





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Derleme Makalesi

Derleme: Elektroaktif Polimerler

 Bahar Şölen AKDEMİR^{a,*},  İhsan Murat KUŞOĞLU^b

^a Nanobilim ve Nanomühendislik Bölümü, Nanoteknoloji Enstitüsü, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, TÜRKİYE

^b Duisburg-Essen Universität, Technical Chemistry I, Duisburg, GERMANY

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: solenakdemir@gmail.com

DOI:10.29130/dubited.1071302

Öz

Bu çalışmada akıllı malzemelerinden biri olan elektroaktif polimerlerin çeşitleri, yapıları, çalışma mekanizmaları ve kullanım alanları tanıtılmıştır. Akıllı malzemelere duyulan ihtiyaç geleneksel aktüatörlerden farkı ortaya konarak açıklanmıştır. Elektroaktif polimerlerin tarihsel gelişimi, ilk ticari ürünü, çalışma mekanizması, uygulama alanları ve çeşitleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Elektronik ve iyonik elektroaktif polimer çeşitleri ayrıntılı bir şekilde ele alınarak okuyucuya malzemeleri kolayca karşılaştırabilme imkanı tanınmıştır. Bu derleme ile Türkçe literatüre elektroaktif polimerler ile ilgili temel bir kaynak kazandırılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı malzemeler, İyonik elektroaktif polimerler, Elektronik elektroaktif polimerler

Review: Electroactive Polymers

ABSTRACT

In this study, the types, structures, working principles and applications of electroactive polymers were introduced. The need of smart materials was explained with the addressing the difference between the commercial actuators. The detailed knowledge about the historical development, first commercial product, working principle, application and types of electroactive polymers were given. The opportunity of comparison among the electroactive polymer types was provided by discussing the electronic and ionic electroactive polymers in detail. With this review, it is aimed to provide a base reference in Turkish literature about electroactive polymers.

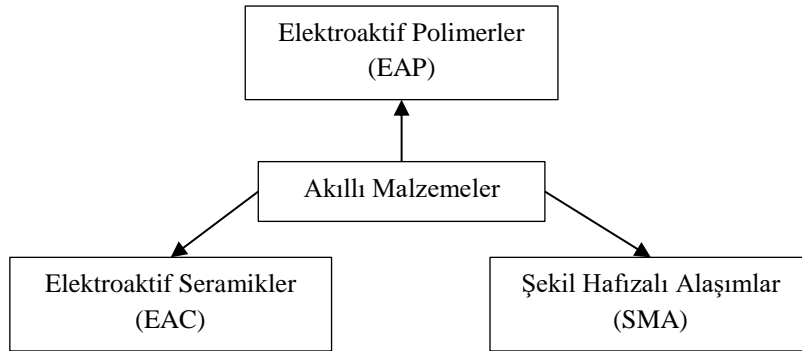
Keywords: Smart materials, Ionic electroactive polymers, Electronic electroactive polymers

I. GİRİŞ

Teknolojinin hızla gelişmesiyle günlük hayatta kullandığımız teknolojik cihazlar da hızla güncellenmektedir. Akıllı televizyonlar, telefonlar, arabalar, hatta evler; yüksek performanslı bilgisayarlar bunlardan sadece bazılarıdır. Bu gelişen teknolojik cihazları günlük yaşantımıza adapte edebilmek içinse bu gelişmelere adapte olabilen enerji kaynakları gerekmektedir. Bu nedenle akıllı malzemeler kullanılarak çeşitli enerji kaynakları üretilmeye başlanmıştır.

Aktüatörler bir enerji formunu başka bir enerji formuna çevirerek sisteme enerji sağlarlar. Elektromotorlar ve yanma motorları gibi geleneksel aktüatörler [1], [2] son zamanlarda gelişen teknolojik cihazlara enerji sağlama konusunda yetersiz kalmaktadırlar. Bu tip geleneksel aktüatörler yerine daha hafif, daha küçük ve daha verimli aktüatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için akıllı malzemeleri aktüatör sistemlerine dahil ederek yeni aktüatörler geliştirilmektedir.

Akıllı malzemeler, çevresel uyarılara gerçek zamanlı ya da gerçek zamanlıya yakın tepki verebilen malzemeler olarak tanımlanabilir [3], [4]. Bu görülebilir ve ölçülebilir çevresel enerji etkisiyle fiziksel özelliklerinin bir ya da daha fazlasını değiştirebilirler. Bu tepkiler tekrarlanabilir, tersinir, hızlı ve belirli olmalıdır [1], [5]. Şekil 1’de gösterildiği gibi akıllı malzemeler genel olarak şekil hafızalı alaşımlar (shape memory alloys/SMA), elektroaktif seramikler (electroactive ceramics/EAC) ve elektroaktif polimerler (electroactive polymers/EAP) olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir.



Şekil 1. Akıllı malzeme çeşitleri

Nikel-titanyum alaşımları gibi şekil hafızalı alaşımlar savaş uçaklarındaki hidrolik hat bağlantılarından medikal alandaki kateter damarlarına kadar çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Ama EAP'lere nazaran bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Şekil hafızalı alaşımlar yüksek kuvvet ve yer değiştirmeye sahip olmalarına rağmen yavaş tepki süresine, geniş mekanik histeresise ve kısa çevrim süresine sahiptirler. Elektroaktif seramikler de kompakt ve hızlı tepki verebilen malzemelerdir. Ancak göreceli olarak düşük mekanik aktivasyona (<%1 gerinim) ve kırılğan bir yapıya sahip olup oldukça pahalıdırlar [4]. Şekil hafızalı alaşımlar, elektroaktif seramikler ve elektroaktif polimerlerin özelliklerinin karşılaştırmalı tablo 1’de verilmiştir [6].

Bu derlemede elektroaktif polimerlerin çeşitleri, çalışma prensipleri ve kullanım alanlarından çeşitli kaynaklardan derlemeler yapılarak bahsedilecektir.

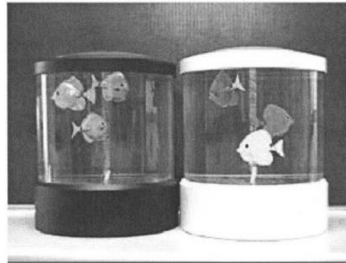
Tablo 1. Elektroaktif seramik, şekil hafızalı alaşım ve elektroaktif polimerlerin karşılaştırmalı tablosu [6]

Özellik	Elektroaktif seramik	Şekil hafızalı alaşımlar	Elektroaktif polimerler
% aktivasyon gerinimi	0,1-0,3	< 8	> 1 (>200'e kadar)
Tıkama kuvveti (Mpa)	30-40	~700	0,1-3
Aktivasyon-hız değerleri (s)	10^{-6} -1	$1-10^2$	10^{-6} - 10^2
Yoğunluk (g/cm^3)	6-8	5-6	0,9-2,5
Aktivasyon voltajı (V)	50-800	5	2-7
Tüketilen enerji (W)	1	1	10^{-3}
Mekanik tepki	Kırılğan	Elastik	Elastik

II. ELEKTROAKTİF POLİMERLER

1990'lı yılların başlarında elektrik alana şekil değiştirerek tepki verebilen bir polimer keşfedilmiştir. Bu polimerlere “elektroaktif polimerler” adı verilmiştir. İlk elektroaktif polimer 1880 yılında Röntgen tarafından kullanılan doğal kauçuktur. Röntgenin çalışmasında doğal kauçuğun ucuna kendisinden 2 kat daha fazla ağırlığa sahip bir yük asılarak doğal kauçuğa voltaj uygulanmıştır. Uygulanan voltaj sonrasında doğal kauçuğun boyunun değiştiğini gözlemlenmiştir [7]. Daha sonra 1925 yılında Eguchinin çalışmaları sonucunda “elektret” adı verilen piezoelektrik polimer keşfedilmiştir. Çeşitli reçine ve parafin karışımlarından meydana gelen elektretler sıvı haldeyken elektriği çok az iletirken katı haldeyken oldukça iyi yalıtkanlardır. Çalışmada bu sıvıya bütün katılma süreci boyunca elektrik alan uygulanarak katılma sonucunda malzemede kalıcı kutuplaşmaların oluştuğu gözlemlenmiştir. Kutupların kalıcılığını test etme amaçlı malzeme ateş ve UV ışını gibi uyarılara tabii tutulmuştur. Bıçak gibi kesici aletlerle malzemeye zarar verilmiştir. Ancak kutupların bu uyarıların hiçbirinden etkilenmediği farkedilmiştir. Hatta bu kutuplar yıllar sonra bile zarar görmeden kalabilmişlerdir [8]. Takip eden yıllarda Bar-Cohen ve ekibi tarafından günümüzde en çok kullanılan poli (viniliden florür) (PVDF) adı verilen polimeri keşfedilmiştir. Bar-Cohen'in düzenlediği kongrede bu keşfi tanıtmak için bir robotik kol tasarlanmıştır ve bir bilek güreşi müsabakası düzenlenmiştir. Bu müsabakada yapılan bilek güreşini robotik kol kazanmıştır. Böylelikle elektroaktif polimerler üzerine yapılan çalışmalar hız kazanarak artmaya başlamıştır [6], [9].

Başlangıçta elektroaktif polimerlerin şekil değişimleri ve genleşmeleri oldukça küçüktür. Yapılan çalışmalar sonucunda genleşmeleri iki katına kadar gelişmiştir. İnsan kaslarına olan benzerlikleri sebebiyle “yapay kas” olarak da adlandırılmaya başlamışlardır. Böylelikle bilim insanları biyomimetik robotlar üretmeye başlamıştır. İlk ticari elektroaktif polimer 2002 yılında Eamex adı verilen bir Japon şirketi tarafından üretilmiştir. Şekil 2'de gösterildiği gibi bu pil yerine iletken bobinle hareket edebilen bir balıktır [10].



Şekil 2. İlk ticari EAP robotik balık [10]

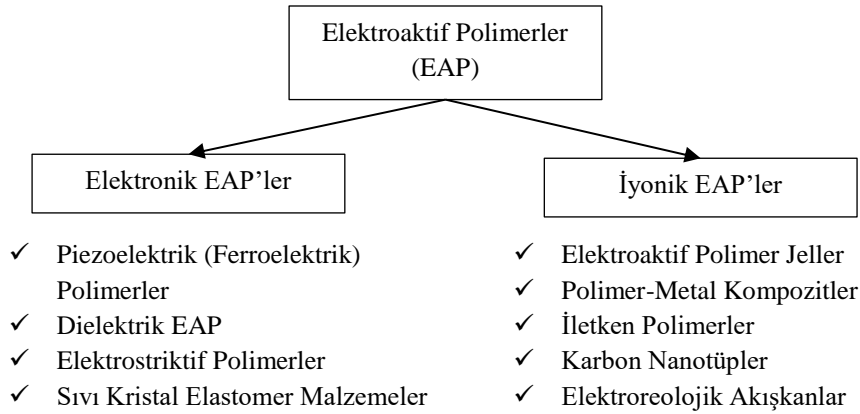
EAP'ler elektrik uyarı altında şekil ve boyut değişimiyle kayda değer bir gerilim ve/veya gerinim sergilerler [3]–[5], [9], [11]–[14]. Bunlar geleneksel elektrik motorlarının tork ürettiği gibi hareket

üretebilen aktüatörlerdir [4]. Ama geleneksel aktüatörlerden daha hafif, daha küçük ve daha verimlidirler. EAP'ler elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirebilirler [4], [5], [13], [15]. Sıcaklık, pH, ışık, manyetik ve elektrik alan gibi çevresel uyarılara kontrollü bir şekilde tepki verebilen akıllı malzemelerdir. Aynı zamanda yüksek performans aktüatörleri olarak da kabul edilmektedirler [3]–[5], [9], [11]–[14].

Genel olarak EAP'ler biyomedikal, yapay kas, ilaç salınımı ve nano biyomimetik aktüatörler gibi yüksek teknoloji gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar [3]–[5], [9], [11], [13], [16]. Bunlara ek olarak elektronik sektörde mini- ve mikro-robotik bileşenler, görsel gösterimler, düz panel hoparlörler ve su altı uygulamalarında kullanılmak üzere akustik dönüştürücüler olarak tercih edilmektedirler [4], [13], [15], [17].

EAP'ler elektromekanik özellikleri, yüksek aktivasyon gerinimleri, kısmen düşük aktivasyon gerinimleri [5], kolay üretilebilirlikleri, hafiflikleri, düşük maliyetleri [4], [5], [12], [15], esnek davranışları ve küçük boyutlarda yüksek verimlilikleri [4] gibi çeşitli avantajları sebebiyle yüksek teknoloji uygulamalarında tercih edilirler [17]. Aynı zamanda EAP'ler elektroaktif seramiklere göre neredeyse 2 kat büyüklükte aktivasyon gerinimine sahiptirler. Şekil hafızalı alaşımlara kıyasla yüksek tepki hızı, çevrim süresi ve düşük yoğunlukları EAP'lere avantaj sağlamaktadır [5], [9]. Diğer yandan yeterli olmayan tepki hızları [13] ve düşük elektromekanik çevrim verimlilikleri [15] kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Yakın zamanlı çalışmalar EAP'leri yüksek teknoloji uygulamalarına adapte edebilmek için bu kısıtlamaların üzerine yoğunlaşmıştır [17], [18].

Şekil 3'te gösterildiği gibi EAP'ler fiziksel durumları ve aktivasyon türlerine göre temel olarak iyonik EAP'ler ve elektronik EAP'ler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar [4].



Şekil 3. Elektroaktif polimer çeşitleri

III. İYONİK ELEKTROAKTİF POLİMERLER

Aktivasyon sırasında polimer içindeki iyonların hareketi ya da difüzyonu sayesinde tepki verebilmektedirler [9], [19]. Aktivasyonda iyon hareketliliğinin sağlanabilmesi için elektrolit adı verilen sıvı bir ortama ihtiyaç duyulmaktadır [4], [9]. Aktivasyon, iyon aktiviteleri olarak tanımlanan, kimyasal reaksiyon sırasında gerçekleşen iyon değişimleri ya da çevresel olarak uygulanan yüklere bağlı olan iyon titreşimleri olarak da adlandırılan mekanizma ile gerçekleşir [19]. İyon titreşimleri 10 voltun altında yaklaşık 1-2 volta kadar düşen aktivasyon enerjisi gerektirmektedir. Bu da elektronik EAP'lere göre oldukça düşük bir aktivasyon voltajıdır. İyonik EAP'ler, aktivasyonları yüksek oranda iyonik difüzyona bağlı olduğundan diğer EAP türlerine göre genellikle daha yavaş tepki sürelerine sahiptirler [19]. Aktivasyon sırasında iyonik difüzyon için gerekli ıslaklığın sağlanma zorunluluğu, iletken polimerler ve karbon nano-tüpler dışında özellikle iyonik polimer-metal kompozit EAP'lerde

doğru akımla elde edilen şekil değişimini devam ettirebilmenin zorluğu başlıca dezavantajlarından [9].

İyonik elektroaktif polimerler genellikle iki elektrot arasında yerleştirilmiş elektrolit membran olmak üzere üç katmanlı bir sandviç yapıdadırlar. Elektrolit membran da polimer içerisinde dağılmış metal parçacıklardan oluşmaktadır. Bunlar da iyonomer, zıt yüklü iyonlar ve çözücü madde moleküllerini içermektedir. İyonomer olarak genellikle Nafion ya da Flemion kullanılmaktadır. Çözücü madde olarak su ya da iyonik bir sıvı kullanılırken; katyon olarak da lityum, sodyum ya da potasyum gibi alkali metal katyonları kullanılmaktadır. Elektrot olarak ise iletkenliklerinden ve aşınma dirençlerinden dolayı platin ya da altın tercih edilmektedir [20].

İyonik elektroaktif polimerler üretim yöntemlerine ve özelliklerine göre çok çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Bu sebeple oldukça farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Temel olarak iyonik elektroaktif polimerlerin üretim yöntemi üç aşamadan oluşmaktadır: membranın hazırlanması, elektrotun hazırlanması ve redüksiyon reaksiyonları. İyonomer olarak çoğunlukla sülfonlu tetrafloroetilen-esaslı floropolimer-kopolimer içeren Nafion (C₇H₉F₁₃O₅S·C₂F₄) kullanılmaktadır [17]. Öncelikle Nafion membranın yüzey alanı zımparalanarak artırılır. Daha sonra iyon değişimi için iyonik sıvı içerisine daldırılır. İyonik sıvı içerisindeyken kimyasal kaplama yöntemi ile elektrotları oluşturabilmek için elektrot olarak kullanılacak olan metal tuzu solüsyona eklenir [21], [22]. Bu işlem farklı iyonik elektroaktif polimerler için küçük farklılıklar içermektedir. Örneğin, iletken polimerlerde metal tuz yerine Nafion ile birlikte polipirol kullanılmaktadır [23]. İletken polimer jellerde ise durum biraz daha farklıdır. Elektrolit membran transparan poli (dimetilsiloksan) (PDMS) ve iyonik sıvı kullanılarak hazırlanır. Poli (3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT) ve sodyum poli (stiren sülfonat) (PSS) içeren iletken polimer transparan elektrolit membran üzerine sprey ile kaplanır [24]. Elektroeolojik akışkanlarda ise iki temel üretim aşaması bulunmaktadır: parçacıkların üretimi ve parçacıkların akışkan içerisinde dağıtılması. Kullanılan akışkan olarak ise genellikle silikon yağı kullanılmaktadır. Parçacık üretiminde çoğunlukla polianilinden (PANI) yararlanılır ve parçacıklar nanoparçacık (0D), nanotel/nanotüp (1D) ya da nanofilm (2D) olarak üretilebilir [25].

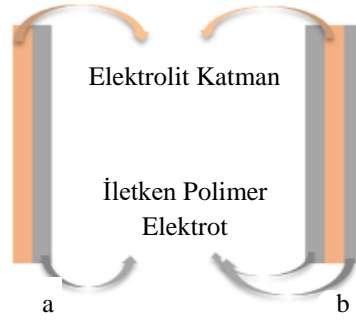
Temelde 5 çeşit iyonik EAP çeşidi bulunmaktadır. Bunlar;

- İletken polimerler
- İyonik polimer-metal kompozitler (IPMK)
- İyonik polimer jeller
- Elektroeolojik akışkanlar
- Karbon nano-tüpler (KNT)'dir [3], [9], [26], [27].

A. İLETKEN POLİMERLER

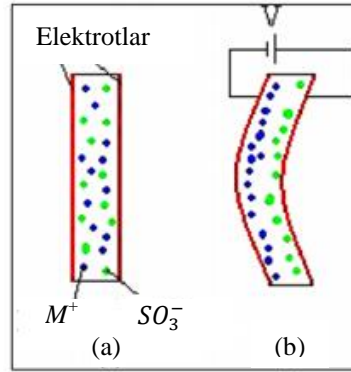
Malzemenin içinde genellikle pozitif iyonların titreşimine izin veren iletken organik malzemelerden oluşurlar. Aktivasyon mekanizmaları oksidasyon ve redüksiyon tepkimeleri sırasında farklı iyonik aktivitelelerin oluştuğu elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır. Yükleri dengelemek için iletken polimer elektrottan ve iletken polimer elektrota doğru iki yönlü iyon akışı ile deformasyon oluşur. Böylelikle hacimsel değişim gerçekleşir [19].

Yapılarında iletken polimer elektrot ve elektrolit katman bulundurlar. İki katmanlı ya da üç katmanlı olabilirler [26]. Şekil 4'te iki katmanlı ve üç katmanlı yapılar gösterilmektedir.



Şekil 4. (a) iki katmanlı (b) üç katmanlı iletken polimer iyonik EAP [26]

İki katmanlı iletken polimer yapılarında oksidasyon reaksiyonu yapının tek yönde bükülmesini sağlar. Diğer yönde bükülme redüksiyon reaksiyonu ile gerçekleşir. Üç katmanlı yapıda ise oksidasyon reaksiyonu sonucu anotta genişleme, redüksiyon reaksiyonu sonucu olarak da katotta büzülme gerçekleşir ve tek yönde bir bükülme elde edilir. Uygulanan potansiyelin yönünün değiştirilmesi ile diğer yönde bükülme elde edilir [19], [26]. Oksidasyon reaksiyonunun gerçekleştiği iletken polimer katman genişlerken, redüksiyon reaksiyonunun gerçekleştiği iletken polimer katman büzülür. Bükülme bu sayede gerçekleşir [26]. Şekil 5'te mekanizmanın görsel şekli verilmektedir.

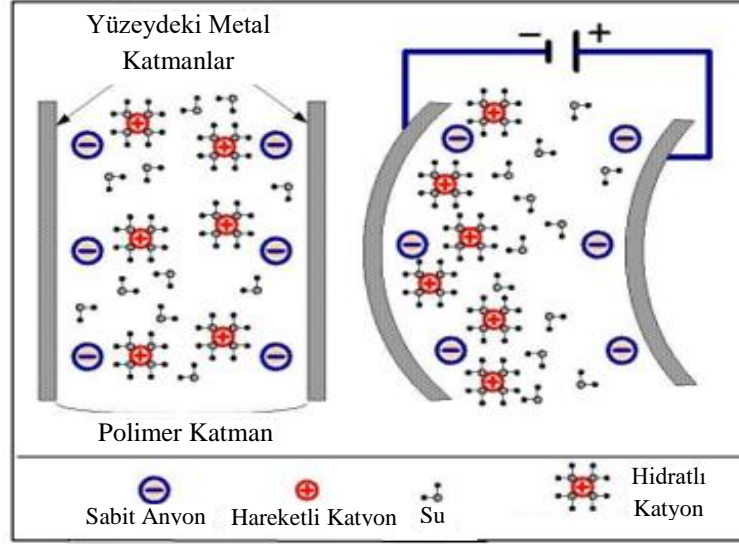


Şekil 5. İletken polimer iyonik EAP'lerde bükülme [26]

Aktivasyon voltajları oldukça düşüktür (1-2 volt). Aktivasyon gerilmeleri ise %2 ile %20 arasında değişmektedir. Ancak oldukça düşük çalışma verimliliğine sahiptirler (yaklaşık %1). Aktivasyon, polimer zincirleri arasındaki iyon difüzyonuna bağlıdır. Tepki süresi ise polimer ağının oryantasyonuna ve hareketli iyon yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle deformasyon hızı oldukça yavaştır (%12 s-1). Biyosensör olarak kullanılan enzimlerde hız ve duyarlılığı arttırmak için oldukça tercih edilmektedir [19]. Ayrıca iletken polimerler yüksek esnekliklerinden dolayı sıcaklık sensörü olarak elektronik ten (e-skin) ve sağlık takibi uygulamalarında [28]; ultra ince fiber yapıda nöral elektrotlar, nöral dokular, kas doku yenilenmesi ve esneyebilir, bükülebilir elektronik uygulamalarında [29] ve çok fonksiyonlu sensör uygulamalarında kullanılmaktadır [30]. İyonik polimerler biyolojik uygulama alanlarının dışında hidrojen depolama ve yakıt pili uygulamalarında da kullanılmaktadırlar [31].

B. İYONİK-POLİMER-METAL KOMPOZİTLER (IPMK)

IPMK'ler uygulanan elektrik alana bağlı olarak mekanik deformasyon oluşturan elektroaktif polimerlerdir. IPMK'ler aynı zamanda yarı geçirgen membran olarak da adlandırılıp elektrik alanla birlikte anot yönünde bükülme gerçekleştirebilmektedirler. Bu bükülme polimer matris içindeki hareketli katyonların hareketleri vasıtası ile oluşmaktadır [32]. Şekil 6'da IPMK'lerin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 6. IPMK'nin şematik gösterimi [33]

IPMK'lerin temel çalışma prensibi uygulanan elektrik alana bağlı olarak polimer membranda pozitif yüklü iyonların ve su moleküllerinin yeniden dağılmasıyla oluşan bölgesel şişme deformasyonudur. Bu da elektriksel olarak kontrollü deforme edilebilen yumuşak aktüatörleri böylelikle de yumuşak robotik aktüatörleri yaratmaktadır [34].

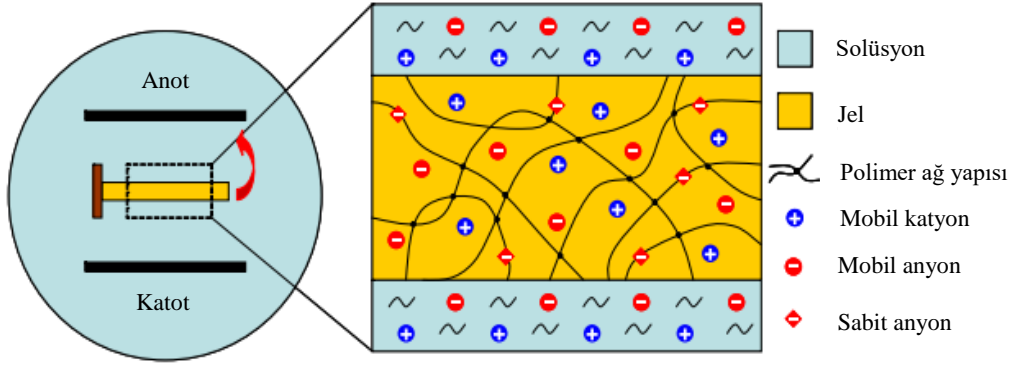
IPMK polimer membran polimer omurgadaki sabit anyonlardan ve serbestçe hareket edebilen katyonlardan oluşmuştur. Sulu durumda, polimer içindeki mikro kanallar serbest katyonların hareketine izin verebilmek için genişler ve su moleküllerini membrana doğru çeker. IPMK elektrotlara voltaj uygulandığı zaman katyonlar anyondan uzağa doğru titreşirler ve yakınlarındaki su moleküllerini de kendileriyle birlikte sürüklerler. Bu katot yüzeyine yakın kısımda bölgesel şişmeye, anot yakınlarında ise büzölmeye yol açan ozmotik basıncı oluşturur ve IPMK'de bütünsel bir deformasyon meydana gelir [34].

Yumuşak ve esnek oluşu, düşük itici güç voltaj ihtiyacı (<5V) ve sulu ortamlarda çalışabilmesi IPMK'lerin avantajlarından. Genellikle çırpma hareketine benzer bükülme elde edebilmek için basit kantilever yapıda üretilmektedir. Ancak tasarımda yapılabilecek değişikliklerle farklı yönelimlere sahip bükülmeler de elde edilebilmektedir. Su altı uygulamalarında, çeşitli biyomedikal sistemlerde, esnek robotik sistemlerde ve bazı enerji toplama sistemlerinde kullanılmaktadır [35]. En çok tercih edilenler de Nafion tabanlı IPMK'lerdir [36]. Pratik uygulamalar için IPMK'lerin küçük deformasyon miktarlarında yaklaşık 3V sinyal üretmeleri gerekmektedir. Ancak var olan IPMK aktüatörler yaklaşık 1V sinyal üretebilmektedir [37]. Son zamanlarda PEDOT:PSS gibi farklı polimerler kullanılarak bu sorunun üstesinden gelebilmek için çalışmalar yapılmaktadır [38].

C. İYONİK POLİMER JELLER

Polimer jeller kimyasal reaksiyonlar, sıcaklık, elektrik alan, çözeltiler ve ışıkla aktive edilebilen çapraz bağlı polimer yapılarıdır. Bu özellikleri sebebiyle yüksek şişme ve büzülme aktivasyonları gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler. Bu aktivasyon sabit yüklerin elektrostatik itme kuvvetiyle oluşan kimyasal genişleme stresi ile gerçekleşebilmektedir. Elektrikle uyarılabilen polimer jellere poliakrilamid ve poli (vinil alkol) örnek olarak verilebilir. Jel sıvı solüsyona daldırıldığı zaman pH değişimine su alarak ya da su kaybederek hacimsel değişimle tepki vermektedir. Bu reaksiyon elektriksel olarak uyarılabilir. Aktivasyon gerçekleştiğinde, katodun alkali, anodun ise asidik olması sebebiyle jel bükülür [26], [39], [40]. Bu çok katlı jel yapının bükülmesi oldukça yavaş gerçekleşmektedir. Çünkü iyonların jelin içerisinde difüze olabilmeleri için zamana ihtiyaçları vardır. Poli (akrilik asit) jel numunelerin anot ile temas halindelerse pozitif konkav şeklinde, hiçbir elektrotla temas halinde değillerse de negatif konkav şeklinde bükülmesi beklenmektedir [40].

Polimer jeller şekil 7’de de gösterildiği gibi katyon, anyon, sabit yük, tabakalar arasında bulunan sıvı ve katılardan oluşmaktadır. Solüsyon ise katyonlar, anyonlar ve sudan oluşmaktadır [40].

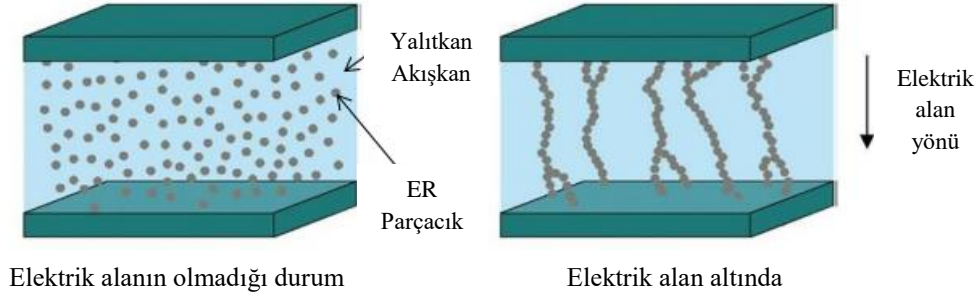


Şekil 7. İyonik polimer jel yapısının şematik gösterimi [40]

Jel ve solüsyon içinde bulunan her bileşen elektriksel olarak denge konumunu korur. Elektriksel alana bağlı bükülme mekanizması jelin içinde bulunan iyonlara ve solüsyonun tipine bağlıdır [40]. Polimer jeller inorganik seramik elektrolitlerden daha fazla iyonik iletkenliğe sahiptirler. Bu sebeple polimer jeller günümüz giyilebilir teknolojisine uyarlanabilecek esnek süper kapasitör uygulamalarında kendine geniş bir yer edinmiştir [41], [42].

D. ELEKTROREOLOJİK AKIŞKANLAR

Elektroreolojik akışkanlar elektrik alana maruz bırakıldıklarında akışkanın viskozitesini değiştiren parçacıklara sahiptirler. 1-10 μm çapa sahip parçacıklar iletken değilken akışkan – düşük viskoziteli – özellik taşırlar. Mineral yağ, silikon yağı ya da parafin yağı gibi sıvılar; mısır nişastası, silika küreleri ve alümina-silikat gibi parçacıklar elektroreolojik akışkan üretmek için kullanılabilirler. Selüloz, nişasta, kitosan ve türevleri gibi doğal polisakkaritler en çok çalışılan elektroreolojik dolgu parçacık türlerindedir [43]. Şekil 8’de gösterildiği gibi sıvının içerisinde bulunan parçacıklar voltaj uygulandığı zaman elektrik alan doğrultusunda hizalanarak zincir yapı oluştururlar. Böylelikle akışkanın viskozitesini arttırmış olurlar ve sıvı elektrik alan altında daha çok jel gibi davranır. Elektrik alan ortadan kaldırıldığı zaman elektroreolojik akışkanlar düşük viskoziteli sıvı hallerine geri dönerler [26]. Elektroreolojik akışkanlar hızlı, tersinir, sürekli ve kontrol edilebilir reolojik davranışları sebebiyle şok sönmüleme, akıllı parlatma, akıllı yağlama, mikro akışkan kontrolü, robotik ve medikal uygulamalarda kullanılabilir [44].

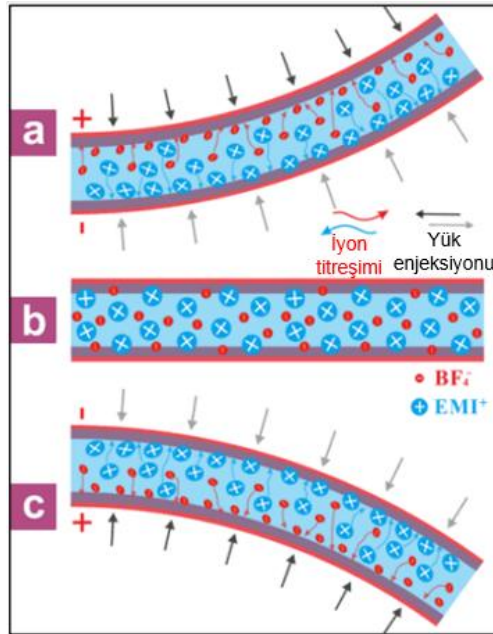


Şekil 8. Elektoreolojik akışkan görseli [26]

E. KARBON NANO-TÜPLER (KNT)

KNT'ler 1-20 nm arasında değişen çapa sahip olup tek duvarlı KNT'ler (TD-KNT) ve çok duvarlı KNT'ler (ÇD-KNT) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Tek duvarlı KNT'ler bir tek grafen katmanından oluşurlar. Çok duvarlı KNT'ler ise daha büyük çapa ve üretim koşullarına göre değişen dağılılırlığa ve duvar sayısına sahiptirler [4].

Elektriksel aktivasyon her bir KNT'de ya da KNT makromolekülünde (genellikle yaprak formunda) çift katmanlı yük enjeksiyonuna ve aynı zamanda karbon bağ uzunluğuna bağlıdır [4][26]. Bu aktivasyon KNT'lerin elektrolit solüsyona daldırılmasıyla ve KNT'ler ile karşı elektrot arasında bir voltaj uygulanmasıyla elde edilir. KNT üzerinde bulunan iyonlar elektrolit içinde diğer KNT'nin dış yüzeyinde bulunan karşı yüklü iyonları kendine doğru çeker. Bu etki KNT'nin elektronik yapısının Culomb kuvvetiyle de birlikte tekrar düzenlenmesine neden olur. Bunların hepsi göz önünde bulundurulduğunda KNT'lerde boyutsal değişim meydana gelir [4]. Aktivasyon mekanizmasının görseli şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. KNT aktüatör gösterimi [26]

KNT'lerden üretilen aktüatörlerde genellikle elektrik uyararla oluşturulan birim kütle başına düşen mekanik iş (iş yoğunluğu) oldukça yüksektir. KNT aktüatörler yüksek modülüslerinden dolayı diğer

aktüatörlere kıyasla yaklaşık 30 kat daha fazla iş yoğunluğuna sahiptirler. Ayrıca KNT aktüatörler oldukça düşük (~1V) itici güç voltajına ve elektromekanik eşleşme (elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü) değerine sahiptirler. Diğer yandan KNT aktüatörlerin üretim maliyetleri (özellikle tek duvarlı KNT) oldukça yüksek ve seri üretim kapasiteleri oldukça düşüktür [4]. Hızlı bükülme aralıklarında çabuk tepki verebilmesi sebebiyle KNT aktüatörler zıplayan robot tasarımlarında, zorlu koşullara dayanabilmesi sebebiyle uzay uygulamalarında [45], yeniden programlanabilirliği ve farklı şekiller arasında geçiş yapabilmesi sebebiyle başka hiçbir mekanik bileşene ihtiyaç duymadan çeşitli biyomimetik uygulamalarda [46] kullanılabilirlerdir.

IV. ELEKTRONİK ELEKTROAKTİF POLİMERLER

Elektronik EAP'lerde aktivasyon doğrudan elektrik alan ile uyarılan polimerdeki şekil değişimi olarak gerçekleşmektedir. Bu değişimler iki farklı mekanizma ile gerçekleşebilmektedir: zincir oryantasyonlarına bağlı olarak polimer mikroyapısındaki iç dönüşümler ve polimeri fiziksel olarak sıkıştıran elektromekanik davranımdan dolayı polimer bloklardaki dış. Elektronik EAP'lerde deformasyon doğrudan elektrostatik kuvvetlerle oluşturulduğu için (Maxwell stress gibi) tepki süresi oldukça kısadır ancak çok daha yüksek voltajlara ihtiyaç duyulmaktadır [19].

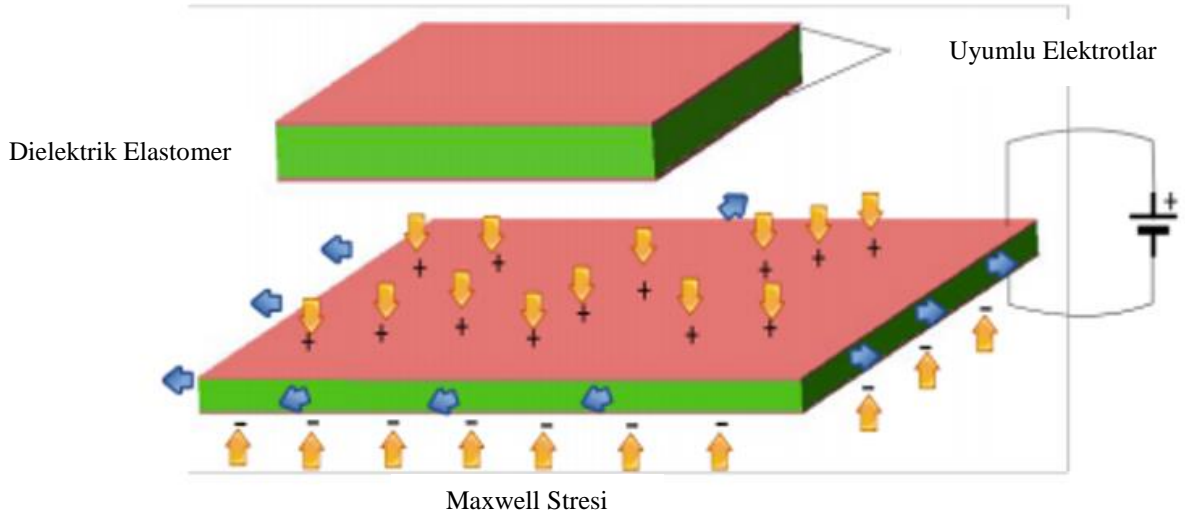
Temelde 4 çeşit elektronik EAP vardır;

- Dielektrik Elastomer
- Ferroelektrik Polimer Aktüatör
- Elektrostriktif Polimer
- Sıvı Kristal Elastomer Malzemeler

A. DIELEKTRİK ELASTOMER

Dielektrik elastomerler elektronik EAP'lerin alt başlığı olarak kabul edilmektedir ve aynı zamanda dielektrik EAP olarak da adlandırılmaktadırlar [27]. Elektrik alana maruz kaldıklarında yüksek gerinimler üretebilen ve yüksek oranda deforme edilebilen yalıtkan polimer ağından meydana gelmektedirler. Aynı zamanda yüksek aktivasyon stresine (7 Pa'a kadar), yüksek aktivasyon gerinimine (>200%), yüksek spesifik enerji yoğunluğuna (~0.15 J/g), yüksek bağlantı verimine, kısa tepki süresine (<3s) ve güvenilirlik özelliklerine sahiptirler. Ek olarak hafif, esnek ve düşük maliyetlidirler; üretimleri de kolaydır. Biyomimetik robotlar, protez cihazları, adaptif yapılar, elektroaktif akışkan pompaları, uyumlu tenler (conformable skin), yenilenebilir görme engelli cihazları, otomatik odaklamaya sahip lens sabitleyicileri, hoparlörler, şekil ve yapı sistemleri, aktif akıllı kumaşlar, sensörler ve enerji elde etme sistemleri başlıca kullanım alanlarındandır [47]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar ile düşük aktivasyon voltajlarında uzun süre mekanik dayanıma sahip kendi kendini iyileştirebilen [48] dielektrik EAP'ler tasarlanarak yaklaşık bir gramdan hafif hava robotları gibi cihazların uygulamalarında kullanılabilirlerdir [49].

Şekil 10'da da belirtildiği gibi dielektrik EAP'ler iki uyumlu elektrot arasına sıkıştırılmış dielektrik tabakadan oluşmaktadır [47]. Dielektrik EAP'lerin aktivasyonlarında elektrotlardaki elektrostatik yüklenme sonucunda elektroaktif filmde bir tepki oluşur. Elektrotlar zıt polariteyle yüklendiklerinde birbirlerini çekerler ve filmin üzerinde sıkıştırma kuvveti oluşturacak bir basınç yaratırlar. Bu sebeple filmin kalınlığı azaldıkça hacmini korumak için genişliği artar [27].

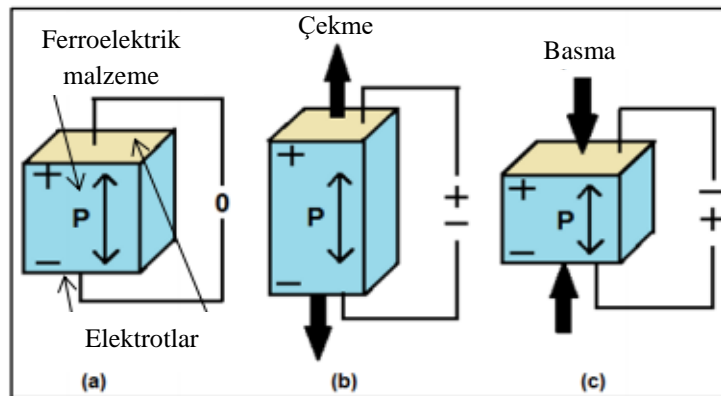


Şekil 10. Dielektrik EAP aktivasyon mekanizmasının şematik gösterimi [47]

Yıllardır bütün yalıtkan malzemelerde yüzeylerindeki serbest yüklerin malzemeyi gerinime uğratan bir stress yarattığı bilinmektedir. Bu strese Maxwell stresi adı verilir. Şekil 10'da Maxwell stresin mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. Bu mekanizma dielektrik elastomerleri çoğu elektriksel boyut değişimli malzemedan ayırmaktadır. Yaklaşık 10-200 μm kalınlığa sahip dielektrik elastomer filmin iki tarafı da uygun bir elektrotla kaplanmıştır. Karbon takviye edilmiş yağ, kullanılan elektrotlara örnek olarak verilebilir. Elektrotlara voltaj uygulandığında elektrostatik kuvvetler filmi sıkıştırır ve esnetmesine sebep olur. Filmin kalınlık yönünden sıkıştırılması zıt yüklerin birbirine yaklaşmasına neden olur. Yatay yönde esnetmesi ise aynı yüklerin birbirinden ayrılmasını ve uzaklaşmasını sağlar. Bu iki değişim de elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye çevirerek aktivasyon mekanizmasını gerçekleştirir [13].

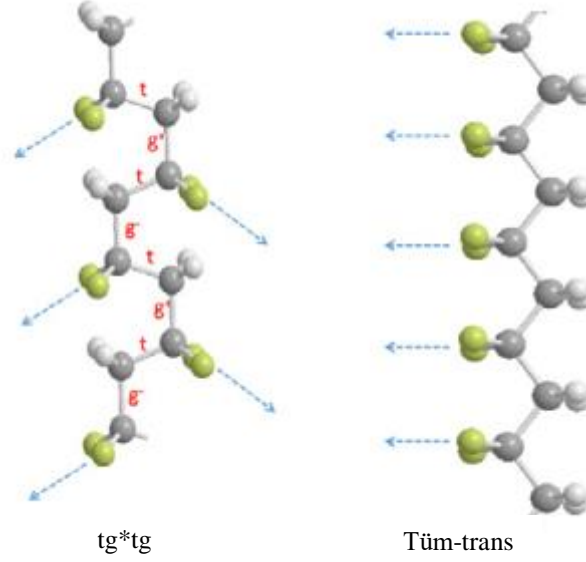
B. FERROELEKTRİK POLİMER AKTÜATÖR

Ferroelektrik polimerler piezoelektrik malzemeler gibi davranırlar. Doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki çeşit mekanizma ile elektrik enerjisini mekanik enerjiye mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine çevirebilirler. Elektrik alanın varlığına bağlı olmaksızın kalıcı dipollere sahiptirler. Bu dipoller elektrik alana göre yönlenebilmektedirler. Ferroelektrik malzemeler 20-80°C aralığında havada, suda ve hatta vakumda kullanılabilirler [19], [26]. Ferroelektriklerin genel tepki mekanizması şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Ferroelektrik polimer çalışma mekanizması [26]

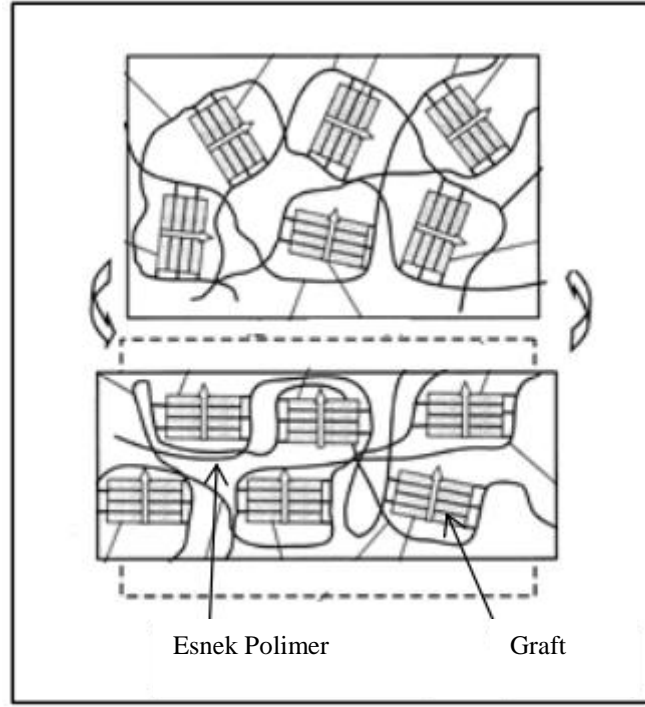
Yalıtkan ve dielektrik polimerler de simetrik olmayan piezoelektrik malzemeler gibi elektrik alanla kalıcı dipollerinin oryantasyonunu değiştirerek ferroelektrik özellik gösterebilirler. Bu dipol oryantasyonu esnemeye sebep olarak polimer zincirlerinin boylarının uzamasına neden olur. Bu etkiye elektriksel boyut değişimi (electrostriction) adı verilir. Şekil 12’de en yaygın piezoelektrik polimer olan poli (viniliden florür)’in (PVDF) dipol oryantasyonuna bağlı boyut değişimi görülmektedir. Son yıllarda ferroelektrik polimer aktüatörlerin aktivasyon voltajı düşürülerek mikro akışkan pompalarda [50] ve insan-makine arayüzlerinde [51] kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.



Şekil 12. Poli (viniliden florür)(PVDF) polimer zincirinin ferroelektrik özelliğinin şematizasyonu [47]

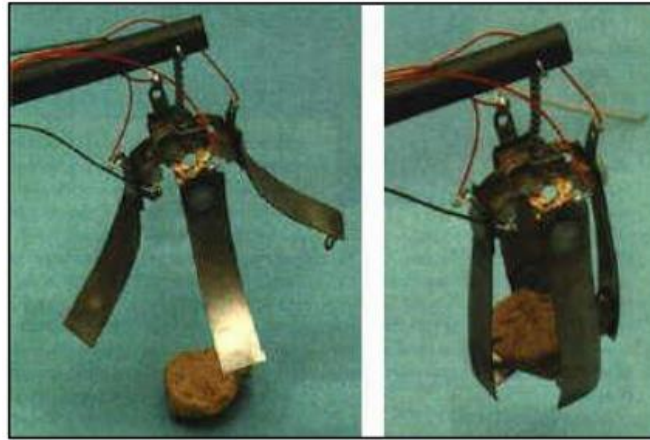
C. ELEKTROSTRİKTİF POLİMER

Bir polimerin elektrostriktif özellik gösterebilmesi için malzemenin mekanik tepkisinin doğrudan moleküler düzeydeki polarizasyonla ilişkili olması gerekmektedir [4]. Poliüretanın elektrostriktif özelliği ilk olarak 1994 yılında Scheinbeim ve ekibi tarafından raporlanmıştır [52]. Daha sonra 1998 yılında Su ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmalar sonucunda elektrostriktif graft elastomerler ortaya çıkmıştır. Elektrostriktif graft elastomerler esnek polimer yapı ve graft kristal polimer yapı olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Şekil 13’te üst taraftaki şekilde gösterildiği gibi elektrik alan uygulanmadığında graftlar elastomerin içerisinde rastgele dağılmış durumda bulunurlar. Elektrik alan uygulandığında graftlar yönlenecek elastomerin gerinime maruz kalmasına ve kalınlığının azalmasına neden olurlar [26].



Şekil 13. Elektrostriktif graft elastomer şematik gösterimi [26]

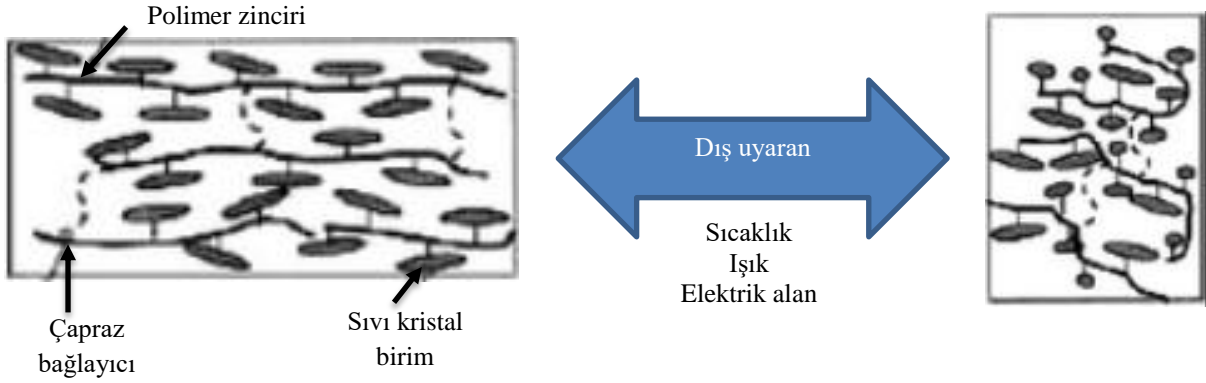
2000 yılında Kim ve arkadaşları tarafından voltaj uygulandığında uç kısmında bükülme gözlemlenen elektrostriktif kağıt keşfedilmiştir. Elektrostatik kuvvetler ve aradaki yapışkanın moleküller arası etkileşimi ile voltaj uygulandığında elektrostriktif kağıdın uç kısmında bükülme gözlemlenmektedir. Verilen voltaj yoğunluğu artırılarak daha fazla bükülme açıları elde edilebilmektedir. Kim ve arkadaşları bu yapıda birbirine emülsiyon yapıştırıcı ile tutturulan iki gümüş tabaka kullanmışlardır. Daha sonra her tabakalı yapıyı alüminyum folyo ile astarlamışlardır. Bu yapı şekil 14'te gösterilmiştir. Şekilde dört adet elektrostriktif kağıt kısıkaçtan oluşturulmuş bir düzenek bulunmaktadır. Bu kısıkaçlar voltaj uygulandığında açılmakta, voltaj kaldırıldığında ise kapanmaktadır [26]. Bunların yanında elektrostriktif polimerlere örnek olarak yüksek-enerjili-elektron ışınına maruz kalmış poli (viniliden florür-trifloroetilen) (HEEI P(VDF-TrFE)) kopolimer ve P(VDF-TrFE)-esaslı terpolimerler örnek olarak verilebilir [52]. Son zamanlarda aktüatörlerin elektrostriktif özellikleri geliştirilerek elektro-elastik davranışlarının gelişmesi üzerine çalışmalar bulunmaktadır [53], [54].



Şekil 14. Elektrostriktif kağıt kısıkaç düzeneğinin gösterimi [26]

D. SIVI KRİSTAL ELASTOMER MALZEMELER

Sıvı kristal elastomerler nematik – moleküllerin iplik şeklinde yönlenmesine verilen ad – ve izotropik fazlar arasındaki değişim ile esneme ve büzülme özelliği gösterirler. Bir polimerin nematik özellik gösterebilmesi için polarizasyona moleküllerinin yönlenmesini değiştirerek tepki vermesi gerekmektedir. Polimerde izotropik fazdan nematik faza geçişte esneme, nematik fazdan izotropik faza geçişte de büzülme etkileri görülür. Sıvı kristal elastomerlerin faz değişim özellikleri sıvı kristal faza, çapraz bağ yoğunluğuna, polimer zincirlerinin esnekliğine, sıvı kristal gruba ve dış uyarana bağlıdır. Şekil 15'te sıvı kristal elastomerin üç farklı dış uyarana karşı verdiği tepki şematik olarak gösterilmiştir [26].



Şekil 15. Sıvı kristal elastomerin anizotropik büzülme ve esneme mekanizmasının şematik gösterimi [26]

Sıcaklık uyaralı mekanizmada sıcaklık değişimine bağlı olarak sıvı kristal elastomer şekil değişimi göstermektedir. Anizotropik fazdan izotropik faza dönüşümde bağlar kısalır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte üretilen kuvvet artarken malzemenin gerinimi düşer. Sıcaklığın artmasıyla birlikte üretilen kuvvet artarken malzemenin gerinimi düşer. Işık uyaralı sıvı kristal elastomerler fotoizomerizasyon ile şekil değiştirirler. Sıvı kristal elastomer, UV ışığına maruz kaldığında fotoizomerik molekül çubukları absorplayıcı gibi davranarak bükülürler. UV ışığına maruz kaldıkları süre arttıkça sıvı kristal elastomerler büzülürler. Elektriksel olarak uyarılan sıvı kristal elastomerler ferroelektrik polimerlere benzerler. Sahip oldukları serbest enerji sebebiyle sarmal yapıdadırlar. Ferroelektrik sıvı kristal elastomerler bu sarmal yapının çözülmesi, eski haline gelmesinin önlenmesi ve stres altında akışkanlığının engellenmesi ile üretilebilmektedirler [26]. Sıvı kristal elastomerler doku mühendisliği, hücre kültürü, fotonik cihazlar, yumuşak robotik ve 4D yazıcı uygulamalarında kullanılabilir [55]–[57].

IV. SONUC

Akıllı malzemeler hayatımızda önemli bir yer tutmaktadır. Elektroaktif polimerler de elektromekanik özellikleri, yüksek aktivasyon gerinimleri, kısmen düşük aktivasyon gerinimleri, kolay üretilebilirlikleri, hafiflikleri, düşük maliyetleri, esnek davranışları ve küçük boyutlarda yüksek verimlilikleri sebebiyle oldukça tercih edilmektedirler. Elektronik ve iyonik polimerler yapısal özellikleri ve farklı ortamlarda çalışabilme özelliklerinden dolayı çok çeşitli uygulamalarda kullanım alanı bulabilmektedirler. En büyük avantajları kullanılacak ortama ve istenilen çıktıya göre rahatça modifiye edilebilmeleridir. Korozif bir sıvı içerisinde kullanılmak üzere iyonik polimer metal kompozitler seçilebilirken bir gramdan hafif bir hava aracı için yüksek mekanik dayanıma sahip dielektrik elastomerler tercih edilebilmektedir. Aktivasyon voltajını düşürmek üzerine yapılan çalışmalarla birlikte elektroaktif polimerler uygulama alanlarına göre modifiye edilerek gelecekte çok daha fazla uygulama alanında kullanılabilir hale gelecektir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2018.KB.FEN.025).

V. KAYNAKLAR

- [1] Q. Li, C. Liu, Y. H. Lin, L. Liu, K. Jiang, and S. Fan, "Large-strain, multiform movements from designable electrothermal actuators based on large highly anisotropic carbon nanotube sheets," *ACS Nano*, vol. 9, no. 1, pp. 409–418, 2015.
- [2] J. D. W. Madden, N.A. Vandesteeg, P. A. Anquetil, P. G. A. Madden, A. Takshi, R. Z. Pytel, S.R. Lafontaine, P. A. Wieringa, I. W. Hunter, "Artificial muscle technology: Physical principles and naval prospects," *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2003, doi: 10.1109/JOE.2004.833135.
- [3] C. M. de O. Ribeiro, "Processing and characterization of piezoelectric polymers for tissue engineering applications," Universidade do Minho, 2012.
- [4] R. Shankar, T. K. Ghosh, and R. J. Spontak, "Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators," *Soft Matter*, vol. 3, no. 9, p. 1116, 2007.
- [5] R. Shankar, T. K. Ghosh, and R. J. Spontak, "Mechanical and actuation behavior of electroactive nanostructured polymers," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 151, pp. 46–52, 2009.
- [6] Y. Bar-Cohen, *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles Reality, Potential, and Challenges*, 2nd ed. Washington: Spie Press, 2004.
- [7] W. C. Roentgen, "About the changes in shape and volume of dielectrics caused by electricity," *Annu. Phys. ans Chem. Ser.*, vol. 11, pp. 771–786, 1880.
- [8] M. Eguchi, "On the Permanent Electret," *Philos. Mag.*, vol. 49, p. 178, 1925.
- [9] Y. Bar-Cohen, "Current and future developments in artificial muscles using electroactive polymers," *Expert Rev. Med. Devices*, vol. 6, pp. 731–740, 2005.
- [10] D. W. Richerson and W. E. Lee, *Modern Ceramic Engineering Properties, Processing, and Use in Design*, 4th ed. CRC Press Taylor&Francis Group, 2018.
- [11] V. Finkenstadt and J. L. Willett, "Preparation and characterization of electroactive biopolymers," *Macromol. Symp.*, vol. 227, pp. 367–371, 2005.
- [12] R. D. Kornbluh, R. Pelrine, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, and S. Chiba, "High-field electrostriction of elastomeric polymer dielectrics for actuation," in *SPIE Conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices*, 1999, pp. 149–161.
- [13] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, and J. Joseph, "High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%," *Science (80-.)*, vol. 287, pp. 836–839, 2000.
- [14] K. Ren, "Approaches to Achieve Smarter Electroactive Materials and Devices," The Pennsylvania State University, 2007.
- [15] Z. Y. Cheng, V. Bharti, T. B. Xu, H. Xu, T. Mai, and Q. M. Zhang, "Electrostrictive poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 90, pp. 138–147, 2001.

- [16] A. F. Kanaan, A. C. Pinho, and A. P. Piedade, “Electroactive polymers obtained by conventional and non-conventional technologies,” *Polymers*, vol. 13, no. 16. MDPI AG, Aug. 02, 2021.
- [17] M. H. Rahman, H. Werth, A. Goldman, Y. Hida, C. Diesner, L. Lane, P. L. Menezes, “Recent Progress on Electroactive Polymers: Synthesis, Properties and Applications,” *Ceramics*, vol. 4, no. 3, pp. 516–541, Sep. 2021, doi: 10.3390/ceramics4030038.
- [18] B. S. Akdemir and I. M. Kusoglu, “Effect of curing conditions and batio3 nanoparticle addition on dielectric constant of pdms for eap applications,” *Acta Phys. Pol. A*, vol. 139, no. 2, pp. 145–150, Feb. 2021, doi: 10.12693/APhysPolA.139.145.
- [19] W. Lai, “Characterization, fabrication, and analysis of soft dielectric elastomer actuators capable of complex 3D deformation,” Iowa State University, 2015.
- [20] Y. Wang and T. Sugino, “Ionic Polymer Actuators: Principle, Fabrication and Applications,” in *Actuators*, InTech, 2018.
- [21] J. Yip, L. S. Feng, C. W. Hang, Y. C. W. Marcus, and K. C. Wai, “Experimentally validated improvement of IPMC performance through alternation of pretreatment and electroless plating processes,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 1, 2011.
- [22] P. Rinne, I. Põldsalu, H. K. Ratas, K. Kruusamäe, U. Johanson, T. Tamm, K. Põhako-Esko, A. Punning, A. L. Peikolainen, F. Kaasik, I. Must, D. van den Ende, A. Aabloo, “Fabrication of carbon-based ionic electromechanically active soft actuators,” *J. Vis. Exp.*, vol. 2020, no. 158, Apr. 2020, doi: 10.3791/61216.
- [23] S. Ramírez-García and D. Diamond, “Biomimetic, low power pumps based on soft actuators,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 135, no. 1, pp. 229–235, 2007.
- [24] N. Terasawa, “High-performance transparent actuator made from Poly(dimethylsiloxane)/Ionic liquid gel,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 257, pp. 815–819, 2018.
- [25] J. Tang, X. Wen, Z. Liu, J. Wang, and P. Zhang, “Synthesis and electrorheological performances of 2D PANI/TiO₂ nanosheets,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 552, pp. 24–31, 2018.
- [26] J. T. Godfrey, “Soft Robotic Actuators,” University of California, Irvine, 2017.
- [27] Y. Ozsecen, “Dielectric electroactive polymer based biomedical devices: control, sensing and interfacing,” Northeastern University, 2010.
- [28] J. Chen, Y. Zhu, Z. Guo, and A. G. Nasibulin, “Recent progress on thermo-electrical properties of conductive polymer composites and their application in temperature sensors,” *Engineered Science*, vol. 12. Engineered Science Publisher, pp. 13–22, 2020.
- [29] X. X. Wang, G. F. Yu, J. Zhang, M. Yu, S. Ramakrishna, and Y. Z. Long, “Conductive polymer ultrafine fibers via electrospinning: Preparation, physical properties and applications,” *Progress in Materials Science*, vol. 115. Elsevier Ltd, 2021.
- [30] J. Chen, Y. Zhu, J. Huang, J. Zhang, D. Pan, J. Zhou, J. E. Ryu, A. Umar, Z. Guo, “Advances in Responsively Conductive Polymer Composites and Sensing Applications,” *Polym. Rev.*, vol. 61, no. 1, pp. 157–193, 2021.

- [31] N. Mahato, H. Jang, A. Dhyani, and S. Cho, "Recent progress in conducting polymers for hydrogen storage and fuel cell applications," *Polymers*, vol. 12, no. 11. MDPI AG, pp. 1–40, 2020.
- [32] J. Najem, S. A. Sarles, B. Akle, and D. J. Leo, "Biomimetic jellyfish-inspired underwater vehicle actuated by ionic polymer metal composite actuators," *Smart Mater. Struct.*, 2012.
- [33] D. Zhao, J. Ru, T. Wang, Y. Wang, and L. Chang, "Performance Enhancement of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators with Polyethylene Oxide," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 1, p. 80, 2021.
- [34] T. P. Stalbaum, "Ionic electroactive polymer devices: physics-based modeling with experimental investigation and verification," University of Nevada, Las Vegas, 2016.
- [35] V. Palmre, J. J. Hubbard, M. Fleming, D. Pugal, S. Kim, K. J. Kim, K. K. Leang, "An IPMC-enabled bio-inspired bending/twisting fin for underwater applications," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 014003, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/1/014003.
- [36] Z. J. Olsen, K. J. Kim, and I. K. Oh, "Developing next generation ionic polymer–metal composite materials: perspectives for enabling robotics and biomimetics," *Polym. Int.*, vol. 70, no. 1, pp. 7–9, 2021.
- [37] D. K. Biswal, B. R. Moharana, and T. P. Mohapatra, "Bending response optimization of an ionic polymer-metal composite actuator using orthogonal array method," *Mater. Today Proc.*, vol. 49, pp. 1550–1555, 2022.
- [38] V. Panwar, L. S. Panwar, G. Anoop, and S. Park, "Electronic-ionic polymer composite for high output voltage generation," *Compos. Part B Eng.*, vol. 232, p. 109601, 2022.
- [39] M. Doi, M. Matsumoto, and Y. Hirose, "Deformation of Ionic Polymer Gels by Electric Fields," *Macromolecules*, vol. 25, pp. 5504–5511, 1992.
- [40] C. Jo, H. E. Naguib, and R. H. Kwon, "Fabrication, modeling and optimization of an ionic polymer gel actuator," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, p. 045006, 2011.
- [41] X. Zen L. Dong, J. Fu, L. Chen, J. Zhou, P. Zong, G. Liu, L. Shi, "Enhanced interfacial stability with a novel boron-centered crosslinked hybrid polymer gel electrolytes for lithium metal batteries," *Chem. Eng. J.*, vol. 428, 2022.
- [42] Q. Wang, X. Xu, B. Hong, M. Bai, J. Li, Z. Zhang, Y. Lai, "Molecular engineering of a gel polymer electrolyte via in-situ polymerization for high performance lithium metal batteries," *Chem. Eng. J.*, vol. 428, 2022.
- [43] V. V. Kovaleva, N. M. Kuznetsov, A. P. Istomina, O. I. Bogdanova, A. Y. Vdovichenko, D. R. Streltsov, S. N. Malakhov, R. A. Kamyshinsky, S. N. Chvalun, "Low-filled suspensions of α -chitin nanorods for electrorheological applications," *Carbohydr. Polym.*, vol. 277, 2022.
- [44] Y. Wang, J. Yuan, X. Zhao, and J. Yin, "Electrorheological Fluids of GO/Graphene-Based Nanoplates," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 1, p. 311, 2022.
- [45] K. Yu, X. Ji, T. Yuan, Y. Cheng, J. Li, X. Hu, Z. Liu, X. Zhou, L. Fang, "Robust Jumping Actuator with a Shrimp-Shell Architecture," *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 44, 2021.
- [46] W. J. Sun, Y. Guan, Y. Y. Wang, T. Wang, Y. T. Xu, W. W. Kong, L. C. Jia, D. X. Yan, Z. M. Li, "Low-Voltage Actuator with Bilayer Structure for Various Biomimetic Locomotions," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021.

- [47] E. Cakmak, “Dielectric and Electromechanical Properties of Polyurethane and Polydimethylsiloxane Blends and Nanocomposites,” North Carolina State University, 2014.
- [48] R.-P. Nie, W. B. Tang, Y. Li, L. C. Jia, L. Xu, H. D. Huang, J. Lei, Z. M. Li, “Surfactant-assisted fabrication of room-temperature self-healable dielectric elastomer toward actuation application,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 234, p. 109655, 2022.
- [49] Z. Ren, S. Kim, X. Ji, W. Zhu, F. Niroui, J. Kong, Y. Chen, “A High-Lift Micro-Aerial-Robot Powered by Low-Voltage and Long-Endurance Dielectric Elastomer Actuators,” *Adv. Mater.*, p. 2106757, 2022.
- [50] F. Zhao, X. Chen, J. Zhang, X. Zhang, J. Xie, L. Jin, Z. Liu, J. Zhuang, W. Ren, Z. G. Ye, “A wearable, nozzle-diffuser microfluidic pump based on high-performance ferroelectric nanocomposites,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 347, 2021.
- [51] S. Chen, M. W. M. Tan, X. Gong, and P. S. Lee, “Low-Voltage Soft Actuators for Interactive Human–Machine Interfaces,” *Adv. Intell. Syst.*, p. 2100075, 2021.
- [52] J. Su and Y. Tajitsu, “Piezoelectric and Electrostrictive Polymers as EAPs: Materials,” in *Electromechanically Active Polymers*, Springer International Publishing, 2016, pp. 509–531.
- [53] R. Farhan, A. Eddiai, M. Meddad, N. Chakhchaoui, M. Rguiti, and M. Mazroui, “Improvement in energy conversion of electrostrictive composite materials by new approach via piezoelectric effect: Modeling and experiments,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 32, no. 1, pp. 123–130, 2021.
- [54] E. Hansy-Staudigl and M. Krommer, “Electrostrictive polymer plates as electro-elastic material surfaces: Modeling, analysis, and simulation,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 32, no. 3, pp. 296–316, 2021.
- [55] M. Li, S. Dai, X. Dong, Y. Jiang, J. Ge, Y. Xu, N. Yuan, J. Ding, “High-Strength, Large-Deformation, Dual Cross-Linking Network Liquid Crystal Elastomers Based on Quadruple Hydrogen Bonds,” *Langmuir*, vol. 38, no. 4, pp. 1560–1566, 2022.
- [56] B. Gurboga, E. B. Tuncgovde, and E. Kemiklioglu, “Liquid crystal-based elastomers in tissue engineering,” *Biotechnol. Bioeng.*, 2022.
- [57] Y. Wang, J. Liu, and S. Yang, “Multi-functional liquid crystal elastomer composites,” *Appl. Phys. Rev.*, vol. 9, no. 1, p. 011301, 2022.