T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MEMRİSTÖR MODELLENMESİNDE PROGRAMLANABİLİR DONANIM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ

Hazırlayan
Jean Luck RANDRIANANTENAINA

Danışman
Prof. Dr. Recai KILIÇ

Yüksek Lisans Tezi

Ağustos 2022
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MEMRİSTÖR MODELLENMESİNDE PROGRAMLANABİLİR DONANIM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Hazırlayan
Jean Luck RANDRIANANTENAINA

Danışman
Prof. Dr. Recai KILIÇ

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: FYL-2022-11759) tarafından desteklenmiştir.

Ağustos 2022

KAYSERİ

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Jean Luck RANDRIANANTENAINA

İmza:

“MEMRİSTÖR MODELLENMESİNDE PROGRAMLANABİLİR DONANIM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Jean Luck RANDRIANANTENAINA	Prof. Dr. Recai KILIÇ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı
Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocalarım Prof. Dr. Recai KILIÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Nimet KORKMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı Arş. Gör. Ahmet Yasin BARAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına proje desteği veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FYL-2022-11759) teşekkür ederim.

Ayrıca Eğitim hayatım boyunca bana her zaman destek olan ve hiçbir yardımdan kaçınmayan anneme, babama ve kardeşlerime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Jean Luck RANDRIANANTENAINA

Kayseri, Ağustos 2022

MEMRİSTÖR MODELLENMESİNDE PROGRAMLANABİLİR DONANIM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ

Jean Luck RANDRIANANTENAINA

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2022
Danışman: Prof. Dr. Recai KILIÇ

ÖZET

Memristör elemanının emülatör devreleri ile ilgili değerlendirme ve donanım doğrulama çalışmaları genellikle ya analog ya da dijital gerçekleştirme sonuçlarını içerir. Bu tez çalışmasında, pencere fonksiyonları ile tasarlanan gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog ve dijital platformlarda donanımsal gerçekleştirimi bir arada verilmiştir. Burada, Alan Programlanabilir Analog Dizi (FPAA) platformu ile ilk kez pencere fonksiyonları kullanılarak voltaj kontrollü memristör elemanı gerçeklenmiştir. FPAA platformu analog yapısı, hızlı prototipleme ve düşük donanım maliyeti özellikleri ile dikkat çekmekte ve bu cihaz üzerinde farklı doğrusal olmayan fonksiyonlar kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Benzer şekilde Alan Programlanabilir Kapı Dizi (FPGA) platformu da dijital işaret işleme çalışmalarında paralel çalışma özelliği ile öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanının FPGA tabanlı sayısal uygulama aşamaları da ele alınmıştır. Böylece FPAA ve FPGA tabanlı memristör emülatör tasarımları bir arada sunularak gerçek zamanlı sinyallerin alınması için gerekli olan memristör tabanlı analog ve dijital uygulamalara katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Memristör, pencere fonksiyonu, yeniden yapılandırılabilir devre uygulaması, histerezis eğrisi, Alan Programlanabilir Analog Dizi (FPAA), Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (FPGA).

INVESTIGATION OF PROGRAMMABLE HARDWARE APPROACHES IN MEMRISTOR MODELING

Jean Luck RANDRIANANTENAINA

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, August 2022
Supervisor: Prof. Dr. Recai KILIÇ

ABSTRACT

Evaluation and hardware validation studies of emulator circuits of memristor elements usually include either analog or digital realization results. In this thesis, the hardware implementation of the Non-Linear Ion Drift Model, which is a voltage-controlled memristor model designed with window functions, on programmable and reconfigurable analog and digital platforms is presented together. Here, a voltage-controlled memristor element is implemented for the first time with the Field Programmable Analog Array (FPAA) platform using window functions. The FPAA platform draws attention with its analog structure, rapid prototyping and low hardware cost features, and different nonlinear functions can be easily created on this device. Similarly, the Field Programmable Gate Array (FPGA) platform stands out with its parallel operation feature in digital signal processing studies. In this study, FPGA-based numerical implementation stages of the window function-based memristor element are also discussed. Thus, FPAA and FPGA-based memristor emulator designs were presented together, contributing to the memristor-based analog and digital applications required to receive real-time signals.

Keywords: Memristor, window function, reconfigurable circuit implementation, hysteresis curve, Field Programmable Analog Array (FPAA), Field Programmable Gate Array (FPGA).

İÇİNDEKİLER

MEMRİSTÖR MODELLENMESİNDE PROGRAMLANABİLİR DONANIM YAKLAŞIMLARININ İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK iii
KABUL VE ONAY iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR x
TABLOLAR LİSTESİ xi
ŞEKİLLER LİSTESİ xii
GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
MEMRİSTÖR ELEMANI

1.1. Memristör Kavramı 5
1.2. Memristör Uygulamaları 9

2. BÖLÜM
PENCERE FONKSİYONLARI

2.1. HP Modeli 12
2.2. Pencere Fnksiyonları 15
2.3. Pencere Fonksiyonları ile Tasarlanan Memristör Elemanlarının Nümerik Benzetimleri 24

3. BÖLÜM

PENCERE FONKSİYONLARI İLE TASARLANAN MEMRİSTÖR ELEMANININ ANALOG VE DİJİTAL TABANLI GERÇEKLEŞTİRİMİ

3.1. Pencere Fonksiyonları İle Tasarlanan Memristör Elemanının FPAA Tabanlı Gerçekleştirimi 31

3.2. Pencere Fonksiyonları İle Tasarlanan Memristör Elemanının FPGA Tabanlı Gerçekleştirimi 37

4. BÖLÜM

TARTIŞMA VE SONUÇ

KAYNAKÇA 47

ÖZGEÇMİŞ 52

KISALTMALAR

ADC	Analog Dijital Dönüştürücü (Analog to Digital Convertor)
DAC	Dijital Analog Dönüştürücü (Digital to Analog Convertor)
CAB	Konfigüre Edilebilir Analog Blok (Configurable Analog Block)
CAM	Yapılandırılabilir Analog Modül (Configurable Analog Module)
LUT	Hafiza Tablosu (Look Up Table)
FPAA	Alan Programlanabilir Analog Dizi (Field Programmable Analog Array)
FPGA	Alan Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array)
VHDL	Çok yüksek hızlı entegre devrelerde Donanım Tanımlama Dili (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language)
TOA	Transempedans İşlemsel Yükselteç (Transimpedance Operational Amplifier)
LDR	Işığa Duyarlı Direnç (Light Dependant Resistor)
CMOS	Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)
PLLs	Faz Kilitli Döngüler (Phase Locked Loops)
DMM	Ayrık Memristör Modeli (Discrete Memristor Model)
HP	Hewlett Packard
TiO_2	Titanyum Dioksit
ReRAM	Dirençli Rastgele Erişim Belleği (Resistive Random Access Memory)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı (p) değerleri için Joglekar pencere fonksiyonu. 17

Tablo 2.2. Negatif akım değerleri için Biolek pencere fonksiyonu. 19

Tablo 2.3. Pozitif akım değerleri için Biolek pencere fonksiyonu. 19

Tablo 2.4. $(j = 1)$ ve (p)'nin farklı değerleri için Prodromakis pencere fonksiyonu. 21

Tablo 2.5. $(p = 1)$ ve (j)'nin farklı değerleri için Prodromakis pencere fonksiyonu. 22

Tablo 2.6. Tasarlanan memristör elemanının pencere fonksiyonları ile karşılaştırılması. 28

Tablo 3.1. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı uygulamasının tasarımında kullanılan CAM'lerin listesi. 35

Tablo 4.1. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı uygulamasının sentez sonuçları. 44

Tablo 4.2. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPGA tabanlı uygulamasının sentez sonuçları. 45

Tablo 4.3. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPGA tabanlı uygulamasının güç tüketimi sonuçları 45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.a) Direncin akım-voltaj karakteristiği, b) Kapasitörün akım-voltaj karakteristiği, c) İndüktörün akım-voltaj karakteristiği ve d) Memristörün akım-voltaj karakteristiği. 6
Şekil 1.2. Temel devre değişkenleri ve temel devre elemanları arasındaki ilişki. 7
Şekil 1.3. Memristörün histerezis (Lissajous) eğrisi. 8
Şekil 1.4. Farklı frekans değerleri için memristörün histerezis eğrisi. 9
Şekil 1.5. Memristörlerin uygulamaları. 10
Şekil 2.1. HP tarafından sunulan memristör diyagramı. 12
Şekil 2.2.a) Stanley Williams'ın deneysel Histeresis eğrisi. b) Matlab'da HP veri noktalarının çoğaltılması. 13
Şekil 2.3. Strukov penceresi fonksiyonunun grafiği. 15
Şekil 2.4. Farklı (p) değerler için Joglekar penceresi fonksiyonunun grafikleri. 16
Şekil 2.5. Akımın negatif olduğu durumlarda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği. 18
Şekil 2.6. Akımın pozitif olduğu durumlarda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği. 20
Şekil 2.7. Akımın pozitif ve negatif olduğu durumlarda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği 20
Şekil 2.8. $(j = 1)$ ve farklı (p) değerleri için Prodromakis pencere fonksiyonunun grafikleri. 22
Şekil 2.9. Prodromakis pencere fonksiyonunun $(p = 1)$ ve farklı (j) değerleri için grafikleri. 23
Şekil 2.10. Tukey pencere fonksiyonunun farklı (r) değerleri için grafikleri. 24
Şekil 2.11. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının Matlab tabanlı gerçekleştirim sonuçların zaman domeni gösterimleri ve faz portresi gösterimleri a) Strukov, b) Joglekar, c) Biolek, d) Prodromakis, e) Tukey. 26
Şekil 2.12. Tasarlanan memristör elemanının pencere fonksiyonları ile karşılaştırılması. a) Gerilim-Zaman, b) Akım-Zaman, c) $x(t)$ - Zaman, d) $M(x)$ - Zaman, e) Akım-Gerilim, f) $f(x) - x(t)$ 27

Şekil 3.1. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının deneysel platformu. 30
Şekil 3.2. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA ve FPGA tabanlı gerçeklemelerinin deneysel kurulumu. 31
Şekil 3.3. FPAA'ya dayalı tasarım akış diyagramı. 32
Şekil 3.4. Anadigm Designer2 yazılımında kullanılan CAM bloklarının listesi. 33
Şekil 3.5. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA gerçekleştirim şeması. 34
Şekil 3.6. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirim sonuçların zaman domeni gösterimleri ve faz portresi gösterimleri a) Strukov, b) Joglekar, c) Biolek, d) Prodromakis, e) Tukey. 36
Şekil 3.7. FPGA'ya dayalı tasarım akış diyagramı. 38
Şekil 3.8. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının MATLAB-SIMULINK™ ortamında tasarlanmış modeli. 39
Şekil 3.9. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının giriş gerilimi/çıkış akımı dalga biçimleri; a) Joglekar ve b) Prodromakis. 40
Şekil 3.10. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının SG_{DSP} tabanlı tasarım şeması. 41
Şekil 3.11. Joglekar pencere fonksiyonu tabanlı memristör modelinin FPGA tabanlı deneysel gerçekleştirme sonuçları: a) $v_{source}(t)$ (üst) ve $v(t)$ (alt) giriş-çıkış sinyalleri, b) $v_{source}(t)$ - $v(t)$ faz portre çizimi. 42
Şekil 3.12. Prodromakis pencere fonksiyonu tabanlı memristör modelinin FPGA tabanlı deneysel gerçekleştirme sonuçları: a) $v_{source}(t)$ (üst) ve $v(t)$ (alt) giriş-çıkış sinyalleri, b) $v_{source}(t) - v(t)$ bir faz portre çizimi. 42

GİRİŞ

Leon Chua'nın temel devre teorisinde zamana bağımlı elektriksel voltaj ve akım sinyallerinin integrallerini ilişkilendirmesi ile 1971 yılında memristör elemanının en temel bağıntısı tanımlanmıştır [1]. İki terminalli bir eleman olarak modellenen ve dördüncü temel pasif devre elemanı olarak tanıtılan bu komponent; diğer pasif devre elemanlardan ayrılan kendine özgü doğrusal olmayan özellikleri ile devre teorisi ile ilgilenenlerin kısa zamanda ilgisini çekmiştir. Matematiksel olarak temel bağıntısı 1970'li yıllarda keşfedilmiş olan memristör elemanının fiziksel olarak ilk gerçekleştirimi, yaklaşık kırk yıl sonra Stanley Williams ve arkadaşları tarafından Hewlett Packard (HP) Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Titanyum dioksit (TiO_2) malzeme kullanılarak üretilen bu komponent ile ilgili HP firmasının yayımladığı raporda [2]; elemanın küçük boyut, düşük güç tüketimi, yüksek hızlı çalışma, kararlı davranış, çok durumlu çalışma gibi dikkat çekici özelliklerinden bahsedilmiştir [3–7]. Böylece hem bilimsel araştırmalarda hem de elektronik endüstrisinde memristör elemanın kullanımına olan ilgi artmıştır.

Memristör elemanının analog ve dijital elektronik uygulamalarında kullanımı sırasında elemanın direnç seviyelerinden yararlanılmıştır. Dijital elektronik uygulamalarında, memristörün direnç seviyelerinin bir kısmı kullanılırken; analog uygulamalarda gerçek analog hesaplamayı mümkün kılan minimum ve maksimum değerler arasındaki direnç değeri aralıklarından yararlanılmıştır. Literatürdeki elektronik gerçekleştirimlerde memristör elemanının farklı karakteristik özelliklerini öne çıkaran, Doğrusal İyon Sürüklenme Modeli (Linear Ion Drift Model) [2], Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli (Nonlinear Ion Drift Model) [8], Simmons Tünel Bariyer Modeli (Simmons Tunneling Barrier Model) [9] ve Eşik Uyarlamalı Memristör (Threshold Adaptive Memristor Model -TEAM) [10] gibi modeller tanımlanmıştır. Bu modellerden gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli daha belirgin akım-gerilim ilişkisi karakteristiği ile farklılaşmaktadır. Doğrusal Olmayan İyon

Sürüklenme Modelleri'nde sınır değeri kısıtlamaları ile karşılaşılmaktadır. Bu kısıtlamalar Biolek, Prodromakis, Strukov, ve Joglekar gibi farklı pencere fonksiyonları tanımlanarak azaltılmaktadır [11–16].

Memristör elemanının modelleme çalışmalarının ardından, elemanın farklı devre ve sistemlerde kullanılabilmesi amacıyla fiziksel olarak üretimine ve gerçek zamanlı elektriksel karakteristik çıkışlarına ihtiyaç duyulmuştur. HP tarafından üretilen prototipe ilaveten, memristör elemanının deneysel gerçekleştirimlerde kullanılabilmesi için farklı donanımlar kullanılarak gerçeklenen emülatör devreleri de gerçeklenmiştir [17]. Chua tarafından oluşturulan ilk analog emülatör devresinde; işlemsel kuvvetlendiriciler, transistörler, diyotlar, kapasitörler dirençler ve potansiyometreler kullanılmıştır. Mutlu ve Karakulak [18] tarafından önerilen bir başka emülatör devresinde doğrultucu, fark kuvvetlendiricisi, integral alıcı ve doğrusal olmayan direnç yapılarından yararlanılmıştır. Pershin ve Di Ventra [19], mikroişlemci, Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) ve dijital potansiyometre içeren programlanabilen bir memristör emülatörü geliştirmişlerdir. Valsa ve diğerleri [20] iletkenlik ve akı ile orantılı voltaj üreten voltaj kontrollü bir memristör emülatörü uyguladı. Kim ve arkadaşları [21], uygulanan voltajın polaritesine bağlı olarak artma ve azalma eğiliminde olan iki farklı memristör emülatör devresi önermiştir. Bir memristör emülatörü Wang ve arkadaşları [22] tarafından tasarlanmıştır. Bir ışığa bağımlı direnç (LDR) kullanarak tasarımları eğitim amaçlı önerilmiştir. Biolek ve arkadaşları [23], Akım Geri Besleme İşlemsel Yükseltici (CFOA), Geçiş Empedans İşlemsel Yükseltici (TOA) [24] kullanan birkaç memristör emülatörü önerilmiştir. Literatürde memristörü taklit etmek için opamp, çoğaltıcı ve tamamlayıcı metal-oksit-yarı iletken (CMOS) gibi birkaç farklı entegre bileşen kullanılmıştır [25–27]. Sodhi ve Gandhi [28], memristör davranışını taklit eden, ayrık elemanlardan oluşan ve okullarda eğitim amaçlı olarak kullanılabilecek bir kit tasarlamışlardır. Xudong Xie ve arkadaşları [29], memristörü karakterize etmek için doğrusal olmayan logaritmik bir model önermişlerdir ve bu model için memristör emülatör devresi geliştirilmişlerdir. Bu gerçekleştirimlerin pek çoğunda ayrık donanımların kullanılması, tasarlanan emülatörler için eleman değerlerinin hassas olarak ayarlanabilmesi açısından dezavantaj teşkil etmektedir. Bu sebeple bazı çalışmalarda memristör yapıları için geliştirilen emülatör devrelerinin sadece devre simülasyon programında yapılan analiz sonuçları sunulmaktadır. Örneğin, Zdeněk Biolek ve arkadaşları [11], Joglekar pencere fonksiyonunu SPICE devre analiz

programını kullanarak devre benzetimlerini yapmışlardır. Benzer şekilde, Ahmad Fuad Adzmi ve arkadaşları [30], pencere fonksiyonlarının temel karakteristiklerini karşılaştırmak amacıyla ilgili modelleri SPICE devre analiz programında benzetim yapmışlardır.

Literatürde memristör elemanının emülatör devrelerinin sunulduğu donanım doğrulama çalışmalarında genellikle ya analog ya da dijital gerçekleştirim sonuçlarına yer verilmiştir. Bu tez çalışmasında, pencere fonksiyonları ile tasarlanan gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog ve dijital platformlarda akım-gerilim ilişkisinin deneysel olarak gözlemlenebilmesi amacıyla, pencere fonksiyonları ile modellenen memristör elemanının programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog ve dijital elemanlarla gerçekleştirim aşamaları bir arada sunulmuştur. Bahsi geçen memristör tanımlamalarının; analog doğası, farklı nonlineer fonksiyonların eleman üzerinde kolaylıkla inşa edilebilmesi, hızlı prototiplendirme imkânı sunması ve düşük maliyeti ile dikkat çeken FPAA elemanı ile gerçekleştirimi sayesinde; analog elektriksel işarete ihtiyaç duyulan uygulamalar için alternatif bir yaklaşım sunulacaktır. Ayrıca bildiğimiz kadarı ile Strukov, Joglekar, Prodromakis, Biolek, Tukey pencere fonksiyonları ile modellenen memristör elemanı ilk kez FPAA ile taklit edilecektir. Öte yandan, Strukov, Joglekar, Prodromakis pencere fonksiyonu ile modellenen memristör elemanının dijital işaret işleme çalışmalarında paralel işlem yapabilme özelliği ile öne çıkan FPGA elemanı üzerinde gerçekleştirimleri de ilgili memristör modellerinin kullanılacağı dijital uygulamalar için alternatif çözümler teşkil edecektir. Memristör elemanının FPAA ve FPGA platformları ile taklit edilmesi ile elde edilen sonuçların bir arada sunulduğu bu tez çalışması, memristör elemanının kullanıldığı pek çok sistemin gerçeklenme sürecine de esin kaynağı olacaktır.

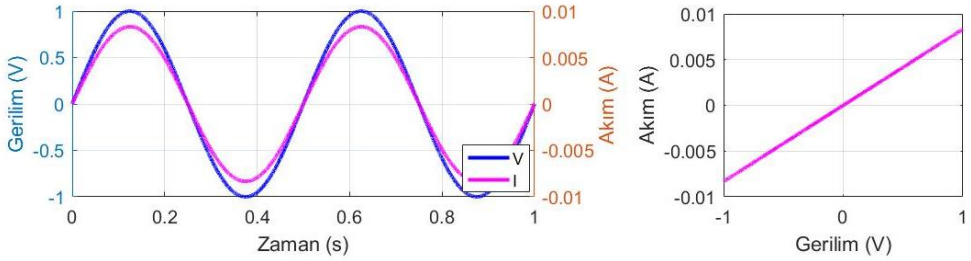
Bu kapsamda Bölüm 1'de memristör elemanının tanımı, tarihçesi ve uygulamaları gibi temel bilgiler verilmiştir. Ardından memristör elemanının modellenmesi için literatürde mevcut olan farklı matematiksel ifadelerle tanımlanmış pencere fonksiyonları incelenmiştir. Memristör elemanının karakteristik eğrisi olan histerezis yapısının gözlemlenebilmesi için elemanın girişine sinüzoidal bir elektriksel işaret uygulanması gerekmektedir. Memristör elemanı frekansa bağımlı çalışma karakteristiği sergileyen bir eleman olduğundan, bu bağımlılığın sonuçlarının gözlemlenebilmesi için, belirlenen

frekans değerlerindeki sinüzoidal işaretin pencere fonksiyonları kullanılarak tasarlanan memristör yapılarına uygulanması gerekmektedir. Bu çıktıyı gözlemlemek için yapılan nümerik simülasyon sonuçları da Bölüm 2'de sunulacak ve yorumlanmıştır. Ardından Bölüm 3'te pencere fonksiyonlarının FPAA ve FPGA platformunda oluşturulması için takip edilen tasarım aşamalarının detayları ele alınmıştır. Elde edilen FPAA tabanlı gerçekleştirim sonuçları da bu bölümde verilmiştir. FPAA platformunda tasarım aşamasında genliği ve frekansı kullanıcı tarafından ayarlanabilen bir sinüzoidal osilatör mevcuttur; fakat FPGA platformlarında sinüzoidal işaretin doğrudan elde edilebileceği önceden tanımlı bir yapı genellikle yoktur. Bu sebeple, farklı pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının FPGA platformu üzerindeki gerçekleştiriminde, elemanın girişine tatbik edilecek giriş işaretinin de kullanıcı tarafından tasarlanmasına ihtiyaç duyulabilir. Bu tez çalışmasında sinyal jeneratöründen alınan harici bir işaretin Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) ile FPGA platformuna uygulanması yerine, bir sinüzoidal osilatör tanımlamasından yararlanılmıştır. Bu osilatör yapısı da FPGA platformunda oluşturulmuştur. Bunun için literatürde sıklıkla kullanılan osilatör tanımlamalarından biri olan Van der Pol (VDP) osilatörü FPGA elemanı üzerinde gerçeklenmiştir. VDP osilatörünün osilasyon frekansı arzu edilen frekans değerine ayarlanarak pencere fonksiyonları ile oluşturulan memristör elemanının girişine uygulanmış ve memristör elemanının karakteristik histerezis eğrisi gözlemlenmiştir. Öte yandan, FPAA ve FPGA elemanları sırasıyla birer analog ve dijital gömülü sistem elemanları olduklarından bu elemanların tipik özelliklerini doğrudan karşılaştırmak mümkün değildir. Bununla birlikte, tasarım aşamalarında izlenmesi gereken prosedürlere, bu aşamalarda karşılaşılan önerilen çözüm yöntemlerine ilaveten, platformların güç tüketimi ve hafıza kullanımı gibi genel çıktıları Bölüm 4'te tartışılacaktır. Çalışmayla ilgili elde edilen genel sonuçlar ise son bölümde ele alınmıştır.

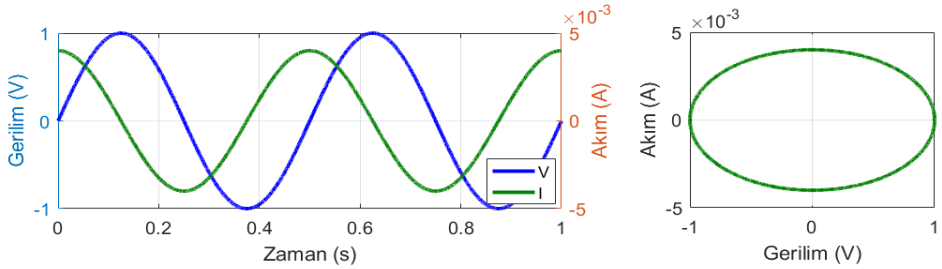
1. BÖLÜM
MEMRİSTÖR ELEMANI

1.1. Memristör Kavramı

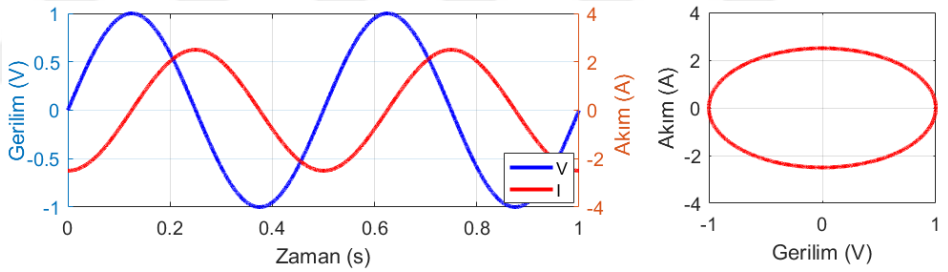
Direnç, kapasitör ve indüktör devre teorisinde temel pasif devre elemanlarıdır. Bu elemanlar başlıca dört devre değişkeni olan akım (i), voltaj (v), elektrik yükü (q) ve manyetik akı (φ) arasındaki ilişki ile tanımlanır. Direnç (R); Şekil 1.1a'da gösterildiği gibi voltaj ile akım arasındaki ilişkiyi $(dv = Rdi)$, kapasitör (C); Şekil 1.1b'de gösterildiği gibi voltaj ile yük arasındaki ilişkiyi $(dq = Cdv)$, indüktör (L) ise; Şekil 1.1c'de gösterildiği gibi akım ile manyetik akı arasındaki ilişkiyi $(d\varphi = Ldi)$ temsil etmektedir. Bunun dışında Faraday Kanunu'na göre (i) akımı (q) elektriksel yükünün türevine eşit iken, (v) voltajı (φ) manyetik akısının türevine eşittir. Dört temel devre değişkenin altı farklı kombinasyonunun olduğu açıktır ancak bu tanımlamalara göre sadece beş kombinasyon ifade edilmektedir. Leon Chua tarafından önerilen memristör elektrik yükü (q) ile manyetik akı (φ) arasındaki ilişkiyi temsil ederek son kombinasyonu tamamlamıştır. Dört temel pasif elemanına sinüzoidal bir giriş uygulandığında direncin voltaj ve akım arasında doğrusal bir ilişki gösterdiği, enerji depolama elemanlarının (kapasitör ve indüktör) doksan derece faz farkı ile dairesel bir döngü sergilediği bilinmektedir. Memristör elemanı sinüzoidal giriş uygulandığında önceden bilinen iki terminale sahip üç temel pasif elemanda (direnç, kapasitör ve indüktör) bulunmayan düzleminde sıfır geçiş ile bir histerezis döngü karakteristiği göstermektedir.



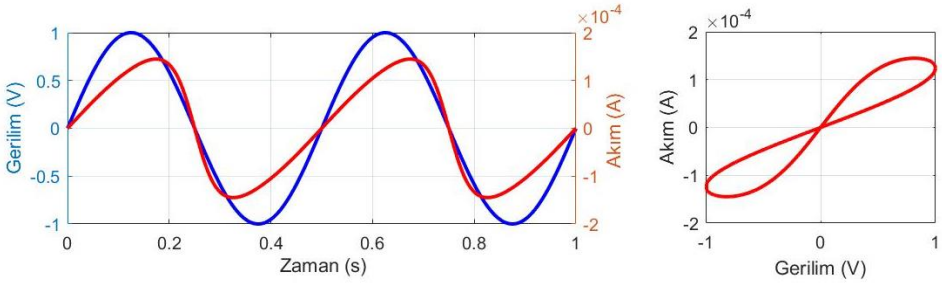
a)



b)

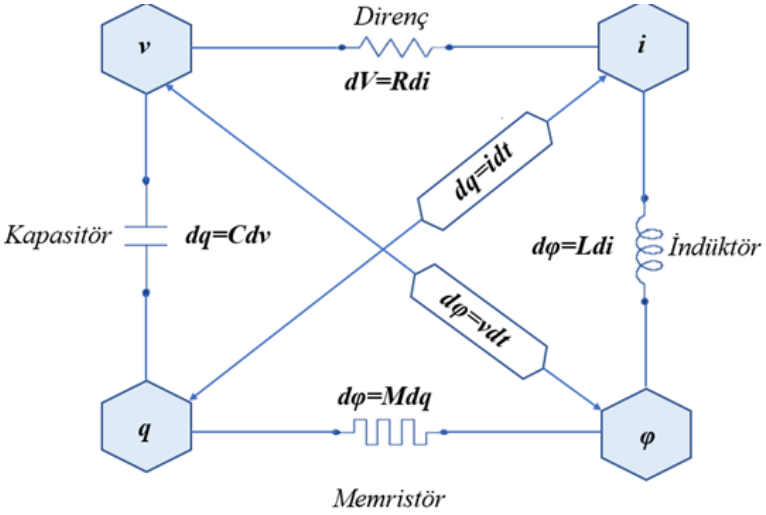


c)



d)

Şekil 1.1. a) Direncin akım-voltaj karakteristiği, b) kapasitörün akım-voltaj karakteristiği, c) indüktörün akım-voltaj karakteristiği ve d) memristörün akım-voltaj karakteristiği.



Şekil 1.2. Temel devre değişkenleri ve temel devre elemanları arasındaki ilişki [2].

Temel devre elemanları ve elektriksel değişkenler arasındaki ilişki Şekil 1.2'de görülmektedir. Memristör; üzerinden geçen akıma bağlı olarak direnç değeri değişen pasif bir devre elemanıdır. Memristör elemanının üzerinden bir yönde akım geçtiğinde direnci artarken, tersi yönde akım geçtiğinde ise direnci azalmaktadır. Üzerinden geçen akım kesilip yeniden akım tatbik edilinceye kadar, sahip olduğu son direnç değerini korumaktadır. Bu durum memristör elemanının hafızalı bir direnç gibi davrandığını göstermektedir. MEMory ResISTOR'ün kısaltmaları olan memristör adını da bu özelliğinden almaktadır.

Elektriksel yük ile manyetik akıyı ilişkilendiren memristör, yük ve akı arasındaki ilişkinin ifade biçimine göre iki şekilde isimlendirilir: Yük ile akı arasındaki ilişki, yükün (q) bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa; yük-kontrollü memristör olarak ifade edilir ve memristans olarak adlandırılır. Birimi Ohm (Ω)'dur ve Denklem (1)'deki gibi $M(q)$ ile tanımlanır:

$$\varphi = f(q)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{df(q)}{dq}\frac{dq}{dt} \quad \Rightarrow \quad v(t) = \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{ve} \quad i(t) = \frac{dq}{dt} \tag{1}$$

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

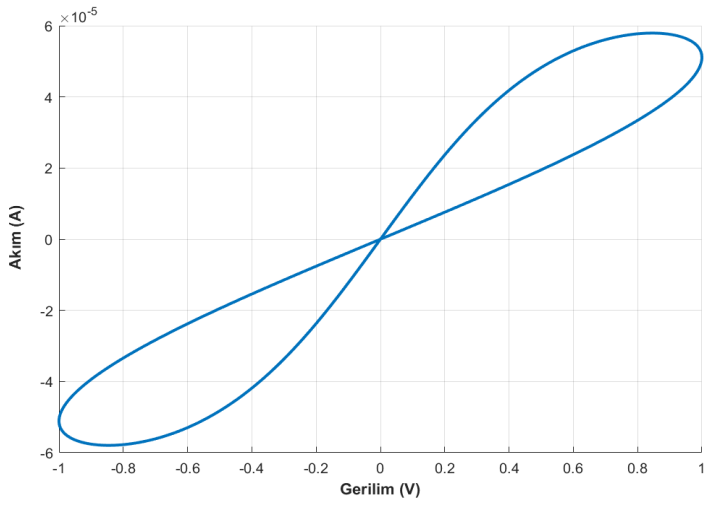
Aksi durumda, memristör elemanı üzerindeki yük ile akı ilişkisi akının (φ) bir fonksiyonu olarak tanımlanırsa, akı-kontrollü memristör olarak ifade edilir ve Memdüktans olarak adlandırılır. Birimi Siemens (S)'tir ve Denklem (2)'deki gibi $W(\varphi)$ ile ifade edilir:

$$q = g(\varphi)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dg(\varphi)}{d\varphi}\frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow i(t) = \frac{dq}{dt} \quad \text{ve} \quad v(t) = \frac{d\varphi}{dt} \tag{2}$$

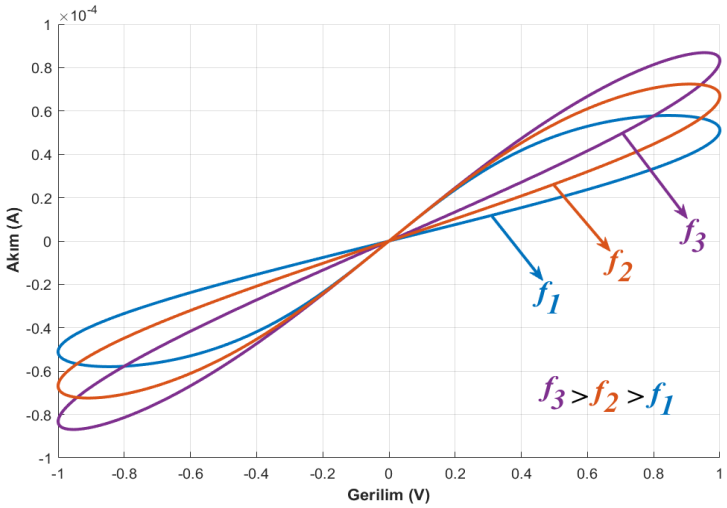
$$i(t) = W(\varphi)v(t)$$

Memristans ve Memdüktans sırasıyla direnç ve iletkenlik birimine sahiptir; fakat temel pasif devre elemanlarına kıyaslandığında memristör elemanlarının kendine özgü ve doğrusal olmayan Pasiflik Kriteri, Histerezis döngüleri, Doğrusal Karakteristik Sınırlaması ve Varlık ve Teklik Teoremi gibi karakteristik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir [31]. Pasiflik kriteri; yük kontrollü memristörün, memristans değeri $M(q)$ pozitifse, yani herhangi bir anda $M(q) \geq 0$ ise, sağlanan bir kriterdir. Bu kriter, memristörün enerji tüketeceği ve dahili bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan bir pasif devre elemanı olarak çalışabileceği anlamına gelmektedir. Pasif bir memristör sinüzoidal uyarım altında her zaman girişin en fazla iki değerli bir fonksiyonu olan ve orijinden geçen Lissajous benzeri bir tepkiye yol açar ve bu döngü histerezis döngüsü olarak bilinir. Memristör ideal ise $I - V$ yanıtı da simetrik olmalıdır. Bu tür tepkiler, memristör davranışlarını tanımlamak için nicel bir yol olarak kullanılmaktadır[31].



Şekil 1.3. Memristörün histerezis (Lissajous) eğrisi.

Şekil 1.3 sinüzoidal uyartımın altında ideal bir memristör için orijini geçen histerezis karakteristikli $I-V$ tepkisini göstermektedir. İdeal olmayan memristörler için benzer tepkiler elde edilmektedir [32]. Doğrusal Karakteristik Sınırlamasında ise periyodik bir dalga formu ile uyarılan pasif bir memristör elemanında, uyartımın frekansı sonsuza doğru arttıkça, memristör elemanı doğrusal bir direnç gibi davranır. Uyartım frekansının artmasıyla histerezis eğrisi daralmaktadır. Şekil 1.4'te sinüzoidal bir uyartım altında ideal karakteristikli bir memristör modelinin artan büyüklükteki frekans cevapları gösterilmiştir. Minimum frekanstan (f_1) maksimum frekansa (f_3)'e yükseldikçe, memristörün doğrusal bir dirence benzediği görülmektedir. Memristör yanıtının sıfırdan geçiş özelliği frekanstan bağımsız olarak korunmaktadır. Bunu kontrol eden yapı doğrusal karakteristik sınırlamasıdır**.**



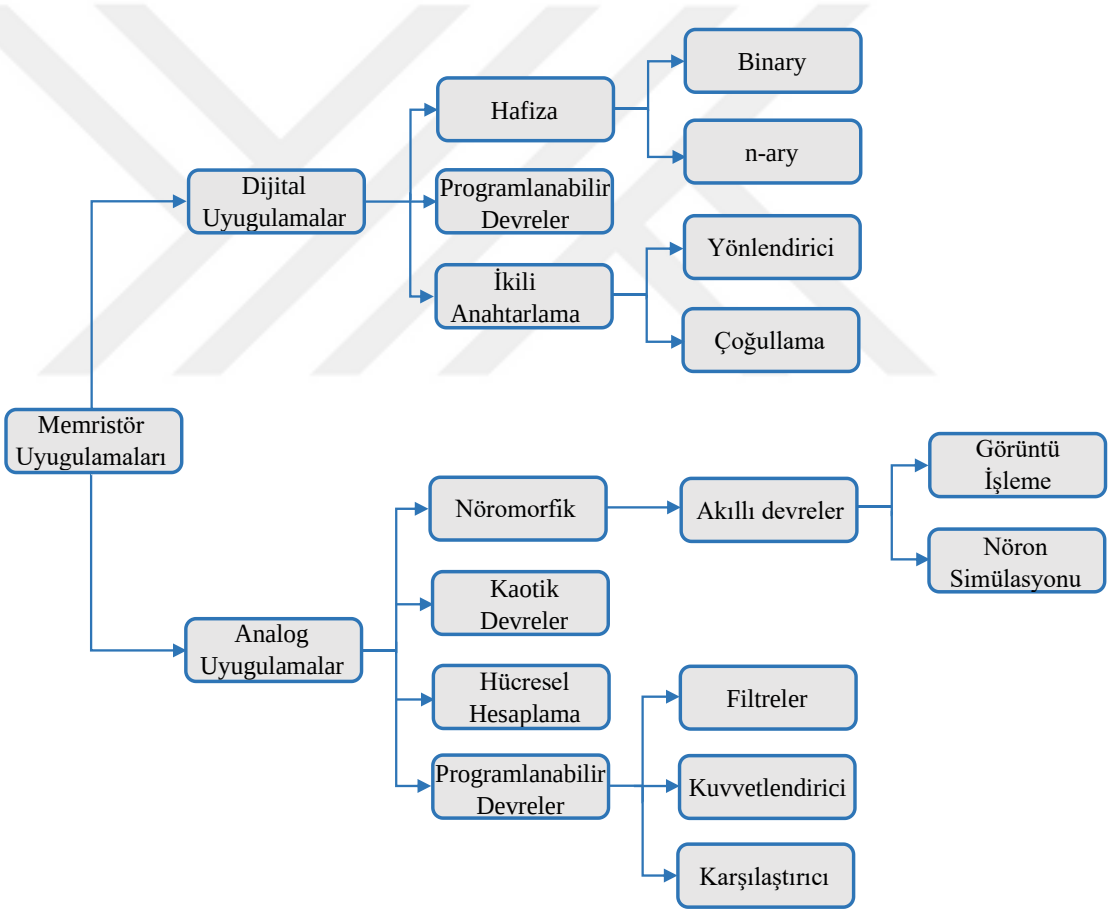
Şekil 1.4. Farklı frekans değerleri için memristörün histerezis eğrisi.

Varlık ve Teklik Teoremi; pasif bir memristör bulunduran her sistemin sadece tek cevabının bulunması olarak tanımlanmıştır.

1.2. Memristör Uygulamaları

Memristörün fiziksel gerçekleştirimi sonrası, bilimsel araştırmalarda ve mühendislik uygulamalarında bu elemanın kullanıldığı gerçekleştirimler için araştırmalar başlamıştır. Memristörün küçük boyutlu olması, düşük enerji tüketimi, anahtarlama özelliği, sinaps-benzeri davranışı, hafıza özelliğinin olması gibi karakteristiklerinden yararlanılarak literatüre birçok çalışma sunulmuştur. Mevcutta geliştirilen ve kullanılan uygulamaların performansını artırmak için memristör elemanının tercihi alternatif çalışmalara esin

kaynağa olmuştur. Örneğin; memristör elemanının dijital hafıza elemanı olarak kullanımı ile alternatif devre kartlarının geliştirilmesi, FPGA tabanlı hatların iletişim protokollerinin yapılandırılması, yüksek hızlı dalga formu üretimi, sensör simülasyonu, bit hata oranı testi gibi çok çeşitli uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Dahası nöromorfik devreler, akıllı sistem uygulamalarında memristör kullanımı ile ilgili çalışmalar da literatüre sunulmuştur [8]. Literatürde memristörlerin özelliklerinden yararlanan çok sayıda uygulama önerilmiş ve araştırılmıştır. Uygulama alanları, cihazın memristans seviyelerinin aralığının nasıl kullanıldığına bağlı olarak dijital ve analog olarak ayrılmıştır. Memristör uygulama alanları Şekil 1.5'teki gibi özetlenebilir.



Şekil 1.5. Memristörlerin uygulamaları [33].

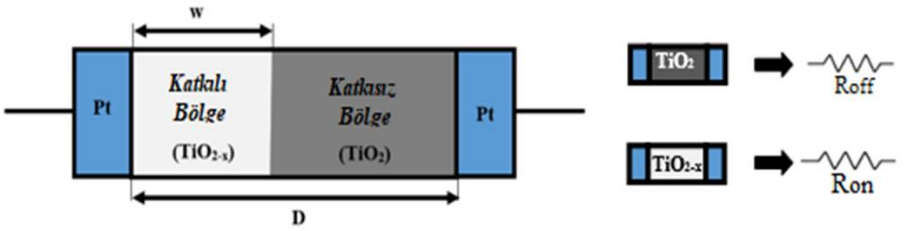
Dijital uygulamalar için, ayrık direnç seviyelerinin bir kısmı kullanılmıştır. Öte yandan, analog uygulamalar için; gerçek analog hesaplamayı mümkün kılan minimum ve maksimum değerler arasındaki direnç aralıkları kullanılmıştır [34-35]. Önerilen en sönemli dijital uygulamalar iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Bunlar; dijital bellekler

(binary) ile yapılandırılabilir ve programlanabilir dijital mantık devreleri olarak bilinmektedir. Bu uygulamalar uygun bir giriş darbesi uygulanarak ikili direnç seviyesine ayarlanabilen bir anahtar görevi gören, tek bir programlanabilir memristör ile aynı prensibe dayanmaktadır. Memristörün dikkat çeken analog uygulama alanları ise, biyolojiden esinlenilen devreler ve nöromorfik sistemlerdir. Bu analog uygulamalar, belirli bir hesaplamayı gerçekleştirmek için insan veya başka bir canlının sinir sisteminden esinlenen biyolojik bir sinir ağının belirli bir işlevselliğini taklit eden bir yapay nöral yapıları kullanmaktadır. Bu nöral ağlar birbirine bağlanan nöronlardan ve sinapslardan oluşmaktadır [36].

2. BÖLÜM
PENCERE FONKSİYONUN TANITIMI

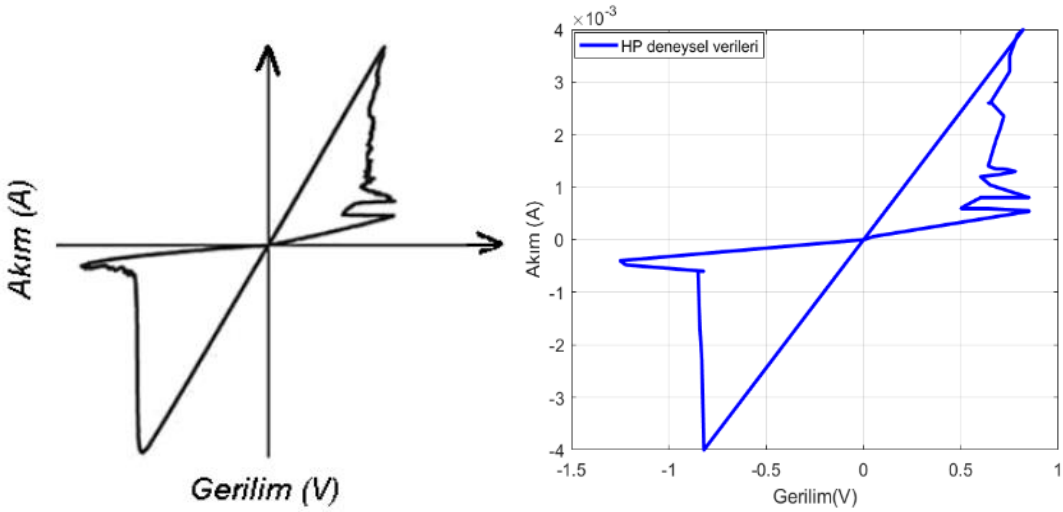
2.1. HP Modeli

HP Laboratuvar ekibi ilk fiziksel memristörü, Doğrusal Sürüklenme Modeli ya da kısaca HP modeli olarak adlandırdıkları Şekil 2.1'da görülen yapıyı ince bir titanyum dioksit (TiO_2) filmini iki platin (Pt) elektrot arasına yerleştirerek üretmişlerdir [2]. Şekil 2.1'da gösterilen bu modelde (D) elemanın genişliğini ifade eder ve iki bölgeden oluşur. Birinci bölge pozitif oksijen iyonlarıyla katkılanmış oksijen boşluklarını, ikinci bölge ise katkılanmamış kısmı ifade eder. HP tarafından deneysel olarak üretilen Memristörün $I-V$ karakteristiği Şekil 2.2a'da verilmiştir. Şekil 2.2b'de, MATLAB kullanılarak HP veri noktalarının replikasyonu gösterilmektedir [2].



Şekil 2.1. HP tarafından sunulan memristör diyagramı.

Katkılanmış kısmın genişliği (w) ile tanımlanır ve düşük dirence (R_{on}) sahiptir. Dolayısıyla daha iletkendir. Katkılanmamış bölge ise daha yüksek dirence (R_{off}) sahiptir. $w = 0$ olduğunda memristör direnci yükselir ve açık anahtar görevi görür. $w = D$ olduğunda ise memristör direnci azalır ve kapalı anahtar vazifesi görür.



a) b)

Şekil 2.2. a) Stanley Williams'ın deneysel Histeresis eğrisi. b) Matlab'da HP veri noktalarının çoğaltılması.

Memristörün memristansının (w) değişkenine bağlı olarak ifadesi Denklem (3)'teki gibidir:

$$M(w) = R_{on}\frac{w(t)}{D} + R_{off}(1 - \frac{w(t)}{D}) \tag{3}$$

Memristöre bir $i(t)$ akımı uygulanırsa, iki bölge arasındaki sınır, yüklü katkı maddesinin kayması nedeniyle memristör boyunca hareket edecektir. Düzgün bir alan yükünde doğrusal bir iyon sürüklenmesi olacağı dikkate alınarak memristör üzerindeki voltaj Denklem (4)'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$v(t) = M(w)i(t) = \left[R_{on}\frac{w(t)}{D} + R_{off}(1 - \frac{w(t)}{D})\right] i(t) \tag{4}$$

$x = \mathrm{w/D}$ ile tanımlanan (x) değişkeni (w) değişkeninin normalize edilmiş halidir ve $x \in [0,1]$ aralığında tanımlanır. $x(t) = 0$ durumunda, $M(x) = R_{off}$ ve $x(t) = 1$ durumunda ise $M(x) = R_{on}$ değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durumda Denklem (4) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$M(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x) \tag{5}$$
$$v(t) = [R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x)]i(t)$$

Memristörün elektriksel davranışı, katkılanmış bölge ile katkılanmamış bölge arasındaki kaymayla ilgilidir ve $[0, D]$ aralığıyla sınırlıdır. Sınırlardaki durum, doğrusal sürüklenme yaklaşımının önemli bir sorunudur. Elemana nano boyutlarda uygulanan gerilim; iyonik hareketlilikte önemli bir büyüklükte doğrusal olmayan karakteristiğe neden olan bir elektrik alan oluşumuna ve sonuç olarak enerji bariyerinde hızlı ve önemli bir azalmaya sebep olmaktadır [8]. Bahsedilen bu doğrusal olmama özelliği sınırlarda kendini göstermektedir. Yani, iyon sürüklenme hızı sıfıra yaklaşmakta ve memristör ON veya OFF durumuna ayarlıyken, harici hiçbir uyartım durumu değiştirememektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için pencere fonksiyonu (window function) yaklaşımını gündeme gelmiş ve durum denklemlerindeki bu doğrusal olmama durumu Denklem (6)'daki gibi güncellenmiştir:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mu_V \frac{R_{on}}{D^2} i(t) f(x) \tag{6}$$

Memristörün yapısal dinamiğine bağlı olarak $\mu_v Ron/D^2$ fiziksel parametresi sabit bir (k) değeri ile değiştirilmiştir. Bu durumda Denklem (6), Denklem (7)'deki forma dönüşmüştür:

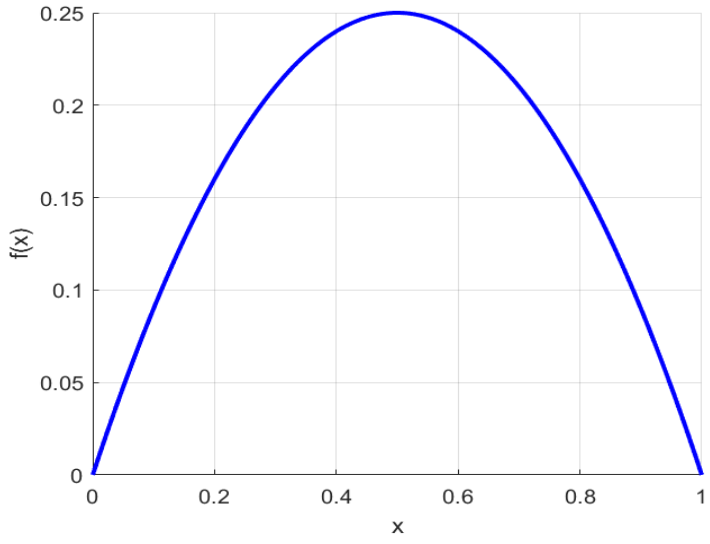
$$\frac{dx(t)}{dt} = ki(t) f(x) \tag{7}$$

Denklem (6) ve (7)'de genel olarak $f(x)$ ile tanımlanan pencere fonksiyonu için birçok farklı tanımlama literatüre sunulmuştur. Bu pencere fonksiyonlardan bazıları Tablo 2.1'deki gibi Strukov pencere fonksiyonu modeli**,** Joglekar pencere fonksiyonu modeli, Prodromakis pencere fonksiyonu modeli, Biolek pencere fonksiyonu modeli, Tukey pencere fonksiyonu modeli şeklinde sıralanabilir. $f(x)$ fonksiyonunun alacağı değer, titanyum dioksit bölgesinin $x = 0.5$ değerinde maksimuma ulaşması gerekirken; $x = 0$ ile $x = 1$ durum değerlerinde sıfır değerine düşmelidir.

2.2. Pencere fonksiyonları

Pencere fonksiyonunu ilk olarak ***Strukov*** ve diğerleri 2008 yılında HP modelinin sınır koşullarındaki davranışı ifade etmek için Denklem (8)'deki $f(x)$ pencere fonksiyonunu önermişlerdir [37]. Strukov pencereleme fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör elemanının sınır bölgelerine doğru yakınlaştıkça sınırın dönüşüm hızının doğrusal olmayacak şekilde azalarak, $x = 0$ veya $x = 1$ bölgelerinde sınır dönüşüm hızı sıfır olmaktadır. Bu durum $w = 0.5$ noktasına göre asimetrik olmayan $f(w) = w(1 - w)$ pencere fonksiyonu kullanılarak ifade edilebilmiştir. Strukov pencere fonksiyonu modeli ile ilgili problem $x = 0$ ve $x = 1$ sınır bölgeleri için dx/dt türev ifadesinin sıfıra eşit olmasıdır. $x = 0$ ve $x = 1$ sınır bölgelerinde, pencere fonksiyonu akım değerinin sıfırdan farklı olduğu durumlarda sıfır durumunda sürekli olarak takılı kalır. Akımın sürekli sıfırda kalması sınıra yapışma problemi olarak tanımlanmaktadır ve Strukov pencere fonksiyonunun temel problemidir. Bu model $x = 0$ ve $x = 1$ sınır bölgelerinde memristörün özelliği olan sıfır geçişini sağlamasına rağmen sınır değişim hızının doğrusal olmamasından ve kontrol edilememesinden dolayı yetersiz kalmaktadır. Denklem (8)'de verilen ifadenin grafiği Şekil 2.3'teki gibidir. Denklem (8) için sınır şartları $F(0) = 0$ ve $F(D) \approx 0$'dır. Bu sınır şartlarında $dw/dt = 0$ olduğu için hiçbir harici alan memristörün sınırını değiştiremez.

$$f(x) = x - x^2 \tag{8}$$

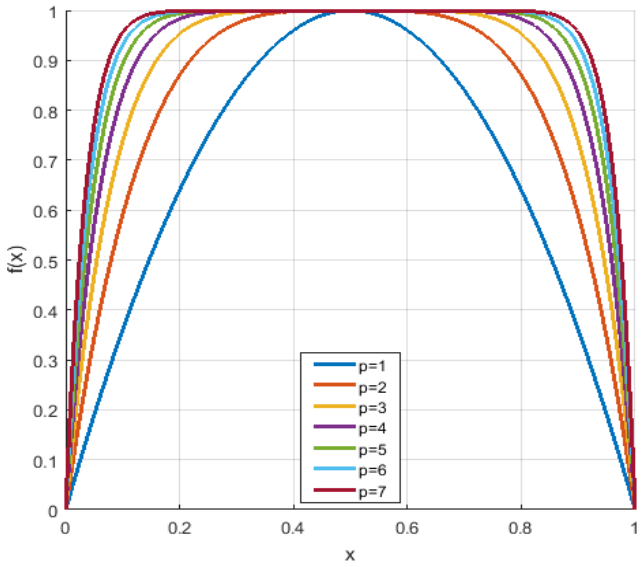


Şekil 2.3. Strukov penceresi fonksiyonunun grafiği.

Joglekar ve Wolf, 2009 yılında $0 < w < D$ olduğu zaman sınırlardaki yaklaşık lineer sürüklenme davranışını ve doğrusal olmama özelliğini ele almışlardır. Fonksiyonlarındaki doğrusal olmama özelliğini (veya doğrusallık özelliğini) kontrol parametresi ismini verdikleri ikinci bir (p) parametresi ile kontrol etmişlerdir [13]. Joglekar ve Wolf'ün önerdiği bu Denklem (9)'daki gibi ifade edilmektedir. Joglekar pencere fonksiyonu' nün $x = 0$ ve $x = 1$ sınır bölgelerinde sıfıra geçiş hızı bulunmaktadır. Joglekar pencere fonksiyonunun kullanılmasıyla sınır bölgelerinde doğrusal olmama özelliği sağlanılmaktadır ve (p) parametresi kullanılarak modelin ayarı ve kontrolü yapılabilmektedir. Joglekar pencere fonksiyon modeli Strukov pencere fonksiyonu gibi sıfır geçişinin sağlanması konusunda başarılı olmasına rağmen eğer sınır değerine ulaşılmışsa yani $x = 0$ ve $x = 1$ değerlerinde fonksiyon sıfır durumunda takılı kalır. Bu durum bu pencere fonksiyonunun temel problemidir.

$$f(x) = 1 - (2x - 1)^{2p} \tag{9}$$

(p) derecesinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun değişiminin grafiği Şekil 2.4'te verilmiştir. Joglekar modeli $f(0) = f(1) = 0$ gibi basit sınır koşullarını dikkate alır. $(p) \to \infty$ durumunda, Joglekar modeli dikdörtgen bir pencere fonksiyonuna dönüşür ve durum değişkeni fonksiyonu lineer öteleme modeline yaklaşır $(f(0 < x < 1) \approx 1)$.



Şekil 2.4. Farklı (p) değerler için Joglekar penceresi fonksiyonunun grafikleri.

Tablo 2.1. Farklı (p) değerleri için Joglekar pencere fonksiyonu.

(p)	$\mathrm{f}(x) = 1 - (2x-1)^{2\mathrm{p}}$
1	$4x(1 - x)$
2	$- 16x^4 + 32x^3 - 24x^2 + 8x$
3	$- 64x^6 + 192x^5 - 240x^4 + 160x^3 - 60x^2 + 12x$
4	$- 256x^8 + 1024x^7 - 1792x^6 + 1792x^5 - 1120x^4 + 448x^3 - 112x^2 + 16x$
5	$- 1024x^{10} + 5120x^9 - 11520x^8 + 15360x^7 - 13440x^6 + 8064x^5 - 3360x^4 + 960x^3 - 180x^2 + 20x$
6	$- 4096x^{12} + 24576x^{11} - 67584x^{10} + 112640x^9 - 126720x^8 + 101376x^7 - 59136x^6 + 25344x^5 - 7920x^4 + 1760x^3 - 264x^2 + 24x$
7	$-16384x^{14} + 114688x^{13} - 372736x^{12} + 745472x^{11} - 1025024x^{10} + 1025024x^9 - 768768x^8 + 439296x^7 - 192192x^6 + 64064x^5 - 16016x^4 + 2912x^3 - 364x^2 + 28x$

Denklem (9)'da verilen ifade de (p) parametresi pozitif tamsayıdır ve (p) derecesinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonun değişim grafiği Şekil 2.4'te verilmiştir. Joglekar modeli $f(0) = f(1) = 0$ şeklindeki basit sınır durumlarını dikkate alır. $p \to \infty$, durumunda, Joglekar modeli dikdörtgen pencere fonksiyonuna dönüşerek durum değişken fonksiyonu doğrusal sürüklenme modeline yaklaşmaktadır ($f(0 < x < 1 \approx 1)$. Bu nedenle bu modelde genellikle (p) değeri 1, 2, 3 gibi tam sayılar seçilir.

Biolek ve diğerleri bahsi geçen problemi ele almışlar ve 2009 yılında ve memristör akımına dayanan Denklem (10)'da gösterilen yeni bir pencere fonksiyonu önermişlerdir. (x) ve (p) önceki modelde bahsedilen parametrelerle aynıdır ve sadece (i) memristör akımı ilaveten bir parametre olarak eklenmiştir. Bahsedilen pencere fonksiyonları ayarlanabilir özellikte değildir. Yani fonksiyonlar maksimum değere ulaştıktan sonra ne artırılabilir ne de azaltılabilir özelliğe sahiptir. Biolek pencere fonksiyonu Joglekar ve

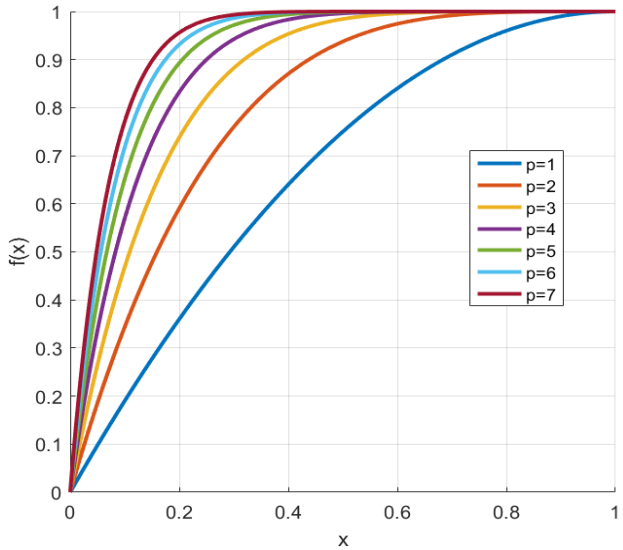
Strukov ‘da görülen $x = 0$ ve $x = 1$ sınır bölgelerinde sınıra yapışma problemini ortadan kaldırmıştır. $x = 0$ ve $x = 1$ sınır bölgelerinde görünen sınıra yapışma problemi, Biolek pencere fonksiyonunda akım yönünün bir ayar parametresi olarak kullanılmasıyla sınıra yapışma problemi ortadan kalkmıştır. Biolek pencere fonksiyonu sınıra yapışma problemini ortadan kaldırmasına rağmen sınırlarda devamlılık göstermez, yani sınırlarda sürüklenme hızının süreksizliğine neden olur. Biolek pencere fonksiyon modelinin diğer bir problemi dikey olarak maksimum genlik seviyesinin değişmesini sağlayabilecek bir ayar parametresinin bulunmamasıdır. Bu problem genliğin farklı değerleri için çıkış gerilimini sınırlandırmaktadır.

$$f(x) = 1 - (x - stp(-i))^{2p}$$
$$stp(i) = \begin{cases} 1; i \geq 0 \\ 0; i < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Farklı akım polariteleri için Biolek pencere fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f(x) = \begin{cases} 1 - (x-1)^{2p}; i(t) \leq 0 \\ 1 - x^{2p}; i(t) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

$f(x)$ fonksiyonunun akımın negatif olması durumunda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için grafiği Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Akımın negatif olduğu durumlarda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği.

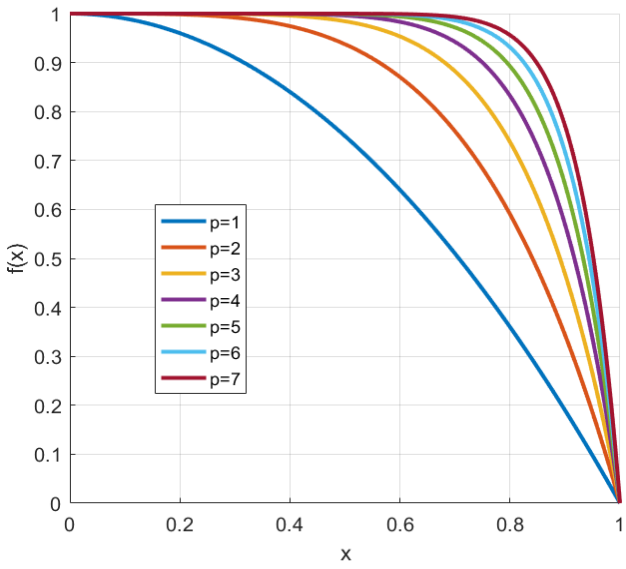
Tablo 2.2. Negatif akım değerleri için Biolek pencere fonksiyonu.

	$i(t)\leq 0$
p	$f(x)= 1-(x-1)^{2p}$
1	$2x - x^2$
2	$-x^4+4x^3-6x^2+4x$
3	$-x^6 + 6x^5 - 15x^4 + 20x^3 -15x^2+ 6x$
4	$-x^8 + 8x^7 - 28x^6 + 56x^5 - 70x^4 + 56x^3 - 28x^2 + 8x$
5	$-x^{10} + 10x^9 - 45x^8 + 120x^7 - 210x^6 + 252x^5 - 210x^4 + 120x^3 - 45x^2 + 10x$
6	$- x^{12} + 12x^{11} - 66x^{10} + 220x^9 - 495x^8 + 792x^7 - 924x^6 + 792x^5 - 495x^4 + 220x^3 - 66x^2 + 12x$
7	$- x^{14} + 14x^{13} - 91x^{12} + 364x^{11} - 1001x^{10} + 2002x^9 - 3003x^8 + 3432x^7 - 3003x^6 + 2002x^5 - 1001x^4 + 364x^3 - 91x^2 + 14x$

$f(x)$ fonksiyonunun akımın pozitif olması durumunda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için grafiği Şekil 2.6'da verilmiştir.

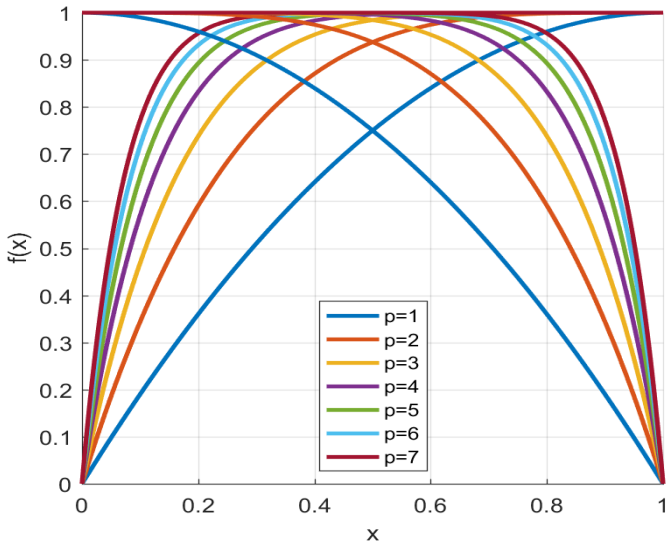
Tablo 2.3. Pozitif akım değerleri için Biolek pencere fonksiyonu.

p	1	2	3	4	5	6	7
$f(x) =1- x^{2p}$	$1- x^2$	$1- x^4$	$1- x^6$	$1- x^8$	$1- x^{10}$	$1- x^{12}$	$1- x^{14}$



Şekil 2.6. Akımın pozitif olduğu durumlarda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği.

(p) kontrol parametresinin pozitif ve negatif farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Akımın pozitif ve negatif olduğu durumlarda (p) kontrol parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği

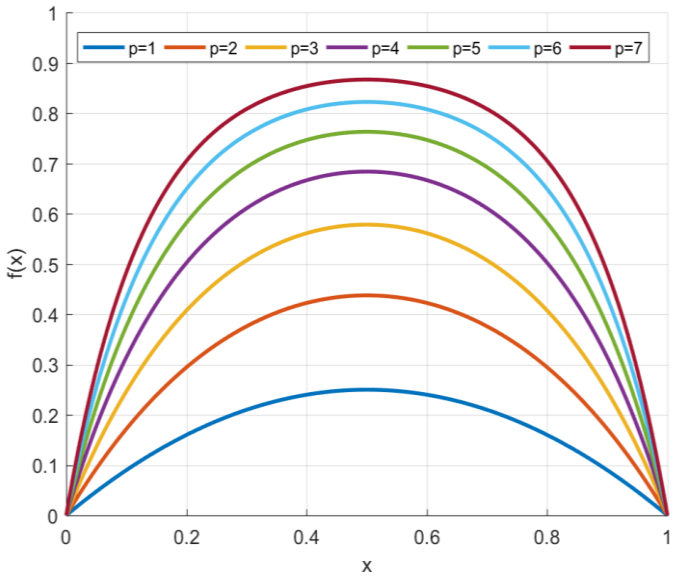
Biolek pencere fonksiyonundaki soruna bir çözüm olması açısından bir başka pencere fonksiyonu 2011 yılında ***Prodromakis*** ve diğerleri tarafından Denklem (12)'deki gibi açıklanmıştır. Prodromakis pencere fonksiyonunda (p) ve (j) olarak tanımlanan iki adet kontrol parametresi bulunmaktadır. Prodromakis pencere fonksiyonunun görünüm ayarı (p) parametresi ile düzenlenirken, Prodromakis pencere fonksiyonunun genliğinin dikey olarak (j) parametresi ayarlanabilmektedir. Prodromakis pencere fonksiyonunda ölçekleme yaparak doğrusal olmama özelliğine ve genliği dikey olarak ölçeklendirilmesine imkân tanımasına rağmen $x = 0$ ve $x = 1$ bölgelerinde Prodromakis pencere fonksiyonu $f(0) = 0$ ve $f(1) = 0$ değerlerini almaktadır, yani bu modelde de sınıra yapışma problemi bulunmaktadır.

$$f(x) = j(1 - [(x - 0.5)^2 + 0.75]^p) \qquad (12)$$

$(j = 1)$ ayar parametresinin değeri sabitlenerek, (p) parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği Şekil 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.4. $(j = 1)$ ve (p)'nin farklı değerleri için Prodromakis pencere fonksiyonu.

p	$f(x) = 1 - [(x - 0.5)^2 + 0.75]^p$
1	$x - x^2$
2	$- x^4 + 2x^3 - 3x^2 + 2x$
3	$- x^6 + 3x^5 - 6x^4 + 7x^3 - 6x^2 + 3x$
4	$- x^8 + 4x^7 - 10x^6 + 16x^5 - 19x^4 + 16x^3 - 10x^2 + 4x$
5	$- x^{10} + 5x^9 - 15x^8 + 30x^7 - 45x^6 + 51x^5 - 45x^4 + 30x^3 - 15x^2 + 5x$
6	$- x^{12} + 6x^{11} - 21x^{10} + 50x^9 - 90x^8 + 126x^7 - 141x^6 + 126x^5 - 90x^4 + 50x^3 - 21x^2 + 6x$
7	$- x^{14} + 7x^{13} - 28x^{12} + 77x^{11} - 161x^{10} + 266x^9 - 357x^8 + 393x^7 - 357x^6 + 266x^5 - 161x^4 + 77x^3 - 28x^2 + 7x$

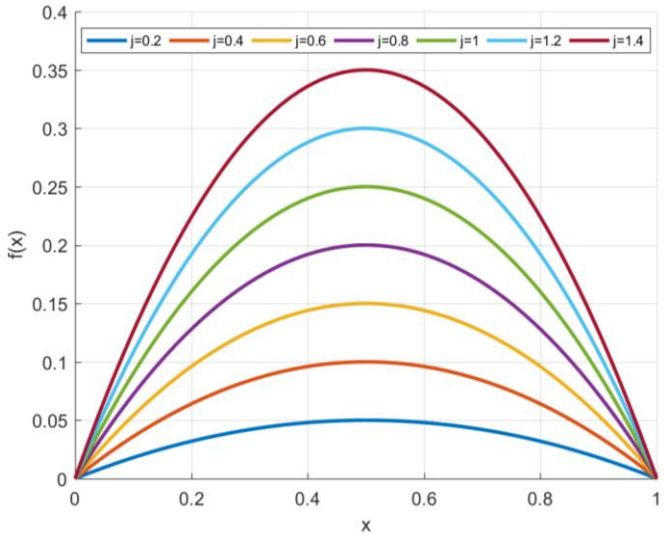


Şekil 2.8 $(j = 1)$ ve farklı (p) değerleri için Prodromakis pencere fonksiyonunun grafikleri.

$(p = 1)$ayar parametresinin değeri sabitlenerek, (j) parametresinin farklı değerleri için $f(x)$ fonksiyonunun grafiği Şekil 2.9'da verilmiştir

Tablo 2.5. $(p = 1)$ ve (j)'nin farklı değerleri için Prodromakis pencere fonksiyonu.

j	$j(x\text{-}x^2)$
0.2	$0.2(x\text{-}x^2)$
0.4	$0.4(x\text{-}x^2)$
0.6	$0.6(x\text{-}x^2)$
0.8	$0.8(x\text{-}x^2)$
1	$x\text{-}x^2$
1.2	$1.2(x\text{-}x^2)$
1.4	$1.4(x\text{-}x^2)$

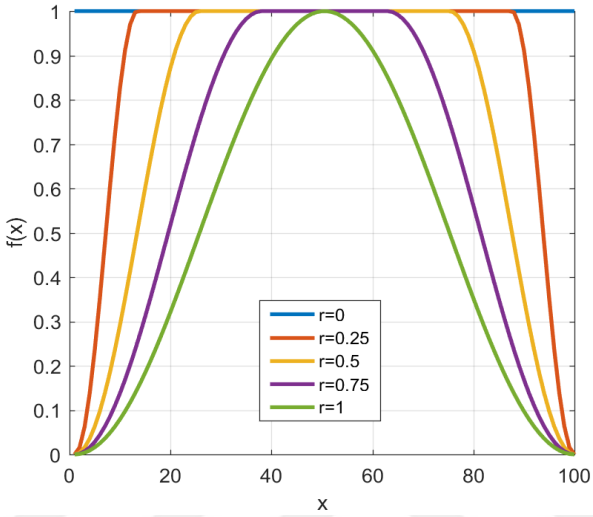


Şekil 2.9. Prodromakis pencere fonksiyonunun $(p = 1)$ ve farklı (j) değerleri için grafikleri.

Prodromakis pencere fonksiyonun avantajı; iki farklı parametre kullanarak doğrusal olmama özelliğini özellikle sınır koşullarında ihtiyaca uygun olarak modelleyebilmesidir. Sınır değişiminin daha yavaş olması istenildiğinde genlik artırılarak geometri değiştirilebilmektedir. $(j = 1)$ için, değişken (p) değerlerine göre çizilen fonksiyon grafiği Şekil 2.8'de $(p = 1)$ için, değişken (j) değerlerine göre çizilen fonksiyon grafiği ise Şekil 2.9'de gösterilmiştir.

Yasuhiro Takahashi ve arkadaşları [15], 2015 yılında doğrusal olmayan iyon sürüklenme modelinin karakteristik davranışını denklem (13)'te ***Tukey*** pencere fonksiyonu ile modellemeyi önermişlerdir. Tukey pencere fonksiyonu zaman düzleminde düzgün karakteristiktedir ve pencere zaman aralıklarının çoğunluğu için 1 (bir) değerine yakındır. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi pencere fonksiyonunun bir değerini koruduğu süreyi belirleyen uzunluk "Konik Uzunluk" olarak bilinir. Konik uzunluk Denklem (13)'teki $f(x)$ fonksiyonunun (r) parametresinin farklı değerlerine göre değişmektedir. (r) parametresine kadar düşükse, konik uzunluk bir değerinde daha fazla sabit kalmaktadır.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(1 + cos\left(\frac{2\pi}{r}\right)\left[x - \frac{r}{2}\right]\right) & ;\left(0 < x \leq \frac{r}{2}\right) \\ 1 & ;\left(\frac{r}{2} \leq x \leq 1 - \frac{r}{2}\right) \\ \frac{1}{2}\left(1 + cos\left(\frac{2\pi}{r}\right)\left[x - 1 + \frac{r}{2}\right]\right) & ;\left(1 - \frac{r}{2} < x \leq 1\right) \end{cases} \quad (13)$$

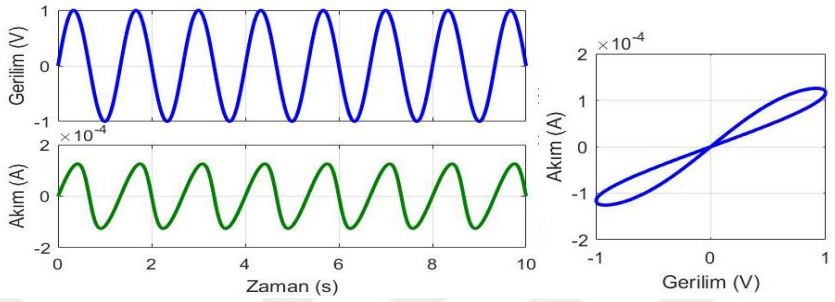


Şekil 2.10. Tukey pencere fonksiyonunun farklı r değerleri için grafikleri.

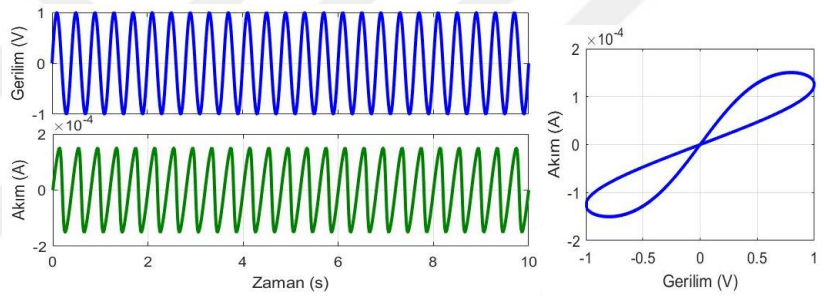
2.3. Pencere Fonksiyonları ile Tasarlanan Memristör Elemanlarının Nümerik Benzetimleri

Bu çalışmada, nümerik benzetim için Denklem (6)'daki Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin parametreleri $R_{on} = 0.1\,k\Omega$, $R_{off} = 16\,k\Omega$, $\mu_v = 30.10^{-15} m^2/(Vs)$ ve $D = 9.10^{-9}\,m$ olarak ayarlanmış ve $f(x)$ fonksiyonu yerine sırasıyla Strukov, Joglekar, Biolek, Prodromakis ve Tukey pencere fonksiyonları kullanılmıştır. Strukov pencere fonksiyonu için giriş voltajı, tepe değeri $1V$ olan bir sinüs dalgası olarak seçilmiştir. Bu giriş işaretinin frekans değeri $\omega = 0.75\,rad/s$ ayarlanmıştır. Joglekar pencere fonksiyonu için kontrol parametresi $p = 1$'e ayarlanmıştır ve giriş voltajı, tepe voltajı $1V$ ve frekansı $\omega = 2{,}5\,rad/s$ olan bir sinüs dalgası olarak seçilmiştir. Biolek pencere fonksiyonu için kontrol parametresi $(p) = 1$'e ayarlanarak, girişine tepe voltajı $1V$ ve frekansı $\omega = 2{,}5\,rad/s$ olan bir sinüs dalgası uygulanmıştır. Prodromakis pencere fonksiyonu için kontrol parametresi $p = 20$'ye ayarlanırken (j) kontrol parametresi bire ayarlanmıştır ve girişine tepe voltajı $1V$ ve frekansı $\omega = 2{,}5\,rad/s$ olan bir sinüs dalgası uygulanmıştır. Tukey pencere fonksiyonu için (r) parametresi bir) ayarlanarak giriş voltajı, tepe değeri $1V$ ve frekans değeri $\omega =$

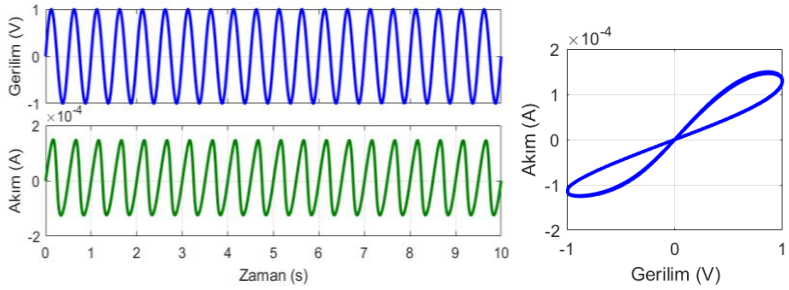
2,5 rad/s olan bir sinüs dalgası olarak seçilmiştir. Pencere fonksiyonları kullanılarak oluşturulan bu memristör elemanlarının girişine genlik ve frekans değerleri verilen sinüzoidal giriş işaretlerinin ayrı ayrı uygulanması ile elde edilen nümerik benzetim sonuçları Şekil 2.11'de verilmiştir.



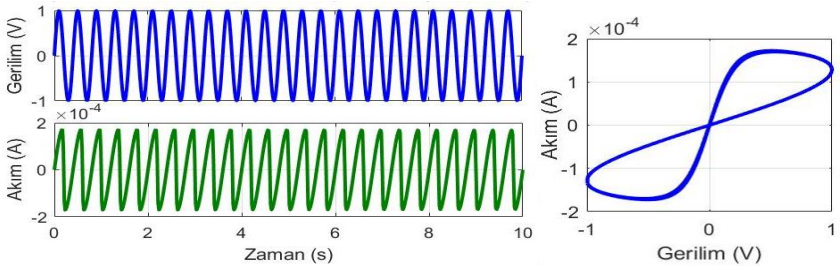
a)



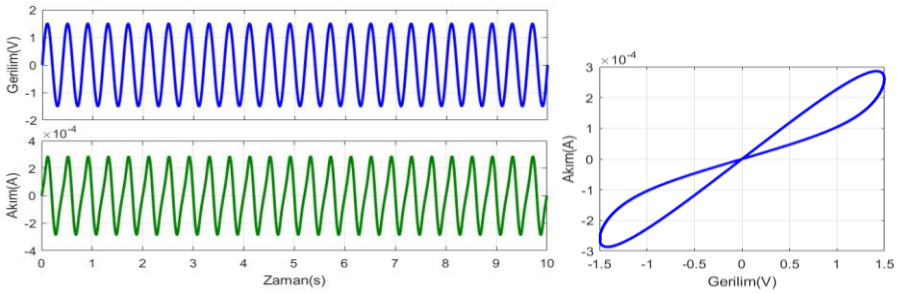
b)



c)



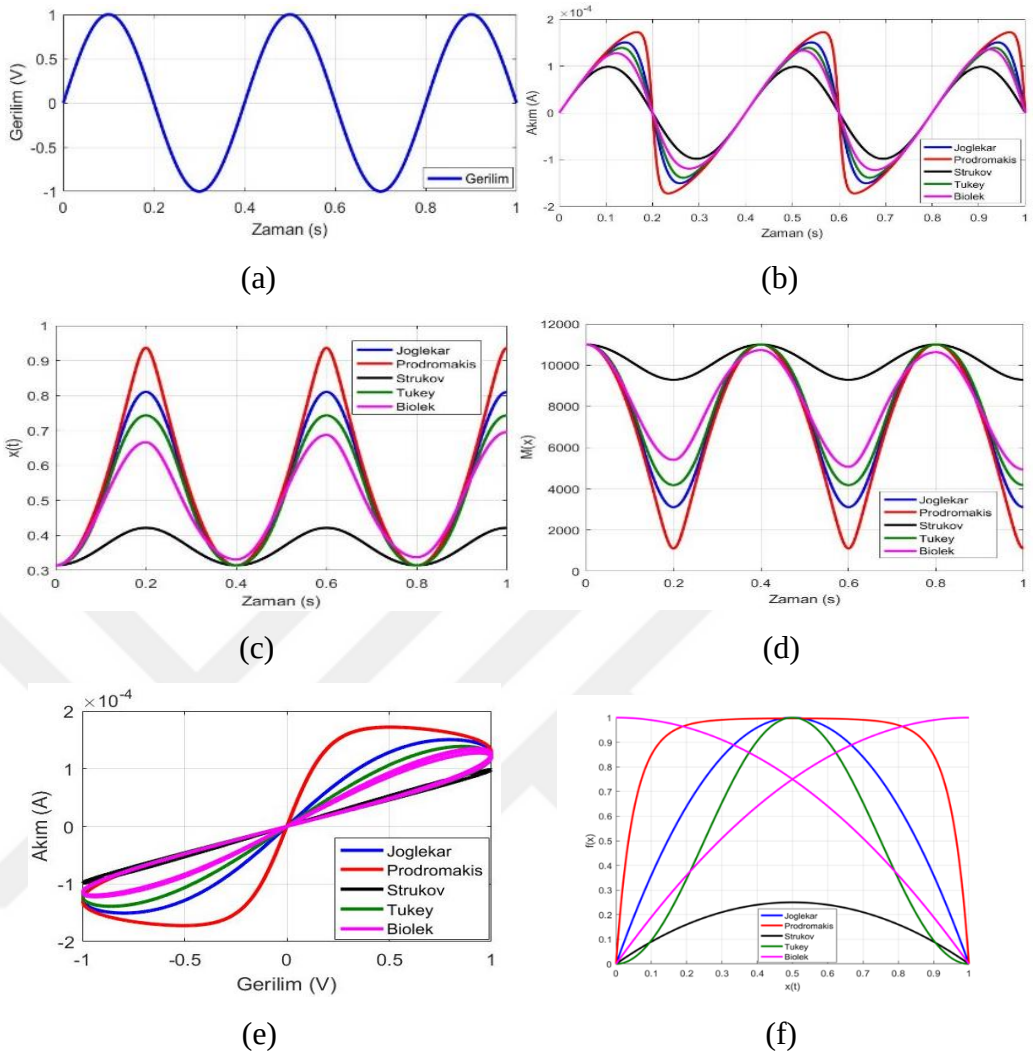
d)



e)

Şekil 2.11. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının Matlab tabanlı gerçekleştirim sonuçların zaman domeni gösterimleri ve faz portresi gösterimleri a) Strukov, b) Joglekar, c) Biolek, d) Prodromakis, e) Tukey.

Aşağıdaki şekillerde Strukov, Joglekar, Biolek, Prodromakis ve Tukey pencere fonksiyonlarının kullanıldığı beş memristör modelinin aynı değerdeki giriş işaretine karşı sergilediği cevaplar karşılaştırma amaçlı bir arada sunulmaktadır. Burada, Joglekar için $p = 1$ kontrol parametresi kullanılırken, Prodromakis pencere işlevi için $p = 20$ seçilmiştir. Strukov için kontrol parametresi yoktur ve Tukey için $r = 1$ değeri kullanılmıştır. Girişe uygulanan kaynak gerilimi sinüs biçimli $V(t) = V_0 \sin(2\pi\omega t)$ işaretidir. Burada $V_0 = 1V$ işareti genliğidir ve $\omega = 2{,}5\ rad/s$ işaretin frekansıdır. Şekil 2.12'de aynı başlangıç koşullarında ve özdeş giriş kaynağı Şekil 2.12a için Strukov, Joglekar, Biolek, Prodromakis ve Tukey pencere fonksiyonlarının Şekil 2.12b çıkıtça ölçülen akım değeri, Şekil 2.12c memristör katkılama bölgesi oranlarının ölçeklemesini ifade eden (x) parametresi çıkışları, Şekil 2.12d memristans ölçümleri ve Şekil 1.12e karakteristik histerezis eğrilerinin karşılaştırmaları görülmektedir.



Şekil 2.12. Tasarlanan memristör elemanının pencere fonksiyonları ile karşılaştırılması. a) Gerilim-Zaman, b) Akım-Zaman, c) $x(t)$ - Zaman, d) $M(x)$ - Zaman, e) Akım-Gerilim, f) $f(x) - x(t)$.

Şekil 2.12f'de farklı pencere fonksiyonlarının, Strukov, Joglekar, Biolek, Prodromakis ve Tukey'nin pencere fonksiyonunun karşılaştırmasını göstermektedir ve Tablo 2.6, memristörün bu farklı pencere fonksiyonları arasındaki bir karşılaştırmayı özetlemektedir.

Tablo 2.6. Tasarlanan memristör elemanının pencere fonksiyonları ile karşılaştırılması [15, 38].

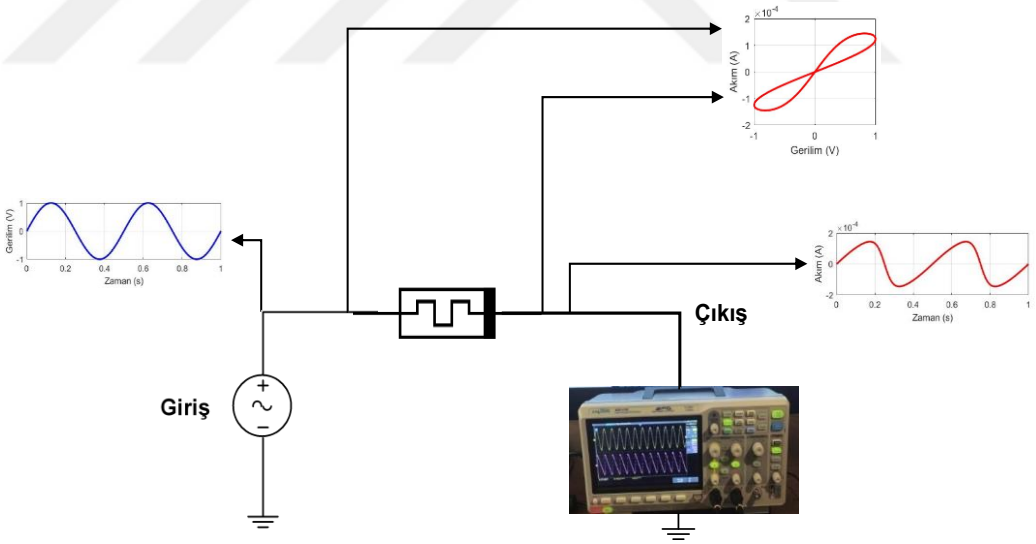
Pencere fonksiyonları	Strukov	Biolek	Joglekar	Prodromakis	Tukey
Simetri	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
Sınır etkisini çözümü	Evet	Süreksiz	Evet	Evet	Evet
Doğrusal olmayan sürüklenme uygular	Evet	Evet	Evet	Evet	Evet
Doğrusal katkılı sürüklenme modeliyle bağlantı	Hayır	Evet	Evet	Evet	Evet
Kontrol parametresi	Yok	Var	Var	Var	Var
Ölçek faktörü ($\mathbf{0} \leq \boldsymbol{fmax}(\boldsymbol{x}) \leq \mathbf{1}$)	Hayır	Sınırlı	Hayır	Evet	Evet

3. BÖLÜM
PENCERE FONKSİYON İLE TASARLANAN MEMRİSTÖR ELEMANININ ANALOG VE DİJİTAL TABANLI GERÇEKLEŞTİRİMİ

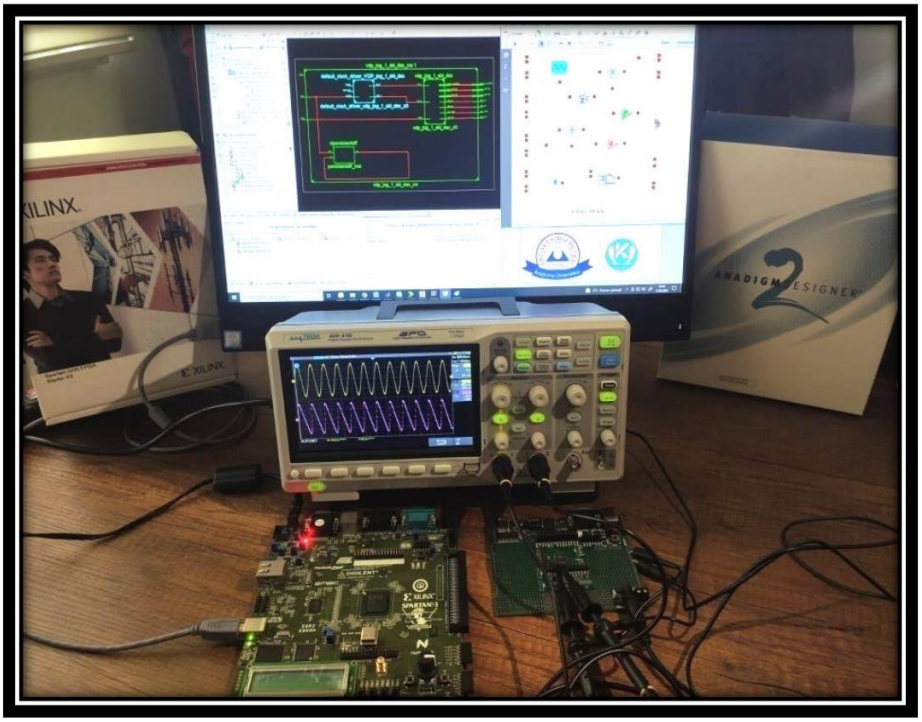
Son yıllarda benzetim araçlarının sunduğu basitliğe benzer şekilde hassas parametre ayarı yapabilmeye imkân sağlama, ayrık donanımlarla yapılan gerçekleştirimlerle elde edilen gerçek zamanlı elektriksel işaretleri ölçmeye benzer şekilde ise deneysel çıktılar elde edebilme özellikleri ile programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog ya da dijital elemanlar oldukça dikkat çekmektedir. Öyle ki, son yıllarda farklı doğrusal olmayan fonksiyonlarla karakterize edilen sistemlerin elektronik donanımlarla gerçekleştirimlerinde alternatif çözümler sunan programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir elemanların kullanımına yönelik pek çok farklı çalışma literatüre kaydedilmiştir. Bu kapsamda literatürde memristör elemanının kullanıldığı tasarımların test edilmesi ve doğrulanması için farklı taklit devrelerinin kullanımı yerine, analog veya dijital programlanabilir donanım platformlarının tercih edildiği çalışmalar mevcuttur. Tahir ve Saif [39], akı kontrollü memristör modelini nümerik olarak simüle ettikten sonra, modelin donanım gerçekleştirimini bir alan programlanabilir analog dizi (FPAA) kullanılarak yapmışlardır. Arık ve Kılıç [40], memristör tabanlı kaotik sistemlerin deneysel olarak test edilmesi ve doğrulanması için bir alan programlanabilir analog dizi (FPAA) elemanını kullanmışlardır. Ioannis Vourkas ve arkadaşları voltaj kontrollü eşik tipi memristör modeline dayanan ilk dijital memristör taklit devresini geliştirmiştir [41]. G.M. Tornez-Xavier ve arkadaşları, doğrusal olmayan dopant memristör modelini temel alan üç pencere fonksiyonu için hibrit bir System Generator tasarımı yaparak sistemin FPGA tabanlı gerçekleştirim sonuçlarını sunmuşlardır [42]. Tolba ve arkadaşları [28], ayrık memristör model (Discrete memristor Model-DMM) ve sürekli memristör model

(Continuous Memristor Model-CMM) için FPGA tabanlı bir uygulama önermişlerdir [43]. Farooq ve arkadaşları [44], daha sonra tam hibrit heterojen bir FPGA mimarisi oluşturmak üzere birleştirilen heterojen ada tarzı FPGA'nın temel ve karmaşık memristör-transistör hibrit yapı taşlarını tasarladı. Alombah ve arkadaşları [45] tarafından, Muthuswamy [46] tarafından 2010 yılında önerilen ve üç adet adi diferansiyel denklem ile modellenen iki bileşenli ve ikinci dereceden tanımlı bir memristör modeli sunulmuştur. Modelin nümerik analizleri MATLAB^{TM} programı kullanılarak yapılmış ve donanım doğrulaması içinse FPGA donanımı kullanılmıştır.

Aşağıdaki Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de, bir memristörün deneysel olarak gerçekleştirilmesini göstermektedir. memristörün girişinde değişken frekanslı bir AC güç kaynağı kullanılır ve çıkışta akım ölçülebilir. Deneysel ölçümler dijital osiloskop ile kaydedildi. Bu memristör elemanının karakteristik histerezis eğrisi, faz portre gösterimi ile deneysel olarak elde edilmiş ve bu gösterim, giriş sinüzoidal sinyali $v(t)$ 'nin çıkış akımı $i(t)$ 'ye karşı ölçülmesiyle oluşturulmuştur.



Şekil 3.1. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının deneysel platformu.

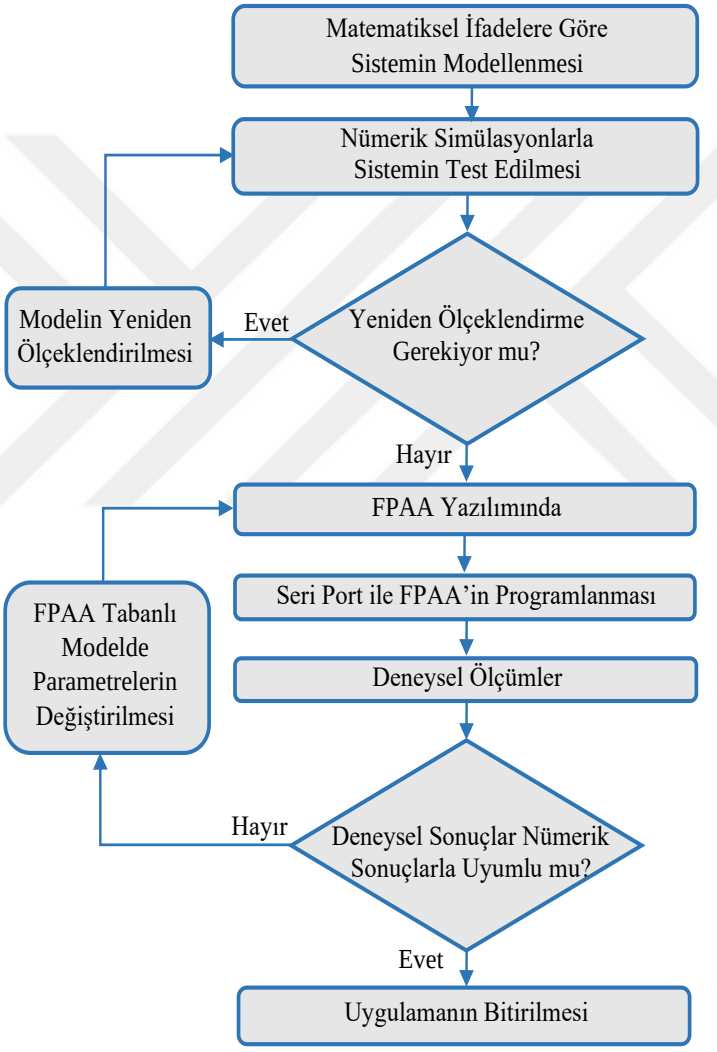


Şekil 3.2. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA ve FPGA tabanlı gerçeklemelerinin deneysel kurulumu.

3.1. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirimi

Alan programlanabilir analog diziler (Field Programmable Analog Array-FPAA); analog ve hibrit devrelerin tasarımında kararlılık, doğruluk ve hızlı prototip teknikleri sunan, temel analog işlemleri içeren ve farklı analog fonksiyonları gerçekleştirmek için elektriksel olarak yeniden programlanabilen tümdevrelerdir. FPAA elemanı giriş çıkış portlarından, lojik kontrol biriminden ve elemanın hafızasını belirleyen ve yapılandırılabilir analog bloklardan (Configurable Analog Blocks- CAB) meydana gelir. Bir FPAA bordunun hafızasının yetmediği tasarımlarda FPAA bordları birleştirilebilir [47]. Analog işlemler CAB blokları içerisinde gerçekleşir ve bu işlemler için anahtarlamalı Kapasitör tekniği kullanılmaktadır. FPAA üzerinde gerçeklenmek istenen sistem, öncelikle nümerik analizlerle test edilmelidir. Bunun sebebi, FPAA elemanı $\pm 2V$ satürasyon seviyesine sahiptir. Satürasyon seviyesini aşan parametrelere yeniden ölçeklendirme işlemi uygulanır. Ölçeklendirme işleminden sonra modeldeki fonksiyonlara karşılık gelen uygun yapılandırılabilir analog modül (Configurable Analog

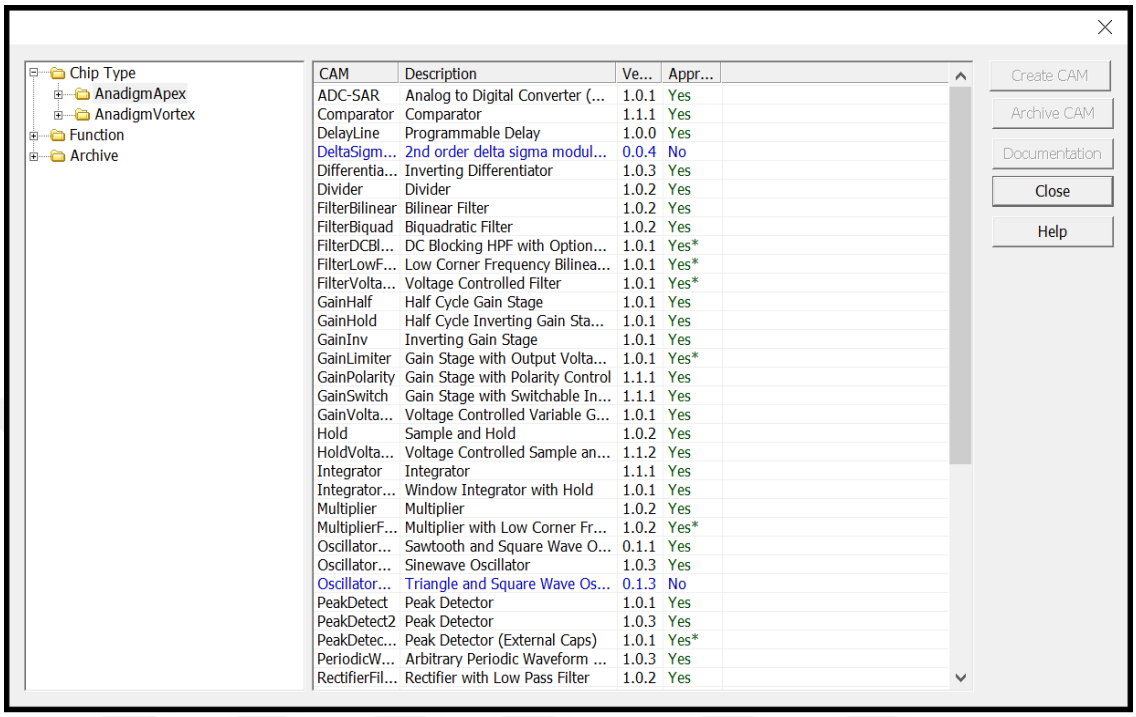
Module-CAM) blokları belirlenir. Bu bloklar arasındaki ara bağlantılar arayüz programı üzerinde oluşturulur. Modellenen sistem bir seri port aracılığı ile FPAA borduna gönderilir. Bord üzerinde bulunan giriş çıkış birimlerinden yararlanılarak, osiloskop yardımı ile gerekli ölçümler yapılır. Elde edilen sonuçlar nümerik simülasyonlarla karşılaştırılır. Sonuçlar uyuşuyorsa işlem sonlandırılır, aksi durumda sistem davranışını etkileyen parametreler üzerinde küçük değişiklikler yapılarak doğru cevap elde edilmeye çalışılır. Şekil 3.3'te bu süreci özetleyen bir akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.3. FPAA'ya dayalı tasarım akış diyagramı.

Bu çalışmada Anadigm firmasının ürettiği AN231E04 platformu kullanılmıştır. Anadigm firmasının ürettiği bordları programlayabilmek için Anadigm Designer2 programı kullanılmaktadır. Bu programda analog fonksiyonları gerçekleştirmek için önceden

tanımlı CAM blokları mevcuttur. Bu blokların listesini içeren Anadigm Designer2 programından bir görüntü Şekil 3.4'te verilmektedir.



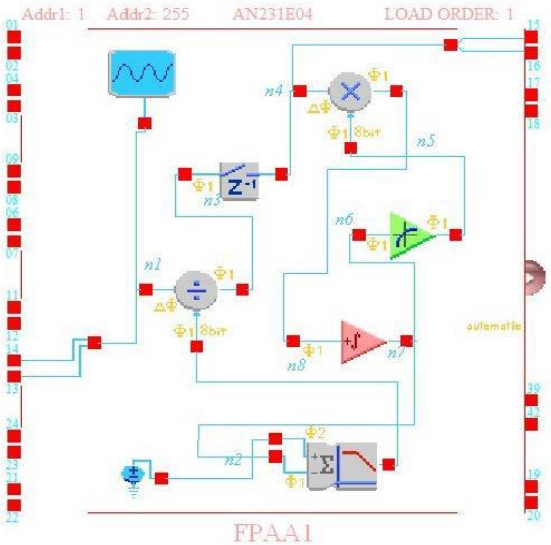
Şekil 3.4. Anadigm Designer 2 yazılımında kullanılan CAM bloklarının listesi.

Pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının FPAA tabanlı gerçekleştirimi için kullanılan CAM blokları ve bloklar arasındaki bağlantılar Şekil 2.5'te görülmektedir. Burada SUMFILTER, TRANSFER FUNCTION, VOLTAGE, MULTIPLIER, DIVIDER, INTEGRATOR, HOLD, OSCILLATOR CAM blokları kullanılmıştır. Pencere fonksiyonları modelleri her biri için uygulanan giriş işaretinin uygulandığı nümerik simülasyonunda memristörün memristans değerinin satürasyon seviyesini aştığı görülmektedir. Bu sebeple FPAA tabanlı gerçekleştirim için denklem yeniden ölçeklendirilmelidir. Bu nedenle ilgili model yeniden skalalandırılmış ve sonuç olarak Denklem (14)'teki yeniden ölçeklendirilmiş tanımlama elde edilmiştir ve giriş işareti olarak $1.5V$ genliğinde ve $850Hz$ frekansında sinüzoidal bir giriş işareti kullanılmıştır.

$$v(t) = M(x)i(t)$$
$$M(x) = 0{,}00625x + (1 - x) \quad (14)$$
$$\frac{dx(t)}{dt} = 2{,}47i(t)f(x)$$

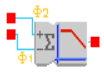
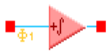
Burada SUMFILTER, TRANSFER FUNCTION, VOLTAGE, MULTIPLIER, DIVIDER, INTEGRATOR, HOLD, OSCILLATOR olarak isimlendirilen CAM blokları kullanılmıştır. TRANSFER FUNCTION bloğu kullanılarak $f(x)$ pencere fonksiyonu elde edilmiştir. Memristans fonksiyonu, SUMFILTER bloğu kullanılarak oluşturulmuştur. $dx(t)/dt = 2.47i(t)f(x)$ fonksiyonu ile tanımlanan katkılı bölge ile katkısız bölge arasındaki sınır hızı MULTIPLIER bloğu ile oluşturulmuştur.

Akımı $i(t) = v(t)/M(x)$ tanımlaması ile elde etmek için bir DIVIDER bloğu kullanılmıştır. Bir OSCILATOR bloğu kullanılarak $v(t)$ sinüzoidal giriş işareti gerçeklenmiştir. Diferansiyel denklemin çözümü için gerekli olan integral işlemi INTEGRATOR bloğu ile gerçekleştirilmiştir. HOLD bloğu, MULTIPLIER ve DIVIDER blokları arasındaki faz durumunu düzenlemek için kullanılmıştır. Son olarak sabit parametreler, bir DC gerilim kaynağı olan VOLTAGE bloğu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te verilen pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştiriminde kullanılan bloklar görülmektedir. Bu blokların parametre değerleri Tablo 3.1'de özetlenmektedir.

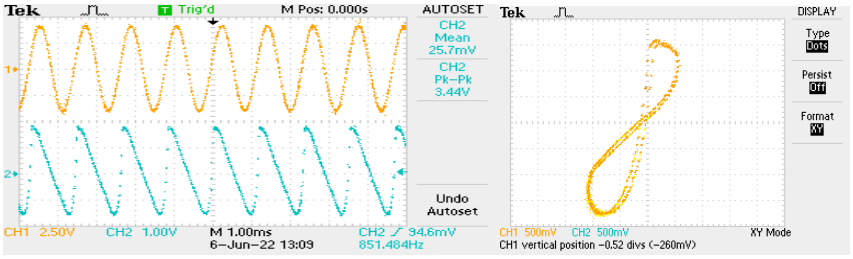


Şekil 3.5. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA gerçekleştirim şeması.

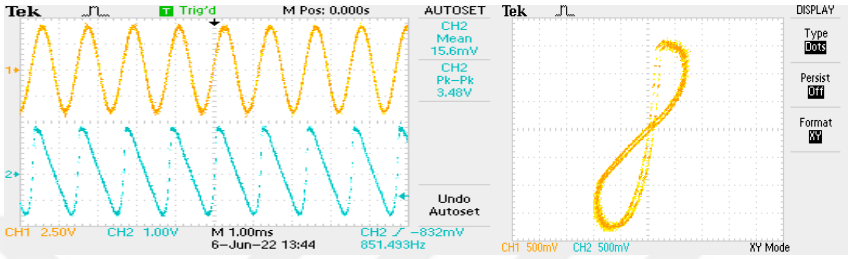
Tablo 3.1. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı uygulamasının tasarımında kullanılan CAM'lerin listesi.

Blok adı	Seçenekler	Parametreler	Açıklamalar
SumFilter 	Çıkış Değişiklikleri: Faz 1 Giriş 1: Evirmeyen Giriş 2: Eviren Giriş 3: Kapalı	Köşe Frekansı: 0.35 kHz Kazanç 1: 1.07 Kazanç 2: 1	Bu CAM, üç girişe kadar matematiksel toplama işlemini karşılamaktadır.
Integrator 	Polarite (Kutupluk): Evirmeyen Girdi Örneklemesi: Faz 1 Kontrol Karşılaştırması: Sıfırlama Yok	İntegral Alma Sabiti: [1/us]:0.05	Bu CAM, programlanabilir integral sabitine sahip bir integral alıcı bloğudur.
Divider 	Örnekle ve Bekletme: Kapalı	Bölme Sabiti: 0.34	Bu CAM matematiksel bölme işlemini karşılamaktadır.
Multiplier 	Örnekle ve Bekletme: Kapalı	Çarpım Sabiti: 0.34	Bu CAM matematiksel çarpma işlemini karşılamaktadır.
Hold 	Girdi Örneklemesi: Faz 1		Bu CAM bir örnek oluşturur ve tutar.
Transfer Function 	Çıkışı Bekletme: Kapalı		Bu CAM, 256 niceleme adımıyla kullanıcı tarafından belirlenen bir voltaj aktarım işlevi uygular.
Oscillator Sine 		Osilasyon Frekansı [kHz]: 0.8 Tepe genliği [V]: 1.5	Bu CAM, sinüzoidal bir çıkış oluşturur. Bu oluşturulan sinyal programlanabilir genlik ve frekansa sahiptir.
Voltage 	Polarite (Kutupluk): +2V		Bu CAM, tasarımda ihtiyaç duyulan sabit katsayıları karşılamak için kullanılmaktadır.

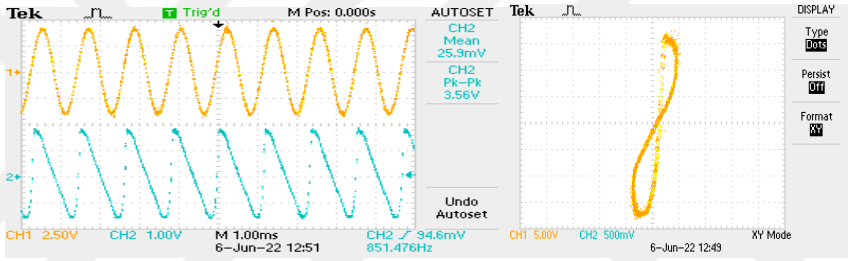
Arayüz programı ile modellenen çeşitli pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısı seri port ile herhangi bir dönüşüme ihtiyaç duymadan doğrudan AN231E04 kartına gömülmüştür.



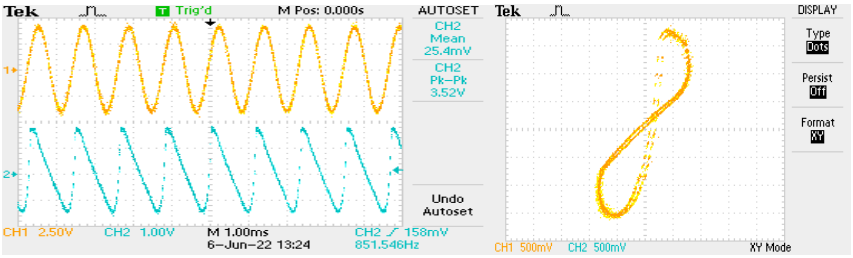
a)



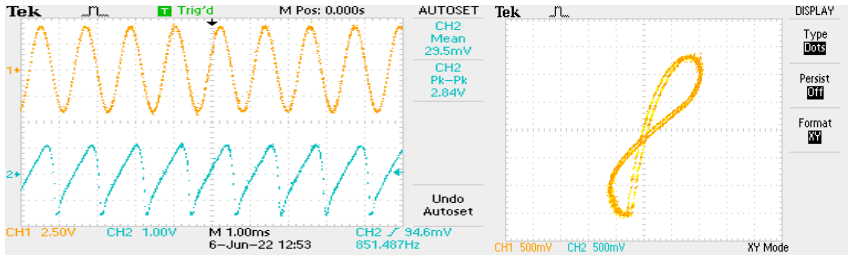
b)



c)



d)



e)

Şekil 3.6. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirim sonuçların zaman domeni gösterimleri ve faz portresi gösterimleri a) Strukov, b) Joglekar, c) Biolek, d) Prodromakis, e) Tukey.

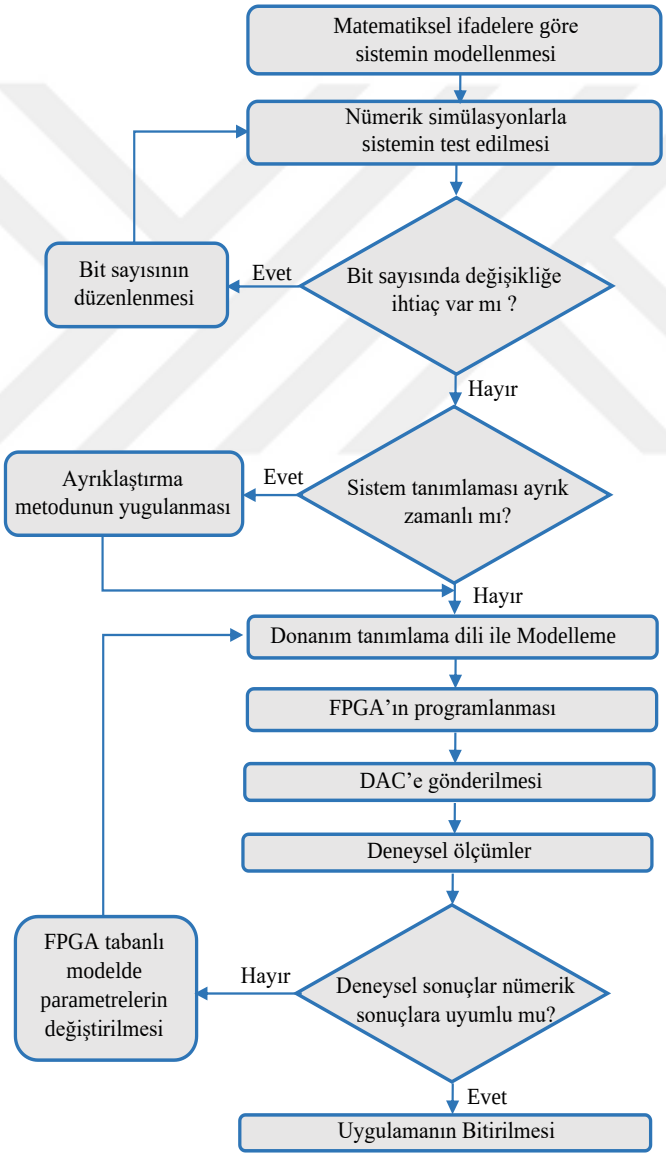
Ardından bir osiloskop ile deneysel ölçümler yapılmıştır. Şekil 3.6a'da pencere fonksiyonu memristör modelinin girişine uygulanan $v(t)$ sinüzoidal işareti (üstteki) ile çıkışta ölçülen akım değeri (alttaki) $i(t)$'nin zaman domeni gösterimleri görülmektedir. Şekil 3.6b'de ise girişe uygulanan $v(t)$ sinüzoidal işarete karşılık çıkışta ölçülen $i(t)$ akımının oluşturduğu faz portresi gösterimi ile gözlemlenen histerezis eğrisi deneysel olarak elde edilmiştir. Böylece, çeşitli pencere fonksiyonu memristör modeli FPAA platformu ile başarılı bir şekilde gerçeklenmiştir. FPAA tabanlı elde edilen gerçekleştirim sonuçları ile nümerik benzetim sonuçları birbirleriyle oldukça uyumludur.

3.2. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPGA tabanlı gerçekleştirimi

Memristör elemanının dijital sistemlerde ele alındığı en önemli uygulamaları iki temel kategoriye ayrılmaktadır: dijital bellekler (binary) ve yapılandırılabilir ve programlanabilir dijital mantık devreleri ile gerçekleştirimleri. Dijital bellek uygulamalarında memristör elemanı girişine uygulanan işaret ile iki seviyeli bir direnç gibi ayarlanarak bir anahtar görevi gören bir elektronik donanımdır. Burada iki direnç seviyesine mantık '0' ve mantık '1' değerleri atanırsa, memristör 1-bit depolayabilen bellek hücresi haline gelir ve Boole fonksiyonunun iki olası sonucundan birini temsil eder [48]. Memristörlerin elemanının farklı sistemlerde kullanımının ve etkinliğinin araştırıldığı, bu etkinliğin ispatı için de dijital yeniden programlanabilir mantık devrelerinin kullanıldığı araştırmalar ise diğer uygulama alanıdır ve bu uygulamalarda FPGA elemanı sıklıkla kullanılmaktadır.

Alan programlanabilir kapı dizileri (Field Programmable Gate Array-FPGA), programlanabilen mantık blokları ve bu bloklar arasındaki ara bağlantılardan oluşan, yeniden yapılandırılabilme özelliğine sahip dijital bir elektronik platformdur. Standart işlemcili sistemlerin aksine, tamamen paralel bir şekilde çalışan sayısal tüm devrelerdir. Programlanabilir giriş çıkış birimleri, programlanabilir ara bağlantılar, saat kanalları, PLL, hafıza birimi, çarpıcılar ve programlanabilir lojik bloklar gibi birleşenleri içermektedir. FPGA'ler tasarım sırasında belirli işlemleri yapan fonksiyonları gerçekleştirmek için bir yazılım dili ve birimler arasındaki ara bağlantıları düzenlemek içinse FPAA'lere benzer şekilde üretici firma tarafından önerilen yazılım geliştirme programı kullanırlar. FPGA üzerinde yapılan tasarımlarda, ayrık zamanlı

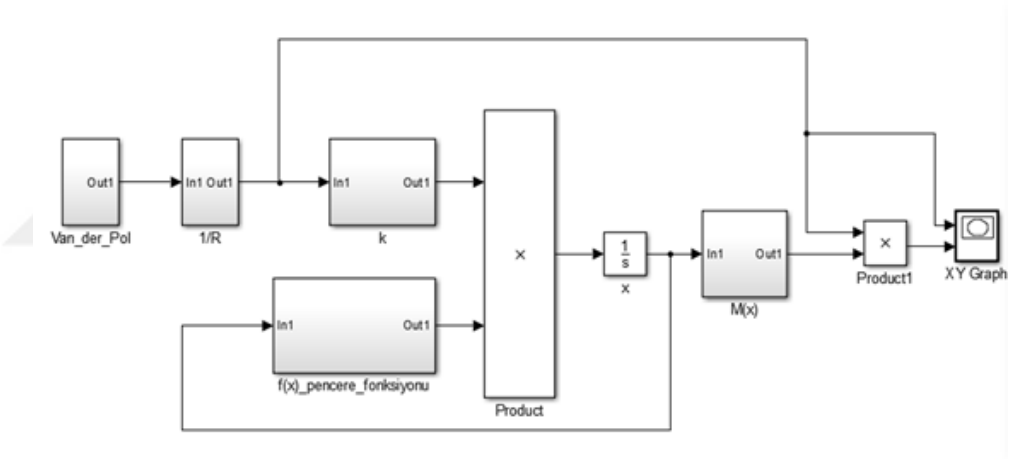
tanımlamalardan yararlanılır. FPGA tabanlı gerçeklenmek istenen sistem sürekli zamanda tanımlı ise çeşitli ayrıklaştırma metotları ile ayrık zamanlı hale dönüştürülür ve nümerik simülasyonlarla dönüşümün doğruluğu test edilir. Ayrık zamanlı hale dönüştürülen sistem donanım tanımlama dilleri kullanılarak, uygun bir arayüz programı ile modellenip FPGA borduna yollanır. FPGA elemanının çıkışları da sayısaldır. Bu sebeple bir dijital analog çevirici (DAC) kullanılarak çıkışlar analog hale getirilir. Elde edilen deneysel sonuçlar DAC bloğunun çıkışından osiloskop yardımı ile ölçülebilir. Şekil 3.7'te bu süreci özetleyen bir akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.7. FPGA'ya dayalı tasarım akış diyagramı.

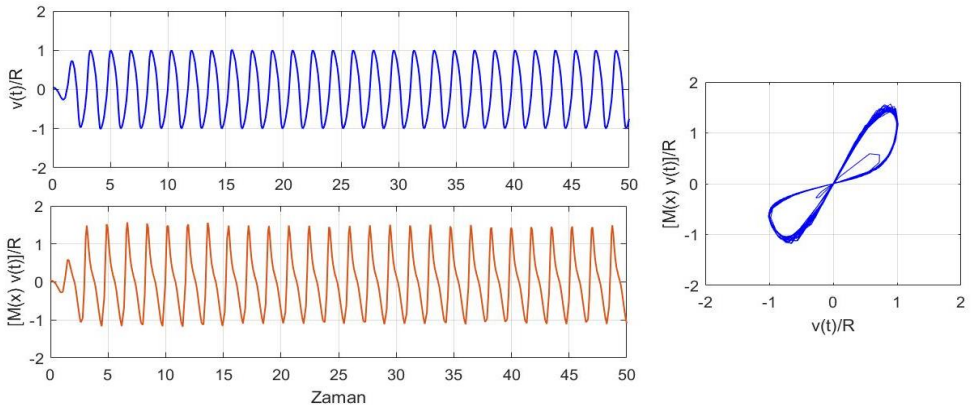
Bu tez çalışmasında XILINX™ firmasının ürettiği Spartan-3AN FPGA platformu kullanılmıştır. Bu kartın programlanması ise XILINX™ firması tarafından geliştirilen ve

MATLAB-SIMULINK™'de tasarlanan modelden XILINX™ IP Core koduna doğrudan dönüşüme imkân sağlayan System Generator DSP için (SG_{DSP}) programı kullanılmıştır [49]. Tasarımlarda Q(32,18) "fixed-point" tanımlamadan yararlanılmıştır. Sürekli zamanda tanımlı olan memristör yapıları Euler ayrıklaştırma yöntemi kullanılarak Denklem (14)'teki gibi düzenlenmiştir. Denklem (14)'te yer alan $f(x)$ fonksiyonu yerine sırasıyla Denklem (9)'daki Joglekar pencere fonksiyonu ve Denklem (11)'deki Prodromakis pencere fonksiyonu adapte edilerek FPGA tabanlı gerçekleştirimler yapılmıştır. Pencere fonksiyonlar ile modellenen memristör elemanının MATLAB SIMULINK™ programı üzerinden tasarlanmış sistem Şekil 3.8' de verilmiştir. Nümerik simülasyon için $R_{on} = 0.1\,k\Omega$, $R_{off} = 16\,k\Omega$, $\mu_v = 30.10^{-15}\,m^2/(Vs)$ ve $D = 9.10^{-9}m$ olarak kullanılmıştır.

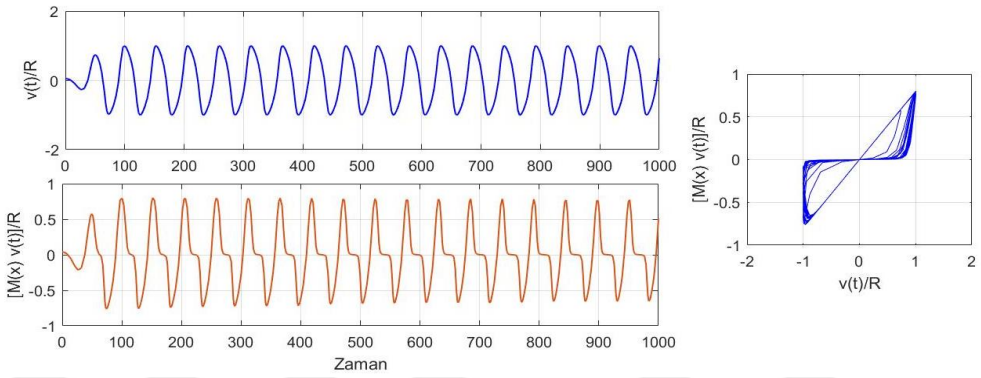


Şekil 3.8. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının MATLAB-SIMULINK™ ortamında tasarlanmış modeli.

İhtiyaç duyulan sinüzoidal işaret üreteci olarak voltajı tepe değeri $1V$ ve frekans değeri $\omega = 1{,}25\,rad/s$ olan Van der Pol osilatörü kullanılmıştır. Joglekar ve Prodromakis pencere fonksiyonunun zaman domeninde ve faz domenindeki simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 3.9a ve Şekil 3.9b'de verilmiş ve simetrik bir histerezis eğrisi gözlemlenmiştir.



a)



b)

Şekil 3.9. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının giriş gerilimi/çıkış akımı dalga biçimleri; a) Joglekar ve b) Prodromakis.

$$v(t) = M(x)i(t) = M(x)\frac{v_{source(t)}}{R_{source}}$$

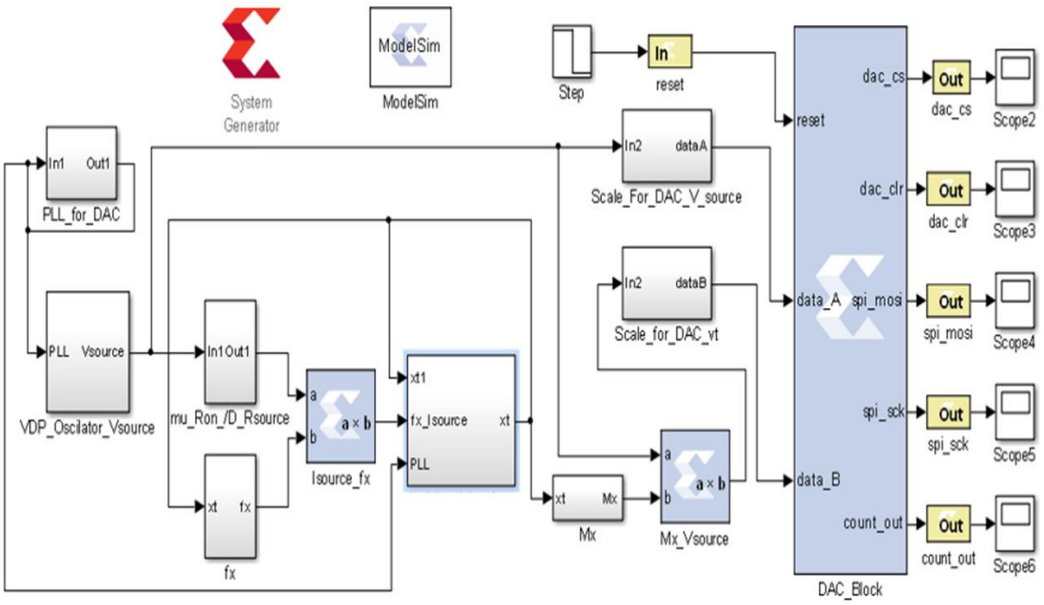
$$M(x) = R_{ON}x + R_{OFF}(1-x) = 100x + 16000(1-x)$$

$$x(t+1) = [\mu_V \frac{R_{on}}{D^2} i(t) f(x)]\Delta h + x(t) \tag{15}$$

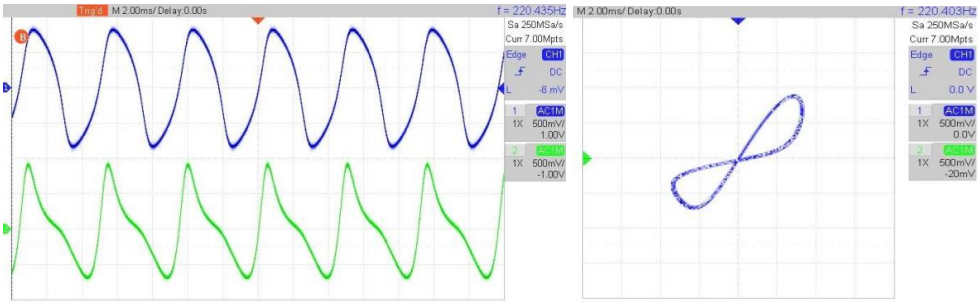
$$= [\frac{30 \times 10^{-15} \times 100}{(9 \times 10^{-9})^2} \frac{v_{source(t)}}{R_{source}} f(x)]0.001 + x(t)$$

Denklem (15)'teki parametrelerin değerleri, önceki bölümlerde sunulan nümerik benzetim çalışmalarında kullanılan değerlerle aynı seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan FPGA platformunda $i(t) = v(t)/M(x)$ ifadesinin gerçekleştirilmesi için ihtiyaç duyulan bölücü bloğuna sahip değildir. Bu eksikliği gidermek için pencere fonksiyonları tabanlı

memristör elemanının girişine uygulanacak bir akım kaynağı $i(t) = \frac{v_{source(t)}}{R_{source}}$) şeklinde tasarlanmış ve böylece $v(t) = i(t)M(x)$ ifadesi gerçekleştirilebilmiştir. Bu akım kaynağı i(t) şu şekilde elde edilmiştir: İlk olarak $\omega = 1.25\ rad/s$ salınım frekansına sahip bir Van Der Pol osilatörü tasarlanmış ve bu osilatörün çıkış gerilimi bir direnç üzerinden geçirilerek akım sinyaline dönüştürülmüştür. Burada R_{source} direncinin değeri $20k\Omega$'dur. Daha sonra bu akım kaynağı memristör girişine uygulanarak memristör elemanının çıkışında voltaj ölçümü kaydedilmiştir. Aslında karakteristik memristör histerezis eğrisini gözlemlemek için $v_{source}(t)$ - $v(t)$ ölçümü kullanılmıştır. Denklem (14)'teki pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanının FPGA tabanlı gerçekleştirimi için SG_{DSP} aracında tasarlanan şema Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bu tasarım SG_{DSP} aracı aracılığıyla VHDL'ye dönüştürülmüş ve son IP çekirdekleri Spartan-3AN FPGA platformuna gömülmüştür.

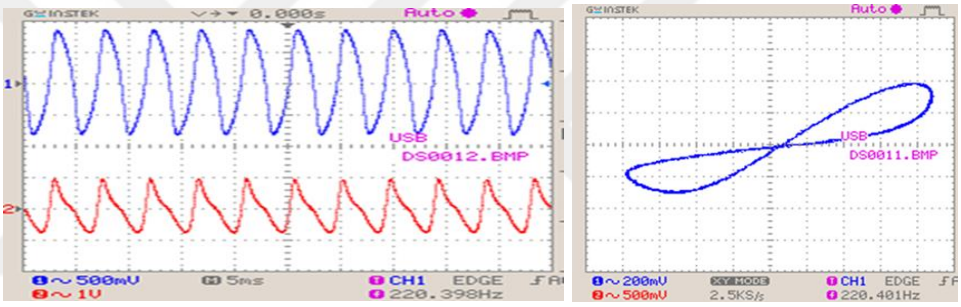


Şekil 3.10. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının SG_{DSP} tabanlı tasarım şeması.



(a) (b)

Şekil 3.11. Joglekar pencere fonksiyonu tabanlı memristör modelinin FPGA tabanlı deneysel gerçekleştirme sonuçları: a) $v_{source}(t)$ (üst) ve $v(t)$ (alt) giriş-çıkış sinyalleri, b) $v_{source}(t)$ - $v(t)$ faz portre çizimi.



(a) (b)

Şekil 3.12. Prodromakis pencere fonksiyonu tabanlı memristör modelinin FPGA tabanlı deneysel gerçekleştirme sonuçları: a) $v_{source}(t)$ (üst) ve $v(t)$ (alt) giriş-çıkış sinyalleri, b) $v_{source}(t) - v(t)$ bir faz portre çizimi.

Joglekar pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanının Denklem (14)'teki FPGA tabanlı gerçekleştirimi için SG_{DSP} aracında tasarlanan şema Şekil 3.11'te gösterilmektedir. Prodromakis pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanının FPGA tabanlı gerçekleştirimi için Şekil 3.12'teki SG_{DSP} aracında tasarlanan sistemde ise sadece $f(x)$ bloğu içerisindeki bloklarda değişiklik yapılmıştır. Gerçek zamanlı deneysel sonuçlar, bir dijital osiloskop aracılığıyla ölçülmüştür. Şekil 3.11a ve Şekil 3.12a'da memristör çıkışında ölçülen $v_{soucre}(t)$ sinüzoidal voltaj kaynağının (üstteki) ve $v(t)$ çıkış voltajının (alttaki) zaman domeni gösterimleri göstermektedir. Burada $v_{soucre}(t)$ gerilimi daha önce de bahsedildiği gibi VDP osilatörünün FPGA tabanlı gerçeklenmesiyle elde edilmiştir. Bu voltaj bir direnç üzerinden geçirilerek Joglekar

pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanının girişine uygulanmış ve memristör elemanının çıkışından ölçülen $v(t)$ voltajı kaydedilmiştir. Şekil 3.11b ve Şekil 3.12b''de ise sırasıyla Joglekar ve Prodromakis pencere fonksiyonları ile gerçeklenen memristör elemanlarının FPGA tabanlı gerçekleştirimlerine ait faz portre gösterimi verilmiştir. Bu gösterimde amaç memristör elemanını temel karakteristik eğrisi olan histerezis yapısını gözlemlemektir. Bu gösterim $v_{soucre}(t)$'ye karşı $v(t)$ voltajları çizilerek oluşturulmuştur. Böylece Joglekar ve Prodromakis pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanı FPGA platformu ile başarılı bir şekilde gerçeklenmiştir.

4. BÖLÜM
TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA ve FPGA tabanlı uygulamalarında izlenen prosedürler detaylandırılmıştır. Bu uygulamalardan elde edilen sonuçlar nümerik benzetimlerle oldukça uyumludur. Bununla birlikte, bu programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog/dijital cihazlar, kendilerine özgü özelliklere sahiptir. Örneğin, sürekli bir zaman modeli tanımına sahip olan memristör elemanı, analog FPAA elemanı ile herhangi bir ön hazırlık olmaksızın gerçeklenebilir. Bu modeller, FPGA tabanlı uygulamalar için ayrıklaştırılmıştır ve bu ayrıklaştırma işlemi modellerde düşük de olsa hataya neden olabilir. FPGA platformunda sürekli bir sistemin tasarım prosedürü, FPAA platformundan daha karmaşıktır. Ayrıca FPGA tabanlı uygulama sürecinde tasarlanan sistemin sonuçlarını ölçmek için DAC veya ADC kullanılmalıdır. Öte yandan elektronik tasarımlarda her platformun donanım kapasiteleri sınırlandırılmıştır. FPAA ve FPGA platformları arasında doğrudan bir karşılaştırma mümkün olmasa da FPGA platformlarının mevcut teknolojide yüksek bellek kapasitesine sahip olduğu açıktır. Pencere fonksiyonları tabanlı memristör elemanının FPAA ve FPGA tabanlı uygulamalarının donanım kullanım miktarları sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'te özetlenmiştir.

Tablo 4.1. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı uygulamasının sentez sonuçları.

CAB1 (Kullanılan/toplam kapasite)	CAB2 (Kullanılan/toplam kapasite)	CAB3 (Kullanılan/toplam kapasite)	CAB4 (Kullanılan/toplam kapasite)	Güç tüketimi
8/8	6/8	8/8	7/8	164±49mW

Tablo 4.2. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPGA tabanlı uygulamasının sentez sonuçları.

	Kullanılan / Toplam Dilim Kayıtları	Kullanılan/ Toplam 4 input LUTs	Kullanılan / Toplam Dilim	Kullanılan/ Toplam BUFGMUXs	Kullanılan/ Toplam MULT18X18SIOs	Maksimum Gecikme (ns)
Joglekar	137/11777 (1%)	1564/11776 (13%)	960/5888 (16%)	2/24 (8%)	16/20 (80%)	1.093
Prodromakis	137/11777 (1%)	1541/11776 (13%)	953/5888 (16%)	2/24 (8%)	16/20 (80%)	1.078

Analog FPAA ve dijital FPGA platformlarının kendine özgü yazılım araçları vardır ve bu araçlar farklı projeler geliştirmek için fırsatlar sunar. Bu araçlar sayesinde devre düzenleme süreci düzgün bir şekilde sürdürülür. Pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanlarının FPAA ve FPGA tabanlı uygulamalarının güç tüketimleri, sırasıyla AnadigmDesigner2 ve FPAA ve FPGA için ISE Design Suite adlı geliştirme araçları kullanılarak belirlenmiştir. FPGA tabanlı tasarım için güç tüketimi Tablo 4.3'teki gibi kaydedilirken, FPAA tabanlı tasarım için güç tüketimi $164 \pm 49mW$'dir. Bu iki platformun maksimum çalışma frekansı dikkate alınırsa, FPAA'nın sınırlı bir performansı vardır. FPAA platformunda sinyal işleme işlemi $2MHz$'e kadar gerçekleştirilebilirken, FPGA platformu kullanılan karta bağlı olarak daha yüksek frekanslarda çalışabilmektedir.

Tablo 4.3. Pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanının FPGA tabanlı uygulamasının güç tüketimi sonuçları

	Saatler	Mantık	Sinyaller	MULTs	I/Os	Sızıntı	Toplam
Joglekar Güç Analizörü Sonuçları(W)	0.006	0	0.004	0.004	0	0.036	0.051
Prodromakis Güç Analizörü Sonuçları(W)	0.006	0	0.005	0.004	0	0.036	0.051

Programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog/dijital platformlar, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin gerçekleştirimleri için alternatif bir bakış açısı sunmaktadır. Bu gerçekleşmelerin ilk aşamasında, FPAA platformunun satürasyon seviyesi nedeniyle pencere fonksiyonu tabanlı memristör modelleri yeniden ölçeklendirilirken, FPGA platformunun dijital doğası nedeniyle ilgili modeller ayrıklaştırılmıştır. Aslında her iki gerçekleştirmede de pencere fonksiyonu tabanlı memristör elemanları bir ön hazırlık

sürecine tabi tutulmuştur. Sayısal analiz sonuçları ile doğrulama aşamasından sonra, bu programlanabilir analog/dijital platformların yazılım geliştirme araçları üzerinde ayrı ayrı pencere fonksiyonu tabanlı memristör modeli oluşturulmuş ve oluşturulan yapılar bu platformlara gömülmüştür. FPAA tabanlı analog gerçekleştirim sonuçları ilave ekipman gerektirmeden doğrudan ölçülebilirken, FPGA tabanlı gerçekleştirme sonuçları bir DAC aracılığıyla elde edilmiştir. Bu çalışmaya dayalı olarak, gelecekteki çalışmalarda, E^2PROM-Flash bellek ve Dinamik Rastgele Erişimli Belleğin (DRAM) yerini alma potansiyelleri nedeniyle, kalıcı Dirençli Rastgele Erişimli Belleğin (ReRAM) gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Bu ReRAM belleğin kullanımı entegrasyon kolaylığı, düşük çalışma voltajı ve minyatürleştirme potansiyeli gibi birçok avantaj sunar. Ayrıca ReRAM teknolojisinin kullanımı CMOS süreçleri ile uyumludur.

KAYNAKÇA

[1] Chua, L. O., 1971. Memristor—The Missing Circuit Element. **IEEE Transactions on Circuit Theory, 18**(5), 507–519.

[2] Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R. & Williams, R. S., 2008. The missing memristor found. **Nature, 453**(7191), 80–83.

[3] Waser, R., Dittmann, R., Staikov, C. & Szot, K., 2009. Redox-based resistive switching memories nanoionic mechanisms, prospects, and challenges. **Advanced Materials, 21**(25–26), 2632–2663.

[4] Schindler, C., Weides, M., Kozicki, M. N. & Waser, R., 2008. Low current resistive switching in Cu-SiO2 cells. **Applied Physics Letters, 92**(12), 1–4.

[5] Jo, S. H. & Lu, W., 2008. CMOS compatible nanoscale nonvolatile resistance switching memory. **Nano Letters, 8**(2), 392–397.

[6] Jo, S. H., Kim, K.-H. & Lu, W., 2009. High-Density Crossbar Arrays Based on a Si Memristive System. **Nano Letters, 9**(2), 870–874.

[7] Wang, S. Y., Huang, C. W., Lee, D. Y., Tseng, T. Y. & Chang, T. C., 2010. Multilevel resistive switching in Ti/ Cux O/Pt memory devices. **Journal of Applied Physics, 108**(11).

[8] Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y. S., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S. F. & Abbott, D., 2010. The fourth element: Characteristics, modelling and electromagnetic Theory of the memristor. **In Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** (Vol. 466, Number 2120, pp. 2175–2202). Royal Society.

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

[10] Kvatinsky, S., Friedman, E. G., Kolodny, A. & Weiser, U. C., 2013. TEAM:

Threshold adaptive memristor model. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 60**(1), 211–221.

[11] Biolek, Z., Biolek, D., Biolek, Z. & Biolková, V., 2009. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift.

[12] Biolek, D., Biolek, Z. & Biolkova, V., 2009. SPICE modeling of memristive, memcapacitative and meminductive systems. *ECCTD 2009 - European Conference on Circuit Theory and Design Conference Program*, 249–252.

[13] Joglekar, Y. N. & Wolf, S. J., 2009. The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits. **European Journal of Physics, 30**(4), 661–675.

[14] Prodromakis, T., Peh, B. P., Papavassiliou, C. & Toumazou, C., 2011. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics. **IEEE Transactions on Electron Devices, 58**(9), 3099–3105.

[15] Takahashi, Y., Sekine, T. & Yokoyama, M., 2015. SPICE model of memristive device using Tukey window function. **IEICE Electronics Express, 12**(5), 1–8.

[16] Singh, J. & Raj, B., 2019. An accurate and generic window function for nonlinear memristor models. **Journal of Computational Electronics, 18**(2), 640–647. https://doi.org/10.1007/s10825-019-01306-6

[17] Elwakil, A. S., Fouda, M. E. & Radwan, A. G., 2013. A simple model of double-loop hysteresis behavior in memristive elements. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 60**(8), 487–491.

[18] Karakulak, E. & Mutlu, R., 2009. Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi. *13. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi,* 4–7.

[19] Pershin, Y. V. & Di Ventra, M., 2009. Practical approach to programmable analog circuits with memristors.

[20] Juraj, V., Dalibor, B. & Biolek, Z., 2013. An analogue model of the memristor. **International Journal of Numerical Modelling, 26**(April 2011), 493–505.

https://doi.org/10.1002/jnm

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

[22] Wang, X. Y., Fitch, A. L., Iu, H. H. C., Sreeram, V. & Qi, W. G., 2012. Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor. **Chinese Physics B, 21**(10).

[23] Biolek, D., Bajer, J., Biolkova, V. & Kolka, Z., 2011. Mutators for transforming nonlinear resistor into memristor. *2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD 2011*, 3, 488–491.

[24] Biolková, V., Biolek, D. & Kolka, Z. K., 2012. Unified Approach to Synthesis of Mutators Employing Operational Transimpedance Amplifiers for Memristor Emulation. 110–115.

[25] Li, Z., Zeng, Y. & Ma, M., 2017. A Novel Floating Memristor Emulator with Minimal Components. **Active and Passive Electronic Components**.

[26] Rziga, F. O., Mbarek, K., Ghedira, S. & Besbes, K., 2019. An efficient Verilog-A memristor model implementation: simulation and application. **Journal of Computational Electronics, 18**(3), 1055–1064. https://doi.org/10.1007/s10825-019-01357-9

[27] Abuelma'Atti, M. T. & Khalifa, Z. J., 2015. A continuous-level memristor emulator and its application in a multivibrator circuit. AEU - **International Journal of Electronics and Communications, 69**(4), 771–775.

[28] Sodhi, A. & Gandhi, G., 2010. Circuit mimicking TiO2 memristor: A plug and play kit to understand the fourth passive element. **International Journal of Bifurcation and Chaos, 20**(8), 2537–2545.

[29] Xie, X., Zou, L., Wen, S., Zeng, Z. & Huang, T., 2019. A Flux-Controlled Logarithmic Memristor Model and Emulator. **Circuits, Systems, and Signal Processing, 38**(4), 1452–1465.

[30] Adzmi, A. F., Nasrudin, A., Abdullah, W. F. H. & Herman, S. H., 2012. Memristor Spice model for designing analog circuit. *2012 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, 78–83.

[31] Chua, L. O., Kang, S. M., 1976. Memristive devices and systems. **Proceedıngs OF The Ieee, Vol. 64, No. 2, 64**(2).

[32] Baatar, C., Porod, W. & Roska, T., 2010. Cellular Nanoscale Sensory Wave Computing.

[33] Jo, S. H., Kim, K. & Lu, W., 2009. Programmable Resistance Switching in Nanoscale Two-Terminal Devices. 1–5.

[34] Brook, S., Strukov, D. B. & Likharev, K. K., 2007. A Defect-Tolerant Architecture for Nanoelectronic Resistive Memories. 58–63.

[35] Choi, H., Jung, H., Lee, J., Yoon, J., Park, J., Seong, D., Lee, W., Hasan, M., Jung, G. & Hwang, H., 2009. An electrically modifiable synapse array of resistive switching memory. https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/34/345201

[36] Mazumder, P., Kang, S. M. & Waser, R., 2012. Memristors: Devices, models, and applications [scanning the issue]. **Proceedings of the IEEE, 100**(6), 1911–1919. https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2190812

[37] Shi, M., Yu, Y. & Xu, Q., 2018. Window function for fractional-order HP TiO2 non-linear memristor model. **IET Circuits, Devices and Systems, 12**(4), 447–452.

[38] Xu, K. Da, Li, D., Jiang, Y. & Chen, Q., 2021. SPICE Behaviors of Double Memristor Circuits Using Cosine Window Function. **Frontiers in Physics, 9.** https://doi.org/10.3389/fphy.2021.648737

[39] Tahir, F. & Ramadhan, S., 2018. Analog Programmable Circuit Implementation for Memristor. **Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering, 14**(1), 1–9.

[40] Arik, S. & Kiliç, R., 2014. Reconfigurable hardware platform for experimental testing and verifying of memristor-based chaotic systems. **Journal of Circuits, Systems and Computers, 23**(10).

[41] Vourkas, I., Abusleme, A., Ntinas, V., Sirakoulis, G. C. & Rubio, A., 2016. A Digital Memristor Emulator for FPGA-Based Artificial Neural Networks. **2016 1st IEEE International Verification and Security Workshop, IVSW 2016**, 54–57.

[42] Tornez-Xavier, G. M., Gutierrez-Mondragon, M. A., Flores-Nava, L. M., Gomez-Castaneda, F. & Moreno-Cadenas, J. A., 2017. Memristor hybrid model for nonlinear analog circuit design. *2017 14th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, CCE 2017*, 17–22.

[43] Tolba, M. F., Halawani, Y., Saleh, H., Mohammad, B. & Al-Qutayri, M., 2020. FPGA-Based Memristor Emulator Circuit for Binary Convolutional Neural Networks. **IEEE Access, 8,** 117736–117745.

[44] Farooq, U. & Aslam, M. H., 2015. Design and implementation of basic building blocks of FPGA using memristor-transistor hybrid approach. *5th International Conference on Innovative Computing Technology, INTECH 2015*, 142–147.

[45] Henry Alombah, N., Fotsin, H., Megam Ngouonkadi, E. B. & Nguazon, T., 2016. Dynamics, Analysis and Implementation of a Multiscroll Memristor-Based Chaotic Circuit. **International Journal of Bifurcation and Chaos, 26**(8).

[46] Muthuswamy, B., 2010. Implementing memristor based chaotic circuits. **International Journal of Bifurcation and Chaos, 20**(5), 1335–1350.

[47] Anadigm: **http://www.anadigm.com/**, (Erişim tarihi: Şubat 2022).

[48] Likharev, K. K. & Strukov, D. B., 2007. Prospects for the development of digital CMOL circuits. *2007 IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures, NANOARCH*, 109–116.

[49] Xilinx. **http://www.xilinx.com/**), (Erişim tarihi: Şubat 2022).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLERİ

Adı Soyadı: Jean Luck RANDRIANANTENAINA
Uyruğu: Madagaskar

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	ERÜ. Kayseri / Türkiye Elektrik-Elektronik Müh.	2022
Yüksek Lisans	Polytechnic-Antsiranana Üniversitesi / Madagaskar Elektrik Müh.	2019
Lisans	Polytechnic-Antsiranana Üniversitesi / Madagaskar Elektrik Müh.	2017
Lise	Teknik Lisesi-Don Bosco Merkezi-Mahajanga / Madagaskar Elektrik.	2013

YABANCI DİL

- İngilizce
- Fransızca
- Malagasça: Anadil

YAYINLAR VE KONFERANS

1. Jean, L. R., Baran, A. Y., Korkmaz, N., Kılıç, R., 2022. The Functional Emulator Designs for a memristor Model with the Programmable Analog and Digital Platforms. **Journal of Computational Electronics.** (Yüklenmiştir.)

2. Jean, L. R., Baran, A. Y., Korkmaz, N., Kılıç, R., 2022. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirimi**. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.** (Yüklenmiştir.)

3. Jean, L. R., Baran, A. Y., Korkmaz, N., Kılıç, R., 2022. Prodromakis pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPGA tabanlı gerçekleştirimi. *4. Uluslararası Türk Dünyası Fen Bilimleri ve Mühendislik Kongresi 23-24 Haziran 2022, Niğde – Türkiye.*