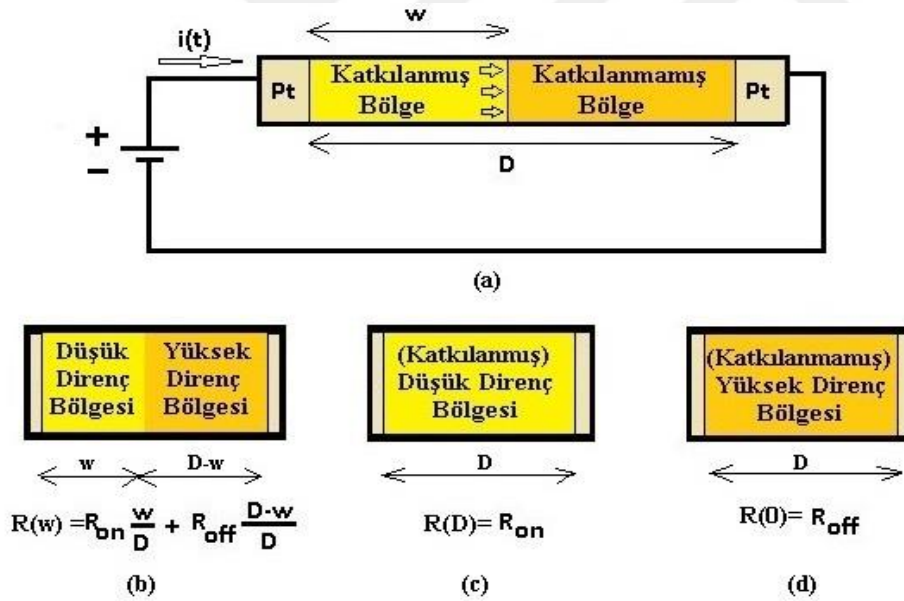
HP laboratuvarında gerçekleştirilen  $TiO_2$  memristörünün topolojisi ve sembolik gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Reaktif bir metal olan titanyum elementinin oksijen elementi ile birçok bileşimi mevcuttur ( $TiO_2$ ,  $TiO_3$ ,  $Ti_3O_2$ , vs.). Bunların en kararlı yapıya sahip olanı titanyum dioksit ( $TiO_2$ ) yarıiletken maddesidir. Bu  $TiO_2$  ince film üretilirken Pt elektrotlardan birisine yakın olan bölgede oksijen bakımından bir zenginleşme diğerine yakın bölgede ise bir oksijen azlığı (fakirleşme bölgesi) oluşmaktadır. Oksijence zengin  $TiO_2$  bölgesi yani  $TiO_x$  bölgesi katkılanmış ve oksijence (delik bakımından) fakir bölge katkılanmamış bölge olarak isimlendirilmektedir.  $TiO_2$  içindeki bu ekstra Oksijen atomları Titanyum dioksitin yapısında delikler ("hole") halinde yer almaktadır. Bu delikler bir elektrik akımı etkisi altındayken, akım yönüne doğru hareket etmektedir. Eğer oksijen bakımından zengin olan  $TiO_2$  elektrotuna, diğer elektrota göre daha yüksek bir potansiyel uygulanmışsa, pozitif yüklü oksijen iyonu boşlukları itilerek akımın diğer elektrota doğru akmasını sağlamaktadır. Bu durumda oksijen bakımından zengin olan  $TiO_2$  bölgesi yani  $TiO_x$  bölgesi genişlemeye başlamaktadır, yani katkılanmış bölge genişliği artarken, katkılanmamış bölge genişliği azalmaktadır. Eğer oksijen bakımından fakir olan  $TiO_2$  elektrotuna, diğer elektrota göre daha yüksek bir potansiyel uygulanmışsa, bu durumda oksijen bakımından zengin olan  $TiO_2$  bölgesi yani  $TiO_x$  bölgesi daralmaya başlamaktadır, yani katkılanmış bölge genişliği azalırken, katkılanmamış bölge genişliği artmaktadır.  $TiO_x$  bölgesinin öz direnci  $TiO_2$  bölgesinin öz direncine göre daha düşüktür.  $TiO_x$  bölgesi komple yayıldığında memristörün direnci minimum olmakta ve hiç yayılmadığında memristörün direnci maksimum olmaktadır. Bundan dolayı memristörün direnci  $TiO_2$  bölgesi genişliğine bağlıdır. Yani katkılanmış ve katkılanmamış bölge sınırlarının değişimi ile titanyumdioksitin yani memristörün direnci de değişmektedir.  $TiO_x$  bölgesi genişlerken memristörün direnci düşmekte, daralırken ise direnci artmaktadır. Akmakta olan akım kesildiğinde, sürüklenen delikler durarak, konumlarını koruyacaktır yani katkılı ve katkısız bölgeler yayıldıkları mesafede kalmakta, sahip oldukları uzunluğu korumaktadır. Böylece, bu ince-film yapının akımın kesildiği andaki direnç değeri sabit kalacaktır.





Şekil 2.5. a)  $TiO_2$  Memristör Topolojisi ve b) Memristör Sembolü

Bir memristörün minimum dirence sahip olduğu duruma düşük direnç ve maksimum dirence sahip olduğu duruma yüksek direnç durumu adı verilmektedir. Şekil.2.6’da ise platin kontaklar arasına yerleştirilen  $TiO_2$  memristörünün düşük, yüksek ve ara değer dirence sahip olduğu durumları görülebilir.



Şekil 2.6. a) İleri yönde kutuplanan  $TiO_2$  memristörün gerilim kaynağı altında uyartılması, b) Katılanmış bölge  $w$  uzunluğunda iken direncin değeri, c)  $w=D$  iken memristörün düşük (minimum) direnç durumu, d)  $w=0$  iken memristörün yüksek (maksimum) direnç durumu

Memristörün direnç yani memristans değerinin, memristörün katkılı ( $w$ ) bölge uzunluğu ve toplam uzunluğu ( $D$ ) cinsinden ifadesi,

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

(2.14)

şeklindedir. Burada  $v(t)$  memristör gerilimini,  $i(t)$  memristör akımını,  $R_{ON}$ ,  $w=D$  durumundaki memristör direncini yani minimum direncini,  $R_{OFF}$ ,  $w=0$  durumundaki memristör direncini yani maksimum direncini ifade etmektedir.

$w$  katkılı bölge genişliği zamana bağlıdır. Akımın yüke göre türevine eşit olan memristans, [4]'te yapıldığı gibi  $\frac{q}{q_{sat}} = \frac{w(t)}{D}$  kabulü ile, memristörün yüküne bağlı olarak,

$$M(q) = R(w)$$

(2.15)

$$M(q) = R_{ON} \frac{q}{q_{sat}} + R_{OFF} \frac{q_{sat}-q}{q_{sat}}$$

(2.16)

şeklinde de ifade edilebilir. Bu denklemde “ $q$ ” bir  $t$  anındaki memristörün yük değerini,  $q_{sat}$  ise memristörün doyuma gittiği durumdaki, yani  $R_{ON}$  direnç değerindeki, maksimum memristör yükünü ifade etmektedir.

Akımın pozitif yönde yeterince süre akması ile memristör saturasyon durumuna gelecektir. Saturasyon durumunda yani doyumda memristör yükü maksimum değerine yani  $q_{sat}$ 'a ulaşacaktır. Doyum anında ( $w=D$ ) memristörün direnç değerinin  $R_{ON}$  değerine eşit olması gerekmektedir. Denklem 2.8'den saturasyonda yani  $q = q_{sat}$  anında,

$$M(q) = R_{ON}$$

(2.17)

olduğu açıkça görülmektedir.  $TiO_2$  memristörün katkılanmış bölge uzunluğunun, memristörün  $TiO_2$  bölgesinin toplam uzunluğuna oranını  $x = w/D$  (Normalize edilmiş oksitlenmiş bölge uzunluğu durum değişkeni) ile isimlendirerek ve Denklem 2.8'i bu  $x$  durum değişkeni cinsinden tekrar yazarak, Memristörün memristansının anlık değeri,

$$R(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x)$$

(2.18)

olarak ta ifade edilebilir.  $x$  durum değişkeni;  $w$ 'nun minimum değerinin 0, maksimum değerinin ise  $D$  olacağından ötürü;  $[0,1]$  arasında değerler alacaktır.

Williams ve Ark. lineer ve homojenlik varsayımları ile yaptıkları çalışmada [13], bir t anında katkılı ve katkısız bölgeler arasındaki  $TiO_x$  sınırının değişim hızı, iyon mobilitesine, memristör içinden geçen akıma, katkılanmış bölge direncine ve memristörün  $TiO_2$  bölgesinin toplam uzunluğuna bağlıdır. Memristörde yük akışı sırasındaki  $TiO_x$  sınırının değişim hızı,

$$v_D = \frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} i(t) \quad (2.19)$$

olarak yazılabilir. Burada  $\mu_v$  mobilite, yani iyonların hareketliliğidir ve yaklaşık olarak  $10^{-14} m^2 s^{-1} V^{-1}$ 'e eşittir.  $v_D$  ise katkılanmış bölgenin uzunluğunun zamana bağlı değişim hızını yani sürüklenme hızını ifade eder.

Bu durumda  $TiO_x$  bölgesinin uzunluğu;

$$w(t) = \int_{t_0}^t \mu_v \frac{R_{ON}}{D} i(t) dt \mu_v + w(t_0) \quad (2.20)$$

bulunur. Memristörün yükü ise akımının zamana göre integraline eşittir;

$$q(t) = \int_{t_0}^t i(t) dt \mu_v + q(t_0) \quad (2.21)$$

Böylece memristörün memristans değeri memristörün yükü cinsinden,

$$M(q) = \left( R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) \quad (2.22)$$

$$M(q) = R_{OFF} \left( 1 - \frac{w(t)}{D} \right) \quad (2.23)$$

$$M(q) = R_{OFF} \left( 1 - \frac{\int_{t_0}^t \mu_v \frac{R_{ON}}{D} i(t) dt + w(t_0)}{D} \right) \quad (2.24)$$

$$M(q) = R_{OFF} \left( 1 - \frac{\mu_v \frac{R_{ON}}{D} \int_{t_0}^t i(t) dt + w(t_0)}{D} \right) \quad (2.25)$$

$$M(q) = R_{OFF}(1 - \mu_v \frac{R_{ON}}{D^2} q)$$

(2.26)

olarak ta ifade edilebilir. Burada  $R_{ON} \ll R_{OFF}$  olduğu için  $R_{ON}$  ihmal edilmiştir. HP laboratuvarı tarafından verilen bu memristör modeli nonlinear sürüklenme hızını gözönünde bulundurmadığı için eksiktir ve nonlinear sürüklenme hızını gözönünde bulunduran bir model bir sonraki kısımda tanıtılacaktır.

#### 2.4. Biolek Pencere Fonksiyonu Kullanılarak Yapılan Memristör Modeli

Literatürde memristör için geliştirilen modellerden biri olan HP memristör modeli; yük akışı sırasında yani memristörden akım geçerken memristör içerisindeki  $TiO_x$  bölgesinin iyonların memristör doyuma ulaşmaya kadar her iki akım yönünde (polaritesinde) yani her iki yöne genişlerken ya da daralırken eşit hızla hareket ettiği varsayımı ile yapılmıştır. Ancak, gerçekte, düzgün bir elektrik alan altında bile, memristördeki iyonların ya da memristör içerisindeki  $TiO_x$  bölgesinin hareket hızı, yani genişleme ya da daralma hızları, sınır bölgelerine yaklaştıkça lineerlikten uzaklaşmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar, “pencere fonksiyonu” olarak adlandırdıkları fonksiyonlar geliştirerek ve onları memristör modellerinde kullanarak, memristör içindeki iyonların ya da bölgelerin nonlinear hareketlerini modellemişlerdir [26-29]. Biolek’ten önce araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda,  $x=0$  ve  $x=1$  sınırlarında  $dx/dt=0$  olması, yani akımın her değeri ve yönü için sınırlarda  $TiO_x$  bölgesinin değişmeksizin kalması, literatürde sınıra yapışma problemi olarak adlandırılmıştır. Biolek yaptığı çalışmada, akım polaritesini fonksiyon parametrelerinden biri olarak seçmiş, bu sayede sınıra yapışma problemini çözmeyi amaçlamıştır. Biolek ve Ark., iyonların, özellikle sınır bölgelere yaklaştıkça azalan hızlarına dikkat çekerek geliştirdikleri pencere fonksiyonu (Biolek Pencere Fonksiyonu) ile yeni bir memristör modelini oluşturmuşlardır [27]. Biolek’in bu modeli, bu tez çalışmasında kullanılması tercih edilen model olmuştur.

HP memristör modelinde [13], memristörün iyon sürüklenme hızı yani memristörün katkılanmış bölge genişliğinin zamana göre değişiminin,

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

(2.27)

olarak verildiği daha önceki bölümde belirtilmişti. Denklem (2.20) pencere fonksiyonu kullanarak,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu R_{on} i(t)}{D^2} f(x)$$

(2.28)

şeklinde yeniden biçimlendirilebilir. Joglekar'ın memristör modeli [26] gibi Biolek'in memristör modeli de nonlinear sürüklenme hızlı bir memristör modelidir. Ama Joglekar'ın memristör modeli gibi sınıra yapışma problemine sahip değildir.

Biolek ve Ark., memristörler için

$$f(x, i) = 1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p}$$

(2.29)

şeklinde bir pencere fonksiyonunu önermiştir. Burada x (zamana bağlı) durum değişkenidir ve w/D'ye eşittir. Yani memristörün katılanmış bölge uzunluğunun, memristörün toplam memristif bölge uzunluğuna oranını ifade etmektedir. Dolayısıyla değeri [0,1] aralığında değişmektedir. Denklem 2.29'da görüldüğü gibi, f(x) pencere fonksiyonu, x durum değişkenine, p parametresine ve i(t) memristör akımının polaritesine bağlıdır. Burada p parametresi, nonlinear sınır şartlarını modelleyebilmek için pencere fonksiyonuna dahil edilen pozitif bir tamsayıdır ve 1,2,3, ... gibi değerler alır. p parametresinin değeri arttıkça lineer ve nonlinear sürüklenme modelleri arasındaki fark ortadan kalkar. Bu denklemde memristör akımının polaritesine bağlılığını ifade eden 'step' fonksiyonu birim basamak fonksiyondur ve

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

(2.30)

parçalı fonksiyonu ile ifade edilebilir. Böylece f(x) fonksiyonu iki farklı polarite (memristörden geçen akımın yönü) için,

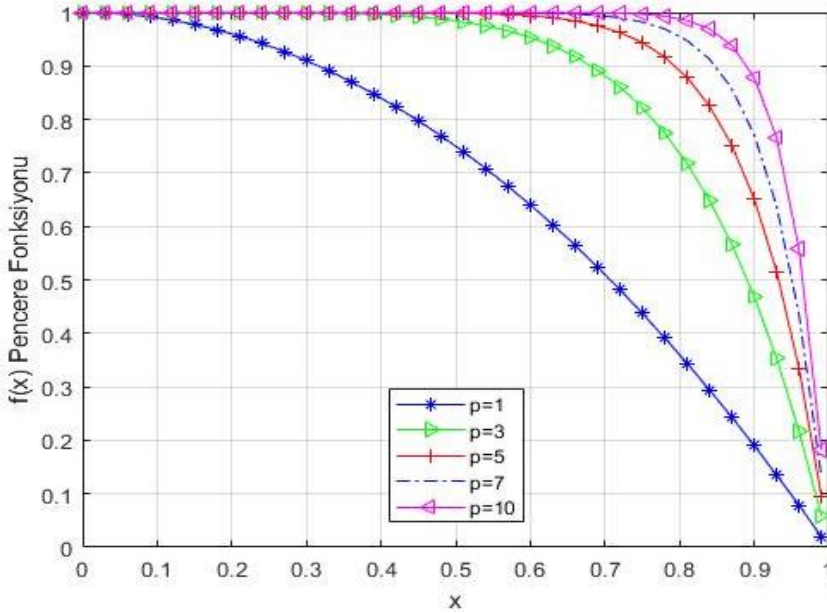
$$f(x) = \begin{cases} 1 - (x - 1)^{2p}, & i(t) \leq 0 \\ 1 - x^{2p}, & i(t) > 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

olarak yazılabilir. Burada farklı 'p' parametresi değerlerinde, her iki akım yönü için hesaplanan pencere fonksiyonları Çizelge 2.2' de verilmiştir.

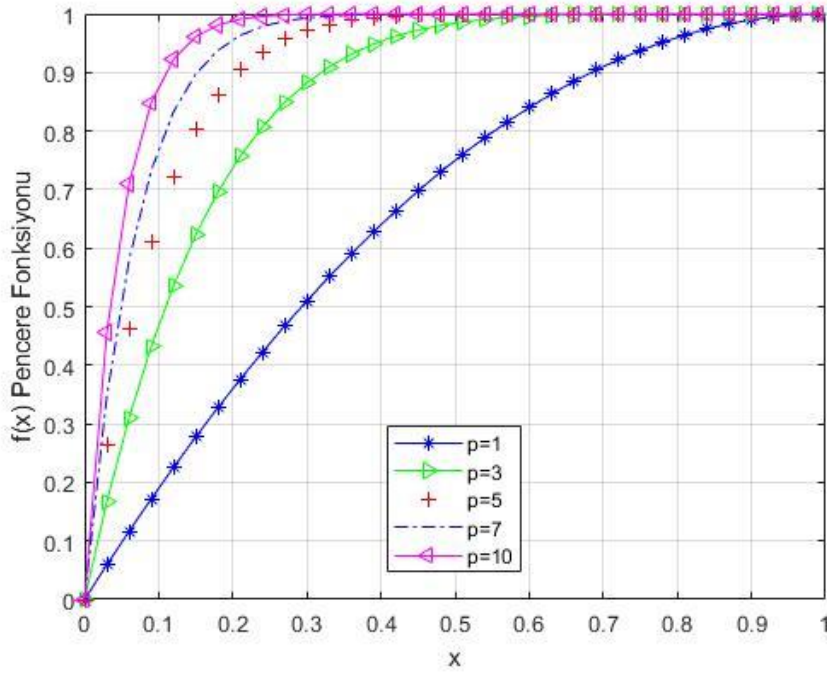
Çizelge 2.2. Farklı 'p' parametresi değerleri ve her iki akım yönü için Biolek Pencere Fonksiyonu

P	$i(t) \leq 0$ için $f(x) = 1 - (x - 1)^{2p}$	$i(t) > 0$ için $f(x) = 1 - x^{2p}$
1	$2x - x^2$	$1 - x^2$
2	$-x^4 + 4x^3 - 6x^2 + 4x$	$1 - x^4$
3	$-x^6 + 6x^5 - 15x^4 + 20x^3 - 15x^2 + 6x$	$1 - x^6$
4	$-x^8 + 8x^7 - 28x^6 + 56x^5 - 70x^4 + 56x^3 - 28x^2 + 8x$	$1 - x^8$
5	$-x^{10} + 10x^9 - 45x^8 + 120x^7 - 210x^6 + 252x^5 - 210x^4 + 120x^3 - 45x^2 + 10x$	$1 - x^{10}$

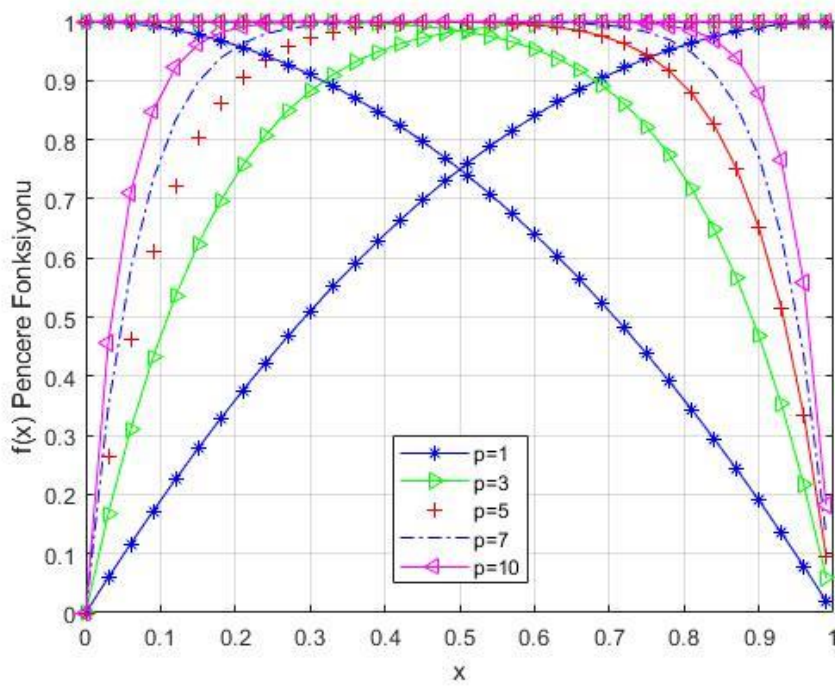
Biolek ve Ark., gerçeklikten uzak olan; memristördeki iyon hareketinin, memristör doyuma ulaşmaya kadar homojen olma varsayımı ile yapılan HP memristör modeline, geliştirdikleri bu pencere fonksiyonunu dahil ederek daha doğru bir memristör modeline ulaşmıştır. Şekil 2.7, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da akımın iki farklı polaritesi ve farklı p değerleri için çizilen Biolek pencere fonksiyonunun grafikleri görülebilir. Bu modelin polariteye bağlı olarak farklı sürüklenme hızları üreterek sınıra yapışma problemini ortadan kaldırdığı görülebilir.



Şekil 2.7. Akım pozitif iken ( $i(t) > 0$ ), farklı p değerleri için çizdirilen Biolek pencere fonksiyonu grafikleri



Şekil 2.8. Akım negatif iken ( $i(t) \leq 0$ ), farklı  $p$  değerleri için çizdirilen Bioregulatory pencere fonksiyonu grafikleri



Şekil 2.9. Akım pozitif ve negatif iken ( $i(t) > 0$  ve  $i(t) \leq 0$ ), farklı  $p$  değerleri için çizdirilen Bioregulatory pencere fonksiyonu grafikleri

### 3. KAYNAKLI VE KAYNAKSIZ M-C SERİ DEVRELERİNİN HP MEMRİSTÖR MODELİ KULLANILARAK YAPILAN ANALİZLERİ

Literatürde M-C (memristör-kondansatör) seri devresi ile ilgili sayılı çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak filtrelerle ilgili olmuştur [5, 45-49]. Bir kısım çalışmada ise kondansatörün dolma ve boşalma analizleri yapılmıştır. İlk M-C seri devresi incelemesi Joglekar ve Ark.'larının çalışmasıdır [26]. Joglekar ve Ark. çalışmalarında HP memristör modelini kullanarak kaynaksız ve DC gerilim kaynaklı bir memristör ve kondansatör seri devresinin analizini yapmıştır. Literatürde M-C seri devresi analizi yapılan diğer bir çalışma Mutlu'ya aittir [30]. Mutlu çalışmasında HP memristör modeli kullanarak M-C seri devresinin, sabit gerilimli kaynak ile analizini yaparak, kondansatörün dolmasını incelemiş ve devreyi bir gevşeme osilatörü devresine uygulamıştır.

Bu bölümde Joglekar ve Ark. ile Mutlu'nun inceledikleri kaynaklı ve kaynaksız M-C devreleri kısaca anlatılıp, bu devreleri tanımlayan denklemler verilmiştir. [26] ve [30]'da verilen çözümlerde memristörün yükü zamana bağlı bir fonksiyon olarak yazılamamıştır, yani memristörün yükü kapalı fonksiyon formunda bulunmuştur. Joglekar ve Ark. ile Mutlu'nun bulunduğu bu kapalı fonksiyonların çözümleri Urgan ve Ark. tarafından Lambert W fonksiyonu kullanılarak ifade edilmiştir [31]. Lambert W fonksiyonu, 1758'de Johann Heinrich Lambert tarafından tanıtılan bir Transandantal fonksiyondur (transcendental function) [50]. Bu fonksiyon Leonhard Euler tarafından daha simetrik bir forma dönüştürülmüştür [51]. Lambert W fonksiyonu bazı mühendislik problemlerinin modellenmesinde kullanılmaktadır ve Fen bilimlerinde karşımıza yaygınca çıkmaktadır. Bu bölümde ayrıca kaynaklı ve kaynaksız M-C seri devrelerinin [31]'de Lambert W fonksiyonu kullanılarak yazılan çözümleri de verilmiştir.

#### 3.1.Kaynaksız M-C Seri Devresinin Analizi

Bu bölümde Joglekar ve Ark.'nın HP memristör modeli kullanarak yaptığı kaynaksız M-C devresinin analizi verilecektir [26]. Bu devre Şekil 3.1'de görülebilir.



Şekil 3.1. Kaynaksız M-C seri devresi



[26]'da bu devreyi tanımlayan diferansiyel denklem,

$$M(q(t)) \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C} = 0$$

(3.1)

olarak verilmiştir. Burada  $q(t)$  kondansatörün yüküdür,  $M(q)$  memristörün memristansıdır,  $t$  zamandır ve  $C$  bu kondansatörün kapasitansdır.

Joglekar ve Ark. Denklem 3.1'in çözümünü,

$$q(t) e^{\frac{\eta \Delta R q(t)}{R_F Q_0}} = q(0) e^{-\frac{t}{R_F C}} e^{\frac{\eta \Delta R q(0)}{R_F Q_0}}$$

(3.2)

olarak vermiştir. Bu çözümde  $R_F$  memristörün başlangıç direncidir, kondansatörün  $t=0$ 'daki yükü is  $q(0)$ 'dır ve  $\eta$  ise memristörün polarite (yön) katsayısıdır.

$\eta$  memristör ileri yönde iken yani memristörün direnci azalırken  $+1$ 'e ve memristör ters yönde iken yani memristörün direnci artarken  $-1$ 'e eşittir.

[26]'da ayrıca memristörün başlangıç direnci,

$$R_F = R_0 - (\eta \Delta R q_0 / Q_0)$$

(3.3)

olarak verilmiştir. Burada  $Q_0 = D^2 / \mu_D R_{ON}$  memristörün maksimum yüküdür.

Joglekar ve Ark.'nın verdiği bu çözüm kapalı formda bulunmuştur [26]. Joglekar ve Ark.'nın verdiği çözüme dair daha fazla açıklama [26]'da bulunabilir. [31]'da Urgan ve Ark. Joglekar'ın kaynaksız M-C seri devresinin analitik çözümünün Lambert W fonksiyonu kullanarak,

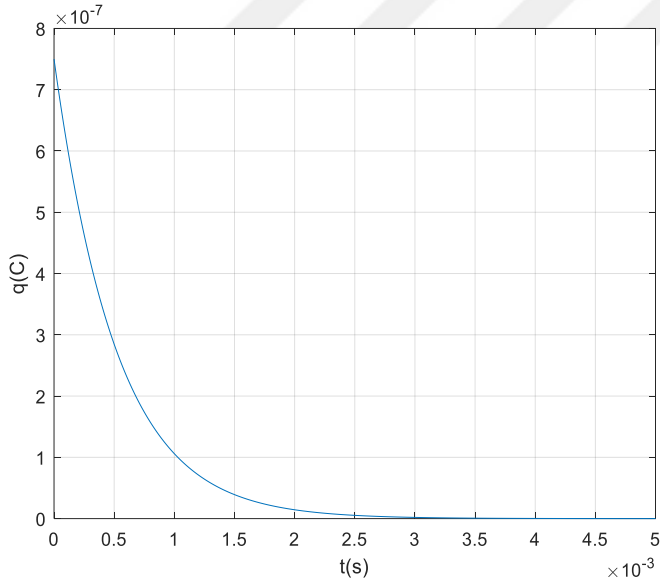
$$q(t) = \frac{R_F Q_0}{\eta \Delta R} W \left( \frac{\eta \Delta R q(0)}{R_F Q_0} e^{-\frac{t}{R_F C}} e^{A q(0)} \right) \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabileceğini göstermiştir.

MATLAB programında lambertw komutu ile Çizelge 3.1'deki parametreler kullanarak Denklem (3.4) çizdirilmiştir. Bu grafik Şekil 3.2'de görülebilir.

Çizelge 3.1. Kaynaksız M-C devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri [26]

Parametre	Değeri
H	1
$\Delta R$	100 $\Omega$
$R_F$	1000 $\Omega$
C	0.5 Nf
$Q_0$	1.5 $\mu\text{C}$
Q (0)	$Q_0/2$
$V_C(0)$	10 V

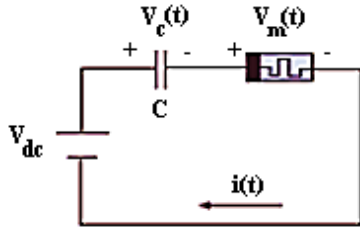


Şekil 3.2. Kaynaksız M-C devresindeki memristörün yükünün zamana göre değişimi [31]

### 3.2.DC Kaynaklı M-C Seri Devresinin Analizi

Joglekar ve Ark. [26]'da ayrıca DC kaynaklı bir M-C seri devresi analiz etmiştir. Ama Mutlu'nun [30]'da yaptığı DC Kaynaklı seri M-C devresi analizi daha detaylıdır. Mutlu ayrıca analizinde kondansatörün ve memristörün yükünün herhangi bir değer

olabileceği kabulü ile çözüm yapmıştır ve ayrıca memristörün doyuma gitmesini de incelemiştir. DC Kaynaklı seri M-C devresi Şekil 3.3'te görülebilir.



Şekil 3.3. DC kaynağı tarafından beslenen M-C seri devresi.

Kirchoff'un kanunları kullanılarak bu devreyi tanımlayan diferansiyel denklem,

$$M(q) \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q_c(t)}{C} = V_{dc} \quad (3.5)$$

$$(M_0 - Kq) \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q_c(t)}{C} = V_{dc} \quad (3.6)$$

olarak yazılır. Memristör doyumda değil ise, Denklem 3.6'da kondansatör yükü  $q_c(t)$  ve memristör yükü  $q(t)$  arasındaki ilişki,

$$q(t) = q_c(t) + B \quad (3.7)$$

olarak verilir. Burada  $B$  bir integral sabitidir ve

$$B = q(0) - q_c(0) \quad (3.8)$$

değerine eşittir. Burada  $q(0)$  ve  $q_c(0)$  sırasıyla memristör ve kondansatörün  $t=0$ 'da verilen başlangıç yükleridir. Böylece

$$(M_0 - Kq) \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q-B}{C} = V_{dc} \quad (3.9)$$

denklemini elde edilir.

Mutlu Denklem 3.9'in çözümünü, memristör doymada değil ise,

$$t = C(M_0 - KB - KCV_{dc}) \ln \left( \frac{CV_{dc} - q(0) + B}{CV_{dc} - q + B} \right) + KC(q - q(0)) \quad (3.10)$$

olarak bulmuştur. Burada  $M_0$  HP memristörün maksimum direnci ve  $K$  ise HP memristörün yük katsayısıdır.

Bu denklem satürasyon anında yani  $t = t_{sat}$  anında ve memristörün yükü  $q = q_{sat}$  iken,

$$t_{sat} = C(M_0 - KB - KCV_{dc}) \ln \left( \frac{CV_{dc} - q(0) + B}{CV_{dc} - q_{sat} + B} \right) + KC(q_{sat} - q(0)) \quad (3.11)$$

olacaktır.  $t > t_{sat}$  için memristör lineer bir direnç gibi davranmaya başlar. Memristörün satürasyonda iken, seri bağlı kondansatör gerilimi,

$$V_c(t) = (V_c(t_{sat}) - V_{dc})e^{-(t-t_{sat})/\tau} + V_{dc} \quad (3.12)$$

olarak bulunur. Denklem 3.10 kapalı formdadır. [31]'de Urgan ve Ark. Mutlu'nun DC gerilim kaynaklı M-C seri devresinin analitik çözümünün Lambert W fonksiyonu kullanarak,

$$q(t) = E - \frac{1}{KC} W[KCe^{F-D+KCE}] \quad (3.13)$$

şeklinde yazılabileceğini göstermiştir. Bu denklemde yer alan parametreler;

$$D = C(M_0 - KB - KCV_{dc}) \quad (3.14)$$

$$E = CV_{dc} + B \quad (3.15)$$

$$F = D \ln(E - q(0)) - t + KCq(0) \quad (3.16)$$

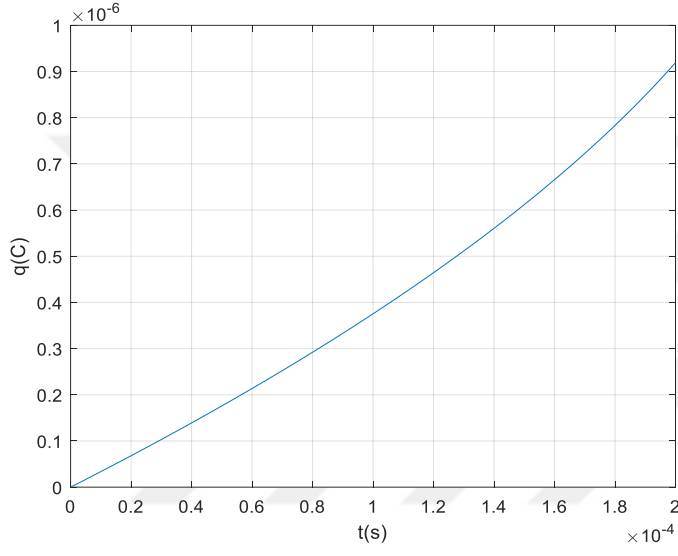
olarak verilir.

MATLAB programında lambertw komutu ile Çizelge 3.2'deki parametreler kullanarak Denklem (3.13) çizdirilmiştir. Bu grafik Şekil 3.4'te görülebilir.

Çizelge 3.2. Kaynaklı M-C devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri

Parametre	Değeri
H	1
$\Delta R$	100 $\Omega$
$R_F$	1000 $\Omega$

C	0.5 nF
$Q_0$	1.5 $\mu$ C
$Q(0)$	$Q_0/2$
$V_C(0)$	10 V



Şekil 3.4. Kaynaklı M-C devresindeki memristörün yükünün zamana göre değişimi [31]

#### 4. KENDİNDEN KANAL OLUŞTURMALI KARBON VE TUNGSTEN TABANLI MEMRİSTÖRLER

Bu çalışmada kullanılmak üzere Knowm şirketinin ürettiği, kendinden kanal oluşturmali Karbon ve Tungsten tabanlı memristör entegreleri tercih edilmiştir [33]. Bu çalışmada kullanılan Karbon ve Tungsten tabanlı Knowm memristör entegre devrelerinin fotoğrafları Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu entegrelerin her birinin toplamda 16 bacağı ve her birinin içerisinde 8 adet memristör bulunmaktadır. Şekil.4.2’de bu entegre devrelerin bacak bağlantıları verilmiştir. Memristörler bu entegrenin içine, bağlantı uçları entegrenin karşılıklı bacak çiftleri olacak şekilde yerleştirilmiştir.

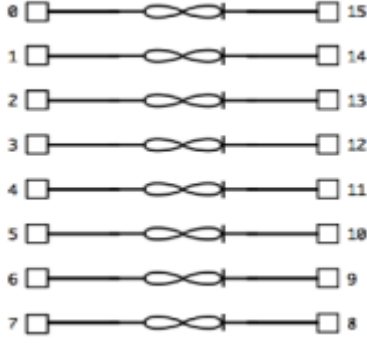


(a)



(b)

Şekil 4.1. İçerisinde 8 ayrı Kendinden Kanal Oluşturmali a) Karbon(C) ve b) Tungsten(W) Tabanlı Memristör Bulunan Knowm Entegreleri [33]



Şekil 4.2. İçerisinde 8 ayrı Kendinden Kanal Oluşturmalı Memristör bulunan Knowm Memristör Entegrasi bacak bağlantıları [33]

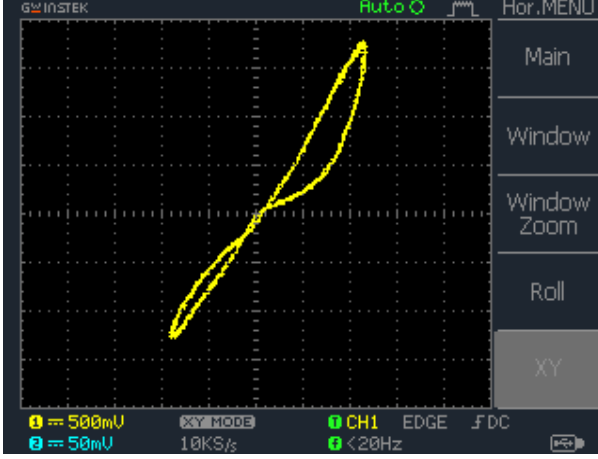
Cihaz direncini değiştirmek için kullanılan, malzeme katmanları içinde oluşan memristör kanalları,  $Ag^+$  iyonlarının aktif katmanların içindeki hareketine dayanır. Bu malzeme katmanları, bir metal iyon iletken cihaz oluşturmakta ve genellikle elektrokimyasal metalleştirme hücresi olarak adlandırılmaktadırlar. [33]'ten alınan, Şekil 4.3'te verilen Karbon ve Tungsten tabanlı memristör topolojilerinde görüldüğü üzere, bu devre elemanları, çeşitli katkı maddeleriyle optimize edilmeye çalışılmıştır. Memristöre uygulanan ileri yönlü gerilim,  $Ag^+$  iyonlarının hareketiyle kanal oluşturarak, cihazı alçak iletkenlik durumundan yüksek iletkenlik durumuna getirecektir. Ters gerilimde ise direnç değeri oldukça artacak olan cihaz daha az iletken duruma gelecektir. Knowm memristörlerde doğal yani ileri yön, direnç değerinin azalıp, iletkenliğin arttığı yönü tanımlarken; ters yön ise direnç değerinin artıp, iletkenliğin azaldığı yönü tanımlamaktadır.



Şekil 4.3. a) Karbon(C) ve b) Tungsten(W) tabanlı Knowm Memristörü topolojileri [33]

Knowm memristörleri hakkında daha detaylı bilgiye [33]'ten ulaşılabilir. [33]'te verilen bilgiye göre bu çalışmada kullanılan kendinden kanal oluşturmali Karbon(C) tabanlı memristör, düşük güçlü ikili anahtarlama için firmanın sattığı en uygun cihaz olarak tanımlanmıştır. Tungsten(W) tabanlı memristör ise, orta-hızlı frekanslardaki anahtarlama cevabı ile analog durum tutma yeteneği yönünden firmanın sattığı en uygun cihaz yani devre elemanıdır [33]. Bu memristörler sinüzoidal bir sinyal ile uyarılarak, düşük ve yüksek frekans değerlerinde memristörün histeresis eğrileri gözlemlenmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te sırasıyla Karbon ve Tungsten tabanlı memristörler için, düşük ve yüksek frekanslarda alınan birer histeresis eğrisi verilmiştir. Artan frekans değeriyle birlikte, histeresis eğrisinin alanının küçüldüğü Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te görülebilir. İdeal bir memristörün histeresis eğrisinin alanının frekansla azaldığı ilk olarak 1976'da Chua ve Ark. tarafından tahmin edilmiştir [3].



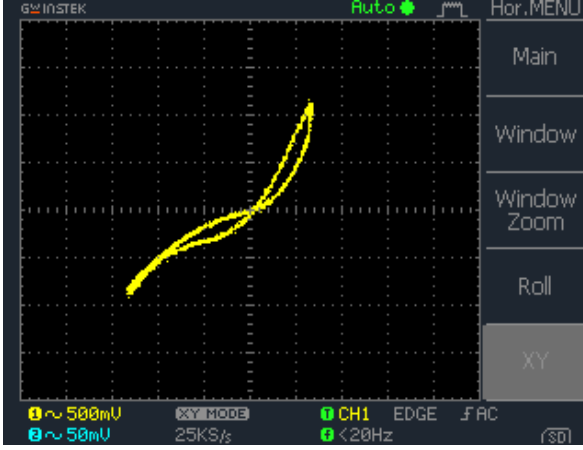


(a)

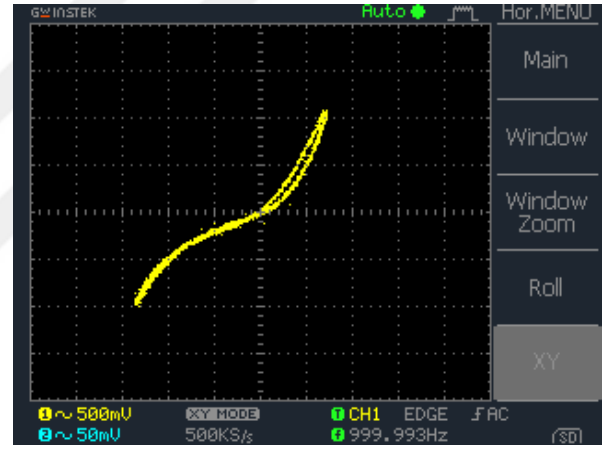


(b)

Şekil.4.4. Kendinden Kanal Oluşturmalı Karbon(C) Tabanlı memristörde sinüzoidal gerilim altında, a) 20 Hz ve b) 1 kHz frekans değerlerinde gözlemlenen histeresis eğrileri



(a)



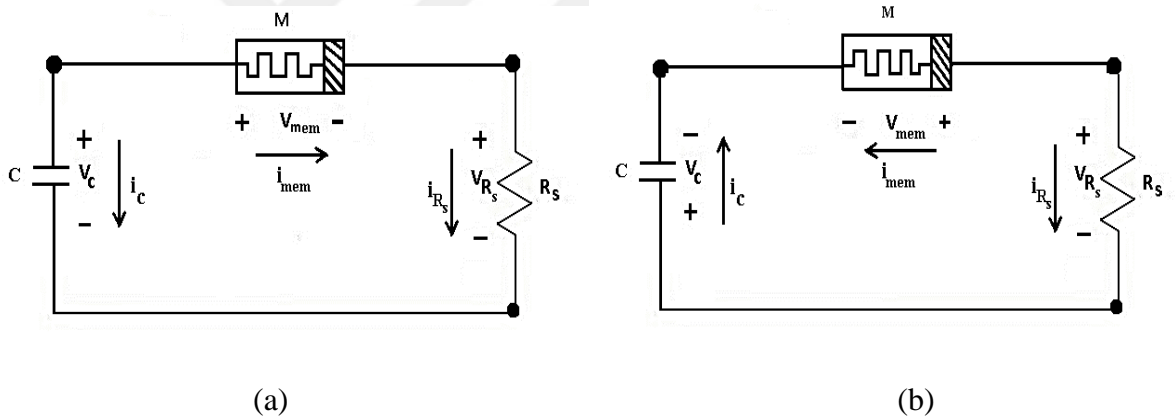
(b)

Şekil.4.5. Kendinden Kanal Oluşturmalı Tungsten(W) Tabanlı memristörde sinüzoidal gerilim altında, a) 20 Hz ve b) 1 kHz frekans değerlerinde gözlemlenen histeresis eğrileri

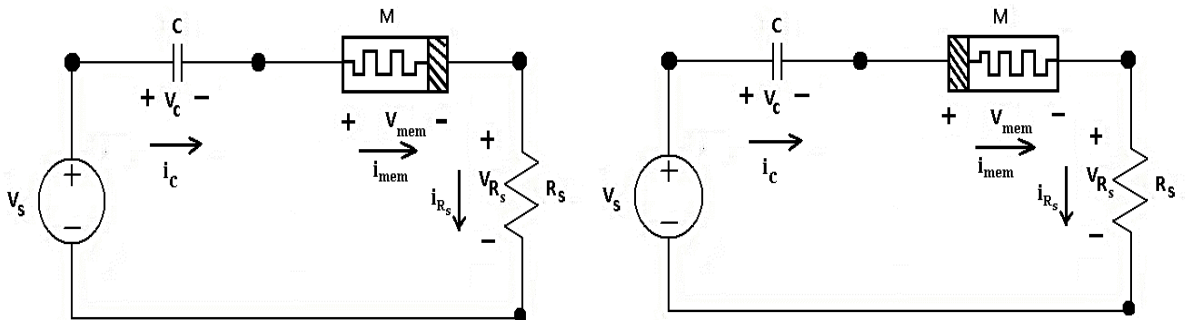
## 5. KAYNAKSIZ VE KAYNAKLI M-C DOLMA VE BOŞALMA DEVRELERİNİN ANALİZLERİ

Bu bölümde, kaynaklı ve kaynaksız M-C seri dolma (şarj) ve boşalma (deşarj) devrelerinin analizi yapılacaktır. Laboratuvar ortamında kurulup ölçümlerin alınacağı bu devrelerde Tungsten ya da Karbon memristör kataloğunda tavsiye edildiği üzere, memristörün

zarar görmemesi için bir  $R_S$  seri koruma direnci kullanılmıştır [33]. Bundan dolayı, bu bölümdeki analizlerde bu  $R_S$  koruma direnci dikkate alınmıştır. Böylece bu bölümde bir kondansatör, memristör ve  $R_S$  koruma direnci seri devresinin DC kaynaklı ve kaynaksız analizi yapılacaktır. Dr. Chua 1971’de yüke bağımsız bir memristörün direnç olarak davranacağını göstermiştir [1]. Seri bağlı iki memristör tek bir memristör gibi davranacaktır [52-55]. Bu analiz memristör ve koruma direncinin eşdeğeri bulunarak ve bu eşdeğer memristör bir kondansatörle seri bağlanarak ta yapılabilir ama bu çalışmada kondansatör, Memristör ve  $R_S$  koruma direncinden oluşan bu seri devrenin analizi her bir eleman ayrı ayrı göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu iki analiz birbirine denktir. Devrenin kaynaklı ve kaynaksız olduğu her iki durumda memristörün yönü değiştirilerek analizler tekrarlanacaktır. Analizi yapılacak olan kaynaksız ve kaynaklı devreler Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Bu şekillerde yapılan analizin türünün metinde kısaca anlatılabilmesi için ileri ve ters yönlü kutuplanmış memristörler için sırasıyla  $M_{İleri}$  ve  $M_{Ters}$  sembolleri kullanılmıştır. Bölüm 2.4’te verilen Biolek Memristör Modeli bu bölümdeki analizlerde kullanılacaktır.



Şekil 5.1. Kaynaksız a) Kondansatör, ileri yönlü kutuplanmış Tungsten ya da Karbon memristör ve  $R_S$  koruma direnci (C- $M_{İleri}$ - $R_S$ ) seri bağlı devresi ve b) Kondansatör, ters yönlü kutuplanmış Tungsten ya da Karbon memristör ve  $R_S$  koruma direnci (C- $M_{Ters}$ - $R_S$ ) seri bağlı devresi



(a)

(b)

Şekil 5.2. DC gerilim kaynaklı a) Kondansatör, ileri yönlü kutuplanmış memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{İleri}-R_S$ ) seri bağlı devresi ve b) Kondansatör, ters yönlü kutuplanmış memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{Ters}-R_S$ ) seri bağlı devresi

### 5.1.Kaynaksız Kondansatör-Memristör- $R_S$ Koruma Direnci Seri Devresinin Analizi

Bu bölümde sırasıyla, kaynaksız kondansatör, ileri yönlü memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{İleri}-R_S$ ) ve kaynaksız kondansatör, ters yönlü memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{Ters}-R_S$ ) seri bağlı devrelerinin analitik çözümleri verilmiştir.

#### 5.1.1. Kaynaksız Kondansatör-İleri Yönde Kutuplanmış Memristör- $R_S$ Koruma Direnci Seri Devresinin ( $C-M_{İleri}-R_S$ ) Analizi

Bu bölümde kaynaksız kondansatör, ileri yönlü kutuplanmış memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C-M_{İleri}-R_S$ ) devresinin analitik çözümü verilmiştir. Memristörün ileri yönlü bağlı (kutuplanmış) olduğu Şekil 5.1.a'daki devrede Kirchoff'un (Kirşof) gerilim kanunu kullanılarak,

$$-v_c(t) + v_{mem}(t) + v_{R_S}(t) = 0$$

(5.1)

yazılabilir. Burada  $v_c(t)$ ,  $v_{mem}(t)$  ve  $v_{R_S}(t)$  sırasıyla kondansatör, memristör ve koruma direnci gerilimleridir. Bu elemanların uç denklemleri burada yerine yazılırsa,

$$-v_c(t) + R(x) i_{mem}(t) + R_S i_{R_S}(t) = 0$$

(5.2)

elde edilir. Burada  $i_{mem}(t)$  ve  $i_{R_S}(t)$  sırasıyla memristör ve koruma direnci akımlarıdır. Bu devrede kondansatör akımı  $i_c(t)$ 'dir.  $R(x)$ , memristör direncine ve  $R_S$  ise seri koruma direncine eşittir. Bu devre için Kirchoff'un (Kirşof) akımlar kanunu,

$$-i_c(t) = i_{mem}(t) = i_{R_S}(t)$$

(5.3)

olarak yazılabilir. Denklem (5.2)'de akımlar kondansatör akımı cinsinden yazılırsa,

$$-v_c(t) - R(x) i_c(t) - R_S i_c(t) = 0 \quad (5.4)$$

$$-v_c(t) - (R(x) + R_S) i_c(t) = 0 \quad (5.5)$$

bulunur. Bu denklemde kondansatör akımını  $i_c(t) = C \, d v_c(t)/dt$  yerine yazıldığında,

$$v_c(t) + C(R(x) + R_S) \frac{d v_c(t)}{dt} = 0 \quad (5.6)$$

diferansiyel denklemi elde edilmektedir. Bu eşitlik,

$$\frac{d v_c(t)}{dt} = - \frac{v_c(t)}{C(R(x)+R_S)} \quad (5.7)$$

olarak düzenlenebilir. Bu denklem zincirleme türev kuralı kullanılarak,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{dx}{dt} = - \frac{v_c(t)}{C(R(x)+R_S)} \quad (5.8)$$

olarak yazılabilir. Bölüm 2.4'te, Biolek Memristör modeline göre iyon sürüklenme hızının,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(t) f(x, i_{mem}) \quad (5.9)$$

olduğu verilmişti. Burada  $i_{mem}(t) = -i_c(t)$  olduğu dikkate alınarak,

$$i_{mem}(t) = \frac{v_c(t)}{(R(x)+R_S)} \quad (5.10)$$

yazılabilir. Bu durumda Denklem 5.9,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{v_c(t)}{(R(x)+R_S)} f(x, i_{mem}) \quad (5.11)$$

olarak düzenlenebilir. Bu ifade Denklem 5.8'te yerine yazılacak olursa,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \left( \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{v_c(t)}{R(x)+R_S} f(x, i_{mem}) \right) = - \frac{v_c(t)}{C(R(x)+R_S)} \quad (5.12)$$

elde edilir. Sadeleşme sonucu,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} f(x, i_{mem}) = - \frac{1}{C} \quad (5.13)$$

$$\frac{d v_c(t)}{dx} = - \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON} f(x, i_{mem})} \quad (5.14)$$

elde edilir. Her tarafın integralini alarak,

$$v_c(t) = -\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \int \frac{dx}{f(x, i_{mem})} \quad (5.15)$$

bulunur. Burada, ikinci bölümde parçalı fonksiyon olarak verilen Biölek pencere fonksiyonu,  $f(x, i_{mem})$ , yerine yazılacak olursa, kondansatör gerilimi, memristör akımı pozitif iken, yani  $i_{mem}(t) > 0$  iken,

$$v_c(t) = -\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \int \frac{dx}{1-x^{2p}} \quad (5.16)$$

olacaktır. Matematiksel olarak elle çözümü zor olan Denklem 5.16'daki integral, Wolfram-Alpha integral alma programı ile hesaplanmıştır. Buradaki,

$$\int \frac{1}{1-x^{2p}} dx \quad (5.17)$$

integrali Wolfram-Alpha integral çözücüsü [56] ile çözüldüğünde,

$$\int \frac{1}{1-x^{2p}} dx = x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2p}; 1 + \frac{1}{2p}; x(t)^{2p} \right) + S1 \quad (5.18)$$

çözümü elde edilmiştir. Burada integralin çözümü,  $x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2p}; 1 + \frac{1}{2p}; x(t)^{2p} \right)$  fonksiyonu ile sonuçlanmıştır ve S1 integral sabitidir. Bu sonuç orijinal ismi 'hypergeometric function' olan, dilimize 'hipergeometrik fonksiyon' olarak geçen  ${}_2F_1(a, b; c; z)$  fonksiyonunu içermektedir.

Hipergeometrik fonksiyon kaynaklarda  ${}_2F_1$  ve F olmak üzere iki farklı gösterime sahiptir. Bu fonksiyonun genelleştirilmiş denklemi,

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(a)_n (b)_n}{(c)_n} \frac{z^n}{n!} = 1 + \frac{ab}{c} \frac{z}{1!} + \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1)} \frac{z^2}{2!} + \dots \quad (5.19)$$

şeklindedir. Bu denklem  $|z| < 1$  için geçerlidir yani yakınsamaktadır ve 'c' negatif bir sayı iken hipergeometrik fonksiyon tanımsızdır. Burada  $(a)_n$ ,  $(b)_n$  ve  $(c)_n$  olarak karşılaşılan katsayılar, aşağıda  $(q)_n$  olarak isimlendirilmiş polinom cinsinden ifade edilirler;

$$(q)_n = \begin{cases} 1 & , q = 0 \\ q(q+1)(q+2)\dots(q+n-1) & , q > 0 \end{cases}$$

(5.20)

Burada  $(q)_n$  Pochhammer sembolüdür [57]. Leo August Pochhammer tarafından tanıtılan bu fonksiyon polinom yükselen faktöriyelleri temsil eder. Denklem 5.16 gerekli integrallerin çözülmesinin ardından,

$$v_c(t) = -\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} (x(t))_2 F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(t)^{2P} \right) + S1$$

(5.21)

olur. Burada  $t=0$ 'daki  $v_c(0)$  ve  $x(0)$  başlangıç şartları kullanılırsa,

$$v_c(0) = -\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} (x(0))_2 F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(0)^{2P} \right) + S1$$

(5.22)

elde edilecektir. Buradan S1 integral sabiti,

$$-\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} S1 = v_c(0) + \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \left( (x(0))_2 F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(0)^{2P} \right) \right)$$

(5.23)

denklemleri ile hesaplanabilir. Böylece  $i_{mem}(t) > 0$  için kondansatör gerilimi,

$$v_c(t) = -K \left[ (x(t))_2 F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(t)^{2P} \right) - (x(0))_2 F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(0)^{2P} \right) \right] + v_c(0)$$

(5.24)

olur. Burada  $K = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}}$  dur,  $v_c(0)$   $t=0$  anında kondansatör geriliminin başlangıç şartıdır ve  $x(0)$  ise  $t=0$  anında memristör durum değişkeninin başlangıç şartıdır.  $v_c(t)$ , kondansatör akımı olan,

$$i_c(t) = -\frac{v_c(t)}{(R(x)+R_S)} \tag{5.25}$$

ifadesinde yerine yazılırsa,

$$i_c(t) = -\frac{-K \left[ (x(t))_2 F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(t)^{2P} \right) - (x(0))_2 F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(0)^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x)+R_S)}$$

(5.26)

olacaktır. Buradan memristör gerilimi,

$$v_{\text{mem}}(t) = -R(x)i_c(t) \quad (5.27)$$

$$v_{\text{mem}}(t) = -R(x) \frac{-K \left[ x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t))^{2P} \right) - x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0))^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.28)$$

olacaktır. Seri koruma direncinin gerilimi,

$$v_{R_S}(t) = -R_S i_c(t) \quad (5.29)$$

$$v_{R_S}(t) = R_S \frac{-K \left[ x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t))^{2P} \right) - x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0))^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.30)$$

olarak bulunur. Zamana (t) bağlı olarak açık bir şekilde yazılamayan bu çözümler x(t)'ye bağlı bulunmuştur. Burada x(t) zamana bağlı olarak açık bir şekilde bilinmemektedir. Dolayısıyla, kapalı bir fonksiyon olarak bulunan  $v_c(t)$ ,  $v_{\text{mem}}(t)$ ,  $v_{R_S}(t)$ ,  $i_{\text{mem}}(t)$  denklemlerinin zamana bağlı olarak açık bir çözümü yoktur. Bundan dolayı kapalı fonksiyon olarak elde edilen denklemlerin ( $v_c(t)$ ,  $v_{\text{mem}}(t)$ ,  $v_{R_S}(t)$ ,  $i_{\text{mem}}(t)$ ) çözümü için gerekli olan t zamanı değerleri, Euler metodu kullanılarak oluşturulan bir algoritma ile hesaplanabilir. Burada,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{\text{mem}}(t) f(x, i_{\text{mem}}) \quad (5.31)$$

denklemini yeniden düzenlenirse, zamanın diferansiyeli,

$$dt = \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{\text{mem}}(t) f(x, i_{\text{mem}})} dx \quad (5.32)$$

olarak elde edilir. Bu denklemde her iki tarafın integrali alınırsa, zaman yani t değerleri x(t) cinsinden,

$$t = \int_{t=0}^{t=t} dt = \int_{x(0)}^{x(t)} \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{\text{mem}}(t) f(x, i_{\text{mem}})} dx \quad (5.33)$$

olacaktır. Euler metodu kullanılırsa,

$$t_1 = t_0 + \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{\text{mem}}(x_0) f(x_0, i_{\text{mem}}(x_0))} \Delta x_0 \quad (5.34)$$

yazılarak ilk adımdaki t değeri olan  $t_1$  bulunabilir. Burada integralin alt sınırı sıfır olduğundan dolayı başlangıç zaman değeri  $t_0 = 0$  alınır;

$$t_1 = \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_0) f(x_0, i_{mem}(x_0))} \Delta x_0 \quad (5.35)$$

olacaktır. Bu durumda  $t_2$ ,

$$t_2 = t_1 + \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_1) f(x_1, i_{mem}(x_1))} \Delta x_1 \quad (5.36)$$

olacaktır. Böylece tüm  $x(t)$  değerlerine karşılık gelen  $t$  değerleri, yani  $j$ . adımdaki zaman değeri,

$$t_j = t_{j-1} - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1}) f(x_{j-1}, i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x_j \quad (5.37)$$

algoritması ile hesaplanabilir. Burada  $\Delta x_j$ ,  $x$ 'in  $j$ . adım aralığıdır ve çözümde kolaylık sağlama açısından,

$$\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \dots = \Delta x_j = \dots \quad (5.38)$$

alınmıştır. Burada  $\Delta x$  aralığı  $n$  tane aralık kullanıldığı varsayıldığında,

$$\Delta x = \frac{x(t) - x(0)}{n} \quad (5.39)$$

olarak hesaplanabilir. Böylece,

$$t_j = t_{j-1} - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1}) f(x_{j-1}, i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x \quad (5.40)$$

yazılabilir. Burada  $x$ 'in bir fonksiyonu olan  $t$  değerleri yani  $\Delta x$  kadar adım aralığı kullanarak  $x(t)$ 'ye karşılık gelen  $j$  adımında hesaplanan  $t$  anı, Riemann manasında integral yaklaşımı ile,

$$t = t_j \cong \sum_{j=0}^j \Delta x_j \left( \frac{K}{i_{mem}(x_j) f(x_j, i_{mem}(x_j))} \right) \quad (5.41)$$

integrali ile bulunabilir. Burada yarı-analitik çözümü yapılan C-Milleri- $R_S$  seri devresi MATLAB programında yazılan bir kod ile incelenmiştir.  $t$  değerleri MATLAB kodunda kümülatif sayısal integral alma komutu (cumtrapz) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$t = D^2 / (Mv * Ron) * cumtrapz(x, 1 ./ ((1 - x.^{(2*p)}). * imem)) \quad (5.42)$$

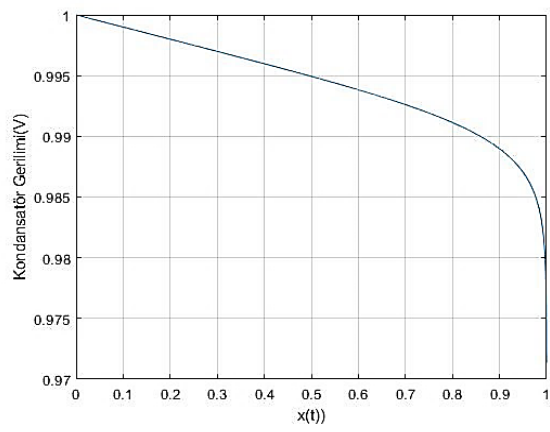
Bu devrenin analizi için MATLAB programında yazılan kod EK-1'de verilmiştir. Bu kod ile ve Çizelge 5.1'deki parametreler kullanarak devre değişkenlerinin grafikleri çizdirilmiştir.  $x(t)$ 'ye ve  $t$  zaman değerlerine bağlı olarak ayrı ayrı çizdirilen grafikler Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sırasıyla görülebilir. İleri yönde kutuplanmış memristör üzerinden kondansatörün önce



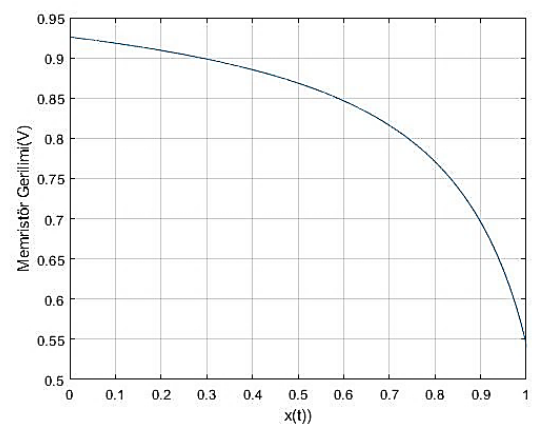
düşük ve sonra giderek artan bir eğimle deşarj olduğu Şekil 5.4.a'da görülmektedir. İleri yönde kutuplanmış memristörün direncinin maksimum değerinden ( $R_{off}$ ) başlayarak zamana göre hemen hemen sabit bir eğimle azaldığı ve giderek minimum direnç değerine ( $R_{on}$ ) doğru asimptotik olarak yaklaştığı Şekil 5.4.e'de görülebilir. Memristör direnci azalırken memristör durum değişkeninin hemen hemen sabit bir eğimle arttığı ve ardından hemen hemen 1 değerinde sabitlendiği Şekil 5.4.f'de görülebilir. Memristör direnci hemen hemen sabitlendikten yani yaklaşık 2,2 milisaniye geçtikten sonra devre kondansatör-direnç (R-C) devresi olarak davranmaya başlamıştır. Hipergeometrik fonksiyonun  $x=1$ 'de tanımsız olmasından dolayı adım sayısının daha fazla artırılması gerekmektedir. Memristörün direnci azalırken Şekil 5.4.c'de görüldüğü gibi kondansatörün deşarj akımı artmıştır. Ama deşarj akımı yaklaşık 2,2 milisaniye sonra sabitlenmiştir. Kondansatör yeterince yüklü olduğu için geriliminde fazla bir düşme olmadığı ama boşalma eğrisinin memristörün direncinin etkisi ile biçimlendirildiği yine Şekil 5.4.a'da görülebilir. Memristör devresi için  $(R_S + R_{on})C$  değeri yaklaşık 0,225 saniye yapmaktadır. Bir tür zaman sabiti olarak alınabilecek bu değer 2,2 milisaniyeden çok büyük olduğundan, memristör direnci sabitlendiğinde R-C devresi gibi davranan bu deşarj devresinde kondansatörün gerilimi sabit bir eğimle düşmektedir. Memristör direnci düşerken memristörün geriliminde önce düşük bir eğimle, sonra artan bir eğimle azaldığı ve 2,2 milisaniye sonra düşük bir eğimle azaldığı Şekil 5.4.b'de görülebilir. Devredeki koruma direncinin gerilimi, Ohm Kanunundan dolayı, devre deşarj akımı ile aynı karakteristiği göstermektedir. İleri yönde kutuplanmış memristör ve koruma direnci üzerinden kondansatör deşarj olurken bu deşarjın karakteristiğinin bir R-C devresi gibi eksponansiyel olmadığı Şekil 5.4'te görülmektedir.

Çizelge 5.1. C-M<sub>İleri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri

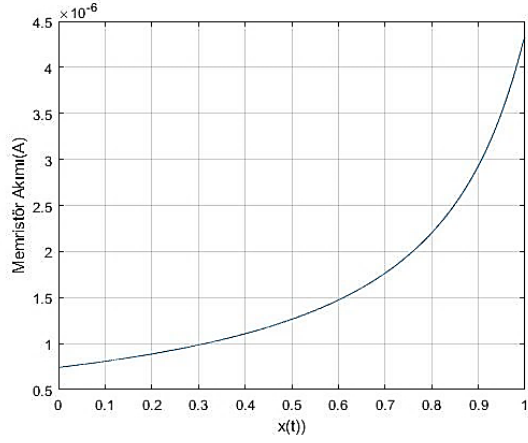
Parametre	Değeri
$\mu_V$	$40e-14 \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$
$R_{on}$	125 k $\Omega$
$R_{off}$	1250 k $\Omega$
D	10 nm
$R_S$	100 k $\Omega$
C	200 Nf
P	2
$V_C(0)$	1 V



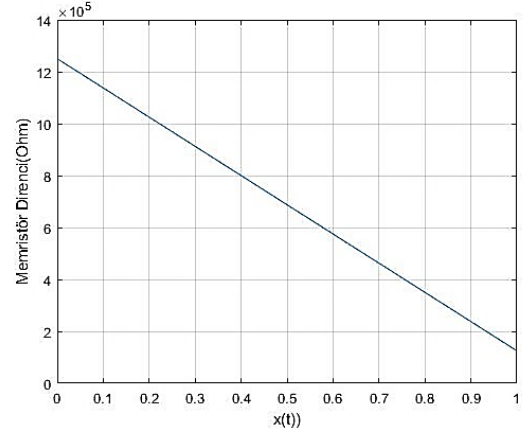
(a)



(b)

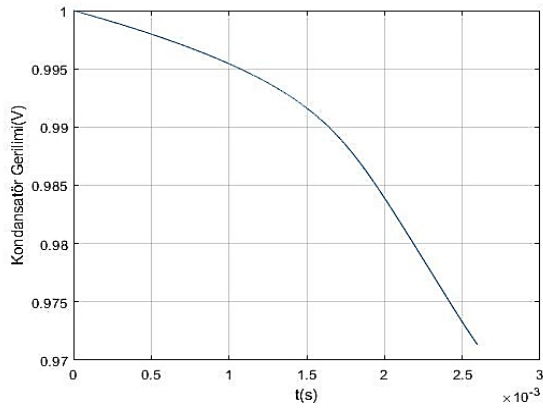


(c)

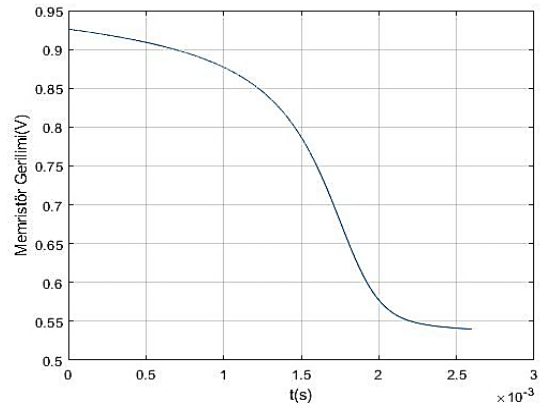


(d)

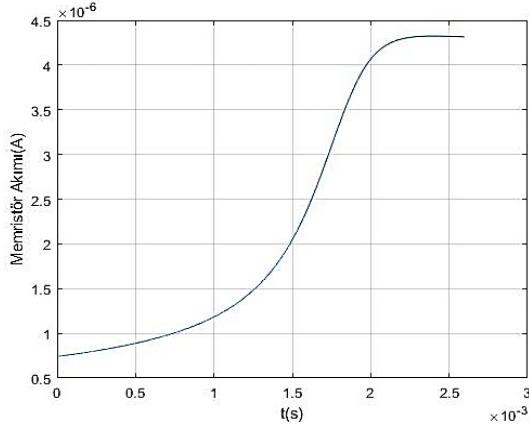
Şekil 5.3. Kaynaksız C-Milleri- $R_C$  seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin  $x(t)$ 'ye göre değişim grafikleri



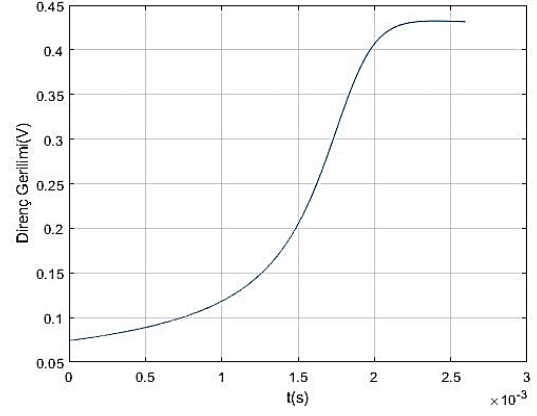
(a)



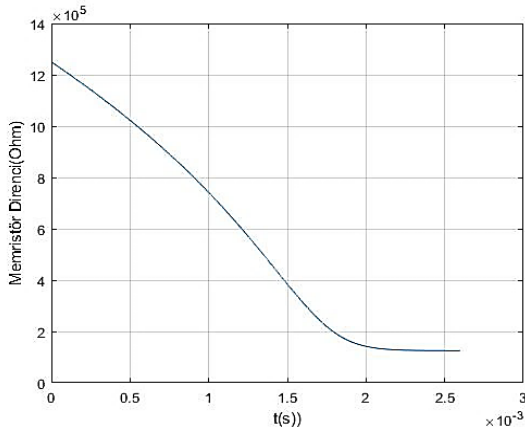
(b)



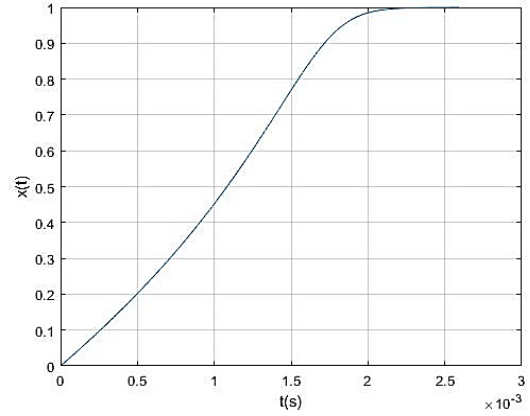
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.4. Kaynaksız C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnç gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri

### 5.1.2. Kaynaksız Kondansatör-Ters Yönde Kutuplanmış Memristör-R<sub>S</sub> Koruma Direnci Seri Devresinin (C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub>) Analizi

Bu bölümde kaynaksız kondansatör, ters yönlü kutuplanmış memristör ve R<sub>S</sub> koruma direnci (C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub>) seri devresinin analitik çözümü verilecektir. Memristörün ters yönlü bağlı (kutuplanmış) olduğu Şekil 5.1.b'deki devrede Kirchoff'un (Kirşof) gerilim kanunu kullanılarak,

$$-v_c(t) + v_{mem}(t) - V_{R_S}(t) = 0 \quad (5.43)$$

yazılabilir. Burada  $v_c(t)$ ,  $v_{mem}(t)$  ve  $V_{R_s}(t)$  sırasıyla kondansatör, memristör ve koruma direnci gerilimleridir. Elemanların uç denklemleri burada yerine yazılırsa,

$$-v_c(t) + R(x) i_{mem}(t) - R_s i_{R_s}(t) = 0 \quad (5.44)$$

elde edilir. Burada  $i_{mem}(t)$  ve  $i_{R_s}(t)$  sırasıyla memristör ve koruma direnci akımlarıdır. Bu devrede kondansatör akımı  $i_c(t)$ 'dir.  $R(x)$ , memristör direncine ve  $R_s$  ise seri koruma direncine eşittir. Bu devre için Kirchoff'un akımlar kanunu,

$$-i_c(t) = i_{mem}(t) = -i_{R_s}(t) \quad (5.45)$$

olarak yazılabilir. Denklem 5.44'te akımlar kondansatör akımı cinsinden yazılırsa,

$$-v_c(t) - R(x)i_c(t) - R_s i_c(t) = 0 \quad (5.46)$$

bulunur. Bu eşitlikte,  $i_c(t) = C \, d v_c(t)/dt$  yerine yazıldığında,

$$v_c(t) + C(R(x) + R_s) \frac{d v_c(t)}{dt} = 0 \quad (5.47)$$

diferansiyel denklemi elde edilmektedir. Bu eşitlik,

$$\frac{d v_c(t)}{dt} = - \frac{v_c(t)}{C(R(x)+R_s)} \quad (5.48)$$

olarak düzenlenebilir. Bu denklem zincirleme türev kuralı kullanılarak,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{dx}{dt} = - \frac{v_c(t)}{C(R(x)+R_s)} \quad (5.49)$$

olarak yazılabilir. Bölüm 2.4'te, Biolek Memristör modeline göre iyon sürüklenme hızının,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(t) f(x, i_{mem}) \quad (5.50)$$

olduğu verilmişti. Bu devrede memristör ters yönde kutuplanmış olduğundan, memristör akımı negatif işaretli olacaktır. Bu durumda,

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(t) f(x, -i_{mem}) \quad (5.51)$$

olarak yazılabilir. Burada memristör akımı,

$$i_{mem}(t) = \frac{v_c(t)}{(R(x)+R_s)} \quad (5.52)$$

dir. Bu durumda Denklem 5.51,

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{v_c(t)}{(R(x)+R_S)} f(x, -i_{mem}) \quad (5.53)$$

olarak düzenlenebilir. Bu ifade Denklem (5.49)'da yerine yazılacak olursa,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \left( -\frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{v_c(t)}{R(x)+R_S} f(x, -i_{mem}) \right) = -\frac{v_c(t)}{C(R(x)+R_S)}$$

(5.54)

elde edilir. Sadeleşme sonucu,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} f(x, -i_{mem}) = \frac{1}{C}$$

(5.55)

$$\frac{d v_c(t)}{dx} = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \frac{1}{f(x, -i_{mem})}$$

(5.56)

elde edilir. Her iki tarafın integrali alınarak,

$$v_c(t) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \int \frac{dx}{f(x, -i_{mem})}$$

(5.57)

bulunur. Biolek Pencere fonksiyonu, ikinci bölümde,

$$f(x, i_{mem}) = \begin{cases} 1 - (x - 1)^{2p} & , i_{mem}(t) < 0 \\ 1 - x^{2p} & , i_{mem}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (5.58)$$

olarak verilmiştir. Bu pencere fonksiyonunun, Şekil 5.1.b'deki devrede ters yönde kutuplanan memristörün, akım yönü dikkate alındığında,

$$f(x, -i_{mem}) = \begin{cases} 1 - (x - 1)^{2p} & , i_{mem}(t) > 0 \\ 1 - x^{2p} & , i_{mem}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (5.59)$$

olduğu düşünülebilir. Bu durumda Denklem 5.57  $i_{mem}(t) > 0$  iken,

$$v_c(t) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \int \frac{dx}{1 - (x-1)^{2p}} \quad (5.60)$$

olarak düzenlenebilir. Matematiksel olarak elle çözümü zor olan Denklem 5.65'deki integral, Wolfram-Alpha integral alma programı ile hesaplanmıştır. Buradaki,

$$\int \frac{1}{1 - (x-1)^{2p}} dx \quad (5.61)$$

integrali Wolfram-Alpha integral çözücüsü [56] ile çözüldüğünde,

$$\int \frac{1}{1-(x-1)^{2P}} dx = (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) + S2 \quad (5.62)$$

çözümü elde edilmiştir. Burada S2 integral sabitidir. Böylece Denklem 5.60 gerekli integralin çözümlenmesinin ardından,

$$v_c(t) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \left( (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) + S2 \right) \quad (5.63)$$

olur. Burada t=0'daki v<sub>c</sub>(0) ve x(0) başlangıç şartları kullanılırsa,

$$v_c(0) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \left( (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) + S2 \right) \quad (5.64)$$

elde edilecektir. Buradan S2 integral sabiti,

$$\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} S2 = v_c(0) - \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \left( (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right) \quad (5.65)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Böylece i<sub>mem</sub>(t) > 0 için kondansatör gerilimi,

$$v_c(t) = K \left[ (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) - (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right] + v_c(0) \quad (5.66)$$

olur. Burada K =  $\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}}$  dur. v<sub>c</sub>(0) t=0 anında kondansatör geriliminin başlangıç şartıdır ve x(0) ise t=0 anında memristör durum değişkeninin başlangıç şartıdır. Denklem 5.66,

$$i_c(t) = - \frac{v_c(t)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.67)$$

ifadesinde yerine yazılırsa,

$$i_c(t) = - \frac{K \left[ (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) - (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.68)$$

olacaktır. Buradan memristör gerilimi,

$$v_{mem}(t) = R(x) i_{mem}(t) \quad (5.69)$$

$$v_{mem}(t) = -R(x) i_c(t) \quad (5.70)$$

$$v_{mem}(t) = R(x) \frac{K \left[ (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) - (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.71)$$

olacaktır. Seri koruma direncinin gerilimi,

$$v_{R_S}(t) = -R_S i_{R_S}(t) \quad (5.72)$$

$$v_{R_S}(t) = -R_S i_c(t) \quad (5.73)$$

$$v_{R_s}(t) = R_s \frac{K \left[ (x(t)-1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t)-1)^{2P} \right) - (x(0)-1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0)-1)^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x)+R_s)} \quad (5.74)$$

olarak bulunacaktır. Zamana (t) bağlı yazılamayan bu çözümler x(t)'ye bağlı bulunmuştur. Burada x(t) zamana bağlı olarak açık bir şekilde bilinmemektedir. Dolayısıyla, kapalı bir fonksiyon olarak bulunan v<sub>c</sub>(t), v<sub>mem</sub>(t), v<sub>R<sub>s</sub></sub>(t) ve i<sub>mem</sub>(t) denklemlerinin zamana bağlı olarak açık bir çözümü yoktur. Bundan dolayı kapalı fonksiyon olarak elde edilen denklemlerin (v<sub>c</sub>(t), v<sub>mem</sub>(t), v<sub>R<sub>s</sub></sub>(t), i<sub>mem</sub>(t)) çözümü için gerekli olan t zamanı değerleri, Euler metodu kullanılarak oluşturulan bir algoritma ile hesaplanabilir. Burada,

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(t) f(x, -i_{mem}) \quad (5.75)$$

denklemini yeniden düzenlenirse, zamanın diferansiyeli,

$$dt = - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(t) f(x, -i_{mem})} dx$$

(5.76)

olarak elde edilir. Bu denklemde her iki tarafın integrali alınır, zaman yani t değerleri x(t) cinsinden,

$$t = \int_{t=0}^{t=t} dt = - \int_{x(0)}^{x(t)} \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(t) f(x, -i_{mem})} dx \quad (5.77)$$

olacaktır. Euler metodu kullanılırsa,

$$t_1 = t_0 - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_0) f(x_0, -i_{mem}(x_0))} \Delta x_0$$

(5.78)

yazılarak ilk adımdaki t değeri olan t<sub>1</sub> bulunabilir. Burada integralin alt sınırı sıfır olduğundan dolayı başlangıç zaman değeri t<sub>0</sub> = 0 alınır;

$$t_1 = - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_0) f(x_0, -i_{mem}(x_0))} \Delta x_0 \quad (5.80)$$

olacaktır. Bu durumda t<sub>2</sub>,

$$t_2 = t_1 - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_1) f(x_1, -i_{mem}(x_1))} \Delta x_1$$

(5.81)

olacaktır. Böylece tüm x(t) değerlerine karşılık gelen t değerleri, yani j. adımdaki zaman değeri,



$$t_j = t_{j-1} - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1})f(x_{j-1}, i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x_j$$

(5.82)

algoritması ile hesaplanabilir. Burada  $\Delta x_j$ ,  $x$ 'in  $j$ . adım aralığıdır ve çözümde kolaylık sağlama açısından,

$$\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \dots = \Delta x_j = \dots$$

(5.83)

alınmıştır. Burada  $\Delta x$  aralığı  $n$  tane aralık kullanıldığı varsayıldığında,

$$\Delta x = \frac{x(t) - x(0)}{n}$$

(5.84)

olarak hesaplanabilir. Böylece,

$$t_j = t_{j-1} - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1})f(x_{j-1}, i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x$$

(5.85)

yazılabilir. Burada  $x$ 'in bir fonksiyonu olan  $t$  değerleri yani  $\Delta x$  kadar adım aralığı kullanarak  $x(t)$ 'ye karşılık gelen  $j$  adımında hesaplanan  $t$  anı, Riemann manasında integral yaklaşımı ile,

$$t = t_j \cong - \sum_{j=0}^j \Delta x_j \left( \frac{K}{i_{mem}(x_j)f(x_j, i_{mem}(x_j))} \right)$$

(5.86)

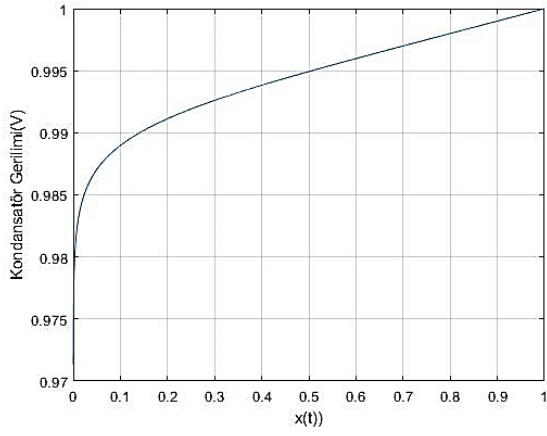
integrali ile bulunabilir. Burada yarı-analitik çözümü yapılan C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresi MATLAB programında yazılan bir kod ile incelenmiştir.  $t$  değerleri MATLAB kodunda kümülatif sayısal integral alma komutu (cumtrapz) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$t = -D^2/(Mv * Ron) * cumtrapz(x, 1./((1-(x-1).^(2*p)).*imem))$$

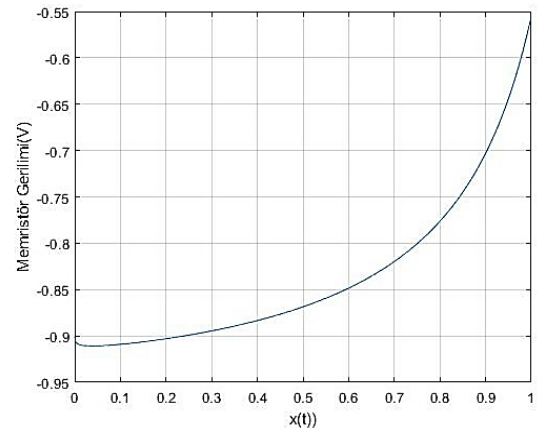
(5.87)

Bu devrenin analizi için MATLAB programında yazılan kod EK-2'de verilmiştir. Bu kod ile Çizelge 5.1'deki parametreler kullanarak devre değişkenlerinin grafikleri çizdirilmiştir.  $x(t)$ 'ye ve  $t$  zaman değerleri için ayrı ayrı çizdirilen grafikler Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırasıyla görülebilir. Ters yönde kutuplanmış memristör üzerinden kondansatörün hemen hemen sabit bir eğimle deşarj olduğu Şekil 5.6.a'da görülmektedir. Ters yönde kutuplanmış memristörün direncinin minimum direnç değerinden ( $R_{on}$ ) başlayarak, zamana göre hızlı bir şekilde direnç değerinin arttığı ve 3,5 ms'den sonra asimptotik olarak  $R_{off}$  değerine yaklaştığı

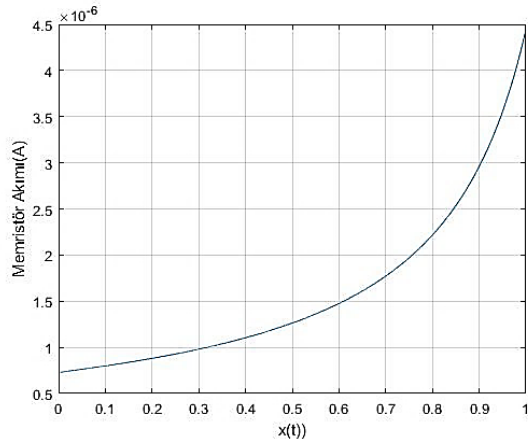
Şekil 5.6.e’de görülebilir. Memristör direnci artarken memristör durum değişkeninin memristörün direncinin hızlıca artması ile ters orantılı olarak hızlıca azaldığı ve ardından hemen hemen 0 değerinde sabitlendiği Şekil 5.6.f’de görülebilir. Memristör direnci hemen hemen sabitlendikten yani yaklaşık 3,5 ms geçtikten sonra devre kondansatör-direnç (R-C) devresi olarak davranmaya başlamıştır. Hipergeometrik fonksiyonun  $x=1$ ’de tanımsız olmasından dolayı adım sayısının daha fazla arttırılması gerekmektedir. Memristörün direnci artarken Şekil 5.6.c’de görüldüğü gibi kondansatörün deşarj akımı azalmıştır. Ama deşarj akımı yaklaşık 3,5 ms sonra sabitlenmiştir. Memristör devresi için  $(R_S + R_{off})C$  değeri yaklaşık 0,225 saniye yapmaktadır. Bir tür zaman sabiti olarak alınabilecek bu değer 3,5 ms’den oldukça büyük olduğundan, memristör direnci sabitlendiğinde R-C devresi gibi davranan bu deşarj devresinde kondansatörün gerilimi neredeyse sabit bir eğimle düşmektedir. Memristör direnci artarken memristörün geriliminin de önce yüksek bir eğimle artışı olduğu, sonra memristör geriliminde hemen hemen 0,02 Volt’luk bir düşüş seyredildiği Şekil 5.6.b’de görülebilir. Gerilimdeki bu dalgalanma yedinci bölümde, simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak incelenecektir. Devredeki koruma direncinin gerilimi, Ohm Kanunundan dolayı, devre deşarj akımı ile aynı karakteristiği göstermektedir. Ters yönde kutuplanmış memristör ve koruma direnci üzerinden kondansatör deşarj olurken bu deşarjın karakteristiğinin bir R-C devresi gibi eksponansiyel olmadığı Şekil 5.6’da görülmektedir.



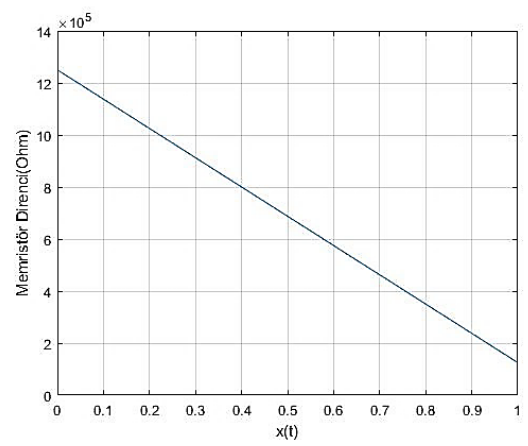
(a)



(b)

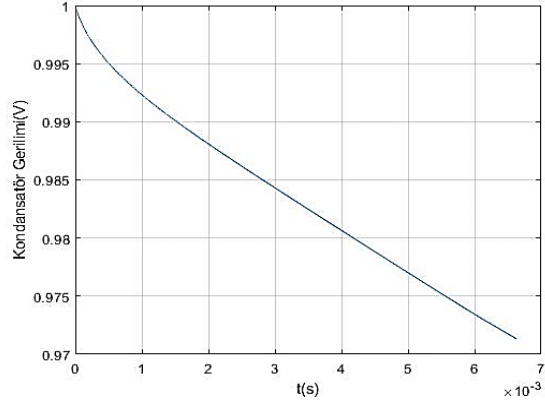


(c)

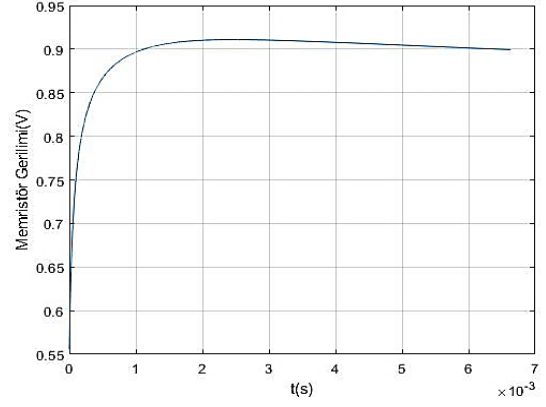


(d)

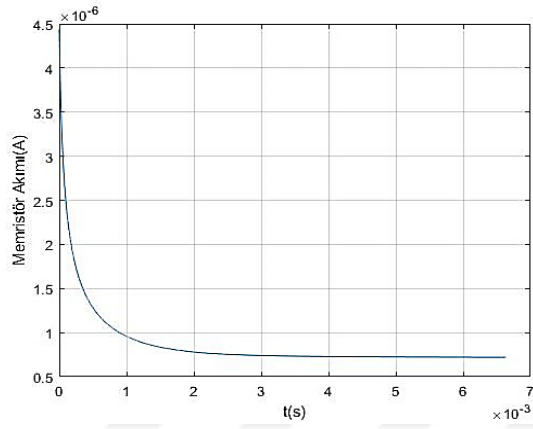
Şekil 5.5. Kaynaksız  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin  $x(t)$ 'ye göre değişim grafikleri



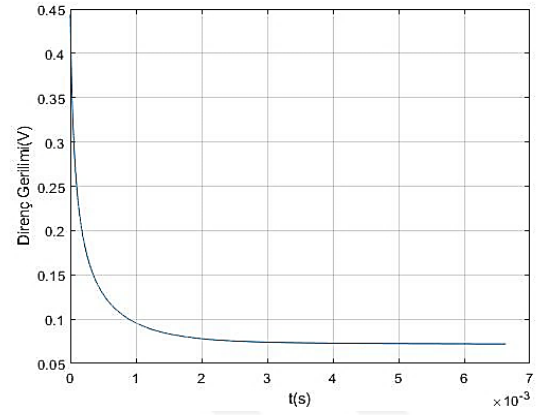
(a)



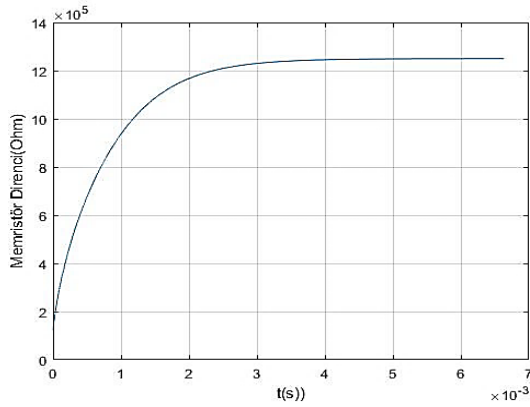
(b)



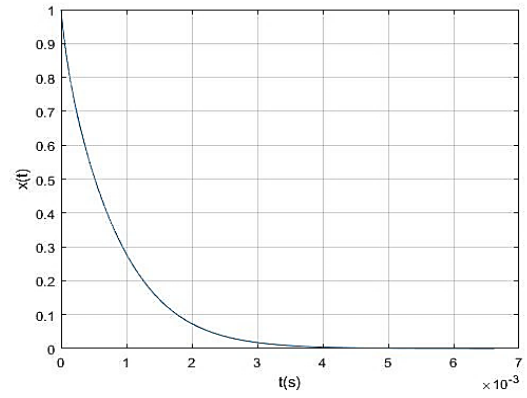
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.6. Kaynaksız  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin Çizelge 5.1'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnc gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri

## 5.2. DC Gerilim Kaynaklı Kondansatör-Memristör- $R_S$ Koruma Direnci Seri Devresinin Analizi

Bu bölümde sırasıyla, DC gerilim kaynaklı kondansatör, ileri yönlü memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C$ - $M_{İleri}$ - $R_S$ ) ve DC gerilim kaynaklı kondansatör, ters yönlü memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C$ - $M_{Ters}$ - $R_S$ ) seri bağlı devrelerinin analitik çözümleri verilmiştir.

### 5.2.1. DC Gerilim Kaynaklı Kondansatör-İleri Yönde Kutuplanmış Memristör- $R_S$ Koruma Direnci Seri Devresinin ( $C$ - $M_{İleri}$ - $R_S$ ) Analizi

Bu bölümde DC gerilim kaynaklı kondansatör, ileri yönlü kutuplanmış memristör ve  $R_S$  koruma direnci ( $C$ - $M_{İleri}$ - $R_S$ ) devresinin analitik çözümü verilmiştir. Memristörün ileri yönlü bağlı (kutuplanmış) olduğu Şekil 5.2.a'daki devrede Kirchoff'un (Kirşof) gerilim kanunu kullanılarak,

$$v_c(t) + v_{mem}(t) + v_{R_S}(t) = V_S \quad (5.88)$$

yazılabilir. Burada  $V_S$ ,  $v_c(t)$ ,  $v_{mem}(t)$  ve  $v_{R_S}(t)$  sırasıyla kaynak, kondansatör, memristör ve koruma direnci gerilimleridir. Elemanların uç denklemleri burada yerine yazılırsa,

$$v_c(t) + R(x) i_{mem}(t) + R_S i_{R_S}(t) = V_S \quad (5.89)$$

elde edilir. Burada  $i_{mem}(t)$  ve  $i_{R_S}(t)$  sırasıyla memristör ve koruma direnci akımlarıdır. Bu devrede kondansatör akımı  $i_c(t)$ 'dir.  $R(x)$ , memristör direncine ve  $R_S$  ise seri koruma direncine eşittir. Bu devre için Kirchoff'un (Kirşof) akımlar kanunu,

$$i_c(t) = i_{mem}(t) = i_{R_S}(t) \quad (5.90)$$

olarak yazılabilir. Denklem 5.89'da akımlar kondansatör akımı cinsinden yazılırsa,

$$v_c(t) + R(x) i_c(t) + R_S i_c(t) = V_S \quad (5.91)$$

$$v_c(t) + (R(x) + R_S) i_c(t) = V_S \quad (5.92)$$

bulunur. Burada  $i_c(t) = C dv_c(t)/dt$  kondansatör akımı yerine yazıldığında,

$$v_c(t) + C(R(x) + R_S) \frac{d v_c(t)}{dt} = V_S$$

(5.93)

diferansiyel denklemi elde edilmektedir. Bu eşitlik,

$$\frac{d v_c(t)}{dt} = \frac{V_S - v_c(t)}{C(R(x) + R_S)}$$

(5.94)

olarak düzenlenebilir. Bu denklem zincirleme türev kuralı kullanılarak,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{V_S - v_c(t)}{C(R(x) + R_S)}$$

(5.95)

olarak yazılabilir. Bölüm 2.4'te, Biolek Memristör modeline göre iyon sürüklenme hızının,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(t) f(x, i_{mem})$$

(5.96)

olduğu verilmişti. Burada kondansatör akımına eşit olan memristör akımı,

$$i_{mem}(t) = \frac{V_S - v_c(t)}{R(x) + R_S}$$

(5.97)

olarak verilir. Bu durumda Denklem 5.96,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{V_S - v_c(t)}{R(x) + R_S} f(x, i_{mem})$$

(5.98)

olarak düzenlenebilir. Bu ifade Denklem 5.95'te yerine yazılacak olursa,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \left( \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{V_S - v_c(t)}{R(x) + R_S} f(x, i_{mem}) \right) = \frac{V_S - v_c(t)}{C(R(x) + R_S)}$$

(5.99)

elde edilir. Sadeleşme sonucu,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} f(x, i_{mem}) = \frac{1}{C}$$

(5.100)

$$\frac{d v_c(t)}{dx} = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \frac{1}{f(x, i_{mem})}$$

(5.101)

elde edilir. Her iki tarafın integrali alınarak,

$$v_c(t) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \int \frac{dx}{f(x, i_{mem})} \quad (5.102)$$

bulunur. Burada, ikinci bölümde parçalı fonksiyon olarak verilen Biolek pencere fonksiyonu ( $f(x, i_{mem})$ ) yerine yazılacak olursa, kondansatör gerilimi; memristör akımı pozitif iken, yani  $i_{mem}(t) > 0$  iken,

$$v_c(t) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \int \frac{dx}{1-x^{2P}} \quad (5.103)$$

olacaktır. Matematiksel olarak elle çözümü zor olan Denklem 5.103'deki integral, Wolfram-Alpha integral alma programı ile hesaplanmıştır. Buradaki,

$$\int \frac{1}{1-x^{2P}} dx \quad (5.104)$$

integrali Wolfram-Alpha integral çözücüsü [56] ile çözüldüğünde,

$$\int \frac{1}{1-x^{2P}} dx = x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(t)^{2P} \right) + S3 \quad (5.105)$$

çözümü elde edilmiştir. Burada S3 integral sabitidir. Denklem 5.103 gerekli integrallerin çözümlenmesinin ardından,

$$v_c(t) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \left( x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(t)^{2P} \right) + S3 \right) \quad (5.106)$$

olur. Burada  $t=0$ 'daki  $v_c(0)$  ve  $x(0)$  başlangıç şartları kullanılırsa,

$$v_c(0) = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \left( x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(0)^{2P} \right) + S3 \right) \quad (5.107)$$

elde edilecektir. Buradan S3 integral sabiti,

$$\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} S3 = v_c(0) - \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \left( x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(0)^{2P} \right) \right) \quad (5.108)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Böylece  $i_{mem}(t) > 0$  için kondansatör gerilimi,

$$v_c(t) = K \left[ x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(t)^{2P} \right) - x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; x(0)^{2P} \right) \right] + v_c(0) \quad (5.109)$$

olur. Burada  $K = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}}$  dur.  $v_c(0)$   $t=0$  anında kondansatör geriliminin başlangıç şartıdır ve  $x(0)$  ise  $t=0$  anında memristör durum değişkeninin başlangıç şartıdır.  $v_c(t)$ , memristör akımı olarak Denklem 5.97'de verilen ve aynı zamanda kondansatör akımına eşit olan,

$$i_c(t) = \frac{V_S - v_c(t)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.110)$$

ifadesinde yerine yazılırsa,

$$i_c(t) = \frac{V_S - \left( K \left[ x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t))^{2P} \right) - x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0))^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.111)$$

olacaktır. Buradan memristör gerilimi,

$$v_{mem}(t) = R(x) i_c(t) \quad (5.112)$$

$$v_{mem}(t) = R(x) \frac{V_S - \left( K \left[ x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t))^{2P} \right) - x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0))^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.113)$$

olacaktır. Seri koruma direncinin gerilimi,

$$v_{R_S}(t) = R_S i_c(t) \quad (5.114)$$

$$v_{R_S}(t) = R_S \frac{V_S - \left( K \left[ x(t) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t))^{2P} \right) - x(0) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0))^{2P} \right) \right] + v_c(0)}{(R(x) + R_S)} \quad (5.115)$$

olarak bulunacaktır. Zamana (t) bağlı yazılamayan bu çözümler x(t)'ye bağlı bulunmuştur. Burada x(t) zamana bağlı olarak açık bir şekilde bilinmemektedir. Dolayısıyla, kapalı bir fonksiyon olarak bulunan  $v_c(t)$ ,  $v_{mem}(t)$ ,  $v_{R_S}(t)$ ,  $i_{mem}(t)$  denklemlerinin zamana bağlı olarak açık bir çözümü yoktur. Bundan dolayı kapalı fonksiyon olarak elde edilen denklemlerin ( $v_c(t)$ ,  $v_{mem}(t)$ ,  $v_{R_S}(t)$ ,  $i_{mem}(t)$ ) çözümü için gerekli olan t zamanı değerleri, Euler metodu kullanılarak oluşturulan bir algoritma ile hesaplanabilir. Burada,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_V R_{ON}}{D^2} i_{mem}(x) f(x, i_{mem}) \quad (5.116)$$

denklemini yeniden düzenlenirse, zamanın diferansiyeli,

$$dt = \frac{D^2}{\mu_V R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(t) f(x, i_{mem})} dx$$

(5.117)

olarak elde edilir. Bu denklemde her iki tarafın integrali alınırsa, zaman yani t değerleri x(t) cinsinden,

$$t = \int_{x(0)}^{x(t)} dt = \int_{x(0)}^{x(t)} \frac{D^2}{\mu_V R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(t) f(x, i_{mem})} dx$$

(5.118)



olacaktır. Euler metodu kullanılırsa,

$$t_1 = t_0 + \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i(x_0) f(x_0, i(x_0))} \Delta x_0$$

(5.119)

yazılarak ilk adımdaki t değeri olan  $t_1$  bulunabilir. Burada integralin alt sınırı sıfır olduğundan dolayı başlangıç zaman değeri  $t_0 = 0$  alınır;

$$t_1 = \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_0) f(x_0, i_{mem}(x_0))} \Delta x_0$$

(5.120)

olacaktır. Bu durumda  $t_2$ ,

$$t_2 = t_1 + \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_1) f(x_1, i_{mem}(x_1))} \Delta x_1$$

(5.121)

olacaktır. Böylece tüm  $x(t)$  değerlerine karşılık gelen t değerleri, yani j. adımdaki zaman değeri,

$$t_j = t_{j-1} + \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1}) f(x_{j-1}, i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x_j$$

(5.122)

algoritması ile hesaplanabilir. Burada  $\Delta x_j$ , x'in j. adım aralığıdır ve çözümde kolaylık sağlama açısından,

$$\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \dots = \Delta x_j = \dots$$

(5.123)

alınmıştır. Burada  $\Delta x$  aralığı n tane aralık kullanıldığı varsayıldığında,

$$\Delta x = \frac{x(t) - x(0)}{n}$$

(5.124)

olarak hesaplanabilir. Böylece,

$$t_j = t_{j-1} + \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1}) f(x_{j-1}, i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x$$

(5.125)

yazılabilir. Burada  $x$ 'in bir fonksiyonu olan  $t$  değerleri yani  $\Delta x$  kadar adım aralığı kullanarak  $x(t)$ 'ye karşılık gelen  $j$  adımında hesaplanan  $t$  anı, Riemann manasında integral yaklaşımı ile,

$$t = t_j \cong \sum_{j=0}^j \Delta x_j \left( \frac{K}{i_{\text{mem}}(x_j) f(x_j, i_{\text{mem}}(x_j))} \right)$$

(5.126)

integrali ile bulunabilir. Burada yarı-analitik çözümü yapılan kaynaklı C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresi MATLAB programında yazılan bir kod ile incelenmiştir.  $t$  değerleri MATLAB kodunda kümülatif sayısal integral alma komutu (cumtrapz) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir:

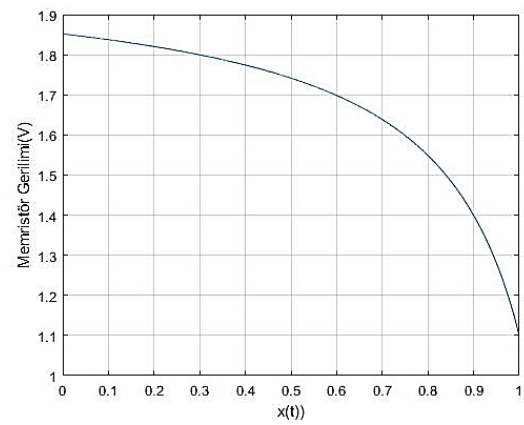
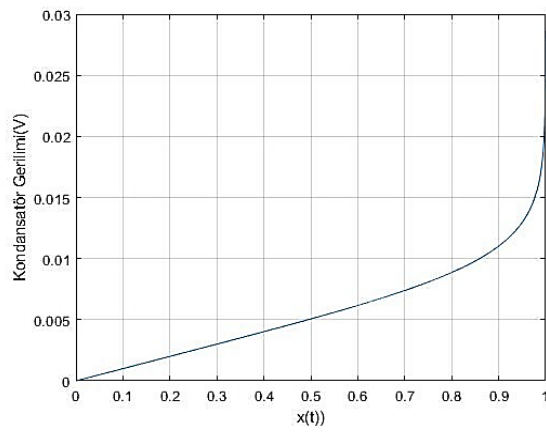
$$t = D^2 / (Mv * Ron) * \text{cumtrapz}(x, 1 ./ ((1 - x.^{(2*p)}). * imem)) \quad (5.127)$$

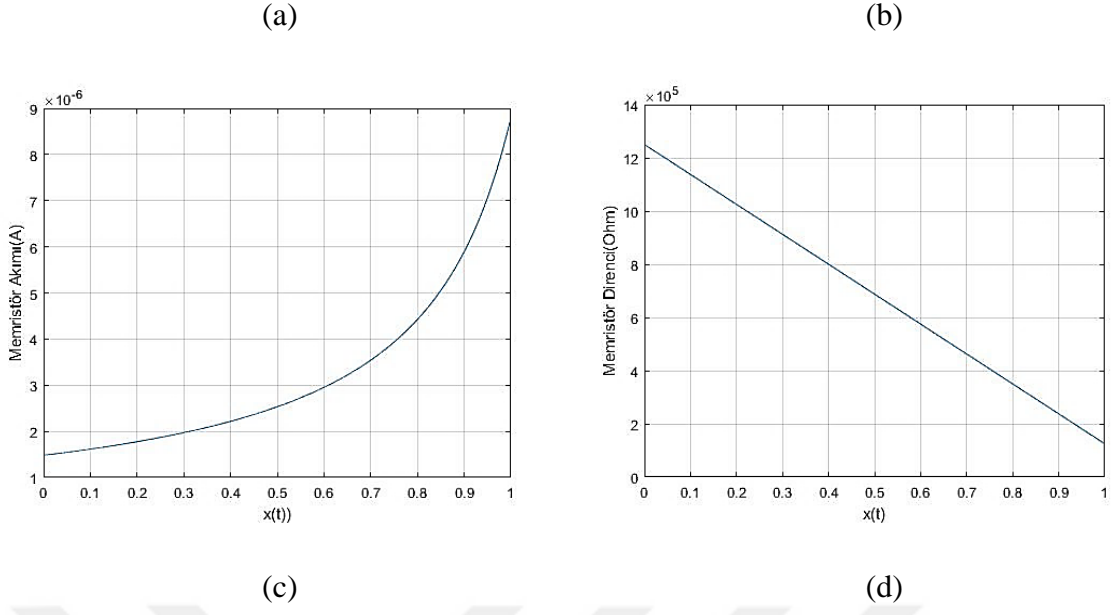
Bu devrenin analizi için MATLAB programında yazılan kod EK-3'de verilmiştir. Bu kod ile Çizelge 5.2'deki parametreler kullanarak devre değişkenlerinin grafikleri çizdirilmiştir.  $x(t)$ 'ye ve  $t$  zaman değerleri için ayrı ayrı çizdirilen grafikler Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'te sırasıyla görülebilir. İleri yönde kutuplanmış memristör üzerinden kondansatörün giderek artan bir eğimle şarj olduğu Şekil 5.8.a'da görülmektedir. İleri yönde kutuplanmış memristörün direncinin maksimum değerinden ( $R_{\text{off}}$ ) başlayarak zamana göre hemen hemen sabit bir eğimle azaldığı ve giderek minimum direnç değerine ( $R_{\text{on}}$ ) doğru asimptotik olarak yaklaştığı Şekil 5.8.e'de görülebilir. Memristör direnci azalırken memristör durum değişkeninin hemen hemen sabit bir eğimle arttığı ve ardından hemen hemen 1 değerinde sabitlendiği Şekil 5.8.f'de görülebilir. Memristör direnci hemen hemen sabitlendikten yani yaklaşık 1,1 ms geçtikten sonra devre kondansatör-direnç (R-C) devresi olarak davranmaya başlamıştır. Hipergeometrik fonksiyonun  $x=1$ 'de tanımsız olmasından dolayı adım sayısının daha fazla artırılması gerekmektedir. Memristörün direnci azalırken Şekil 5.8.c'de görüldüğü gibi kondansatörün şarj akımı artmıştır. Ama şarj akımı yaklaşık 1,1 ms sonra sabitlenmiştir. Şekil.5.8.a'da simülasyon esnasında kondansatör geriliminin 0,3 volt kadar arttığı görülmektedir. Bunun sebebi; memristör devresi için  $(R_S + R_{\text{on}})C$  değeri yaklaşık 0,225 saniye olması ve 1,3 ms civarındaki simülasyon zamanının bir tür zaman sabiti olarak alınabilecek olan bu değere göre oldukça düşük olmasıdır. Bu nedenle kondansatör gerilimi kondansatörün dolma anına kadar gözlenememektedir. Memristör direnci düşerken memristörün geriliminin de önce düşük bir eğimle sonra artan bir eğimle azaldığı ve 1,1 ms sonra düşük bir eğimle azaldığı Şekil 5.8.b'de görülebilir. Devredeki koruma direncinin gerilimi, Ohm Kanunundan dolayı, devre şarj akımı ile aynı karakteristiği göstermektedir. İleri yönde kutuplanmış memristör ve koruma direnci üzerinden kondansatör şarj olurken bu

şarjın karakteristiğinin bir R-C devresi gibi eksponansiyel olmadığı Şekil 5.8’de görülmektedir.

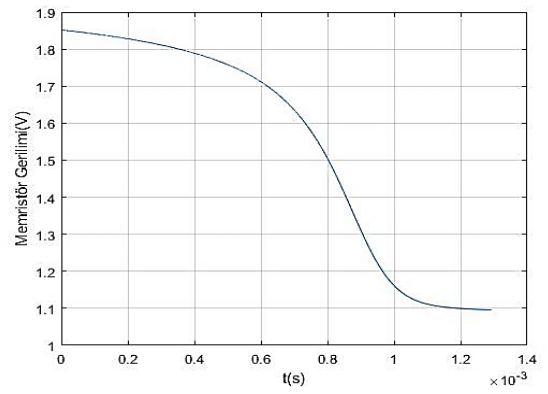
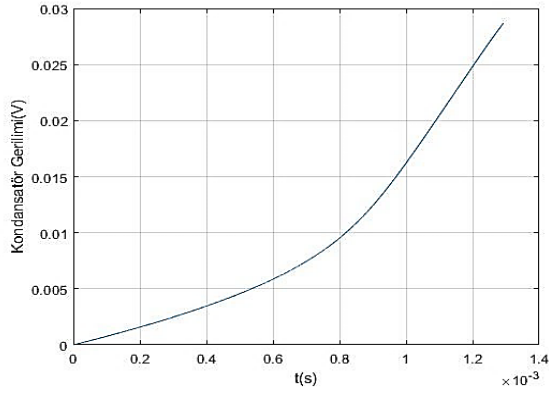
Çizelge 5.2. Kaynaklı C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin simülasyonda kullanılan parametreleri

Parametre	Değeri
$\mu_V$	$40e-14 \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{V}^{-1}$
$R_{On}$	125 k $\Omega$
$R_{Off}$	1250 k $\Omega$
D	10 nm
$R_S$	100 k $\Omega$
C	200 Nf
p	2
$V_C(0)$	0 V
$V_S$	2 V



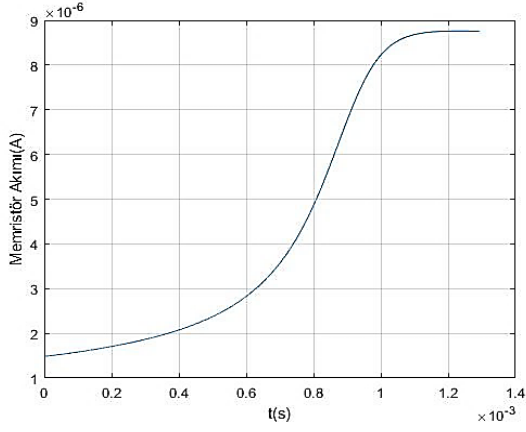


Şekil 5.7. DC gerilim kaynaklı C-Milleri- $R_S$  seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin  $x(t)$ 'ye göre değişim grafikleri

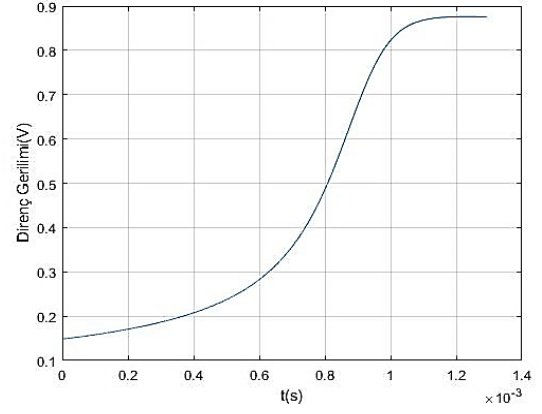


(a)

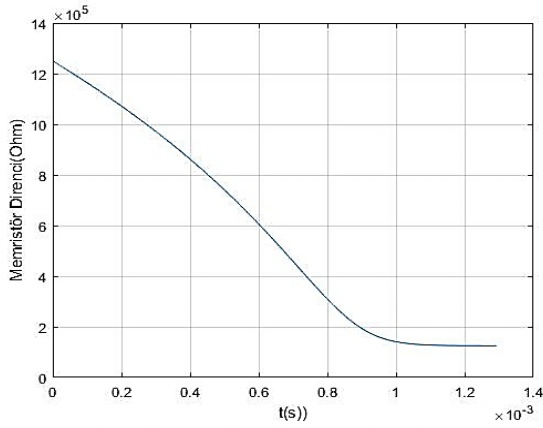
(b)



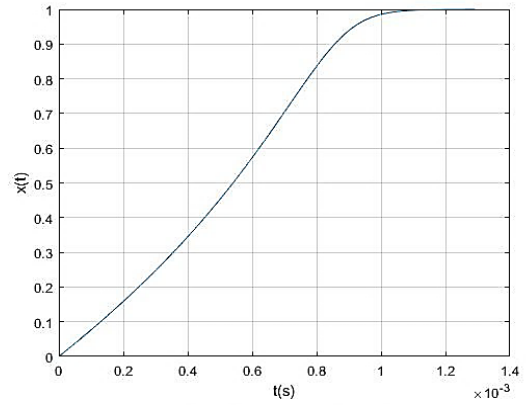
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.8. DC gerilim kaynaklı C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnç gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri

### 5.2.2. DC Gerilim Kaynaklı Kondansatör-Ters Yönde Kutuplanmış Memristör-R<sub>S</sub> Koruma Direnci Seri Devresinin (C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub>) Analizi

Bu bölümde DC gerilim kaynaklı kondansatör, ters yönlü kutuplanmış memristör ve R<sub>S</sub> koruma direnci (C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub>) seri devresinin analitik çözümü verilecektir. Memristörün ters yönlü bağlı (kutuplanmış) olduğu Şekil 5.2.b'deki devrede Kirchoff'un (Kirşof) gerilim kanunu kullanılarak,

$$v_C(t) + v_{mem}(t) + v_{R_S}(t) = V_S \quad (5.128)$$

yazılabilir. Burada  $v_c(t)$ ,  $v_{mem}(t)$  ve  $v_{R_s}(t)$  sırasıyla kondansatör, memristör ve koruma direnci gerilimleridir. Elemanların uç denklemleri burada yerine yazılırsa,

$$v_c(t) + R(x) i_{mem}(t) + R_S i_{R_s}(t) = V_S \quad (5.129)$$

elde edilir. Burada  $i_{mem}(t)$  ve  $i_{R_s}(t)$  sırasıyla memristör ve koruma direnci akımlarıdır. Bu devrede kondansatör akımı  $i_c(t)$ 'dir.  $R(x)$ , memristör direncine ve  $R_S$  ise seri koruma direncine eşittir. Bu devre için Kirchoff'un (Kirşof) akımlar kanunu,

$$i_c(t) = i_{mem}(t) = i_{R_s}(t) \quad (5.130)$$

olarak yazılabilir. Denklem 5.129'da akımlar kondansatör akımı cinsinden yazılırsa,

$$v_c(t) + R(x) i_c(t) + R_S i_c(t) = V_S \quad (5.131)$$

$$v_c(t) + (R(x) + R_S) i_c(t) = V_S \quad (5.132)$$

bulunur. Burada  $i_c(t) = C \, d v_c(t)/dt$  kondansatör akımı yerine yazıldığında,

$$v_c(t) + C(R(x) + R_S) \frac{d v_c(t)}{dt} = V_S \quad (5.133)$$

diferansiyel denklemi elde edilmektedir. Bu eşitlik,

$$\frac{d v_c(t)}{dt} = \frac{V_S - v_c(t)}{C(R(x) + R_S)} \quad (5.134)$$

olarak düzenlenebilir. Bu denklem zincirleme türev kuralı kullanılarak,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{V_S - v_c(t)}{C(R(x) + R_S)} \quad (5.135)$$

olarak yazılabilir. Bölüm 2.4'te, Biolek Memristör modeline göre iyon sürüklenme hızının,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(t) f(x, i_{mem}) \quad (5.136)$$

olduğu verilmişti. Bu devrede memristör ters yönde kutuplanmış olduğundan memristör akımı negatif işaretli olacaktır. Bu durumda,

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(t) f(x, -i_{mem}) \quad (5.137)$$

olarak yazılabilir. Burada memristör akımı,

$$i_{mem}(t) = \frac{(V_S - v_c(t))}{(R(x) + R_S)} \quad (5.138)$$

dir. Bu durumda Denklem 5.137,

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{(V_S - v_c(t))}{(R(x) + R_S)} f(x, -i_{mem}) \quad (5.139)$$

olarak düzenlenebilir. Bu ifade Denklem 5.135'te yerine yazılacak olursa,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \left( -\frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} \frac{(V_S - v_c(t))}{R(x) + R_S} f(x, -i_{mem}) \right) = \frac{(V_S - v_c(t))}{C(R(x) + R_S)} \quad (5.140)$$

elde edilir. Sadeleşme sonucu,

$$\frac{d v_c(t)}{dx} \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} f(x, -i_{mem}) = -\frac{1}{C} \quad (5.141)$$

$$\frac{d v_c(t)}{dx} = -\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \frac{1}{f(x, -i_{mem})} \quad (5.142)$$

olacaktır. Burada her iki tarafın integrali alınırsa,

$$v_c(t) = -\frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}} \int \frac{dx}{f(x, -i_{mem})} \quad (5.143)$$

bulunur. Biolek Pencere fonksiyonu, ikinci bölümde,

$$f(x, i_{mem}) = \begin{cases} 1 - (x - 1)^{2p} & , i_{mem}(t) < 0 \\ 1 - x^{2p} & , i_{mem}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (5.144)$$

olarak verilmiştir. Bu pencere fonksiyonunun, Şekil 5.2.b'deki devrede ters yönde kutuplanan memristörün, akım yönü dikkate alındığında,

$$f(x, -i_{\text{mem}}) = \begin{cases} 1 - (x - 1)^{2p} & , i_{\text{mem}}(t) > 0 \\ 1 - x^{2p} & , i_{\text{mem}}(t) \leq 0 \end{cases}$$

(5.145)

olduğu düşünülebilir. Bu durumda Denklem 5.143  $i_{\text{mem}}(t) > 0$  iken,

$$v_c(t) = - \frac{D^2}{C \mu_v R_{\text{ON}}} \int \frac{dx}{1 - (x-1)^{2p}}$$

(5.146)

olacaktır. Matematiksel olarak elle çözümü zor olan Denklem 5.146'daki integral, Wolfram-Alpha integral alma programı ile hesaplanmıştır. Buradaki,

$$\int \frac{1}{1 - (x-1)^{2p}} dx$$

(5.147)

integrali Wolfram-Alpha integral çözücüsü [56] ile çözüldüğünde,

$$\int \frac{1}{1 - (x-1)^{2p}} dx = (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2p}; 1 + \frac{1}{2p}; (x(t) - 1)^{2p} \right) + S4$$

(5.148)

çözümü elde edilmiştir. Burada S4 integral sabitidir. Böylece Denklem 5.146 gerekli integralin çözülmesinin ardından,

$$v_c(t) = - \frac{D^2}{C \mu_v R_{\text{ON}}} \left( (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2p}; 1 + \frac{1}{2p}; (x(t) - 1)^{2p} \right) + S4 \right)$$

(5.149)

olur. Burada  $t=0$ 'daki  $v_c(0)$  ve  $x(0)$  başlangıç şartları kullanılırsa,

$$v_c(0) = - \frac{D^2}{C \mu_v R_{\text{ON}}} \left( (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2p}; 1 + \frac{1}{2p}; (x(0) - 1)^{2p} \right) + S4 \right)$$

(5.150)

elde edilecektir. Buradan S4 integral sabiti,

$$- \frac{D^2}{C \mu_v R_{\text{ON}}} S4 = v_c(0) + \frac{D^2}{C \mu_v R_{\text{ON}}} \left( (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2p}; 1 + \frac{1}{2p}; (x(0) - 1)^{2p} \right) \right)$$

(5.151)



denklemleri ile hesaplanabilir. Böylece  $i_{\text{mem}}(t) > 0$  için kondansatör gerilimi,

$$v_c(t) = -K \left[ (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) - (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right] + v_c(0) \quad (5.152)$$

olur. Burada  $K = \frac{D^2}{C \mu_v R_{ON}}$  dur.  $v_c(0)$   $t=0$  anında kondansatör geriliminin başlangıç şartıdır ve  $x(0)$  ise  $t=0$  anında memristör durum değişkeninin başlangıç şartıdır. Denklem 5.152'deki eşitlik,

$$i_{\text{mem}}(t) = \frac{V_S - v_c(t)}{R(x) + R_S} \quad (5.153)$$

ifadesinde  $v_c(t)$  yerine yazılırsa,

$$i_{\text{mem}}(t) = \frac{V_S - \left( -K \left[ (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) - (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right] + v_c(0) \right)}{R(x) + R_S} \quad (5.154)$$

olacaktır. Buradan memristör gerilimi,

$$v_{\text{mem}}(t) = R(x) i_{\text{mem}}(t) \quad (5.155)$$

$$v_{\text{mem}}(t) = R(x) \frac{V_S - \left( -K \left[ (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) - (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right] + v_c(0) \right)}{R(x) + R_S} \quad (5.156)$$

olacaktır. Seri koruma direncinin gerilimi,

$$v_{R_S}(t) = R_S i_c(t) \quad (5.157)$$

$$v_{R_S}(t) = R_S \frac{V_S - \left( -K \left[ (x(t) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(t) - 1)^{2P} \right) - (x(0) - 1) {}_2F_1 \left( 1, \frac{1}{2P}; 1 + \frac{1}{2P}; (x(0) - 1)^{2P} \right) \right] + v_c(0) \right)}{R(x) + R_S} \quad (5.158)$$

olarak bulunacaktır. Zamana  $(t)$  bağlı yazılamayan bu çözümler  $x(t)$ 'ye bağlı bulunmuştur. Burada  $x(t)$  zamana bağlı olarak açık bir şekilde bilinmemektedir. Dolayısıyla, kapalı bir fonksiyon olarak bulunan  $v_c(t)$ ,  $v_{\text{mem}}(t)$ ,  $v_{R_S}(t)$  ve  $i_{\text{mem}}(t)$  denklemlerinin zamana bağlı olarak açık bir çözümü yoktur. Bundan dolayı kapalı fonksiyon olarak elde edilen

denklemlerin ( $v_c(t)$ ,  $v_{mem}(t)$ ,  $v_{R_S}(t)$ ,  $i_{mem}(t)$ ) çözümü için gerekli olan  $t$  zamanı değerleri, Euler metodu kullanılarak oluşturulan bir algoritma ile hesaplanabilir. Burada,

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} i_{mem}(x) f(x, -i_{mem}) \quad (5.159)$$

denklemini yeniden düzenlenirse, zamanın diferansiyeli,

$$dt = -\frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(t) f(x, -i_{mem})} dx \quad (5.160)$$

olarak elde edilir. Bu denklemde her iki tarafın integrali alınırsa, zaman yani  $t$  değerleri  $x(t)$  cinsinden,

$$t = \int_{t=0}^{t=t} dt = -\int_{x(0)}^{x(t)} \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(t) f(x, -i_{mem})} dx \quad (5.161)$$

olacaktır. Euler metodu kullanılırsa,

$$t_1 = t_0 - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i(x_0) f(x_0, i(x_0))} \Delta x_0 \quad (5.162)$$

yazılarak ilk adımdaki  $t$  değeri olan  $t_1$  bulunabilir. Burada integralin alt sınırı sıfır olduğundan dolayı başlangıç zaman değeri  $t_0 = 0$  alınırsa;

$$t_1 = -\frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_0) f(x_0, -i_{mem}(x_0))} \Delta x_0 \quad (5.163)$$

olacaktır. Bu durumda  $t_2$ ,

$$t_2 = t_1 - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_1) f(x_1, -i_{mem}(x_1))} \Delta x_1 \quad (5.164)$$

olacaktır. Böylece tüm  $x(t)$  değerlerine karşılık gelen  $t$  değerleri yani  $j$ . adımdaki zaman değeri,

$$t_j = t_{j-1} - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1}) f(x_{j-1}, -i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x_j \quad (5.165)$$

algoritması ile hesaplanabilir. Burada  $\Delta x_j$ ,  $x$ 'in  $j$ . adım aralığıdır ve çözümde kolaylık sağlama açısından,

$$\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = \dots = \Delta x_j = \dots$$

$$(5.167)$$

alınmıştır. Burada  $\Delta x$  aralığı  $n$  tane aralık kullanıldığı varsayıldığında,

$$\Delta x = \frac{x(t) - x(0)}{n}$$

$$(5.168)$$

olarak hesaplanabilir. Böylece,

$$t_j = t_{j-1} - \frac{D^2}{\mu_v R_{ON}} \frac{1}{i_{mem}(x_{j-1}) f(x_{j-1}, -i_{mem}(x_{j-1}))} \Delta x$$

$$(5.169)$$

yazılabilir. Burada  $x$ 'in bir fonksiyonu olan  $t$  değerleri yani  $\Delta x$  kadar adım aralığı kullanarak  $x(t)$ 'ye karşılık gelen  $j$  adımında hesaplanan  $t$  anı, Riemann manasında integral yaklaşımı ile,

$$t = t_j \cong - \sum_{j=0}^j \Delta x_j \left( \frac{K}{i_{mem}(x_j) f(x_j, -i_{mem}(x_j))} \right)$$

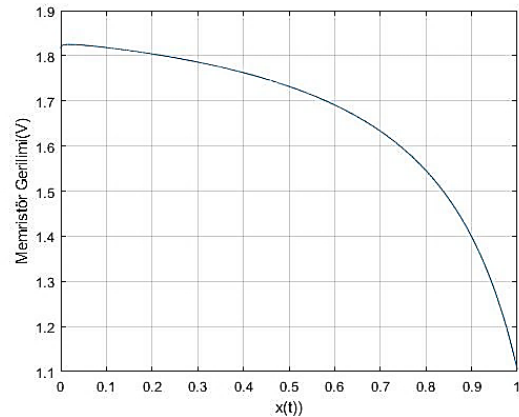
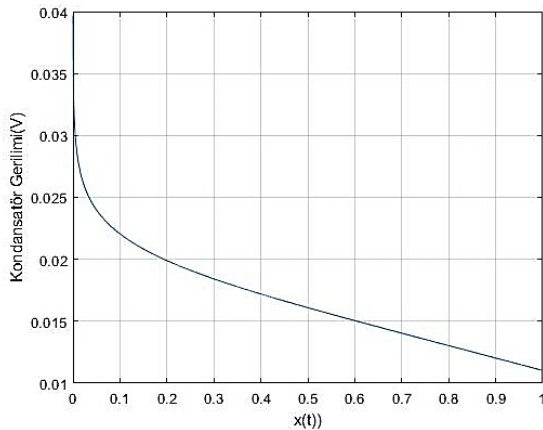
$$(5.170)$$

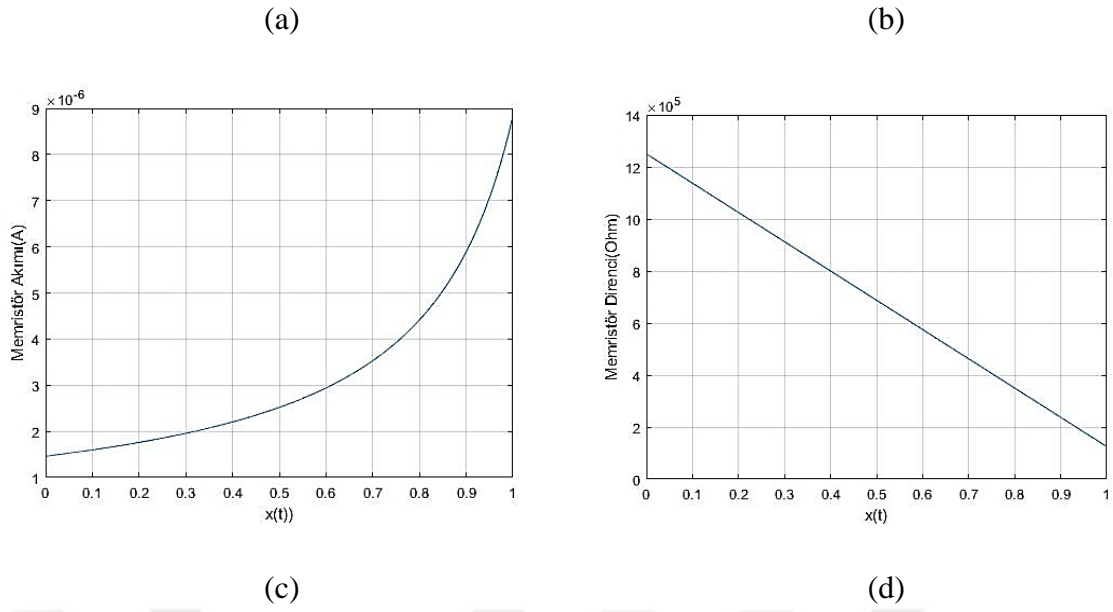
integrali ile bulunabilir. Burada yarı-analitik çözümü yapılan  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresi MATLAB programında yazılan bir kod ile incelenmiştir.  $t$  değerleri MATLAB kodunda kümülatif sayısal integral alma komutu (cumtrapz) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$t = -D^2 / (Mv * Ron) * cumtrapz(x, 1 ./ ((1 - (x - 1).^ (2 * p)). * imem)) \quad (5.171)$$

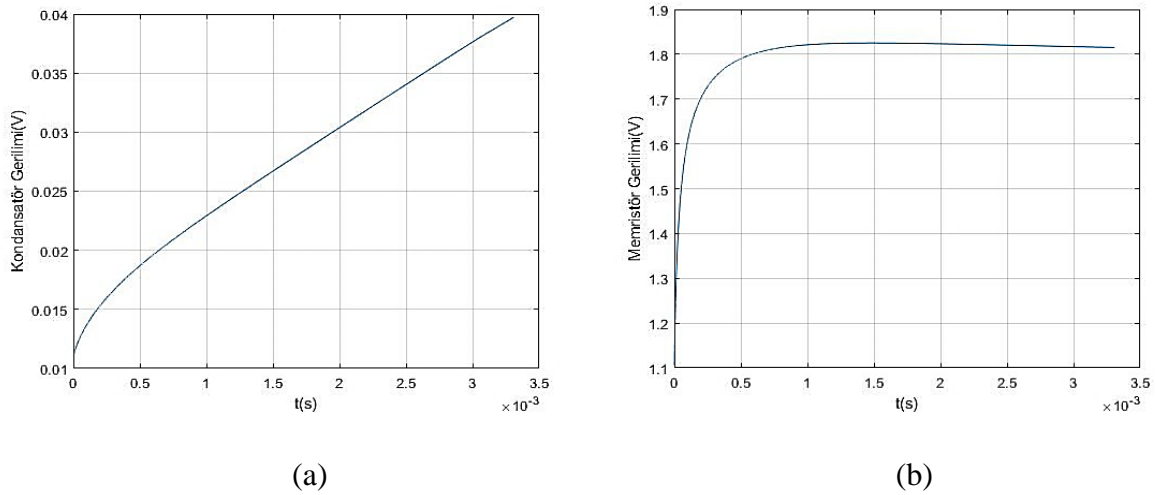
Bu devrenin analizi için MATLAB programında yazılan kod EK-4'te verilmiştir. Bu kod ile Çizelge 5.2'deki parametreler kullanarak devre değişkenlerinin grafikleri çizdirilmiştir.  $x(t)$ 'ye ve  $t$  zaman değerleri için ayrı ayrı çizdirilen grafikler Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da sırasıyla görülebilir. Ters yönde kutuplanmış memristör üzerinden kondansatörün hemen hemen sabit bir eğimle şarj olduğu Şekil 5.10.a'da görülmektedir. Ters yönde kutuplanmış memristörün direncinin minimum direnç değerinden ( $R_{on}$ ) başlayarak, zamana göre hızlı bir şekilde değerinin arttığı ve 2 ms'den sonra asimptotik olarak  $R_{off}$  değerine yaklaştığı Şekil 5.10.e'de görülebilir. Memristör direnci artarken memristör durum değişkeninin memristörün direncinin hızlıca artması ile ters orantılı olarak hızlıca azaldığı ve ardından hemen hemen 0 değerinde sabitlendiği Şekil 5.10.f'de görülebilir. Memristör direnci hemen hemen sabitlendikten, yani yaklaşık 2 ms geçtikten sonra devre kondansatör-direnç ( $R-C$ ) devresi

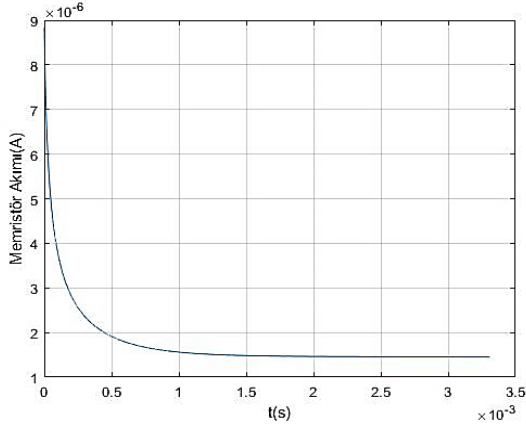
olarak davranmaya başlamıştır. Hipergeometrik fonksiyonun  $x=1$ 'de tanımsız olmasından dolayı adım sayısının daha fazla artırılması gerekmektedir. Memristörün direnci artarken Şekil 5.10.c'de görüldüğü gibi kondansatörün şarj akımı azalmıştır. Ama şarj akımı yaklaşık 2 ms sonra sabitlenmiştir. Bunun sebebi; memristör devresi için  $(R_S + R_{on})C$  değeri yaklaşık 0,225 saniye olması ve 1,3 ms civarındaki simülasyon zamanının bir tür zaman sabiti olarak alınabilecek olan bu değere göre oldukça düşük olmasıdır. Bu nedenle kondansatör gerilimi kondansatörün dolma anına kadar gözlenmemektedir. Memristör direnci artarken memristörün geriliminin de önce yüksek bir eğimle arttığı, sonra memristör geriliminde hemen hemen 0,02 Volt'luk bir düşüş seyredildiği Şekil 5.10.b'de görülebilir. Gerilimdeki bu dalgalanma yedinci bölümde, simülasyon sonuçlar ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak incelenecektir. Devredeki koruma direncinin gerilimi, Ohm Kanunundan dolayı, devre şarj akımı ile aynı karakteristiği göstermektedir. Ters yönde kutuplanmış memristör ve koruma direnci üzerinden, kondansatör şarj olurken bu şarjın karakteristiğinin bir R-C devresi gibi eksponansiyel olmadığı Şekil 5.10'da görülmektedir.



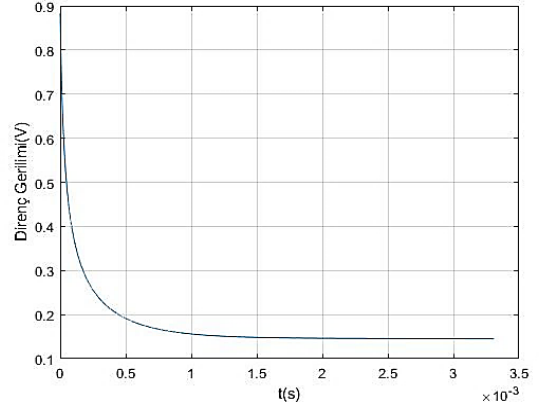


Şekil 5.9: DC gerilim kaynaklı C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı ve d) memristör direncinin  $x(t)$ 'ye göre değişim grafikleri

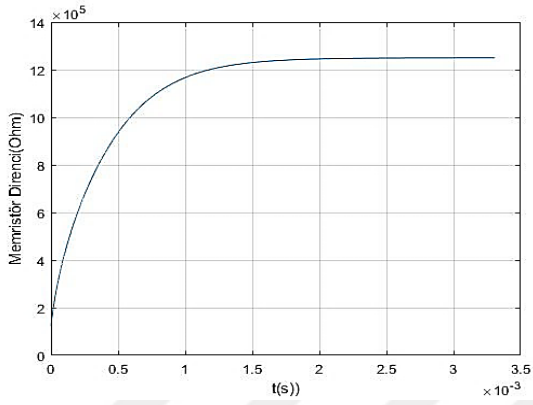




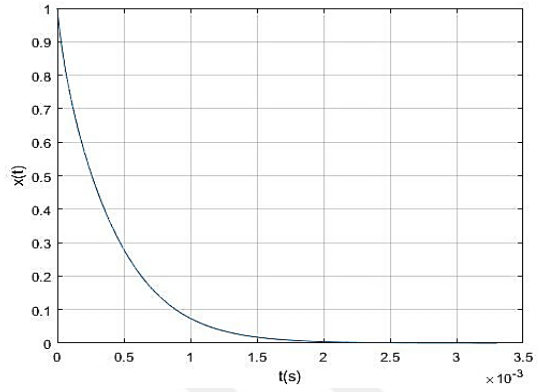
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.10. DC gerilim kaynaklı  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin Çizelge 5.2'deki parametreler kullanılarak MATLAB programında çizdirilen a) kondansatör gerilimi, b) memristör gerilimi, c) memristör akımı, d) direnç gerilimi, e) memristör direnci ve f) memristör durum değişkeninin zamana göre değişim grafikleri

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölüm tez boyunca incelenen devrelerin laboratuvar ortamında kaydedilen ölçümlerini içermektedir. Deneyler Karbon ve Tungsten tabanlı iki memristör için ayrı ayrı yapılmıştır. Bu bölümde osiloskoptan alınan deney sonuçlarının ekran görüntüleri verilmiştir. Görülen ölçümlerin osiloskopta kaydedilen Excell datalarının, MATLAB programında işlenmesiyle elde edilen bazı deneysel sonuçlar bir sonraki bölümde verilecektir. Deneylerde izlenen yol takip eden paragraflarda açıklanacaktır.

Knowm firması, ürettiği memristörlerin korunması amacıyla 50-100 k $\Omega$  aralığında bir direncin memristöre seri olarak bağlanmasını tavsiye etmektedir [33]. Koruma dirençleri, bu

çalışmada da deneyde kullanılan her bir memristörün bozulmasını engellemek amacıyla kullanılmıştır. Chua yüke göre değeri sabit olan memristörün 1971’de direnç olarak davrandığını göstermiştir [1]. Memristör ve direncin seri olarak bağlanması durumunda ikisinin eşdeğerinin yine bir memristör olarak davranacağı memristör denklemlerinden görülebilir. Bu çalışmada yapılan deneylerde kondansatör-memristör-direnç devresinde kondansatörün şarjı ve deşarjı incelenecektir. Bir sonraki bölümde seri bağlı direnç gerilimi daha sonra direnç değerine bölünerek devre akımı hesaplanacaktır. Deneylerde kullanılan direncin değeri 100 kΩ seçilmiştir. Biolek ve HP modellerinde memristör ileri yönde kutuplandığında içinden akım geçerken direnci azalmakta ve ters yönde kutuplandığında içinden akım geçerken direnci artmaktadır. Bu nedenle yapılacak tüm deneyler bu iki akım yönü (ileri ve ters yön) için yapılacaktır. Deneylerde her iki memristör ve seri bağlı direnç üzerinden kondansatörün deşarj ve şarj edilmesi gerekmektedir. Şarj işlemi bir doğru gerilim kaynağı kullanılarak ve bir süre sonra devreden çıkarılarak yapılabilirdi ama bu çalışmada iki farklı gerilim kaynağı, Kare dalga ve Saat sinyali kaynağı kullanılarak, bu işlemler yapılmıştır.

Öncelikle, kaynak olarak niçin saat sinyalinin kullanıldığı açıklanacaktır. Bir saat sinyali denklemi,

$$V(t) = \begin{cases} V_p & , \quad 0 < t < T/2 \\ 0 & , \quad T/2 < t < T \end{cases}$$

(6.1)

olarak verilir. Burada  $V_p$  saat sinyalinin tepe değeri ve  $T$  saat sinyali periyodudur. Bilindiği gibi periyodiklik şartı gereği,

$$V(t) = V(t + T) \tag{6.2}$$

dir. Burada kaynak frekansı değeri  $f_s = 1/T$  olarak hesaplanır.

Saat sinyalinin değeri periyodun ilk yarısında pozitif  $V_p$  gerilimine ve periyodun ikinci yarısında sifıra eşittir. Yani düşük frekanslı saat sinyali kullanılarak, sinyalin ilk yarı periyodunda kondansatör, direnç ve memristör üzerinden şarj edilebilir ve ikinci yarı periyodunda deşarj edilebilir. Yani doluluk boşluk oranı %50 olan bir saat sinyali bize aynı deneyde hem dolma hem de boşalma analizini yapmamıza izin verecektir. Saat sinyali kaynağında gerilimin yönü değişmez. Kaynak gerilimi pozitif iken; akım, memristörün pozitif kutbundan negatif kutbuna doğru akıyorsa; kaynak gerilimi sıfır iken, yani kondansatör

boşalırken, akım memristörün negatif kutbundan pozitif kutbuna doğru akacaktır. Bundan dolayı, bu devrenin her iki yönde dolma ve boşalmanın incelenebilmesi için memristörün uçlarının değiştirilip deneylerin tekrarlanması gerekmektedir.

Deneyde kaynak olarak kare dalga kullanılmasının sebebi ise şöyle açıklanabilir. Bir kare dalga sinyalinin denklemi,

$$V(t) = \begin{cases} V_p & , \quad 0 < t < T/2 \\ -V_p & , \quad T/2 < t < T \end{cases}$$

(6.3)

olarak verilir. Burada  $V_p$  kare dalga sinyalinin tepe değeri ve  $T$  kare dalga sinyali periyodudur. Periyodiklik şartı gereği,

$$V(t) = V(t + T)$$

(6.4)

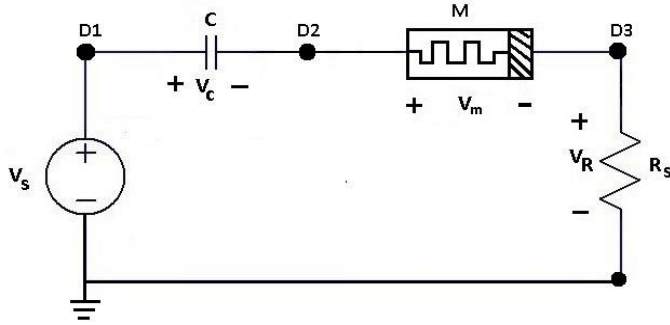
dir. Burada kaynak frekansı değeri  $f_s = 1/T$  olarak hesaplanır.

Kare dalga sinyalinin değeri periyodun ilk yarısında (pozitif alternansında) pozitif  $V_p$  gerilimine ve periyodun ikinci yarısında (negatif alternansında)  $-V_p$  gerilimine eşittir. Yani düşük frekanslı kare dalga sinyali kullanılarak, sinyalin ilk yarı periyodunda kondansatör, direnç ve memristör üzerinden pozitif gerilim ile şarj edilebilir ve ikinci yarı periyodunda negatif gerilim ile şarj edilebilir. Kare dalga sinyalinde gerilimin yönü değiştiğinden, doluluk boşluk oranı %50 olan bir kare dalga sinyali bize aynı deneyde, memristör hem ileri yönde hem de ters yönde bağlı iken, kondansatörün dolma (şarj) deneyini yapmamıza izin verecektir. Bu devre boşalma deneyi yapılması için kullanılamaz. Kare dalga ile yapılan deneyler, saat sinyali ile yapılan şarj deneylerinin sonuçlarının kontrol edilmesi için (sağlama amacıyla) yapılmıştır. Kare dalga ile yapılacak bu deneylerde, sinyal geriliminin yönü değiştiğinden memristörün uçlarının değiştirilmesine gerek yoktur.

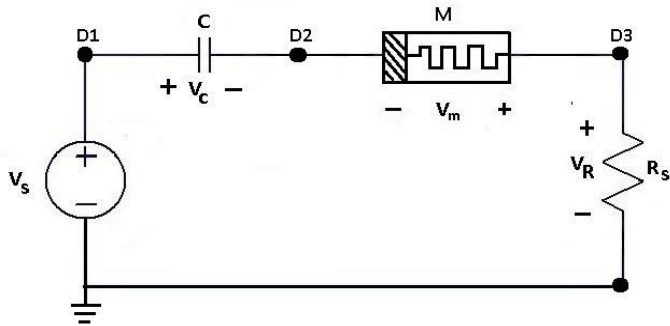
Beşinci bölümde analizi yapılan devreler, bu bölümde belirtilen kaynaklar kullanılarak (kare dalga ve saat sinyali kaynağı), Karbon ve Tungsten tabanlı olmak üzere iki memristör türü için deneysel olarak incelenecektir. Deneylerde kullanılan osiloskop cihazında iki prob mevcuttur ve bu problemler ortak toprağa sahiptir. Bu durum devrede aynı anda ikiden fazla noktada ölçüm yapılabilmesini imkânsız kılmaktadır. Deneylerde memristör, kondansatör, seri direnç elemanlarının gerilimleri ve kaynak gerilimi olmak üzere dört gerilim ölçümü gerekmektedir. Şekil.6.1' de deney devrelerinin şemaları verilmiştir. Bu devreler sırayla board



üzerine kurularak gereken ölçümler alınmıştır. Board üzerine kurulan deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil.6.2' de verilmiştir.

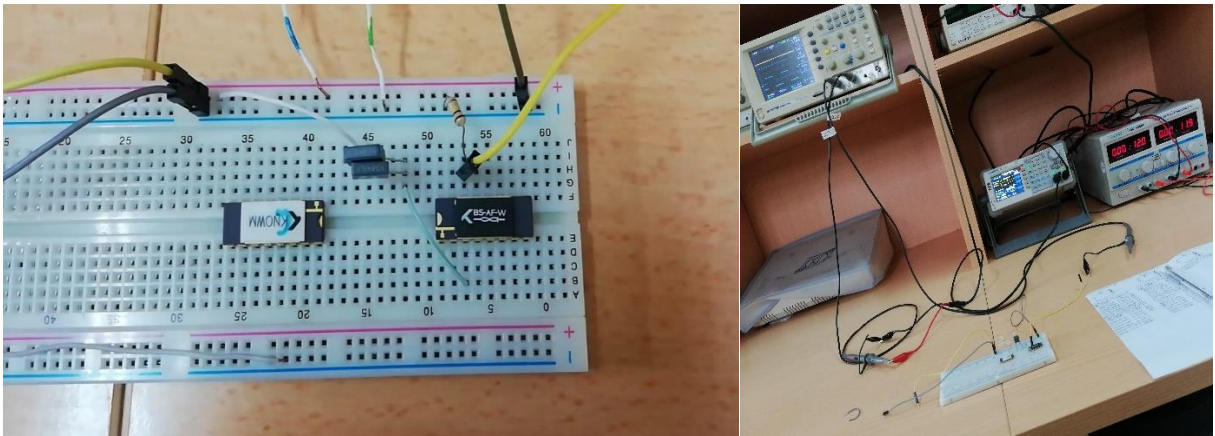


(a)



(b)

Şekil.6.1. Laboratuvar ortamında incelenmek üzere kurulan a) C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> ve b) C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devrelerinin şemaları



Şekil.6.2. Laboratuvar ortamında board üzerine kurulan deney düzeneği (Deneyler, her iki memristör için ayrı ayrı yapılmıştır.)

Deneylerde kullanılan devre elemanlarının değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Deneyde kullanılan kaynağın tipi ve kaynak frekansı değerleri deneyde kaydedilen grafiklerin

altında yapılan açıklamalarda verilmiştir. Her bir polarite için ölçülen Karbon ve Tungsten memristörlerin minimum ve maksimum direnç değerleri Çizelge 6.2’de bulunabilir. Minimum ve maksimum değerlerin birbirine yakın çıkması bu memristörlerin bipolar davranış sergilediğini göstermektedir.

Çizelge 6.1. Deney parametreleri ve değerleri.

Parametre	Değeri
C	200 nF
$R_S$	99.8 k $\Omega$

Çizelge 6.2. Memristör tipleri ve ölçülen direnç değerleri.

Memristör Parametresi\Memristör Tipi	Tungsten Memristör	Karbon Memristör
$R_{ON}$	321 k $\Omega$	123,9 k $\Omega$
$R_{OFF}$	333 k $\Omega$	132,7 k $\Omega$

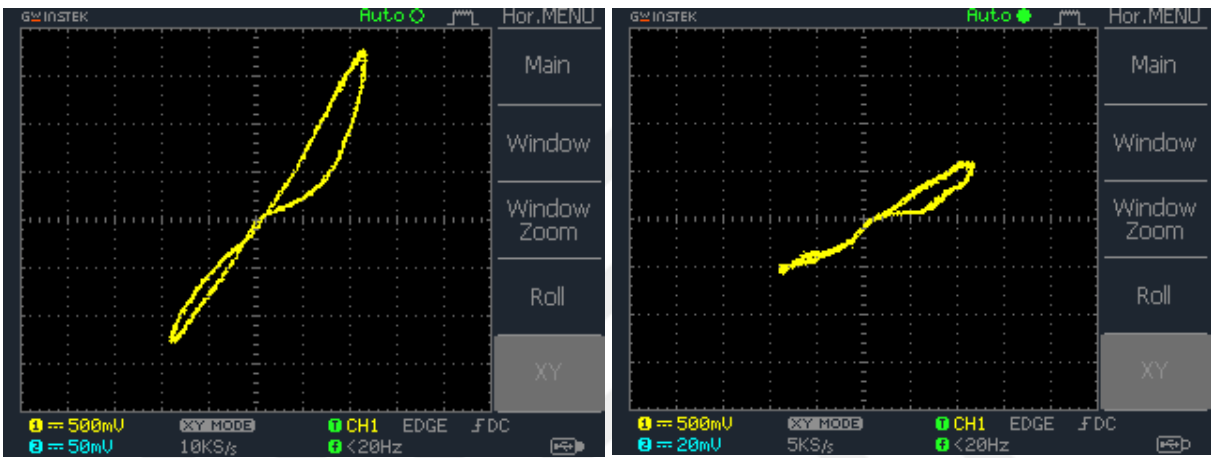
Prob sayısının azlığı sebebiyle ölçümler sırayla yapılmıştır. Ölçme sayısını sınırlandırmak için Şekil 6.1’de görüldüğü üzere D1, D2, D3 olarak üç düğüm belirlenmiştir. Bu düğüm gerilimleri sırasıyla  $V_{D1}$ ,  $V_{D2}$ ,  $V_{D3}$  olarak isimlendirilmiştir. Burada, ölçülen  $V_{D3}$  düğüm gerilimi direnç gerilimine eşittir. Bir sonraki bölümde bu gerilim ve Ohm kanunu kullanılarak, devre akımı hesaplanacaktır. Ölçülen  $V_{D2}$  düğüm gerilimi, memristör ve direnç gerilimleri toplamına eşittir.  $V_{D1}$  düğüm gerilimi ise kaynak gerilimine eşittir. Yapılan ölçümler kullanılarak,  $V_{D2} - V_{D3}$  işlemi ile memristör gerilimi ve  $V_{D1} - V_{D2}$  işlemi ile kondansatör gerilimi hesaplanabilir.

Burada her düğüm gerilimi ayrı ayrı ölçülmüştür. Ölçümler esnasında, direncin gerilimi referans olması açısından sürekli ölçülmüştür. Bu bağlamda, osiloskop problemlerinden biri, direnç üzerinde sabit bırakılırken ( $V_{D3}$ ); diğer prob sırasıyla  $V_{D1}$  ve  $V_{D2}$  düğüm gerilimlerini ölçmek için kullanılmıştır.

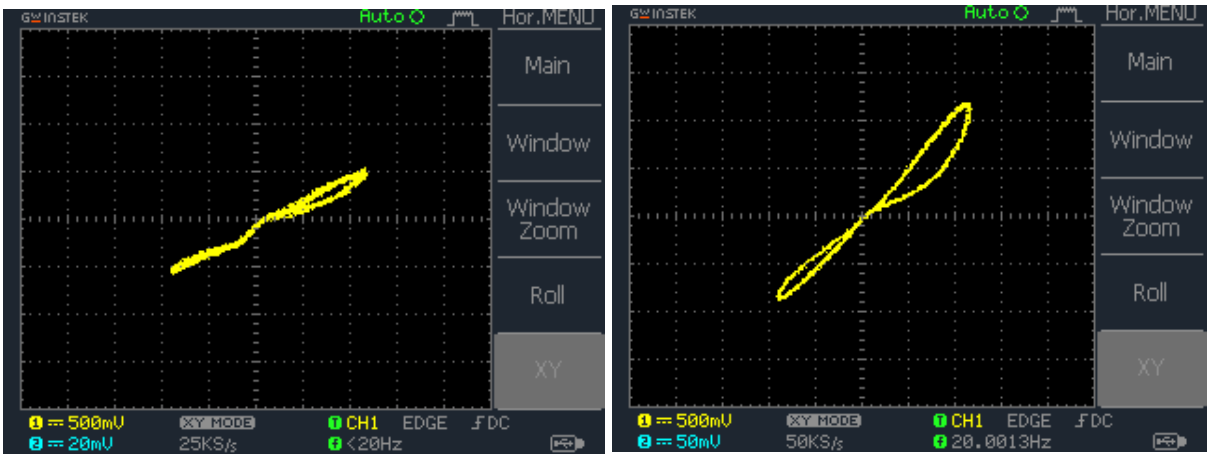
### 6.1.Karbon Tabanlı Memristör ile Yapılan Deneylerin Sonuçları

Bu bölümde Known firması tarafından üretilen Karbon tabanlı memristör kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları yer almaktadır. Karbon tabanlı memristörün akımını ölçmek amacıyla kullanılan koruma direnci ile yapılan deneyler bu memristörün stokastik bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu stokastik davranış, memristörün aynı kaynak frekansında birbirinden farklı histeresis eğrilere sahip olmasıyla da tespit edilmiştir. Sinüsoidal gerilimle

beslenen Karbon tabanlı memristörün 5 Hz ve 20 Hz frekanslarında elde edilen iki farklı histeresis eğrisi sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te verilmiştir. Bu durum memristörün akımının periyodik değil stokastik bir davranış sergilemesi ile açıklanabilir. Frekans arttıkça memristörün akımının daha periyodik bir davranış gösterdiği yani stokastik davranışın ortadan kalktığı görülmüştür. Bu durum memristörün stokastik davranışını belirleyen mekanizmanın (rastgele yürüyüşün ya da rassal kanal oluşmasının) artan frekansla etkisinin azaldığını ya da ortadan kaybolduğunu göstermektedir. Karbon tabanlı bu memristör düşük frekanslarda stokastik bir memristör modeli ile modellenmelidir. Biolek memristör modeli bu stokastik davranışı modellemekte yetersizdir.



Şekil 6.3. Sinüsoidal gerilimle beslenen Karbon tabanlı memristörün 5 Hz kaynak frekansında elde edilen iki farklı histeresis eğrisi



Şekil 6.4. Sinüsoidal gerilimle beslenen Karbon tabanlı memristörün 20 Hz kaynak frekansında elde edilen iki farklı histeresis eğrisi

Karbon memristör dolma ve boşalmasını incelemek için kurulan devreler,

- Saat sinyali kaynaklı C–M<sub>ileri</sub>–R<sub>S</sub> seri devresi
- Saat sinyali kaynaklı C–M<sub>Ters</sub>–R<sub>S</sub> seri devresi
- Kare dalga sinyali kaynaklı C–M<sub>ileri</sub>–R<sub>S</sub> seri devresi
- Kare dalga sinyali kaynaklı C–M<sub>Ters</sub>–R<sub>S</sub> seri devresi

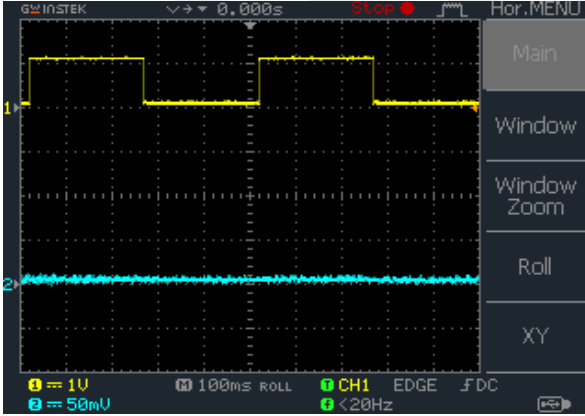
şeklinde isimlendirilmiştir. Farklı kaynak türü ve genlik değerleri ile deney yaparken izlenen yolların detayları şu şekilde açıklanabilir:

- ✓ Saat sinyali genliği  $V_p = 1\text{ V}$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH2) sürekli R<sub>S</sub> direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH1) önce kaynak gerilimi, ardından memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.
- ✓ Saat sinyali genliği  $V_p = 2\text{ V}$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH2) sürekli R<sub>S</sub> direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH1) önce kaynak gerilimi, ardından memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.
- ✓ Kare dalga sinyali genliği  $V_p = 1\text{ V}$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH2) sürekli R<sub>S</sub> direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH1) önce kaynak gerilimi, ardından memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.
- ✓ Kare dalga sinyali genliği  $V_p = 2\text{ V}$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH2) sürekli R<sub>S</sub> direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH1) önce kaynak gerilimi, ardından memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.

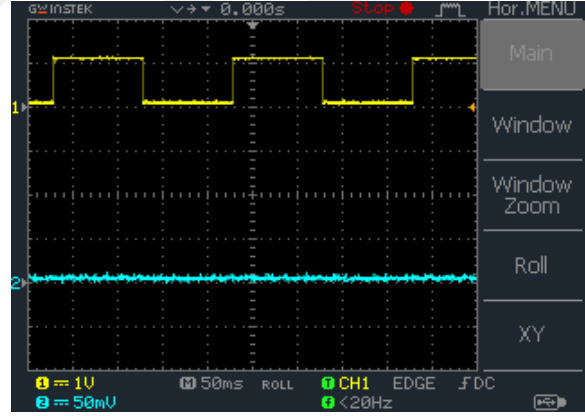
Memristörün yönü ya da polaritesi de dikkate alındığında, on altı farklı ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler 2 Hz, 5 Hz, 20 Hz ve 1 kHz olmak üzere dört farklı frekans değerinde yapılmıştır ve gereken kayıtlar alınmıştır. Takip eden şekillerde bu 16 farklı deneyin osiloskoptan alınan ekran görüntüleri verilmiştir.

Şekil 6.5, C–M<sub>ileri</sub>–R<sub>S</sub> devresinin 1V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenirken, dijital osiloskop ile kaydedilen, kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj durumu esnasında kaydedilen ekran görüntülerini içermektedir. Burada 2 Hz ve 5Hz frekans değerlerinde kaydedilen görüntülerde kondansatörün şarj ve deşarj olayı gözlenememiştir. Histeresis eğrilerinden elde edilen tecrübeden beklenenin aksine, Şekil 6.5.a ve Şekil 6.5.b’de görüldüğü üzere devrenin şarj ya da deşarj diye adlandırılabilir bir akım çekmediği direncin üzerindeki gürültüyü andıran gerilimden anlaşılabilir. Şekil 6.5.c’de 20 Hz’de şarj/deşarj olayının başladığı, kısa süreli bir palsi andırdığı ve detaylı olarak

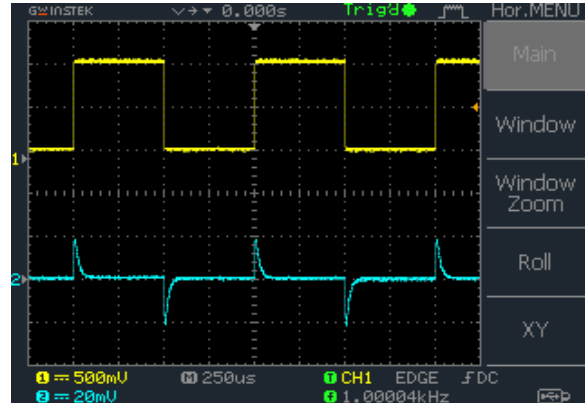
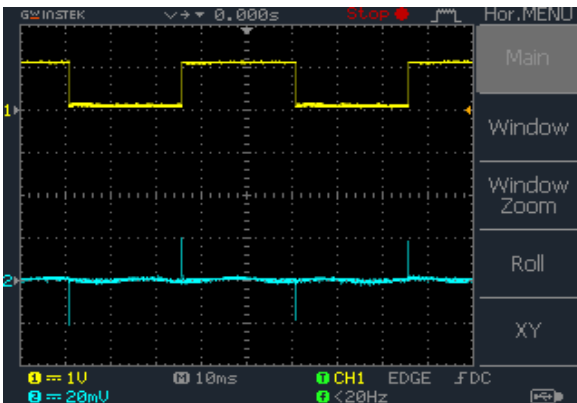
incelenemediği görülebilir. Şekil 6.5.d'de 1 kHz gibi yüksek bir frekans değerinde bu şarj/deşarj olayının yöne bağımlı olduğu her alternanstaki kondansatör gerilimin maksimum değerinin farklı olmasından görülebilir. Saat sinyali kaynağının genliği 2 V iken çizdirilen grafiklerin yer aldığı Şekil 6.6'da devredeki kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj vedeşarj olduğu indirekt olarak devrenin akımı ile orantılı olan direnç geriliminden görülebilir ama direnç gerilimi periyodik değildir ve üzerinde rassal bir dalgalanma vardır. Bu dalgalanma periyodik değil stokastik bir davranış göstermektedir. Direnç gerilimi yani dolayısıyla devre akımı yöne bağımlılığa göstermektedir. Şekil 6.6'daki dalga şekillerinde yarım dalga simetrisi yoktur. Biolek memristör modeli stokastik bir model olmadığından, Karbon tabanlı memristörlü bu devrenin Biolek memristör modeli ile analiz edilemeyeceği görülmektedir.



(a)



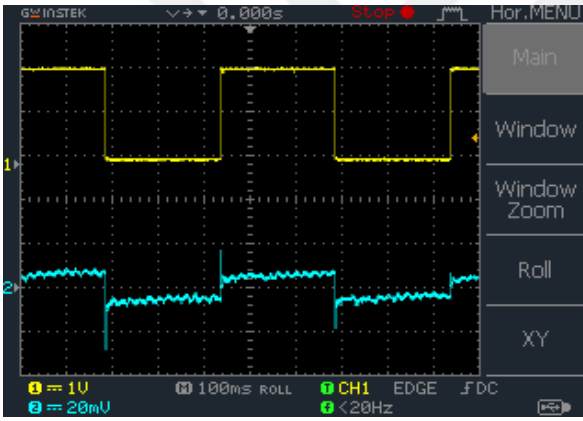
(b)



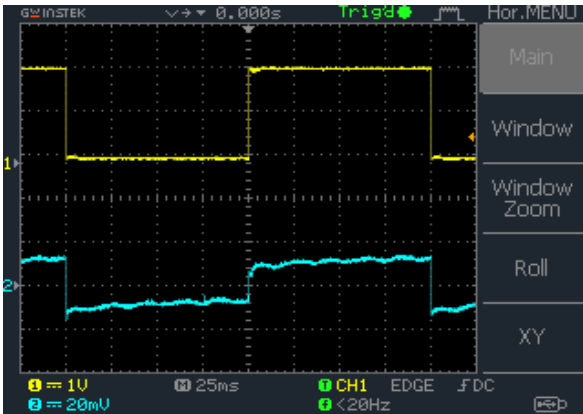
(c)

(d)

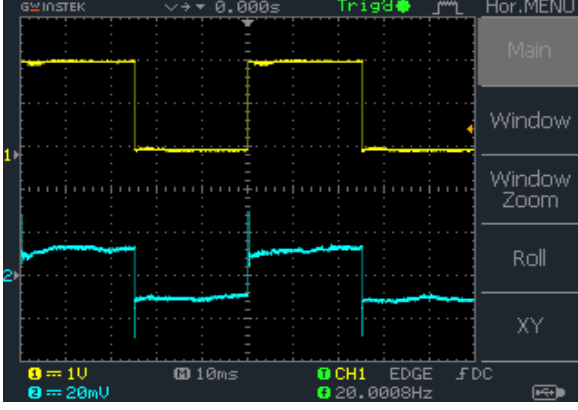
Şekil 6.5. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri



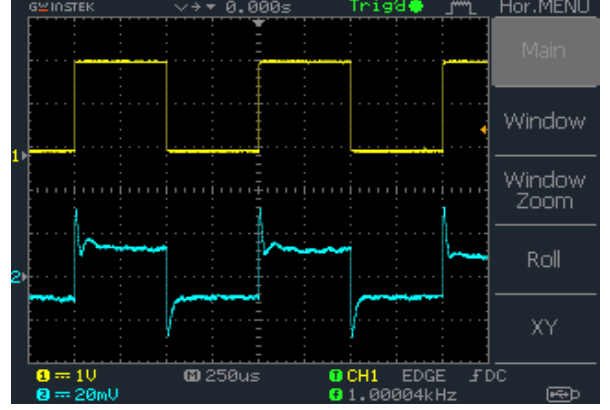
(a)



(b)



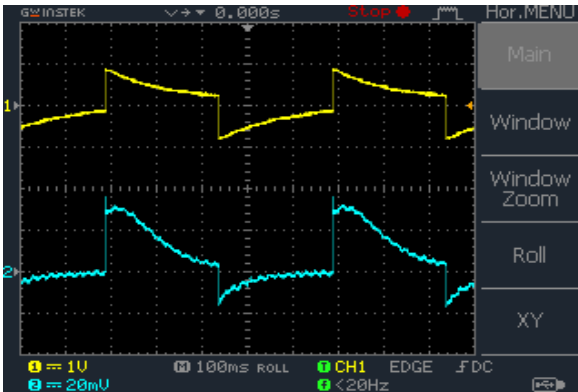
(c)



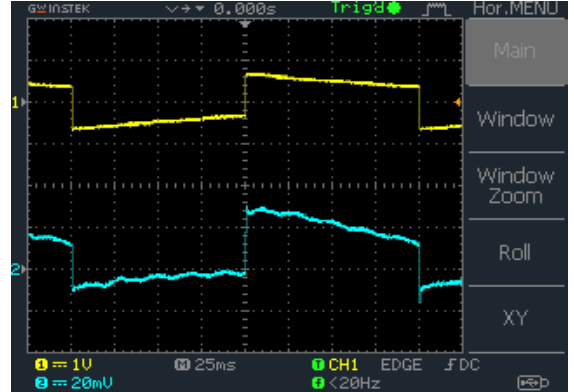
(d)

Şekil 6.6. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri

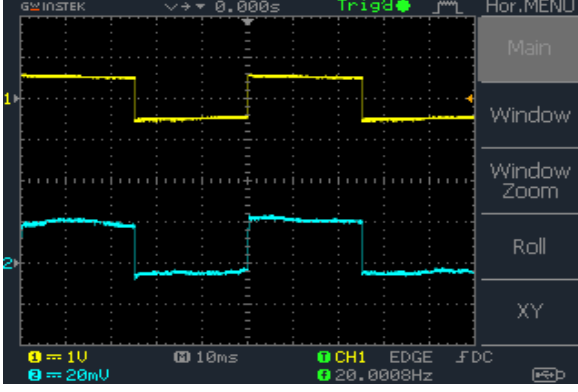
C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> devresindeki D2 noktası gerilimi (memristör ve koruma direnci üzerindeki toplam gerilim) ve koruma direnci üzerindeki gerilim Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmiştir. Bu dalga şekilleri sırasıyla 1 V ve 2 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile alınan ölçümlerdir. Şekil 6.7’de görüldüğü üzere devredeki D2 noktası gerilimi periyodik ama bipolar bir davranış göstermektedir. İlginç bir şekilde koruma direncinin geriliminin yani Karbon tabanlı memristörün akımının periyodik olmadığı görülmüştür. Akım periyodik ve rassal olmak üzere iki bileşenden oluşmuş gözükmemektedir. Yani direncin gerilimi ile orantılı Karbon tabanlı memristör akımı stokastik bir davranış sergilemektedir. Şekil 6.7.d’de görüldüğü gibi 1 kHz gibi yüksek frekanslarda bile bu stokastik davranış devam etmektedir. Ayrıca akım dalga şeklinde yarım dalga simetrisi bulunmamaktadır. Yöne bağımlı ve bipolar bir davranış söz konusudur.



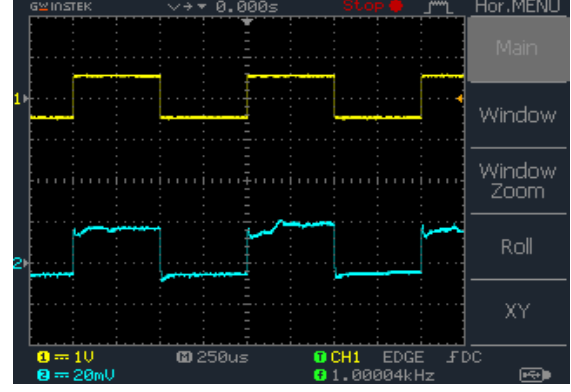
(a)



(b)



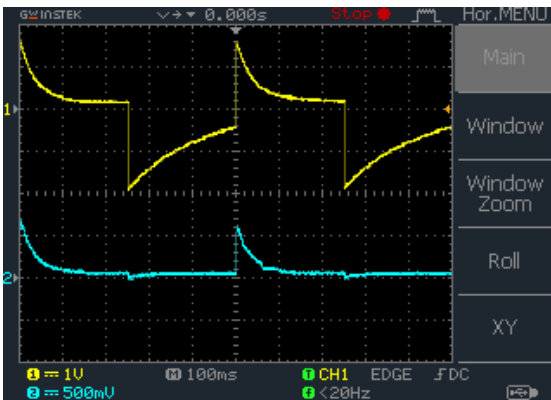
(c)



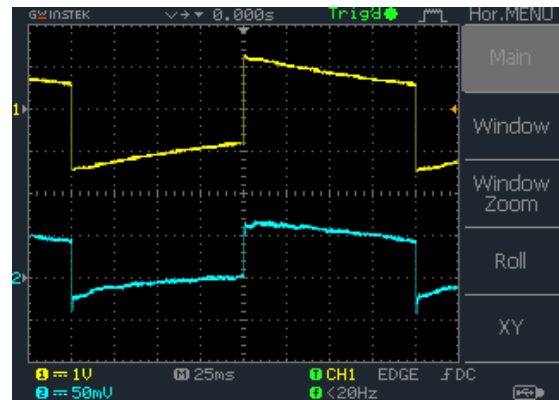
(d)

Şekil 6.7. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 6.8'de görüldüğü üzere saat sinyalinin genliği 2 V'a çıkarıldığında D2 düğüm gerilimi periyodik ama bipolar bir davranış göstermektedir. Koruma direncinin geriliminin yani Karbon tabanlı memristörün akımının da hemen hemen periyodik olduğu görülmüştür. Akım periyodik ve rassal olmak üzere hala iki bileşenden oluşmuş gözükmemektedir. Ama saat sinyalinin genliği 2 V iken, rassal bileşenin genliği çok azalmış durumdadır ve stokastik davranış zorlukla görülebilmektedir. Yani direncin gerilimi ile orantılı Karbon tabanlı memristör akımının stokastik davranışı memristöre uygulanan gerilim arttığında ya da şarj eden kaynağın genliği arttığında azalmaktadır. Şekil 6.7.d'de görüldüğü gibi 1 kHz gibi yüksek frekanslarda bile akımın periyodik olmadığı ama akım içindeki dalgalanmanın Şekil 6.7'ye göre oldukça azaldığı görülebilir. Ayrıca akım dalga şeklinde ya da koruma direncinin geriliminde hala yarım dalga simetrisi bulunmamaktadır. Yöne bağımlı ve bipolar bir davranış söz konusudur.

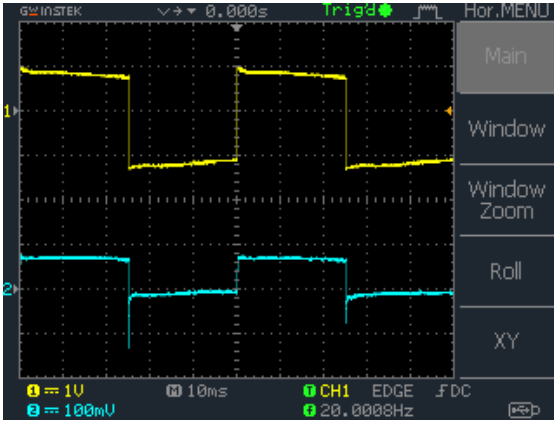


(a)

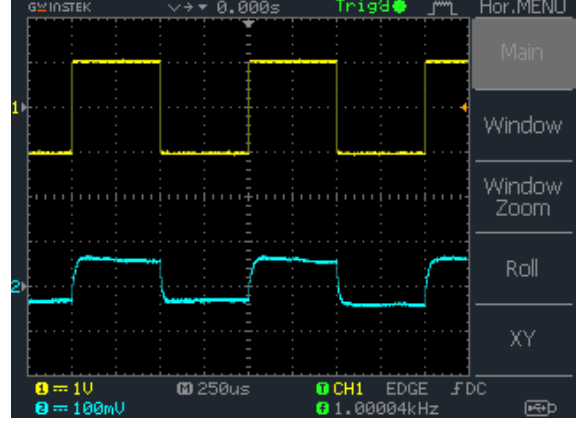


(b)





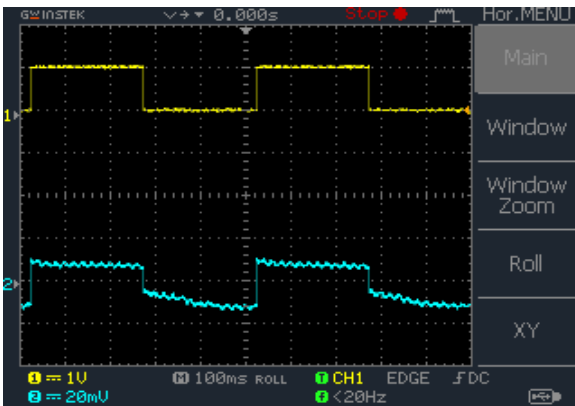
(c)



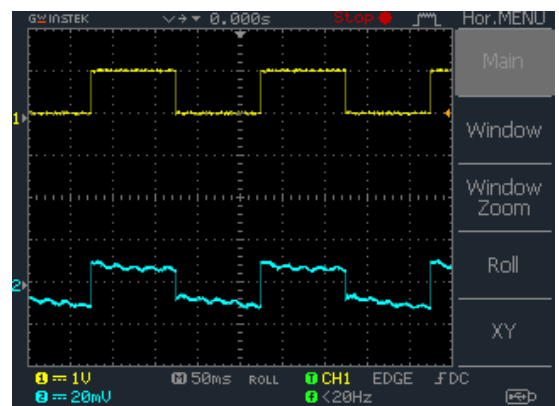
(d)

Şekil 6.8. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

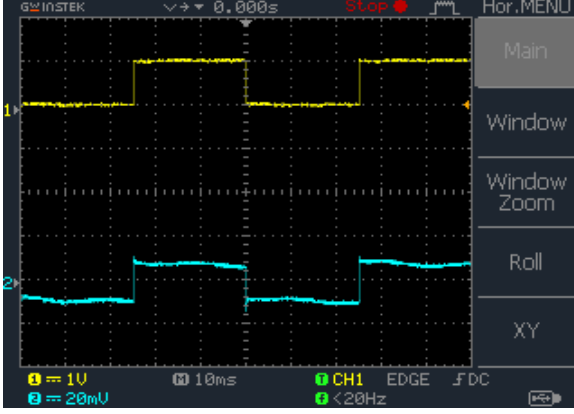
Şekil 6.9, 1 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  devresinde kondansatör memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj olurken, dijital osiloskop ile kaydedilen direnç ve kaynak gerilimini içermektedir. Burada 2 Hz ve 5 Hz frekans değerlerinde direnç geriliminin periyodik olmadığı gözlemlenmektedir. Şekil 6.9.c ve Şekil 6.9.d'de görüldüğü üzere 20 Hz ve 1 kHz frekans değerlerinde ise periyodik davrandığı görülmektedir. Bununla birlikte, özellikle 5 Hz, 20 Hz ve 1 kHz frekanslarındaki gerilim grafiklerinde, her alternanstaki seri direnç geriliminin maksimum değerinin farklı olmasından kondansatörün yöne bağımlı olduğu görülebilir.



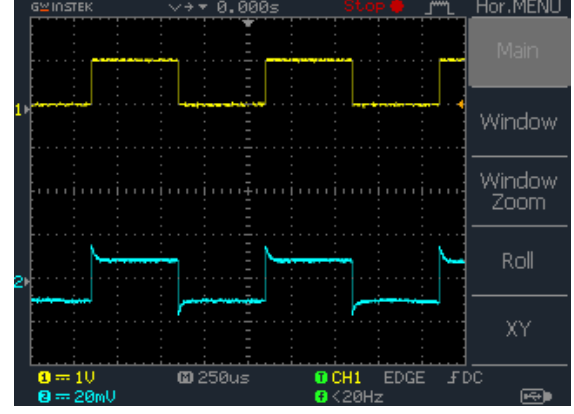
(a)



(b)



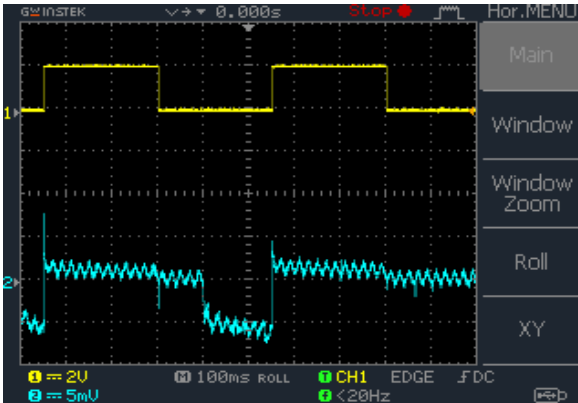
(c)



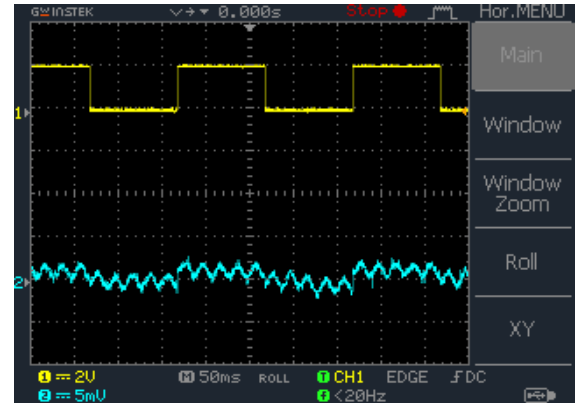
(d)

Şekil 6.9. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri

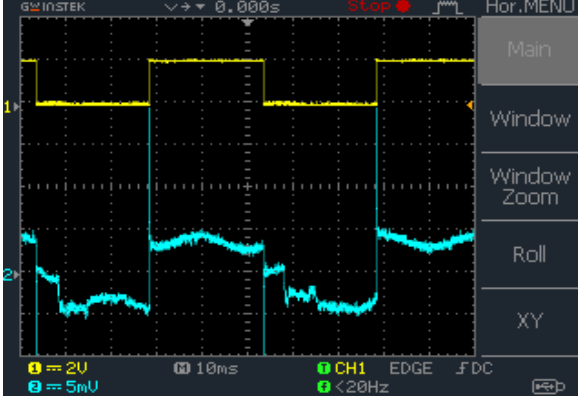
Şekil 6.10, 2 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  devresinde kondansatör memristör ve direnç üzerinden şarj vedeşarj olurken, dijital osiloskop ile kaydedilen direnç ve kaynak gerilimini içermektedir. Burada 2 Hz ve 5 Hz frekans değerlerinde direnç geriliminin periyodik olmadığı gözlemlenmektedir. Burada kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj vedeşarj olduğu, devrenin akımı ile orantılı olan direnç geriliminden görülebilir. Bu grafiklerde direnç geriliminin periyodik olmayıp rassal olarak değiştiği görülmektedir Şekil 6.10'da 2 Hz, 5 Hz ve 20 Hz frekanslarında stokastik davranıştan dolayı yöne bağımlılık gözlenemezken, 1 kHz'de direncin geriliminin dolayısıyla memristörün akımının genliği her yönde farklı olduğundan yöne bağımlılık gözlemlenmiştir. Şekil 6.10'dan Karbon tabanlı memristörün stokastik ve yön bağımlı davranışı açıkça görülmektedir.



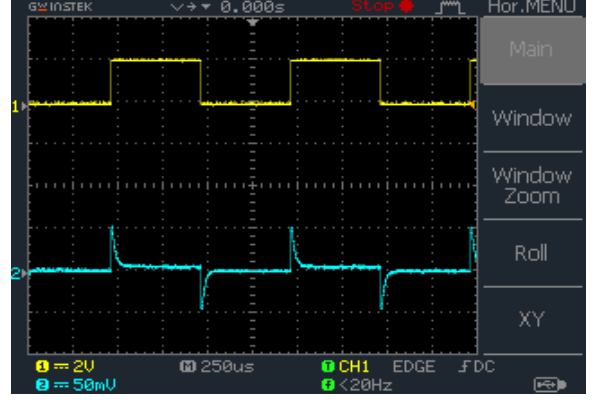
(a)



(b)



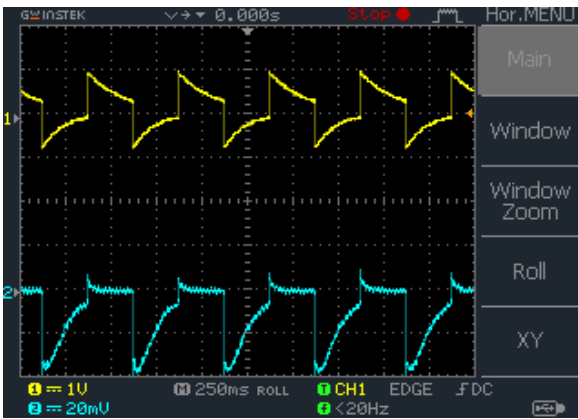
(c)



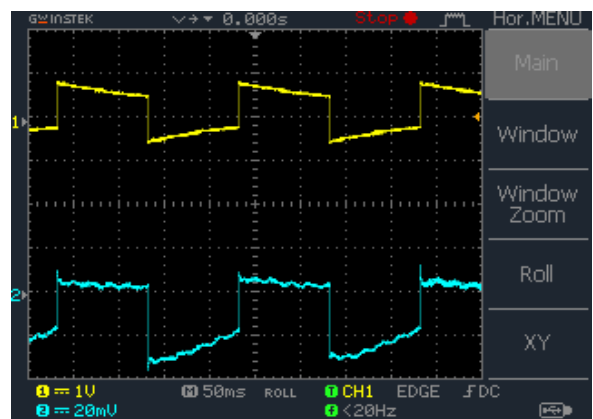
(d)

Şekil 6.10. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri

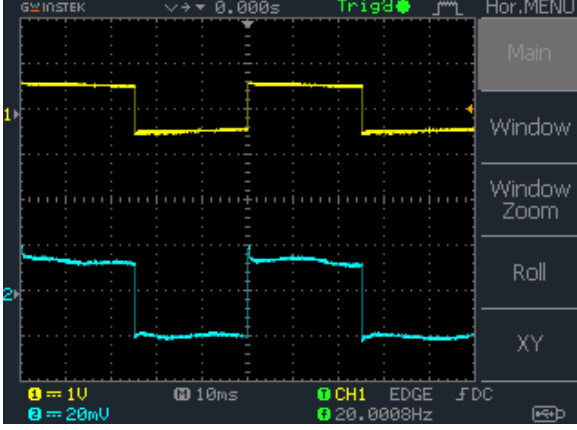
Tepe değeri 1 V olan saat sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresindeki D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilim grafikleri Şekil 6.11’de verilmiştir. Dört farklı frekans değeri (2 Hz, 5 Hz, 20 Hz, 1 kHz) için incelenen bu grafiklerde direnç geriliminin, dolayısıyla memristör akımının periyodik olmama durumu yani stokastik olduğu Şekil 6.11.b’de (5 Hz) bariz bir şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 6.11’deki tüm grafiklerde memristör akımının yöne bağımlı olduğu gözlemlenmiştir.



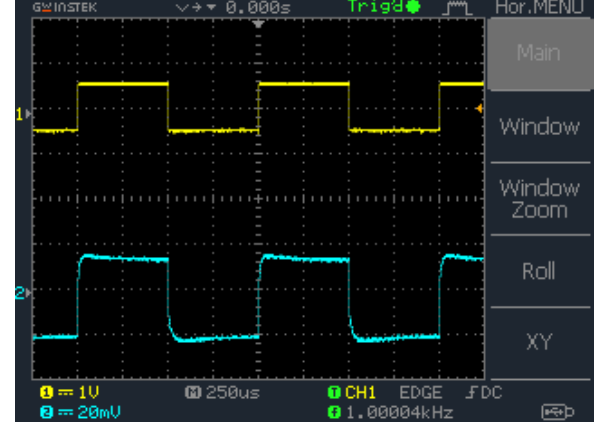
(a)



(b)



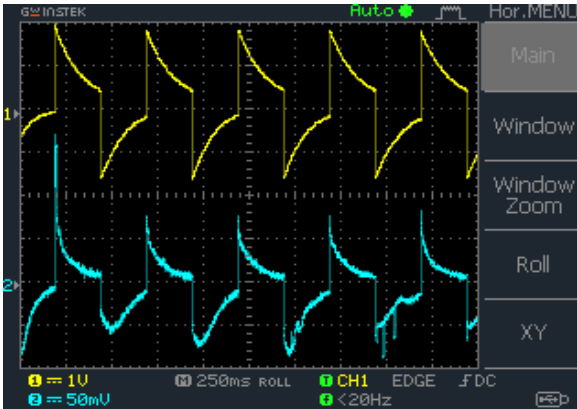
(c)



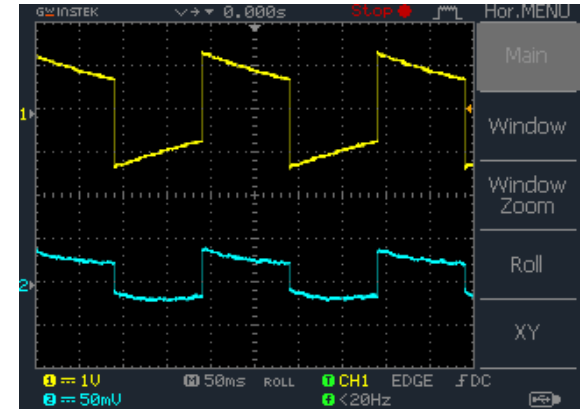
(d)

Şekil 6.11. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

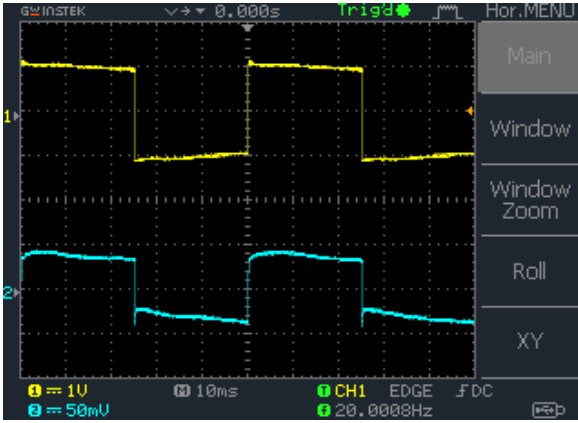
Tepe değeri 2 V olan saat sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresindeki D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilim grafikleri Şekil 6.12’de verilmiştir. Şekil 6.12.a’da 2 Hz kaynak frekanslı saat sinyali kullanılarak çizdirilen direnç gerilim yani akım grafiği verilmiştir. Burada direnç akımının, dolayısıyla memristör içinden geçen akımın periyodik olmadığı gözlemlenmiştir. 6.12.b’de de devre akımının periyodik olmadığı (gürültülü olduğu) gözlemlenirken, 6.12.c ve 6.12.d’de bu gürültünün kaybolduğu yani 2 Hz ve 5 Hz frekanslarına göre daha periyodik davrandığı görülmüştür. Ayrıca dolma ve boşalmanın yöne bağımlı olduğu da Şekil 6.12’de yarım dalga simetrisi olmamasından görülmektedir.



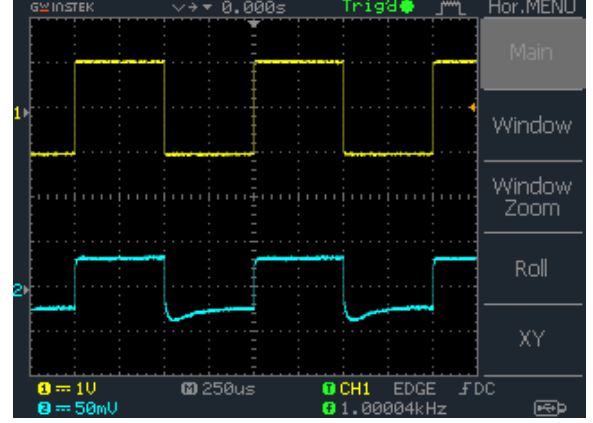
(a)



(b)



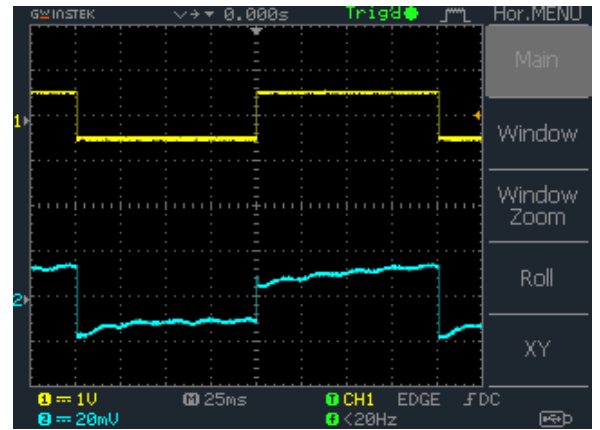
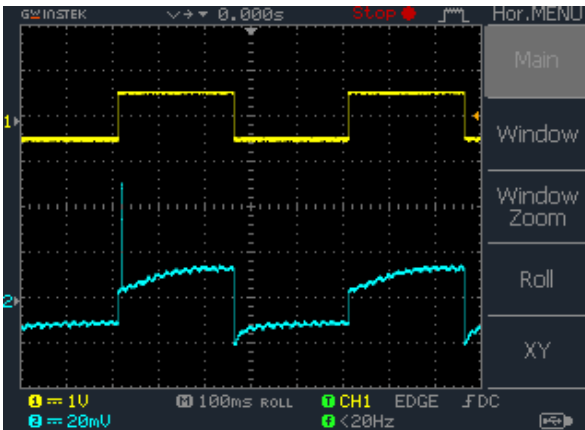
(c)



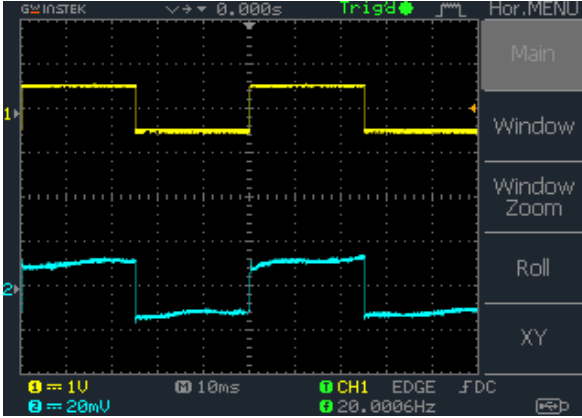
(d)

Şekil 6.12. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

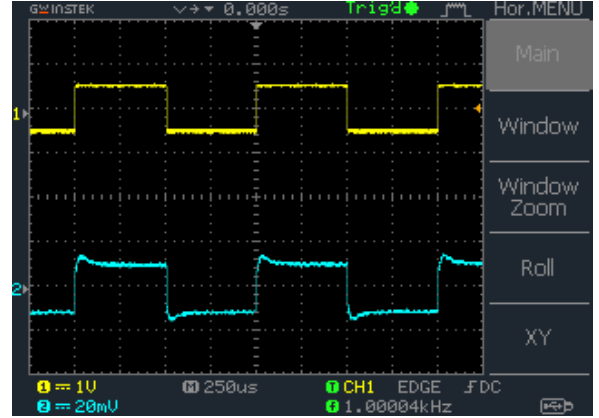
Şekil 6.13, 1 V tepe değerli kare dalga sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{İleri}-R_S$  devresinde kondansatör memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj olurken, dijital osiloskop ile kaydedilen direnç ve kaynak gerilimini içermektedir. Burada kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj olduğu, devrenin akımı ile orantılı olan direnç geriliminden takip edilebilir. Şekil 6.13.a ve Şekil 6.13.b'de direnç geriliminin yani dolayısıyla memristörün akımının periyodik olmadığı ve stokastik bir davranış sergilediği görülmektedir. 20 Hz ve 1 kHz frekanslarında direnç geriliminin dolayısıyla devrenin hemen hemen periyodik çalışmaya geçtiği Şekil 6.13.c ve Şekil 6.13.d'de açıkça görülmektedir. 1 kHz'de yarım dalga simetrisi gözükmediğinden devrenin dolma ve boşalmasının yöne bağımlı olduğu da Şekil 6.13.d'den görülebilir.



(a)



(b)

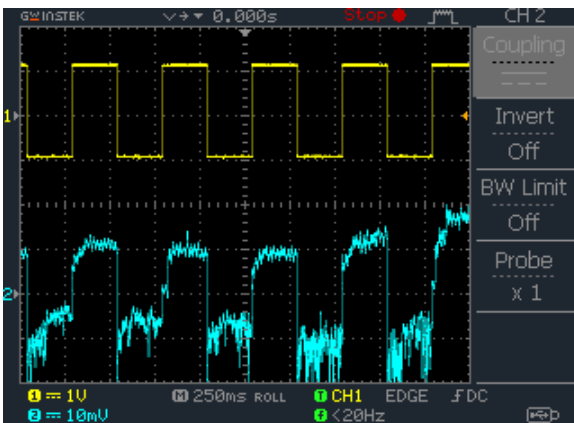


(c)

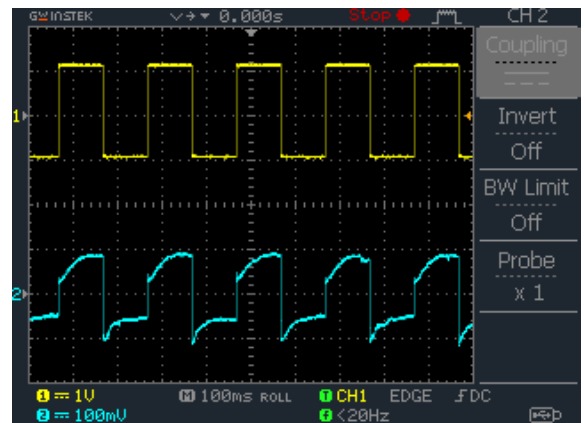
Şekil 6.13. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri

(d)

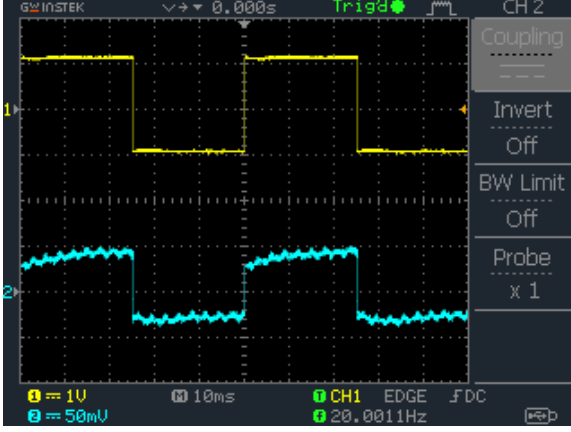
Şekil 6.14, C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> devresinin 2 V tepe değerli kare dalga sinyali kaynağı ile beslenirken, dijital osiloskop ile kaydedilen, kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj vedeşarj durumu esnasında kaydedilen ekran görüntülerini içermektedir. Burada kondansatörün şarj vedeşarj olayı, direnç geriliminden takip edilebilir. Şekil 6.14.a 'da direnç gerilimi periyodik bir davranış sergileyemeyerek, oldukça fazla gürültü içermektedir. Ayrıca Şekil 6.14.b ve Şekil 6.14.c'de direnç geriliminin periyodik olmadığı gözlenmektedir. Şekil 6.14.d'de, 1 kHz frekans değerinde gerilim değişimi periyodik olarak gözlenmiştir.



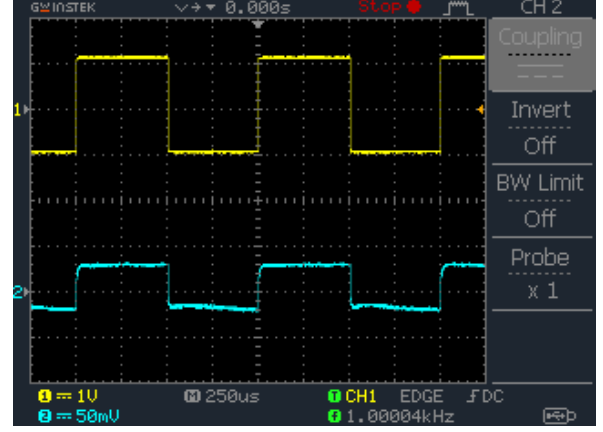
(a)



(b)



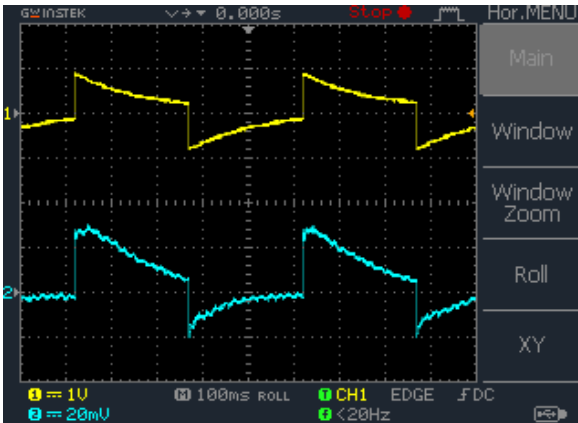
(c)



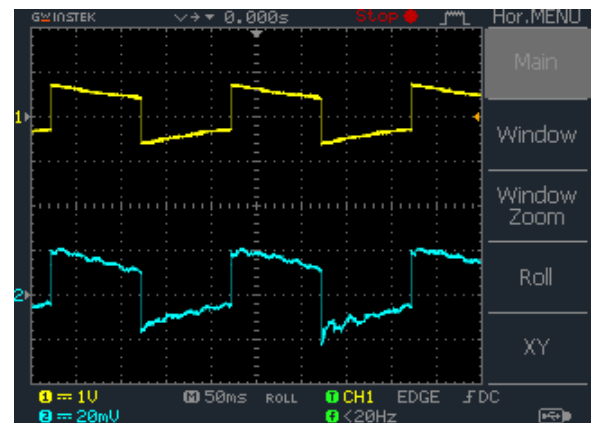
(d)

Şekil 6.14. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri

Şekil 6.15'te tepe değeri 1 V olan kare dalga sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresindeki D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilimler verilmiştir. Şekil 6.15.a ve Şekil 6.15.b'de, 2 Hz ve 5 Hz olmak üzere iki düşük frekans değerinde çizdirilen direncin gerilimi yani devrenin akım grafiği incelendiğinde akımın periyodik olmadığı görülmektedir. Şekil 6.15.c'de periyodik olmama durumu azalmakta iken, Şekil 6.15.d'de yani 1 kHz frekansında akımın periyodik hale geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.15'de D2 noktasının geriliminin stokastikten ziyade periyodik davrandığı görülmektedir. Bu memristörün akımının oluşma mekanizmasının veya sürüklenme hızının oldukça stokastik bir davranış gösterdiği şeklinde yorumlanabilir.

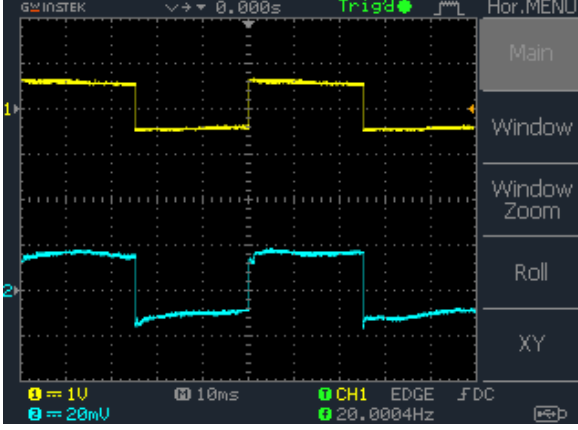


(a)

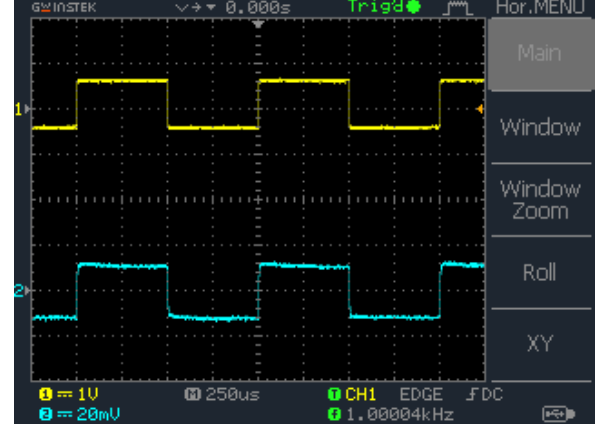


(b)





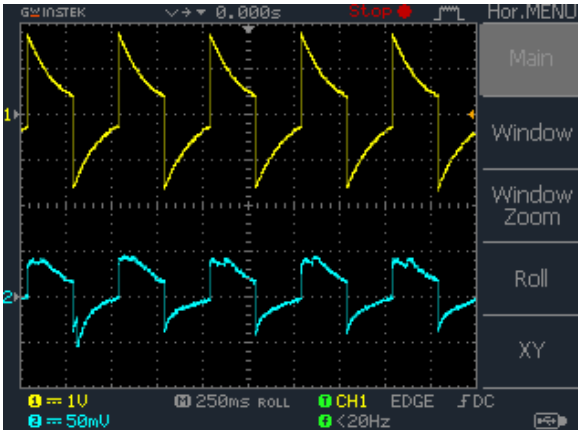
(c)



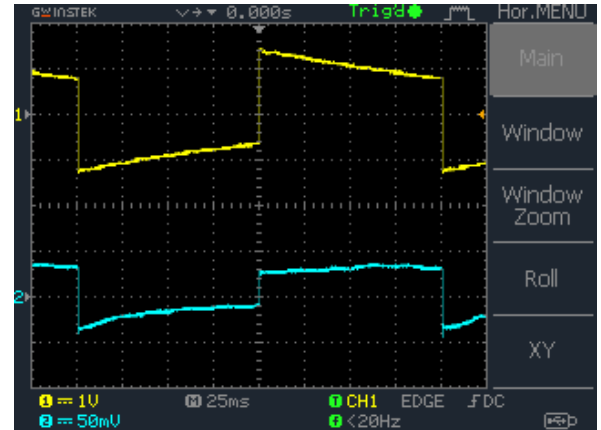
(d)

Şekil 6.15. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{\text{ileri}}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 6.16'da ise tepe değeri 2 V olan kare dalga sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{\text{ileri}}-R_S$  seri devresindeki D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilim grafikleri verilmiştir. Şekil 6.16.a'da, direncin gerilimi yani devrenin akım grafiği incelendiğinde akımın periyodik olmadığı açıkça görülmektedir. Devre akımı 5 Hz ve 20 Hz frekans değerlerinde periyodik bir davranış sergilerken, Şekil 6.16.d'de yani 1 kHz frekansında akımın periyodikliğinin zaman zaman bozulduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.16'da D2 noktasının geriliminin stokastikten ziyade periyodik davrandığı görülmektedir. Bu memristörün akımının oluşma mekanizmasının veya sürüklenme hızının oldukça stokastik bir davranış gösterdiği şeklinde yorumlanabilir.

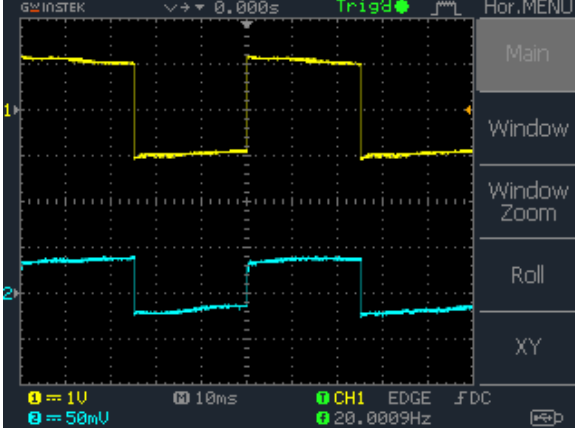


(a)

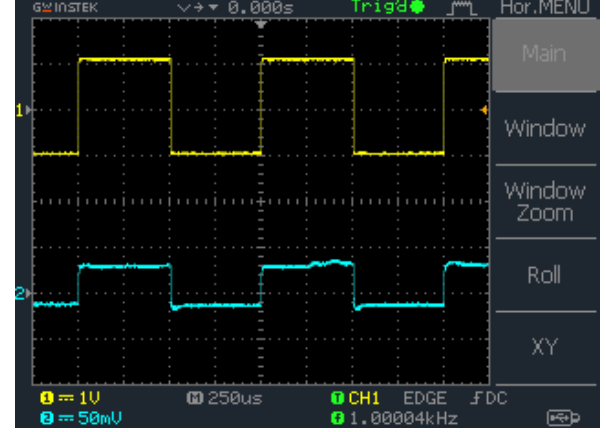


(b)





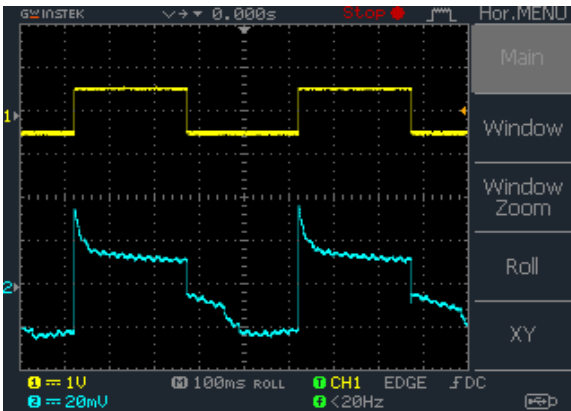
(c)



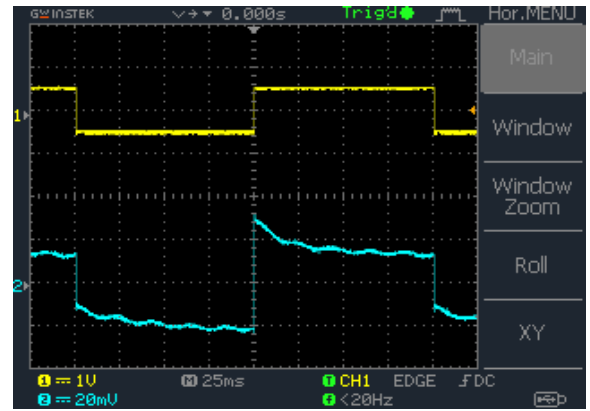
(d)

Şekil 6.16. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{ileri}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

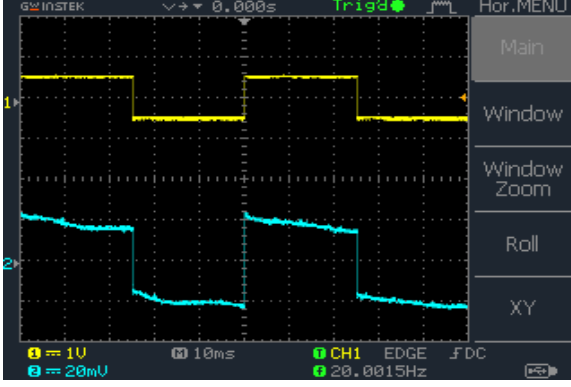
Şekil 6.17, 1 V tepe değerli kare dalga sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  devresinde kondansatör memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj olurken, dijital osiloskop ile kaydedilen direnç ve kaynak gerilimini içermektedir. Burada kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj olduğu, devrenin akımı ile orantılı olan direnç geriliminden takip edilebilir. 2 Hz, 5 Hz, 20 Hz ve 1 kHz frekanslarında alınan ekran görüntülerinde 2 Hz, 5 Hz ve 20 Hz frekanslarında devre akımının periyodik olmadığı, stokastik bir davranış sergilediği, fakat frekans arttıkça bu gürültünün yani bu stokastik davranışın (periyodik olmama durumunun) azaldığı görülmekte ve 1 kHz frekansında bu stokastik davranışın kaybolduğu görülmektedir. 1 kHz'de yarım dalga simetrisi gözükmediğinden devrenin dolma ve boşalmasının yöne bağımlı olduğu da Şekil 6.17.d'den görülebilir.



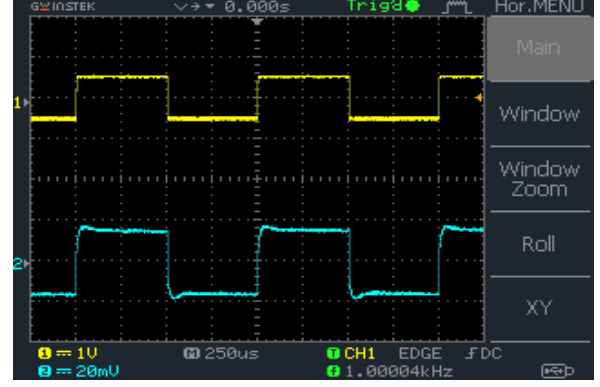
(a)



(b)



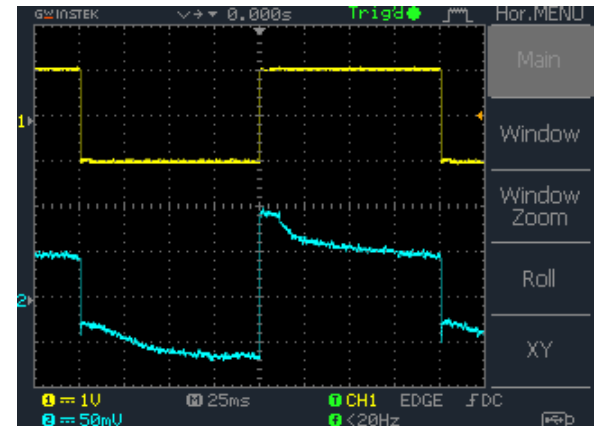
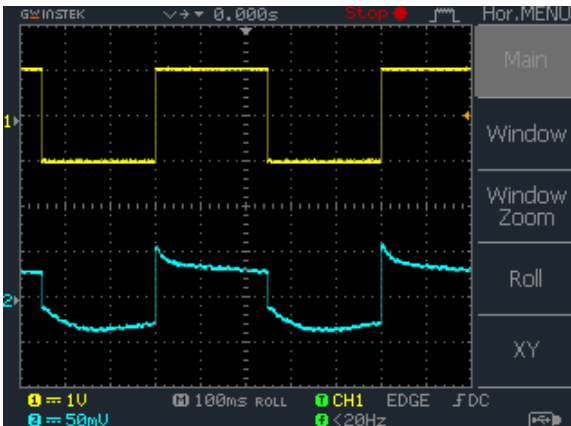
(c)

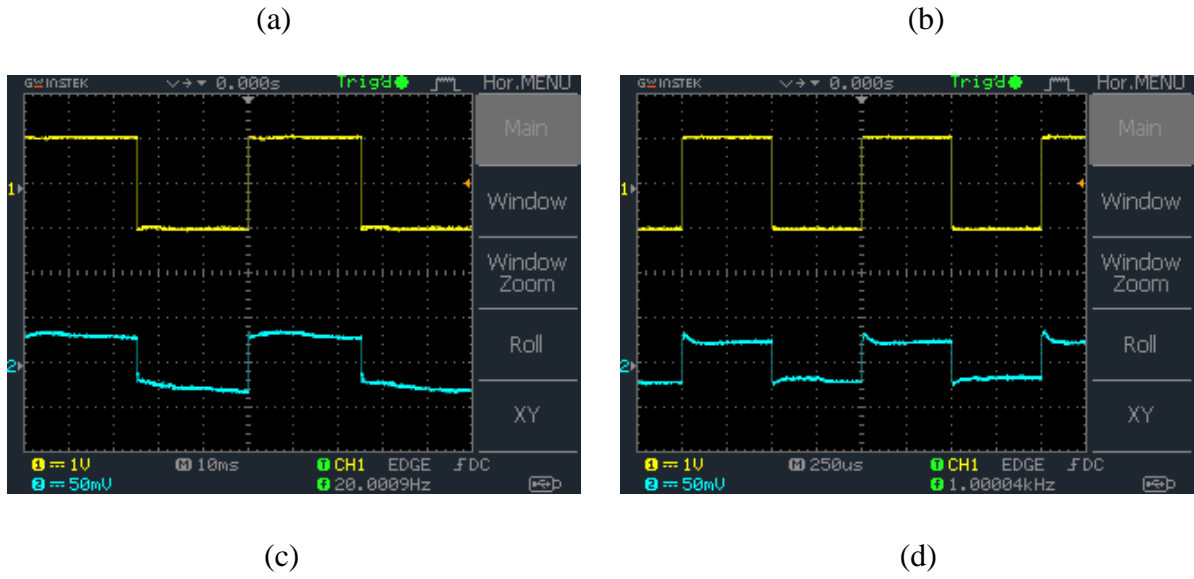


(d)

Şekil 6.17. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri

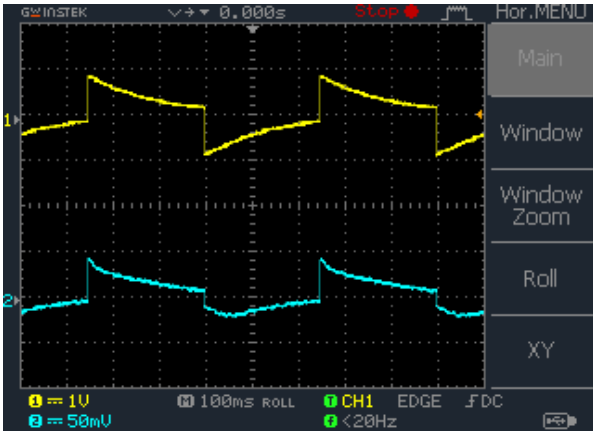
Şekil 6.18, 2 V tepe değerli kare dalga sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  devresinde kondansatör memristör ve direnç üzerinden şarj vedeşarj olurken, dijital osiloskop ile kaydedilen direnç ve kaynak gerilimini içermektedir. Koruma direncinin geriliminin yani Karbon tabanlı memristörün akımının da hemen hemen periyodik olduğu görülmüştür. Akım periyodik ve rassal olmak üzere hala iki bileşenden oluşmuş gözükmemektedir. Ama saat sinyalinin genliği 2 V iken, rassal bileşenin genliği çok azalmış durumdadır ve stokastik davranış zorlukla görülebilmektedir. Yani direncin gerilimi ile orantılı Karbon tabanlı memristör akımının stokastik davranışı memristöre uygulanan gerilim arttığında ya da şarj eden kaynağın genliği arttığında azalmaktadır. Şekil 6.18.d'de görüldüğü gibi 1 kHz gibi yüksek frekanslarda bile akımın periyodik olmadığı ama akım içindeki dalgalanmanın Şekil 6.18.b'ye göre oldukça azaldığı görülebilir. Ayrıca akım dalga şeklinde ya da koruma direncinin geriliminde hala yarım dalga simetrisi bulunmamaktadır. Yöne bağımlı ve bipolar bir davranış söz konusudur.



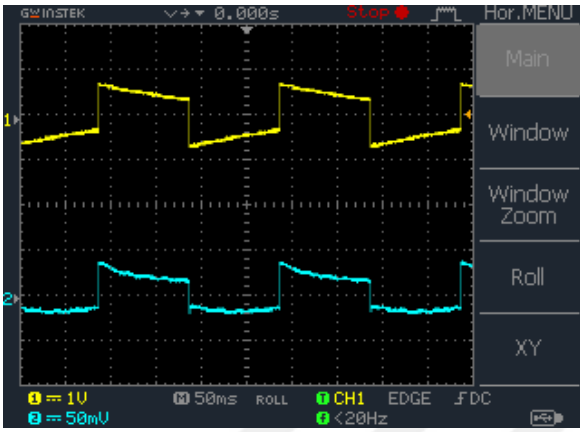


Şekil 6.18. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında şarj/deşarj esnasında kaynağın ve direncin gerilimleri

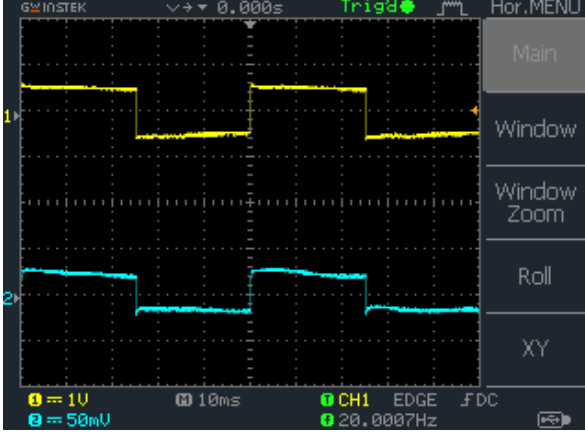
Tepe değeri 1 V olan kare dalga sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresindeki D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilim grafikleri Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekil 6.19.a, 6.19.b ve 6.19.d'de (2 Hz, 5 Hz ve 1 kHz frekanslarında) verilen grafikler incelendiğinde, direncin gerilimi yani devrenin akımının periyodik olmadığı, içinde stokastik bir dalgalanma olduğu, görülmektedir. 20 Hz ara 1 kHz frekans değerlerinde ise bu stokastik dalgalanmanın içindeki yüksek frekanslı bileşen oldukça azalmaktadır. 1 kHz'de hemen hemen periyodik bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Devredeki memristörün bipolar davrandığı direncin geriliminden yani akım şeklinden anlaşılabilir. D2 noktasının geriliminin içindeki dalgalanma memristörün akımına göre daha azdır.



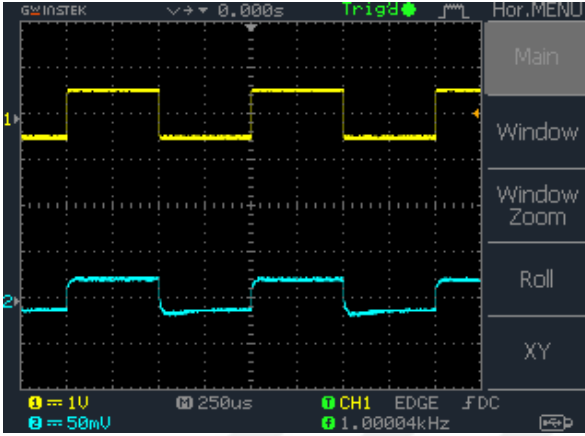
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.19. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

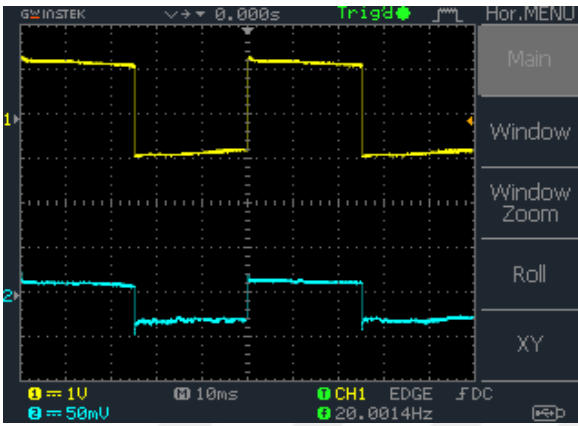
Tepe değeri 2 V olan saat sinyali kaynağı ile beslenen  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresindeki D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilim grafikleri Şekil 6.20'de verilmiştir. Tüm frekans değerlerinde, direncin gerilimi yani devrenin akımının periyodik olmadığı gözlemlenmiştir. Tepe değeri 1 V olan saat sinyali ile beslenme durumuna göre hem D2 noktası geriliminde hem de direncin geriliminde daha az genlikli bir stokastik dalgalanma görülmektedir. Daha önce görüldüğü gibi D2 noktasının geriliminin içindeki dalgalanma memristör akımının içindeki dalgalanmaya göre daha azdır.



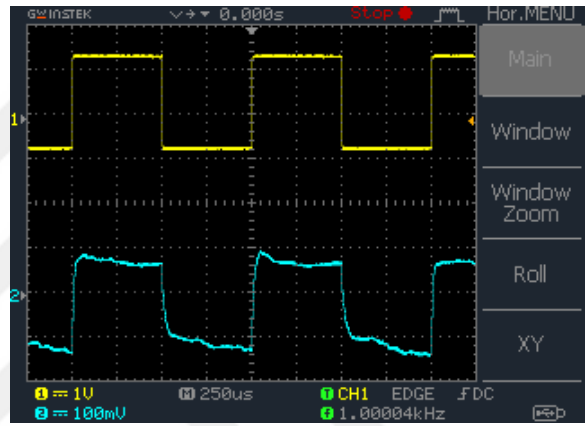
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.20. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Karbon tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

Şekil 6.5'ten Şekil 6.20'ye kadar olan şekillerde görüldüğü üzere, deneysel çalışmanın çoğu kısmında Karbon tabanlı memristör stokastik bir davranış sergilemiştir. Bu durum sağlıklı inceleme ve yorumlamayı zorlaştırdığı gibi, deneysel veriler ve 5. bölümdeki devre analizi sonuçlarını karşılaştırmaya da imkân sağlamamaktadır. Karbon tabanlı memristör ve direnç üzerinden kondansatörün dolma ve boşalması yöne bağlıdır ve stokastik bir karakteristiğe sahiptir. Bu stokastik davranış artan frekansla ve artan genlikle azalma eğilimindedir. Sonuç olarak, Biolek modeli ile stokastik davranan Karbon tabanlı memristörün modellenmesi mümkün olmadığından, Karbon tabanlı memristörlü şarj ve deşarj devreleri Biolek modeli ile analiz edilemez.

Karbon tabanlı memristörle yapılan çalışmaların seyri bu yönde iken, elde mevcut olan ve yine Knowm firmasının ürettiği bir Tungsten tabanlı memristör ile bu bölümdeki deneyler

tekrar edilmiştir. Tungsten tabanlı memristörün stokastik davranmadığı görülmüştür. Tungsten tabanlı memristör ile yapılan deneyler ve açıklamaları sıradaki alt bölümde verilmiştir.

## 6.2.Tungsten Tabanlı Memristör ile Yapılan Deneylerin Sonuçları

Bu bölümde Knowm firması tarafından üretilen Tungsten tabanlı memristör kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları yer almaktadır. Farklı kaynak türü ve genlik değerleri ile deney yaparken izlenen yolların detayları şu şekilde açıklanabilir:

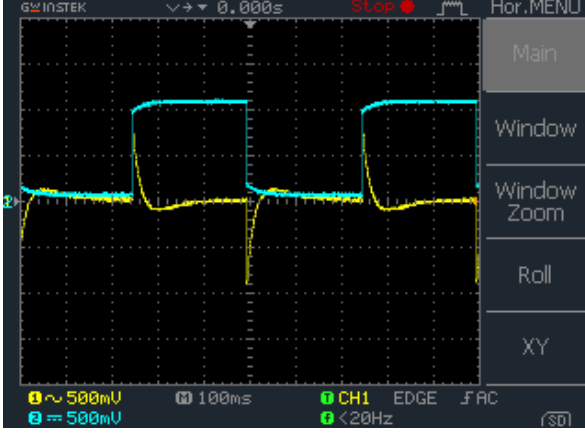
- ✓ Saat sinyali genliği  $V_p = 1 V$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH1) sürekli  $R_S$  direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH2) önce kaynak gerilimi, ardından Tungsten tabanlı memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.
- ✓ Saat sinyali genliği  $V_p = 2 V$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH1) sürekli  $R_S$  direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH2) önce kaynak gerilimi, ardından Tungsten tabanlı memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.
- ✓ Kare dalga sinyali genliği  $V_p = 1 V$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH1) sürekli  $R_S$  direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH2) önce kaynak gerilimi, ardından Tungsten tabanlı memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.
- ✓ Kare dalga sinyali genliği  $V_p = 2 V$  iken, Osiloskop cihazı problarından biri ile (CH1) sürekli  $R_S$  direnci üzerindeki gerilim ölçülürken, diğer prob ile (CH2) önce kaynak gerilimi, ardından Tungsten tabanlı memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim ölçülmüştür.

Tungsten tabanlı memristörün kutup değişimi de dikkate alındığında, bu bölüm için onaltı farklı ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler 2 Hz, 5 Hz, 20 Hz ve 1 kHz olmak üzere dört farklı frekans değerinde yapılmıştır. Takip eden şekillerde, daha önce Karbon tabanlı memristörün kullanıldığı deneyler için verilen grafiklerin, Tungsten tabanlı memristör kullanılarak yapılan deneylerde osiloskoptan alınan ekran görüntüleri verilmiştir.

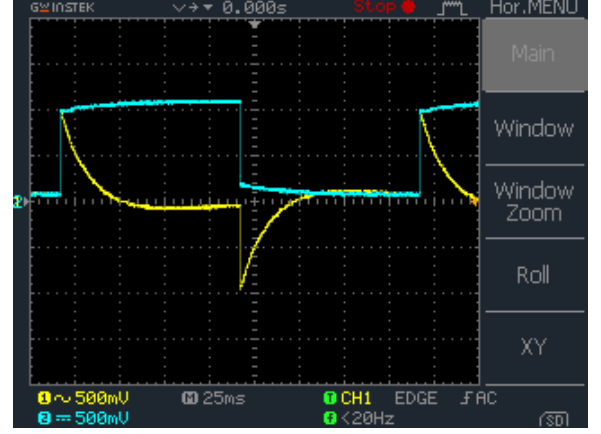
Şekil 6.21 ve Şekil 6.22 sırasıyla, C-Milleri- $R_S$  devresinin 1 V ve 2 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, kondansatörün Tungsten tabanlı memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj durumu esnasında kaydedilen ekran

görüntülerini içermektedir. 1 V ve 2 V saat sinyali ile beslenen C-Milleri- $R_S$  devresi deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Akımın ters yönde akmasının nedeni yedinci bölümde elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak incelenecektir. Frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. Kaynak gerilimi ideal bir kare dalga değildir, bunun nedeni kaynağın iç direnci olarak düşünülmüştür. Bir kondansatörün kapasitif reaktansı ( $X_C = 1/WC$ ) frekansla ters orantılı olduğundan, yüksek frekanslarda kapasitif reaktans değeri oldukça küçük olacağı için kondansatör kısa devre gibi düşünülebilir. Şekil 6.21.d ve Şekil 6.22.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça, kondansatör devrede kısa devreymiş gibi davranırken, Tungsten tabanlı memristör, direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlineer bir direnç gibi davranmaktadır.

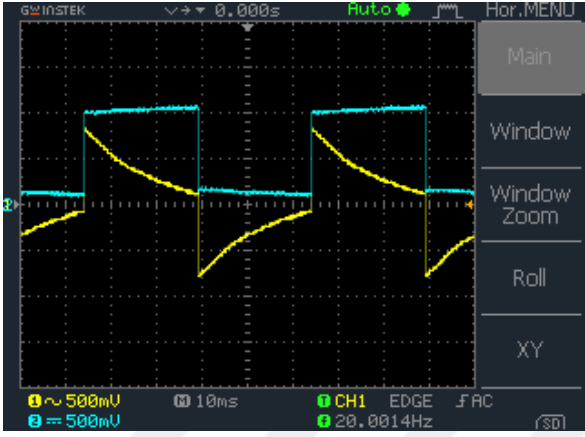




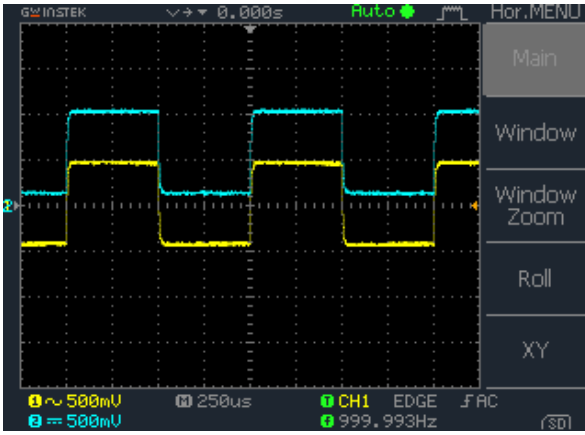
(a)



(b)

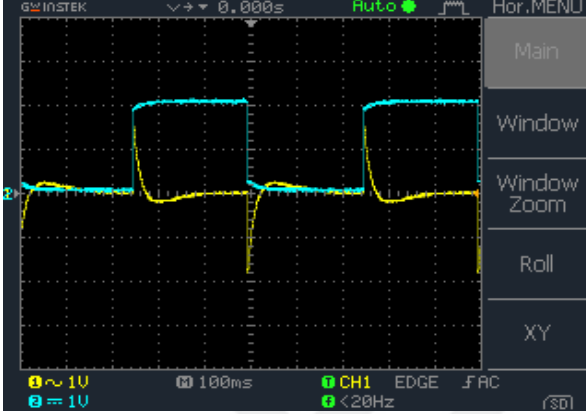


(c)

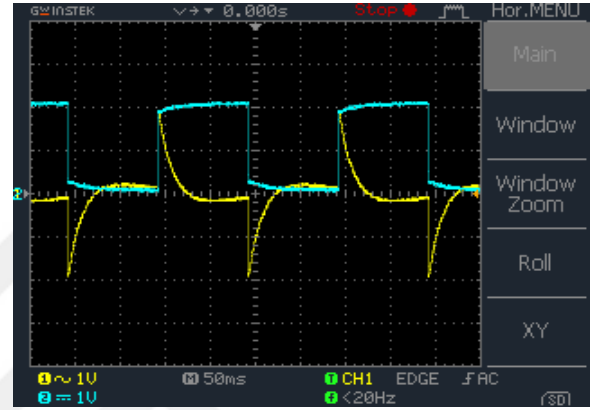


(d)

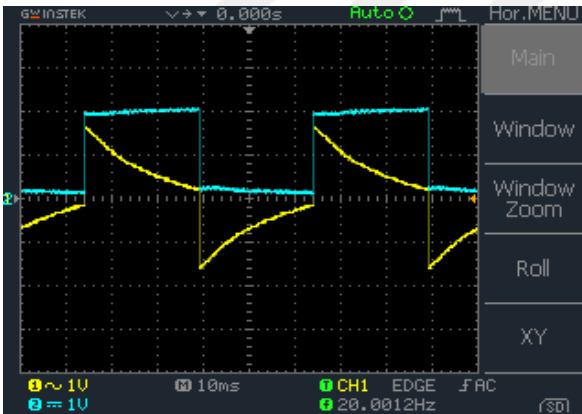
Şekil 6.21. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-Milleri- $R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi



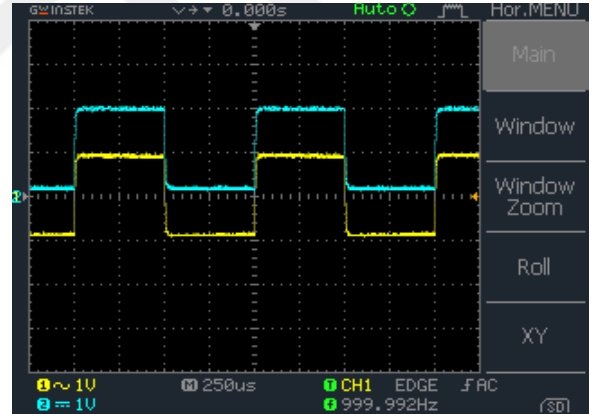
(a)



(b)



(c)

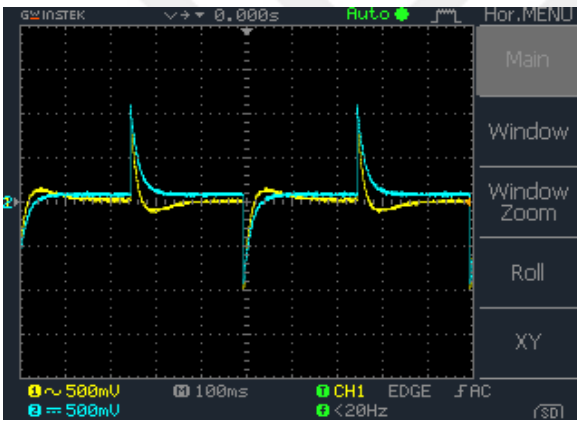


(d)

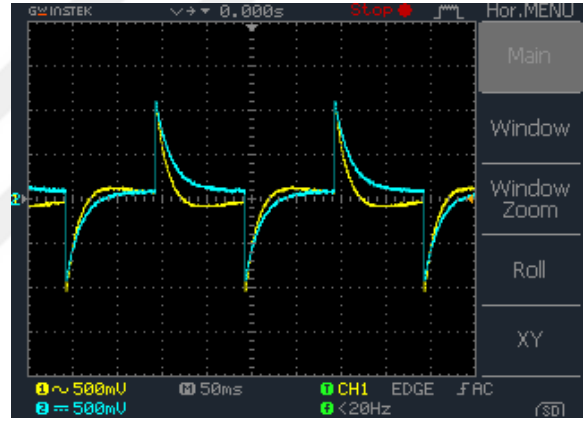
Şekil 6.22. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2\text{ V}$ ) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C\text{-}M_{\text{ileri}}\text{-}R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi

Şekil 6.23 ve Şekil 6.24 sırasıyla,  $C\text{-}M_{\text{ileri}}\text{-}R_S$  devresinin 1 V ve 2 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilimlerin ekran görüntülerini içermektedir. 1 V ve 2 V saat sinyali ile beslenen  $C\text{-}M_{\text{ileri}}\text{-}R_S$  devresi deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde

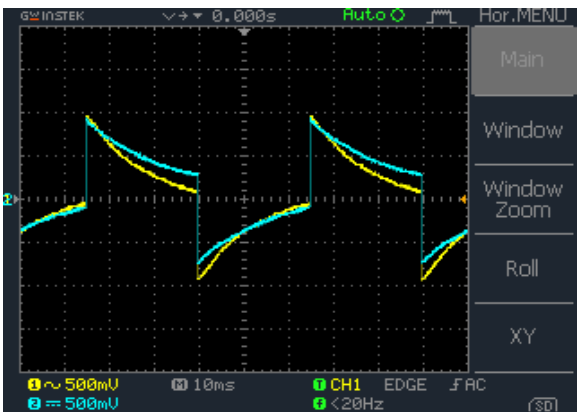
aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Akımın ters yönde akmasının nedeni yedinci bölümde elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak incelenecektir. Frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. D2 düğümü ile direnç gerilimi üst üste bindirilemediğinden memristörün direncinin zamanla değiştiği Şekil 6.23.c ve Şekil 6.24.c'den görülebilir. Şekil 6.23.d ve Şekil 6.24.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim karakteristiğinin, direnç gerilim karakteristiğiyle uyumunun arttığı, yani memristörün nonlinear akım yönüne bağlı bir direnç gibi davrandığı gözlenebilmektedir. Tungsten tabanlı memristör yüksek frekanslarda direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlinear bir direnç gibi davranmaktadır.



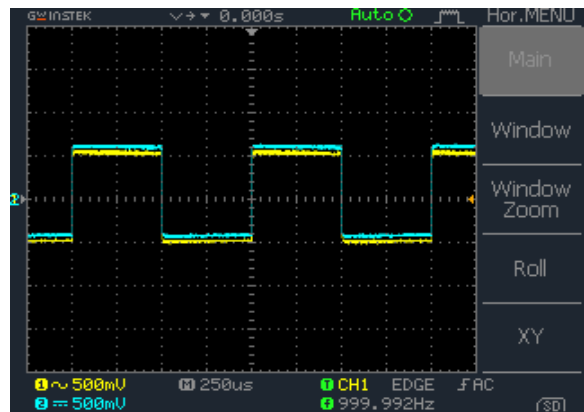
(a)



(b)

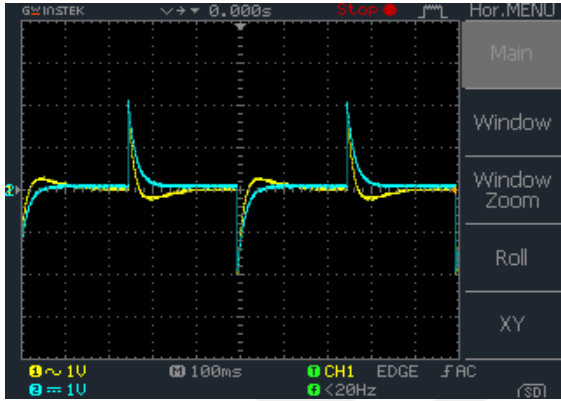


(c)

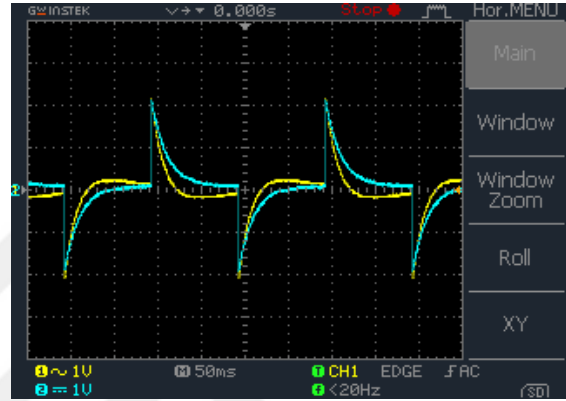


(d)

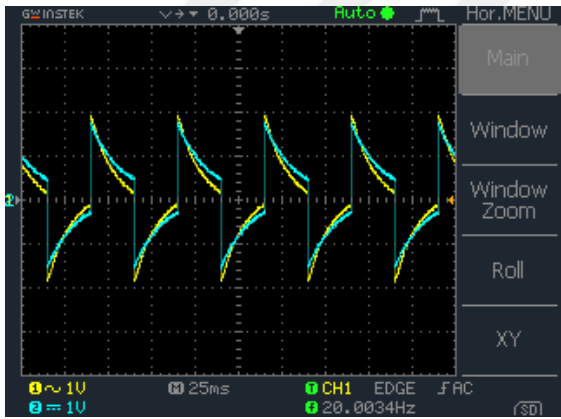
Şekil 6.23. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi



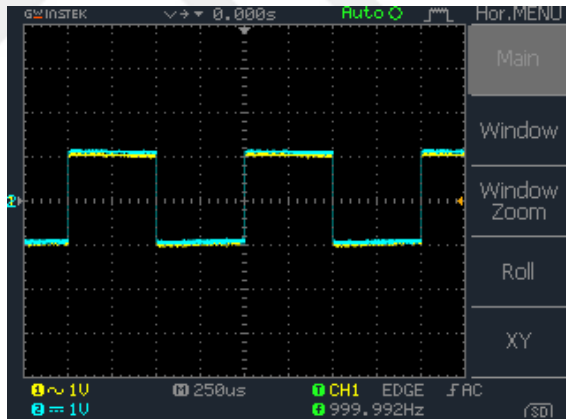
(a)



(b)



(c)



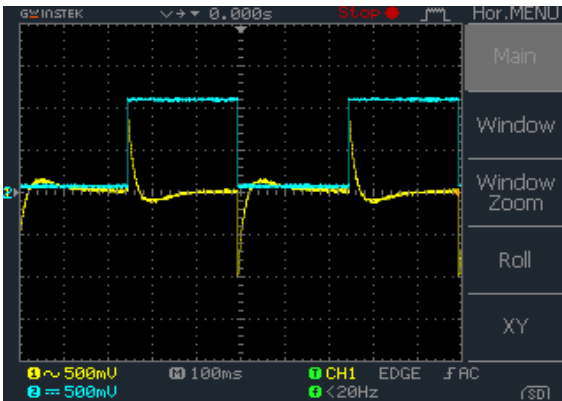
(d)

Şekil 6.24. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

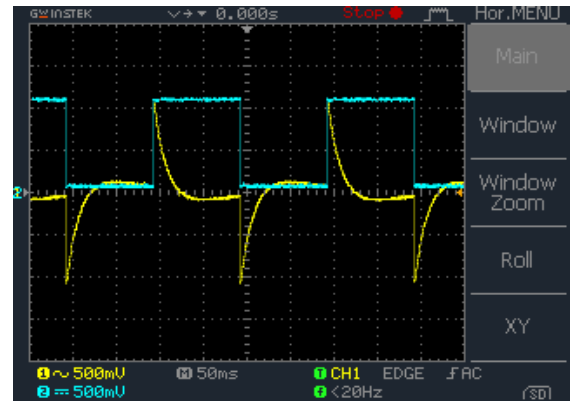
Bu deneyler, farklı tepe değerlerine sahip saat sinyali kaynağı kullanılarak, C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> devresi için tekrar edilmiştir. C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> devresinde olduğu gibi, hem kondansatörün şarj-deşarjı hemde memristör-direnç davranışları incelenmiş ve kayıt edilmiştir. Bu ekran kayıtları Şekil 6.25 ve Şekil 6.28 arasında verilmiştir. İncelenen C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> devreleri için de C-M<sub>ileri</sub>-

$R_S$  devrelerinde yapılan yorumlara benzer yorumlar yapmak mümkündür. Yüksek frekanslarda, kondansatör devrede bir kısa devre gibi davranmakta ve memristörün davranışı nonlinear bir dirence benzemektedir.

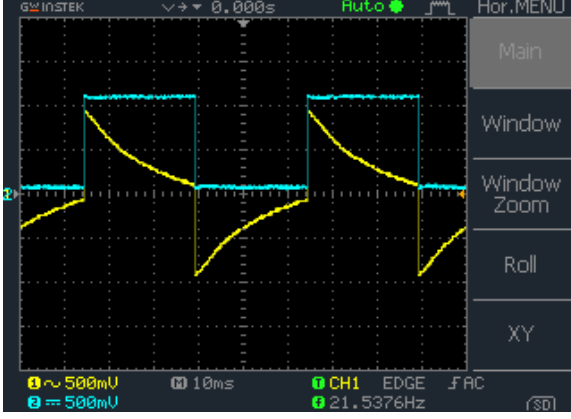
Şekil 6.25 ve Şekil 6.26 sırasıyla,  $C-M_{Ters}-R_S$  devresinin 1 V ve 2 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj durumu esnasında kaydedilen ekran görüntülerini içermektedir. Bu devrenin deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Akımın ters yönde akmasının nedeni yedinci bölümde elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak incelenecektir. Frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. Kaynak gerilimi ideal bir kare dalga değildir bunun nedeni kaynağın iç direnci olarak düşünülmüştür. Bir kondansatörün kapasitif reaktansı frekansla ters orantılı olduğundan, yüksek frekanslarda kapasitif reaktans değeri oldukça küçük olacağı için kondansatör kısa devre gibi düşünülebilir. Şekil 6.25.d ve Şekil 6.26.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça, kondansatör devrede kısa devreymiş gibi davranırken, Tungsten tabanlı memristör, direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlinear bir direnç gibi davranmaktadır.



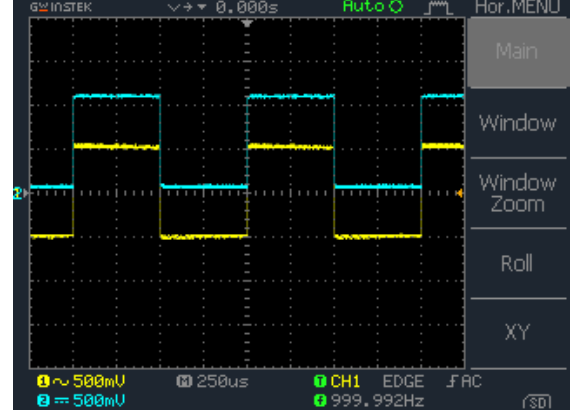
(a)



(b)

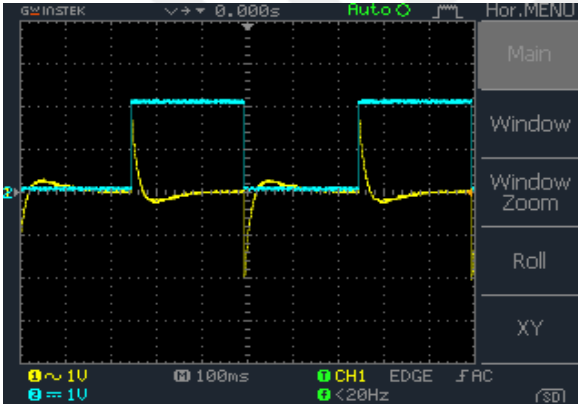


(c)

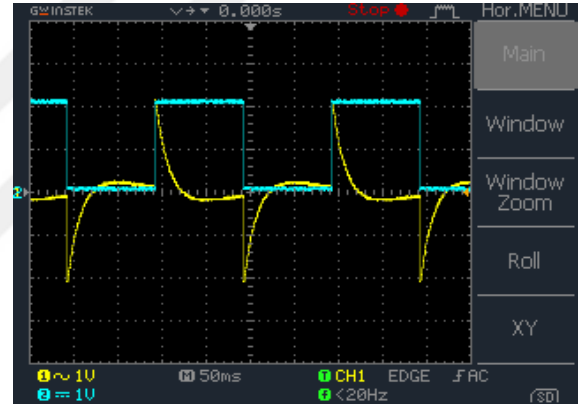


(d)

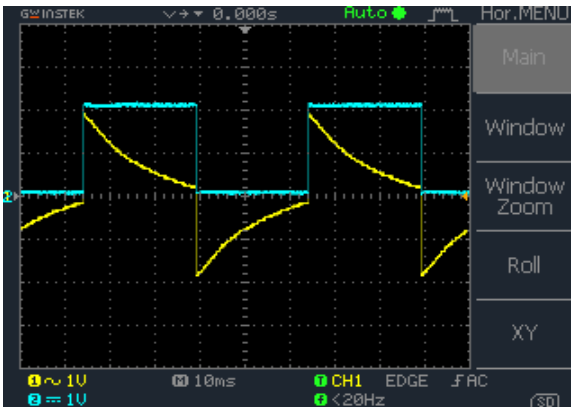
Şekil 6.25. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi



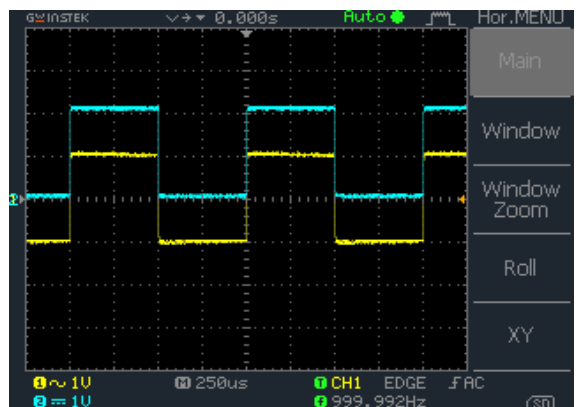
(a)



(b)



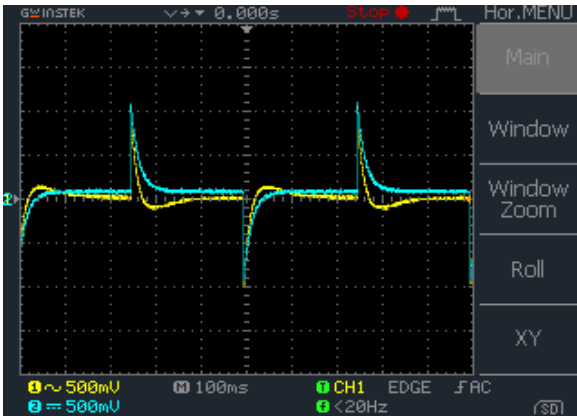
(c)



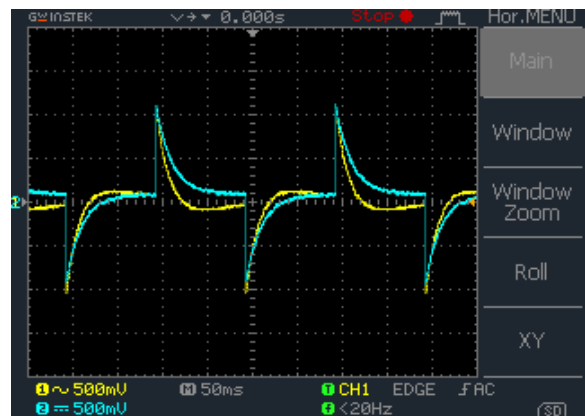
(d)

Şekil 6.26. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C- $M_{Ters}$ - $R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi

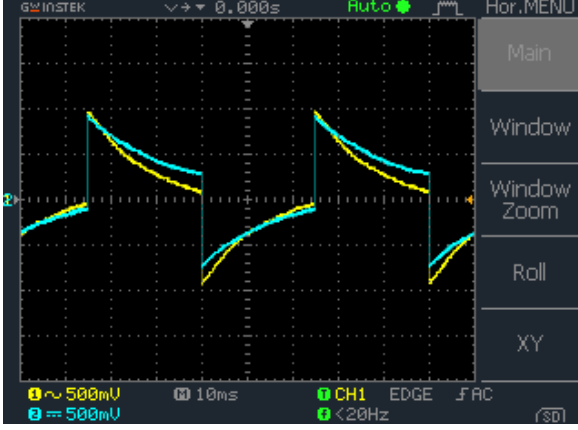
Şekil 6.27 ve Şekil 6.28 sırasıyla, C- $M_{Ters}$ - $R_S$  devresinin 1 V ve 2 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilimlerin ekran görüntülerini içermektedir. Bu devrenin deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. D2 düğümü ile direnç gerilimi üst üste bindirilemediğinden memristörün direncinin zamanla değiştiği Şekil 6.27.c ve Şekil 6.28.c'den görülebilir. Şekil 6.27.d ve Şekil 6.28.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim karakteristiğinin, direnç gerilim karakteristiğiyle uyumunun arttığı, yani memristörün bir nonlinear bir direnç gibi davrandığı gözlemlenmektedir. Tungsten tabanlı memristör, direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlinear bir direnç gibi davranmaktadır.



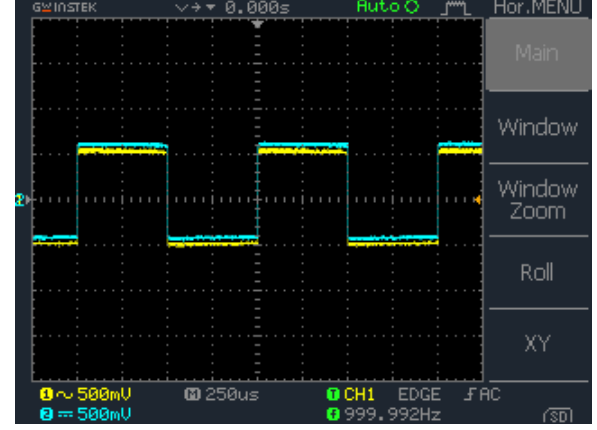
(a)



(b)

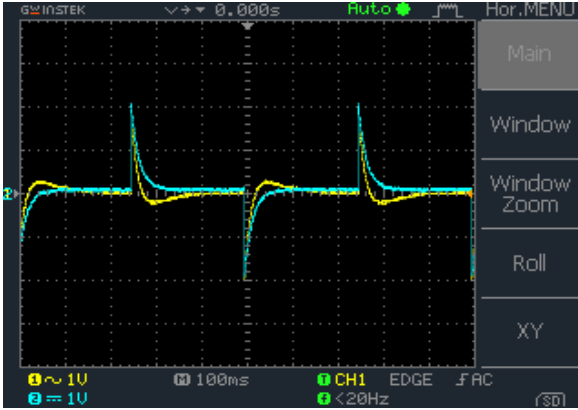


(c)

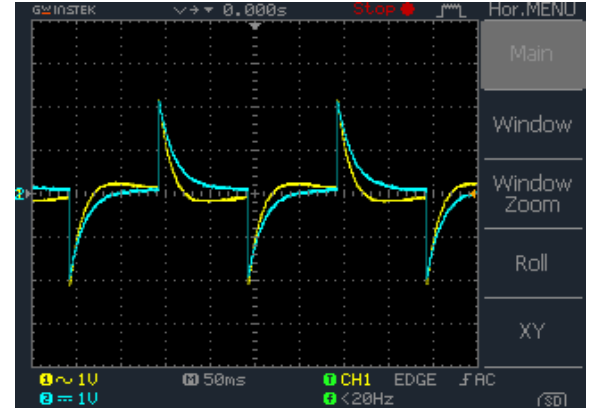


(d)

Şekil 6.27. Tepe değeri 1 Volt olan saat sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

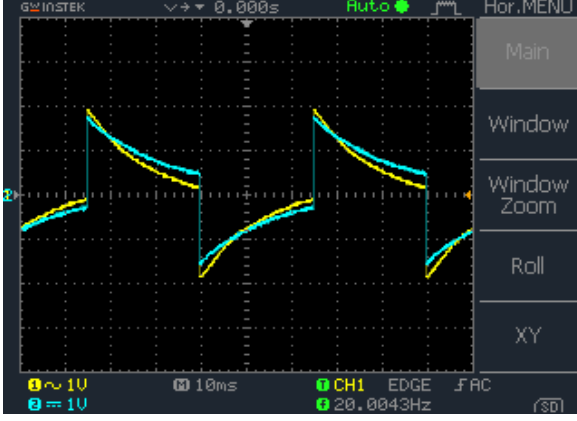


(a)

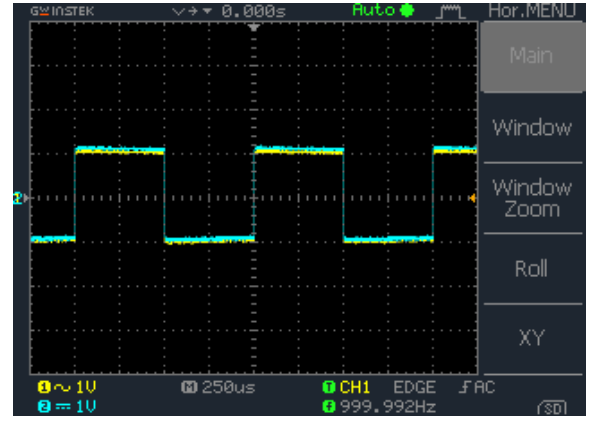


(b)





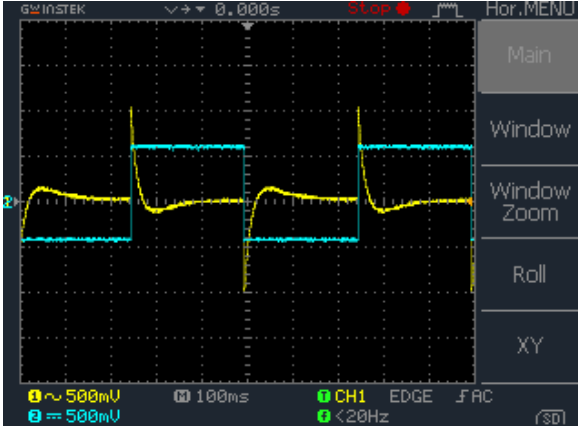
(c)



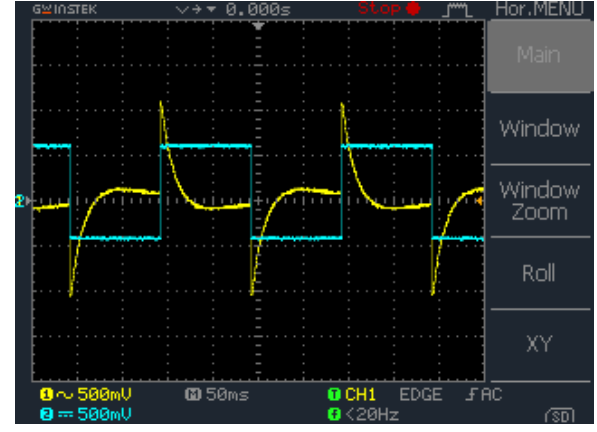
(d)

Şekil 6.28. Tepe değeri 2 Volt olan saat sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{Ters}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

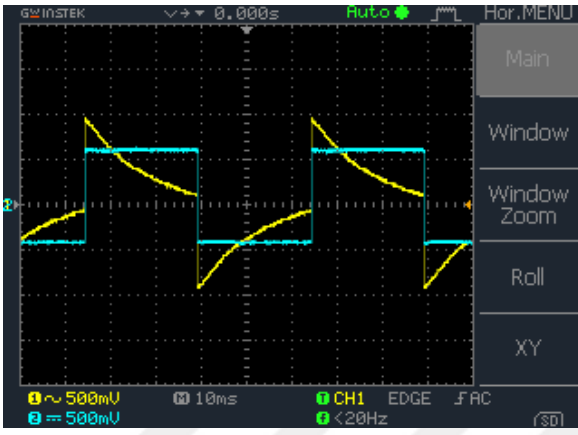
Şekil 6.29 ve Şekil 6.30 sırasıyla,  $C-M_{ileri}-R_S$  devresinin 1 V ve 2 V tepe değerli kare dalga sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj ve deşarj durumu esnasında kaydedilen ekran görüntülerini içermektedir. Bu devrenin deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Saat sinyali kaynağındaki sonuçlara benzer şekilde frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. Kaynak gerilimi ideal bir kare dalga değildir bunun nedeni kaynağın iç direnci olarak düşünülmüştür. Bir kondansatörün kapasitif reaktansı frekansla ters orantılı olduğundan, yüksek frekanslarda kapasitif reaktans değeri oldukça küçük olacağı için kondansatör kısa devre gibi düşünülebilir. Şekil 6.29.d ve Şekil 6.30.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça, kondansatör devrede kısa devreymiş gibi davranırken, Tungsten tabanlı memristör, direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlineer bir direnç gibi davranmaktadır.



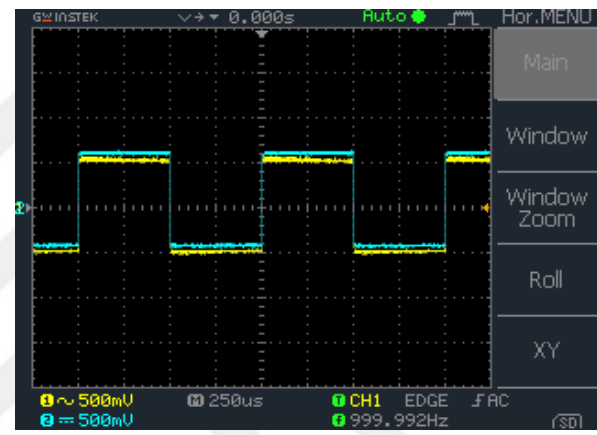
(a)



(b)

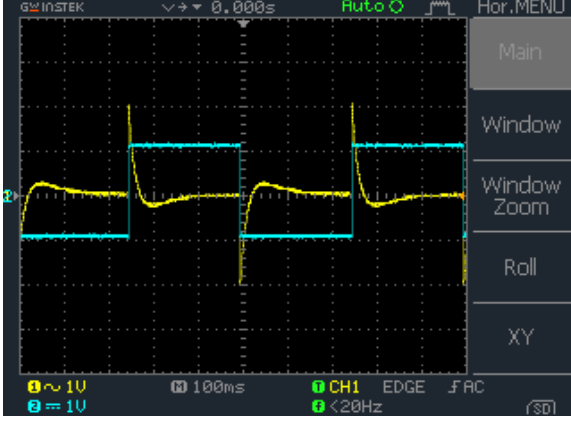


(c)

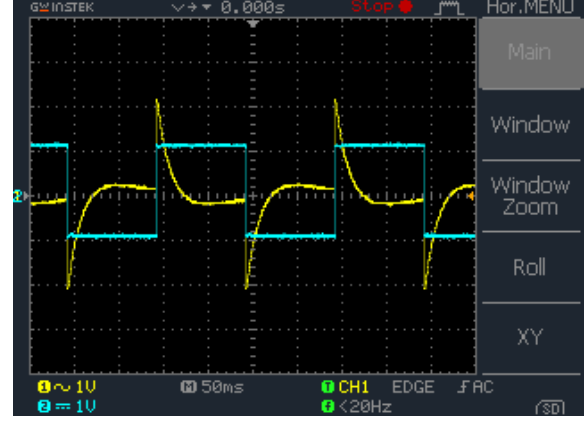


(d)

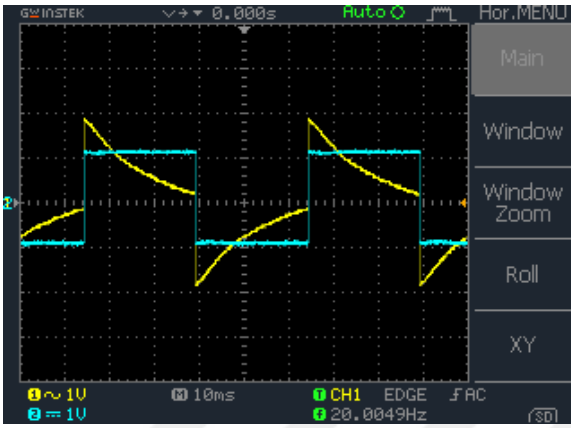
Şekil 6.29. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi



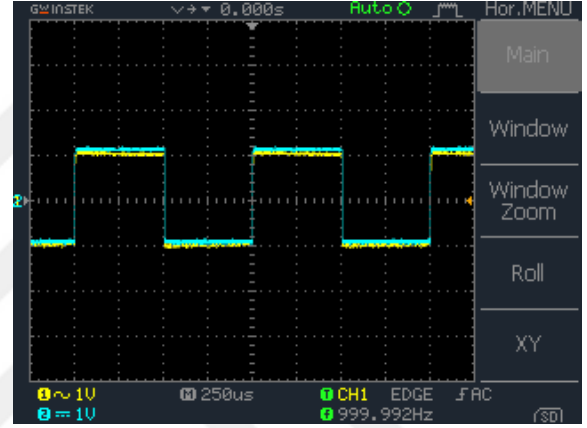
(a)



(b)



(c)

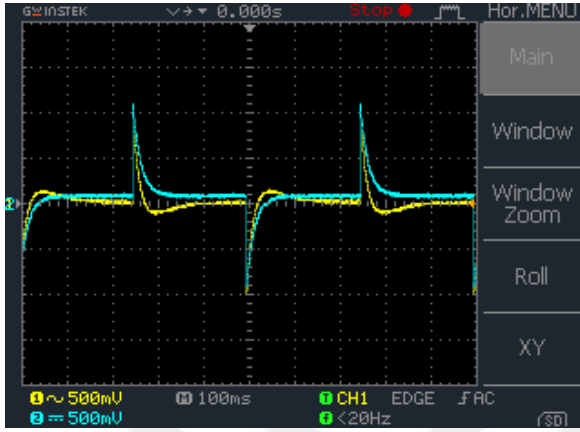


(d)

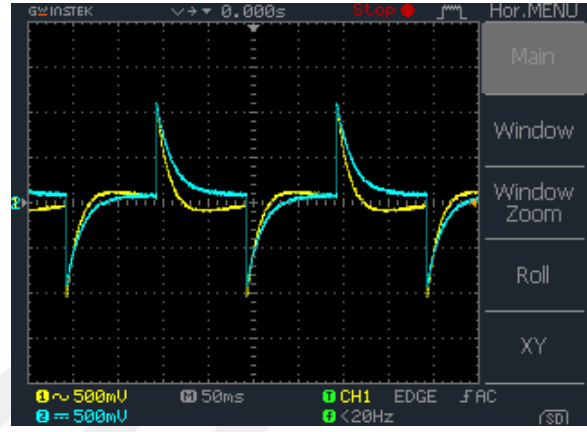
Şekil 6.30. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi

Şekil 6.31 ve Şekil 6.32 sırasıyla, C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> devresinin 1 V ve 2 V tepe değeri saat sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilimlerin ekran görüntülerini içermektedir. Bu devrenin deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. D2 düğümü ile direnç gerilimi üst üste bindirilemediğinden memristörün direncinin zamanla değiştiği Şekil 6.31.c ve Şekil 6.32.c'den görülebilir. Şekil 6.31.d ve Şekil 6.32.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim karakteristiğinin, direnç gerilim karakteristiğiyle uyumunun arttığı, yani memristörün bir nonlineer bir direnç gibi davrandığı

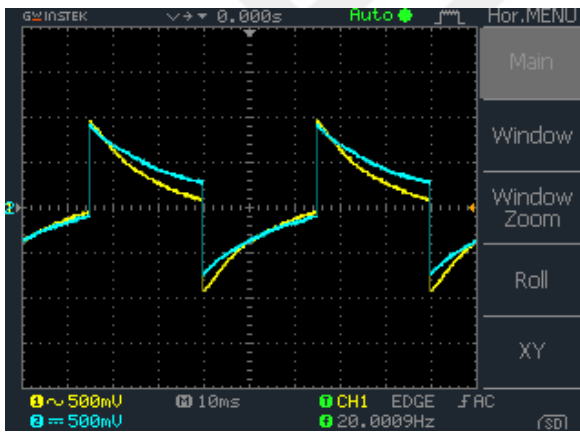
gözlenebilmektedir. Tungsten tabanlı memristör, direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlinear bir direnç gibi davranmaktadır.



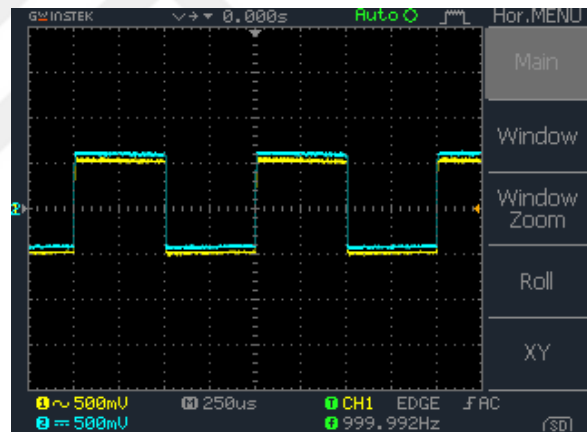
(a)



(b)

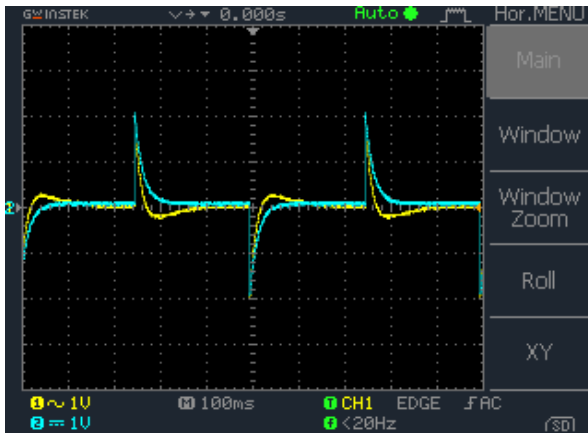


(c)

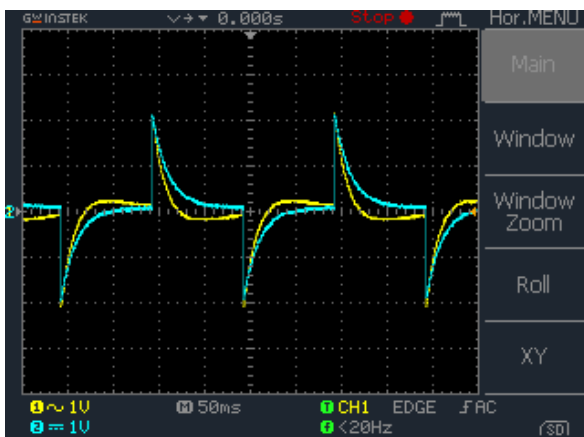


(d)

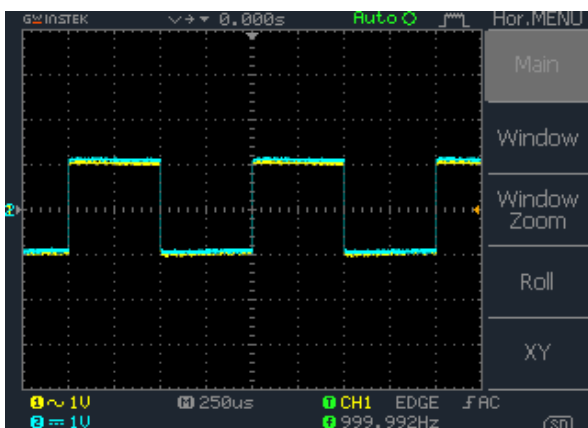
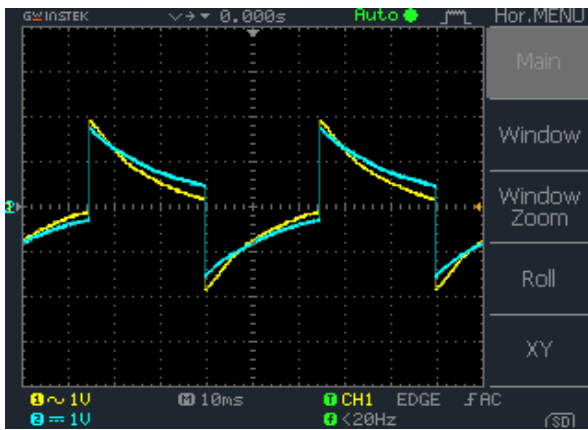
Şekil 6.31. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü  $C-M_{\text{ileri}}-R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi



(a)



(b)



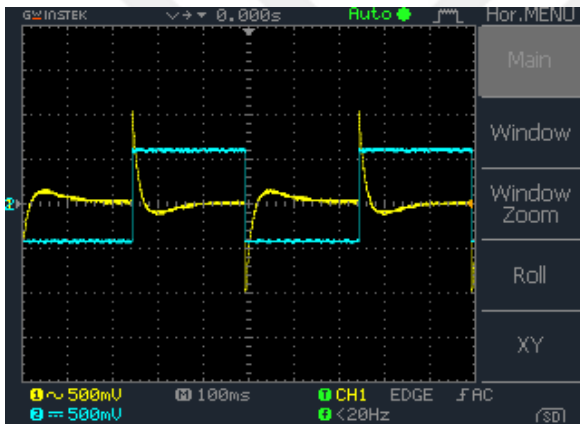
(c)

(d)

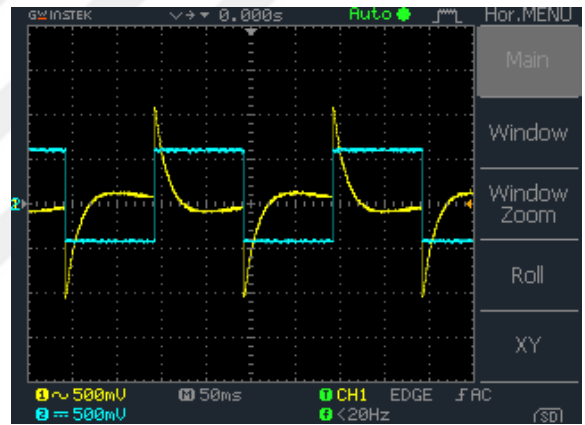
Şekil 6.32. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

Şu ana kadar Tungsten tabanlı memristörlü, kare dalga sinyali kaynağı kullanılarak yapılan C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> devresi deneyleri, C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> devresi için tekrar edilmiştir. C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> devresinde olduğu gibi, hem kondansatörün şarj-deşarjı hemde memristör-direnç davranışları incelenmiş ve kayıt edilmiştir. Bu ekran kayıtları Şekil 6.33 ve Şekil 6.36 arasında verilmiştir. İncelenen C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> devreleri için de C-M<sub>ileri</sub>-R<sub>S</sub> devrelerinde yapılan yorumlara benzer yorumlar yapmak mümkündür.

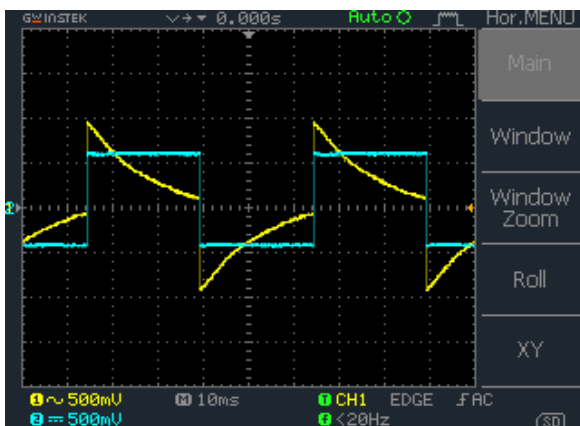
Şekil 6.33 ve Şekil 6.34 sırasıyla, C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> devresinin 1 V ve 2 V tepe değerli kare dalga sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, kondansatörün memristör ve direnç üzerinden şarj vedeşarj durumu esnasında kaydedilen ekran görüntülerini içermektedir. Bu devrenin deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Saat sinyali kaynağındaki sonuçlara benzer şekilde frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. Bir kondansatörün kapasitif reaktansı frekansla ters orantılı olduğundan, yüksek frekanslarda kapasitif reaktans değeri oldukça küçük olacağı için kondansatör kısa devre gibi düşünülebilir. Şekil 6.33.d ve Şekil 6.34.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça, kondansatör devrede kısa devreymiş gibi davranırken, Tungsten tabanlı memristör, direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlinear bir direnç gibi davranmaktadır.



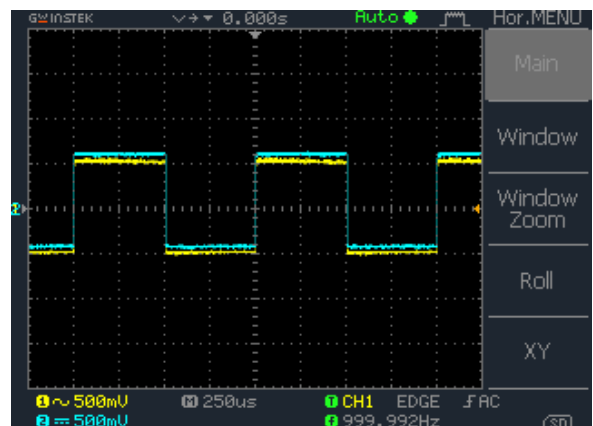
(a)



(b)

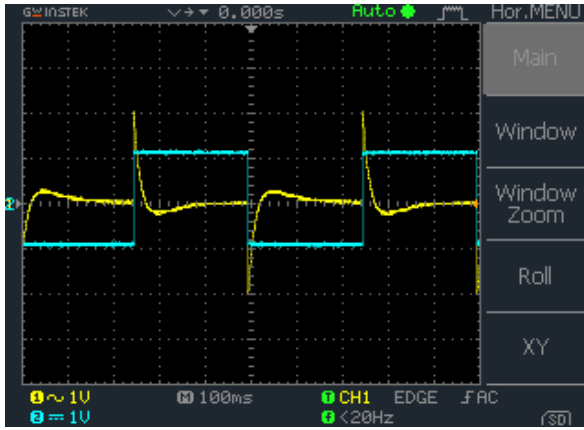


(c)

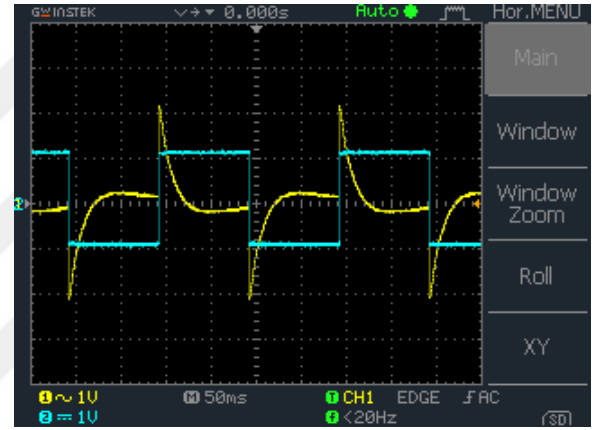


(d)

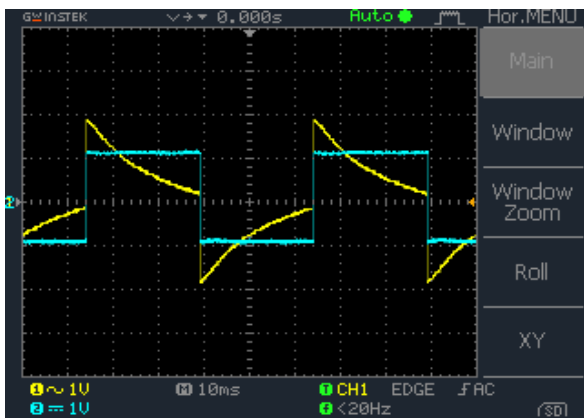
Şekil 6.33. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C- $M_{Ters}$ - $R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi



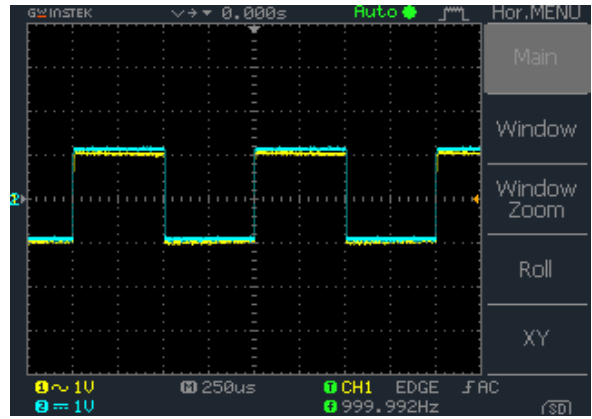
(a)



(b)



(c)

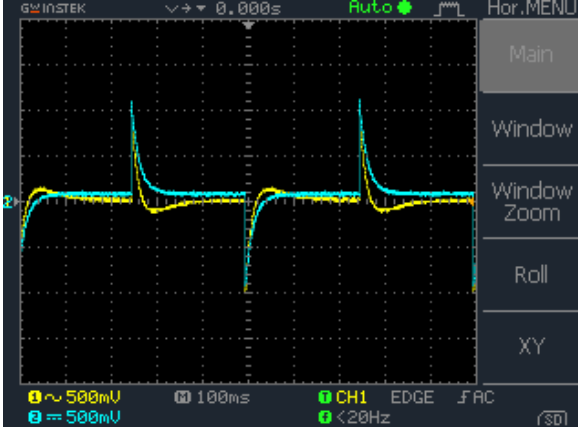


(d)

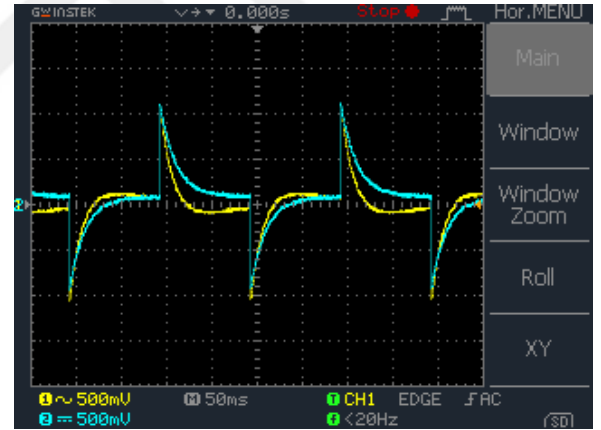
Şekil 6.34. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C- $M_{Ters}$ - $R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında kaynak gerilimi ve koruma direnci geriliminin zamanla değişimi



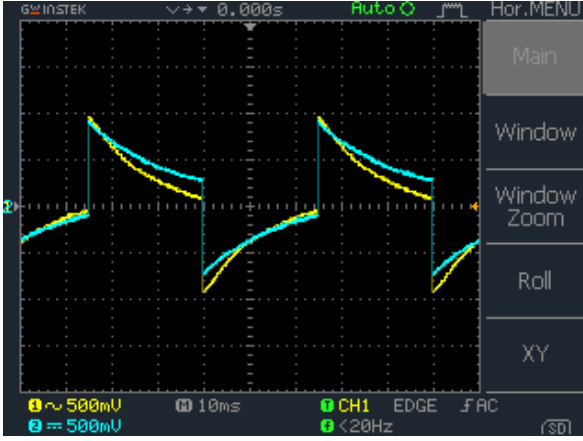
Şekil 6.35 ve Şekil 6.36 sırasıyla,  $C-M_{Ters}-R_S$  devresinin 1 V ve 2 V tepe değerli saat sinyali kaynağı ile beslenirken dijital osiloskop ile kaydedilen, D2 noktası ve koruma direnci üzerindeki gerilimlerin ekran görüntülerini içermektedir. Bu devrenin deney çıktıları incelendiğinde, 2 Hz ve 5 Hz düşük frekans değerlerinde direnç üzerinden akan akım değerinin (CH1) azalarak, 50-100 ms arası bir süre için ters yönde aktıktan sonra tekrar sıfır değerini aldığı gözlemlenmiştir. Frekans 20 Hz'e çıktığında devre akımı negatife gidecek zaman bulamamaktadır yani yönü değişmemektedir. D2 düğümü ile direnç gerilimi üst üste bindirilemediğinden memristörün direncinin zamanla değiştiği Şekil 6.35.c ve Şekil 6.36.c'den görülebilir. Şekil 6.35.d ve Şekil 6.36.d'de görüldüğü gibi kaynak frekansı 1 kHz'e yaklaştıkça memristör ve direnç üzerindeki toplam gerilim karakteristiğinin, direnç gerilim karakteristiğiyle uyumunun arttığı, yani memristörün bir nonlinear bir direnç gibi davrandığı gözlenebilmektedir. Tungsten tabanlı memristör, direncini ya da durum değişkeninin değerini değiştirecek zaman bulamamaktadır ve her yönde farklı akım çektiğinden nonlinear bir direnç gibi davranmaktadır.



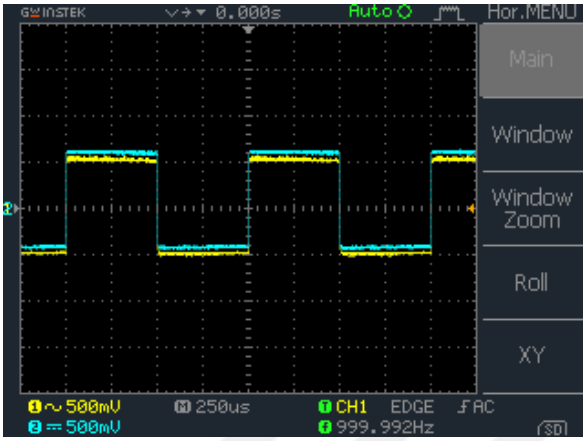
(a)



(b)

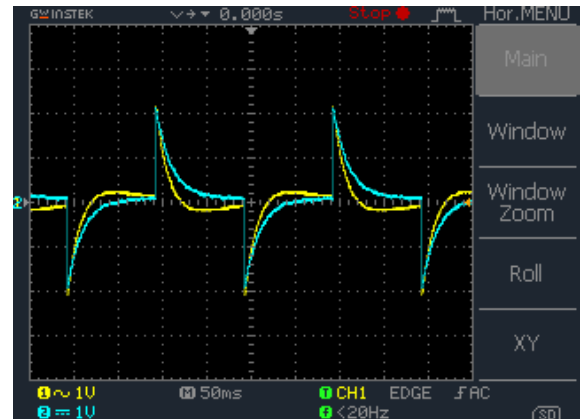
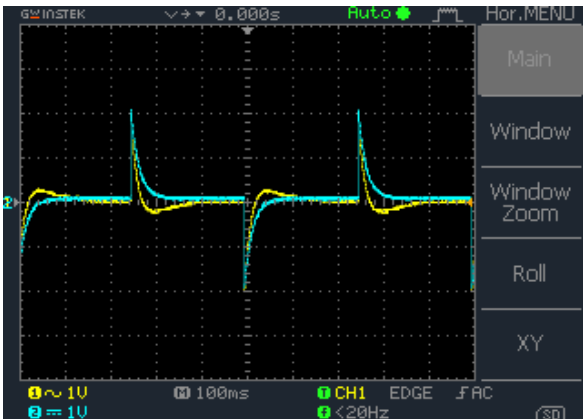


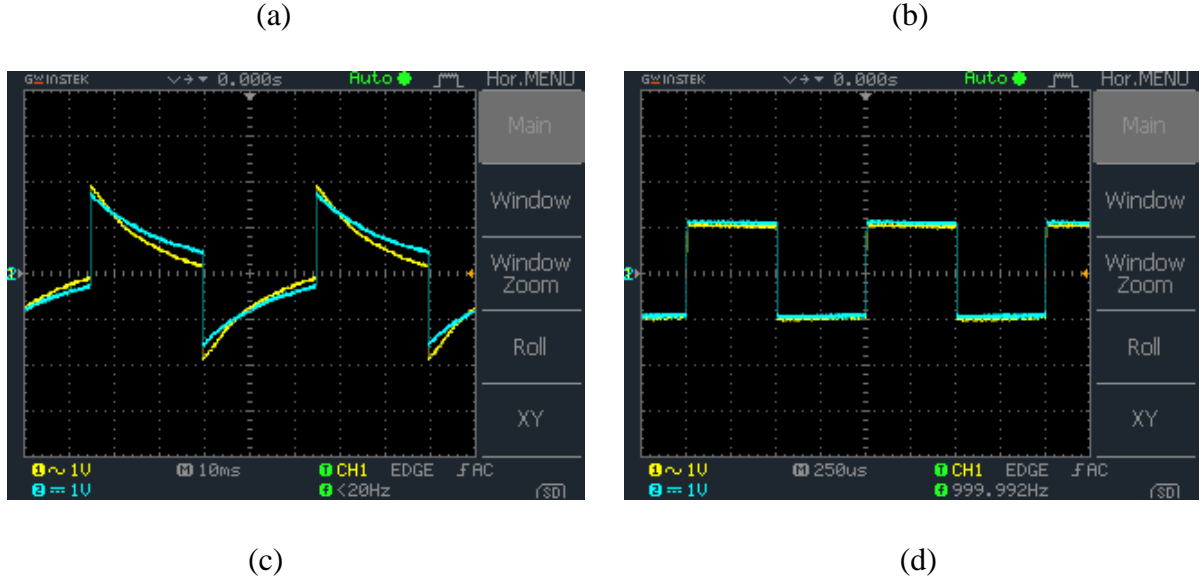
(c)



(d)

Şekil 6.35. Tepe değeri 1 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=1$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C- $M_{Ters}$ - $R_S$  seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi





Şekil 6.36. Tepe değeri 2 Volt olan kare dalga sinyali ( $V_p=2$  V) ile beslenen Tungsten tabanlı memristörlü C-M<sub>Ters</sub>-R<sub>S</sub> seri devresinin; a) 2 Hz, b) 5 Hz, c) 20 Hz ve d) 1 kHz kaynak frekanslarında D2 noktasının ve direncin geriliminin zamana göre değişimi

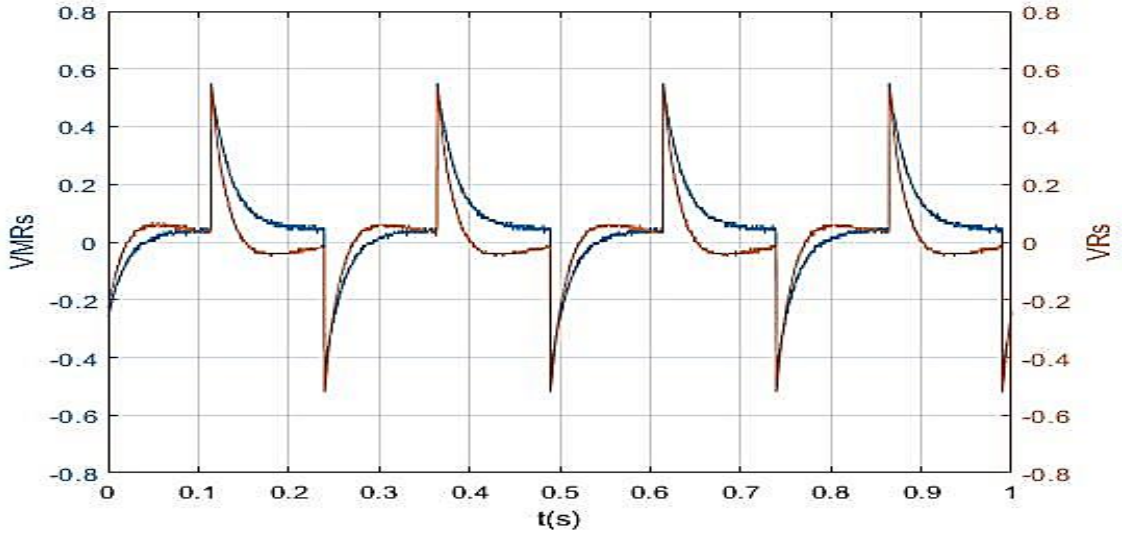
Yüksek frekanslarda, kondansatör devrede bir kısa devre gibi davranmakta ve memristörün davranışı nonlineer bir dirence benzemektedir. Yapılan tüm deneylerde devredeki akım ve gerilim dalga şekillerinin hemen hemen yarım dalga simetrisine sahip olduğu görülebilir. Tungsten memristör Karbon memristörle karşılaştırıldığında Biolek modeline uymasa da stokastik bir davranış göstermediği görülebilir.

## 7. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI

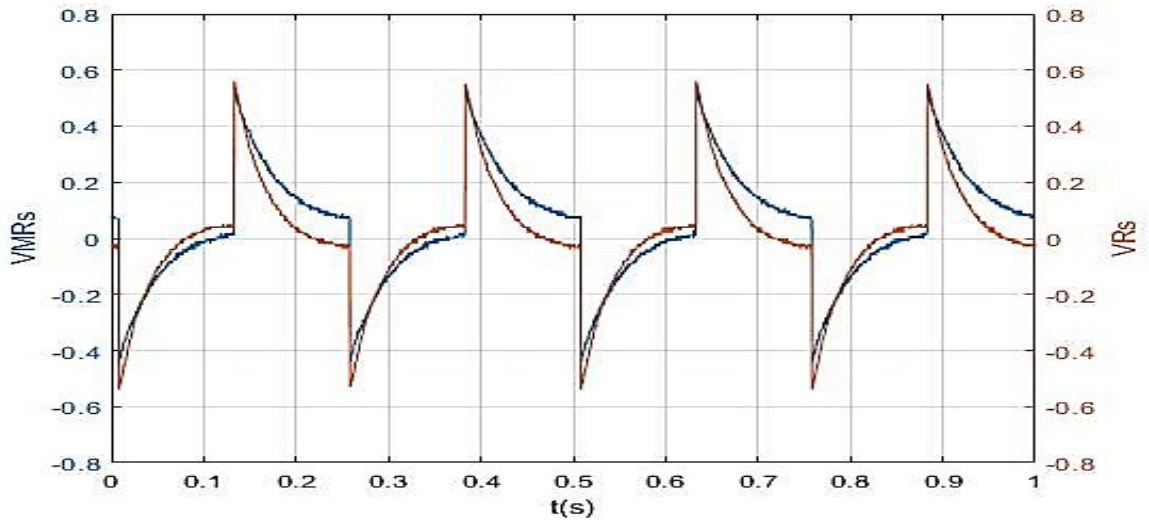
Deneylerde kullanılan osiloskop deney datalarının excell dosyası olarak kaydedilmesine izin vermektedir. MATLAB programında bu deney datalarını işlemek mümkündür. Bu bölümde 5. bölümde Biolek modeli kullanılarak çizdirilen C-M-R devre değişkenlerinin akım ve gerilim grafikleri ile 6. bölümdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması planlanmıştır. Ama maalesef deneysel sonuçlar yorumlandığında bunun mümkün olmadığı görüldü.

6. bölümde düşük frekanslarda ölçülen akımların periyodik olmaması ve stokastik bir değişim sergilemesi (artıp azalması), Karbon tabanlı memristörün, Stokastik bir model olmayan Biolek modeli ile modellenmeyeceğini göstermektedir. Yani 5. bölümde Biolek modeli için yapılan analizler, Karbon tabanlı memristörü modellemek için kullanılamaz. Bundan dolayı 5. bölümdeki analiz sonuçları ile Karbon tabanlı memristörün deney sonuçları karşılaştırılamamaktadır. Bu sebeple, aynı deneyler Tungsten tabanlı memristör ile tekrarlandı ve ölçüm sonuçları değerlendirildi. Değerlendirmeler sonucunda Tungsten tabanlı memristörün Karbon tabanlı memristöre göre stokastik olmayan bir davranış sergilediği ve periyodik akım çektiği görülmüştür. Bu bölümdeki takip eden karşılaştırmalar Tungsten tabanlı memristör ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile yapılmıştır.

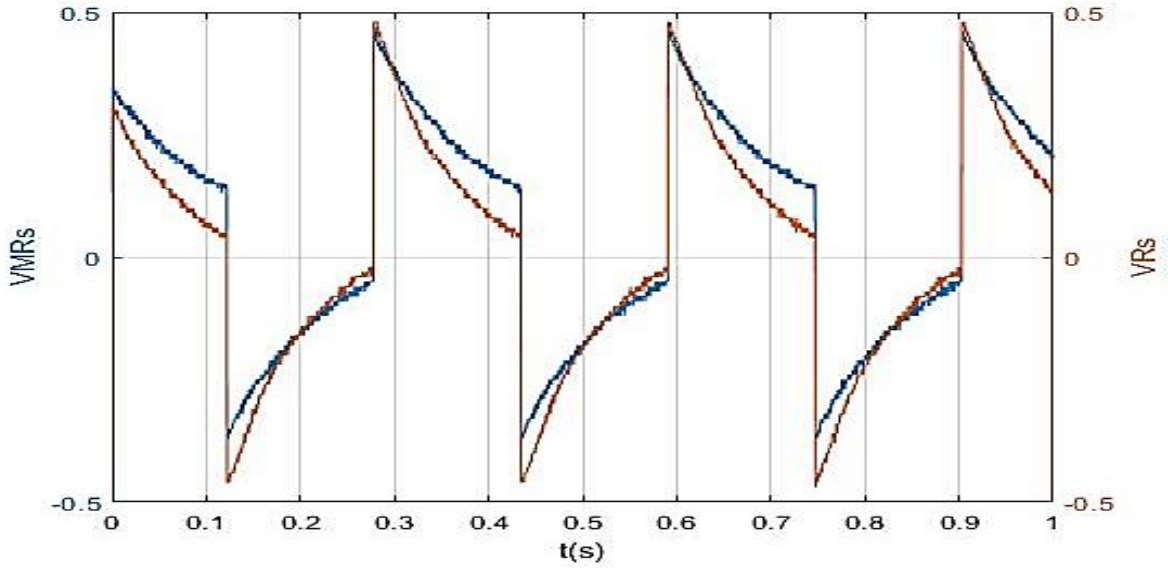
Tungsten tabanlı memristör ile yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen tepe değeri 1 V olan ve 5 Hz frekanslı kare dalga ile beslenen D2 düğümünün ve memristör koruma direnci geriliminin zamana göre değişimi, MATLAB programında (Bu deneyde kaydedilen Excell dosyası kullanılarak) yeniden çizdirilmiştir ve Şekil 7.1’de görülebilir. Burada beklenmedik bir durumla karşılaşmıştır. Direnç uçlarından ölçülen akım, D2 düğüm gerilimi pozitif iken negatife gitmektedir. Yani düşük frekanslarda Tungsten tabanlı memristör karmaşık ve umulmayan bir davranış sergilemektedir. Yüksek frekansta memristör gibi davranan sistemlerde kapasitif etkiler ortaya çıktığı bilinmektedir, fakat Tungsten memristör için düşük frekanslarda kapasitif etkilerin ortaya çıkması bildiğimiz kadarıyla daha önce rapor edilmemiştir ve Knowm firmasının kataloğunda da böyle bir bilgi mevcut değildir [33]. Yapılan ölçümlerde, kare dalga ile beslenen C-M-R devresinde, frekans 20 Hz civarlarında iken akımın negatife gitmesinin kaybolduğu gözlemlenmiştir. Grafiklerdeki değişikliklerin artan frekans ile değişiminin rahatça gözlenmesi için 10 Hz ve 20 Hz frekansta çizdirilen grafikler, sırasıyla Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’te verilmiştir.



Şekil 7.1. Tepe değeri 1 V olan 5 Hz frekansındaki Kare dalga ile beslenen D2 düğümünün ( $V_{MRs}$ ) ve memristör koruma direnci gerilimlerinin ( $V_{Rs}$ ) zamana göre değişimi

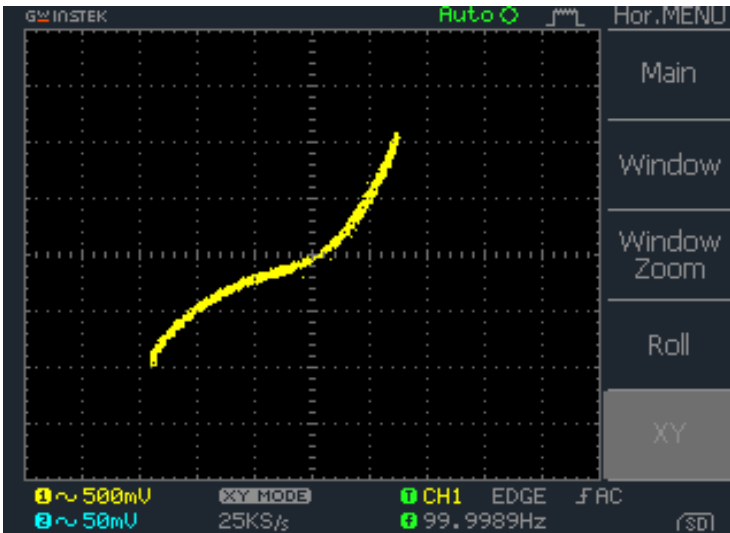


Şekil 7.2. Tepe değeri 1 V olan 10 Hz frekansındaki Kare dalga ile beslenen D2 düğümünün ( $V_{MRs}$ ) ve memristör koruma direnci gerilimlerinin ( $V_{Rs}$ ) zamana göre değişimi



Şekil 7.3. Tepe değeri 1 V olan 20 Hz frekansındaki Kare dalga ile beslenen D2 düğümünün ( $V_{MRs}$ ) ve memristör koruma direnci gerilimlerinin ( $V_{Rs}$ ) zamana göre değişimi

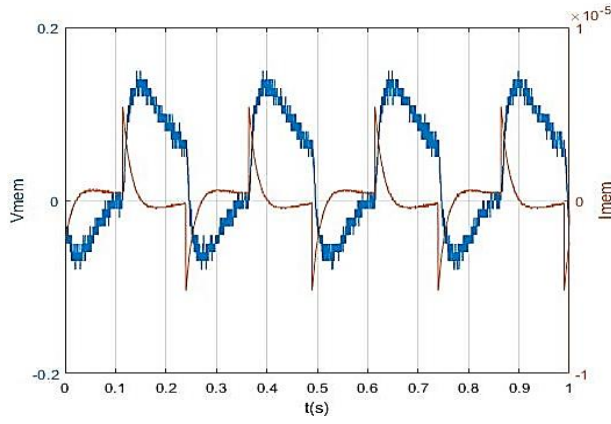
Yüksek frekanslarda bir memristörün histeresis eğrisinin memristör davranışından saparak, lineer ya da nonlinear bir direnç gibi davrandığı bilinmektedir. Şekil 7.4'te görülen Tungsten memristörün 100 kHz'de çizdirilen histeresis eğrisi bu memristörün nonlinear bir direnç gibi çalıştığını göstermektedir. Bu çalışmada, Tungsten tabanlı bir memristörün yüksek frekanslarda olduğu gibi düşük frekanslarda da ideal memristör davranışından saptığı görülmüştür.



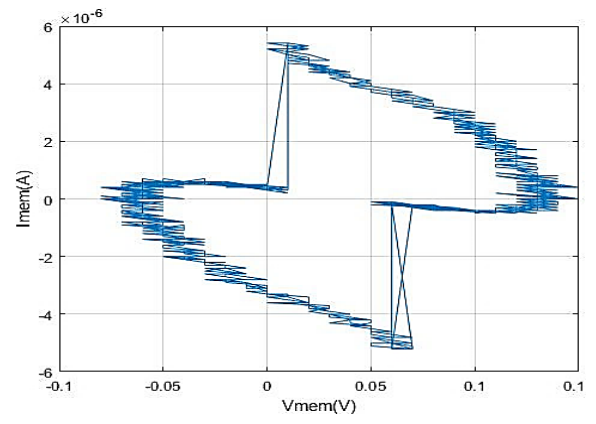
Şekil 7.4. Tungsten memristörün 100 kHz frekansında çizdirilen histeresis eğrisi

1 V tepe değerli kare dalga kaynağı ile beslenen ileri yönlü C-M-R devresinin deneyler esnasında kaydedilen Excell dosyaları kullanarak, Matlab programında 5, 10 ve 20 Hz için Tungsten tabanlı memristörün akımı ve gerilimi ölçülen düğüm gerilimlerinden hesaplanmıştır. Memristörün akım ve gerilimin zamana göre değişimleri ve histeresis eğrileri çizdirilmiştir. Bu grafikler şekil 7.5'te verilmiştir. Bu akım ve gerilim verisi kullanılarak aynı zamanda şekil 7.5'te bu memristörün 5, 10 ve 20 Hz frekanslarında Lissajous eğrileri ya da V-I karakteristikleri de çizdirilmiştir.

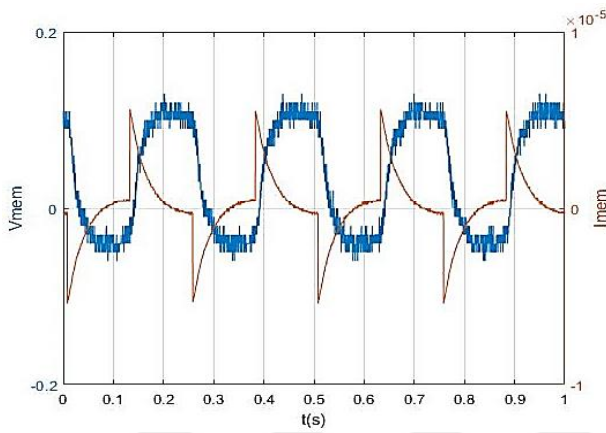




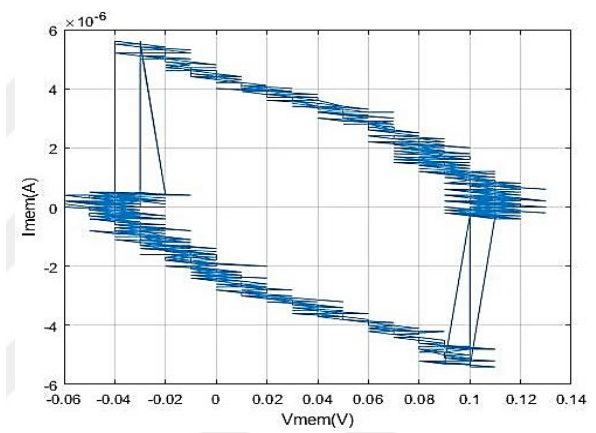
(a)



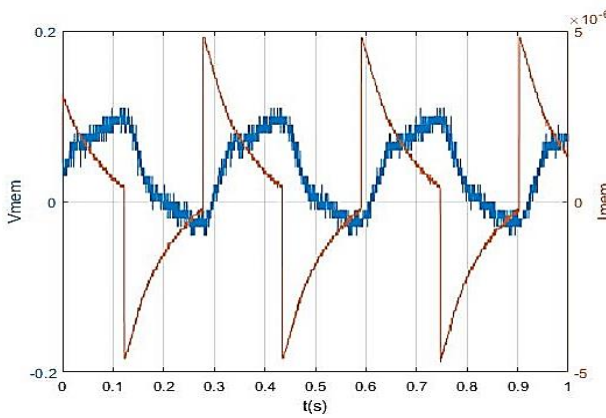
(b)



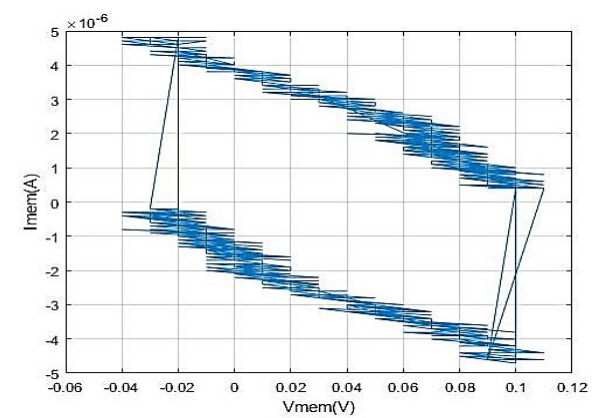
(c)



(d)



(e)

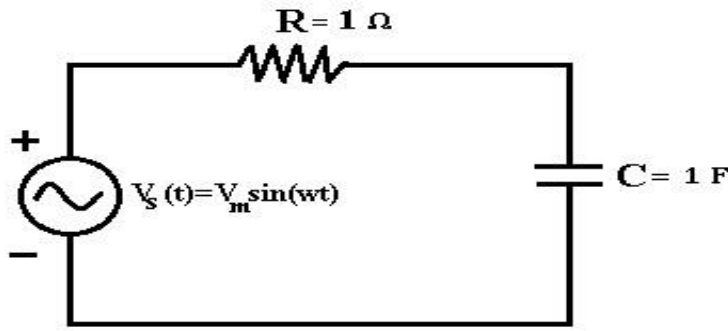


(f)

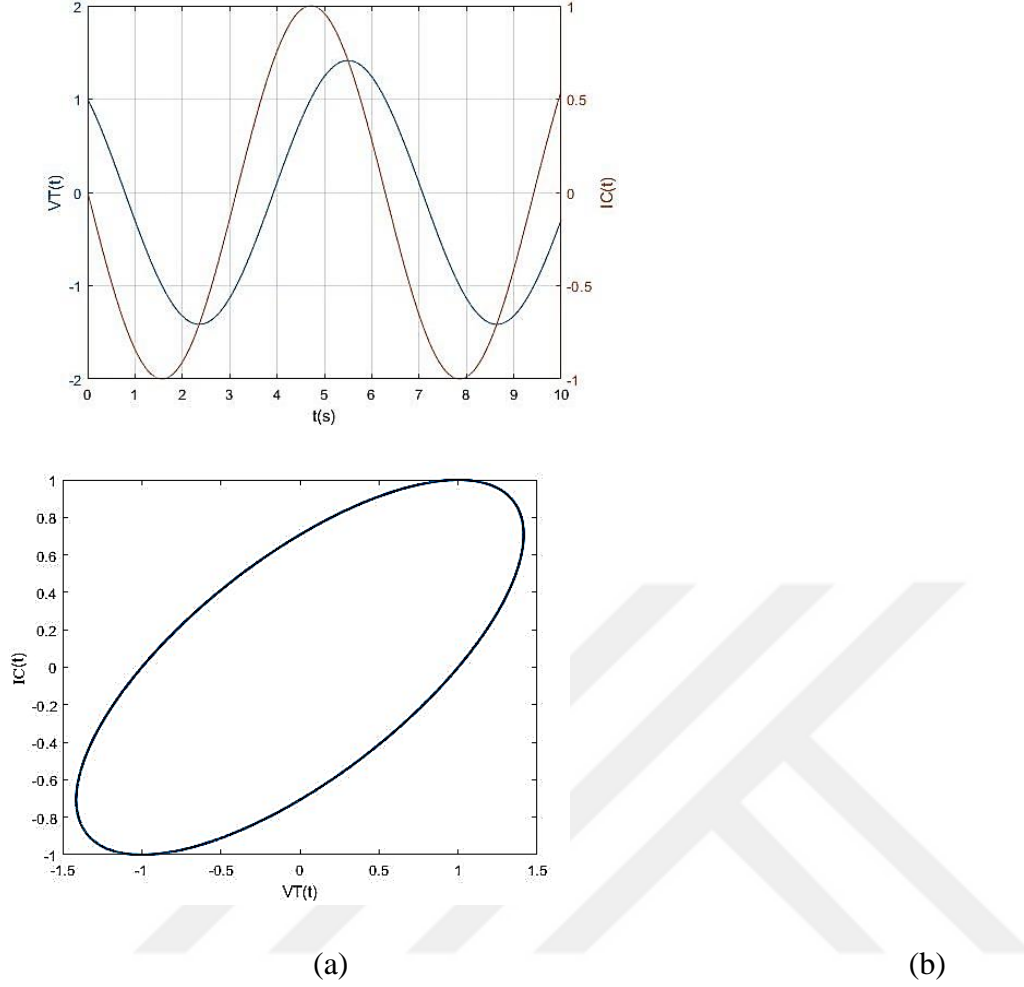
Şekil 7.5. Tepe değeri 1 V olan a) 5 Hz, c) 10 Hz ve e) 20 Hz frekanslarındaki Kare dalga ile beslenen Tungsten memristörün geriliminin ve akımının zamana göre değişimi ve b) 5 Hz, d) 10 Hz ve f) 20 Hz frekanslarındaki histeresis eğrileri (V-I grafikleri)



Lissajous eğrileri periyodik iki sinyalin X-Y düzlemindeki davranışlarının grafiğidir. Bu davranışlar iki sinyalin genliğine, açısal frekansına ve  $t=0$  anındaki faz farkına bağlı olarak değişmektedir. Eğriler bu değişime göre; bir doğruya, bir çembere, bir elipse veya daha karışık şekillere dönüşmektedir. Şekil 7.6'da görülen lineer zamanla değişmeyen R-C devresine ait akım-gerilim grafikleri ve devrenin Lissajous eğrisi Şekil 7.7'de verilmiştir. Şekil 7.7'de verilen Lissajous eğrileri, Şekil 7.5.b, Şekil 7.5.d ve Şekil 7.5.f'de verilen histeresis eğrileri ile Kartezyen koordinat sisteminin dört bölgesinde de bulunmalarından dolayı benzerdir. Bu Tungsten tabanlı memristör içinde yük ya da enerji depo eden kapasitif etkilerin olduğunu göstermektedir. Ama Tungsten tabanlı memristörün Lissajous eğrileri elips şeklinde olmadığından 5 Hz, 10 Hz ve 20 Hz frekans değerlerinde lineer bir R-C devresinden farklı bir kapasitif davranış yani nonlineer bir kapasitif davranış sergilediği görülmüştür.



Şekil 7.6. Lineer zamanla değişmeyen bir R-C devresi



Şekil 7.7. Bir R-C devresinin a) akım ve gerilim grafiği ve b) V-I Lissajous eğrisi

Dr. Chua memristörü güç tüketen bir eleman olarak tanımlamıştır [1]. Bu tanıma göre bir memristörün histeresis eğrisi, Kartezyen koordinat sisteminde sadece 1. ve 3. bölgede olabilir [3,42]. Histeresis eğrisi incelendiğinde memristörün histeresis eğrisi Kartezyen koordinat sisteminde 2. ve 4. bölgeye geçmiş gözükmemektedir. Yani memristör gerilimi pozitif iken memristör akımı bir an için negatif olmaktadır. Ya da memristör gerilimi negatif iken memristör akımı bir an için pozitif olmaktadır. Bu durum Tungsten tabanlı memristörün çok düşük frekanslarda davranışının memristör ya da memristif sistem davranışından saptığını göstermektedir [3,42]. Bu sapma, düşük frekanslarda kapasitif etkilerin ortaya çıkması ile açıklanabilir. Bu kapasitif etkiler Biolek modelinde göz önünde bulundurulmamıştır [27]. Strukov, Joglekar, Zha, Prodramakis gibi memristör modellerinde de bu etki göz önünde bulundurulmamıştır [13, 26, 28.29]. Bu Biolek modelinin Tungsten tabanlı M-C boşalma ve dolma devrelerinin analizinde kesinlikle kullanılamayacağını göstermektedir. Ayrıca HP,

Joglekar, Zha, Prodramakis gibi memristör modelleri de bu analizde kullanılmaya uygun olmayacaktır.

Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler Tunsten tabanlı memristörlü bir C-M-R seri devresinde düşük frekanslarda kapasitif etkinin mevcut olduğunu ve memristör akımını bazen ters yönde akıtabilecek kadar kuvvetli olduğunu göstermektedir. Literatür taraması sonucunda Zhou ve Ark. yaptıkları bir çalışmada Gümüş-Karbon-Gümüş (Ag-Carbon-Ag) yapısının kapasitif etkili ve sıfır geçişsiz bir memristif sistem gibi davrandığını rapor etmişlerdir [58]. Literatürde bu davranışı sergileyen memristif sistemler ile ilgili sayılı çalışma mevcuttur [59-66]. Knowm firması tarafından üretilen Karbon tabanlı memristörler için böyle bir bilgi ilk defa bu çalışma ile verilmiştir.

Yapılan deneylerde kullanılan her iki memristörün (Karbon ve Tungsten tabanlı) Biolek modeli ile modellenip modellenemeyeceği ek olarak birkaç ölçüm daha yapılarak incelenmiştir. Bunlardan biri memristörlerin direnç değerinin ölçülmesidir. Memristör direnç değerleri ohmmetre ile ölçüldüğünde Tungsten tabanlı memristörün direnci bir yöne doğru 321 k $\Omega$  ve diğer yöne doğru 333 k $\Omega$ , olarak ölçülmüştür. Karbon tabanlı memristörün direnci ise bir yöne doğru 123,9 k $\Omega$  ve diğer yöne doğru 132,7 k $\Omega$ , olarak ölçülmüştür. Yani her iki memristör türünde de direnç değerleri iki yönde hemen hemen eşit okunmuştur. Yani hem Karbon hem de Tungsten tabanlı memristif sistemler bipolar bir davranış sergilemektedir. Biolek modelinde ise maksimum direncin minimum dirence oranının oldukça büyük olması beklenirdi. Bu durumun ve yapılan analizlerin Biolek ve diğer memristör modellerine uymaması, Karbon ve Tungsten tabanlı memristörlerin çok katmanlı bir içyapıya belki de (üretim sonucunda) Tümleyen Bağlı Rezistif Anahtarlama (Complementary Resistive Switches (CRS)) bağlantısına benzer bir iç yapıya sahip olmaları ya da onlar gibi davranmaları ile açıklanabilir. Tümleyen Bağlı Rezistif Anahtarlar hakkında daha çok bilgi [21, 67-68]'de bulunabilir. Kapasitif etkiyi gözönünde bulundurmak için, Tümleyen Bağlı Rezistif Anahtarlara paralel olarak kondansatörler de bağlanabilir. Bu kondansatörler lineer, nonlineer ya da memkapasitif özelliklere sahip olabilir. Bir doktora tezi çıkma potansiyeline sahip bu topoloji Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Knowm firması memristör sembolünü kutuplu bir elemanmış gibi çizmektedir. Fakat çalışmalar sonucunda elde edilen veriler (6. Bölümde yapılan ölçmeler) dikkate alındığında Knowm memristörünün bazen bipolar davranışta olduğu açıkça görünmektedir.



Şekil 7.8. Karbon ve Tungsten tabanlı memristör topolojilerinin düşünülen eşdeğer devresi

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada önce memristör ve memristif sistemler üzerine bilgi verilmiş, HP ve Biolek memristör modeli tanıtılmış ve literatürde verilmiş olan M-C dolma ve boşalma devrelerin analizleri özetlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca literatürde kaynaklı ve kaynaksız analizlerinin yer aldığı HP memristör ile modellenmiş M-C devrelerinin çözümlerinin Lambert W fonksiyonu ile de ifade edilebileceği gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında memristörün yön bağımlılığı dikkate alınarak, kondansatör, memristör ve direnç seri devresinde kondansatörün şarj ve deşarjı analitik olarak incelenmiştir. Bu çalışma, literatürde bir M-C devresinde

kondansatörün şarj ve deşarjında memristörün polaritesinin etkisinin deneysel olarak incelendiği başka bir çalışma olmaması sebebiyle de önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, memristörün yönünün de ifade edilebilmesi açısından  $C-M_{ileri}-R_s$  ve  $C-M_{Ters}-R_s$  olarak isimlendirilen devreler Biolek memristör modeli ile Kirchoff kanunları kullanılarak kaynaklı ve kaynaksız olarak analiz edilmiştir. Bu analizlerde incelenen devre değişkenlerinin analitik çözümü zamana göre değilde memristör durum değişkeni  $x$ 'e bağlı bir hipergeometrik fonksiyon içermektedir. Bu nedenle, devre elemanlarının akım ve gerilimleri, memristör durum değişkeni olan  $x$ 'e bağlı olarak kapalı bir fonksiyon olarak yazılabilmektedir. Elde edilen ve açık bir çözüme sahip olmayan bu fonksiyonların zaman değişkeni Euler yöntemi kullanılarak nümerik olarak çözülmüştür. Bu çözümde, kondansatörün eksponansiyel bir şekilde şarj/deşarj olmadığı görülmüştür. Kondansatörün şarjı ve deşarjı memristörün devredeki her iki kutuplanma durumu için analiz edilmiştir. Bu çalışmadaki devrelerin Biolek memristör modeli kullanılarak elde edilen yarı-analitik çözümleri gerekli kod yazılarak MATLAB™ programında çizdirilmiştir. Bu çalışma memristör ve kondansatörlü bir devrenin analitik çözümünün hipergeometrik fonksiyon ile analiz edilmesi, sonucun zamana göre kapalı fonksiyon olarak bulunması ve yarı-analitik olarak çözülmesi açısından oldukça önem taşımaktadır. Bu analizlerin bundan sonraki M-C elemanı içeren devreler üzerine yapılan çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Biolek modeli ile analizi yapılan bu devreler laboratuvar ortamında deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneylerde Knowm firması tarafından üretilen hem Karbon tabanlı memristör hem de daha periyodik ve kararlı sonuçlar sağlayan Tungsten tabanlı memristör kullanılmıştır. Bu memristörler, seri bir koruma direnci ile kullanılmaktadır. Bu yüzden yapılan deneylerde bu koruma direnci her zaman için kullanılmıştır.  $C-M-R_s$  devresinde, kondansatörün memristör üzerinden şarjı/deşarjı osiloskop kullanılarak incelenmiştir. Hem Karbon hem de Tungsten tabanlı memristörler ile ileri ve ters kutuplanmış durumlar için sırasıyla saat ve kare dalga sinyalleri kullanılarak  $C-M-R_s$  devreleri deneysel olarak incelenmiştir. Laboratuvarda Excell dosyası olarak kaydedilen kondansatörün şarj ve deşarjı esnasındaki memristör akım ve gerilim grafikleri MATLAB™ programında çizdirilmiştir. Biolek modeli ile elde edilen simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Biolek modelinin Knowm memristörlerin ve incelenen  $C-M-R_s$  devrelerinin modellenebilmesi için yeterli olmadığı görülmüştür.

Yapılan bu deneyler sonucu,

- Avometre ile ölçülen minimum ve maksimum memristör dirençleri hem Karbon hem de Tungsten tabanlı memristör için birbirine yakın değerde olduğu bulunmuştur. Yani her iki memristör bipolar davranış sergilemektedir. Bundan dolayı, bu memristörlerin Biolek modeliyle modellenemeyeceği görülmüştür.
- Karbon memristör ile çok düşük frekanslarda 1 V tepe değerli saat sinyali ile yapılan deneylerde bir dolma ya da boşalma görülmemiştir. 2 V tepe değerli saat sinyali kullanıldığında düşük frekanslarda stokastik bir dolma ve boşalma gözlenmiştir. Kare dalga sinyal kaynağı kullanıldığında her genlik değeri için dolma ve boşalmanın stokastik karakterde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni rastgele kanal oluşumu olarak düşünülmektedir.
- Karbon memristörün düşük frekanslarda stokastik bir davranış sergilediği, yani periyodik akım çekmediği görülmüştür. Biolek memristör modeli stokastik bir model olmadığı için Karbon memristörün modellenmesinde kullanılamaz. Bundan dolayı Biolek memristör modeli ile Karbon tabanlı memristörlü C-M-R<sub>s</sub> devresinin modellenemeyeceği de görülmüştür.
- Artan frekansla Karbon tabanlı memristörün ve bu memristör ile kurulan C-M-R<sub>s</sub> devresinin stokastik davranışının ortadan kaybolduğu görülmüştür.
- Tungsten tabanlı memristörün stokastik bir davranış göstermediği görülmüştür, ama düşük frekanslarda Tungsten tabanlı memristörün nonlinear bir R-C devresi gibi davrandığı görülmüştür.
- Biolek memristör modeli kapasitif etkileri içermediğinden Tungsten tabanlı memristör ile kurulan C-M-R<sub>s</sub> devresinin modellenmesinde kullanılamayacağı ortaya çıkmıştır.
- Tungsten tabanlı memristörün Tümlen Bağı Rezistif Anahtarlar (Ters Seri Bağı Memristörler) ve kondansatörler kullanılarak modellenebileceği bu çalışmada tahmin edilmiştir.
- Bu C-M-R<sub>s</sub> devrelerinin tam analizi, ancak Karbon ve Tungsten tabanlı memristörler için daha doğru modeller yapıldıktan sonra mümkün olacaktır.
- Yaptığımız literatür taramasında, Gümüş-Karbon-Gümüş (Ag-Carbon-Ag) yapısının kapasitif etkili ve sıfır geçişsiz bir memristif sistem gibi davrandığının rapor edildiği görülmüştür [58]. Bu çalışmada kullanılan Tungsten tabanlı memristörün gösterdiği kapasitif davranışa dair bulgular da literatürde rapor edilmelidir.

- Literatürde Karbon tabanlı memristörün stokastik davranışına dair bir model bulunmamaktadır ve daha sonraki araştırmacılar bunu araştırma konusu olarak seçebilir.

Bu tez çalışması içerdiği metodoloji ve deneysel veri açısından, bu yönde çalışma yapacak olan birçok araştırmacıya yol gösterebilir.



## **KAYNAKLAR**

- [1] L. O. Chua, “Memristor-The Missing Circuit Element,” IEEE Trans. Circuit Theory, vol. 18, pp. 507-519, 1971.

- [2] R. Mutlu, E. Karakulak, "Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi," Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, 2009.
- [3] L. O. Chua, S. M. Kang, "Memrivative devices and systems," Proc. IEEE, vol. 64, pp. 209-223, 1976.
- [4] T. Prodromakis, C. Toumazou, "A review on memristive devices and applications," 17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 934-937, 2010.
- [5] Y.V. Pershin, J. Martinez-Rincon, M. Di Ventra, "Memory circuit elements: from systems to applications," Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 8(3), 441-448, 2011.
- [6] Y. V. Pershin, M. Di Ventra, "Memory effects in complex materials and nanoscale systems," Adv. Phys., 60, 145–227, 2011.
- [7] L. Chua, "Resistance switching memories are memristors," Appl. Phys. A, 102, 765–783, 2011.
- [8] R. Marani, G. Gennaro, A. G. Perri, "A Review on Memristor Applications," International Journal of Advances in Engineering & Technology, 8(3), 294, 2015.
- [9] S. Sangho, K. Kim, S. M. Kang, "Memristor applications for programmable analog ICs," IEEE Transactions on Nanotechnology, 10(2), 266-274, 2011.
- [10] J. Zheng, Z. Zeng, Y. Zhu, "Memristor-based nonvolatile synchronous flip-flop circuits," Seventh International Conference on Information Science and Technology (ICIST), 2017.
- [11] R. Rosezin, E. Linn, L. Nielen, C. Kügeler, R. Bruchhaus, and R. Waser, "Integrated Complementary Resistive Switches for Passive High-Density Nanocrossbar Arrays", Electron Device Letters, vol. 32, 2011.
- [12] E. Karakulak, "Tümleyen Bağlı Rezistif Anahtarların Bellekler Ve Yapay Sinir Ağlarında Kullanımı," Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi, Edirne, 2016.
- [13] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, "The missing memristor found," Nature (London), vol. 453, pp. 80-83, 2008.
- [14] Ş. Yener, R. Mutlu, H. H. Kuntman, "Performance Analysis of a Memristor – Based



- Biquad Filter Using a Dynamic Model,” *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, 44: pp. 109-118, 2014.
- [15] T.A Wey., W.D Jemison, “Variable gain amplifier circuit using titanium dioxide memristors,” *IET Circuits, Devices & Systems*, 5: pp. 59–65, 2011.
- [16] W. Yi, F. Perner, M. S. Qureshi, H. Abdalla, M. D. Pickett, J. J. Yang, ... & R. S. Williams,  
“Feedback write scheme for memristive switching devices,” *Applied Physics A*, 102(4), 973-982,2011.
- [17] A. Talukdar, A. G. Radwan, K. N. Salama, “Generalized model for memristor-based Wien-  
family oscillators,” *Journal of Microelectronics*, 42: pp. 1032–1038,2011.
- [18] M. E. FOUDA, A. G. RADWAN, “Power dissipation of memristor-based relaxation oscillators,” *Radioengineering*, 2015, 24.4: 968-973, 2015.
- [19] H. Sozen, U. Cam, “Electronically tunable memristor emulator circuit,” *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 89(3), 655–663, 2016.
- [20] Y. Pershin, M. Di Ventra, “Practical Approach to Programmable Analog Circuits With Memristors”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 57, p.p. 1857 – 1864, 2010.
- [21] E. Karakulak, R. Mutlu, and U. Erdem, “Reconstructive sensing circuit for complementary  
resistive switches-based crossbar memories,” *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*24.3:pp. 1371-1383, 2016.
- [22] T. Wey, S. Benderli, "Amplitude modulator circuit featuring TiO<sub>2</sub> memristor with linear dopant drift," *Electronics Letters*, Vol.: 45, Page(s): 1103 – 1104, 2019.
- [23] T. Prodromakis, C. Toumazou, and L. Chua, “Two centuries of memristors,” *Nature Materials*, vol. 11, p. 478, 2012.
- [24] M. Di Ventra and Y. V. Pershin, “On the physical properties of memristive, memcapacitive  
and meminductive systems,” *Nanotechnology*, vol. 24, p. 255201, 2013.
- [25] L. Chua, “If it’s pinched it’s a memristor,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 29, p. 104001, 2014.
- [26] Y. N. Joglekar, and J. W. Stephen. "The elusive memristor: properties of basic electrical circuits." *European Journal of Physics* 30.4: 661, 2009.
- [27] Z. Biolek, D. Biolek, and V. Biolkova, “SPICE model of memristor with nonlinear

- dopant drift,” *Radioengineering*, 18(2), 210–214, 2009.
- [28] T. Prodromakis, “A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics,” *IEEE transactions on electron devices*, 58.9: 3099-3105, 2011.
- [29] J. Zha, H. Huang, and Y. Liu, “A novel window function for memristor model with application in programming analog circuits,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 63(5), 423-427, 2016.
- [30] R. Mutlu, "Solution of TiO<sub>2</sub> memristor-capacitor series circuit excited by a constant voltage source and its application to calculate operation frequency of a programmable TiO<sub>2</sub> memristor-capacitor relaxation oscillator. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23(5):pp. 1219-1229, 2015.
- [31] N. N. Urgan, C. Dalmış, R. Mutlu, “Analysis of the HP Memristor and Capacitor (M-C) Series Circuit Using the Lambert W Function,” *European J. Eng. App. Sci* 3(2), 27-32, 2020.
- [32] <https://www.informationweek.com/desktop/hp-hynix-to-collaborate-on-memristor-memory-technology/d/did/1092114>
- [33] Knowm, Self Directed Channel Memristors, Rev. 3.2, October 6, 2019  
[https://knowm.org/downloads/Knowm\\_Memristors.pdf](https://knowm.org/downloads/Knowm_Memristors.pdf)
- [34] J. Gomez, I. Vourkas, A. Abusleme, “Exploring Memristor Multi-Level Tuning Dependencies on the Applied Pulse Properties via a Low Cost Instrumentation Setup,” Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2915100, 2019.
- [35] S. Khrapko, V. Rusyn, L. Politansky, “Investigation Of The Memristor Nonlinear Properties,” p-ISSN 2083-0157, e-ISSN 2391-6761, 2018.
- [36] S. D. Santos, S. Furui, “A memristor based ultrasonic transducer: the memosducer,” *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2016.
- [37] C. Volos, V. T. Pham, H. E Nistazakis, I. N. Stouboulos, “A Dream that has Come True: Chaos from a Nonlinear Circuit with a Real Memristor,” *International Journal of Bifurcation and Chaos* 30(13):2030036, 2020.
- [38] L. Minati, L. V. Gambuzza, W. J. Thio, J. C. Sprott, M. Frasca, “A chaotic circuit based on a physical memristor. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2020.
- [39] S. Majzoub, A. S. Elwakil, C. Psychalinos, B. J..Maundy, “On the mechanism of creating pinched hysteresis loops using a commercial memristor device,” *AEU-International*

- Journal of Electronics and Communications, 2019.
- [40] M. I. Selmy, H. Mostafa, A. A. S. Dessouki, “Hardware Implementation of a Low Power Memristor-Based Voltage Controlled Oscillator,” 31st International Conference on Microelectronics (ICM), 2019.
- [41] A. Nannarelli, J. Taylor, “Design and Simulation of a Quaternary Memory Cell based on a Physical Memristor,” Proceedings of the 2016 IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NorCAS), 2016.
- [42] S. P. Adhikari, M. P. Sah, h. Kim and L. O. Chua, “Three Fingerprints of Memristor,” IEEE Transactions Circuits and Systems I: Regular Papers, pp. 60(11), 3008-3021, 2013.
- [43] S. Vongehr, X. Meng, “The Missing Memristor has Not been Found,” Scientific Reports, 5(1),1-7, 2015.
- [44] M. Di Ventra, Y. V. Pershin ve L. O. Chua, “Circuit Elements With Memory: Memristors, memcapacitors and meminductors,” Proc. IEEE, vol. 97, pp. 1717–1724, 2009.
- [45] S. C. Yener, R. Mutlu, and H. H. Kuntman, “Small signal analysis of memristor-based low-pass and high-pass filters using the perturbation theory,” Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 12(January-February 2018), 55-62, 2018.
- [46] H. Sozen, and U. Cam, “First-order memristor–capacitor filter circuits employing hp memristor,” Journal of Circuits, Systems, and Computers, 23(08), 1450116, 2014.
- [47] S. C. Yener, R. Mutlu, and H. H. Kuntman, “A new memristor-based high-pass filter/amplifier: Its analytical and dynamical models,” In 2014 24th International Conference Radioelektronika (pp. 1-4). IEEE, 2014.
- [48] S. C. Yener, R. Mutlu, and H. H. Kuntman, “A new memristor-based low-pass filter topology and its small-signal solution using MacLaurin series,” SAT, 1(1), 2, 2015.
- [49] Ş. Ç. YENER, R. MUTLU, and H. H. Kuntman, “Memristor Temelli Sallen-Key Süzgeçler” Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(2), 2015.
- [50] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth, “On the Lambert W function,” Advances in Computational Mathematics 5, 4, pp. 329–359, 1996.
- [51] L. Euler, “De serie Lambertina plurimisque eius insignibus proprietatibus, Leonhardi Euleri Opera Omnia, Ser. 1, Opera Mathematica 6 [orig. date 1779] 350-369, 1921.

- [52] L. Luo, X. Hu, S. Duan, Z. Dong, L. Wang, "Multiple memristor series-parallel connections with use in synaptic circuit design," *IET Circuits Devices Syst.*, 2017, Vol. 11, Iss. 2, pp. 123–134, 2017.
- [53] M. Ahmer, A. Sajid, M. Y. Yasin, "SPICE Simulation of Memristor Series and Parallel," *S-JPSET*: Vol. 9, Issue 2, ISSN: 2229-7111 (Print) & ISSN: 2454-5767 (Online), 2017.
- [54] J. He, C. B. Huang, S. Kang, "Characteristics for series and parallel circuits of flux controlled memristors," *IEICE Electronics Express*, Vol.14, No.11, 1–11, 2017.
- [55] Y. LAM, "Formulation of Normal Form Equations of Nonlinear Networks Containing Memristors and Coupled Elements," *Ieee Transactions On Circuit Theory*, Vol. Ct-19, No. 6, November 1972.
- [56] <https://www.wolframalpha.com/>
- [57] [https://en.wikipedia.org/wiki/Falling\\_and\\_rising\\_factorials](https://en.wikipedia.org/wiki/Falling_and_rising_factorials)
- [58] G. Zhou, Z. Ren, L. Wang, J. Wu, B. Sun, A. Zhou, G. Zhang, S. Zheng, S. Duan, Q. Song, "Resistive switching memory integrated with amorphous carbon-based nanogenerators for self-powered device," *Nano Energy* 63, 103793, 2019.
- [59] V.S. Markin, A.G. Volkov, L. Chua, "An analytical model of memristors in plants," *Plant Signal. Behav.* 9, e972887, 2014.
- [60] H. Abunahla, M.A. Jaoude, I.A. Omar, B. Mohammad, M. Al-Qutayri, "Resistive switching in sol-gel derived microscale memristors," in: *IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems, MWSCAS*, p. 16723998, 2016.
- [61] L. Zheng, B. Sun, S. Mao, S. Zhu, P. Zheng, Y. Zhang, M. Lei, Y. Zhao, "Metal ions redox induced repeatable nonvolatile resistive switching memory behavior in biomaterials," *ACS Appl. Bio Mater.* 1, 496e501, 2018.
- [62] R. Kaura, S.K. Tripathi, "Dopant dependent electrical switching characteristics of a CdSe-Poly (vinyl-pyrrolidone) nanocomposite," *Org. Electron.* 61, 235e241, 2018.

- [63] S. Sarma, B.M. Mothudi, M.S. Dhlamini, “Observed coexistence of memristive, memcapacitive and meminductive characteristics in polyvinyl alcohol/cadmium sulphide nanocomposites,” J. Mater. Sci. Mater. Electron. 27, 4551e4558, 2016.
- [64] L. Qingjiang, A. Khiat, I. Salaoru, C. Papavassiliou, X. Hui, T. Prodromakis, “Memory impedance in TiO<sub>2</sub> based metal-insulator-metal devices,” Sci. Rep. 4, 4522, 2014.
- [65] F. Messerschmitt, M. Kubicek, J.L.M. Rupp, “How does moisture affect the physical property of memristance for anionicelectronic resistive switching memories?,” Adv. Funct. Mater. 25, 5117e5125, 2015.
- [66] B. Muthuswamy, J. Jevtic, H.H.C. Iu, C.K. Subramaniam, K. Ganesan, V. Sankaranarayanan, K. Sethupathi, H. Kim, M. Pd Shah, L.O. Chua, “Memristor modeling,” IEEE Int Symp Circ Syst (ISCAS) 28, 14483534, 2014.
- [67] E. Linn, R. Rosezin, C. Kügeler, R. Waser, “Complementary resistive switches for passive nanocrossbar memories,” Nat Mater, 9: 403–406, 2010.
- [68] E. Karakulak, R. Mutlu, E. Ucar, “Sneak path current equivalent circuits and reading margin analysis of complementary resistive switches based 3D stacking crossbar memories,” Informacije MIDEM, 44(3), 235-241, 2015.

### **EK-1: Kaynaksız Kondansatör-İleri Yönde Kutuplanmış M-R<sub>s</sub> seri devresi MATLAB kodu**

```
%UYARI: hypergeometric function x=1'de tanımlı değildir.

Mv=40e-14;           %İyon mobilitesi- İyon yayılma hızı
Ron=125e3;           %Minimum memristör direnci
Roff=1250e3;         %Maksimum memristör direnci
D=10e-9;             %Memristör uzunluğu
Rs=100e3;            %Seri bağlı koruma direnci
C=200e-9;            %Seri bağlı kondansatör kapasitesi
p=2;                 %Biölek memristör modeli parametresi
Vc0=1;               %Kondansatör için başlangıç şartı
dx=0.0001;           %Zaman adımı
x=[0:dx:0.9999];    %x=w/D katkılanmış bölge oranını ifade eden durum
değişkenidir.       %x=1 tanımsızdır. Bu yüzden aralığa dahil
```

edilmemiştir.

```
K=D^2/(C*Mv*Ron);           %Kaynaksız devre analizi katsayısı
```

```
Vc=-K*(x.*hypergeom([1,1/(2*p)],1+1/(2*p),x.^(2*p))-  
x(1).*hypergeom([1,1/(2*p)],1+1/(2*p),(x(1)).^(2*p)))+Vc0;   %x(1)=0
```

```
Rx=Roff-(Roff-Ron)*x;       %Memristans değeri  
imem=Vc./(Rs+Rx);          %Memristör akımı  
vmem=imem.*Rx;             %Memristör gerilimi  
VR=imem.*Rs;               %Seri direnç gerilimi
```

```
t=D^2/(Mv*Ron)*cumtrapz(x,1./((1-x.^(2*p)).*imem));           %t'nin x cinsinden  
ifadesi
```

```
Vcdot=-imem/C;            %ic(t)=C*dVc(t)/dt 'den gelmekte
```

```
figure  
plot(x,Vc)  
grid  
xlabel('x(t)')  
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
```

```
figure  
plot(t,Vc)  
grid  
xlabel('t(s)')  
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
```

```
figure  
plot(x,vmem)  
grid  
xlabel('x(t)')  
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
```

```
figure  
plot(t,vmem)  
grid  
xlabel('t(s)')  
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
```

```
figure  
plot(x,imem)  
grid  
xlabel('x(t)')  
ylabel('Memristör Akımı (A)')
```

```
figure  
plot(t,imem)  
grid  
xlabel('t(s)')  
ylabel('Memristör Akımı (A)')
```

```
figure  
plot(x,Rx)  
grid  
xlabel('x(t)')  
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
```

```
figure  
plot(t,Rx)  
grid  
xlabel('t(s)')  
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
```

```
figure  
plot(t,VR)  
grid  
xlabel('t(s)')
```

```
ylabel('Direnç Gerilimi (V)')
```

## EK-2: Kaynaksız Kondansatör-Ters Yönde Kutuplanmış M-R<sub>s</sub> seri devresi MATLAB kodu

```
%UYARI: hypergeometric function x=1'de tanımlı değildir.

Mv=40e-14;           %İyon mobilitesi- İyon yayılma hızı
Ron=125e3;           %Minimum memristör direnci
Roff=1250e3;         %Maksimum memristör direnci
D=10e-9;             %Memristör uzunluğu
Rs=100e3;            %Seri bağlı koruma direnci
C=200e-9;           %Seri bağlı kondansatör kapasitesi
p=2;                 %Biölek memristör modeli parametresi
Vc0=1;              %Kondansatör için başlangıç şartı
dx=0.0001;          %Zaman adımı
u=[0:dx:0.9999];
x=1-u;              %x=w/D katkılanmış bölge oranını ifade eden durum
değişkenidir.      %x=1 tanımsızdır. Bu yüzden aralığa dahil
                    edilmemiştir.

K=D^2/(C*Mv*Ron);   %Kaynaksız devre analizi katsayısı

Vc=K*((x-1).*hypergeom([1,1/(2*p)],1+1/(2*p),(x-1).^(2*p))-(x(1)-
1).*hypergeom([1,1/(2*p)],1+1/(2*p),(x(1)-1).^(2*p)))+Vc0; %x(1)=0

Rx=Roff-(Roff-Ron)*x; %Memristans değeri
imem=Vc./(Rs+Rx);     %Memristör akımı
vmem=imem.*Rx;        %Memristör gerilimi
VR=imem.*Rs;          %Seri direnç gerilimi

t=-D^2/(Mv*Ron)*cumtrapz(x,1./((1-(x-1).^(2*p)).*imem)); %t'nin x
cinsinden ifadesi
Vcdot=-imem/C;
%ic(t)=C*dVc(t)/dt 'den gelmekte

figure
plot(x,Vc)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
figure
plot(t,Vc)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
figure
plot(x,vmem)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
figure
plot(t,vmem)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
```

```

figure
plot(x, imem)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Akımı (A)')
figure
plot(t, imem)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Akımı (A)')
figure
plot(x, Rx)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
figure
plot(t, Rx)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
figure
plot(t, VR)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Direnç Gerilimi (V)')

```

### EK-3: Kaynaklı Kondansatör-İleri Yönde Kutuplanmış M-R<sub>s</sub> seri devresi MATLAB kodu

```

%UYARI: hypergeometric function x=1'de tanımlı değildir.

Mv=40e-14;           %İyon mobilitesi-İyon yayılma hızı
Ron=125e3;           %Minimum memristör direnci
Roff=1250e3;         %Maksimum memristör direnci
D=10e-9;             %Memristör uzunluğu
Rs=100e3;            %Seri bağlı koruma direnci
C=200e-9;           %Seri bağlı kondansatör kapasitesi
p=2;                %Biölek memristör modeli parametresi
Vs=2;               %Kaynak gerilimi
Vc0=0;              %Kondansatör için başlangıç şartı
dx=0.0001;          %Zaman adımı
x=[0:dx:0.9999];   %x=w/D katkılanmış bölge oranını ifade eden
                    %durum değişkenidir.
                    %x=1 tanımsızdır. Bu yüzden aralığa dahil
                    %edilmemiştir.

K=D^2/(C*Mv*Ron);   %Kaynaksız devre analizi katsayısı

Vc=K*(x.*hypergeom([1,1/(2*p)],1+(1/(2*p)),x.^ (2*p))-
x(1).*hypergeom([1,1/(2*p)],1+1/(2*p),(x(1)).^(2*p)))+Vc0; %x(1)=0

Rx=Roff-(Roff-Ron)*x; %Memristans değeri
imem=(Vs-Vc)./(Rs+Rx); %Memristör akımı
vmem=imem.*Rx;        %Memristör gerilimi
VR=imem.*Rs;         %Seri direnç gerilimi

```



```

t=D^2/(Mv*Ron)*cumtrapz(x,1./((1-x.^(2*p)).*imem)); %t'nin x cinsinden
ifadesi
Vcdot=imem/C; %ic(t)=C*dVc(t)/dt 'den gelmekte

figure
plot(x,Vc)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
figure
plot(t,Vc)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
figure
plot(x,vmem)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
figure
plot(t,vmem)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
figure
plot(x,imem)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Akımı (A)')
figure
plot(t,imem)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Akımı (A)')
figure
plot(x,Rx)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
figure
plot(t,Rx)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
figure
plot(t,VR)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Direnç Gerilimi (V)')

```

#### **EK-4: Kaynaklı Kondansatör-Ters Yönde Kutuplanmış M-R<sub>g</sub> seri devresi MATLAB kodu**

%UYARI: hypergeometric function x=1'de tanımlı değildir.

```

Mv=40e-14; %İyon mobilitesi- İyon yayılma hızı
Ron=125e3; %Minimum memristör direnci
Roff=1250e3; %Maksimum memristör direnci

```

```

D=10e-9; %Memristör uzunluğu
Rs=100e3; %Seri bağlı koruma direnci
C=200e-9; %Seri bağlı kondansatör kapasitesi
p=2; %Biölek memristör modeli parametresi
Vs=2; %Kaynak gerilimi
Vc0=0; %Kondansatör için başlangıç şartı
dx=0.0001; %Zaman adımı
u=[0:dx:0.9999];
x=1-u; %x=w/D katkılanmış bölge oranını ifade eden
durum değişkenidir.
%x=1 tanımsızdır. Bu yüzden aralığa dahil
edilmemiştir.

K=D^2/(C*Mv*Ron); %Kaynaksız devre analizi katsayısı

Vc=-K*((x-1).*hypergeom([1,1/(2*p)],1+(1/(2*p)),(x-1).^(2*p))-
x(1000).*hypergeom([1,1/(2*p)],1+1/(2*p),(x(1000)).^(2*p)))+Vc0; %x(1)=0

Rx=Roff-(Roff-Ron)*x; %Memristans değeri
imem=(Vs-Vc)./(Rs+Rx); %Memristör akımı
vmem=imem.*Rx; %Memristör gerilimi
VR=imem.*Rs; %Seri direnç gerilimi

t=-D^2/(Mv*Ron)*cumtrapz(x,1./((1-(x-1).^(2*p)).*imem)); %t'nin x
cinsinden ifadesi
Vcdot=imem/C; %ic(t)=C*dVc(t)/dt 'den gelmekte

figure
plot(x,Vc)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
figure
plot(t,Vc)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Kondansatör Gerilimi (V)')
figure
plot(x,vmem)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
figure
plot(t,vmem)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Gerilimi (V)')
figure
plot(x,imem)
grid
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Akımı (A)')
figure
plot(t,imem)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Akımı (A)')
figure
plot(x,Rx)
grid

```

```
xlabel('x(t)')
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
figure
plot(t,Rx)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Memristör Direnci (Ohm)')
figure
plot(t,VR)
grid
xlabel('t(s)')
ylabel('Direnç Gerilimi (V)')
```

