



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEMRİSTÖR İÇİN PARÇA-PARÇA DOĞRUSAL MODEL TASARIMI VE BU MODELİN MEMRİSTÖR TABANLI FİLTRELERE UYGULANMASI

Ahmet SOLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2017
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEMRİSTÖR İÇİN PARÇA-PARÇA DOĞRUSAL MODEL TASARIMI VE BU MODELİN MEMRİSTÖR TABANLI FİLTRELERE UYGULANMASI

Ahmet SOLAK

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Saadetdin HERDEM

2017, 64 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Saadetdin HERDEM
Doç. Dr. Muciz ÖZCAN
Yrd. Doç. Dr. Rahime CEYLAN

1971 yılında Berkeley Üniversitesi'nden Prof. Dr. Leon Chua tarafından ilk defa memristör fikri ortaya atılmıştır. Elektronik devre elemanları prensipte gerilim, akım, yük ve manyetik akı arasındaki ilişkileri temsil ederler. Direnç, gerilim ile akım arasındaki ilişkiyi, bobin, akım ile manyetik akı arasındaki ilişkiyi, kondansatör gerilim ile yük arasındaki ilişkiyi ifade eder. Chua, yük ile manyetik akı arasındaki eksik olan bağlantıdan yola çıkarak bu eksik elemana memristör adını verdi. Ayrıca aktif devre elemanlarından oluşan bir memristör eşdeğer devresi önerdi. Bundan 37 yıl sonra 2008 yılında Hewlett-Packard (HP) araştırma laboratuvarlarında Stanley Williams ve ekibi fiziksel olarak ilk memristörü üretmeyi başardı. Memristörün fiziksel olarak üretimiyle beraber bilim dünyasında memristör alanında yapılan çalışmalarda artış yaşandı. Yeni memristör modelleri, mantık devreleri, işaret işleme, yapay sinir ağları, kontrol sistemleri, RFID gibi konularda çeşitli yayınlar yapıldı.

Bu tez çalışmasında memristör modelleme yöntemlerinden olan parça-parça doğrusal modelleme ile yeni memristör modelleri oluşturulmuş ve elde edilen modellerin filtre devrelerine uygulanmasıyla geçerliliği test edilmiştir. Bu uygulamalardan elde edilen sonuçlar literatürde bulunan diğer çalışmalarla karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar ve yorumlar paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: eşdeğer memristör modeli, frekans bağımlı PWL memristör modeli, memristör, memristans-gerilim karakteristiği, simulink benzetimi

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN OF PIECEWISE LINEAR MODEL FOR MEMRISTOR AND ITS APPLICATION TO MEMRISTOR BASED FILTERS

Ahmet SOLAK

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Saadetdin HERDEM

2017, 64 Pages

Jury
Prof. Dr. Saadetdin HERDEM
Assoc. Prof. Dr. Muciz ÖZCAN
Asst. Prof. Dr. Rahime CEYLAN

In 1971, Professor at Berkeley University. Dr. Leon Chua first introduced the idea of a memristor. Electronic circuit elements in principle represent the relationship between voltage, current, charge and magnetic flux. The resistor represents relationship between current and voltage, the capacitor represents relationship between charge and voltage, the inductor represents relationship between current and flux. Chua gave the name of this incomplete element of the memristor out of the missing link between the charge and the magnetic flux. Furthermore, a memristor consisting of active circuit elements suggested an equivalent circuit. 37 years later, in 2008, from Hewlett-Packard (HP) research laboratories Stanley Williams and his team physically succeeded in producing the first memristor. There was a considerable increase in the work of the memristor in the field of memristor in the field of science together with the physical production. Various publications have been made on topics such as new memristor models, logic circuits, signal processing, artificial neural networks, control systems, RFID.

In this thesis, new memristor models were created by piece-wise linear modeling which is one of the modeling methods of memristor and their validities were tested by applying the obtained models to filter circuits. The results obtained from these applications are compared with other studies in the literature and the results and interpretations obtained are shared.

Keywords: Equivalent memristor model, frequency dependent PWL memristor model, memristor, memristance-voltage characteristic, simulink simulation

ÖNSÖZ

Memristörün özellikle fiziksel olarak gerçeklenmesinden sonra bilim dünyasında memristöre olan ilgi oldukça artmış ve yeni memristör modelleriyle bu modellerin farklı devre uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu tez çalışmasında, memristör modelleme yöntemlerinden parça parça doğrusal modelleme kullanılarak farklı memristör modelleri oluşturulmuş ve oluşturulan bu modellerin filtre uygulamalarıyla doğruluğu test edilmiştir.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince bana yol gösteren değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Saadetdin HERDEM'e, desteklerinden dolayı tüm mesai arkadaşlarıma ve manevi anlamda daima yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet SOLAK
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **2**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **5**

4. MEMRİSTÖR **7**

4.1. Memristörün Tarihçesi 7
4.2. Memristörün Tanımı 10
4.3. Memristör Modelleri 11
4.3.1. HP Memristör Modeli (Doğrusal İyon Sürüklenmesi Modeli) 11
4.3.2. Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenmesi Modeli 13
4.3.3. Simmons Tünel Bariyer Modeli 14
4.3.4. Eşik Uyarlamalı Memristör Modeli (TEAM Model) 15
4.4. Memristörün Kullanım Alanları 17
4.4.1. Analog Devreler 17
4.4.2. Kaotik Devreler 21
4.4.3. Geçici Olmayan Bellek 22
4.4.4. Nöromorfik Sistemler 24
4.4.5. Diğer Araştırma Alanları 25
4.5. Memristör Emülatör (Taklitçi) Devreleri 26

5. ÖNERİLEN PARÇA-PARÇA DOĞRUSAL MEMRİSTÖR MODELLERİ **27**

5.1. Negatif Dirençli PWL Memristör Modeli 27
5.2. Negatif Dirençsiz PWL Memristör Modeli 32
5.2.1. Gerilim Kaynaklı PWL Memristör Modeli 33
5.2.2. Akım Kaynaklı PWL Memristör Modeli 35
5.3. Frekans Bağımlı PWL Memristör Modeli 37

6. MEMRİSTÖR TABANLI FİLTRE UYGULAMALARI **43**

6.1. Memristör Tabanlı Alçak Geçiren Filtre 43

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **55**

7.1. Sonuçlar 55
7.2. Öneriler 57

KAYNAKLAR 58

ÖZGEÇMİŞ.....64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C : Kondansatör

cm^2 : Santimetre Kare

D : Katkılanmış ve Saf Titanyum Dioksit Kısmının Toplam Uzunluğu

DC : Doğru Akım

E : DC Gerilim Kaynağı

F : Farad

w_k : Kesim Frekansı

GB : Giga Bayt

H : Henry

$|H|$: Filtre Kazancı

HfO_2 : Hafnia

$I-V$: Akım-Gerilim

i : Akım

kHz : Kilohertz

L : Bobin

M : Memristör

MC : Memristör ve Kondansatörden Oluşan Devre

$M-V$: Memristans-Gerilim

ms : Milisaniye

nm : Nanometre

NiO : Nikel Oksit

Pt : Platin

R : Direnç

rad/s : Radyan/saniye

RC : Direnç ve Kondansatörden Oluşan Devre

R_1 : 1. Bölgenin Direnç Değeri

R_2 : 2. Bölgenin Direnç Değeri

R_3 : 3. Bölgenin Direnç Değeri

R_4 : 4. Bölgenin Direnç Değeri

R_{MEM} : Memristörün Toplam Direnci

R_{OFF} : Memristörün Saf Titanyum Dioksit Kısmının Direnci

R_{ON} : Memristörün Katkılanmış Titanyum Dioksit Kısmının Direnci

Si : Silisyum

$SrTiO_3$: Stronsiyum Titanat

S_1 : 1. Bölgenin Anahtarı

S_2 : 2. Bölgenin Anahtarı

S_3 : 3. Bölgenin Anahtarı

S_4 : 4. Bölgenin Anahtarı

TiO_2 : Titanyum Dioksit

v : Gerilim

$V_Ç$: Çıkış Gerilimi

V_G : Giriş Gerilimi

V_M : Memristörün Üzerine Düşen Gerilim

VO_2 : Vanadyum Dioksit

w : Katkılanmış Titanyum Dioksit Kısmının Uzunluğu

x : Katkılanmış Titanyum Dioksit Kısmının Saf Kısma Oranı

ZnO : Çinko Oksit

ZrO_2 : Zirkonya

Z_1 : 1. Bölgenin Empedans Değeri

Z_3 : 3. Bölgenin Empedans Değeri

Ω : Ohm

ω : Açısal Frekans (rad/s)

ϕ : Manyetik Akı

q : Elektriksel Yük

Kısaltmalar

AGF : Alçak Geçiren Filtre

$CMOS$: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken

$DRAM$: Dinamik Rasgele Erişilebilir Bellek

HP : Hewlett- Packard

$MATLAB$: Matris Laboratuvarı

NIL : Nano Baskı Litografi

$NVRAM$: Geçici Olmayan Rasgele Erişilebilir Bellek

PWL : Parça Parça Doğrusal

$ReRAM$: Dirençli Rasgele Erişilebilir Bellek

$STDP$: Zamana Bağlı Sivri Esneklik

1. GİRİŞ

Elektronik devreleri oluşturmak için pasif devre elemanları olarak direnç, bobin ve kondansatör olmak üzere 3 çeşit pasif devre elemanı kullanılıyordu. 'Memristör' adı verilen devre elemanının elektronik devrelerin yapısını gelecekte tamamıyla değiştirebilecek dördüncü devre elemanı olduğu düşünülmektedir. Memristör, İngilizce 'Memory (Hafıza)' ve 'Resistor (Direnç)' kelimelerinden türetilmiş olup Türkçeye hafızalı direnç olarak çevrilebilir. Bu elemanın direnç değeri üzerinden geçen akımın yönüne ve değerine bağlı olarak azalıp artabilir. Akım kesildikten sonra bile bu değerini hafızasında saklayabilir. Böylece elemana yeniden akım verildiğinde son direnç değerini hatırlayabilir ve yapılan işlemlere kalındığı yerden devam edilebilir.

Memristör teorik olarak ilk defa Leon Chua tarafından 1971 yılında tanımlanmıştır. Chua, bu elemanı dört elektriksel büyüklük olan gerilim, akım, elektriksel yük ve manyetik akı arasında daha önce tanımlanmayan bağıntı olan elektriksel yük ile manyetik akı arasındaki bağıntı olarak tanımlamıştır ve bu eleman için ayrıca bir eşdeğer devre modeli önermiştir. Sonraki yıllarda, bu elemanın çalışma özelliklerine ilişkin daha ayrıntılı yayınlar çıkartsa da teorik bir eleman olarak uzun yıllar bir köşede unutulmuştur. Ta ki 2008 yılında Hewlett-Packard (HP) laboratuvarlarında bir grup araştırmacı tarafından nano boyutta ilk memristör üretilene kadar.

Memristörün fiziksel olarak üretimiyle beraber bilim dünyasında memristör alanında yapılan çalışmalarda bir hayli artış yaşandı. HP'nin ürettiği model standart kesin bir model olmadığından araştırmacılar bu yeni eleman için çeşitli modeller oluşturma uğraşına girdiler. Oluşturulan bu yeni memristör modellerinin mantık devreleri, işaret işleme, yapay sinir ağları, kontrol sistemleri, RFID gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanımıyla beraber memristörün kullanımı yaygınlaştı.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

(Chua, 1971); Chua bu makalesinde memristörü ilk kez tanımlamıştır. Memristörü direnç, kondansatör ve bobin ile birlikte dördüncü pasif devre elemanı olarak tanımlamıştır. Memristörü yük ve akı arasındaki kayıp bağıntıdan türetmiştir. Ayrıca bu makalede bir de aktif devre elemanlarından oluşan memristör eşdeğer devresi önermiştir.

(Chua ve Kang, 1976); Bu makalede memristörün biraz daha detaylandırılmış anlatımı yer almıştır. Memristörün kullanılabileceği memristif sistemler adı altında yeni bir sistem tanımlanmış ve bunun kriterleri verilmiştir. Memristörün akım-gerilim karakteristiğinin histerezis eğrisi şeklinde olduğu ilk defa bu makalede verilmiştir. Ayrıca yüksek frekanslarda memristörün akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal bir direncin akım-gerilim karakteristiğine benzediğinden bahsedilmiştir.

(Strukov ve ark., 2008); Memristör fiziksel olarak ilk defa laboratuvar ortamında gerçeklenmiştir. Elde edilen elemanın modeli, modelin formülü, akım-gerilim karakteristiği verilmiştir. Ayrıca daha önce 1976 yılındaki makalede de bahsedilen yüksek frekanslarda memristörün akım-gerilim karakteristiğinin direncin karakteristiğine benzediği bu makalede de vurgulanmıştır.

(Wang ve ark., 2009); Bu çalışmada memristör modellerinden olan PWL (PieceWise Linear) parça parça doğrusal memristör modelinin bir örneği verilmiştir. Ayrıca verilen bu model Chua'nın kaos osilatör devresine uygulanmıştır.

(Strukov ve Williams, 2009); Bu çalışmada memristör modellerinden Simmons Tünel Bariyer Modelinin özellikleri, denklemi ve devre şeması verilmiştir. Ayrıca bu modelin çalışma şekli ve modeli elde ederken kullanılan metotlar verilmiştir.

(Li ve ark., 2009); Bu çalışmada bir PWL memristör modeli verilmiş ve bu model Chua'nın kaos devresine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar da paylaşılmıştır.

(Wang ve ark., 2009); Bu çalışmada memristör temelli filtrelerin filtre karakteristikleri incelenmiştir.

(Pershin ve Di Ventra, 2010); Bu çalışmada memristörün programlanabilir analog devrelerdeki uygulamalarıyla ilgili örnekler verilmiştir.

(Mahvash ve Parker, 2010); Bu çalışmada SPICE ortamında farklı devrelerde kullanılmak üzere bir memristör devresi tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan bu model bir alçak geçiren filtre (AGF) uygulamasına uygulanmış ve sonuçları paylaşılmıştır.

(Prodromakis ve Toumazou, 2010); Bu çalışmada doğrusal olmayan memristör modeli anlatılmış olup bu modelle ilgili çeşitli uygulamalara yer verilmiştir.

(Shadaram ve ark., 2011); Bu çalışmada doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modeli kullanılarak yeni bir memristör modeli elde edilmiştir. Elde edilen model mantık ve hafıza uygulamalarında kullanılmıştır.

(Zaplatilek, 2011); Bu çalışmada daha önce bahsedilen matematiksel memristör modellerinin SIMULINK ortamında modellenmesine yer verilmiştir. SIMULINK ortamında elde edilen sonuçlar diğer matematiksel modellerle karşılaştırılmıştır.

(Pershin ve Di Ventra, 2012); Bu çalışmada memristörün öğrencilere öğretilmesi için bir taklitçi (emülatör) devre verilmiştir ve bu devre ile laboratuar ortamında oluşturulması mümkün olan birkaç tane memristör uygulamasına yer verilmiştir.

(Pershin ve ark., 2012); Bu çalışmada bir önceki çalışmada bahsedilen memristör devresinin analog-dijital ve dijital-analog çevirici devrelerde kullanılmasına yer verilmiştir.

(Elgabra ve ark., 2012); Bu çalışmada mevcut memristör modellerinin matematiksel ifadeleri çıkarılmış ve bu modeller karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

(Chanthbouala ve ark., 2012); Bu çalışmada tünel bariyer modelinin ferroelektrtik malzemelerle gerçeklenmesi ve sonuçları paylaşılmıştır.

(Kvatinsky ve ark., 2013); Bu çalışmada adaptif bir memristör modeli tasarlanmıştır. Model doğrusal iyon sürüklenmesi, doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi ve Simmons tünel bariyer modeli gibi memristör modellerine modellerinin uyarlanabileceğini göstermişlerdir.

(Song ve ark., 2013); Bu çalışmada memristörün MULTISIM ortamında gerçeklenmesi verilmiştir.

(Papandroulidakis ve ark., 2014); Bu çalışmada SPICE ortamında memristörlerle oluşturulan mantık kapılarına yer verilmiştir. Ayrıca bu mantık kapılarıyla elde edilen sonuçlara da yer verilmiştir.

(Yener ve ark., 2014)); Bu çalışmada PWL memristör kullanılarak filtre devreleri elde edilmiştir ve bu devrelerin karakteristikleri incelenmiştir.

(Singh ve Kakade, 2014); Bu çalışmada HP memristör modelinin MATLAB ortamında gerçeklenmesini ve elde edilen modelin analizini içermektedir.

(Vourkas ve ark., 2015); Bu çalışmada doğrusal olmayan memristör modelinin SPICE ortamında davranışının incelenmesine yer verilmiştir.

(Sözen ve Çam, 2015); Bu çalışmada yeni bir memristör taklitçi (emülatör) devresine yer verilmiştir. Bu devre OTA (Operational Transconductance Amplifier)

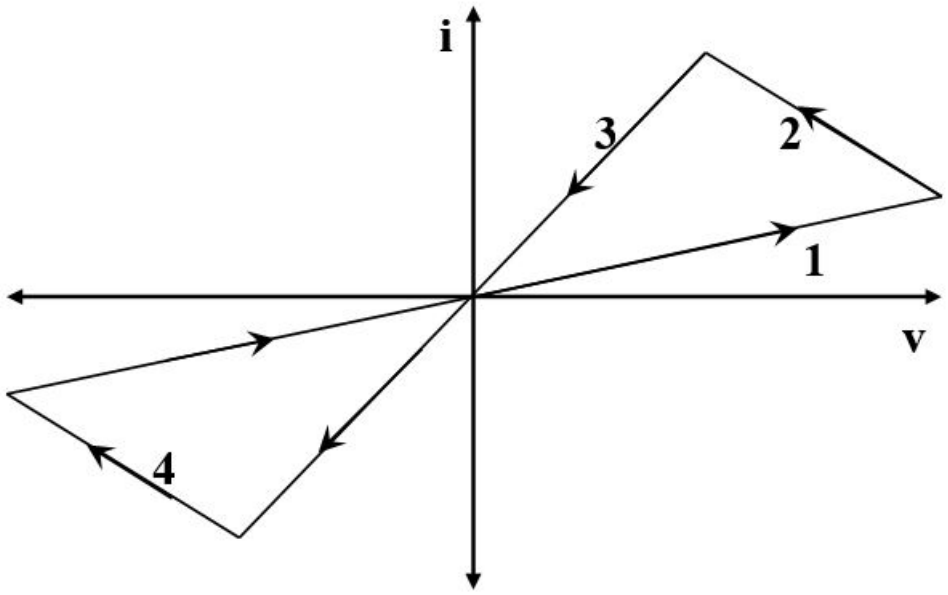
(İşlemsel Geçiş İletim Yükselteci) ve CCII (Current Conveyor 2nd Generation) (2.Nesil Akım Taşıyıcı) kullanılarak oluşturulmuştur. Frekansa bağlı olarak devrenin akım-gerilim karakteristiği gözlemlenmiştir.

(Adam ve ark., 2017); Bu çalışmada 3 boyutlu yeni bir memristör modeli üretilmiş olup elemanın analog ve nöromorfik devrelerdeki davranışı incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Memristör modellemesi literatürde birkaç farklı yöntemle yapılmaktadır. HP'nin gerçeklediği ilk memristörle ortaya çıkan model doğrusal iyon sürüklenmesi modelidir. Bu model kullanılarak yapılan çalışmalarda elemanın doğrusal olmayan özellik göstermesinden dolayı doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modeli geliştirilmiştir. Bu modelin geliştirilmiş hali olan Simmons Tünel Bariyer modeli, nano ölçekte memristör modellemenin temellerini oluşturmaktadır. Memristörün fiziksel yapısı ve davranışı üzerine kurulan bu modellerden farklı olarak elemanın akım-gerilim karakteristiğinin doğrusallaştırılması prensibine dayanan PWL (PieceWise Linear) memristör modeli de elde edilebilmektedir.

Yapılacak olan tez çalışmasında, memristörün histerezis eğrisi şeklindeki akım-gerilim karakteristiği doğrusal olan dört bölgeye ayrılacak ve her bir bölge farklı bir akım-gerilim karakteristiği olarak ele alınacaktır. Şekil 3.1'de görülen bölgeler için akım-gerilim karakteristikleri analiz edilerek her bir bölgenin eşdeğer devre modeli çıkartılacaktır. Her bölge için gerekli devre elamanlarıyla modeller oluşturulacak ve anahtarlar yardımıyla bu modeller birleştirilecektir. Böylece elemanın PWL modeli elde edilmiş olacaktır.



Şekil 3.1. PWL Memristörün Akım-Gerilim Karakteristiği

Elemana uygulanan gerilime göre hangi bölgede çalışılacağına karar verebilmek için kontrol denklemleri kullanılacaktır. Modelde yer alan anahtarların hangi kombinasyonla açılıp-kapanacağını belirlemek için kullanılacak olan kontrol denklemleri Çizelge 3.1'de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Modelle birlikte kullanılacak olan kontrol denklemleri

Bölgeler	Gerilim Değeri (V)	Gerilimin Türevi $\left(dv/dt\right)$
1. Bölge	$-V_2 \leq V \leq V_2$	$\frac{dv}{dt} > 0$
2. Bölge	$V_1 \leq V \leq V_2$	$\frac{dv}{dt} < 0$
3. Bölge	$-V_1 \leq V \leq V_1$	$\frac{dv}{dt} < 0$
4. Bölge	$-V_2 \leq V \leq -V_1$	$\frac{dv}{dt} < 0$

Oluşturulacak olan model bir benzetim (MATLAB, SIMULINK, v.b.) ortamında gerçeklenecektir. Ayrıca bu modelin aşamalı olarak iyileştirilmesi de planlanmaktadır. Modelin aşamalı olarak iyileştirilmesi farklı memristör eşdeğer devre alternatiflerinin oluşmasını sağlayacaktır. Bu modeller şöyle sıralanabilir:

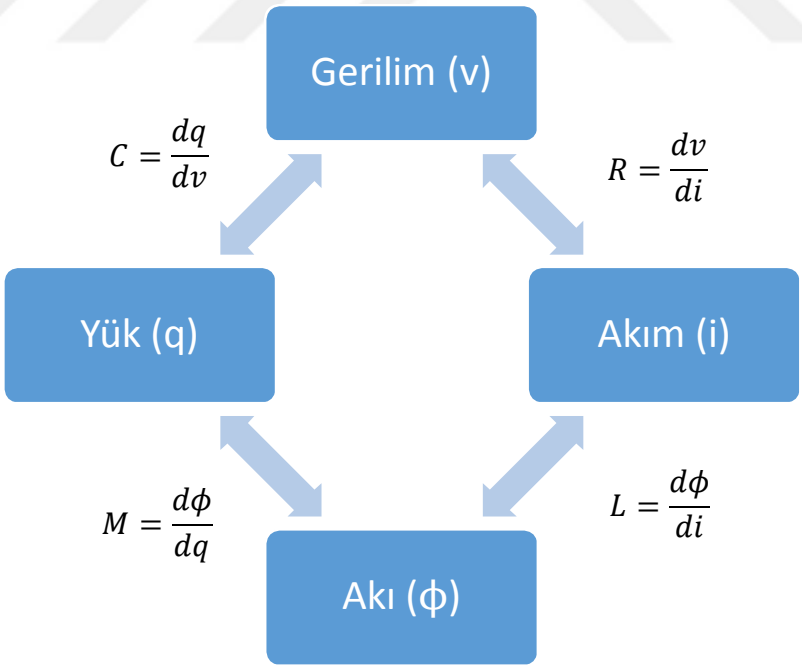
- Negatif Dirençli Model
- Negatif Dirençsiz Model
  - Gerilim Kaynaklı Model
  - Akım Kaynaklı Model
- Frekans Bağımlı Model

Elde edilen memristör modellerinin geçerliliklerinin onaylanmasından (validation) sonra, bu modeller memristör tabanlı filtre devrelerine uygulanacaktır. Bu uygulamalardan elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan diğer memristör tabanlı filtre uygulamalarıyla karşılaştırılacaktır. Yapılacak olan karşılaştırmaların sonuçlarına göre yorumlar ve öneriler sunulmaya çalışılacaktır.

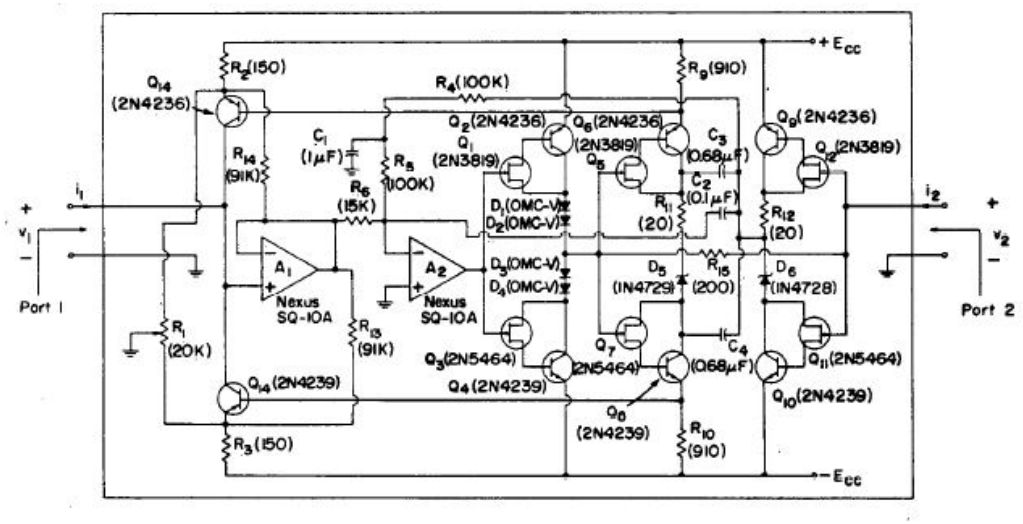
4. MEMRİSTÖR

4.1. Memristörün Tarihçesi

Memristör ilk olarak, 1971 yılında doğrusal olmayan devreler teoristi Prof. Leon Chua tarafından ortaya atılan bir pasif devre elemanıdır (Chua, 1971). Bilindiği üzere dört temel devre değişkeni mevcuttur. Bunlar; akım (i), gerilim (v), elektriksel yük (q) ve manyetik akıdır (ϕ). Temel pasif devre elemanları da bu değişkenlerin birbirleriyle aralarındaki bağıntılardan oluşmaktadır. Akım ile gerilim arasındaki ilişkiden direnç ($v = i * R$), yük ile gerilim arasındaki ilişkiden kondansatör ($q = C * v$), akı ile akım arasındaki ilişkiden bobin ($\phi = L * i$) türetilmiştir. Chua, bu dört temel devre değişkeni arasındaki elektriksel yük ile manyetik akı arasındaki tanımlanmayan bağıntıyı tanımlamıştır ve bu elemana da memristör adını vermiştir. Ayrıca makalesinde bir de dirençler, kondansatörler, bobinler ve yükselteçlerden oluşan bir memristör modeli türetilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sırasıyla temel devre değişkenleri ve aralarındaki bağıntılar ile Chua'nın önerdiği memristör modeli verilmiştir.

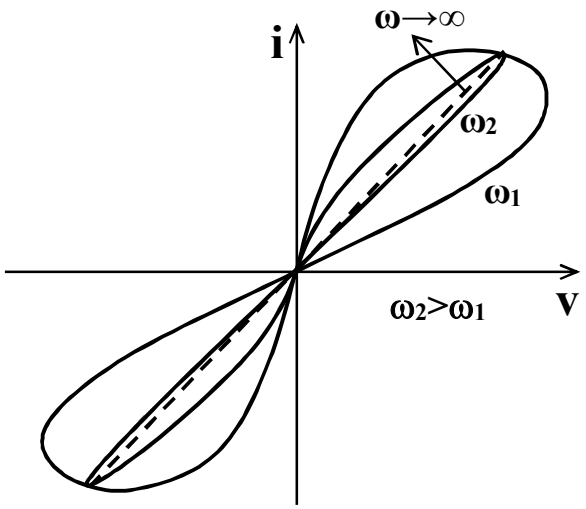


Şekil 4.1. Temel Devre Değişkenleri ve Aralarındaki Bağıntılar



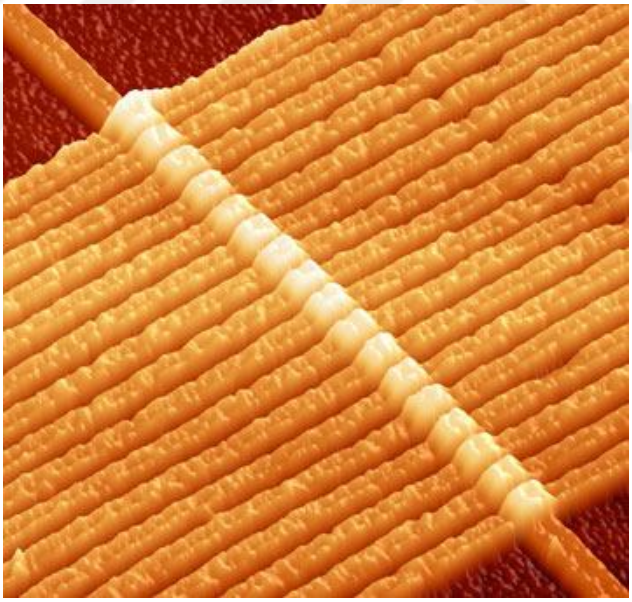
Şekil 4.2. Chua'nın Önerdiği Memristör Modeli (Chua, 1971)

1976 yılında Chua ve Kang tarafından yayınlanan bir başka makalede memristörün biraz daha detaylandırılmış anlatımına yer verilmiştir (Chua ve Kang, 1976). Memristör özelliği gösteren elemanlardan ve memristörün kullanılabileceği memristif sistemler adı altında yeni bir sistem tanımlanmış ve bunun kriterleri verilmiştir. Memristörün akım-gerilim karakteristiğinin histerezis eğrisi şeklinde olduğu ilk defa bu makalede verilmiştir. Ayrıca yüksek frekanslarda memristörün akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal bir direncin akım-gerilim karakteristiğine benzediğinden bahsedilmiştir. Şekil 4.3'de memristörün frekansa bağlı akım-gerilim karakteristiği verilmiştir.



Şekil 4.3. Memristörün Frekansa Bağlı Akım-Gerilim Karakteristiği

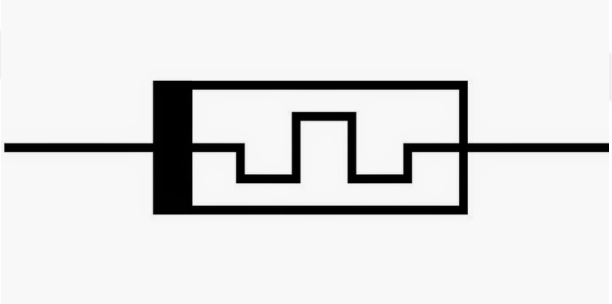
2008 yılında Chua'nın memristörü tanımlamasından tam 37 yıl sonra Hewlett Packard (HP) Laboratuvarları'ndan bir grup araştırmacı memristörün fiziksel olarak gerçeklendiğini duyurdular(Strukov ve ark., 2008). Fiziksel olarak elde edilen bu eleman iki platin (Pt) tabaka arasında yer alan saf ve katkılanmış titanyum dioksitten (TiO_2) oluşmaktadır. TiO_2 yarıiletken bir malzemedir ve saf halde direnci oldukça yüksek bir maddedir. Oksijen atomlarıyla katkılanarak direnci düşürülmektedir. Böylece memristörün akım-gerilim karakteristiğinde mevcut olan düşük ve yüksek direnç değerleri elde edilmiştir. Bu makalede, Chua'nın 1971'deki makalesinde bahsettiği elemanın laboratuvar ortamında nano boyutta gerçekleştirildiği bildiriliyordu. Şekil 4.4'de bu makalede bahsedilen memristör nano boyuttaki hali verilmiştir. Bu gelişmeyle beraber memristöre olan ilgi bilim dünyasında artış göstermiştir. Memristörün fiziksel olarak yeni keşfedilen bir eleman olmasından dolayı üretim standartları olmaması araştırmacıları temel olarak memristörün modellenmesine ve bu modellerin farklı devre uygulamalarına uygulanmasına yöneltmiştir.



Şekil 4.4. Nano boyutta HP Memristör Modeli

4.2. Memristörün Tanımı

Memristörün akım-gerilim karakteristiği iki doğrusal direnç değeri arasında değişen bir histerezis eğrisi şeklindedir. Burada yer alan direnç değerlerinden biri diğerine göre oldukça yüksek değerdedir ve memristörün değeri üzerine uygulanan gerilime göre bu değerler arasında herhangi bir değer alabilir. Memristör ayrıca frekansa bağımlı bir devre elamanıdır. Üzerine uygulanan frekans değeri arttıkça histerezis eğrisi daralmakta ve frekans değeri sonsuza giderken akım-gerilim karakteristiği doğrusal bir direncin akım-gerilim karakteristiğine benzemektedir. Şekil 4.3'de memristörün akım gerilim karakteristiği verilmiştir. Memristör teorik olarak üzerindeki son direnç değerini belleğinde tutar. Üzerindeki enerji kesilse bile yeniden enerji verildiğinde son durumundan işlem yapmaya devam eder. Bu yüzden **memory** ve **resistor** kelimelerinin birleşimiyle memristör adını almıştır. Literatürdeki bazı yayınlarda Türkçeye "**Hafızalı Direnç**" olarak çevrilmiştir (Mutlu ve ark., 2009; Mutlu ve Karakulak, 2010; Aytekin ve Mutlu, 2013). Şekil 4.5'de memristörün sembolü verilmiştir.



Şekil 4.5. Memristörün Sembolü

Memristörün elektriksel büyüklüğü "**Memristans**" olarak adlandırılır ve "**M**" ile ifade edilir, memristansın tanım bağıntısı Denklem 4.1'de verilmiştir. Denklem 4.1'in akım ve gerilim türünden yazılmasıyla elde edilen denklem 4.2 direncin tanım denklemine benzediğinden memristörün birimi "**ohm**" olarak tanımlanmıştır.

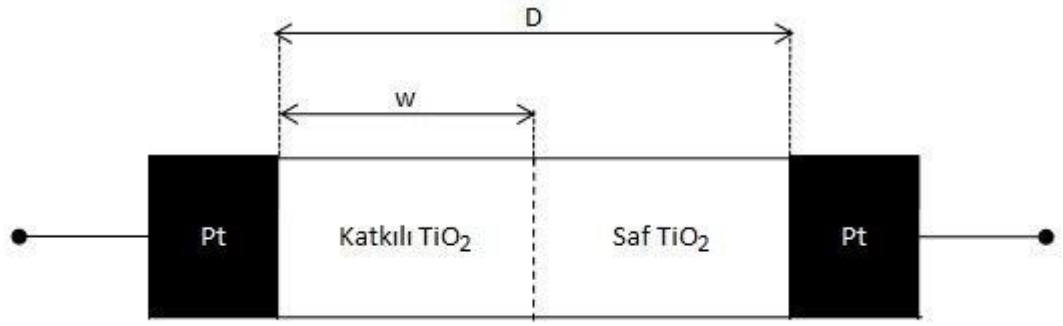
$$M(q) = \frac{d\phi}{dq} \tag{4.1}$$

$$\mathrm{M}\big(\mathrm{q(t)}\big) = \frac{\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{dt}}}{\frac{\mathrm{dq}}{\mathrm{dt}}} = \frac{\mathrm{V(t)}}{\mathrm{I(t)}} \tag{4.2}$$

4.3. Memristör Modelleri

4.3.1. HP Memristör Modeli (Doğrusal İyon Sürüklenmesi Modeli)

2006 yılında HP laboratuvarlarından Stanley Williams ve ekibi nano elektronik üzerine çalışma yaparlarken bir elemanın tuhaf davranışlar gösterdiğini fark ettiler. Sonra ekibin yaptığı literatür taraması üzerine bu elemanın aslında Leon Chua'nın 1971'deki makalesinde bahsettiği eleman olduğunun farkına vardılar (Chua, 1971). 2008 yılında "Kayıp Memristör Bulundu" isimli makalelerini yayınlayarak bilim dünyasına memristörün fiziksel olarak gerçeklendiğini duyurdular (Strukov ve ark., 2008). Şekil 4.6'da HP memristör modeli verilmiştir.



Şekil 4.6. HP Memristor Modeli

HP memristör modelinin memristansı matematiksel olarak Denklem 4.3'teki gibi ifade edilebilir. Burada 'R_{MEM}' memristörün toplam direncini, 'R_{OFF}' memristörün saf TiO_2 kısmını, 'R_{ON}' memristörün katkılanmış TiO_2 kısmını ifade eder. 'x' katkılı TiO_2 kısmının bütün TiO_2 katmanına oranını ifade eder ve 0-1 arasında değer alır. 'w' katkılı TiO_2 kısmını, 'D' ise bütün TiO_2 katmanını temsil eder. Denklem 4.4'te 'x' oranının 0 ve 1 olduğu durumlarda memristörün toplam direncinin değişimi, denklem 4.5'te ise bu oranın tanım denklemi verilmiştir. Memristörün akım gerilim ilişkisi ise denklem 4.6'da verilmiştir.

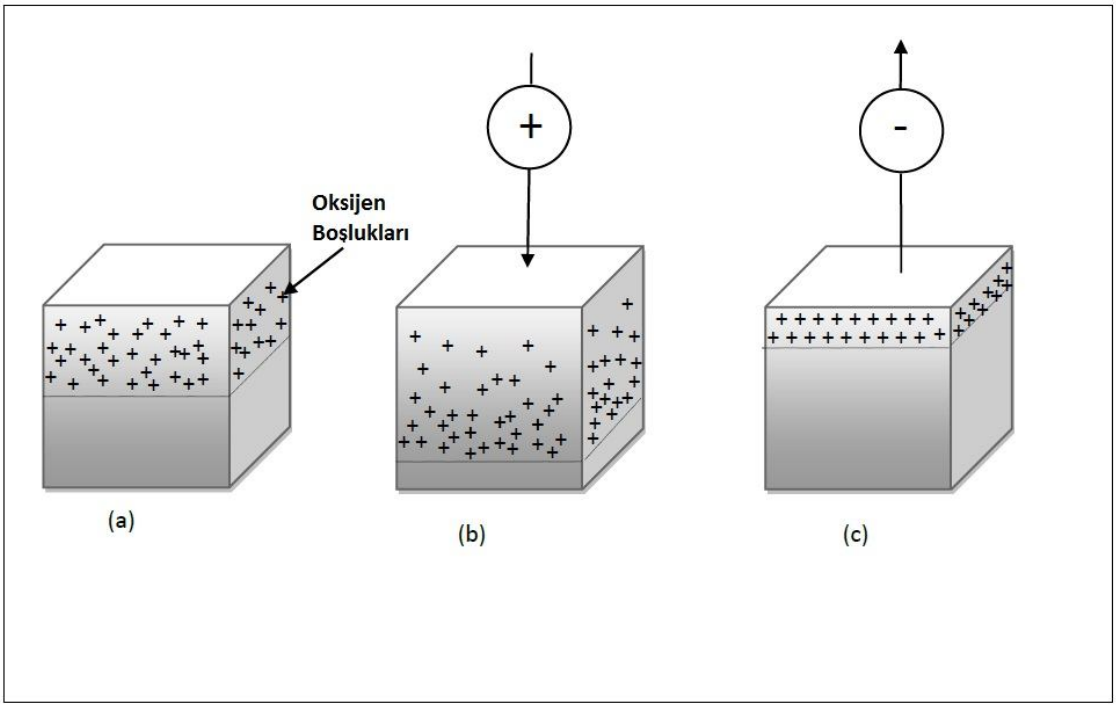
$$R_{MEM}(x) = R_{ON} * x + R_{OFF} * (1 - x) \tag{4.3}$$

$$R_{MEM}(x) = \begin{Bmatrix} x = 0\ ise\ R_{MEM} = R_{OFF} \\ x = 1\ ise\ R_{MEM} = R_{ON} \end{Bmatrix} \tag{4.4}$$

$$x = \frac{w}{D} \tag{4.5}$$

$$v(t) = \left(R_{ON}\frac{w(t)}{D} + R_{OFF}\left(1 - \frac{w(t)}{D}\right)\right).i(t) \quad (4.6)$$

Bu çalışmada Stanley Williams ve ekibi titanyum dioksit (TiO_2) ile platin (Pt) kullandılar. TiO_2 de silisyum (Si) gibi yarıiletken bir madde ve saf halde epey yüksek bir direnc sahiptir. Ancak TiO_2 farklı elementler ile etkileşime girerek iletken hale getiriliyor. TiO_2'yi iletken hale getirmek için kullanılan katkı elementleri şiddetli bir elektrik alanının altında kararlı ve akım doğrultusunda sürüklenme eğiliminde oluyorlar. Bu yüzden bu modele ayrıca doğrusal iyon sürüklenmesi modeli de denilmektedir. Bu modelde üç nanometre kalınlığında bir TiO_2 tabakası iki platin (Pt) tabaka arasına yerleştirildi. TiO_2 tabakasının bir bölümünde, normalde oksijen atomlarının olması gereken artı yüklü boşluklar vardı. Ekip bu boşluklara yakın bir elektroda alternatif akım uygulayarak artı ve eksi yük şeklinde salınmasını sağladı. Elektrot artı yüklüyken yüklü boşlukları ittiriyor ve akımın ikinci elektroda doğru akmasını sağlıyordu. Akımı kestiklerindeyse boşluklar hareket etmeyi bırakıyor ve memristörün yüksek ya da düşük dirençli halde kalmasını sağlıyordu (Buğdaycı, 2012). Şekil 4.7'de pozitif ve negatif gerilim uygulandığında memristörün davranışları gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Pozitif ve Negatif Gerilim Uygulandığında HP Memristör Davranışları (a) İlk Durumda (Gerilim Uygulanmadan Önce), (b) Pozitif Gerilim Uygulandığında, (c) Negatif Gerilim Uygulandığında (Kerur, 2010)

4.3.2. Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenmesi Modeli

Doğrusal olmayan iyon sürüklenmesi modeli, gerilim ve iç durum türevi arasında doğrusal olmayan bağımlılığı bulunan bir gerilim kontrollü memristör modeli olarak varsayılmaktadır. Bu model aynı zamanda asimetrik anahtarlama davranışını varsaymaktadır. Doğrusal iyon sürüklenmesi modeli, memristörde histerezis karakteristikleri üretir, ancak temel elektrodinamik konusunda bazı sınırlamaları da vardır. Çalışmalar ve deneyler, uygulanan memristörlerin davranışının oldukça doğrusal olmadığını ve doğrusal iyon sürüklenme modelinin yeterince doğru olmadığını kanıtlamıştır. Lojik devreler gibi bazı uygulamalar için doğrusal olmayan özellikler gereklidir. Bu nedenle, daha uygun modeller geliştirilmiştir.

Temel olarak ince bir film yapısı boyunca (örneğin; 10 nm) küçük bir gerilim uygulanması (örneğin; 1 V), çok büyük bir elektrik alanına (örneğin; 10^6 V/ cm) neden olacaktır ki bu da iyonik taşınmada hatırı sayılır derecede doğrusal olmayan iyon transferine neden olur. Sonuç olarak, enerji bariyerinde hızlı ve önemli bir azalma olur. Bu doğrusal olmayan davranışlar, elemanın iki ucunda kendini gösterir; burada iki bölge arasındaki sınır yavaş yavaş durur. Diğer bir deyişle, memristör R_{ON} veya R_{OFF} durumuna ayarlandığında, başka hiçbir harici uyaran durumu geri alamaz.

İyon sınırının (katkılı ve saf TiO_2 arasındaki sınır) elemanın her iki tarafına kadar hareket etmeyeceği unutulmamalıdır (Doğrusal olmayan şekilde hareket eder). Eğer böyle bir şey meydana gelirse, bu elemanda herhangi bir fiziksel oksijen boşluğu olmayacağı ve katkılanan bölgenin uzunluğunun sıfır olduğu anlamına gelir ki bu da anlamsızdır. Benzer şekilde, katkılı bölge de tüm elemanın uzunluğunu kaplayamaz. Eğer eleman sadece saf veya sadece katkılı kısımdan oluşsaydı memristör özelliği değil normal bir direnç özelliği gösterirdi. Bu nedenle durum değişkeni $0 < w <$D sınırları arasında veya [0,1] aralığında normalize edilmelidir.

Lehtonen ve arkadaşları (Yang ve ark., 2008) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarını kullanarak yeni bir model önermişlerdir (Lehtonen ve Laiho, 2010). Bu modele doğrusal iyon sürüklenmesi modeli adını vermişlerdir. Bu modelin akım-gerilim ilişkisi denklem 4.7'deki gibi tanımlanmıştır.

$$i(t) = w(t)^n \underbrace{\beta \sinh\big(\alpha v(t)\big)}_{1} + \underbrace{x[\exp(\gamma v(t) - 1)]}_{2} \tag{4.7}$$

Burada α,β,γ ve x deneysel uydurma parametreleridir ve n ise durum değişkeninin akımı nasıl etkileyeceğini belirler. Burada, *w* durum değişkeni, [0,1] aralığında normalize edilir. Model asimetrik anahtarlama davranışı gösterir. ON durumunda iken, *w* bire yakınsar ve model asimetrik anahtarlama davranışı gösterir, bu durumda denklem 4.7'nin ilk terimi (1 ile gösterilen kısım) akımın baskın kısmıdır. Bu da tünel olayına benzemektedir. OFF durumunda, *w* sıfıra yakındır ve bu durumda denklem 4.7'nin ikinci terimi (2 ile gösterilen kısım) akımın baskın kısmıdır. Bu da ideal diyot denklemine benzemektedir.

4.3.3. Simmons Tünel Bariyer Modeli

Önceki modeller, HP memristör modelinin fiziksel olarak temsil edilmesine dayanıyordu; katkılı ve saf iki TiO_2 katman arasında her birinin bir direnç özelliği gösterdiği bir eleman modeliydi. Pickett ve arkadaşları 2009 yılında daha doğru bir memristör modeli önerdi (Pickett ve ark., 2009). Bu modelde, HP'nin modelindeki seri olarak bağlı iki direnç yerine, bir direnç ve bir elektron tüneli bariyeri seri bağlıdır.

Model doğrusal olmayan ve asimetrik anahtarlama özellikleri sergilemektedir. Simmons tüneli bariyer genişliği durum değişkeni x'dir (Simmons, 1963). Yani, x'in türevi oksijen boşluğu sürüklenme hızını verir ve denklem 4.8'de verilmiştir.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{Bmatrix} C_{off}\sinh\left(\frac{i}{i_{off}}\right)\exp\left[-\exp\left(\frac{x-a_{off}}{w_c}-\frac{|i|}{b}\right)-\frac{x}{w_c}\right], & i>0 \\ C_{on}\sinh\left(\frac{i}{i_{on}}\right)\exp\left[-\exp\left(\frac{x-a_{on}}{w_c}-\frac{|i|}{b}\right)-\frac{x}{w_c}\right], & i<0 \end{Bmatrix} \quad (4.8)$$

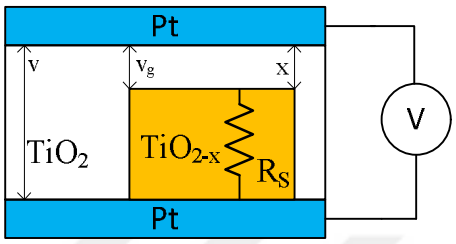
C_{off}, C_{on}, a_{off}, a_{on}, i_{off}, i_{on} ve b deneysel uyarlama parametreleridir. C_{on}, C_{off}'a göre daha büyük bir değerdir ve ikisi de x'in değişiminin üzerinde etkilidir. i_{off} ve i_{on} akım sınırlama eşikleridir. Bu akım eşikleri dijital uygulamalarda yararlıdır. a_{off} x'in üst sınırını, a_{on} x'in alt sınırını belirler. Tanımlanmış aralık dâhilinde, durum değişkeninin türevi, durum değişkeninin kendisinden çok daha küçüktür.

Simmons tünel bariyer modelinin akım-gerilim ilişkisi denklem 4.9'daki gibi tanımlanmıştır. Denklem 4.10'da ise oksitlenmiş bölge geriliminin denklemi yer almaktadır.

$$i(t) = \tilde{A}(x,v_g)\phi_1(v_g,x)\exp\left(-B(v_g,x)\phi_1(v_g,x)^{0.5}\right) - \tilde{A}(x,v_g)(\phi_1(v_g,x)+e|v_g|)\exp(-B(v_g,x)(\phi_1(v_g,x)+ev_g)^{0.5}) \quad (4.9)$$

$$v_g = v - i(t)R_s \tag{4.10}$$

x tünel bariyer genişliğini, R_s kanal direncini, V elemana uygulanan gerilimi, v_g oksitlenmiş bölge gerilimini, v elemanın iç gerilimini (elemana uygulanan gerilime eşit olmasına gerek yok) temsil eder. Şekil 4.8'de Simmons Tünel bariyer modelinin şekli verilmiştir.



Şekil 4.8. Simmons Tünel Bariyer Modeli

Simmons tünel bariyer modelinin memristörün en doğru fiziksel modeli olduğu iddia edilmiştir (Pickett ve ark., 2009). Ancak, şimdiye kadar bazı sorunları vardır:

- Karmaşık bir yapıya sahiptir.
- Akım ve gerilim arasındaki ilişki açık değildir.
- Genel değildir. Her tür memristör için geçerli değildir ve yalnızca bir memristör modeli için uygundur.

Simmons tünel bariyer modelinin karmaşık bir SPICE modeli önerilmiştir (Abdalla ve Pickett, 2011); ancak matematiksel olarak yetersiz bir modeldir. Dolayısıyla, doğru bir model olabilir ancak daha basit ifadelere ihtiyaç duymaktadır.

4.3.4. Eşik Uyarlamalı Memristör Modeli (TEAM Model)

Bu model, Kvatinsky ve ekibi tarafından geliştirilmiş basit ve genel bir modeldir (Kvatinsky ve ark., 2013). Simmons tünel bariyer modeli ile aynı fiziksel modeli, daha basit ifadelerle temsil eder. Analiz basitleştirme ve hesaplama verimliliği için birkaç varsayım yapılmaktadır:

- Belirli bir eşiğin aşağısında, durum değişkeni değişmez.
- Memristör akımı ve durum değişkeni arasında üssel ilişki yerine, bir polinom ilişkisi vardır.

TEAM modeli farklı memristor modellerine (örneğin, Simmons tünel bariyer modeli) uyarlanabilir. Akımın fonksiyonu ve durum değişkeninin fonksiyonu x'e bağlı olarak çarpılarak Simmons tünel bariyer modeline denklem 4.11'deki gibi modellenebilir.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \begin{cases} k_{off}.\left(\frac{i(t)}{i_{off}} - 1\right)^{a_{off}}.f_{off}(x), & 0 < i_{off} < i \\ k_{on}.\left(\frac{i(t)}{i_{on}} - 1\right)^{a_{on}}.f_{on}(x), & 0 < i_{on} < i \\ 0, & Diğer\ Durumlarda \end{cases} \quad (4.11)$$

$k_{off}, k_{on}, a_{off}, a_{on}$ sabit ($k_{off} > 0, k_{on} < 0$), i_{off} ve i_{on} akım eşik değerleri, x iç durum değişkeni, $f_{off}(x)$ ve $f_{on}(x)$ iç durum değişkeninin sınırlarını belirlediği pencereleme fonksiyonlarıdır (). Bu iki fonksiyon eşit olmak zorunda değildir. Aynı Simmons tünel bariyer modelinde olduğu gibi asimetri x'e bağlıdır.

Akım-gerilim karakteristiğinin denklem 4.6'ya benzediğini farz edersek, x 'e bağlı olarak memristans doğrusal olarak değişir ve akım gerilim arasındaki ilişki denklem 4.12'deki hale gelir.

$$v(t) = \left[R_{ON} + \frac{R_{OFF} - R_{ON}}{x_{off} - x_{on}}(x - x_{on})\right].i(t) \quad (4.12)$$

Fakat Simmons tünel bariyeri akım-gerilim ilişkisini kullanırsak, tünel bariyer genişliğindeki herhangi bir değişiklik denklem 4.13'de görüldüğü gibi memristansı üssel olarak değiştirecektir.

$$v(t) = \left[R_{ON}\, e^{\frac{\lambda}{x_{off} - x_{on}}}(x - x_{on})\right].i(t) \quad (4.13)$$

Burada λ deneysel uyarlama parametresidir ve R_{on}, R_{off} efektif sınır dirençleridir. Denklem 4.14'de λ'nın tanım bağıntısı verilmiştir.

$$\frac{R_{off}}{R_{on}} = e^{\lambda} \quad (4.14)$$

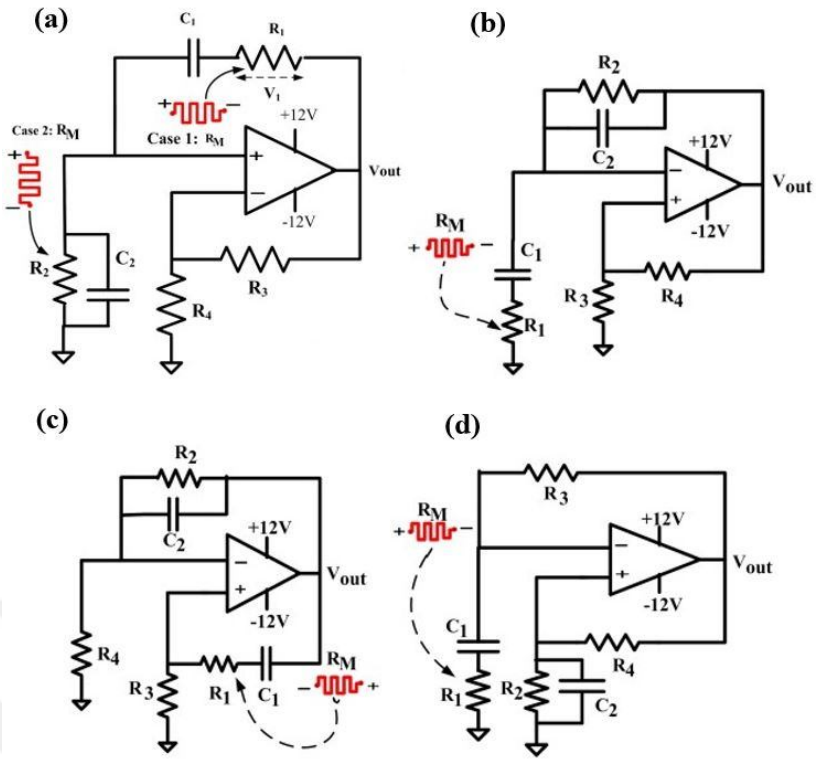
4.4. Memristörün Kullanım Alanları

2008 yılında HP ekibi tarafından memristörün fiziksel olarak keşfinden itibaren bilim dünyasında bu yeni eleman için büyük bir uygulama araştırma akımı başladı. Bu konudaki girişimler memristörün bir devre mimarisinde kullanılması ve uygulamaları, eski uygulamalara memristörün eklenmesi ve sonuçların karşılaştırılması, memristörün yeni özelliklerinin kullanılması ve bunlarla yeni devre mimarileri oluşturmak şeklinde özetlenebilir. Sonuç olarak, son dokuz on yılda bu konuda oldukça çok makale ve bildiri yayınlandı ve yayınlanmaya devam ediyor. Bu bölümde, memristörün geniş kullanım alanlarından doğrusal olmayan analog devre tasarımı, kaotik sistemler, geçici olmayan bellek ve nöromorfik sistemler ele alınacaktır.

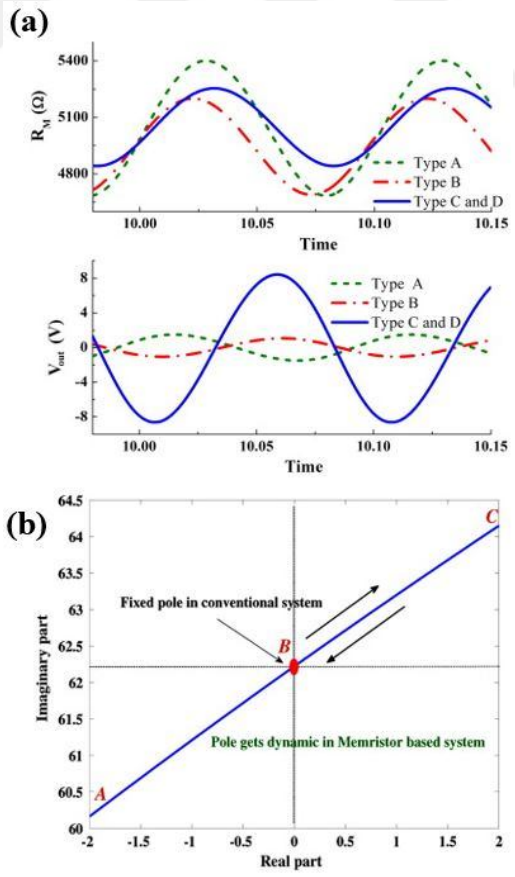
4.4.1. Analog Devreler

4.4.1.1. Memristör Tabanlı Sinüzoidal Osilatörler

Memristör tabanlı sinüzoidal osilatör fikri, en yaygın osilatör devrelerinde bir veya birden çok direncin yerine memristör kullanılmasıyla devrelerin buna cevabının araştırılması temeline dayanır ve bu konuda literatürde pek çok yayın bulunmaktadır (Talukdar ve ark., 2010; 2011; 2012). Örneğin, dört farklı Wien köprü osilatör, memristörler kullanılarak test edilmiştir bu çalışmada sonuç olarak, sürekli salınım gözlemlenmiş ve yaklaşık bir salınım frekansı elde edilmiştir (Talukdar ve ark., 2011). Şekil 4.9'da bu dört farklı Wien köprü osilatör devrelerinde direnç yerine memristör kullanılarak elde edilen devreler verilmiştir. Bu modeller PSPICE kullanılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir ve Şekil 4.10a'da benzetimlerden elde edilen çıkış cevapları ve her bir model için memristans değerleri verilmiştir. Şekil 4.10b'de ise memristans değerinin değişmesine rağmen sürdürülebilir bir salınım elde edilmiştir ve bu da zamana bağlı salınım kutuplarını yansıtan parametrik osilasyon için iyi bir örnektir.



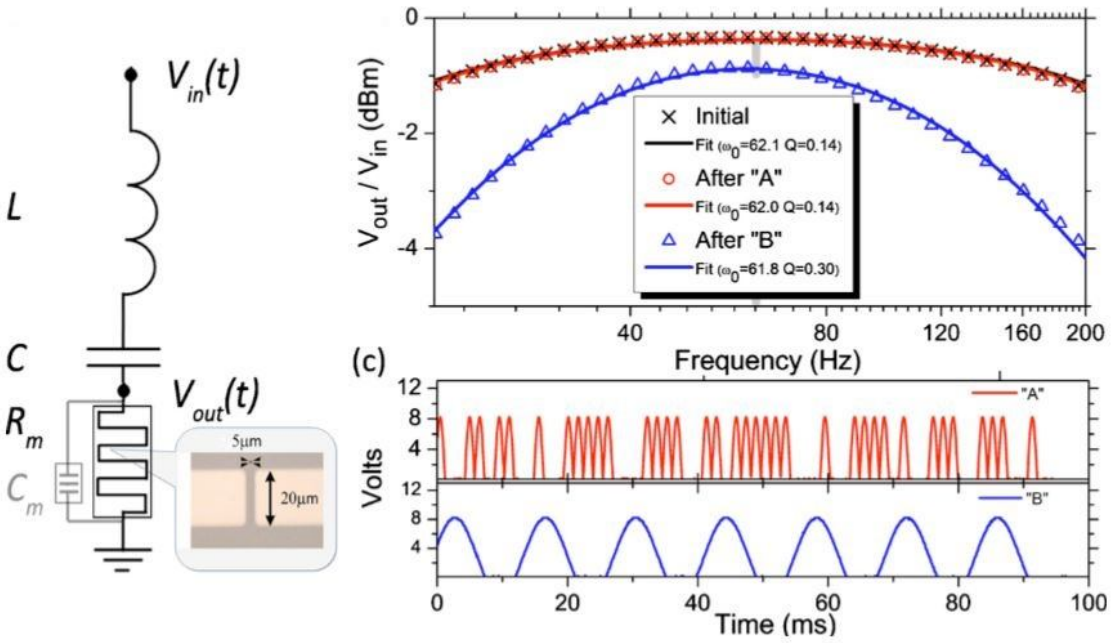
Şekil 4.9. Wien Köprü Osilatör Ailesi **a)** A tipi **b)** B tipi **c)** C tipi **d)** D tipi (Radwan ve Fouda, 2015)



Şekil 4.10. a) Wien Köprü Osilatörlerin Geçici Tepki Cevabı **b)** A Tipi Osilatör İçin s Düzleminde Salınım Kutupları (Radwan ve Fouda, 2015)

4.4.1.2. Filtre Uygulamaları

Memristansın sabit bir değere sahip olmaması ve uygulanan enerjiye göre değişimi, kesim frekansının ayarlanabilmesi ile memristörün filtre uygulamalarında kullanımı dirence göre belirli bir avantaj sağlamaktadır. Filtrelerde memristör kullanımı ilk defa Driscoll ve arkadaşları tarafından vanadyum dioksit (VO_2) memristörün özellikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Driscoll ve ark., 2010). Bu çalışmada, basit bir R_MLC bant geçiren filtre devresi kullanılmıştır. Bu devrede, direnç yerine VO_2 memristör kondansatör ve bobine seri olarak bağlanmıştır ve böylece uyarlanabilir filtre deneysel olarak gösterilmiştir. Şekil 4.11'de devre şeması gösterilmiştir.

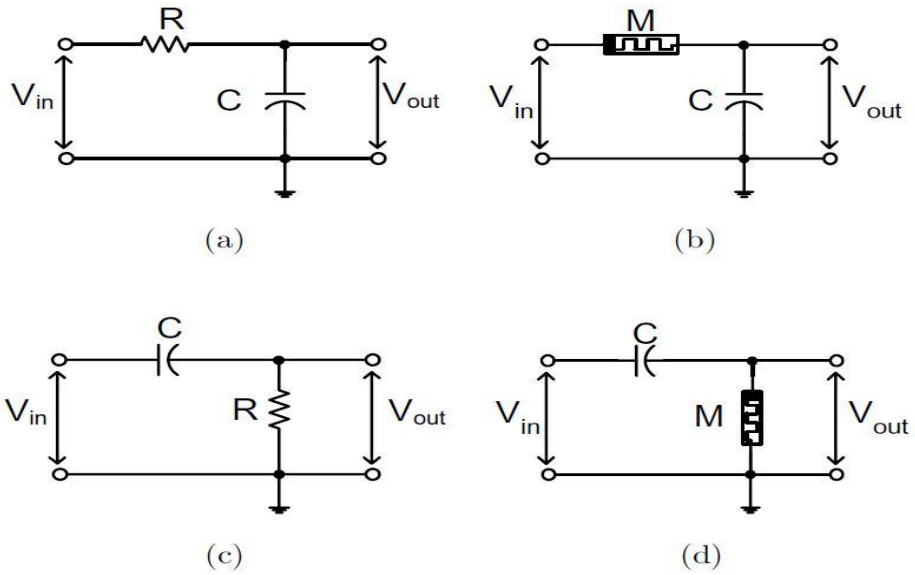


Şekil 4.11. R_MLC Bant Geçiren Filtre Devresi, Transfer Fonksiyonu (V_{out}/V_{in}), Zamana göre memristans durumu (Driscoll ve ark., 2010)

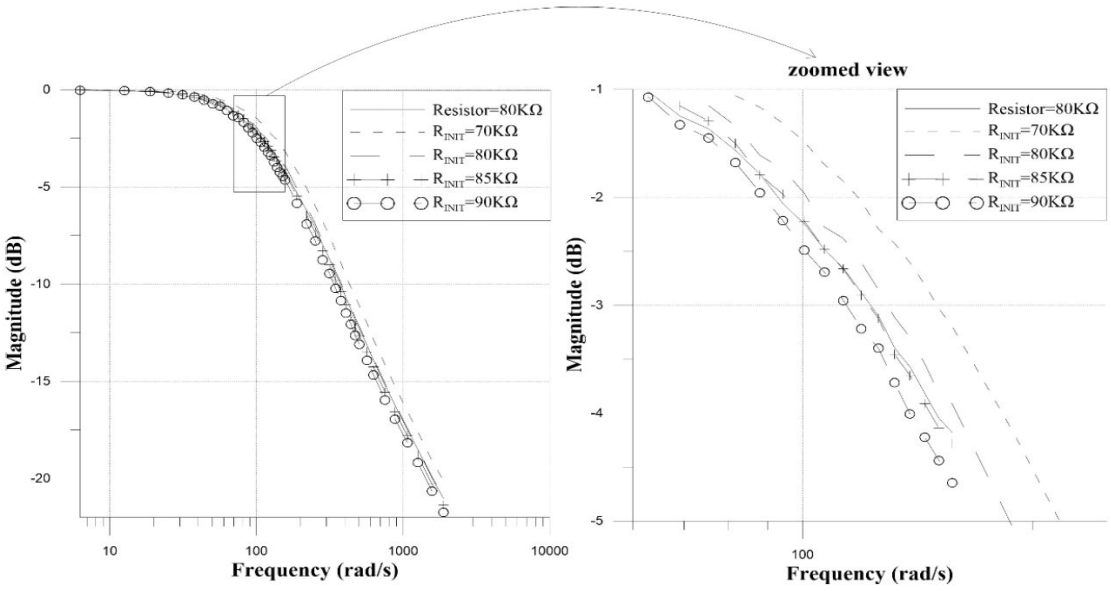
Bununla birlikte, başka bir memristör modeli de birinci ve ikinci dereceden Alçak Geçiren Filtre (AGF) elde etmek için kullanılmıştır (Chew ve Li, 2012). Bu model, baskı devre kartının bakır tabakasına yerleştirilmiş çinko oksit (ZnO) nanotellerden oluşmaktadır. ZnO model kondansatör veya bobin ile alçak geçiren filtre devresini oluşturur ve girişte uygulanan gerilime göre memristans değeri değişir. Ayrıca, alçak geçiren filtrelerin kazancı, sönümlenmesi ve Q faktörü, giriş gerilimlerine göre değişir.

Memristörün bir diğer filtre uygulamasında ise direnç ve kondansatörden (RC) oluşan birinci dereceden AGF ve Yüksek Geçiren Filtre (YGF) uygulamalarıdır. Bu

uygulamalarda genellikle direnç yerine memristör kullanılmıştır ve bir memristör-kondansatör (MC) filtre devresi elde edilmiştir. Elde edilen filtre devresinin davranışı incelenerek RC devresi ile sonuçlar karşılaştırılmıştır (Sozen ve Cam, 2013; 2014). Şekil 4.12'de RC ve MC devrelerinden oluşan AGF ve YGF filtreleri verilmiştir. Şekil 4.13'de ise AGF devresi için genlik cevabı verilmiştir.



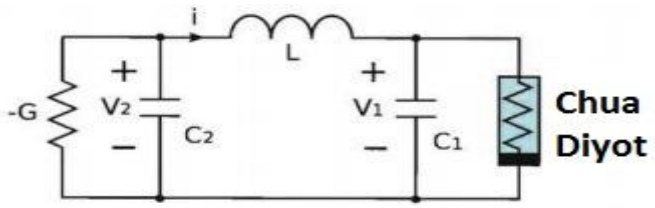
Şekil 4.12. a) RC Alçak Geçiren Filtre **b)** MC Alçak Geçiren Filtre **c)** RC Yüksek Geçiren Filtre **d)** MC Yüksek Geçiren Filtre (Sozen ve Cam, 2014)



Şekil 4.13. AGF için RC ve MC Filtrelerin Genlik Cevabı Karşılaştırılması (Sozen ve Cam, 2014)

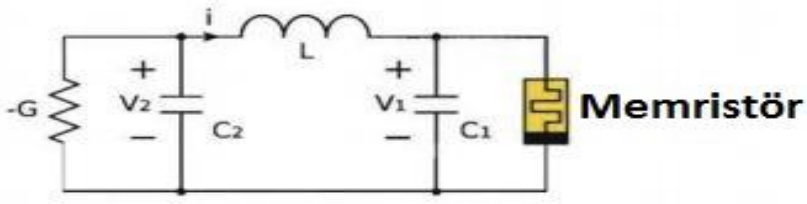
4.4.2. Kaotik Devreler

Memristörlerin bir diğer kullanım alanı da kaotik devreler yani kaos uygulamalarıdır. Bu alandaki çalışmalar memristör özellikleriyle kaotik bir cevap almaya yöneliktir. Memristörün etkileri düşünüldüğünde, belirli parametrelerde bir güç kaynağına bağlanan memristör kaos etkisi gösterebilir. Özellikle Chua'nın kaos devresinde memristörün kullanımı yaygınlaşmıştır (Parker ve Chua, 1987). Şekil 4.14'de Chua'nın kaos devresi yer almaktadır.

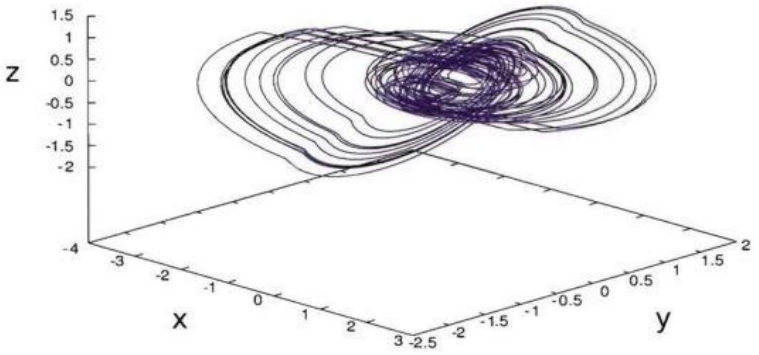


Şekil 4.14. Chua Kaos Osilatör Devresi

Bu devrede diyotun yerine memristör konularak memristör tabanlı bir kaos devresi elde edilmiştir ve bu osilatörde de kaotik davranışlar gözlemlenmiştir (Itoh ve Chua, 2008). Şekil 4.15'de memristör ile tasarlanan Chua kaos osilatörü devresi, Şekil 4.16'da ise bu devreden elde edilen kaos karakteristiği verilmiştir.



Şekil 4.15. Memristör Chua Kaos Osilatör Devresi



Şekil 4.16. Memristör Chua Kaos Osilatör Devresinin Karakteristiği

4.4.3. Geçici Olmayan Bellek

Gerçeğe daha yakın olan ve yakın gelecekte yaygın olarak kullanılabilecek olan memristörün ilk uygulamalarından birisi de, geçici olmayan belleklerdir. Memristörün özellikle üzerinde enerji yokken son durumunu koruması özelliği (bellek özelliği) sayesinde NVRAM (Non-Volatile Random Access Memory) uygulamaları için iyi bir aday konumundadır. Şimdiye kadar, literatürde memristörün bellek mimarisinde kullanıldığı birçok makale yayınlandı (Ho ve ark., 2009; Lee ve ark., 2011; Park ve ark., 2013).

4.4.3.1. Anahtarlamalı Direnç RAM (ReRAM)

ReRAM veya anahtarlamalı direnç RAM bellekler (bazı kaynaklarda memristör bellekleri olarak da geçiyor (Chua, 2014)) dünya çapında birçok şirketin hâlihazırda araştırma konularından birini oluşturmaktadır (HP, IMEC, Fujitsu, Sharp and Unity Semiconductor). Bu bellek türünün çalışma mantığı, lojik değerler "1" ve "0" üzerine kuruludur. Memristörün, ON konumunda yani düşük direnç değerinde "1", OFF konumunda yani yüksek direnç değerinde ise "0" değerini alır (Kavehei, 2011).

Bu tür yapılarda geçiş metali oksitleri olarak çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Anahtarlamalı direnç yapısı ilk defa 1964'te nikel oksitte (NiO) keşfedilmiştir (Gibbons ve Beadle, 1964). Diğer anahtarlamalı direnç özelliği gösteren malzemeler Titanyum dioksit (TiO_2), Stronsiyum Titanat ($SrTiO_3$) Zirkonya (ZrO_2) ve Hafnia (HfO_2). Bu malzemelerde tek kutuplu ve çift kutuplu olmak üzere iki anahtarlama mekanizması gözlemlendi (Xie, 2011). Elemanın durumu üzerine bir potansiyel uygulayarak değişebilir. İki kutuplu anahtarlama cihazları için önceki durumuna geri dönmek için negatif gerilim uygulanmalıdır. Tek kutuplu anahtarlama durumunda, elemanın durumunu değiştirmek için anahtarlama gerilimi iki eşik geriliminden yüksek olmalıdır (Kavehei ve ark., 2010; Kavehei, 2011; Kavehei ve ark., 2011).

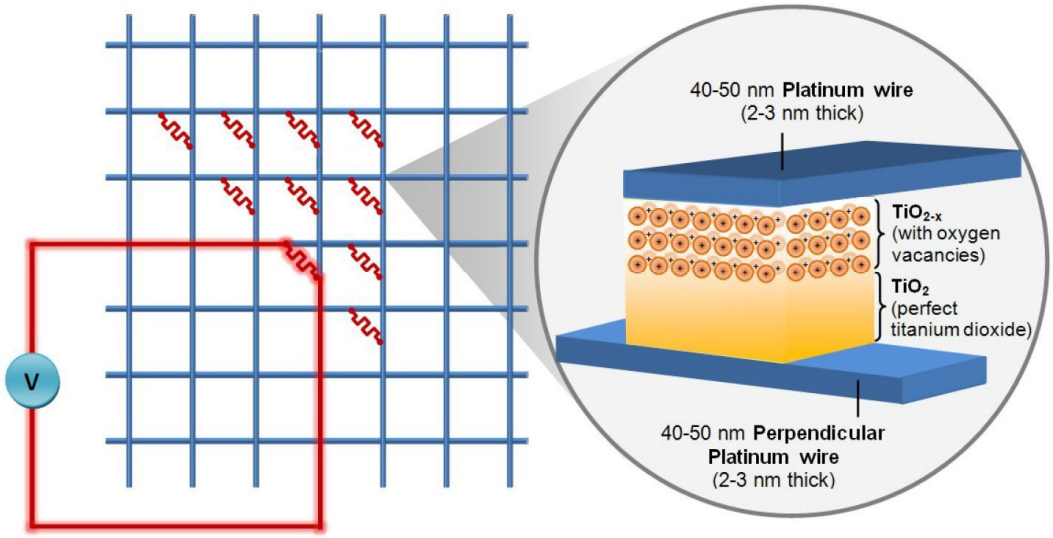
ITRS2009 (Yarı İletkenler için Uluslararası Teknoloji Yol Haritası) raporuna göre, 2019 için DRAM hücrelerinin 16 nm yarı alanında 46 GB / cm^2 (% 100 verimlilik) kapasiteye ulaşması tahmin ediliyor. Buna karşılık memristör 10 nm yarı alanı için 110 GB / cm^2 ve 5 nm yarı alanı için 460 GB / cm^2 gibi daha yüksek kapasiteler vadediyor (Williams, 2008; Lewis ve Lee, 2009).

4.4.3.2. Çapraz Bağlantı (Crossbar)

Çapraz bağlantı yapısı mimari düzeyde en umut verici nano-yapılardan biridir (Bahar ve ark., 2007). Çok sayıda anahtar bulunması nedeniyle çapraz bağlantı hata toleransı vardır. Ayrıca nano ölçeğindedir ve potansiyel olarak daha ucuz ve daha kolay üretim sürecine sahiptir. Diğer avantajları ölçeklenebilirlik, esneklik ve yüksek yoğunluktur. Çapraz bağlantı ağları, büyük miktarda hesaplama yapmak için kullanılabilir.

Her çapraz, yatay veya dikey bağlantı noktasında memristör anahtarlarının bulunduğu nanotellerden oluşan bir yapıya sahiptir. Her bağlantı noktasının büyüklüğü 2-3 nm civarındadır (Transistor bağlantı noktaları 90 nm). Nanotellerin uygulanması için imalat yöntemi, basit, düşük maliyetli ve yüksek çözünürlüklü litografi işlemi olan nano baskı litografidir (NIL).

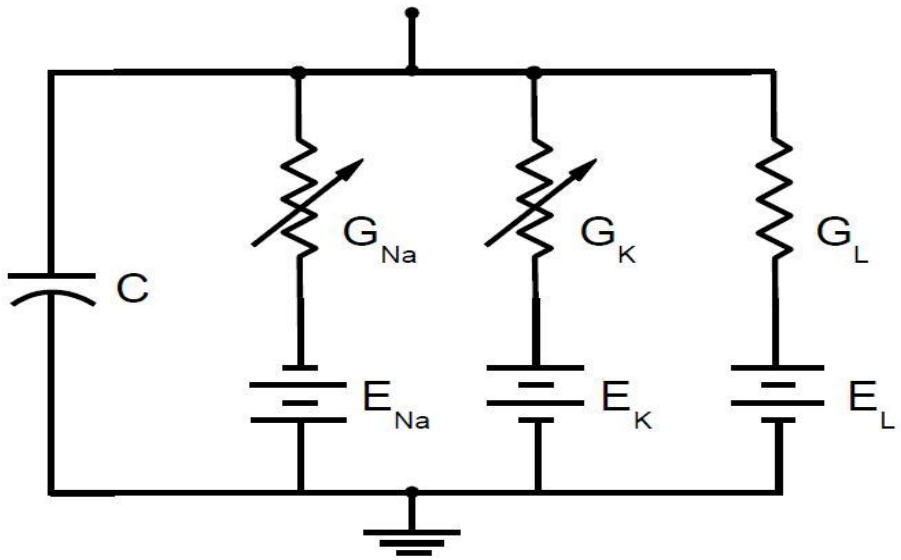
(Bahar ve ark., 2007)'da ele alındığı üzere, üç boyutlu istiflenmiş yapılarda son derece yüksek kapasite ve ultra düşük güç tüketimi bu yapıların DRAM'e göre en büyük avantajıdır. Adresleme karmaşıklığı kapasite arttıkça logaritmik olarak büyür. Dolayısıyla, son derece yüksek kapasitelerde, genel adresleme maliyeti daha azdır. Çapraz bağlantı yapısının her bir bağlantı noktasında bir memristör anahtarı olan yapısı Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Çapraz Bağlantı Yapısı

4.4.4. Nöromorfik Sistemler

"... Sinapsların memristör olduğunu fark ettim. İyon kanalı benim aradığım kayıp halkaydı ve zaten doğada var oldu... ". Leon Chua, memristörün işlevinin sinapsınkiyle oldukça benzer olduğunu bu sözler ile ifade ediyordu. Ayrıca, 1961 Fizyoloji Nobel Ödülü alan Hudgin-Huxley nöron modelini temel alarak bir aksonda bulunan sodyum ve potasyum iyon kanallarının zamanla değişen bir iletkenliğe sahip olduğunu ve bunun da memristif elemanlara bir örnek olduğunu açıkladı. Şekil 4.18'de Hudgin-Huxley nöron modeli yer almaktadır.



Şekil 4.18. Hudgin-Huxley Nöron Modeli

İnsan zihnindeki sinir ağı, nöroplastisite tarafından tanımlanan güçlü veya zayıf bağlantıları oluşturma kabiliyetine sahiptir. Bir nöronun işlevinde neden olan doğrusal olmayan bağımlılıklar aldığı aksiyon potansiyellerine bağlıdır. Bu doğrusal olmayan şeyleri taklit edecek kadar yakın olabilecek tek fiziksel aygıt memristördür. Bu, yapay zekâda yeni bir döneme giden bir yol olabilir. Wei Lu ve Michigan Üniversitesi'ndeki araştırmacı grubu bir melez yonga (CMOS nöronları ve memristör sinapslarından oluşan) üzerinde bazı çalışmalar yaptılar (Kim ve ark., 2011). Sistemin, STDP (Spike Time Dependent Plasticity) yani zamana bağlı sivri esneklik gibi sinaptik fonksiyonları sergileyebildiğini gösterdiler (Versace ve Chandler, 2010).

Her sinapsın içinde karmaşık bir dizi sinyal işleme yapılır ve nöromorfik mimarilerin (veya beyin benzetim sistemlerinin) başarmak istediği şey de budur. Akım

mikroişlemcilerinde tek bir santimetre kareye yaklaşık 10^9 yoğunluğa sahipken, insan sinapsları 10 kat daha fazla yoğunluğa sahiptir (cm^2 başına 10^{10}). Tek bir sinaps modellemek için, sinapsın içinde ne olacağını bilmek gereklidir (Versace ve Chandler, 2010).

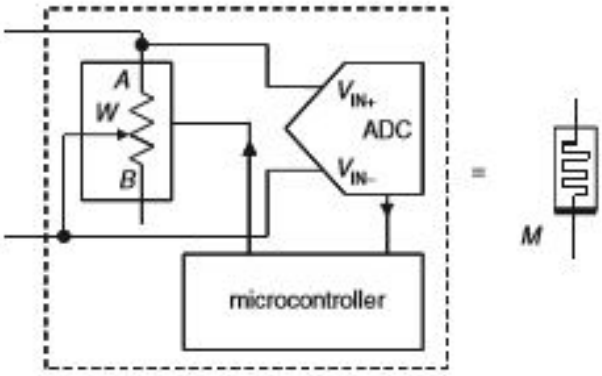
4.4.5. Diğer Araştırma Alanları

Farklı alanlardaki memristör uygulamaları hakkında memristör devre modellemesi, yeni malzemeler, devre tasarımı, dönüş tabanlı elektronik, astroloji, biyoloji gibi birçok alanda araştırma yapılmaktadır. Yakın zamanda literatürde yayınlanan bazı örneklerin kısaca listesi aşağıda verilmektedir:

- Memristör Tabanlı Görüntü Şifreleme (Lin ve Wang, 2009; Lin ve Wang, 2010)
- Memristör Tabanlı Yükselteç (Yu ve ark., 2009)
- Ultra Geniş Band Kablosuz Sistemler İçin Memristor Tabanlı Alıcı (Witrisal, 2009a; Witrisal, 2009b)
- Memristörlerde Çeşitli Fiziksel Bilgi Depolama Mekanizmaları (Driscoll ve ark., 2009a; Driscoll ve ark., 2009b)
- Memristor Tabanlı Çapraz Bağlantı Yapılarıyla Sayısal Mantık Yapıları (Raja ve Mourad, 2009; Borghetti ve ark., 2010)
- Karbon Nanotüplerine Dayanan Bir Elektromanyetik Transistör/ Memristör (EMTM) (Sklyar, 2009)

4.5. Memristör Emülatör (Taklitçi) Devreleri

Hâlihazırda memristörün tek bir eleman olarak bulunmaması ve henüz bir üretim standardının olmaması bilim insanlarını memristör emülatör devrelerine yöneltmiştir. Memristör emülatör devreleri, temel olarak mevcut devre elemanlarıyla memristörün akım-gerilim karakteristiğini gösteren, memristif davranışlar sergileyen bir devre tasarlanması fikrine dayanır. Memristör modellerinin fiziksel donanım hali olarak düşünülebilir. Bu bağlamda bilinen ilk memristör emülatör devresi Pershin ve Di Ventra tarafından geliştirilmiştir (Pershin ve Di Ventra, 2010). Bu devrede, memristörü modellemek için bir adet dijital potansiyometre, bir adet analog-dijital çevirici ve bir adet mikro denetleyici kullanılmıştır. Şekil 4.19'da bu emülatör devresi verilmiştir.



Şekil 4.19. Memristör Emülatör Devresi (Pershin ve Di Ventra, 2010)

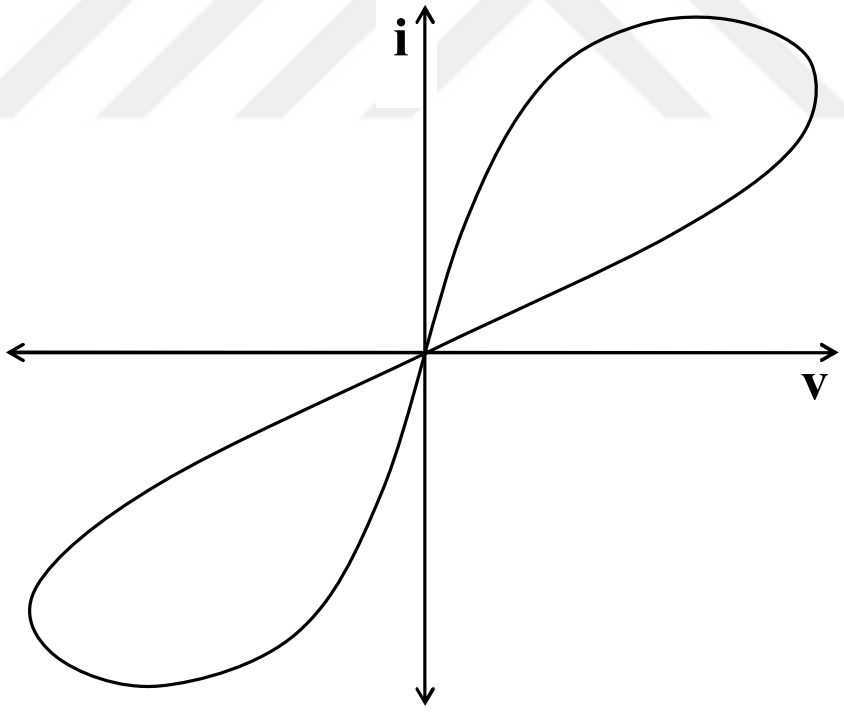
Memristörün fiziksel olarak devrelere uygulanması için emülatör devrelerinin geliştirilmesi önemli bir gelişmedir. Bu aynı zamanda memristörün donanımsal olarak devrelere uygulanmasının önünü açmış ve böylece elemanın fiziksel devrelerde nasıl davranış gösterdiğini görmek açısında da önem arzetmektedir. Bu gelişmeden sonra aynı memristör modellerinde olduğu gibi emülatör devreler üzerine olan çalışmalarda da bir hayli artış gözlendi. Farklı elemanlarla elde edilen farklı memristör emülatör devreleri literatürdeki yerlerini aldılar (Kim ve ark., 2012; Sánchez-López ve ark., 2014; Yeşil ve ark., 2014).

5. ÖNERİLEN PARÇA-PARÇA DOĞRUSAL MEMRİSTÖR MODELLERİ

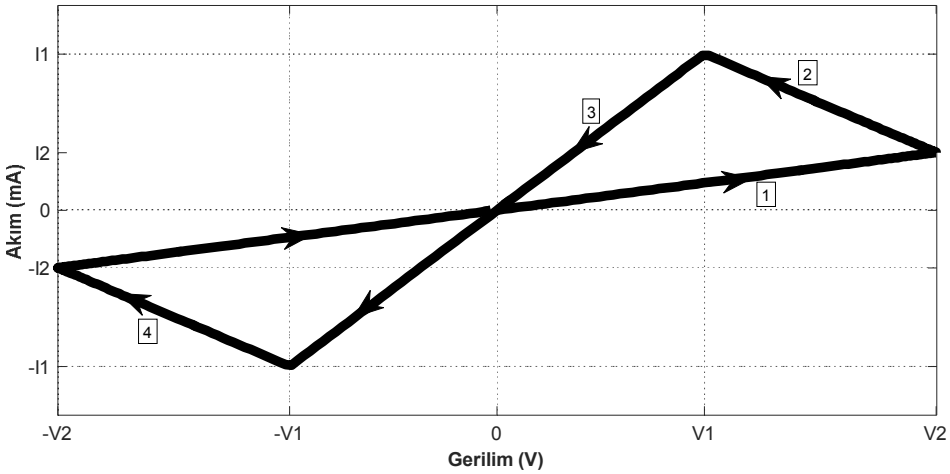
Bu tez çalışmasında, memristörün akım- gerilim (I-V) karakteristiği doğrusal forma getirilerek parça parça doğrusal memristör modelleri önerilmiştir. Önerilen modeller, PWL (PieceWise Linear) memristör modeli temel alınarak gerçekleştirilmiştir. PWL memristör modeli, memristör modelleri kısmında da bahsedildiği üzere diğerlerinin aksine memristörün akım-gerilim karakteristiğinin lineerleştirilmesi prensibine dayanır. Bu bölümde, önerilen memristör modellerinin eşdeğer devre modelleri, I-V karakteristikleri ve diğer karakteristik özelliklerine değinilecektir.

5.1. Negatif Dirençli PWL Memristör Modeli

Bu model, Şekil 5.1'de verilen memristörün I-V karakteristiğinin doğrusallaştırılarak Şekil 5.2'de verilen I-V karakteristiğine getirilmesiyle elde edilen bir memristör modelidir.



Şekil 5.1. Memristör Akım-Gerilim Karakteristiği



Şekil 5.2. Negatif Dirençli PWL Memristör Modeli Akım- Gerilim Karakteristiği

Memristör modelinin eşdeğer devresini oluşturmak için Şekil 5.2'de görülen I-V karakteristiği Çizelge 3.1'de verilen kontrol denklemleri yardımıyla bölgelere ayrılmıştır. Her bir bölge için ayrı ayrı I-V karakteristiği analiz edilerek bölgelere göre eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur (Solak ve Herdem, 2016a).

Çizelge 3.1'deki kontrol denklemlerine göre modeli inceleyecek olursak; 1. Bölgede, I-V karakteristiği bir direncin I-V karakteristiğine benzemektedir. 2. Bölgeyi inceleyecek olursak, bu bölgede negatif yönde bir direncin I-V karakteristiğine benzemektedir. Ayrıca, bu bölgede karakteristik orijinden belirli bir miktar kaydığından dolayı bu kayma miktarı kadar bir DC (Doğru akım) gerilim kaynağı da bu bölgenin eşdeğer modelinde yer almaktadır. 3. Bölge de 1. Bölgeye benzer şekilde bir direncin karakteristiğine sahiptir ama bu direnç değeri 1. Bölgedeki direnç değerinden biraz daha az değerdedir. 4. Bölgeyi inceleyecek olursak bu bölgede de 2. Bölgeye benzer şekilde negatif bir direnç ile modellenebilmektedir. Yine bu bölgede de orijinden kayma miktarı kadar bir DC gerilim kaynağına ihtiyaç vardır; ama bu kaynak bölgenin negatif tarafta olmasından dolayı negatif bir DC kaynak olmalıdır. Modelimizin 2. ve 4. Bölgelerinde kullanılan negatif dirençlerden dolayı modelimiz negatif dirençli, parça parça doğrusal olarak karakteristik analizi yaptığımızdan dolayı da PWL model özellikleri göstermektedir. Bu iki özelliği dolayısıyla modelimiz negatif dirençli PWL memristör modeli adını almıştır. Her bir bölge için kullanılan dirençlerin formülleri ise Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Negatif Dirençli Memristör Modeli Direnç Değerleri

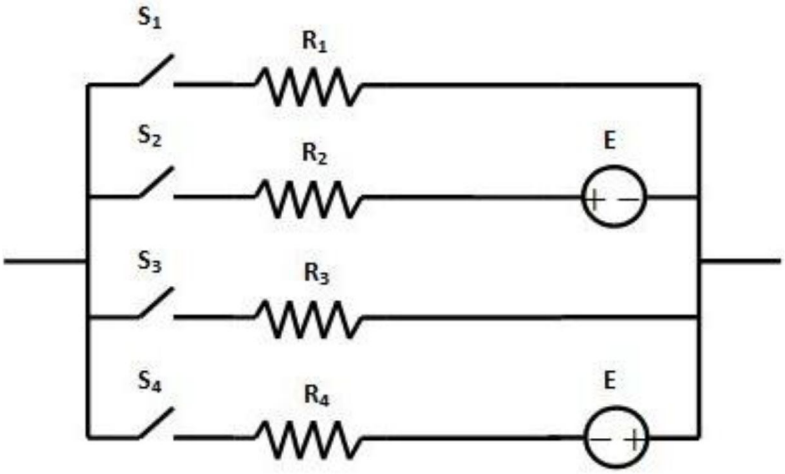
Direnç	Formül
R_1	$\frac{V_2}{I_2}$
R_2	$\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2}$
R_3	$\frac{V_1}{I_1}$
R_4	$\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2}$

Eşdeğer devre modelinin MATLAB ortamında benzetimi yapılırken kullanılan gerilim ve akım parametreleri literatürde daha önce yapılan çalışmalar temel alınarak hesaplanmıştır (Vourkas ve Sirakoulis, 2012). Kullanılan akım ve gerilim değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

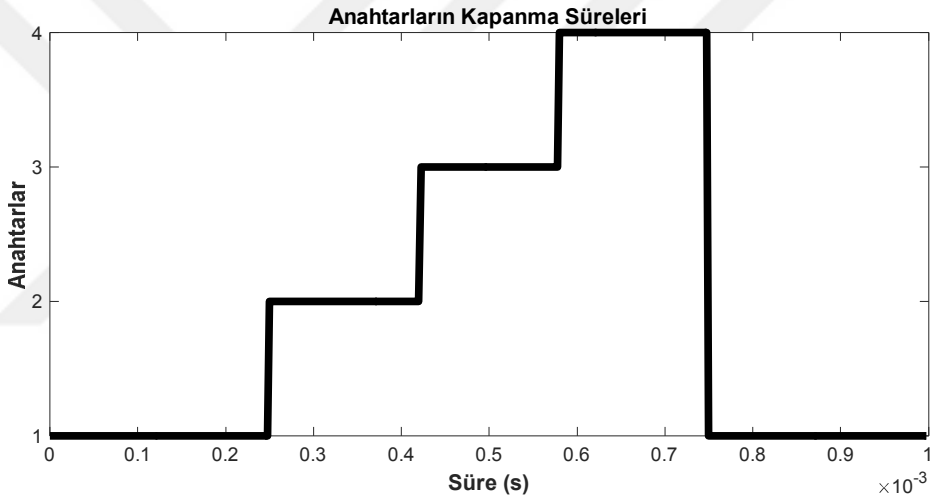
Çizelge 5.2. Kullanılan Akım ve Gerilim Değerleri

Sembol	Değer
V_1	1.888 V
V_2	3.999 V
E	5.2322 V
I_1	1.525 mA
I_2	0.5625 mA

Şekil 5.3'de eşdeğer devre modeli verilmiştir. Bu modelde, bölgeler arası geçiş anahtarlar yardımıyla sağlanmaktadır. Memristör hangi bölgede çalışıyorsa o bölgenin ilgili anahtarı kapalı diğer bölge anahtarları ise açık konumdadır. Memristör 1. bölgede çalışıyorsa S_1 anahtarı kapalı diğer anahtarlar açık, 2. bölgede çalışıyorsa S_2 anahtarı kapalı diğer anahtarlar açık, 3. bölgede çalışıyorsa S_3 anahtarı kapalı diğer anahtarlar açık, 4.bölgede çalışıyorsa S_4 anahtarı kapalı diğer anahtarlar açıktır. Anahtarların kapanma zamanlarını gösteren grafik Şekil 5.4'de verilmiştir. Benzetim yapılırken, sinyal üretecinden 4 V genlikli, 1 kHz frekansa sahip bir sinüs dalga kullanılmıştır. Dolayısıyla Şekil 5.4'deki grafikte bir periyot 1ms olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. Negatif Dirençli PWL Memristör Modeli Eşdeğer Devresi

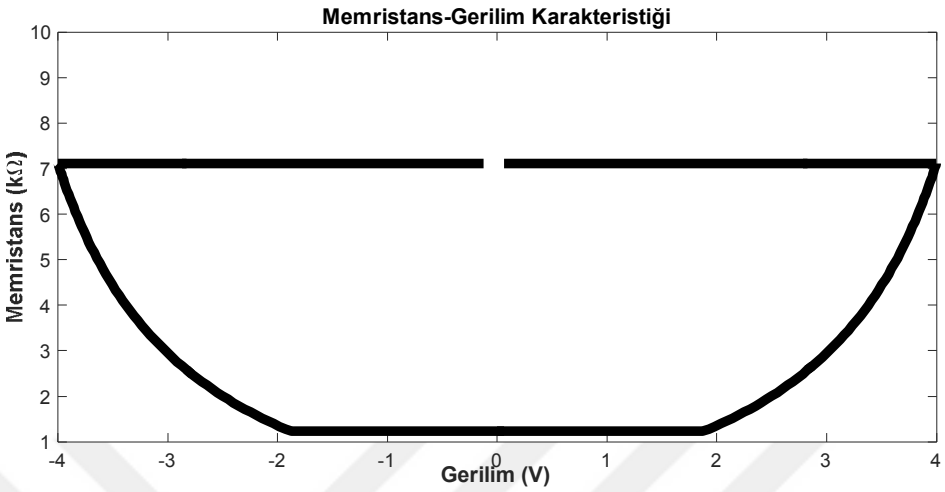


Şekil 5.4. Negatif Dirençli PWL Model Anahtarların Kapanma Süreleri

Eşdeğer devre modelinin çalışma mantığını kısaca özetleyecek olursak:

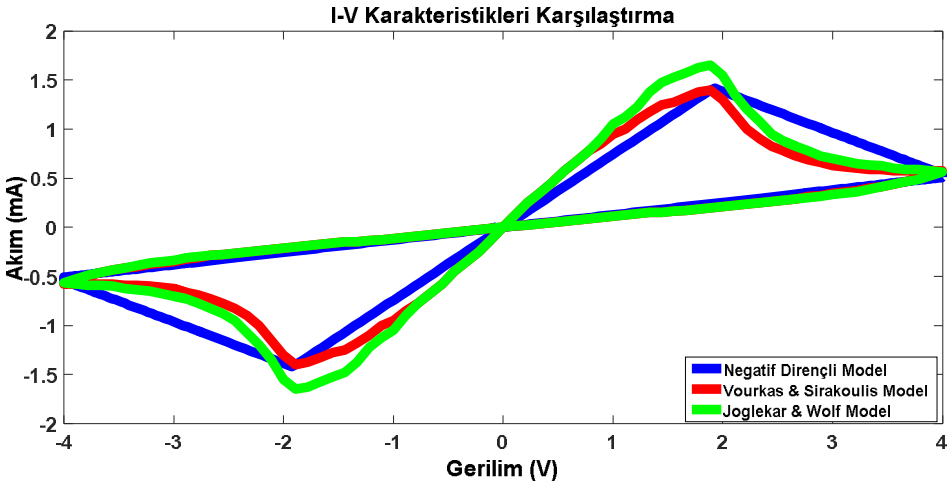
4 V genlikli 1 kHz frekansa sahip bir sinüs dalgası devreye uygulanmıştır. Uygulanan gerilimin V_1 ve V_2 eşik değerlerine göre Çizelge 3.1'de verilen kontrol denklemlerine göre model dört ayrı bölgeye ayrılmıştır ve her bir bölge için daha önceden de bahsedildiği üzere I-V karakteristiğine göre eşdeğer devreler oluşturulmuştur. Bu bölgeler arası geçişi sağlamak için devrede anahtarlar kullanılmıştır. Anahtarlar bağlı bulunduğu eşdeğer devrelerin bölgelerini temsil etmektedirler. Bu anahtarların hangi sürelerde kapalı konumda olduğu da Şekil 5.4'de verilen grafik ile gösterilmiştir. Modelde, HP memristör modelinde kullanılan R_{ON} ve R_{OFF} dirençlerinin yerini sırasıyla R_3 ve R_1 direnç değerleri almıştır. Modele uygulanan gerilime göre memristans değeri bu

iki değer arasında değişmektedir. Modelin memristans– gerilim (M-V) karakteristiği Şekil 5.5'de verilmiştir.

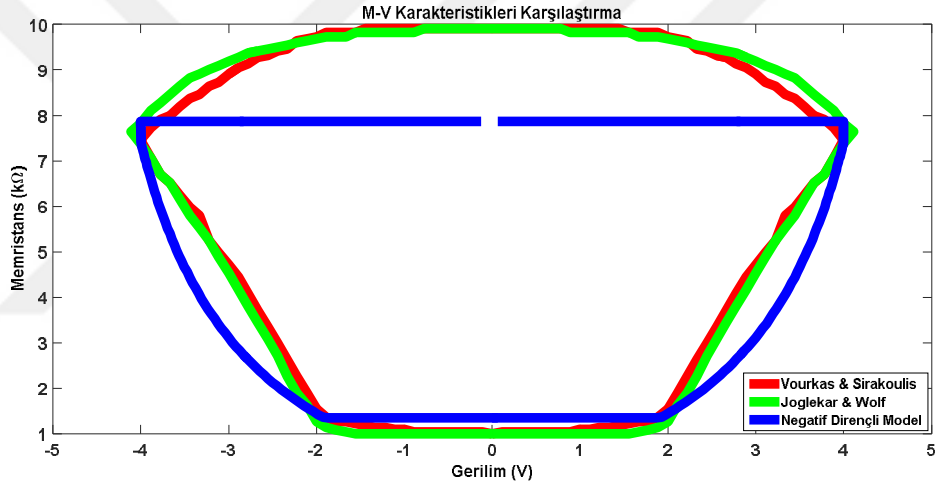


Şekil 5.5. Memristans-Gerilim Karakteristiği

Elde edilen I-V ve M-V karakteristikleri, literatürde parametrelerini temel aldığımız çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırıldı (Joglekar ve Wolf, 2009; Vourkas ve Sirakoulis, 2012). I-V ve M-V karakteristikleri karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmiştir. Karakteristikler ana hatlarıyla birbirine benzemektedirler; ancak aralarındaki fark bizim modelimizin PWL bir model olmasından ve diğer modellerin HP memristör modelini temel alarak oluşturulmasıdır. Dolayısıyla PWL modelde doğrusallaştırma işleminden kaynaklanan farklılıklar oluşmuştur. Ayrıca, SIMULINK ortamında da bir negatif dirençli model oluşturulmuş ve bu modelin I-V ve M-V karakteristikleri de Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'deki gibi elde edilmiştir (Solak ve Herdem, 2016b).



Şekil 5.6. I-V Karakteristikleri Karşılaştırma



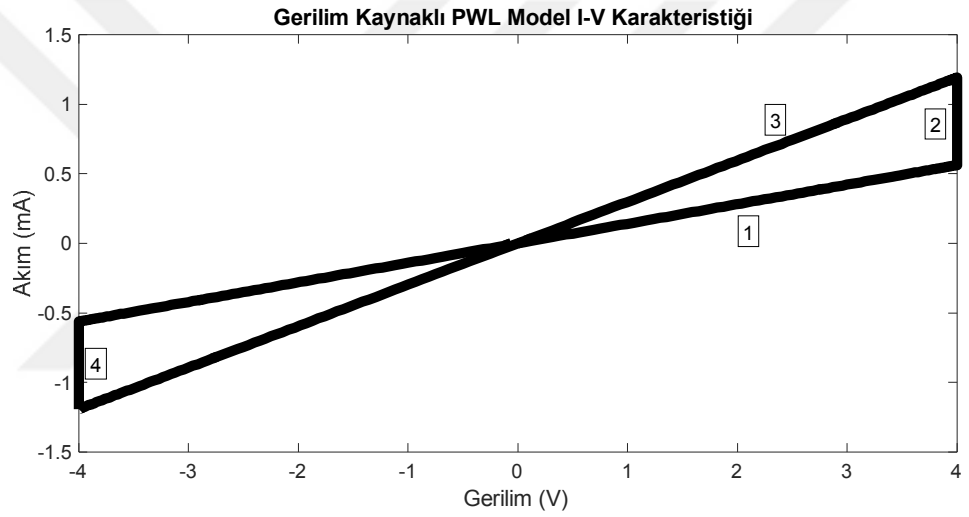
Şekil 5.7. M-V Karakteristikleri Karşılaştırma

5.2. Negatif Dirençsiz PWL Memristör Modeli

Negatif dirençli modeli, pratik uygulamada negatif direnç mevcut olmadığından dolayı uygulamak zordur. Pratikte negatif direnç jiratör devreleriyle modellenebilmektedir. Fakat bu devrelerde eleman yoğunluğu fazla olduğundan dolayı kullanımında fazladan hesaplamalar işin içine girmektedir. Bu ek hesaplamalara girmemek adına memristör eşdeğer devresini daha sade ve negatif dirençten kurtarmak gerekmektedir. Bu yüzden, bu bölümde alternatif olarak bu bölümde gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı olmak üzere iki ayrı model önerilmiştir.

5.2.1. Gerilim Kaynaklı PWL Memristör Modeli

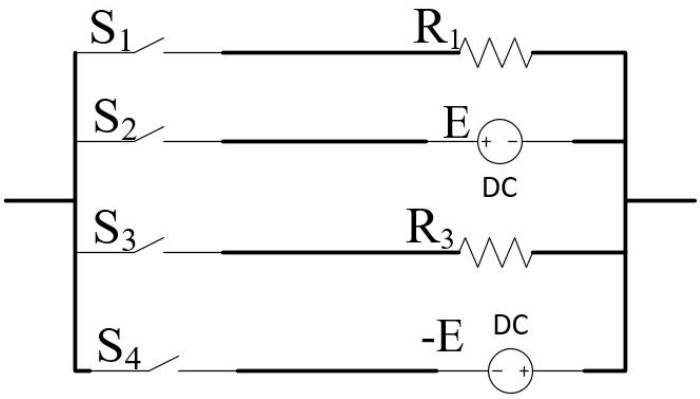
Gerilim kaynaklı PWL memristör modelin negatif dirençli modelden farkı bu modelde negatif dirençten kurtulmak için onun yerine gerilim kaynağı kullanmamızdır. Bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere I-V karakteristiğinin 2. ve 4. bölgelerinde yer alan negatif direnç yerine gerilim kaynağı kullanılmıştır. Gerilim kaynaklı PWL memristör modelinin I-V karakteristiği Şekil 5.8'de verilmiştir. Bu karakteristikte açıkça görüleceği üzere 2. ve 4. bölgelerde yer alan negatif direnç yerini gerilim kaynağına bırakmıştır.



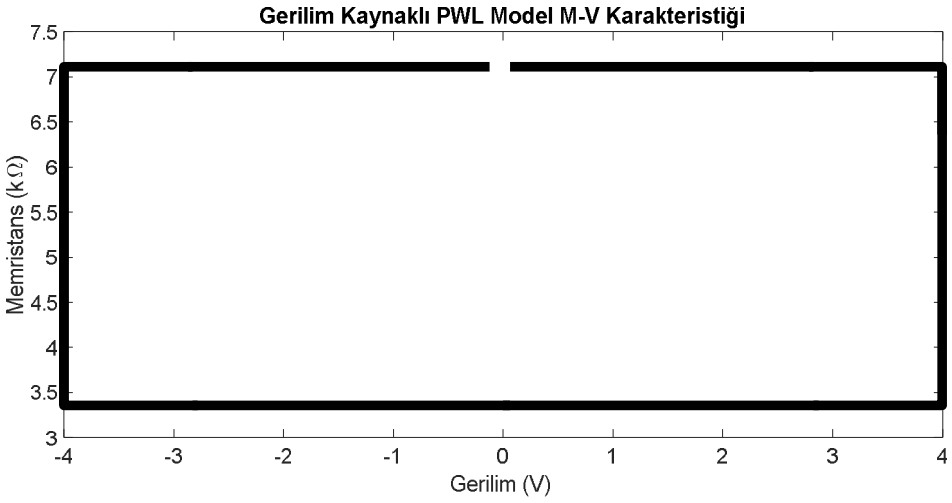
Şekil 5.8. Gerilim Kaynaklı PWL Model I-V Karakteristiği

Gerilim kaynaklı PWL memristör modelinin oluşturulan eşdeğer devresi Şekil 5.9'da verilmiştir. Bu devrede kullanılan R_1 ve R_3 değerleri Çizelge 5.1'de verilen formüllerinde Çizelge 5.2'de verilen akım ve gerilim değerlerinin konulmasıyla elde edilir. E değeri ise Çizelge 5.2'de verilen V_2 değerine eşittir. Anahtarlar yine negatif dirençli modelde olduğu gibi her bir anahtar ayrı bir bölgeyi temsil etmektedir ve memristör hangi bölgede işlem yapıyorsa o bölgenin anahtarı kapalı diğer anahtarlar açık konumdadır. Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de sırasıyla gerilim kaynaklı PWL modelin M-V karakteristiği ve Şekil 5.9'da verilen eşdeğer devrede verilen anahtarların kapanma süreleri verilmiştir. M-V karakteristiği incelendiğinde, modelde sadece birinci ve üçüncü bölgelerde direnç bulunduğundan dolayı karakteristik de bu bölgeler arasında değişim

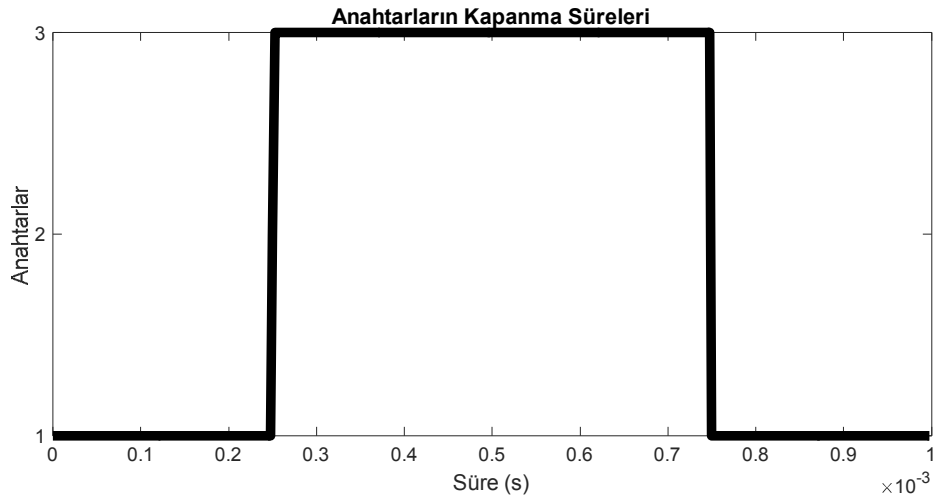
göstermektedir. Eğer model birinci bölgede çalışıyorsa o bölgedeki direnç değeri, üçüncü bölgede çalışıyorsa üçüncü bölgedeki direnç değerini almaktadır. Şekil 5.11'de verilen anahtarların kapanma sürelerini gösteren grafik incelendiğinde ise M-V karakteristiğine paralel olarak anahtarların kapanma sürelerinde de birinci ve üçüncü anahtarların üstünlüğü görülmektedir. Devrede, ikinci ve dördüncü anahtarların bulunduğu DC gerilim kaynaklarına gelindiğinde, bu bölgelerde verilen kaynakların değerleri devreye verilen maksimum gerilim değerine eşit olduğundan dolayı bu değerlerde model hemen diğer bölgelere geçiş yapmaktadır. Dolayısıyla ikinci ve dördüncü bölgelerdeki anahtarların açılıp kapanma süreleri çok kısa olduğundan Şekil 5.11'de verilen grafikte gözükmemektedir. Eğer, DC gerilim kaynağının değeri farklı bir değere ayarlanırsa bu değişim de anahtarların kapanma sürelerini gösteren grafikte görülebilir.



Şekil 5.9. Gerilim Kaynaklı PWL Model Eşdeğer Devresi



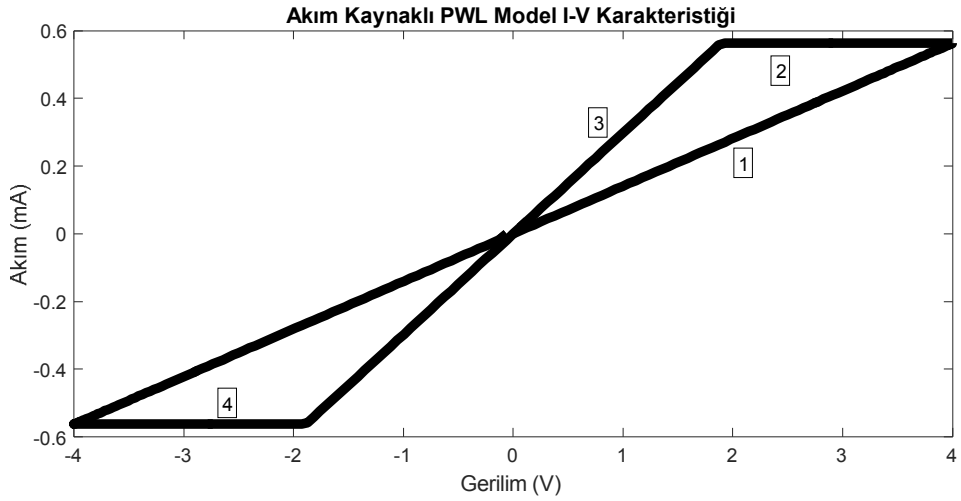
Şekil 5.10. Gerilim Kaynaklı PWL Model Eşdeğer Devresi



Şekil 5.11. Gerilim Kaynaklı PWL Model Anahtarların Kapanma Süreleri

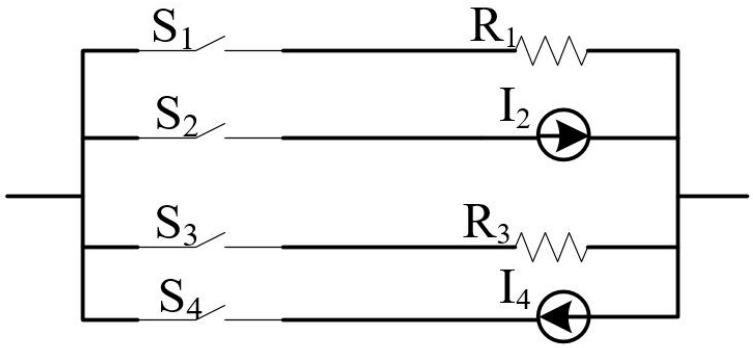
5.2.2. Akım Kaynaklı PWL Memristör Modeli

Akım kaynaklı PWL memristör modeli, negatif dirençsiz memristör modellerine alternatif olarak üretilmiş bir modeldir. Bu modelde de gerilim kaynaklı modelde olduğu gibi negatif dirençten kurtulmak ana amaçtır. Bu doğrultuda, bu modelde gerilim kaynaklı modelden farklı olarak negatif direnç kullanılması gereken yerlerde akım kaynağı kullanılmıştır. Şekil 5.12'de akım kaynaklı PWL memristör modelinin I-V karakteristiği verilmiştir.

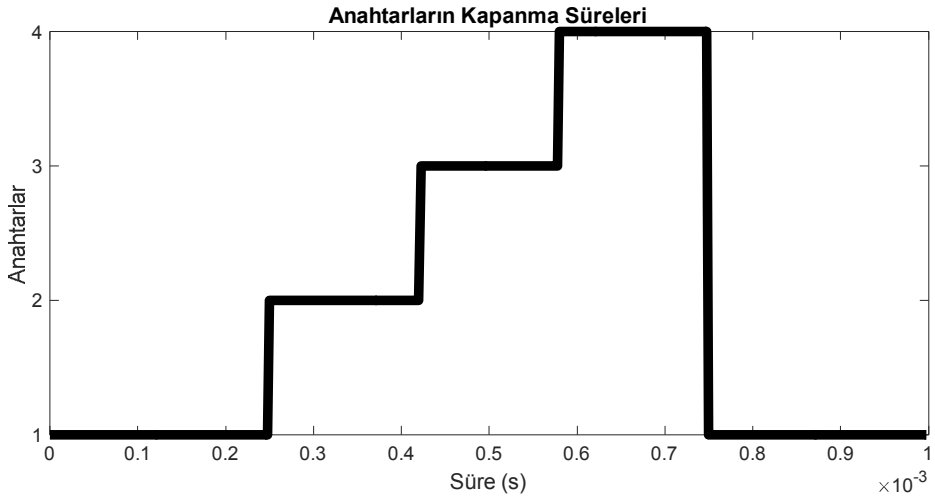


Şekil 5.12. Akım Kaynaklı PWL Model I-V Karakteristiği

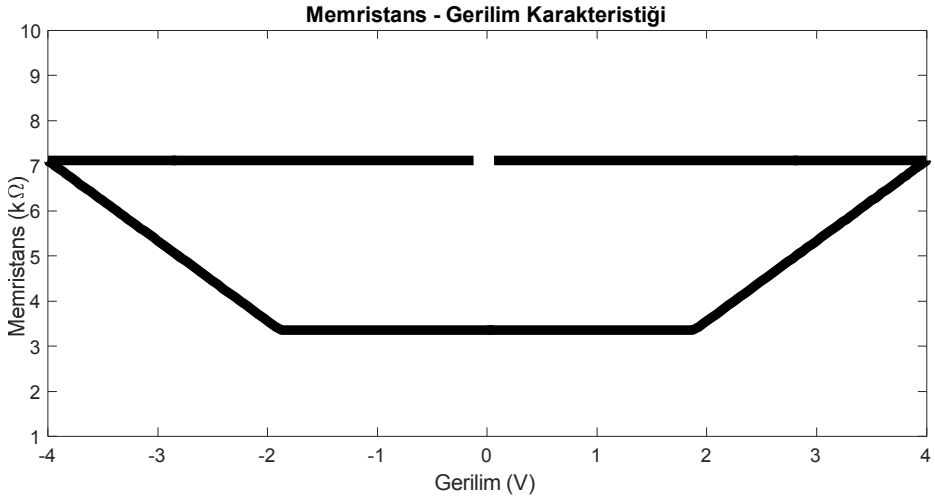
Şekil 5.13'de I-V karakteristiğinin parça parça doğrusal analiziyle elde edilen akım kaynaklı PWL model eşdeğer devresi verilmiştir. Bu modelde, birinci ve üçüncü bölgeler sırasıyla R_1 ve R_3 değerlerine sahip dirençlerin I-V karakteristiğini gösterirler. İkinci ve dördüncü bölgelerde ise aynı değere sahip pozitif ve negatif akım kaynakları sırasıyla I_2 ve I_4 kullanılmıştır. I_2 akım değeri Çizelge 5.2'de verilen I_2 akım değerine eşittir. I_4 akım değeri ise bu değerin negatif işaretlisidir. Anahtarların bir periyot boyunca hangi sürelerde kapalı konumda olduğunu gösteren grafik Şekil 5.14'de verilmiştir Devreye yine 4 V genlikli 1 kHz frekansa sahip bir sinüs dalgası uygulanmıştır. Buna göre devre yine R_1 ve R_3 değerleri arasında uygulanan gerilimin genliğine göre bir değer almaktadır ve devrenin M-V karakteristiği de Şekil 5.15'de verilmiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde gerilim kaynaklı modelden farklı olarak buralarda ikinci ve dördüncü bölgelerin anahtarlarının kapanma süreleri de görülmektedir. Bunun nedeni, gerilim kaynaklı da kullanılan gerilim kaynakları maksimum gerilim değerine eşitti. Ancak, akım kaynaklı da kullanılan kaynaklar maksimum akım değerine eşit değildir. Dolayısıyla, bu da bölgeler arası geçişi gözle görülebilir bir seviyede tutar.



Şekil 5.13. Akım Kaynaklı PWL Model Eşdeğer Devresi



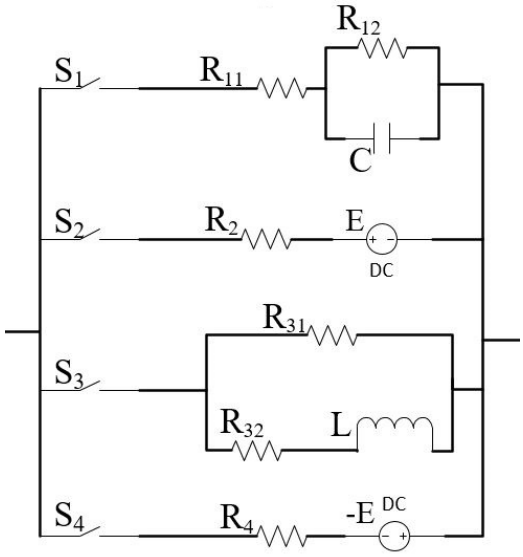
Şekil 5.14. Akım Kaynaklı PWL Model Anahtarların Kapanma Süreleri



Şekil 5.15. Akım Kaynaklı PWL Model M- V Karakteristiği

5.3. Frekans Bağımlı PWL Memristör Modeli

Frekans bağımlı PWL memristör modeli, Şekil 4.3'de de bahsedildiği üzere memristörün frekansa göre değişimini temel alan bir modeldir. Bu model negatif dirençli PWL modelin geliştirilmiş halidir. Modeli frekans bağımlı hale getirmek için, negatif dirençli modelin eşdeğer devresinde 1. ve 3. bölgeler için kullanılan dirençlerin yerine bu elemanlarla aynı değerlikte frekansa bağımlı elemanlar kullanılarak devre frekansa bağımlı hale getirilmiştir. Modelin I-V karakteristiği, Şekil 5.2'de verilen negatif dirençli PWL memristör modelin karakteristiği ile aynıdır. Bu modelin eşdeğer devre şeması Şekil 5.16'da verilmiştir.



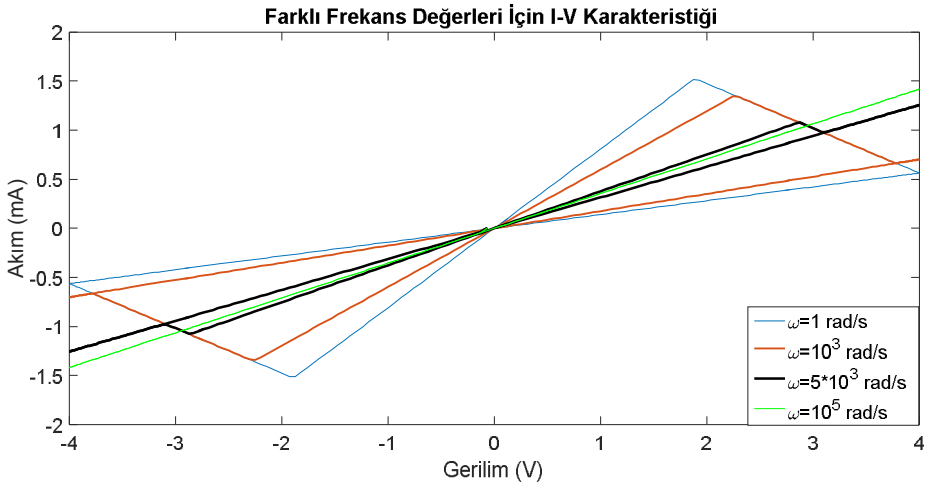
Şekil 5.16. Frekans Bağımlı PWL Model Eşdeğer Devre Şeması
(R_{11}=R_{31}=2.82 kΩ, R_{12}=4.2893 kΩ, R_2=R_4=-2.932 kΩ,
R_{32}=2.2068 kΩ, C=0.233 μF, L=0.1 H)

Şekil 5.16'da verilen eşdeğer devre şemasında 1. ve 3. bölgelerin empedansları sırasıyla $Z_1 = |z_1|$ ve $Z_3 = |z_3|$ olarak adlandırılmıştır. Bu empedans değerlerinin formülleri sırasıyla denklem 5.1 ve denklem 5.2'de verilmiştir. Bu denklemlerde açıkça görüleceği üzere açısal frekansın (Denklemlerde ω ile ifade edilmiştir.) değişimi empedans değerlerini değiştirmektedir. Z_1 ve Z_3 sırasıyla, HP memristör modelde ifade edilen R_{ON} ve R_{OFF} dirençlerine karşılık gelmektedirler. Frekansın artmasıyla beraber Şekil 4.3'de de ifade edilen memristörün frekansa bağlı akım-gerilim karakteristiğinde olduğu gibi karakteristiğin histerezis eğrisi daralmakta ve yüksek frekans değerlerine çıkıldığında ise bu eğri doğrusal bir hal almaktadır. Yani yüksek frekans değerlerinde Z_1 ve Z_3 birbirlerine eşit olmaktadır.

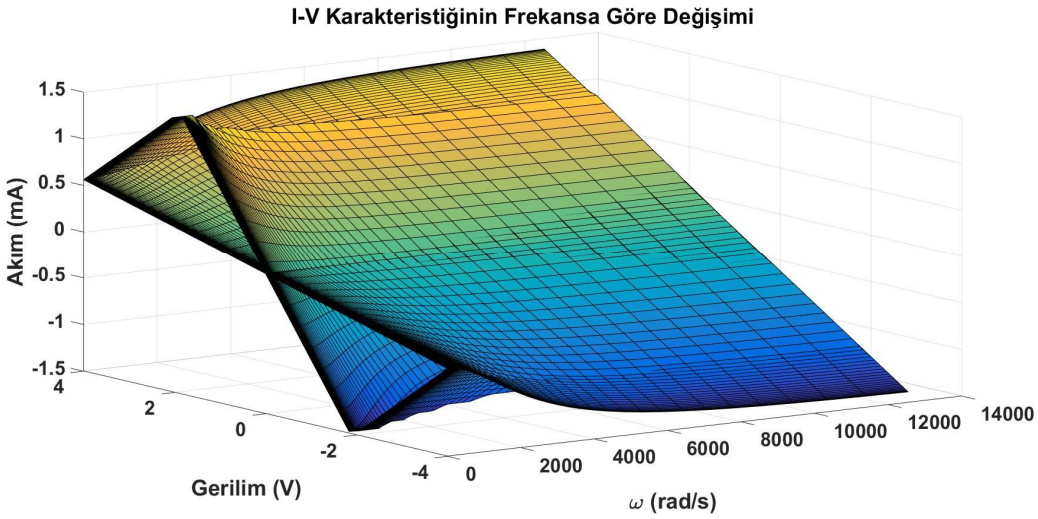
$$Z_1 = \sqrt{\left(\frac{R_{11}+R_{12}+\omega^2C^2R_{12}^2R_{11}}{1+\omega^2C^2R_{12}^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega CR_{12}^2}{1+\omega^2C^2R_{12}^2}\right)^2} \tag{5.1}$$

$$Z_3 = \sqrt{\left(\frac{R_{31}^2R_{32}+R_{31}R_{32}^2+\omega^2L^2R_{31}}{(R_{31}+R_{32})^2+\omega^2L^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega LR_{31}^2}{(R_{31}+R_{32})^2+\omega^2L^2}\right)^2} \tag{5.2}$$

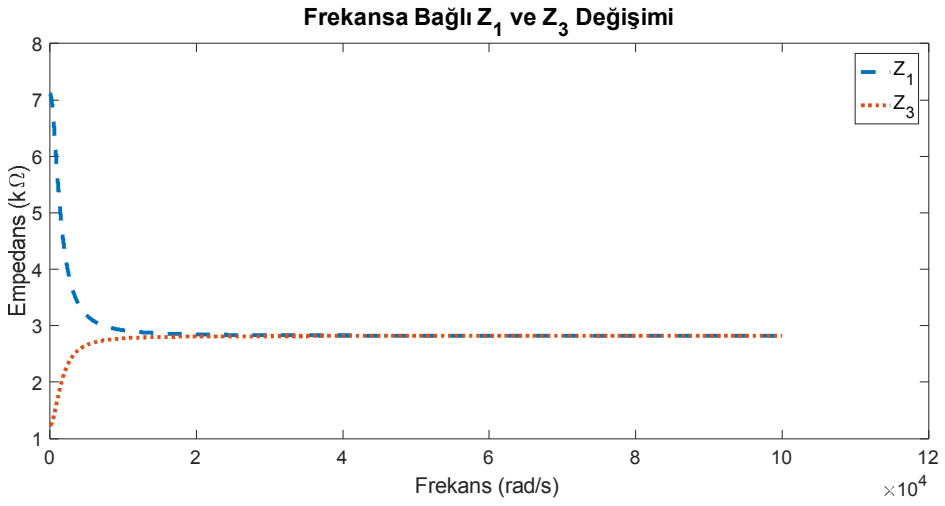
Modele 4 V genlikte ve farklı frekanslarda sinüs gerilimi uygulanmıştır. Şekil 5.17'de farklı frekans değerlerinde modelin akım-gerilim karakteristiği verilmiştir. Şekilde de açıkça görüldüğü üzere frekans arttıkça 1. ve 3. bölgeleri temsil eden karakteristikler giderek birbirine yaklaşmakta ve sonunda da aynı doğrusal karakteristiği oluşturmaktadırlar. Şekildeki mavi çizgi (ω=1 rad/s değerinde) karakteristiğin 1. ve 3. bölgeleri arasındaki fark en üst noktadadır. Turuncu çizgi ($\omega=10^3$ rad/s değerinde) bu bölgelerin biraz daha daraldığı ve aradaki empedans farkının azaldığı açıkça görülmektedir. Siyah çizgi ($\omega=5*10^3$ rad/s değerinde) karakteristik artık iyice daralmış ve burada ilgili bölgeler arasındaki fark daha da azalmıştır. Yeşil çizgi ($\omega=10^5$ rad/s değerinde), artık karakteristik doğrusal bir hal almıştır ve bölgeler arasındaki fark ortadan kalkmıştır. Böylece, memristörün akım-gerilim karakteristiği bir direncin karakteristiği haline gelmiştir. Şekil 5.18'de I-V karakteristiğini frekansa göre değişimi verilmiştir. Bu şekilde de açıkça görüleceği üzere frekans değeri arttıkça karakteristik daralmakta ve belirli bir frekans değerinden sonra doğrusal bir hal almaktadır. Bu da Şekil 4.3'de verilen Chua'nın, memristörün frekansı arttıkça akım- gerilim eğrisi daralır ve en sonunda doğrusal bir hal alır söylemini doğrulamaktadır. Bu bölgelerin empedans değişimini gösteren grafik Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.17. Farklı Frekans Değerleri İçin I-V Karakteristiği

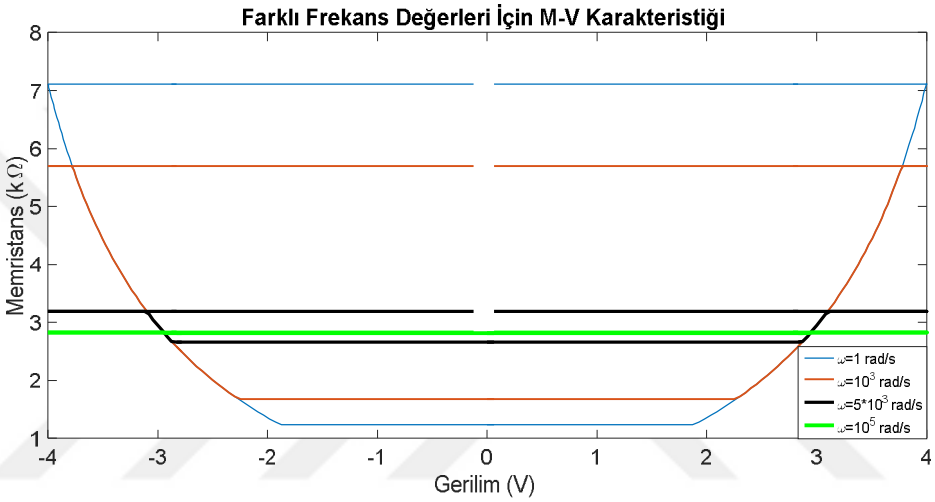


Şekil 5.18. I-V Karakteristiğinin Frekansla Değişimi



Şekil 5.19. Frekansa Bağlı Z_1 ve Z_3 Empedans Değişimi

Şekil 5.20'de farklı frekans değerleri için M- V karakteristiğinin değişimi verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere frekans arttıkça M- V karakteristiği daralmakta ve en sonunda ($\omega=10^5$ rad/s) memristans sabit bir değer almaktadır. Frekansa göre empedans değerleri Z_1 ve Z_3 değişimi Çizelge 5.3'de verilmiştir. Çizelgede de görüldüğü üzere; frekans arttıkça Z1 değeri azalmakta, Z_3 değeri ise artmaktadır. Frekans değeri $\omega=10^5$ rad/s olduğunda ise iki empedans değeri birbirine eşit olmaktadır ve artık bu değerden sonra memristans değeri sabit kalmaktadır. Frekansı daha da artırıldığında memristans değerinin değişmediği görülmüştür.



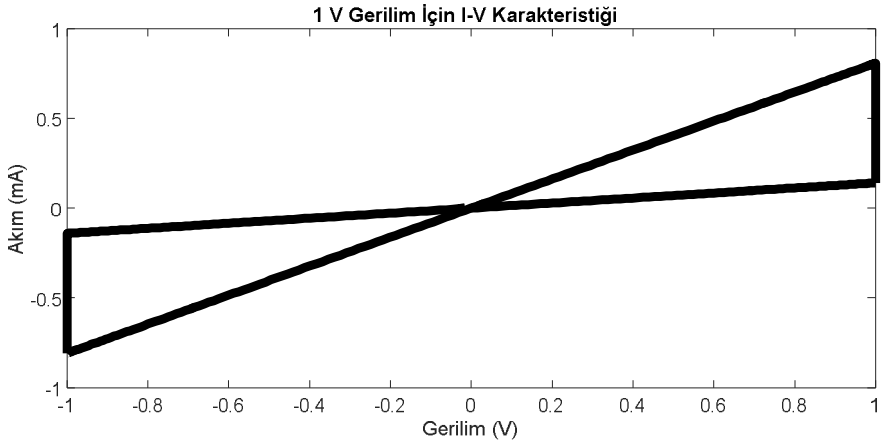
Şekil 5.20. Farklı Frekans Değerleri İçin M-V Karakteristiği

Çizelge 5.3. Z_1 ve Z_3 Değerleri Frekansa Göre Değişimi

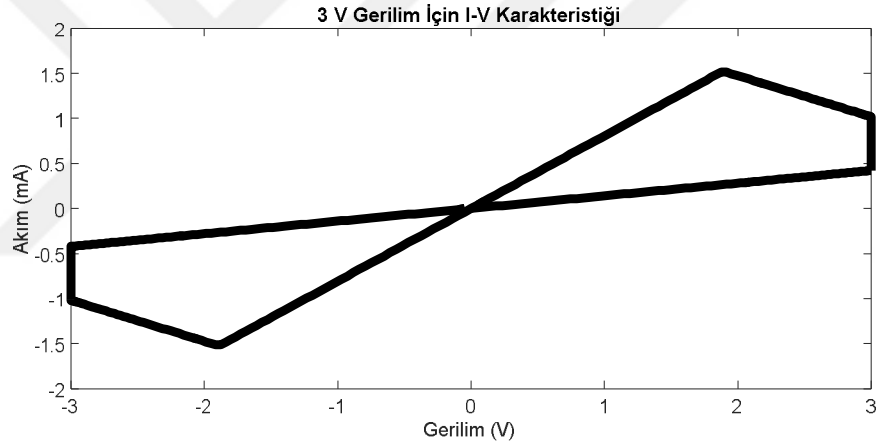
Frekans (rad/s)	**Z_1 (kΩ)**	**Z_3 (kΩ)**
1	7.109	1.238
10^3	5.7	1.675
$5*10^3$	3.186	2.657
10^5	2.821	2.821

Frekans bağımlı model için ayrıca aynı frekansta farklı genlik değerlerinde gerilimler uygulanmıştır. Modele öncelikle 1 rad/s frekansa, 1 V genliğe sahip bir gerilim uygulandı. Şekil 5.21'de 1 V genlikli gerilim için modelin I- V karakteristiği gösterilmiştir. Daha sonra uygulanan gerilimin genliği 3 V'a çıkarıldı. Şekil 5.22'de 3 V genlikli gerilim için modelin I- V karakteristiği gösterilmiştir. Son olarak da uygulanan

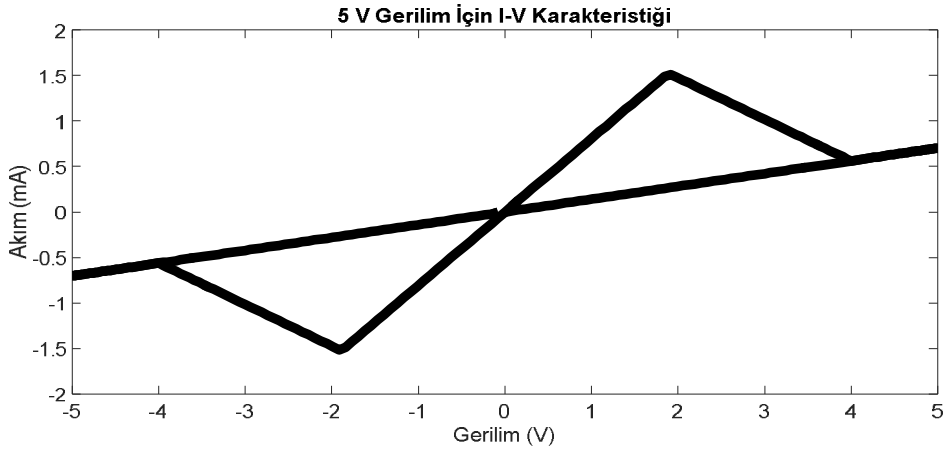
gerilim genliği 5 V yapıldı. Şekil 5.23'de 5 V genlikli gerilim için modelin I- V karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 5.21. 1 V Gerilim Uygulandığında I-V Karakteristiği



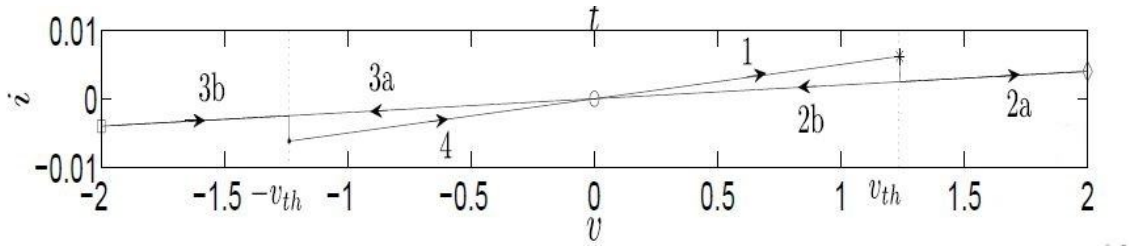
Şekil 5.22. 3 V Gerilim Uygulandığında I-V Karakteristiği



Şekil 5.23. 5 V Gerilim Uygulandığında I-V Karakteristiği

Uygulanan genliğin büyüklüğüne bağlı olarak I-V karakteristiklerinde de farklılıklar görülmektedir. Modelin Çizelge 5.2'de verilen V_1 ve V_2 eşik değerleri bu farklılığın oluşmasının temel nedenidir. Şekil 5.21'de verilen 1 V gerilim için verilen I-V karakteristiği incelendiğinde uygulanan gerilimin büyüklüğü V_1 eşik geriliminden düşük olduğu için model 2. ve 4. çalışma bölgelerine girmiyor. Dolayısıyla da sadece 1. ve 3. bölge arasında genliğe göre akım-gerilim karakteristiği değişmektedir. Şekil 5.22'de verilen 3 V gerilim için verilen I- V karakteristiği incelendiğinde ise gerilimin büyüklüğü bu kez V_1 eşiğinin üstünde ama V_2 eşiğinin altındadır. Dolayısıyla burada da karakteristik 3 V'a kadar negatif dirençli modelde de gördüğümüz karakteristiği sergileyecektir. Ancak, V_2 eşiğine ulaşmadığı için 3 V gerilimde aniden diğer bölgeye geçiş yapmaktadır. Şekil 5.23'de verilen 5 V gerilim için verilen I- V karakteristiği incelendiğinde ise burada gerilim iki eşik değeri V_1 ve V_2'nin üzerindedir. I- V karakteristiğinde gerilim V_2 eşiğini aştığında model 1. bölgede kalmaya devam etmektedir. Gerilim değeri tekrar V_2 eşik değerine ulaştığında ise akım-gerilim karakteristiği aynı negatif dirençli modelde olduğu gibi işlemine devam etmektedir.

Memristörün eşik değerinin üzerine çıktığı durumlardaki davranışlarını inceleyen çalışmalarda literatürde mevcuttur. Örneğin; Fernando Corinto ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada memristörün farklı gerilim ve eşik değerleri için akım-gerilim karakteristikleri incelenmiştir (Corinto ve ark., 2012). Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda bizim yaptığımız çalışmadaki sonuçların doğruluğunu kanıtlamaktadır. Şekil 5.24'de bu çalışmadan elde edilen bir akım-gerilim karakteristiği verilmiştir. Şekilde de açıkça görüleceği üzere eşik gerilimi aşıldıktan sonra karakteristik doğrusal bir şekilde devam etmekte gerilim değeri eşik değerine geldiğinde ise memristörün tipik karakteristik özelliğini devam ettirmektedir.



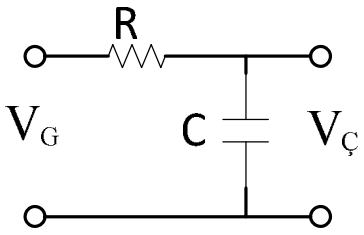
Şekil 5.24. Literatürde Farklı Gerilimde Yapılan Çalışma Sonucu (Corinto ve ark., 2012)

6. MEMRİSTÖR TABANLI FİLTRE UYGULAMALARI

Bu bölümde, bir önceki bölümde bahsedilen memristör modellerinin filtre devrelerinde kullanımını ve bu filtre devrelerinden elde edilen sonuçlar anlatılacaktır. Filtre devreleri bilindiği üzere farklı frekanslara sahip sinyallerin bazı kısımlarını geçirip bazı kısımlarını bastıran, bu sayede sinyallerde istenmeyen kısımlar ve gürültülerden kurtulmayı amaçlayan devrelerdir. Bu çalışmada, alçak geçiren filtre (AGF) devrelerinde memristörün kullanımı ve elde edilen sonuçlardan bahsedilecektir. Ayrıca, bu sonuçlarla literatürde yer alan memristör tabanlı filtre devrelerinden de bahsedilecektir.

6.1. Memristör Tabanlı Alçak Geçiren Filtre

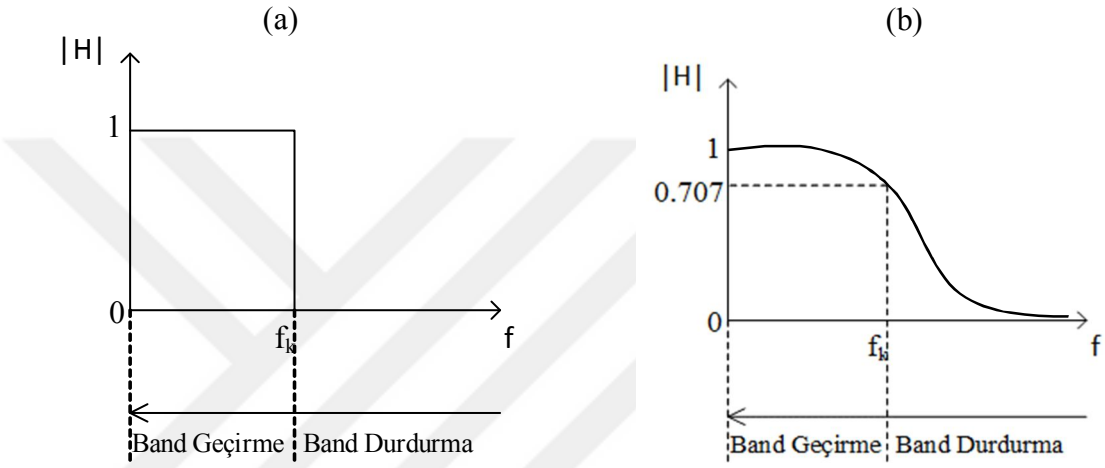
Alçak Geçiren Filtre (AGF) devreleri, düşük frekans değerlerindeki sinyalleri geçirip yüksek frekans değerlerindeki sinyalleri sönümleyen devrelerdir. Hangi frekansa kadarki sinyalleri geçirip hangi frekanstan sonraki sinyallerin sönümleneceğine devre parametreleri ayarlanarak karar verilebilir. AGF devresi basitçe bir direnç ve kondansatörden oluşmaktadır. Bu devreye aynı zamanda direnç ve kondansatörün sembollerinden dolayı RC alçak geçiren filtre devresi de denilmektedir. Şekil 6.1'de bir basit bir RC elemanlarından oluşan AGF devresi verilmiştir. Girişte verilen V_G sinyali devrenin çıkışında istenilen frekans değerine kadar geçirip daha sonrasında sönümlenen bir $V_Ç$ çıkış sinyaline dönüşmektedir.



Şekil 6.1. Alçak Geçiren Filtre Devresi

AGF karakteristikleri Şekil 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.2(a)'da ideal filtre karakteristiği yer almaktadır. Bu karakteristik teoride ideal olması gereken karakteristiktir. Kesim frekansına (w_k) kadar olan sinyaller geçecek, kesim frekansından sonraki sinyaller ise sönümlenecektir. Ancak pratikte bu mümkün olmamaktadır ve pratikte AGF karakteristiği Şekil 6.2(b)'deki gibidir. Filtrenin kazancı ($|H|$), devrenin

çıkış geriliminin ($V_Ç$) giriş gerilimine (V_G) oranıdır. $V_Ç$, V_G'den büyük olamayacağı için kazanç 1'den büyük olamaz. Denklem 6.1'de AGF kazancının formülü verilmiştir. Ayrıca kesim frekansı (w_k), direnç ve kondansatör değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Yani filtre devresinin hangi frekansa kadar geçirip sonraki frekansları sönümleyeceği kesim frekansıyla belirlenmektedir. Kesim frekansının formülü denklem 6.2'de verildiği gibidir. Denklem 6.1'de frekans yerine denklem 6.2'deki formülü koyduğumuzda kesim frekansında kazanç değerini elde ederiz. Denklem 6.3'te kesim frekansında kazanç formülü verilmiştir.



Şekil 6.2. Alçak Geçiren Filtre Karakteristikleri a) İdeal Filtre b) Pratik Filtre

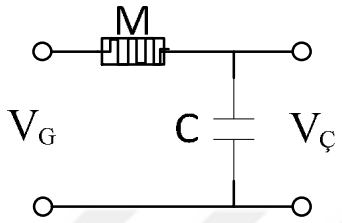
$$|H| = \frac{V_Ç}{V_G} = \frac{1}{1+j*w*C*R} = \frac{1}{\sqrt{1^2+(\frac{1}{w*C*R})^2}} \tag{6.1}$$

$$w_k = \frac{1}{C*R} \text{ rad/s} \tag{6.2}$$

$$|H| = \frac{1}{\sqrt{1^2+1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \tag{6.3}$$

Memristör tabanlı AGF devrelerinde ise direnç yerine memristör kullanılmaktadır. Şekil 6.3'de basit bir memristör tabanlı AGF devresi verilmiştir. Bu devrenin Şekil 6.1'deki RC devreden tek farkı görüldüğü üzere direnç yerine memristör kullanılmasıdır ve bu devreler de kısaca memristör ve kondansatörün sembollerinden MC devreler adıyla anılmaktadır. Bu devreler kesim frekansı da denklem 6.4'deki gibi

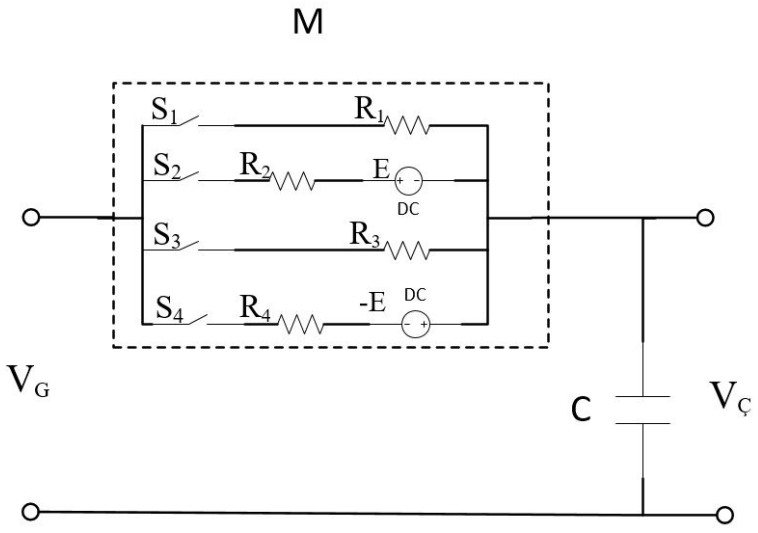
olmaktadır. Literatürde memristör tabanlı AGF filtrelerle yapılan çalışmalarda da farklı memristör modelleri AGF devrelerine uygulanmış ve sonuçları RC devredeki karakteristiklerle karşılaştırılmıştır (Mahvash ve Parker, 2010; Ascoli ve ark., 2013; Sozen ve Cam, 2014). Bu tez çalışması kapsamında önerilen parça- parça doğrusal memristör modelleri AGF devrelerine uygulanmış, her bir model için tek tek devreler oluşturulmuş ve filtre karakteristikleri incelenmiştir.



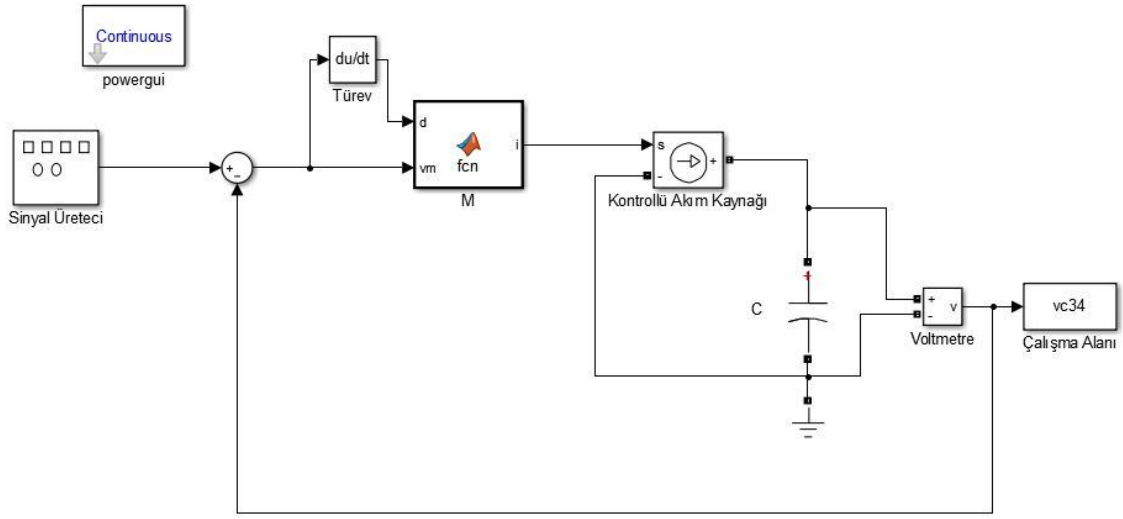
Şekil 6.3. Memristör Tabanlı Alçak Geçiren Filtre Devresi

$$w_k = \frac{1}{C*M} \text{ rad/s} \tag{6.4}$$

İlk olarak negatif dirençli PWL model memristör tabanlı AGF devresine uygulanmıştır. Şekil 6.4'de negatif dirençli PWL modelin AGF devresine uygulanmasıyla oluşturulan AGF devresi verilmiştir. Devrenin benzetim işlemi Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.5'de Simulink ortamında oluşturulan MC devresi yer almaktadır.



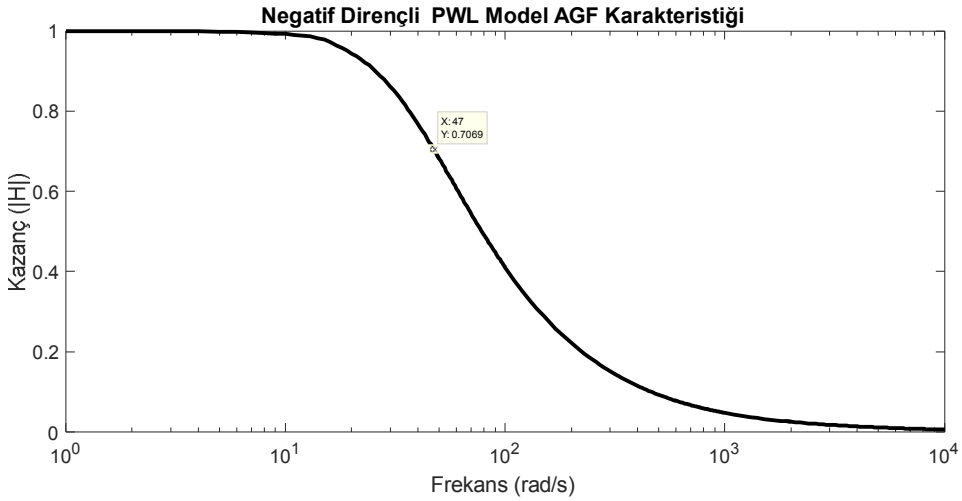
Şekil 6.4. Negatif Dirençli PWL Model AGF Devresi



Şekil 6.5. Simulink Negatif Dirençli PWL Model AGF Devresi

Bu devrede, sinyal üretecinden üretilen sinüs dalga (V_G) ilk olarak "M" harfiyle ifade edilen MATLAB gömülü fonksiyon bloğuna ulaşır. Bu blokta negatif dirençli modelimiz yer almaktadır.. Gelen sinyalle birlikte sinyalin türevi de bloğun içindeki modelde işlenir ve daha sonra işlenen sinyal kondansatör bloğuna aktarılır. Modelimiz, Çizelge 3.1'de verilen kontrol denklemlerine göre ilgili işlemleri yapmaktadır Kondansatörün üzerindeki gerilim bizim çıkış gerilimimiz $V_Ç$'dir. Bu gerilim daha sonra geri besleme için memristör modelinin önündeki toplama- çıkarma bloğuna aktarılır. Burada memristörün üzerindeki gerilim V_M elde edilir. Denklem 6.5'te V_M sinyalinin formülü yer almaktadır. Çalışma Alanı bloğu yardımıyla her bir frekans değeri için bir periyot boyunca $V_Ç$ çıkış gerilimi dizileri elde edilir. Elde edilen bu dizilerin V_G ile oranlamasıyla filtrenin kazanç karakteristiği oluşturulur. Devrede kullanılan kondansatör Simulink "Powerlib" kütüphanesinin bir elemanıdır. MATLAB gömülü fonksiyonuyla bağlantısını sağlamak için araya kontrollü akım kaynağı konulmuştur. Ayrıca bu kütüphanenin elemanlarının çalışması için de "powergui" bloğu devreye eklenmiştir. Oluşturulan diğer modellerin AGF devreleri de bu şekilde çalışmaktadır.Şekil 6.6'da negatif dirençli PWL model AGF karakteristiği yer almaktadır.

$$V_M = V_G - V_Ç \tag{6.5}$$

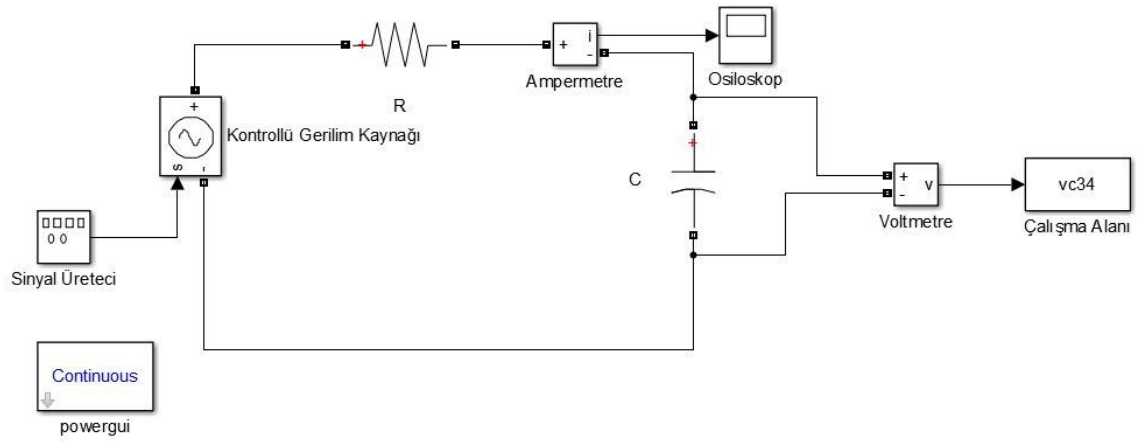


Şekil 6.6. Negatif Dirençli PWL Model AGF Karakteristiği

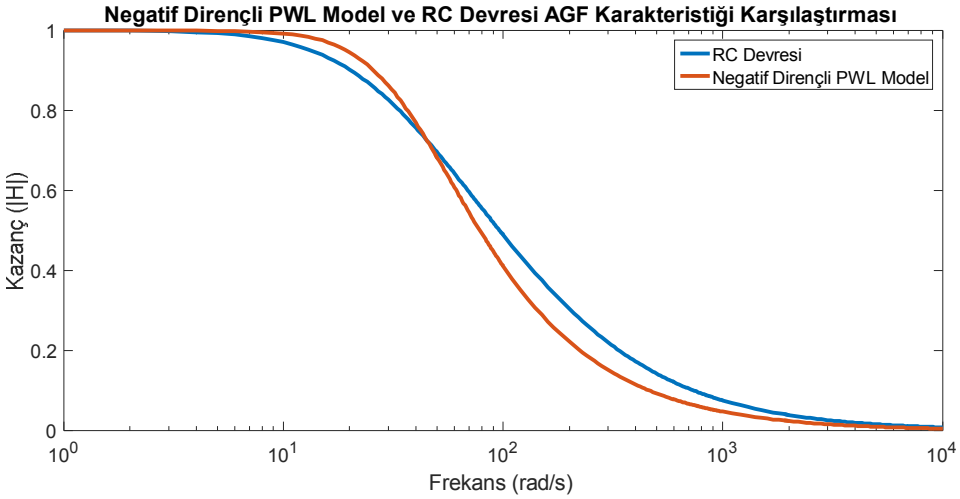
Devrede kullanılan kondansatörün değeri C=10 mF'dır. Şekil 6.6'da görüldüğü üzere kazanç yaklaşık olarak 47 rad/s değerinde 0.707 olmaktadır. Dolayısıyla devrenin kesim frekansını (w_k) 47 rad/s alabiliriz. Denklem 6.4'deki formülden memristans (M) değeri hesabı denklem 6.6'da verilmiştir.

$$w_k = \frac{1}{M*C} \rightarrow M = \frac{1}{C*f_k} = \frac{1}{0.01*47} = 2.1277\ \Omega \tag{6.6}$$

Elde edilen memristans değeriyle AGF devresinin bir de RC devresiyle karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 6.7'de Simulink ortamında kurulan RC devre şeması verilmiştir. Bu devrede direnç değeri denklem 6.6'da elde edilen memristans değerine eşittir. Şekil 6.8'de MC ve RC filtre devrelerinin karakteristiklerinin karşılaştırması verilmiştir.

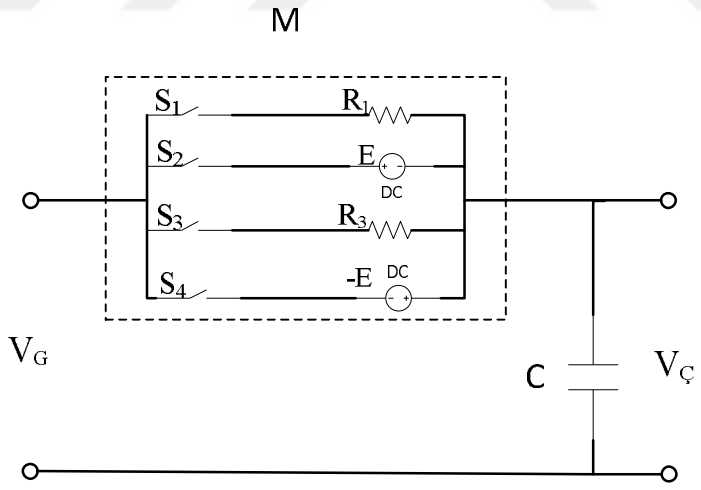


Şekil 6.7. Simulink RC Alçak Geçiren Filtre Devresi

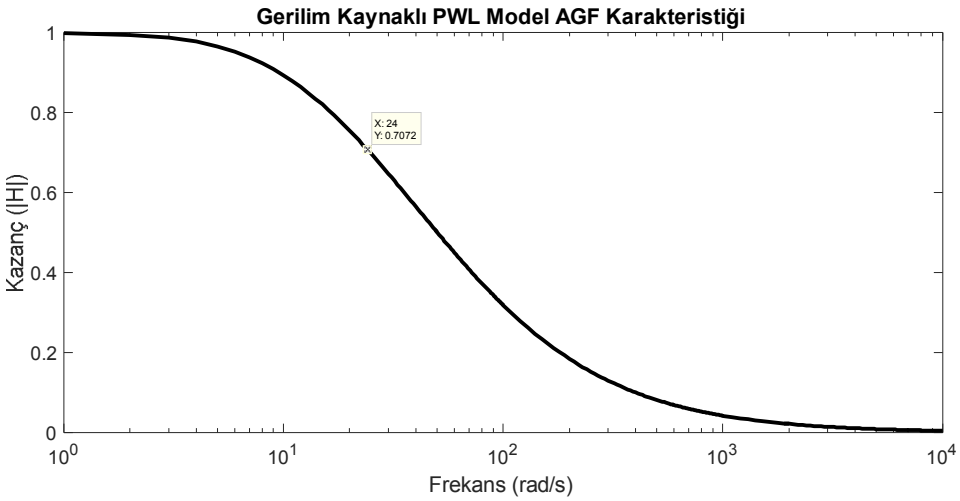


Şekil 6.8. Negatif Dirençli PWL Model ile RC Devresi AGF Karakteristiği Karşılaştırması

Daha sonra Şekil 6.5'de verilen Simulink AGF devresinde, MATLAB gömülü fonksiyon bloğunun içinde bulunan kodları gerilim kaynaklı PWL model kodlarıyla değiştirilerek bu modelin AGF filtre devresi elde edilmiştir. Gerilim kaynaklı PWL modelin AGF eşdeğer devre şeması Şekil 6.9'da verilmiştir. Devrenin çalışma şekli ve blokların özellikleri daha önce negatif dirençli modelde bahsedildiği gibidir. Şekil 6.10'da gerilim kaynaklı PWL model AGF devresinin karakteristiği verilmiştir.



Şekil 6.9. Gerilim Kaynaklı PWL Model AGF Devresi

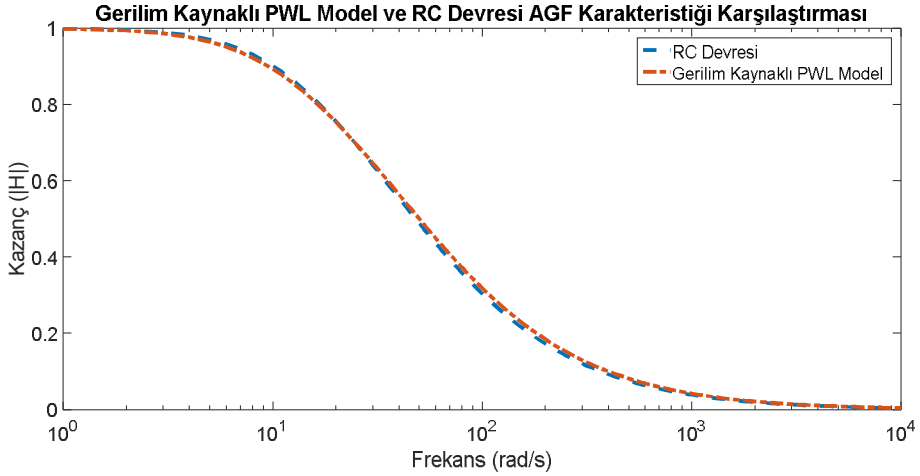


Şekil 6.10. Gerilim Kaynaklı PWL Model AGF Karakteristiği

Devrede kullanılan kondansatörün değeri yine C=10 mF'dır. Şekil 6.9'da görüldüğü üzere kazanç yaklaşık olarak 24 rad/s değerinde 0.707 olmaktadır. Dolayısıyla devrenin kesim frekansını (w_k) 24 rad/s alabiliriz. Denklem 6.4'deki formülden memristans (M) değeri hesabı denklem 6.7'de verilmiştir.

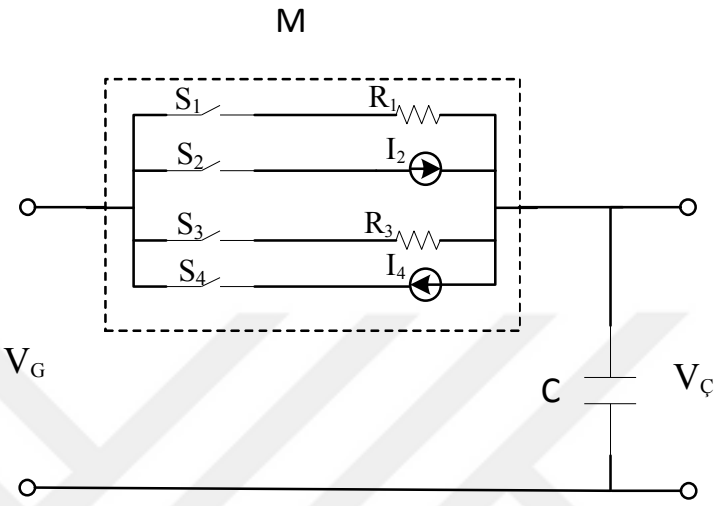
$$w_k = \frac{1}{M*C} \rightarrow M = \frac{1}{C*f_k} = \frac{1}{0.01*24} = 4.1667\ \Omega \tag{6.7}$$

Şekil 6.7'de verilen devrede direnç değeri olarak denklem 6.7'de elde edilen direnç değeri konulmuştur. Devrenin benzetimi yapılarak RC devresinin AGF karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 6.11'de gerilim kaynaklı modelin AGF karakteristiğinin RC devresinin AGF karakteristiğiyle karşılaştırılması verilmiştir.

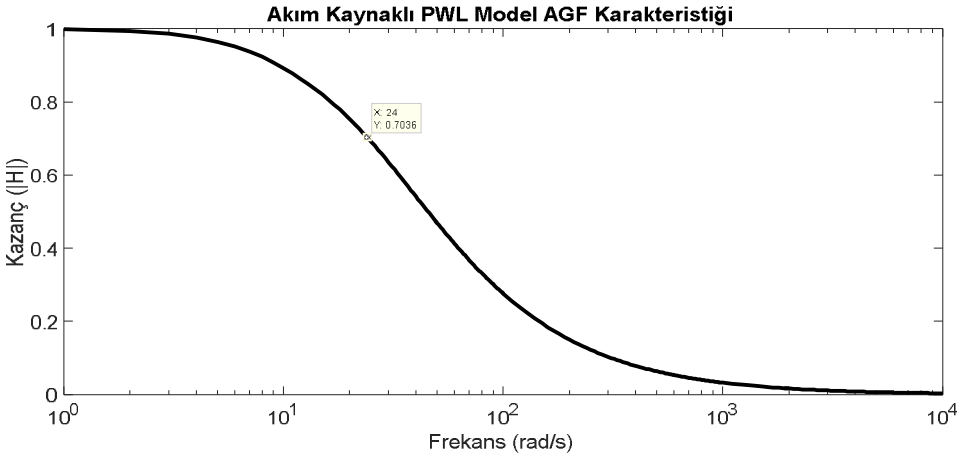


Şekil 6.11. Gerilim Kaynaklı PWL Model ile RC Devresi AGF Karakteristiği Karşılaştırması

Aynı işlemler bu defa akım kaynaklı PWL model kullanılarak tekrar edilmiştir. Elde edilen akım kaynaklı PWL modelin AGF eşdeğer devresi Şekil 6.12'de verilmiştir. Devrenin çalışma şekli diğer modellerin çalışma şekliyle aynıdır. Şekil 6.13'de ise devrenin Simulink ortamında benzetimi yapılmasıyla elde edilen AGF karakteristiği verilmiştir.



Şekil 6.12. Akım Kaynaklı PWL Model AGF Devresi

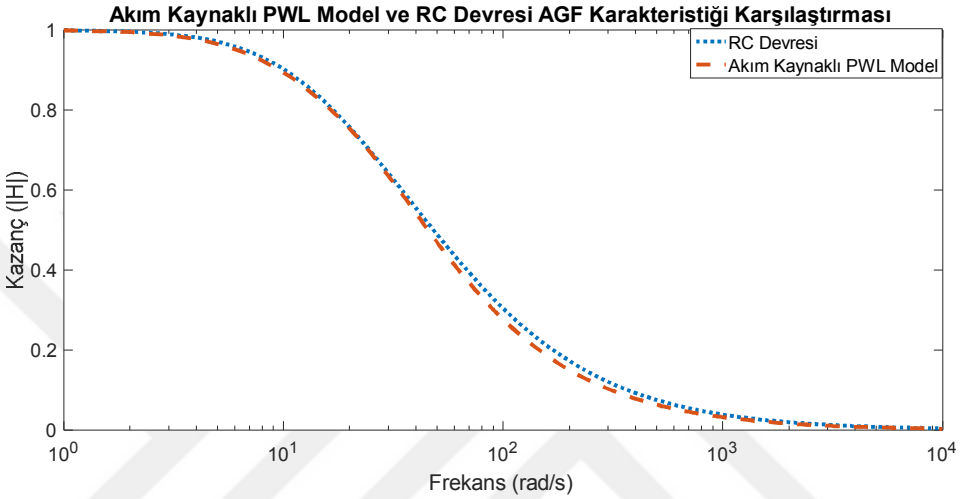


Şekil 6.13. Akım Kaynaklı PWL Model AGF Karakteristiği

Devrede kullanılan kondansatörün değeri yine C=10 mF'dır. Şekil 6.11'de görüldüğü üzere kazanç yaklaşık olarak 24 rad/s değerinde 0.707 olmaktadır. Dolayısıyla devrenin kesim frekansını (w_k) 24 rad/s alabiliriz. Denklem 6.4'deki formülden memristans (M) değeri hesabı denklem 6.8'de verilmiştir.

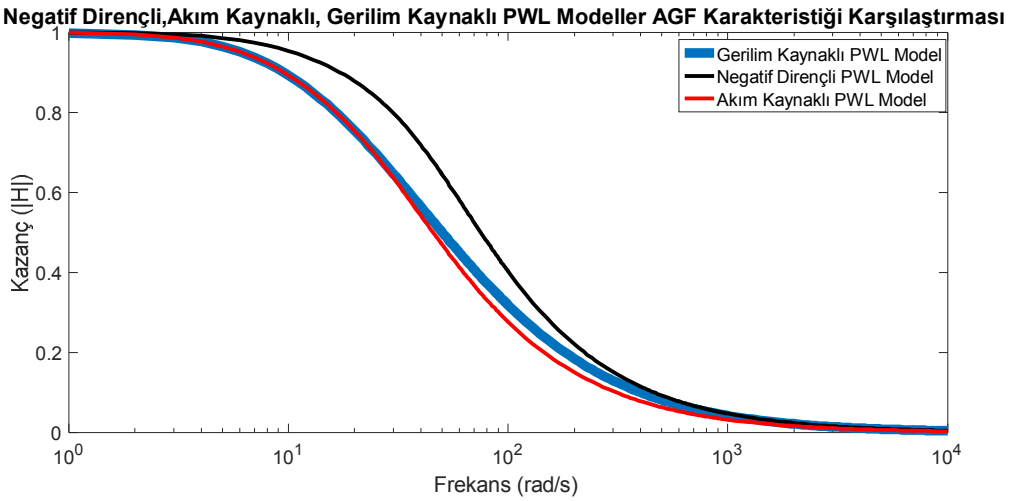
$$w_k = \frac{1}{M*C} \rightarrow M = \frac{1}{C*f_k} = \frac{1}{0.01*24} = 4.1667\ \Omega \tag{6.8}$$

Şekil 6.7'de verilen devrede direnç değeri olarak denklem 6.8'de elde edilen direnç değeri konulmuştur. Devrenin benzetimi yapılarak RC devresinin AGF karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 6.14'de akım kaynaklı modelin AGF karakteristiğinin RC devresinin AGF karakteristiğiyle karşılaştırılması verilmiştir.



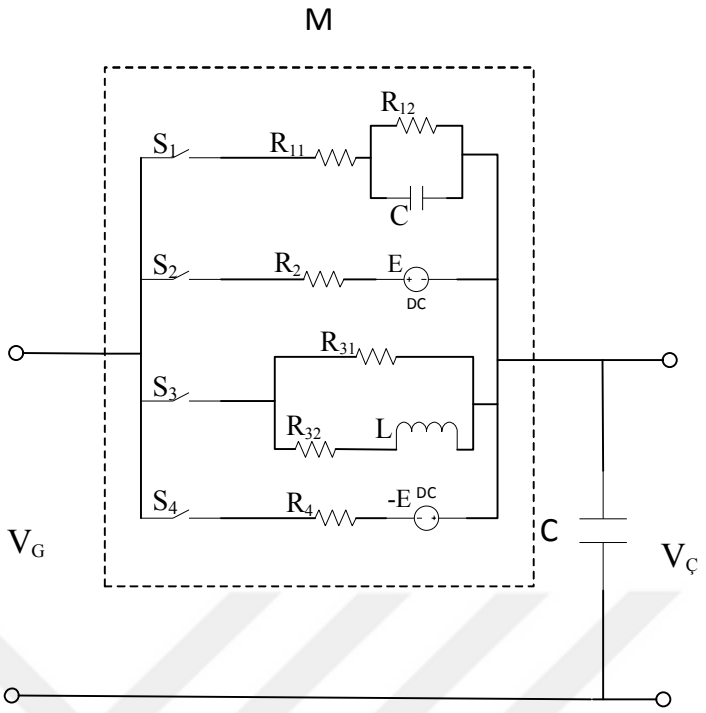
Şekil 6.14. Akım Kaynaklı PWL Model ile RC Devresi AGF Karakteristiği Karşılaştırması

Negatif dirençli, gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı PWL modeller sabit frekansta çalışan memristör modelleridir. Dolayısıyla bu modellerin filtre karakteristikleri birbiriyle karşılaştırılabilir. Bu üç modelin AGF devrelerinin karşılaştırması Şekil 6.15'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı modellerin kesim frekansları birbirine yakın, negatif dirençlinin kesim frekansı ise diğerlerinden farklıdır. Burada, negatif dirençli modelde kullanılan negatif dirençler bu farkı oluşturmaktadır. Bu negatif dirençler modelin memristans değerini değiştirmekte dolayısıyla da kesim frekansı değişmektedir. Akım ve gerilim kaynaklı modellerde kullanılan direnç değerleri aynıdır. Bu iki model arasındaki fark sadece birinde gerilim kaynağı diğerinde ise akım kaynağı kullanılmasıdır. Dolayısıyla iki modelin karakteristikleri ve kesim frekansları benzerlik göstermektedir.

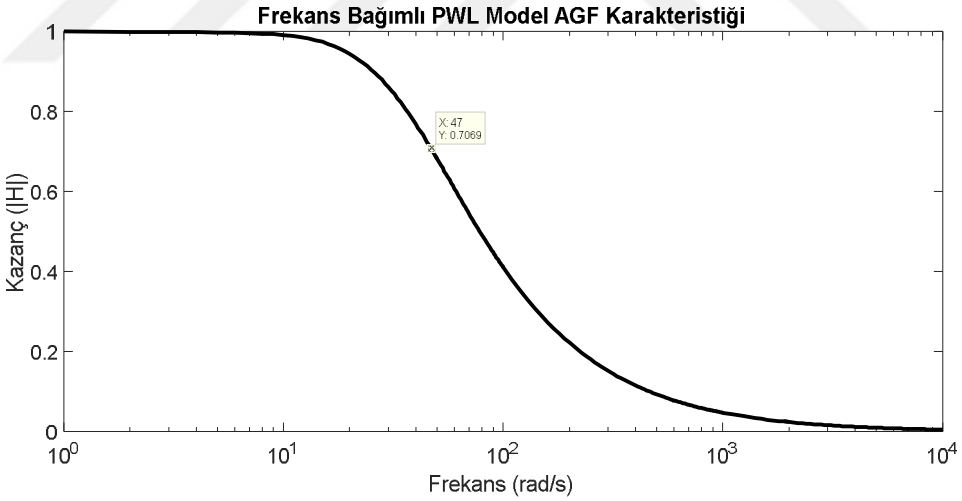


Şekil 6.15. Negatif Dirençli, Gerilim Kaynaklı, Akım Kaynaklı PWL Model AGF Karakteristiği Karşılaştırması

Frekansa bağımlı PWL modelin, frekansa olan bağlılığından dolayı AGF devrelerinde kullanımı diğer modellere oranla daha doğru sonuçlar ortaya koymaktadır. Modelin farklı frekans değerlerinde değişen memristans değerinden dolayı karakteristiği de daha esnek olacaktır. Şekil 6.16'da frekans bağımlı PWL modelin AGF eşdeğer devre modeli verilmiştir. Bu modelde diğer modellerden farklı olarak memristör kısmında frekans bağımlı modelin eşdeğer devre şeması kullanılmıştır. Eşdeğer devrede kullanılan parametreler Şekil 5.13'de verilen devre şemasında kullanılan parametrelerle aynıdır. Şekil 6.17'de bu devrenin Simulink ortamında benzetimi yapılarak elde edilen AGF karakteristiği verilmiştir.



Şekil 6.16. Frekans Bağımlı PWL Model AGF Devresi

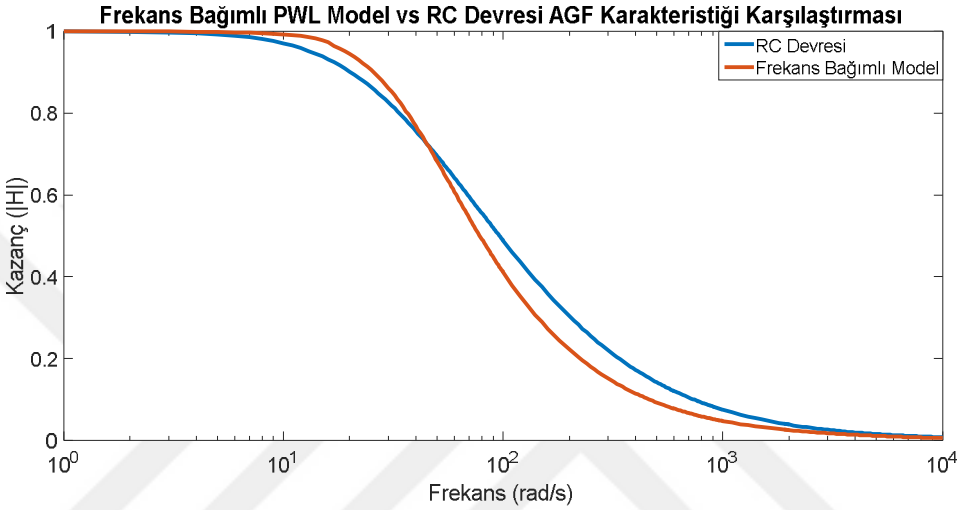


Şekil 6.17. Frekans Bağımlı PWL Model AGF Karakteristiği

Devrede kullanılan kondansatörün değeri C=10 mF'dır. Şekil 6.17'de görüldüğü üzere kazanç yaklaşık olarak 47 rad/s değerinde 0.707 olmaktadır. Dolayısıyla devrenin kesim frekansını (w_k) 47 rad/s alabiliriz. Denklem 6.4'deki formülden memristans (M) değeri hesabı denklem 6.9'da verilmiştir.

$$w_k = \frac{1}{M*C} \rightarrow M = \frac{1}{C*f_k} = \frac{1}{0.01*47} = 2.1277\ \Omega \tag{6.9}$$

Şekil 6.7'de verilen devrede direnç değeri olarak denklem 6.9'da elde edilen direnç değeri konulmuştur. Devrenin benzetimi yapılarak RC devresinin AGF karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 6.18'de frekans bağımlı modelin AGF karakteristiğinin RC devresinin AGF karakteristiğiyle karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 6.18. Frekans Bağımlı PWL Model ile RC Devresi AGF Karakteristiği Karşılaştırması

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Memristör, 2008 yılında HP laboratuvarlarında fiziksel olarak keşfiyle bilim dünyasında merak uyandırmaya başlayan bir elemandır. Bu keşifle beraber memristör üzerine yapılan çalışmalar artmaya başlamıştır. Özellikle, memristörün henüz yeni bir eleman olmasından dolayı bir standardının olmaması bilim insanlarını bu elemanın modellenmesine sevk etmiştir. Yapılan çalışmalar genellikle memristörün modellenmesi, bu modellerin mevcut direnç kullanılan devrelerde kullanılması yönünde olmuştur. Böylece memristörün dirence alternatif bir eleman olduğu ve dirence oranla daha iyi sonuçlar elde edildiği kanıtlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca memristörün hafızalı bir eleman olmasından dolayı daha önce teorik olarak ortaya konulmuş ancak mevcut elemanların yetersizliği nedeniyle oluşturulması mümkün olmayan devreler de memristörle beraber gündeme gelmeye başlamıştır. Örneğin; yapay sinir ağlarında memristörün sinaps olarak kullanılması bu konuda yapay sinir ağlarının fiziksel olarak gerçeklenmesinin önünü açmıştır.

Bu tez çalışmasında, dört farklı memristör modeli önerilmiş ve bu modellerin karakteristik özellikleri verilmiştir. Verilen bu özellikler mevcut memristör modelleriyle kıyaslanmıştır. Daha sonra elde edilen bu modellerin doğruluğunu ispatlamak için modeller filtre devrelerine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar direnç ile oluşturulan filtre devreleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda modellerimizin geçerliliği kanıtlanmıştır.

Memristör modelleme biçimlerinden biri olan Parça-Parça Doğrusal (PWL) model kullanılarak elde edilen memristör modelleri; negatif dirençli PWL model, gerilim kaynaklı PWL model, akım kaynaklı PWL model ve frekansa bağımlı PWL modeldir. Bu modeller, kontrol denklemleri yardımıyla modellenmiştir. Bu modellerden, ilk üçü sabit frekans altında çalışmaktadırlar. Frekansı değiştiğinde modelin Akım-Gerilim (I-V) karakteristiğinde bozulma meydana gelmektedir. Diğer modelimiz, frekansa bağımlı memristör modelinde ise modele uygulanan frekans değiştikçe memristörün özelliklerinden olan frekans yükseldikçe histerezis eğrisi daralır ve sonunda doğrusal bir hal alır önermesi doğrulanmıştır. Frekansı artırdıkça I-V karakteristiğinin histerezis eğrisi gittikçe daralmış ve sonunda belirli bir frekans değerine ulaştığında doğru bir hal almıştır. Modellerin akım-gerilim karakteristikleri, memristans-gerilim karakteristikleri ve

devrelerde kullanılan anahtarların kapalı konumda olduğu zamanları gösteren grafikler paylaşılmıştır.

Bu modellerin doğruluğunu kanıtlamak için modeller filtre devrelerine uygulanmıştır. Burada, Alçak Geçiren Filtre (AGF) devreleri kullanılmıştır. Her bir model için ayrı ayrı devre benzetimi yapılmış ve uygulandıkları filtre devrelerinin sonuçları memristör tabanlı filtre uygulamaları bölümünde paylaşılmıştır. Bu modeller, direnç kullanılan filtre devreleriyle karşılaştırılmış ve modellerin doğruluğu gösterilmiştir. Modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında diğer modellerden farklı olarak frekans bağımlı modelin filtre devrelerinde kullanılması, filtre devreleri frekansa bağlı olarak çalışan devreler olduğu için daha uygun sonuçlar vermiştir.

7.2. Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen modeller aşama aşama geliştirilmiş ve en sonunda frekansa bağımlı model elde edilmiştir. Gelecek çalışmalar için bu modelin daha da geliştirilip faza da bağımlı hale getirilmesi daha iyi sonuçlar elde edilmesinin önünü açabilir. Ayrıca, doğrusallaştırma işleminde daha fazla bölgenin kullanılması da modelin verimliliğini artırabilir. Elde edilen modellerin farklı devre uygulamalarında kullanılmasıyla yeni memristör tabanlı devreler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

Abdalla, H. ve Pickett, M. D., 2011, SPICE modeling of memristors, *Circuits and Systems (ISCAS), 2011 IEEE International Symposium on*, 1832-1835.

Adam, G. C., Hoskins, B. D., Prezioso, M., Merrikh-Bayat, F., Chakrabarti, B. ve Strukov, D. B., 2017, 3-D memristor crossbars for analog and neuromorphic computing applications, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 64 (1), 312-318.

Ascoli, A., Tetzlaff, R., Corinto, F., Mirchev, M. ve Gilli, M., 2013, Memristor-based filtering applications, *Test Workshop (LATW), 2013 14th Latin American*, 1-6.

Aytekin, S. A. ve Mutlu, R., 2013, Taylor Serisi ve Parametrik Fonksiyonlar Kullanarak Yük-bağımlı Memindüktör Histeresiz Eğrisinin Açıklanması. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, (TOK 2013)***:** 705-709.

Bahar, R. I., Hammerstrom, D., Harlow, J., Joyner, W. H., Lau, C., Marculescu, D., Orailoglu, A. ve Pedram, M., 2007, Architectures for silicon nanoelectronics and beyond, *Computer*, 40 (1), 25-33.

Borghetti, J., Snider, G. S., Kuekes, P. J., Yang, J. J., Stewart, D. R. ve Williams, R. S., 2010, 'Memristive'switches enable 'stateful'logic operations via material implication, *nature*, 464 (7290), 873-876.

Buğdaycı, İ., 2012, Elektroniğin Kayıp Halkası: Memristör, *Fizik Dünyası*, 1-8.

Chanthbouala, A., Garcia, V., Cherifi, R. O., Bouzehouane, K., Fusil, S., Moya, X., Xavier, S., Yamada, H., Deranlot, C. ve Mathur, N. D., 2012, A ferroelectric memristor, *Nature materials*, 11 (10), 860-864.

Chew, Z. ve Li, L., 2012, Printed circuit board based memristor in adaptive lowpass filter, *Electronics Letters*, 48 (25), 1610-1611.

Chua, L., 1971, Memristor-the missing circuit element, *IEEE Transactions on circuit theory*, 18 (5), 507-519.

Chua, L., 2014, Resistance switching memories are memristors, In: Memristor Networks, Eds: Springer, p. 21-51.

Chua, L. O. ve Kang, S. M., 1976, Memristive devices and systems, *Proceedings of the IEEE*, 64 (2), 209-223.

Corinto, F., Ascoli, A. ve Gilli, M., 2012, Analysis of current–voltage characteristics for memristive elements in pattern recognition systems, *International journal of circuit theory and applications*, 40 (12), 1277-1320.

Driscoll, T., Kim, H.-T., Chae, B.-G., Di Ventra, M. ve Basov, D., 2009a, Phase-transition driven memristive system, *Applied Physics Letters*, 95 (4), 043503.

Driscoll, T., Kim, H.-T., Chae, B.-G., Kim, B.-J., Lee, Y.-W., Jokerst, N. M., Palit, S., Smith, D. R., Di Ventra, M. ve Basov, D. N., 2009b, Memory metamaterials, *Science*, 325 (5947), 1518-1521.

Driscoll, T., Quinn, J., Klein, S., Kim, H.-T., Kim, B., Pershin, Y. V., Di Ventra, M. ve Basov, D., 2010, Memristive adaptive filters, *Applied Physics Letters*, 97 (9), 093502.

Elgabra, H., Farhat, I. A., Al Hosani, A. S., Homouz, D. ve Mohammad, B., 2012, Mathematical modeling of a memristor device, *Innovations in Information Technology (IIT), 2012 International Conference on*, 156-161.

Gibbons, J. ve Beadle, W., 1964, Switching properties of thin NiO films, *Solid-State Electronics*, 7 (11), 785-790.

Ho, Y., Huang, G. M. ve Li, P., 2009, Nonvolatile memristor memory: device characteristics and design implications, *Proceedings of the 2009 International Conference on Computer-Aided Design*, 485-490.

Itoh, M. ve Chua, L. O., 2008, Memristor oscillators, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 18 (11), 3183-3206.

Joglekar, Y. N. ve Wolf, S. J., 2009, The elusive memristor: properties of basic electrical circuits, *European Journal of Physics*, 30 (4), 661.

Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S. ve Abbott, D., 2010, The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1-28.

Kavehei, O., 2011, Memristive devices and circuits for computing, memory, and neuromorphic applications, PhD, *The University of Adelaide, Australia*, Adelaide, Australia, 23-24.

Kavehei, O., Cho, K., Lee, S., Kim, S.-J., Al-Sarawi, S., Abbott, D. ve Eshraghian, K., 2011, Fabrication and modeling of Ag/TiO_2/ITO memristor, *Circuits and Systems (MWSCAS), 2011 IEEE 54th International Midwest Symposium on*, 1-4.

Kerur, K., 2010, A Study Of The Memristor,The Fourth Circuit Element, Master Of Science, *KANSAS STATE UNIVERSITY*, Manhattan, Kansas, 13.

Kim, H., Sah, M. P., Yang, C., Cho, S. ve Chua, L. O., 2012, Memristor emulator for memristor circuit applications, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 59 (10), 2422-2431.

Kim, K.-H., Gaba, S., Wheeler, D., Cruz-Albrecht, J. M., Hussain, T., Srinivasa, N. ve Lu, W., 2011, A functional hybrid memristor crossbar-array/CMOS system for data storage and neuromorphic applications, *Nano letters*, 12 (1), 389-395.

Kvatinsky, S., Friedman, E. G., Kolodny, A. ve Weiser, U. C., 2013, TEAM: threshold adaptive memristor model, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60 (1), 211-221.

Lee, M.-J., Lee, C. B., Lee, D., Lee, S. R., Chang, M., Hur, J. H., Kim, Y.-B., Kim, C.-J., Seo, D. H. ve Seo, S., 2011, A fast, high-endurance and scalable non-volatile

memory device made from asymmetric Ta2O5− x/TaO2− x bilayer structures, *Nature materials*, 10 (8), 625-630.

Lehtonen, E. ve Laiho, M., 2010, CNN using memristors for neighborhood connections, *Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA), 2010 12th International Workshop on*, 1-4.

Lewis, D. L. ve Lee, H.-H. S., 2009, Architectural evaluation of 3D stacked RRAM caches, *3D System Integration, 2009. 3DIC 2009. IEEE International Conference on*, 1-4.

Li, C., Wei, M. ve Yu, J., 2009, Chaos generator based on a PWL memristor, *Communications, Circuits and Systems, 2009. ICCCAS 2009. International Conference on*, 944-947.

Lin, Z.-h. ve Wang, H.-x., 2009, Image encryption based on chaos with PWL memristor in Chua's circuit, *Communications, Circuits and Systems, 2009. ICCCAS 2009. International Conference on*, 964-968.

Lin, Z. ve Wang, H., 2010, Efficient image encryption using a chaos-based PWL memristor, *IETE Technical Review*, 27 (4), 318-325.

Mahvash, M. ve Parker, A. C., 2010, A memristor SPICE model for designing memristor circuits, *Circuits and Systems (MWSCAS), 2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on*, 989-992.

Mutlu, R., Karakulak, E. ve Bölümu, E., 2009, Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi. *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendislikleri Eğitimi Sempozyumu*.

Mutlu, R. ve Karakulak, E., 2010, Emulator circuit of TiO_2 memristor with linear dopant drift made using analog multiplier, *Electrical, Electronics and Computer Engineering (ELECO), 2010 National Conference on*, 380-384.

Papandroulidakis, G., Vourkas, I., Vasileiadis, N. ve Sirakoulis, G. C., 2014, Boolean logic operations and computing circuits based on memristors, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 61 (12), 972-976.

Park, J., Lee, S., Lee, J. ve Yong, K., 2013, A light incident angle switchable ZnO nanorod memristor: reversible switching behavior between two non□volatile memory devices, *Advanced materials*, 25 (44), 6423-6429.

Parker, T. S. ve Chua, L. O., 1987, Chaos: A tutorial for engineers, *Proceedings of the IEEE*, 75 (8), 982-1008.

Pershin, Y. V. ve Di Ventra, M., 2010, Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors, *Electronics Letters*, 46 (7), 517-518.

Pershin, Y. V. ve Di Ventra, M., 2012, Teaching memory circuit elements via experiment-based learning, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 12 (1), 64-74.

Pershin, Y. V., Sazonov, E. ve Di Ventra, M., 2012, Analogue-to-digital and digital-to-analogue conversion with memristive devices, *Electronics Letters*, 48 (2), 73-74.

Pickett, M. D., Strukov, D. B., Borghetti, J. L., Yang, J. J., Snider, G. S., Stewart, D. R. ve Williams, R. S., 2009, Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices, *Journal of Applied Physics*, 106 (7), 074508.

Prodromakis, T. ve Toumazou, C., 2010, A review on memristive devices and applications, *Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2010 17th IEEE International Conference on*, 934-937.

Radwan, A. G. ve Fouda, M. E., 2015, Memristor: Models, Types, and Applications, In: On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor, Eds: Springer, p. 13-49.

Raja, T. ve Mourad, S., 2009, Digital logic implementation in memristor-based crossbars, *Communications, Circuits and Systems, 2009. ICCCAS 2009. International Conference on*, 939-943.

Sánchez-López, C., Mendoza-Lopez, J., Carrasco-Aguilar, M. ve Muñiz-Montero, C., 2014, A floating analog memristor emulator circuit, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 61 (5), 309-313.

Shadaram, A., Mirzakuchaki, S. ve Zakerian, F., 2011, A Non-Linear, Ionic Drift, Spice Compatible Model for Memristors, *Proc. Int. Conf. Circuits, Syst. Simulation*, 242-246.

Simmons, J. G., 1963, Generalized formula for the electric tunnel effect between similar electrodes separated by a thin insulating film, *Journal of Applied Physics*, 34 (6), 1793-1803.

Singh, J. L. ve Kakade, M. S., 2014, Memristors MATLAB Modeling, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 191-194.

Sklyar, R., 2009, Analytical treatment of the signal propagation in an EM transistor/memristor (EMTM), *Nonlinear Dynamics and Synchronization, 2009. INDS'09. 2nd International Workshop on*, 116-120.

Solak, A. ve Herdem, S., 2016a, A Piece Wise Linear Memristor Model with Switches, *International Journal of Modeling and Optimization*, 6 (2), 124.

Solak, A. ve Herdem, S., 2016b, Simulink Model for Piece Wise Linear Approximation of Memristor, 4, 386-390.

Song, D., Ren, X., Lv, M., Li, M., Zhou, H. ve Zu, Y., 2013, The Realization and Working Conditions of Memristor Based on Multisim, *Journal of Computer and Communications*, 1 (06), 5.

Sozen, H. ve Cam, U., 2013, On the realization of memristor based RC high pass filter, *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2013 8th International Conference on*, 45-48.

Sozen, H. ve Cam, U., 2014, First-Order Memristor–Capacitor Filter Circuits Employing HP Memristor, *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 23 (08), 1-16.

Sözen, H. ve Çam, U., 2015, New memristor emulator circuit using OTAs and CCIIs, *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2015 9th International Conference on*, 10-14.

Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R. ve Williams, R. S., 2008, The missing memristor found, *nature*, 453 (7191), 80-83.

Strukov, D. B. ve Williams, R. S., 2009, Exponential ionic drift: fast switching and low volatility ofáthin-film memristors, *Applied Physics A*, 94 (3), 515-519.

Talukdar, A., Radwan, A. G. ve Salama, K. N., 2010, Time domain oscillating poles: stability redefined in memristor based Wien-oscillators, *Microelectronics (ICM), 2010 International Conference on*, 288-291.

Talukdar, A., Radwan, A. G. ve Salama, K. N., 2011, Generalized model for memristor-based Wien family oscillators, *Microelectronics Journal*, 42 (9), 1032-1038.

Talukdar, A., Radwan, A. G. ve Salama, K. N., 2012, Non linear dynamics of memristor based 3rd order oscillatory system, *Microelectronics Journal*, 43 (3), 169-175.

Versace, M. ve Chandler, B., 2010, The brain of a new machine, *IEEE spectrum*, 47 (12), 30-37.

Vourkas, I. ve Sirakoulis, G. C., 2012, A novel design and modeling paradigm for memristor-based crossbar circuits, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 11 (6), 1151-1159.

Vourkas, I., Batsos, A. ve Sirakoulis, G. C., 2015, SPICE modeling of nonlinear memristive behavior, *International journal of circuit theory and applications*, 43 (5), 553-565.

Wang, D., Hu, Z., Yu, X. ve Yu, J., 2009, A PWL model of memristor and its application example, *Communications, Circuits and Systems, 2009. ICCCAS 2009. International Conference on*, 932-934.

Williams, R. S., 2008, How we found the missing memristor, *IEEE spectrum*, 45 (12), 28-35.

Witrisal, K., 2009a, A memristor-based multicarrier UWB receiver, *Ultra-Wideband, 2009. ICUWB 2009. IEEE International Conference on*, 679-683.

Witrisal, K., 2009b, Memristor-based stored-reference receiver–the UWB solution?, *Electronics Letters*, 45 (14), 713-714.

Xie, Y., 2011, Modeling, architecture, and applications for emerging memory technologies, *IEEE Design & Test of Computers*, 28 (1), 44-51.

Yang, J. J., Pickett, M. D., Li, X., Ohlberg, D. A., Stewart, D. R. ve Williams, R. S., 2008, Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices, *Nature nanotechnology*, 3 (7), 429-433.

Yener, S. C., Mutlu, R. ve Kuntman, H., 2014, A new memristor-based high-pass filter/amplifier: Its analytical and dynamical models, *Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2014 24th International Conference*, 1-4.

Yeşil, A., Babacan, Y. ve Kaçar, F., 2014, A new DDCC based memristor emulator circuit and its applications, *Microelectronics Journal*, 45 (3), 282-287.

Yu, Q., Qin, Z., Yu, J. ve Mao, Y., 2009, Transmission characteristics study of memristors based op-amp circuits, *Communications, Circuits and Systems, 2009. ICCCAS 2009. International Conference on*, 974-977.

Zaplatilek, K., 2011, Memristor modeling in MATLAB & SIMULINK, *Proceedings of the European computing conference*, 62-67.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Ahmet SOLAK
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Samsun- 03.03.1991
Telefon	**:**	0 (332) 223 3714
Faks	**:**	
e-mail	**:**	ahmetsolak@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Tülay Başaran Anadolu Lisesi, İlkadım, Samsun	2008
Üniversite	:	Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, Kocaeli	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2015-	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Solak, A. & Herdem, S. (2016). A Piece Wise Linear Memristor Model with Switches. *International Journal of Modeling and Optimization*, *6*(2), 124-127. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Solak, A, & Herdem, S. (2016). Simulink Model for Piece Wise Linear Approximation of Memristor. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, , 4(Special Issue),386-390. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Solak, A, & Herdem, S. (2017). A New Frequency Dependent Piece Wise Linear Memristor Model**,** *International Conference on Applied Analysis and Mathematical Modeling (ICAAMM 2017)* (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)

Solak, A, & Herdem, S. (2017). Using of Piece Wise Linear Equivalent Circuit Model Instead of Nano-Sized Memristor**,** *International Congress On Semiconductor Materials And Devices (ICSMD 2017)* (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)