

Derleme: Memristör: Cihaz, Model ve Uygulamaları

Özlem AKIN ^{1*}

¹Erzurum Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Erzurum, Türkiye.

ORCID:0000-0002-8636-5021, E-mail: ozlem.akin@erzurum.edu.tr

(Alınış/Arrival: 25.03.2025, Kabul/Acceptance: 10.04.2025, Yayınlanma/Published: 25.06.2025)

Özet

Bu makale 1971 yılında Leon Chua tarafından keşfedilen eksik devre elemanı olarak adlandırılan memristör yapısını tanıtmaktadır. Memristör nöromorfik sinir ağlarında, ileri düzey bilgi işleme teknolojileri başta olmak üzere dijital ve analog devre uygulamalarda kullanılan ve sahip olduğu birçok özellik ile son teknolojik gelişmelere entegre olabilen bir devre elemanıdır. Metal-yalıtkan-metal, yapılar birçok metal oksit kullanılarak farklı özelliklerde memristör yapıları üretilmesine izin vermektedir. Bu memristör yapıları kullanılarak teknolojik gelişmeler her gün iyileşerek gelişmeye devam etmektedir. Makalede memristör yapısının çalışma prensibi üzerinde durularak yapının daha iyi anlaşılması sağlanmıştır. Ayrıca memristör yapılarının genel olarak deneysel üretiminin nasıl olduğunu ve nasıl çalıştığını, sandviç yapısı ele alınarak anlatmıştır. Memristörün anahtarlama mekanizmalarının neler olduğu ve nasıl çalıştığı konusunda bilgi verilmiştir. Son olarak günümüzde memristör uygulamalarının neler olduğu özet olarak anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Memristör, Anahtarlama mekanizmaları, Çalışma prensibi, Memristörün uygulama alanları.

Review: Memristor: Device, Model and Applications

Abstract

This article introduces the memristor structure, which is called the missing circuit element, discovered by Leon Chua in 1971. Memristors are circuit elements that are used in neuromorphic neural networks, advanced information processing technologies, and digital and analog circuit applications, and are integrated with the latest technological developments with their many features. Metal-insulator-metal structures allow the production of memristor structures with different properties using many metal oxides. Technological developments using these memristor structures continue to improve and develop every day. In the article, the working principle of the memristor structure was emphasized and a better understanding of the structure was provided. In addition, it explains how the experimental production of memristor structures is generally done and how they work by considering the sandwich structure.

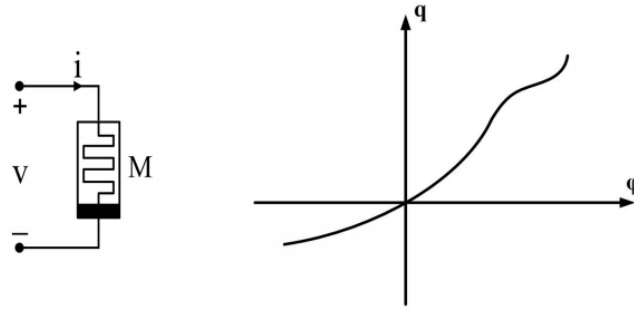
Keywords: Memristor, Switching mechanisms, Operating principle, Application areas of memristor.

1. GİRİŞ

Elektronik alanındaki gelişmelere her geçen gün bir yenisi eklenmektedir. Artan bellek ve depolama ihtiyacı ve bunun yanında işletim sistemlerinin daha hızlı olması mevcut mimariler

ile ilerlemekte güçlük çekmektedir. Von Neumann mimarisi ile yapılan işlemlerde depolama ve bilgi işleme süreci, ciddi problemlere sahiptir [1]. Bu problemlerden ilki erişim hızının merkezi işlem biriminin hesaplama hızından çok daha yavaş olması ve buna bağlı olarak bellek duvarının kullanımının azalmasıdır [2,3]. İkinci temel problem ise iletimi esnasında tüketilen güç miktarında ciddi bir güç kaybına sebep olduğu için güç duvarı olarak adlandırılan çipin gelişmesi oldukça yavaşlamıştır [4]. Moore yasasındaki gelişmeler von Neumann mimarisinin işleyişini iyileştirmiş olsa da bu çözüm gelişen teknoloji karşısında verileri depolama ve hesaplamada henüz yeterli boyuta ulaşmamıştır. Araştırmacılar üretilen işaretlere karşı verilen cevapların beyin sinir hücreleri gibi hızlı olmasını isteyerek, yapay sinir hücreleri gibi çalışan sistemlere yönelmişlerdedir [5].

Memristor yapısı değişen hafızaya sahip bir direnç elemanıdır. Bu yapı ilk olarak 1971 yılında Leon Chua ve öğrencisi tarafından keşfedilmiştir [6]. Leon Chua o dönemde mevcut devre elemanları ve aralarındaki ikili ilişkileri inceleyerek bu ikili ilişkilerden birinin eksik olduğunu bulmuştur. Leon Chua akım ve gerilim arasındaki ilişkiden direnç elemanı, akım ve yük arasındaki ilişkiden endüktans elemanı ve gerilim ile yük arasındaki ilişkiden ise kapasite elemanının üretildiğini fakat akı ile yük arasındaki ilişki kullanılarak herhangi bir eleman geliştirmedigini fark etmiştir. Böylece akı ile yük arasındaki bu ilişkiden hafızalı bir direnç olan memristör yapısını üretmiştir. Memristör kayıp devre elemanı olarak bilinen ve diğer devre elemanları gibi pasif olarak çalışan bir elemandır. Ayrıca memristör iki terminallidir ve non-lineer olarak çalışır. Şekil 1’de Leon Chua tarafından üretilen memristörün şematik görüntüsü ve yine Chua tarafından eksikliği fark edilen akı ve yük arasındaki ilişkinin grafiği verilmiştir.

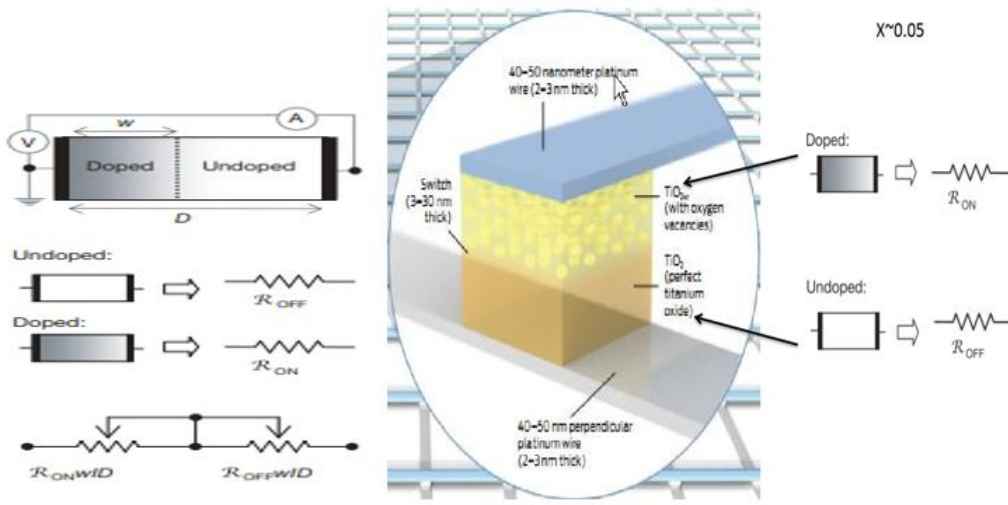


Şekil 1. Memristör şematik gösterimi ve yük ile manyetik akı arasındaki tipik eğri [6].

Memristörün çalışma prensibi şöyledir: üzerinden akım geçince direnci değişen ve akım kesilince son direnç değerini muhafaza eden bir yapıdır. Bu durumu üretilen malzemenin içerisindeki oksijen boşluklarının yapı içerisindeki hareketleri ile sağlamaktadır. 1971 yılından 2008 yılına kadar akıllı dirençler üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen memristördeki direnç değişiminin asıl sebebi anlaşılamayıp çalışılan konular açığa kavuşturulamamıştır.

2008 yılında HP laboratuvarında ki çalışma ekibi, bulmuş oldukları sonuçların [7] 1971 yılında Leon Chua’nın çalışmasında bahsettiği memristör yapısının davranışını sergilediğini ortaya koymuştur. Daha sonra bu alandaki gizem kısmen çözülüp araştırmacılar bu alanda çalışmaya yönelmişlerdir. 2008 yılında yapılan bu çalışmada Strukov ve ekibi, Chua’nın memristör yapısına uygun olarak çalışan iki uçlu elektriksel bir cihazın fiziksel çalışma modelini açıklamayı başarmışlardır. Bu model Leon Chua’dan beri yapılan ve sebebi tam olarak açıklanamayan nano ölçekli ince film aygıtlarda görülen anahtarlama, çok durumlu iletkenlik, negatif diferansiyel ve direnç histerisiz gibi durumlarda ortaya çıkan akım-gerilim anomalilerinin sebebini açıklamayı başarmıştır [7].

Strukov ve ekibi ürettikleri modelde iki metal kontak arasında D uzunluğunda katkılı ve katkısız iki bölgeye sahip bir yarı iletkenlerden oluşan memristör yapısı gerçekleştirdiler, Şekil 2. Aygıtın toplam direnci birbirine seri bağlanmış katkılı ve katkısız iki bölgenin dirençleri toplamına eşittir. Katkılı bölge yüksek dirençli bölgeyi temsil edip ROFF ile gösterilirken, katkısız bölge daha düşük dirençli olup RON ile gösterilir. Bu bölgelerin genişliği metal oksit içerisindeki oksijen boşluklarının uygulanan gerilim ile sürüklenerek yer değiştirmesi ile değişmektedir. Böylece katkılı ve katkısız bölgelerin sınırları değişir. Bu da eşdeğer direncin değişmesine sebep olur. Yapı üzerine gerilim uygulandığında oksijen boşlukları katkısız bölgeye doğru hareket edip burada birikerek bu bölgenin direnç değerini azaltıp akım iletiminin daha kolay olmasını sağlayarak devreyi AÇIK (RON) durumuna geçirmektedir. Uygulanan gerilimin yönü değiştirildiğinde ise katkısız bölgenin genişliği artırıldığından yapının direnç değeri yükseltilecek yapı KAPALI (ROFF) konumuna geçmektedir. Bu çalışma prensibinin Leon Chua'nın hafızalı devre elemanına uygun olduğu gösterilip memristör yapısına atıf yapılarak 2008 yılında memristörün ne olduğu detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil 2. Memristör için değişken direnç çifti modeli [7].

Strukov ve arkadaşlarının ürettikleri memristör yapısının matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir. Ortalama iyon mobilitesi μ_v olan uniform bir alanda, doğrusal iyonik sürüklenme ve omik elektronik iletkenlik için;

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

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

Denklemleri ile verilir, denklem 2'den w(t);

$$w(t) = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (3)$$

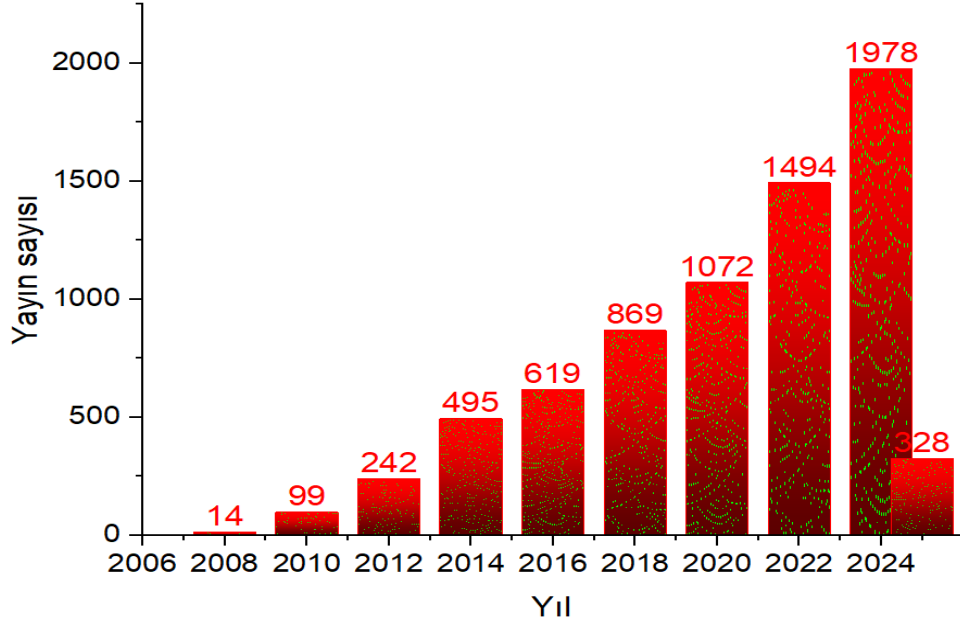
olarak elde edilir. Denklem 3 denklem 1'de yerine koyulursa, sistemin memristansı (ve RON << ROFF için sadeleştirerek);

$$M(q) = R_{OFF} (1 - \frac{\mu_v}{D^2} R_{ON} q(t)) \quad (4)$$

olarak elde edilir [7].

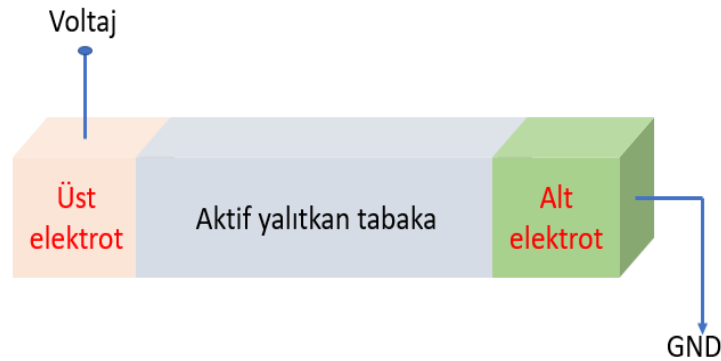
Mikro boyuttan nm skalasına inildiğinde $M(q)$ sabitinin $1/D^2$ 'ye bağlılığından dolayı $M(q)$ 1.000.000 kez artmaktadır. Bu nedenle makro boyutta insanlığın dikkatinden kaçan bir detay günümüzde nano teknolojideki çalışmalar ile bilim insanlarının dikkatini çekmiştir [7].

2008 yılından sonra ne olduğu anlaşılan memristör yapısı üzerine birçok inceleme yapılmıştır. Bu incelemeler Şekil 3'teki gibi rapor edilmiştir.



Şekil 3. Memristör konusunda 2008 yılından 2025 yılı nisan ayına kadar iki yıl arayla yapılan yayın sayıları. Yayın sayısı, Web of Science elektronik sitesi <https://webofknowledge.com/>un "Konu" başlığından memristör kelimesi ile aranarak elde edilmiştir.

Memristör metal-yalıtkan-metal yapısından oluşan, alt ve üst elektrotların metal malzemelerden ve aradaki yapısında oksit malzemelerden oluştuğu bir sistemdir Şekil 4. Yani iki metal arasında oksit tabakasının bulunduğu bir sandviç modeli düşünülebilir. Aradaki malzeme amorf silisyum [8], ferromanyetik malzemeler [9], ZnO [10], NiO [11], BaTiO₃ [12] gibi metal oksitlerden olabilir. Bu malzemeler yapılan memristörün kullanım amacına göre değişkenlik gösterebilir.



Şekil 4. Metal-yalıtkan-metal yapının şematik gösterimi.

Bu çalışma memristör konusu ile yapılan derlemeler içerisinde Türkçe bir kaynak bulunmadığı için kendi dilimizde memristör konusunun açık bir şekilde anlaşılmadığı düşünüldüğü için

hazırlanmıştır. Yani literatürde yapılan memristör çalışmalarının hepsi İngilizce olup bu konuda daha önce Türkçe bir yayın yapılmamış olması bu çalışmayı öne çıkan bir çalışma haline getirmiştir. Yapılan bu çalışma ile Türkiye’de birçok bilim insanı memristör ile tanışıp, bu alanda çalışmalar yapması beklenmektedir. Yapılan çalışma ile memristör, memristörün çalışma prensibi ve uygulama alanları neler olduğu konusunda kapsamlı bir araştırma yapılmıştır.

2. MEMRİSTÖRÜN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Memristörün çalışma prensibine bakmadan önce diğer pasif devre elemanlarının çalışma yapıları incelenmelidir.

Voltaj manyetik akının zamana bağlı değişimi olarak ifade edilir:

$$V = d\phi / dt \quad (5)$$

Akım elektrik yükünün zamana bağlı değişimi olarak ifade edilir:

$$I = dq / dt \quad (6)$$

Direnç akım ile voltaj arasındaki lineer bağıntıdan türetilir:

$$R = dV/dI \quad (7)$$

Kapasite voltaj ile elektrik yükü arasındaki lineer ilişkiden türetilir:

$$C = dq / dV \quad (8)$$

Endüktans manyetik akı ve akım arasındaki lineer ilişkiden türetilmiştir:

$$L = d\phi / dI \quad (9)$$

Akım, voltaj, manyetik akı ve yük arasında toplamda altı tane ikili ilişki olmasına rağmen mevcut durumda beş temel ikili ilişki varken, Leon Chua altıncı ilişkiye de ortaya koyarak memristör elemanını üretmiştir. Memristör manyetik akı ile elektrik yükü arasındaki ilişkiden oluşmaktadır.

$$d\phi = Mdq \quad (10)$$

Burada M memristansı ifade eder.

Chua yapmış olduğu tanımlamada iki tür memristörden bahsetmiştir: birincisi yük kontrollü meristör, ikincisi ise akı kontrollü memristördür [6]. Yük kontrollü memristör şöyle tanımlanır:

$$V(t) = M(q(t)) \cdot I(t) \quad (11)$$

$$M(q) = d\phi(q) / dq \quad (12)$$

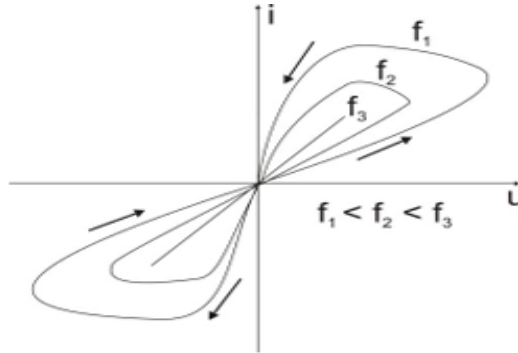
Akı kontrollü memristörde ise akım aşağıdaki gibi tanımlanır ve buradan memdüktrans kavramı ortaya çıkar:

$$I(t) = W(\phi(t)) \cdot V(t) \quad (13)$$

$$W(\phi) = d\phi(q) / d\phi \quad (14)$$

Burada M (q) ve W(φ) sırasıyla direnç (Ω) ve iletkenlik (S) birimlerini ifade eder [13].

Ayrıca Bir yapının memristör olabilmesi için yapının şu üç karakteristiğe sahip olması gerekir: i) yapı pozitif ve negatif uyarımlar ile I-V düzleminde sıkıştırılmış histerisize sahip olmalıdır, ii) histerisiz alanı uyarım frekansındaki artış monomatik olarak azalmalıdır, Şekil 5 iii) uyarım frekansı sonsuza gittikçe histerisiz alanı sıfıra gidip eğri lineer bir şekle dönüşmelidir.



Şekil 5. Histerisiz alanı ile uyarım frekansları arasındaki ilişki [14].

3. ANAHTARLAMA MEKANİZMASI

1990'ların sonlarında çeşitli oksit malzemeler kullanılarak ilk anahtarlama çalışmaları yapılmaya başlanılmıştır [15-18]. Günümüzde yalıtkan tabaka yerini yarı iletken metal oksitlere bırakarak geliştirilen MIM yapıları ile anahtarlama çalışmaları devam etmektedir [15]. MIM yapılarını birçok faktör etkilemektedir. Bunlar: i) elektron hareketliliği, ii) konsantrasyonlarının gradyanı, iii) yalıtkan içindeki sıcaklık gradyanı. Bu faktörler ile yarı iletken malzemelerin katıhal özellikleri değiştirilebilmektedir. Böylece bu malzemeler kullanılarak üretilen memristörlerin direnç değerleri istenildiği gibi ayarlanarak, yapıların anahtarlama özellikleri değiştirilebilmektedir.

Metal oksit memristörlerde aktif tabaka içerisinde uygulanan gerilimin yönüne bağlı olarak oluşan ve kopan filamentler yapının “AÇIK” veya “KAPALI” durumlarını belirleyerek anahtar olarak görev almasını sağlayan en yaygın modeldir. Bu filamentlerin oluşması üst ve alt elektrotlar arasında düşük dirençli bölge yaratarak akımın daha kolay akmasını sağlayıp yapıyı “AÇIK” konuma getirirken, oluşan bu filamentlerin tersine gerilim uygulandığında kopması ile düşük dirençli bölge ortadan kalkar, böylece akımın daha yüksek dirençli bölgeden akması sağlanır. Bu durumda memristör “KAPALI” duruma geçerek anahtar görevini yerine getirmektedir.

Filamentlerin kullanıldığı bu yöntem temelde iki ana direnç anahtarlama mekanizması içerir: i) değerlik değişim belleği (VCM), ii) elektrokimyasal metalleştirme.

3.1. VCM Direnç Anahtarlama Mekanizması – Anyonik Cihazlar

50 yıl önce ilk direnç anahtarlama çalışmaları ince film/metal oksit/ metal sandviç yapısı ile araştırmacılar tarafından çalışılmaya başlanmıştır [19-20]. Yarım yüz yıldır devam eden bu çalışmalarda basit ikili geçiş metal oksitler (HfO_2 , TiO_2 , ZnO , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , MoO , WO , NiO ve CuO), perovskitler, ($\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}$, SrZrO_3 ve BiFeO_3) ve SnO_2 ve indiyum kalay oksit (ITO) gibi şeffaf iletken oksit tabakaları kullanılmıştır [21-28]. Bu oksitler anyonik cihazlar olarak kabul edilip, anahtarlama mekanizmaları, harici bir elektrik alan altında oksijen anyon türlerinin göçüne dayanır. Anyonik cihazlarda çoğu kez ilk filamentleri oluşturmak için cihazın iki terminali boyunca belirli bir süre yüksek bir gerilim verilir. Bu durum düşük voltaj değerlerinde

tekrarlanabilir anahtarlama işleminin devam edebilmesi için gereklidir. Bu işleme elektroforma adı verilir [29]. Anyon tipi memristörlerde oksijen göçü önemli bir faktördür. Bu memristörlerde iletim filamentleri, n-tipi katkı maddesi olarak oksijen boşluklarından faydalanırlar. Tek kristalli karmaşık oksitlerle üretilen memristör yapılarında, oksijen boşlukları yapılan deneysel çalışmalarla doğrudan gözlemlenebildiği için bu yapılarda anahtarlamanın oksijen boşlukları ile gerçekleştirildiği deneysel olarak ispatlanmıştır [30-32].

3.2. ECM Direnç Anahtarlama Mekanizması – Katyonik Cihazlar

ECM mekanizmaları iki farklı özelliğe sahip elektrottan oluşan MIM yapılarıdır. Bu elektrotlardan ilki elektrokimyasal olarak aktif özelliğe sahip Ag ve Cu gibi metaller iken, diğer elektrotlar asil metallerden oluşmaktadır [33-34]. Ayonik cihazlardaki gibi katyonik cihazlarda da yalıtkan tabaka içerisinde iletken filamentler oluşur. Fakat burada filamentler, aktif elektrotun ara yüzünden çözünmüş metal katyonların yalıtkan tabakaya yayılarak asil elektrotta doğru ilerlemesi ile oluşurlar. Başka bir ifadeyle yapı üzerine gerilim uygulandığında oluşan dış elektrik alanın etkisi ile çözünmüş metal katyonları, geride metal boşlukları bırakarak, asil (inert) elektrotta doğru hareket etmeye başlar. Böylece, metal katyonlar yalıtım tabakası içerisinde kademeli olarak göç edip bu tabaka içerisinde mevcut kalınlığı azaltarak iletken filamentleri oluştururlar.

3.3. Anahtarlama Davranışı

Memristör cihazlarında iki farklı anahtarlama tipi vardır. Bunlar: tek kutuplu (unipolar) ve çift kutuplu (bipolar) anahtarlamalardır. Unipolar anahtarlama direncin AÇIK veya KAPALI olma durumu uygulanan gerilimin büyüklüğüne bağlıdır. Direncin SET (AÇIK) durumda olması için uygulanan gerilim, sıfırlama işlemi (KAPATMA işlemi) için uygulanan gerilimden daha yüksektir. Sıfırlama geçiş noktasında ulaşılan akım seviyesi de SET işlemi sırasında tanımlanan uyumluluktan daha büyüktür. Bipolar modda cihaza AÇ-KAPA yaptırmak için gerilimin zıt polaritede olması gerekir. I-V eğrisi incelendiğinde memristör yapılarında anahtarlama şekli açık olarak görülür ve elektriksel şekillendirme ve imalat sırasında yapılan değişiklikler ile anahtarlama modu değiştirilebilir [35].

4. MEMRİSTÖR UYGULAMALARINA GENEL BAKIŞ

Memristörler; CMOS'larla uyumlu çalışması, temel tasarım yapısı ve üretim avantajları, anahtarlama hızı, tutma oranı, dayanıklılık, uzun hizmet ömrü ve değişken hafıza gibi özelliklerinden sayesinde analog devreler, dijital devreler, nöromorfik ağ sistemleri ve hafıza uygulamalarında çokça çalışılan bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Memristörlerin en önemli uygulamalarından biri “uçucu olmayan bellek” özelliğidir. Bu özelliği kullanılarak memristörler hesaplama işlemlerinin yapılmasını sağlamaktadırlar. Tablo 1’de piyasada mevcut olan bellek teknolojilerinde bulunması gereken temel özellikler verilmiştir [36].

Tablo 1. Piyasada mevcut olan bellek teknolojileri [36].

	Mevcut ticari teknolojiler				Gelişen teknoloji
	DRAM	Flash (NAND)	Flash (NOR)	SRAM	Memristör
Hücre yoğunluğu (F^2)	6-30	1-4	1-10	140	4
Tutma süresi	>64 ms	>10 yıl	>10 yıl	Voltaj uygulandığı sürece	>10 yıl
Dayanıklılık	>10 ¹⁶ döngü	>10 ⁵ döngü	>10 ⁵ döngü	>10 ¹⁶ döngü	>10 ¹² döngü

Okuma zamanı	2 ns	0.1 ms	15 ns	0.1-0.3 ns	<2 ns
Boyut	36 nm	16 nm	45 nm	45 nm	<5 nm
Cihaz hücre elemanı	ITIC	1T	1T	6T	1R/1T1R

Tablo incelendiğinde memristör yapısının, dinamik rastgele erişim belleğin (DRAM) yoğunluğuna ve statik rastgele erişim belleğin (SRAM) hızına sahip olduğu görülür. Bu özellikleri ile memristör yapıları, içerik adreslenebilir bellek (CAM) türü için tercih edilmiştir [37]. Memristörler osilatörlerde, adaptif filtrelerde, nöromorfik ağlarda, veya kaotik sistemlerde analog devre uygulaması olarak kullanılırlar [38]. Farklı cihazları iyileştirmek için direnç yerine memristörün özelliklerinden faydalanılır. Memristörün kullanıldığı başka bir alan ise radyo frekans (RF) antenleridir. RF antenlerinde anahtar olarak görevi yapmıştır [39]. Ayrıca programlanabilir devrelerde de memristör yapısı çok önemlidir [39]. Amplifikatör ve filtrelere sahip sistemlerin çalışabilmesi için ayarlanabilir direnç serileri ve anahtarlama mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür devrelerde birçok elemandan oluşan karmaşık sistemler yerine memristör yapıları tercih edilmektedir. Memristör yapısı ayarlanabilir hafızası sayesinde, anahtarlama işlemi yaparak analog devrelerin daha kolay programlanabilmesi sağlamaktadır [39].

Memristörlerin “AÇIK” veya “KAPALI” özelliklerinden yararlanarak birçok lojik devre tasarlanabilir [40]. Memristörler iki değişkenli tüm ikili ilişkiler için uygulanabilirler. Memristörün en önemli uygulamalarından biri olan nöromorfik sistemler günümüzde yapay sinir ağları üreterek birçok probleme cevap üretmektedir [41]. Memristör ile çalışan nöromorfik sistemlerin doğru tanımı makale [42]’ de şu şekilde açıklanmıştır:” nöromorfik sistem, nöron sistemlerinin mimarisini taklit etmekten, gerçek zamanlı hesaplama sırasında yeni nöron desenleri oluşturmaktan, bir insan sinir sitemini simüle etmekten ve taklit etmekten sorumlu olan analog dijital sistemlerin bir bağlantısıdır”. Elektronik devre simülasyonu olarak çalıştırılan nöron ve sinaps bağlantıları, düşük güç tüketimine sahip elemanların uygulamasını gerektirir [42]. Memristörler doğrusal olmayan elemanlar olarak rastgele sayı üretme ve şifreleme özellikleri ile kaotik sistemlerde kullanılmaktadırlar. Bu özellikleri ile memristörler kaotik devreleri basitleştirir ve daha iyi kontrol edilebilir bir hale getirir [42].

Memristörlerin gelecekteki en önemli kullanım alanı kalıcı olmayan bellek alanındaki çalışmalar olacaktır. Yapılan çalışmalar minyatürleşmeye bağlı sınırlar nedeniyle günümüzde kullanılan flaş belleklerin gelişiminin duracağı konusunda bir öngörüye sahiptirler [43]. Memristörlerin, hafızalı bir özelliğe sahip olmaları, sürekli güç kaynağına ihtiyaç duymamaları ve çok küçük boyutlarda üretilebilir olmaları nedeniyle uçucu olmayan bellek alanında büyük ilgi görmüştür [44].

5. SONUÇ

Memristörün keşfinden sonra yapılan çalışmaların devam etmesiyle, özellikle son yirmi yılda (2008’den beri) memristör daha fazla anlam kazanarak birçok elektronik devrede yer almaya başlamıştır. Memristörün kayıp devre elemanı olarak keşfedilmesi elektronik dünyasına yeni bir yön vermeye devam etmektedir. Giriş kısmında memristör yapısının Leon Chua’nın yapmış olduğu keşiften beri gelişimi açıklanmıştır. Uygulanan voltajın yönüne bağlı olarak ve üzerinden geçen akım miktarıyla yapısındaki direnç değerinin değişmesi ve bu değişim ile hafıza özelliği kazanması memristör yapısını birçok alanda tercih edilir konuma getirmiştir. Memristör yapısının nasıl çalıştığı ve keşfinden önemli olan noktanın ne olduğu yine makalede

detaylı olarak verilmiştir. Hafıza özelliği ve çok küçük boyutlarda üretilebilmesi, hızlı cevap üretme özelliği, dayanıklılığı ve tutma süresi gibi özellikleri günümüzde kullanılan bellek teknolojisi için çok önemli olmuştur. Sahip olduğu bu özellikler ile memristör kendisine birçok uygulama alanı bulmuştur. Memristörler kullanılarak üretilen yapay sinir ağları iletişim teknolojilerini geliştirmiştir. Memristörün en önemli özelliklerinden biri olan anahtarlama mekanizmalarının çalışma prensibi açıklanmıştır. Anahtarlama çalışmaları şu şekilde özetlenmiştir: deneysel olarak üretilen memristörlerin yapısındaki oksijen boşluklarından kaynaklı olarak elde edilen düşük dirençli alanlar sayesinde çok daha kolay ve hızlı bir şekilde “AÇIK”, “KAPALI” durumuna geçerek direnç anahtarlama yapılmıştır. Tüm bu özellikler göz önüne alındığında memristör yapısı elektrik alanında birçok ilke imza atıp yeni çalışma alanlarında kendine yer bulacak bir malzemedir.

KAYNAKLAR

- [1] Neumann Jv. The principles of large-scale computing machines. *Ann History Comput.* 1988;10(4):243–256.
- [2] Wulf WA, McKee SA. Hitting the memory wall: implications of the obvious. *SIGARCH Comput Archit News.* 1995;23(1):20–24.
- [3] Backus J. Can programming be liberated from the von Neumann style, A functional style and its algebra of programs. *Commun ACM.* 1978;21 (8):613–641.
- [4] Horowitz M. Computing’s energy problem (and what we can do about it). 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC); San Francisco: IEEE. 2014; p. 10–14.
- [5] Ze W, Jianling Y, Chao J, Isaac A, Yantao Y. Vacancy-Induced Resistive Switching and Synaptic Behavior in flexible BST@Cf memristor crossbars. *Ceramics International.* 2020; 46(13), 21569-21577.
- [6] Leon C, Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on circuit theory.* 1971;18 (5), 507-519.
- [7] Strukov DB, Snider GS, Stewart DR, Williams RS. The missing memristor found. *Nature,* 2008; 453 (7191), 80-83.
- [8] Phil B, Maurice M, Andreas B, Peter Haring B, Bhaskar C, Vibration may Break the Conductive Filament in amorphous Germanium based Memristor. 2024 IEEE 6th International Conference On Ai Circuits And Systems, Aicas. 2024; Page, 408-412, DOI 10.1109/AICAS59952.2024.10595884.
- [9] Menke T, Dittmann R, Meuffels P, Szot K, Waser R. Impact of the electroforming process on the device stability of epitaxial Fe-doped SrTiO₃ resistive switching cells. *J. Appl. Phys.* 2009; 106, 114507.
- [10] Wang Y, Wang W, Zhang C, et al. A digital–analog integrated memristor based on a ZnO NPs/CuO NWs heterostructure for neuromorphic computing. *ACS Appl Electron Mater.* 2022;4(7):3525–3534. DOI:10. 1021/acsaelm.2c00495.

- [11] Seo S, Lee MJ, Seo DH, Jeoung EJ, Suh DS, Joung YS, Yoo IK, Hwang IR, Kim SH, Byun IS, Kim J-S, Choi JS, Park BH. Reproducible resistance switching in polycrystalline NiO films. *Appl. Phys. Lett.* 2004; 85, 5655–5657
- [12] Dewei C, Xi L, Adnan Y, Chang Ming L, Feng D, Sean L. Growth and self assembly of BaTiO₃ nanocubes for resistive switching memory cells. *Journal Of Solid State Chemistry*, 2014; 214, 38–4.
- [13] Radwan AG, and Fouda ME. Memristor: Models, Types, and Applications in On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor, Chapter 2, Cham: Springer, 2015; DOI: 10.1007/978-3-319-17491-4_2.
- [14] Jarosław D, Daman W, Tomasz K, Ewa M. Memristors: a Short Review on Fundamentals, Structures, Materials and Applications. *Intl journal of electronics and telecommunications*, 2020; vol. 66, no. 2, pp. 373-381.
- [15] Waser R, Aono M. Nanoionics-based resistive switching memories. *Nat. Mater.* 2007; 6, 833–840.
- [16] Asamitsu A, Tomioka Y, Kuwahara H, Tokura Y. Current switching of resistive states in magnetoresistive manganites. *Nature* 1997; 388, 50–52.
- [17] Kozicki M, Yun M, Hilt L, Singh A. Applications of programmable resistance changes in metal-doped chalcogenides. *Electrochem. Soc: Pennington NJ USA*, 1999; 298–309.
- [18] Beck A, Bednorz JG, Gerber Ch, Rossel C, Widmer D. Reproducible switching effect in thin oxide films for memory applications. *Appl. Phys. Lett.* 2000; 77, 139–141.
- [19] Hickmott T. Low-frequency negative resistance in thin anodic oxide films. *J. App. Phys.* 1962; 33, 2669–2682.
- [20] Dearnaley G, Stoneham A, Morgan D. Electrical phenomena in amorphous oxide films. *Rep. Prog. Phys.* 1970; 33, 1129.
- [21] Beck A, Bednorz JG, Gerber Ch, Rossel C, Widmer D. Reproducible switching effect in thin oxide films for memory applications. *Appl. Phys. Lett.* 2000; 77, 139–141.
- [22] Choi B, Jeong DS, Kim SK, Rohde C, Choi S, Oh JH, Kim HJ, Hwang CS, Szot K, Waser R, Reichenberg B, Tiedke S. Resistive switching mechanism of TiO₂ thin films grown by atomic-layer deposition. *J. Appl. Phys.* 2005; 98, 033715.
- [23] Seo S, Lee MJ, Seo DH, Jeoung EJ, Suh DS, Joung YS, Yoo IK, Hwang IR, Kim SH, Byun IS, Kim J-S, Choi JS, Park BH. Reproducible resistance switching in polycrystalline NiO films. *Appl. Phys. Lett.* 2004; 85, 5655–5657.
- [24] Szot K, Speier W, Bihlmayer G, Waser R. Switching the electrical resistance of individual dislocations in single-crystalline SrTiO₃. *Nat. Mater.* 2006; 5, 312–320.

- [25] Liu S, Wu N, Ignatiev A. Electric-pulse-induced reversible resistance change effect in magnetoresistive films. *Appl. Phys. Lett.* 2000; 76, 2749–2751.
- [26] Quintero M, Levy P, Leyva AG, Rozenberg MJ. Mechanism of electric-pulse-induced resistance switching in manganites. *Phys. Rev. Lett.* 2007; 98, 116601.
- [27] Choi BJ, Yang JJ, Zhang MX, Norris KJ, Ohlberg DAA, Kobayashi NP, Medeiros-Ribeiro G, Williams RS. Nitride memristors. *Appl. Phys. A* 2012; 109, 1–4.
- [28] Ha SD, Ramanathan S. Adaptive oxide electronics: A review. *J. Appl. Phys.* 2011; 110, 071101.
- [29] Jeong DS, Schroeder H, Breuer U, Waser R. Characteristic electro forming behavior in Pt/TiO₂/Pt resistive switching cells depend ing on atmosphere. *J. Appl. Phys.* 2008; 104, 123716–123716-8.
- [30] Norpeth J, Mildner S, Scherff M, Hoffmann J, Jooss C. In situ TEM analysis of resistive switching in manganite based thin-film heterostructures. *Nanoscale.* 2014; 6, 9852–9862.
- [31] Ge C. et al. Toward switchable photovoltaic effect via tailoring mobile oxygen vacancies in perovskite oxide films. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016; 8, 34590–34597.
- [32] Yao L, Inkinen S, van Dijken S. Direct observation of oxygen vacancy driven structural and resistive phase transitions in La_{2/3}Sr_{1/3}MnO₃. *Nat. Commun.* 2017; 8, 14544.
- [33] Valov I, Waser R, Jameson JR, Kozicki MN. Electrochemical metallization memories – fundamentals, applications, pros pects. *Nanotechnology.* 2011; 22, 254003.
- [34] Liu D, Cheng H, Zhu X, Wang G, Wang N. Analog memristors based on thickening/thinning of Ag nanofilaments in amor phous manganite thin films. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2013; 5, 11258–11264.
- [35] Yang JJ, Strukov DB, Stewart DR. Memristive devices for com puting. *Nat. Nanotechnol.* 2013; 8, 13–24.
- [36] International Technology Roadmap for Semiconductors 2013, Available [Online] Available from: <http://www.itrs.net/>. Accessed on February 2025.
- [37] Wey TA, Jemison WD. Variable gain amplifier circuit using tita nium dioxide memristors. *IET Circ. Dev. Syst.* 2011; 5, 59–65.
- [38] Dongale TD, Shinde SS, Kamat RK, Rajpure KY. Nanostructured TiO₂ thin film memristor using hydrothermal process, *Journal of Alloys and Compounds.* 2014; vol. 593, pp. 267–270, DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.01.093.
- [39] Marani R, Gelao G, and Perri AG, A review on memristor applications, *Electronic Devices Laboratory, Electrical and Information Engineering Department, Polytechnic University of Bari, Digital Library of Cornell University: arXiv:1506.06899, https://arxiv.org*, 2015.

- [40] Kirar V.P.S., “Memristor: The Missing Circuit Element and its Application”, International Scholarly and Scientific Research & Innovation. 2012; vol. 6, no. 12, pp. 1395- 1397.
- [41] Prieto A, Prieto B, Ortigosa EM, Ros E, Pelayo F, Ortega J, Rojas I, Neural networks: An overview of early research, current frameworks and new challenges, Neurocomputing, 2016; DOI: 10.1016/j.neucom.2016.06.014.
- [42] Radwan AG Fouda M, Memristor: Models, Types, and Applications in On the Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor, Chapter 2, Cham: Springer, 2015; DOI: 10.1007/978-3-319-17491-4_2.
- [43] Mazumder P, Kang S, Waser R, Memristors: Devices, Models, and Applications. Proceedings of the IEEE, 2012; vol. 100, no. 6, pp. 1911 1919, DOI: 10.1109/JPROC.2012.2190812.
- [44] Marani R, Gelao G, Perri AG, A review on memristor applications. Electronic Devices Laboratory, Electrical and Information Engineering Department, Polytechnic University of Bari, Digital Library of Cornell University: arXiv:1506.06899, <https://arxiv.org>, 2015.