

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İYONİK POLİMER METAL KOMPOZİT ESASLI**  
**BİYOMİMETİK AKTÜATÖR MODELLENMESİ**  
**VE TASARIMI**



**Özgün Cem YILMAZ**

**Haziran, 2019**  
**İZMİR**

# **İYONİK POLİMER METAL KOMPOZİT ESASLI BİYOMİMETİK AKTÜATÖR MODELLENMESİ VE TASARIMI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Özgün Cem YILMAZ**

**Haziran, 2019**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Özgün Cem Yılmaz, tarafından Doç. Dr. Levent Çetin yönetiminde hazırlanan “İYONİK POLİMER METAL KOMPOZİT ESASLI BİYOMİMETİK AKTÜATÖR MODELLENMESİ VE TASARIMI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Levent ÇETİN

Yönetici



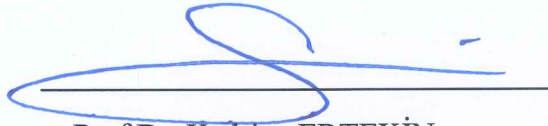
Doç. Dr. Alpaslan TURGUT

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Mehmet SAĞKANTAR

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Öncelikle, lisans bitime projem ile beraber çalışmaya başladığım, yüksek lisans hayatımda da rehberliğiyle beni aydınlatan danışman hocam Doç. Dr. Levent ÇETİN'e bana gösterdiği sabır, ilgi, alakadan ve üzerimdeki büyük emeğinden dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisansım boyunca içinde yer aldığım projelerde bana büyük yardımları dokunan, Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT'a, Dr. Barış Oğuz GÜRSES'e, İbrahim ŐEN'e ve Prof. Dr. Yoldaş SEKİ'ye teőekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında yer alan çalışmalarda 111M643 numaralı proje ile yaptığı maddi destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teőekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansım boyunca yol arkadaşım olan Olgun ALTAY'a, özellikle tez yazım aşamasındaki desteğinden dolayı teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen aileme desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Özgün Cem YILMAZ

# İYONİK POLİMER METAL KOMPOZİT ESASLI BİYOMİMETİK AKTÜATÖR MODELLENMESİ VE TASARIMI

## ÖZ

Akıllı malzemeler kategorisine giren iyonik polimer-metal kompozitler (İPMK), dışarıdan uygulanan bir elektrik alanı sonucu, içerisinde bulunan iyonların hareketine bağlı olarak şekil değiştirirler. İPMK'ların yapıları, iyonik polimer ve bu polimerin iki yüzeyine bir kaç mikrondan fazla olmayan kalınlıklarda kaplanan metal elektrotlardan oluşmaktadır. İyonik polimerler yumuşak bir yapıya sahip olmaları, düşük voltaj altında çalışmaları ve büyük deformasyon göstermelerinden dolayı yapay kas ve benzeri biyomimetik uygulamalarda sensör ve aktüatör olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, biyomimetik uygulamalarda kullanılmak üzere farklı elektrot kalınlıklarında Nafyon bazlı İPMK eyleyiciler üretilmiştir. İlk olarak üretilen İPMK eyleyicilerin performansları doğru akım uygulanıp maksimum uç noktasının hareketi incelenerek karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise eyleyicilerin performanslarını arttırmak amacıyla darbe genişliği modülasyonu (PWM) metodu kullanılması önerilmiştir. Bu aşamada PWM metodunun etkinliğini göstermek amacıyla farklı genlik ve doluluk oranlarına sahip elektriksel sinyallerin etkisi altında eyleyicilerin performansları gözlemlenmiştir ve bu sonuçlara dayanarak üretilen eyleyiciler için bir matematik model önerilmiştir. Son olarak elde edilen İPMK yapı ile fil hortumu eyleyici, Sinerjist ve Agonist-Antagonist kas hareket prensibi ile çalışan eyleyici ve balık yüzgeci eyleyici olmak üzere üç farklı tipte biyomimetik eyleyici üretilerek test edilerek bu yapıların biyomimetik robotik uygulamalarında kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Çalışma, 111M643 numarası ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından desteklenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** İyonik polimer-metal kompozitler, akıllı malzemeler, biyomimetik, eyleyici

# DESIGN AND MODELLING OF AN IONIC POLYMER METAL COMPOSITE BASED BIOMIMETIC ACTUATOR

## ABSTRACT

Ionic polymer–metal composites, in which they are categorized as smart materials, can change their shapes by the movements of ions due to an external electric field. Ionic polymer–metal composite (IPMC) structures are formed from ionic polymers and a few micron thick metal electrodes coated on two sides of polymer surfaces. Because ionic polymers have soft structure, can operate under low voltage and can show large deformation characteristics, they are used as artificial muscles and sensors/actuators elements in various biomimetic applications.

Nafion based IPMC actuators were produced in different electrode thicknesses. Firstly, direct current is applied to IPMC actuators and performance of the actuators was measured by the movement of the tip point. In the second stage, it is proposed to use pulse width modulation (PWM) method to increase the performance of actuators. The results were examined and a mathematical model was proposed for the actuators. Finally, as a result of the studies, three different types of biomimetic actuators (elephant hose actuator, Synergist and Agonist-Antagonist muscle act actuator and fish fin actuator) were produced and tested.

This work was supported by TUBITAK “The Scientific and Technical Research Council of Turkey” under grant number 111M643.

**Keywords:** Ionic polymer-metal composite, smart materials, biomimetic, actuator

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş .....	1
1.2 Elektroaktif Polimerler .....	2
1.3 İyonik Polimer Metal Kompozit Eyleyiciler.....	2
<b>BÖLÜM İKİ - NAFYON TABANLI EYLEYİCİ İMALATI .....</b>	<b>6</b>
2.1 Giriş .....	6
2.2 Nafyon Membran .....	6
2.3 Elektrot Kaplama.....	7
2.3 İyonik Polimer Metal Kompozit Eyleyici İmalatı.....	8
2.3.1 İyon Hareketli Polimer Katman .....	8
2.3.2 Elektrot Katmanı .....	8
<b>BÖLÜM ÜÇ - NAFYON TABANLI EYLEYİCİ KARAKTERİZASYONU.....</b>	<b>9</b>
3.1 Giriş .....	9
3.2 Test Düzenegi.....	9
3.2.1 Görüntüleme Sisteminin Bileşenleri .....	12
3.2.1.1 Görüntüleme Donanımı .....	13

3.2.1.2 Kamera .....	13
3.2.1.3 Lens.....	13
3.2.1.4 Işıklandırma.....	13
3.2.1.5 Gerçek Zamanlı Görüntü Kayıt Yazılımı.....	13
3.2.2 Alınan Görüntünün İncelenmesi .....	14
3.3 Doğru Akım Deney Seti .....	20
3.3.1 Giriş.....	20
3.3.2 Doğru akım Uygulamalarında Eyleyici Cevabı.....	21
3.3.3 Sonuçlar.....	25
3.4 Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) Deney Seti.....	25
3.4.1 Giriş.....	25
3.4.2 Darbe Genişliği Modülasyonu .....	26
3.4.3 Sabit Doğru Akım Testleri .....	27
3.4.4 Basit İPMK Eyleyici Modeli .....	28
3.4.5 PWM Frekansının İPMK eyleyiciler Üzerindeki Etkisinin Araştırılması	30
3.4.6 PWM Sinyalinin Genliğinin İPMK Eyleyici Performansı Üzerindeki Etkisi .....	34
3.4.7 PWM Genliğinin İPMK Eyleyicinin Dayanım Performansı Üzerindeki Etkisi .....	38
3.4.8 Sonuç.....	40

## **BÖLÜM DÖRT - NAFYON BAZLI EYLEYİCİ İLE BİYOMİMETİK UYGULAMALAR.....41**

4.1 Fil Hortumu Eyleyici .....	41
4.1.1 Fil Hortumu Eyleyici 1. Versiyon İmalatı.....	42
4.1.2 Fil Hortumu Eyleyici 2. Versiyon İmalatı.....	45



4.1.2.1 Elektrik Bağlantı Sistemi Geliştirilmesi .....	47
4.1.2.2 Fil Hortumu Eyleyici 2. Versiyon Performans Testleri.....	48
4.1.3 Fil Hortumu Eyleyici 2.1. Versiyon İmalatı .....	49
4.2 Sinergist ve Agonist-Antagonist Kas Hareketi Prensibi İle Çalışan Eyleyici .	50
4.2.1 İskelet Yapısının Tasarlanması.....	51
4.1.3 Performans Testleri .....	52
4.3 Balık Yüzgeci Eyleyici .....	54
4.3.1 Eyleyici Tasarımı .....	55
4.3.2 Elektronik Devre Tasarımı .....	56
4.3.4 Deney Sonuçları.....	56
<b>BÖLÜM BEŞ - SONUÇ.....</b>	<b>60</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>62</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1 İyonik polimer metal kompozit eyleyicilerin çalışma prensibi .....	3
Şekil 2.1 Nafyonun kimyasal yapısı.....	6
Şekil 3.1 NI kartlar ile kurulan test düzeneği .....	10
Şekil 3.2 Arduino ile kurulan test düzeneği.....	10
Şekil 3.3 Kamera ile eyleyici hareketinin incelenmesi .....	11
Şekil 3.4 Host Programı.....	14
Şekil 3.5 Görüntüleme sistemi kullanılarak alınan görüntü .....	15
Şekil 3.6 Görüntünün histogramı .....	15
Şekil 3.7 Görüntünün tüm satırlarındaki parlaklık değeri dağılımı .....	16
Şekil 3.8 10. Satırdaki parlaklık değeri dağılımı .....	17
Şekil 3.9 250. Satırın parlaklık değeri dağılımı .....	17
Şekil 3.10 Ölçekleme sonucu elde edilen parlaklık değeri dağılımları.....	18
Şekil 3.11 Görüntü üzerinde eyleyici izi .....	18
Şekil 3.12 Görüntü üzerinde koordinat eksenin yerleşimi .....	19
Şekil 3.13 Hazırlanan şerit Nafyon numuneler.....	20
Şekil 3.14 9 V gerilim uygulandığında bozulan eyleyici .....	21
Şekil 3.15 Eyleyici yanıtı (5V gerilim uygulanan 45nm kalınlığındaki eyleyici) .21	
Şekil 3.16 Maksimum uç yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi.....	22
Şekil 3.17 3, 5, 7 V doğru akım gerilim uygulanan Nafyon eyleyicilerin maksimum uç yer değiştirmeleri.....	23
Şekil 3.18 3, 5, 7 V doğru akım gerilim uygulanan Nafyon eyleyicilerin maksimum zaman sabitleri .....	24
Şekil 3.19 20 x 5 mm boyutunda hazırlanan numuneler .....	26
Şekil 3.20 Sabit doğru akım testleri uç yer değiştirmeleri .....	27
Şekil 3.21 Basit model yaklaşımının blok diyagramı .....	28
Şekil 3.22 Model yaklaşımıyla önerilen blok diyagramı.....	29
Şekil 3.23 PWM frekansına bağlı eyleyici uç yer değiştirmeleri (a) 0 – 50 Hz, (b) 100 – 1000 Hz.....	31
Şekil 3.24 Frekansa bağlı maksimum ve son uç yer değiştirme değerleri .....	32

Şekil 3.25 Frekansa bağlı geri salma yüzdesi .....	32
Şekil 3.26 Frekansa bağlı kararlı durum zamanı grafiği .....	33
Şekil 3.27 6V genlikte farklı doluluk oranlarının testleri .....	35
Şekil 3.28 8V genlikte farklı doluluk oranlarının testleri .....	36
Şekil 3.29 10 V genlikte farklı doluluk oranlarının testleri .....	36
Şekil 3.30 PWM doluluk oranlarına göre maksimum uç yer değiştirmeleri .....	37
Şekil 3.31 Çevrim sayısına göre normalize edilmiş maksimum uç yer değiştirmesi grafiği .....	39
Şekil 4.1 Fil hortumu .....	41
Şekil 4.2 Referans İPMK tabanlı eyleyici yapısı .....	42
Şekil 4.3 Fil hortumu eyleyici 1. versiyon elektriksel bağlantısı .....	43
Şekil 4.4 Üç segmentli bir fil hortumu eyleyicinin referans hareket dizgesi .....	44
Şekil 4.5 Elektriksel bağlantı şeması elektrot yüzeylerine aktarılmış eyleyici referans tasarımı .....	45
Şekil 4.6 Eyleyici kalıbı ve PVD Cihazı bağlantısı .....	46
Şekil 4.7 Hatalı eyleyici .....	46
Şekil 4.8 Kağıt kalıplar ve üretilen eyleyici .....	47
Şekil 4.9 Elektriksel bağlantı kartı ve performans test düzeneği .....	48
Şekil 4.10 İkinci versiyon fil hortumu eyleyici elektriksel bağlantılar .....	49
Şekil 4.11 Yapısal iyileştirme sonucu elde edilen ikinci fil hortum eyleyici .....	50
Şekil 4.12 İnsan vücudu kas hareketleri antagonist ve sinerjist çalışma .....	51
Şekil 4.13 İskelet yapısal tasarım ve nihai eyleyici yapısı .....	52
Şekil 4.14 Balık yüzgeci eyleyici ve kontrol devreleri .....	55
Şekil 4.15 Balık yüzgecinde tek dalgalı hareket .....	57
Şekil 4.16 Referans hareket formu .....	58
Şekil 4.17 Deney sonuçları .....	58

## TABLULAR LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 3.1 Doğru akım deneyleri eğri uydurma sonuçları .....	29
Tablo 3.2 Frekans deneyleri için eğri uydurma sonuçları.....	34
Tablo 3.3 Sinyal genliği testleri PWM doluluk oranları.....	35
Tablo 3.4 Son uç yer değiştirmedeki artış.....	38
Tablo 3.5 Eğri uydurma sonuçları .....	38
Tablo 4.1 Fil hortumu eyleyici 1. versiyon performans testi sonuçları .....	44
Tablo 4.2 Fil hortumu eyleyici 2. versiyon performans testi sonuçları .....	49
Tablo 4.3 Sinerjist çalışma esnasında elde edilen deneysel veriler .....	53
Tablo 4.4 Agonist-antagonist çalışma esnasında elde edilen deneysel veriler .....	54

# BÖLÜM BİR

## GİRİŞ

### 1.1 Giriş

Geleneksel robotik sistemlerin yapısal tasarım çalışmaları, mekanizma ve eyleyici sentezi gibi aşamaları içerirken, yeni uygulamalar malzeme özelliklerinin modifikasyonu ve dağıtılmış parametrelili modeller gibi daha alt seviye tasarım süreçlerini robotik uygulama geliştirme çalışmalarına dahil etmiştir. Bu kapsamda tez içerisinde elektroaktif polimerlerden yumuşak robotik uygulamalarında kullanılacak eyleyici elde edilmesine yönelik bir geliştirme yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemin adımları aşağıda listelenmiştir:

- İlk olarak baz alınan ticari bir polimer üzerine elektrot kaplanmasıyla bir eyleyici ilk örneği elde edilir.
- Bu ilk örneğin birim basamak cevabı bir test sistemi yardımıyla gözlemlenir.
- Üretim parametreleri veya yapısal parametreler kontrollü olarak değiştirilerek farklı akıllı polimer eyleyici yapılar üretilir.
- Kurulan test sistemi yardımıyla üretilmiş eyleyicilerin dinamik cevapları kaydedilir ve karşılaştırılır.
- Baz eyleyicinin dinamik davranışı kullanılarak en iyi performanslı akıllı polimer eyleyici yapıyı elde etmek için gerekli parametreler belirlenir.

Geliştirilen eyleyicinin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılması için eyleyici yapısının yanı sıra onu sürece elektronik sistemin özelliklerinin de uygulamaya yönelik olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple yukarıdaki metod kullanılarak elde edilmiş eyleyiciler için sürme frekansı ve genliği gibi sürücü parametrelerinin de tasarımı tamamlayıcı bir öge olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada bu önerilen yöntem kullanılarak nafyon tabanlı bir eyleyici yapısı üretilmesi ve bunun biyomimetik uygulamalar üzerinde işlevselliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

## **1.2 Elektroaktif Polimerler**

Akıllı polimerler, ısı, elektrik, ışık, manyetik alan, nem / su, pH gibi dış uyaranlar değiştiğinde şekillerini değiştiren veya mekanik bir güç oluşturan polimerlerdir. Elektrik akımı ile şeklini değiştiren polimerlere elektroaktif polimerler denir. Elektroaktif polimerler iki temel kategoriye ayrılır; Elektrik alanı tarafından kontrol edilen elektronik elektroaktif polimerler ve iyonların hareketi ile kontrol edilen iyonik elektroaktif polimerler (Bar-Cohen, 2007; Bar-Cohen, Kim, Choi ve Madden, 2007).

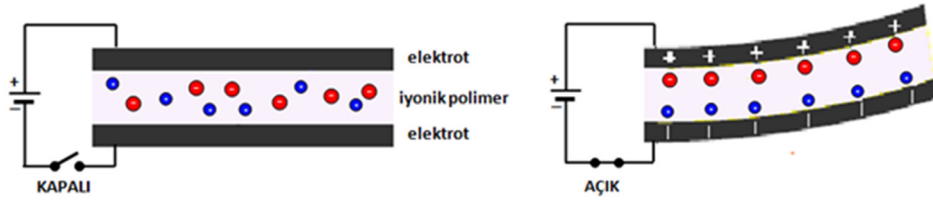
Elektrik alanı tarafından kontrol edilen elektroaktif polimerler, uyarma için yüksek voltaj ( $> 150 \text{ MV / mm}$ ) gerektirir. Sert bir yapıya ve düşük yer değiştirmeye sahiptirler. Aynı zamanda, bu polimerler, farklı ortam koşulları altında yapılarını değiştirmezler. Piezoelektrik malzemeler bu malzeme kategorisine girer.

## **1.3 İyonik Polimer Metal Kompozit Eyleyiciler**

İyonik elektroaktif polimerler olarak sınıflandırılan iyonik polimer-metal kompozitler (İPMK), iyonların harici olarak uygulanan bir elektrik alan hareketine bağlı olarak şeklini değiştirir.

İyonik polimer-metal kompozitler, uygulanan düşük direnç varlığında büyük deformasyon ve düşük empedans sergileyen aktif eyleyicilerdir. İyonik polimer metal kompozitler, son yıllarda elektrik enerjisinin mekanik enerjiye (eyleyici) veya mekanik enerjinin elektrik enerjisine (sensör) dönüştürerek kullanılmaktadırlar. İyonik elektroaktif polimerler, iyonların difüzyon veya göçü ile etki eder, düşük voltaj uygulayarak nispeten büyük bükülme deformasyonu sergiler.

İyonik polimer-metal kompozitlerin yapıları, bir iyonik polimer ve bu polimerin iki yüzeyine birkaç mikron kalınlığında kaplanan metal elektrotlardan oluşur. İPMK'lerin hareket mekanizmaları, iyonların bir taraftan diğer tarafa difüzyonu ile açıklanabilir. Bu kompozitler mekanik esnekliğe, düşük yoğunluğa, düşük uyarma voltajına sahiptir. Bu özelliklerden dolayı, elektroaktif polimerler (EAP) yapay kaslar, biyomimetik sensörler, robot aktüatörler, tıbbi cihazlar gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Şekil 1.1, iyonik polimer metal kompozit aktüatörlerin çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 1.1 İyonik polimer metal kompozit aktüatörlerin çalışma prensibi

Polimer tabakalar bir dış uyarıcı tarafından uyarıldığında (yaklaşık 1V ila 5V arasında), polimerin elektromekanik özelliklerinden dolayı hacim genişlemesi veya kısılması meydana gelir. Hacimdeki değişim bükülme yer değiştirmesine neden olur. Elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür (Bay, Jacobsen, Skaarup ve West, 2001; Otero ve Cortes, 2004; Wallace, Teasdale, Spinks ve Kane-Maguire, 2003). İyonik polimer-metal kompozitlerin son yıllarda büyük ilgi görmesinin nedenlerinden biri, insan, hayvan ve böceklerin hareketlerini taklit etmek için kullanılmasıdır. Bu, özel cihazların ve robotların tasarımına izin verir (Bar-Cohen, 2004).

Literatürde yapılan çalışmalarda, iyonik polimer-metal kompozitler; bir iyon değiştirici polimer ve bu polimerin üzerine birkaç mikron derinliğinde platin ya da altın gibi bir metalle kaplama yapılmasıyla elde edilmiştir. Böylelikle polimerin yüzeyi iletken bir hale getirilmiştir (Shahinpoor ve Kim, 2001, 2004a, 2004b).

İyonik polimerler, akıllı tıbbi enstrümanlar ve yardımcıları (Lendlein ve Langer, 2002; Mazzoldi ve De Rossi, 2000; Wache, Tartakowska, Hentrich ve Wagner, 2003), yapay kas (Bar-Cohen, 2001), elektrokimyasal cihazlar (Scrosati, 1993), biyomimetik

aletler (Calvert ve Rieke, 1996; Xie ve Xiao, 2008), mikro elektromekanik sistemler (Gall ve diğer., 2002), aktüatör ve sensör (Bar-Cohen ve Zhang, 2008; Leng, Lu ve diğer., 2008; Park, Jung, Kim, Kim ve Kim, 2008), ses absorbe eden malzemeler, esnek hoparlörler ve enerji hasatı (energy harvesting) gibi birçok yerde kullanım alanı bulmaktadır.

İyonik polimer metal kompozit eyleyiciler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Lee ve diğer. (2009), tarafından yapılan bir çalışmada, bir iyonik polimer metal kompozitinden oluşan cep telefonlarında otomatik odaklanan kompakt bir kamera modülü için bir ünite önermişlerdir. Yakın gelecekte, düşük güç tüketen ve çok fazla yer değiştirebilen eyleyici üretimi ve ticarileştirilmesi mümkün olacaktır (Lee ve diğer., 2009). İletken bir polimerden oluşan bir eyleyicinin modellenmesi, karakterizasyonu ve performans ölçümü Alici ve Huynh (2007) tarafından yayınlanmıştır. Sonra bu eyleyicilerden bir mikro cımbız üretmişlerdir.

McDaid, Aw, Haemmerle ve Xie (2012), bir platin elektrotlu, Nafyon bazlı bir iyonik polimer metal kompozit aktüatör kullanarak basit bir mikro pompa üretmiştir. Bu mikro pompanın kontrolü, yinelemeli geri besleme ayarlama (IFT) algoritması kullanılarak lazer sensörlerin yardımı ile yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, bilinen model tabanlı kontrolörlere göre % 92 verimlilik artışı sağlanmıştır (McDaid ve diğer., 2012).

Punning, Johanson, Anton, Aabloo ve Kruusmaa. (2009) İPMK'ler için yeni bir model önermiştir. Genel olarak, İPMK'ler kayıp RC devreleri olarak modellenmiştir. bu model sadece İPMK'lerin elektriksel özelliklerini ve tek biçimli olmayan şekil değişikliklerinin tanımlanmasını içerir. Punnig ve diğer (2009). uç nokta şekli modifikasyonu yerine eğrilik yarıçapını modelleyerek daha kapsamlı bir model yaratmıştır (Punning ve diğer., 2009).

Bu çalışmada iyonik polimer metal kompozit eyleyici tasarımı ve bunun biyomimetik robotik uygulamalarında kullanılması üzerinde durulmuştur. İlk olarak yaygın olarak kullanılan Nafyon membran ile düşük kalınlıklı altın elektrot ikilisinden



oluşan İPMK eyleyici yapısı tasarlanmıştır. Sonraki aşamada eyleyicilerin zaman ve frekans davranışları dikkate alınarak en uygun elektrot kalınlığı belirlenmiştir. Belirlenen elektrot kalınlığına sahip eyleyici için elektriksel performans testleri gerçekleştirilmiştir. Projenin son kısmında farklı biyomimetik yapılar üzerinde yeni tasarlanan İPMK eyleyicinin işlevselliği incelenmiştir.



## BÖLÜM İKİ

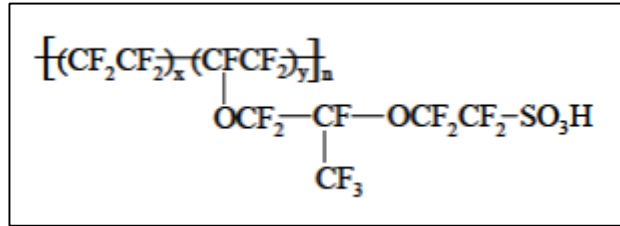
### NAFYON TABANLI EYLEYİCİ İMALATI

#### 2.1 Giriş

İPMK eyleyiciler yapısal olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi iyon hareketlerinin oluştuğu polimer film (membran) ve ikincisi de bu kısım üzerinde elektrik alan oluşturmaya yarayan elektrot kaplamasıdır.

#### 2.2 Nafyon Membran

Nafyon, 1960'ların sonlarında Teflon'un modifiye edilmesiyle DuPont firmasında çalışan Dr. Walther Grot tarafından geliştirilmiştir. Nafyon iyonik özelliklerinden dolayı polimerler arasında iyonomerler adı altında yeni bir kategori oluşmasına neden olmuştur (Permapure, b.t.). Hidrofobik florokarbon omurga ve hidrofobik iyonik sülfonik asit ile tamamlanan perfloroeter yan zincirlerden oluşur (DeLuca, 2008). Sülfonik asit grubu susuz formunda (SO<sub>3</sub>H) gösterilmiştir. Suya maruz kaldığında nafyonun hidrolize formu (SO<sub>3</sub>-H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) membran boyunca proton taşınmasına izin verecektir. Bunun sonucunda, Nafyon temelli eyleyicilerde katyon hareketine izin verilir. Polimerin içerisindeki katyonun hareketi etrafındaki su moleküllerini beraberinde sürükler.



Şekil 2.1 Nafyonun kimyasal yapısı (DeLuca, 2008)

Nafyon'un iyonik özellikleri, Teflon baz malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile birleşerek, nihai malzemeye bazı benzersiz özellikler kazandırır. Örneğin, Nafyon, Teflon'un aksine kimyasal saldırılara karşı oldukça dirençlidir. Yalnızca sodyum gibi metalik alkali metaller Nafyon'a normal çalışma koşullarında

doğrudan saldırabilir. Nafyon, Teflon'dan farklı olarak, yüksek iyon iletkenliğine sahiptir ve bir kation değişim polimeri görevi görür. Ek olarak, Nafyon suya karşı oldukça geçirgendir ve diğer birçok polimerden daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir. Polimer elektrot yakıt hücrelerinde proton değişim zarı olarak da kullanılır (Permapure, b.t.). Nafion membranlar ayrıca termal, kimyasal ve oksidatif olarak kararlıdır.

### 2.3 Elektrot Kaplama

Yukarıda belirtildiği gibi iyon hareketine izin veren polimer diyaframlar tek bir yüklü iyonun hareketine izin verir fakat hareketin oluşması için iyonun bir dış kuvvet etkisinin altında olması gerekir. Bu sebeple polimer diyafram kesitinde bir elektriksel kuvvet oluşturacak elektrik alanın elde edilmesi gerekir. Bu alanın uygulanabilmesi için iyonik polimer membranların dış yüzeyleri metal tabakalar ile kaplanır. Bu tabakalar elektriksel güç kaynağının farklı kutuplarına bağlanarak çalışma esnasında elektrot görevi görürler.

Elektrik potansiyeli uygulanmadığında su/kasyon çifti ve anyon eşit şekilde dağılır. Gerilim uygulandığında su/kasyon çiftleri ve anyonlar yükü dengelemek için yeniden dağılır ve su / kasyon çifti negatif yüklü elektroda doğru hareket eder. Bu, polimerin negatif tarafının pozitif taraftan daha fazla şişmesine neden olur. Bu şişme sonucunda eyleyici bükülme hareketi yapar.

Gerilim yeterinde uzun uygulanırsa İPMK eyleyici orijinal pozisyonuna doğru hareket ederek geri salma yapacaktır. Bu geriye doğru hareket su /kasyon çiftinin nispeten kuru negatif yüklü elektroda varmasıyla diyafram içerisinde oluşan difüzyon kuvvetleri nedeniyle oluşur.

## 2.3 İyonik Polimer Metal Kompozit Eyleyici İmalatı

### 2.3.1 İyon Hareketli Polimer Katman

Çalışmada 60 x 60 mm boyutlarında diyafram şeklinde Nafyon 117 kullanılmıştır. Nafyonun kaplamaya hazır hale gelmesi için öncelikle %3 hidrojen peroksit karışımında 1 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Saf su ile temizlenmesinin ardından hidroklorik asit karışımında 1 saat daha bekletilmiştir. Saf su ile temizlenen diyaframlar son olarak 60 °C sıcaklıkta 12 saat bekletilerek kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

### 2.3.2 Elektrot Katmanı

İPMK eyleyici uygulamalarında polimer diyafram üzerinde elektrik alan oluşturmak için farklı kaplamalar kullanılmaktadır. Elektrot malzemesinden beklenen en temel özellikler, çalışma şartlarıyla uyumlu (çevre ile kimyasal etkileşime girmeme gibi) ve elektriksel olarak düşük öz dirence sahip olmasıdır. Bu çalışmada nafyon diyafram üzerine altın kaplanmıştır.

Nafion tabanlı İPMK eyleyicileri, bir NANOVAK termal buharlaştırıcı kullanılarak fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle üretilmiştir. Bu süreç iki adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, altın, bir makasla küçük parçalara bölünerek ünite içerisine yerleştirilir. Daha sonra, 80 x 80 x 0,178 mm ebatlarında yüksek vakumlu bir odada ( $6 - 8 \cdot 10^{-6}$  Torr arkaplan basıncı)  $\sim 0,1 \text{ nm s}^{-1}$  oranında bir düz Nafion diyafram üzerinde biriktirilir. Bu işlem Nafion diyaframın diğer yüzeyi için tekrarlanır. Altın biriktirmenin kalınlığı, kuvars kristali mikro balansının (QCM) yardımıyla istenilen kalınlığa ayarlanır. Amaçlanan altın kalınlığını garanti etmek için, QCM ilk önce yukarıda belirtilen koşullarda altınla bir cam substrat kaplanarak kalibre edilmiştir. Cam alt tabakanın yüzey kalınlığı üç farklı alanda bir profilometre ile ölçülmüştür. Hem termal evaporatörün hem de profilometrenin kalınlık ekranlarından aynı kalınlık elde edildiğinde kalibrasyon işlemi tamamlanır.

## BÖLÜM ÜÇ

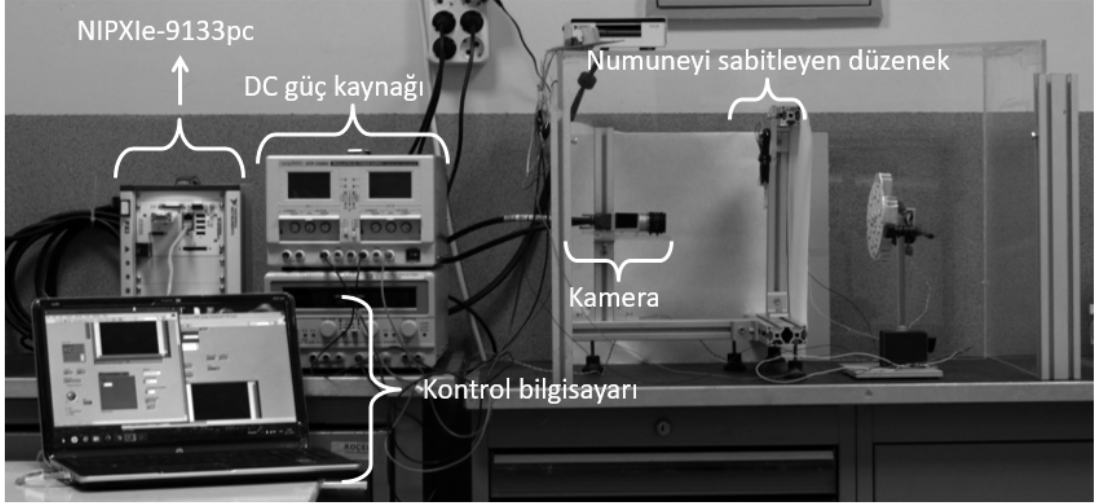
### NAFYON TABANLI EYLEYİCİ KARAKTERİZASYONU

#### 3.1 Giriş

Bu kısımda, elde edilen İPMK eyleyicinin farklı özelliklerdeki elektriksel girdilere karşılık verdiği tepki incelenmiştir. İlk olarak bir önceki kısımda anlatılan şekilde üretilmiş Nafyon tabanlı İPMK eyleyicilerin doğru akım davranışları (basamak girdi cevapları) incelenmiştir. Bu cevaplar üzerinden eyleyiciler, uç yer değiştirme genlikleri ve zaman sabitleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu inceleme sonucunda üretilen eyleyicilerden en yüksek performans gözlenen numune bundan sonraki çalışmalarda kullanılacak eyleyici malzemesi olarak seçilmiş ve bu eyleyici malzemesi ile en iyi mekanik çıktıyı elde etmek için nasıl bir elektriksel sürme sistematığı gerekir sorusunun cevabı aranmıştır. Bunun için PWM frekansı ve genliği değiştirilerek sistem çıktısı deneysel olarak incelenmiştir.

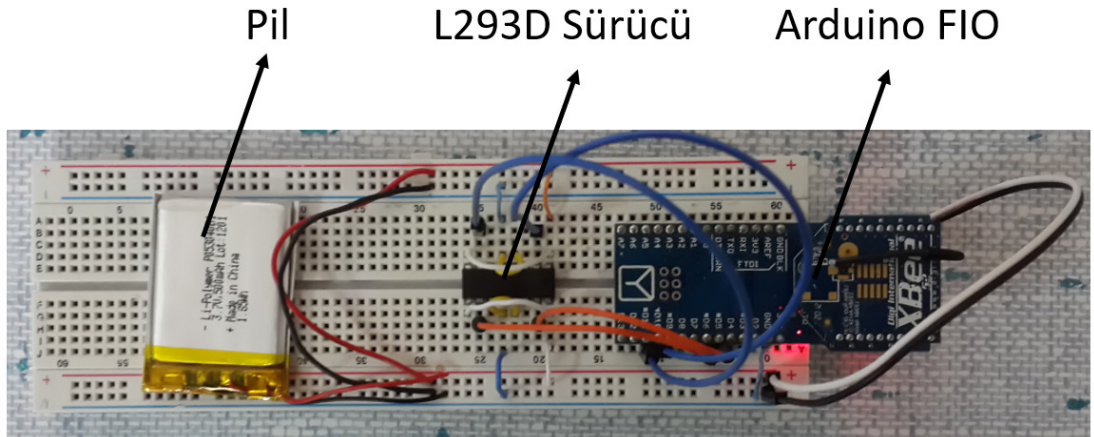
#### 3.2 Test Düzenegi

İyonik polimer metal kompozit eyleyicilerin hareketlerini incelenmesinde bilgisayar, veri toplama kartı, sürücü devre ve temassız pozisyon ölçer kullanılmıştır. Test düzeneklerine göre farklı tipte sürücüler ya da veri toplama kartları tercih edilmiştir.



Şekil 3.1 NI kartlar ile kurulan test düzeneği (Kişisel arşiv, 2014)

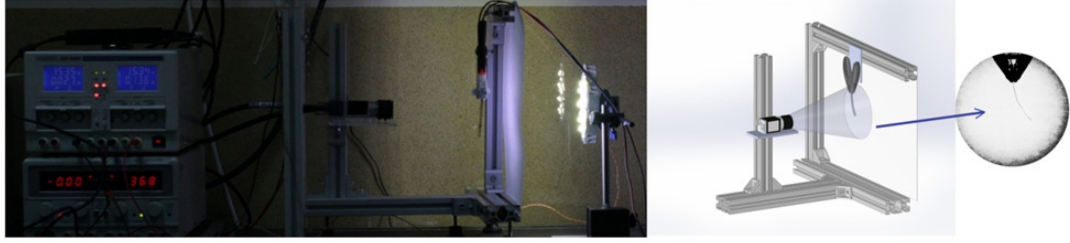
Çalışma kapsamında kurulan düzenekte bilgisayar ve veri toplama sistemi olarak NI PXI sistemi kurulmuştur. Görüntü geri beslemesi için ise NI PXIe-1435 Görüntü yakalama kartı, Basler acA2040-180km kamera ve Computar M0814-MP - 8mm – F1.4 lens kullanılmıştır. Eyleyici hareketine olanak sağlayacak tahrik sinyal şablonları NI-PXI 7854R veri kartları ile sağlanmaktadır. Ses yükseltici devrelerinde kullanılan TDA2040 kullanılarak tampon devre olarak tasarlanmıştır. Sistem aşağıdaki Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu düzenek doğru akım testlerinde kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Arduino ile kurulan test düzeneği (Kişisel arşiv, 2014)

Darbe genişliği modülasyonu (PWM) metodu kullanılan testlerde ise doğru akım testlerinden farklı olarak Arduino FIO kart ile sistem kontrol edilmiştir. Sürücü olarak da H köprüsü mantığı ile çalışan L293D entegresi kullanılmıştır. Görüntünün

yakalanması ve uç nokta hareketinin incelenmesinde yukarıda bahsedilen NI kartlar ve kamera kullanılmıştır. Test düzeneğinde yapılan bu değişikliğin nedeni ileride üretilecek biyomimetik eyleyicilerin düşük güç gerektiren kartlar ile sadece pil ile çalışabileceğinin de kanıtlanmak istenmesidir.



Şekil 3.3 Kamera ile eyleyici hareketinin incelenmesi (Yılmaz ve diğer., 2019)

İyonik polimer kompozit eyleyicilerin dinamik davranışı incelenirken elektriksel girdilere bağlı olarak uç yer değiştirmesi temel veri olarak alınmıştır. Bu gereksinime uygun olarak deney sistemi işleyiş sistemi şu şekildedir:

- Bilgisayar kullanılarak geliştirilen yazılım ile veri toplama kartlarının analog gerilim çıkış terminallerinden test için referans giriş sinyali çıktısı elde edilir.
- Elde edilen sinyal, bilgisayar çıkışında düşük elektriksel güçte olduğu için bir sürücü devre yardımı ile eyleyicinin gerek duyduğu voltaj seviyesine yükseltilir.
- Güçlendirilmiş elektriksel sinyal bir mekanik ara sistem ile eyleyiciye uygulanır. Bu uygulanan sinyal eyleyicinin hareketine sebep olur. Hareket deney zamanına senkronize edilmiş görüntü yakalama sistemi ile belirli bir frekansta kaydedilir.
- Kaydedilen görüntüler hareketin zaman bağlı değişimini verirler. Görüntü sistemi ve referans girişi veren sistem eşzamanlı çalıştığından dolayı girdi değişimlerinin eyleyici hareketine etkisi gözlemlenebilir.

Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde görüntü sistemine alternatif olarak noktasal lazer mesafe ölçer kullanıldığı görülmüştür. Görüntü sistemi ile lazer mesafe ölçer karşılaştırıldığında iki temel fark ortaya çıkmaktadır:

- Bunlardan birincisi ölçüm bant genişliği açısından bakıldığında lazer mesafe lerin daha yüksek örnekleme frekanslarında çalışabilmesidir.
- Diğeri ise görüntü sisteminin noktasal değil uzaysal veri almasıdır.

Yine yapılan diğer çalışmalar incelendiğinder üretilen eyleyicilerin zaman cevaplarının (hareketlerinin zamana bağlı değişimleri) saniye mertebesinde zaman sabitlerine sahip oldukları görülmüştür. Yani eyleyicilerin en yüksek birkaç Hertz civarında bant genişliklerinin olduğu öngörülmüştür. (Bu ngr deneyssel olarak doğrulanmıştır). Dolayısı ile kurulan sistem ile elde edilen 10~20 Hertz mertebesindeki örnekleme frekansının eyleyicinin hareketlerini gözlemlenir kılabilceği görülmüştür. (Bu sistem ile teorik olarak Nyquist rnekleme frekansı kriterine göre 5 Hz lik bant genişliğine sahip bir eyleyici ile yapılan testler gözlemlenebilir. Lakin yapılan denemelerde gerilme bağlı olarak bant genişliğinin en düşük 1 Hz civarında olduğu görülmüştür. Dolayısı ile örnekleme frekansı 10 Hz alınarak deneyler yapılmıştır.) Bu sebep ile kHz mertebesinde bant genişliğine sahip lazer mesafe lerin bu uygulama için görüntü sistemine bir üstünlüğü yoktur. Buna karşın uzaysal veri alabilme özelliğinin bir sonucu olarak hareketi daha detaylı betimleyebilecek eğrilik yarı çapı gibi parametrelerin hesaplanması mümkün olabilmektedir.

### ***3.2.1 Görüntüleme Sisteminin Bileşenleri***

Görüntü işleme sistemi üç bileşenden oluşmaktadır:

- Donanım: tek kamera, görüntü işleme kartı ve endüstriyel bilgisayar donanımından oluşmaktadır.
- Gerçek Zamanlı Görüntü Kayıt yazılımı: Sabit frekanslı eşzamanlı görüntü yakalayıp kaydeden yazılım



- Görüntü işleme ve ölçüm yazılımı: Kaydedilen veriyi işleyip istenen biçimde sunan yazılım.

#### *3.2.1.1 Görüntüleme Donanımı*

Görüntü yakalama kartı kamera verisinin dijital olarak kaydedilmesi için kullanılmıştır. Sistem üzerinde analog gerilim girdi çıktı sistemi ile senkron çalışacak şekilde donanımsal olarak programlanabilmektedir. Bunun yanında, enstantane ayarı yine program üzerinden yapılabilmektedir.

#### *3.2.1.2 Kamera*

Yukarıda belirtilen hızlarda görüntü alıp bu veriyi işleyebilme yeteneğine sahip bir kamera kullanılmıştır. Düzlemsel konum ölçümü yapılacağından dolayı yüksek çözünürlüklü bir model temin edilmiş ve böylelikle ölçüm toleransı küçültülmüştür.

#### *3.2.1.3 Lens*

Lens olarak 10~20 cm gibi mesafelerden netleme yapabilen bir lens seçilmiştir. Odak uzaklığı 8mm ve diyafram açıklığı F1.4 tür.

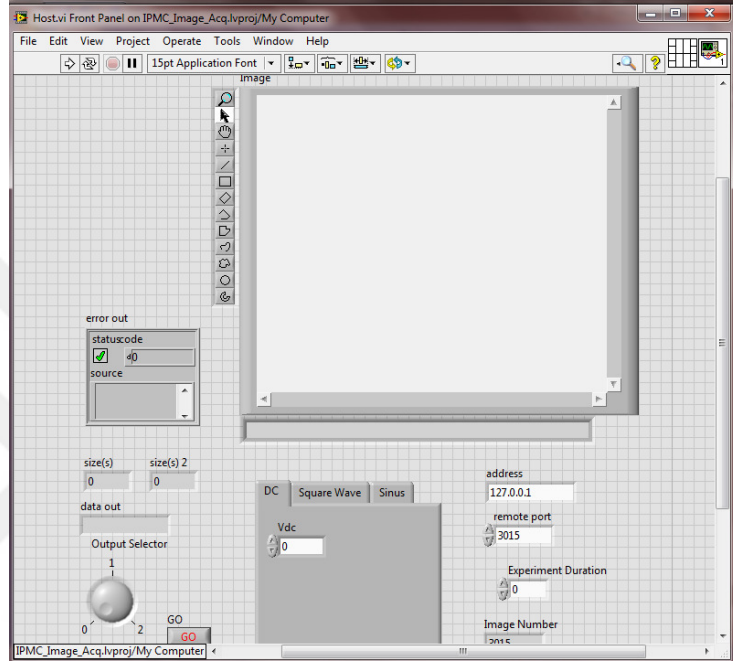
#### *3.2.1.4 Işıklandırma*

Sistemde gölgeleme olmasını engellemek amaçlı iki adet yüksek güçlü LED bazlı aydınlatıcı tasarlanmış ve bunlar uygun deneme yanılma yöntemi ile belirli bir konumda konumlandırılmıştır.

#### *3.2.1.5 Gerçek Zamanlı Görüntü Kayıt Yazılımı*

Yazılım NI Labview geliştirme ortamında tasarlanmış ve gerçek zamanlı olarak NI PXIe-8133 üzerinde çalıştırılmıştır. Aşağıda verilen sistem özelliklerine uygun görüntüleme yapmaktadır.

Hazırlanan Labview programı üç ayrı parçadan oluşmaktadır. Bunlardan birisi kullanıcın bilgisayarında kullandığı ve NI PXI sistemini kontrol eden host programı (Şekil 3.4), diğeri NI PXI sistemi üzerinde koşan target programı, sonuncusu ise FPGA kartı üzerinde koşan target slave programıdır.



Şekil 3.4 Host Programı

### 3.2.2 Alınan Görüntünün İncelenmesi

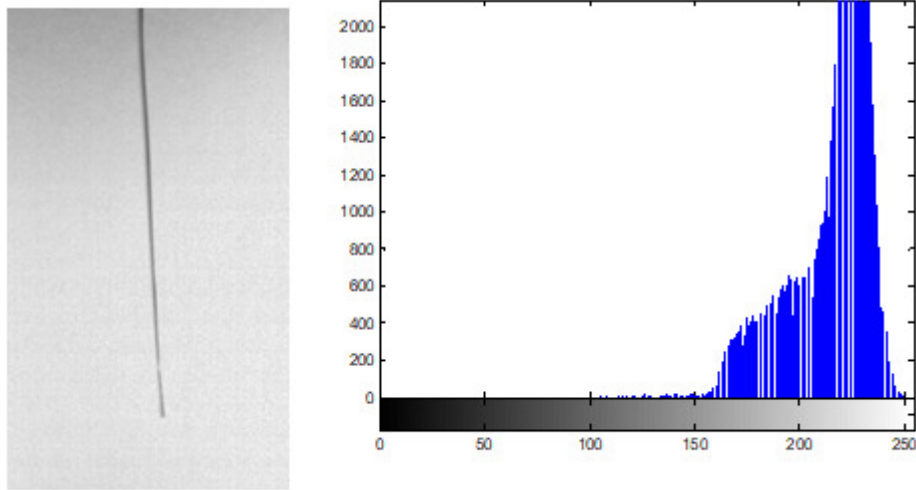
Görüntü sistemi kullanılarak alınan görüntü Şekil 3.5' de verilmiştir. Görüntü içerisine ilgilenilen nesne dışında da bir takım nesnelerin bulunduğu görülmüştür. Bunun için öncelikli olarak resim üzerinde bir ilgilenilen alan (ROI) tanımlanması gereği görülmüştür.



Şekil 3.5 Görüntüleme sistemi kullanılarak alınan görüntü (Kişisel arşiv, 2014)

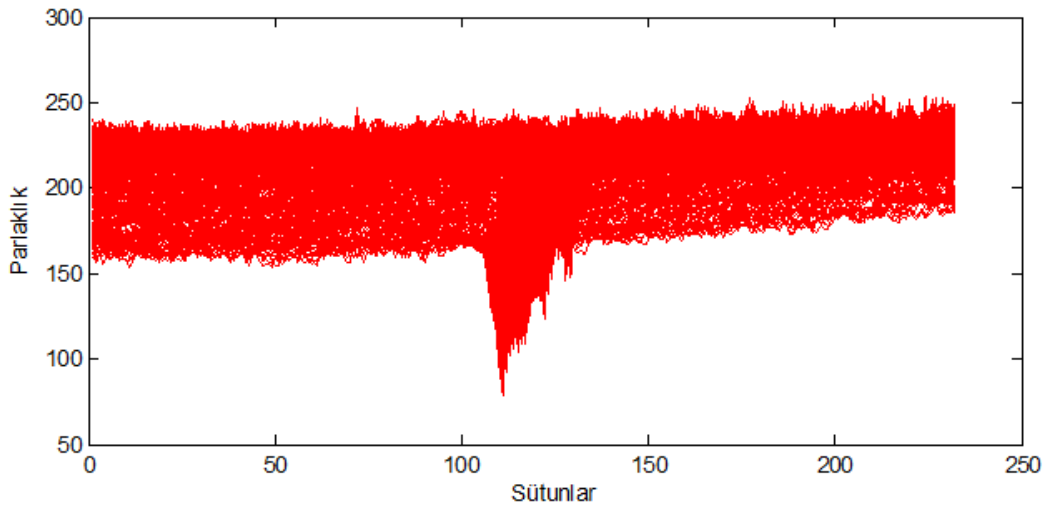
Bu konu ile ilgili temel kısıt eyleyicinin hareket testleri esnasında bu ilgi alanından çıkması ve numune sökme bağlama esnasında görüntü üzerindeki yer değiştirmelerin tolere edilebilmesi olarak düşünülmüş ve tek referans görüntü üzerinden kullanıcı tarafından girilmesi sağlanmıştır.

Elde edilen görüntü test görüntü seti için n adet görüntüde işlenecek bölge olarak belirlenmiştir. İlk bakışta görüntü üzerinde eyleyicinin koyu renk pikseller ile arka planın ise açık renk pikseller ile tanımlandığı izlenimi elde edilmektedir. Bu ayrımın geçerliliğini test etmek için bu görüntünün histogramı incelenmiştir. (Şekil 3.6).



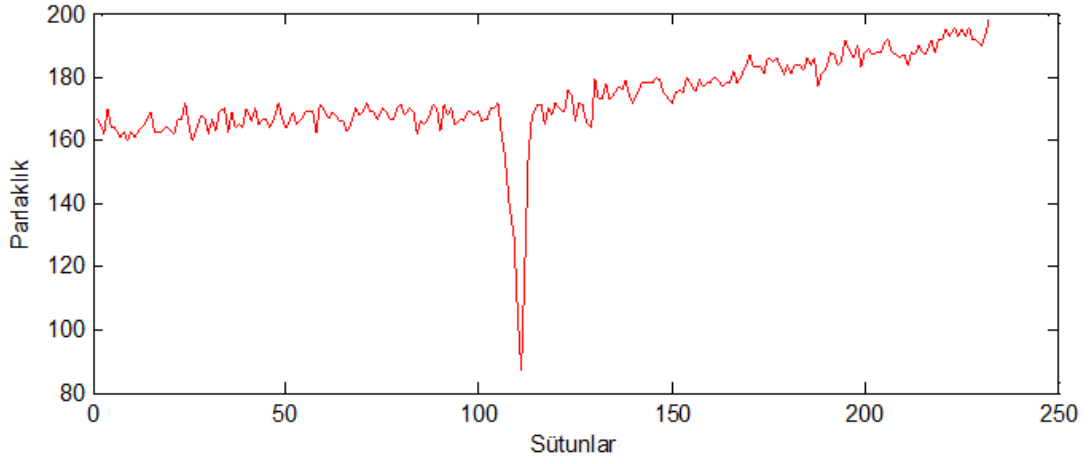
Şekil 3.6 Görüntünün histogramı

Histogram üzerinde, görüntü düzleminde ilgilendiğimiz eyleyici izi ile arka planı net olarak ayırabileceğimiz bir piksel parlaklık değeri görülmektedir. Buna bir çözüm yaklaşımı olarak düşük bir eşik değeri alınıp (örneğin 50) karşılaştırma yapılabilir. Fakat bu durumda da görüntünün satır eksenini doğrultusunda sahip olduğu parlaklık geçişi problem yaratmaktadır. (Benzer şekilde MATLAB'in kendi otomatik eşik değeri üretme komutu da başarısız sonuç vermektedir.) Bu duruma çözüm bulmak için görüntü satır bazında incelenmiştir ve her satırın parlaklık değeri yatay eksen sütun no dikey eksen parlaklık olacak şekilde çizdirilmiştir (Şekil 3.7).



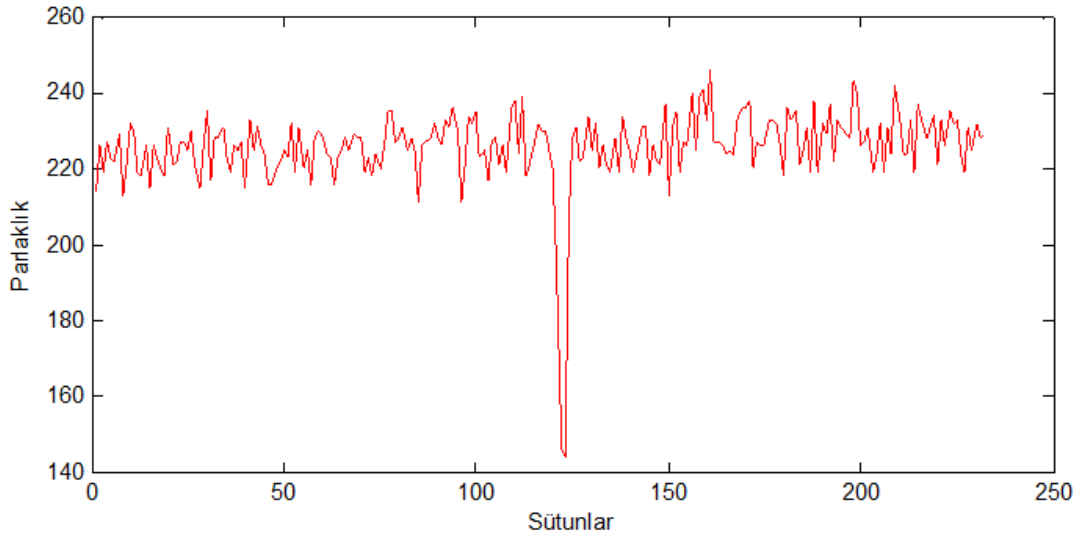
Şekil 3.7 Görüntünün tüm satırlarındaki parlaklık değeri dağılımı

Satır satır yapılan incelemede her satırdaki en koyu renk piksellerin rahatlıkla ayırt edilebildiği tespit edilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 10. Satırdaki parlaklık değeri dağılımı

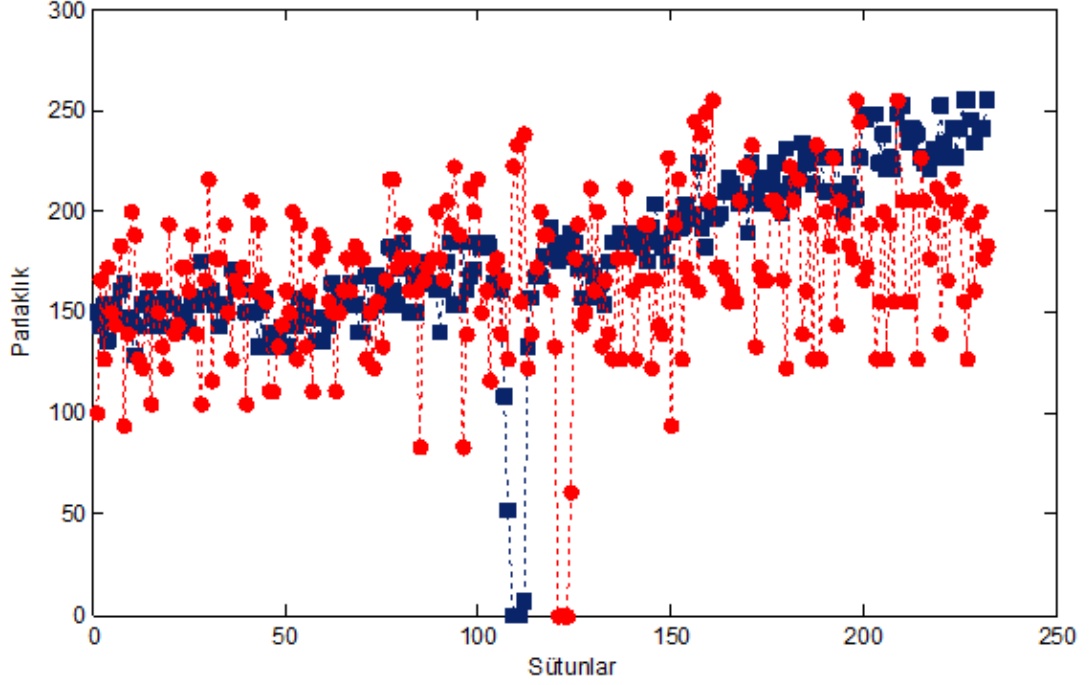
Buna göre görüntü düzlemindeki eşik değeri ile karşılaştırma işleminin satır satır yapılmasına karar verilmiştir. Fakat bu durumda da her satır için eşik değerinin nasıl seçileceği problemi ortaya çıkmıştır. Şekillerin karşılaştırılmasından da görüldüğü gibi bir satırdaki koyu renk piksellerin değeri başka bir satırda aydınlık piksellere denk gelebilmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 250. Satırın parlaklık değeri dağılımı

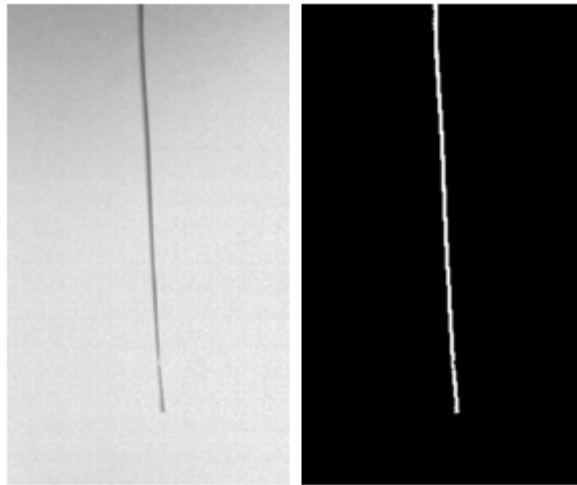
Bu probleme çözüm olarak her satırın tek tek ölçeklenmesi aynı değişim aralığına ölçeklenmesi düşünülmüştür. Böylelikle tüm satırlardaki en koyu pikseller “0” civarında parlaklık değerlerine ve yoğunluğun olduğu daha aydınlık arka plan

pikselleri ise “255” değerine yaklaşacak ve bu durum her satırı aynı parlaklık değeri dağılımına yakın hale getirecektir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Ölçekleme sonucu elde edilen parlaklık değeri dağılımları (□ 10. Satır verileri • 250.satır verileri)

Bu ön işlemlerden sonra görüntü “60” sabit eşik değeri ile karşılaştırılarak iki renk görüntüye çevrilmiştir (Şekil 3.11).

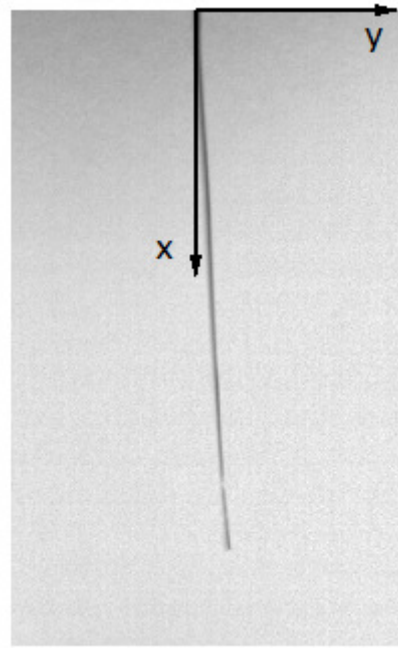


Şekil 3.11 Görüntü üzerinde eyleyici izi

Yukarıda belirlenen yöntem alınan her görüntüye uygulanır. Önışlem alt programının işleyişı ve örnek olarak alınmış 4 görüntü üzerinden sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Tek kamera ile boyut ve yer değiştirme gibi ölçümler yapabilmek için uygulanan yöntem ölçülecek parçanın bağlandığı düzleme denk gelecek bilinen boyutlu bir hedef bağlayıp bu hedefin en ve boy uzunluklarının denk geldikleri piksel sayısından bir ölçek elde edilmiştir. Bu ölçek verisi eyleyicinin sadece bir düzlemdeki hareketi inceleneceğinden yeterli bulunmuştur.

Görüntü düzleminde ilk satırdaki eyleyici izinin merkez noktası referans alınarak piksel bu koordinat eksenine uygun olarak sıralanmıştır. Bu işlem her görüntü için otomatik olarak yapılmaktadır (Şekil 3.12).

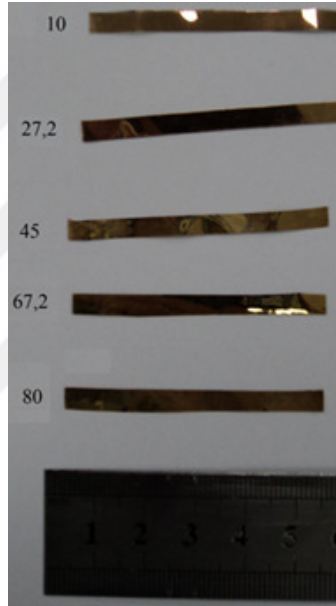


Şekil 3.12 Görüntü üzerinde koordinat ekseninin yerleşimi

### 3.3 Doğru Akım Deney Seti

#### 3.3.1 Giriş

Elektrot kalınlığının eyleyici dinamikleri üzerindeki etkisini belirlemek için doğru akım (DC) deney seti tasarlanmıştır. Deneylede, eyleyici şeklindeki değişimin düzlemsel olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, şerit şeklindeki numuneler ile yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan Nafion tabakaları 50 x 5 mm ve elektrot kalınlığı 10, 27, 45, 67 ve 80 nm olarak seçilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Hazırlanan şerit Nafyon numuneler (Kişisel arşiv, 2014)

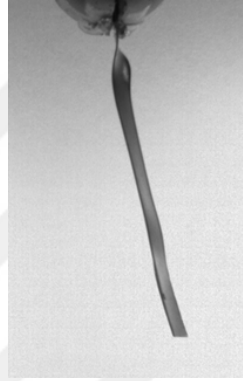
1,2 V gerilimin eyleyicilerin yaşam beklentisi açısından kritik olduğu bilinmesine rağmen, eyleyicilerin güç üretme yeteneklerindeki artıştan dolayı eyleyicileri test etmek için daha geniş bir voltaj aralığı kullanan birçok araştırma ve uygulama vardır. Literatürde, İPMK eyleyiciler için tipik çalışma gerilimi aralığının 0 – 5 V olduğu sıkça belirtilmektedir (Caponetto, De Luca, Graziani, Sapuppo, 2013; Vunder, Punning, Aabloo, 2012). Bu nedenle deneyler daha geniş bir gerilim aralığında (1V-9V) yapılmıştır. İlk örnek sette 1, 3, 5, 7 ve 9 V doğru akım uyarma değerleri kullanılmıştır. Bu deney kümesi, eyleyicilerin geçici tepki karakteristiklerini ve yarı-



kararlı hal değerlerini tanımlamak amacıyla kullanılmıştır. İkinci örnek sette 3, 5 ve 7 V büyüklükte kare dalga uyarımı uygulanmıştır.

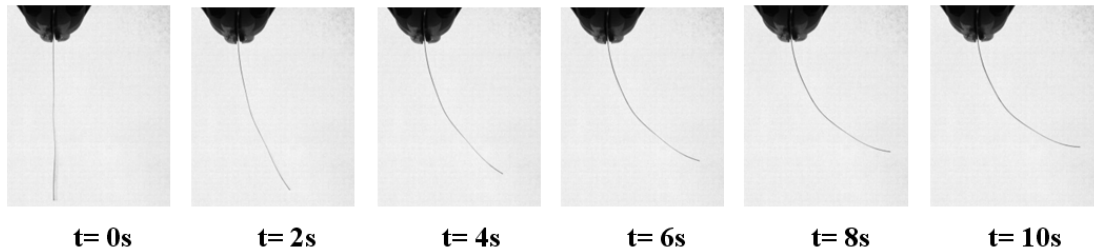
### 3.3.2 Doğru Akım Uygulamalarında Eyleyici Cevabı

Eyleyicilere 1 V gerilim uygulandığında dikkate alınır bir uç yer değiştirme yapımadığı gözlenmiştir. 9 V gerilim uygulandığında ise eyleyici büzülerek tekrar kullanılamaz hale gelmiştir (Şekil 3.14).



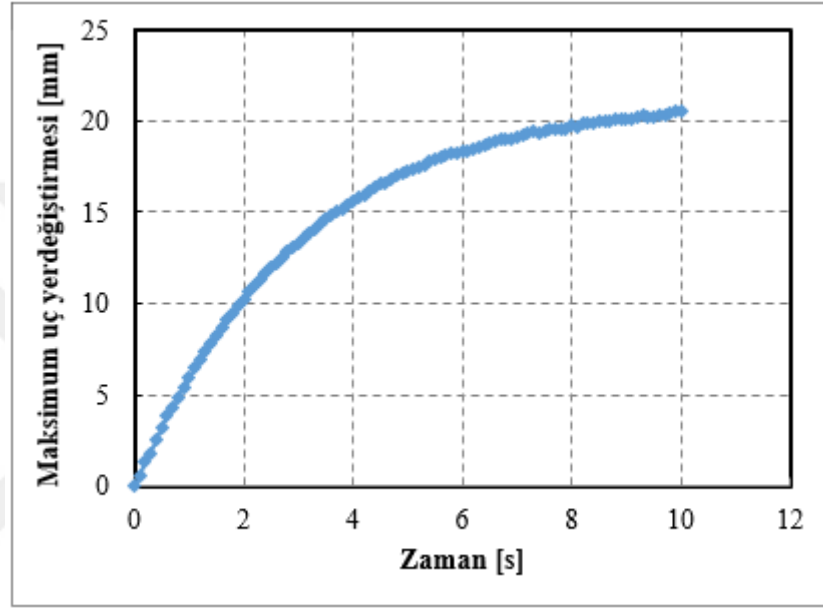
Şekil 3.14 9 V gerilim uygulandığında bozulan eyleyici (Yılmaz ve diğer., 2019)

Deneyler, 10 saniyelik bir süre boyunca 3, 5 ve 7 V DC gerilimler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Örnek eyleyicilerin zaman tepkileri deneyler sırasında kaydedilmiştir. Tüm eyleyici örnekleri için genel bir cevap formu gözlemlenmiştir. Eyleyici yanıtının bu genel formunu temsil etmek için, deney sırasında farklı anlarda yakalanan görüntüler Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



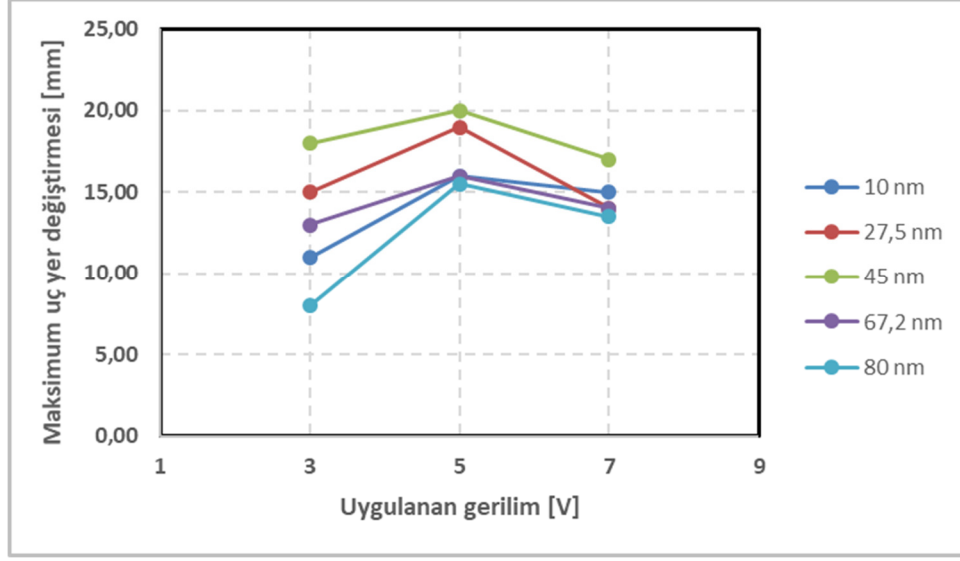
Şekil 3.15 Eyleyici yanıtı (5V gerilim uygulanan 45nm kalınlığındaki eyleyici) (Yılmaz ve diğer., 2019)

Şekil 3.16'da, uç yer değiştirmenin zaman içerisindeki değişimini göstermektedir (eyleyicinin zaman cevabı). Şekil 3.16'dan görülebileceği gibi, eyleyici 10 s içinde 20 mm uç yer değiştirmesine ulaşmıştır. Eyleyici tepkisi zaman leğine göre analiz edildiğinde, her takip zaman diliminde uç yer değiştirmedeki artışın daha küçük olduğu görülmüştür. Bu nedenle, uç eğrilerine karşılık zaman eğrilerinin üstel biçimde olduğu tahmin edilebilir.



Şekil 3.16 Maksimum uç yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi

3, 5 ve 7 V giriş gerilimi, 10, 27, 45, 67 ve 80 nm elektrot kalınlıklarında nafyon tabanlı eyleyici için maksimum uç yer değiştirme değerleri deneysel veriler kullanılarak bulunmuştur

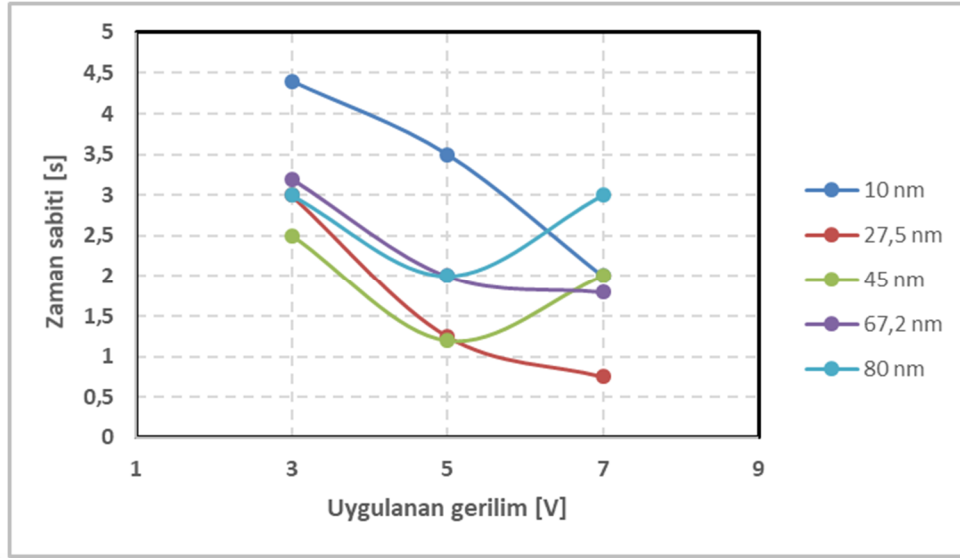


Şekil 3.17 3, 5, 7 V doğru akım gerilim uygulanan Nafyon eyleyicilerin maksimum uç yer değiştirmeleri

Şekil 3.17'deki sonuçlar incelendiğinde, gerilim 3 V'tan 5 V'a yükselirken maksimum uç yer değiştirmesi de yükselmiş, ancak gerilim 7 V'a yükseldiğinde uç yer değiştirmesi hafifçe düşmüştür. Bu beklenmeyen bir sonuçtur, çünkü eyleyiciye daha fazla elektrik potansiyeli enerjisi sağlanmıştır ve bu nedenle daha fazla mekanik iş yapılması beklenmektedir. Ancak sonuçlar, giriş voltaj değeri eşiği aşıldığında uç yer değiştirmesinin azaldığını göstermektedir (5 V deneyleri). Farklı elektrot kalınlıkları için değerler karşılaştırıldığında, iki sonuç ortaya çıkmıştır:

- İlk çıkarım, 45 nm elektrot kalınlığına sahip eyleyici, tüm uyarma gerilimleri için tüm eyleyiciler dikkate alındığında maksimum uç yer değiştirmesine sahiptir.
- Gözlenen diğer bir sonuç, belirli bir elektrot kalınlığı için, gerilim arttıkça uç yer değiştirmesinin her zaman artmamasıdır. Uç yer değiştirme ve gerilim arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Bu nedenle, her gerilim için uygun bir optimum kalınlık değeri vardır.

Zaman sabitleri, 3, 5 ve 7 V giriş geriliminde, 10, 27, 45, 67 ve 80 nm elektrot kalınlığı olan Nafyon eyleyici numuneleri için deneysel veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, Şekil 3.18'de sunulmuştur.



Şekil 3.18 3, 5, 7 V doğru akım gerilim uygulanan Nafyon eyleyicilerin maksimum zaman sabitleri

Şekil 3.18’de, uyarma voltaj eğrilerine karşı zaman cevabında iki tip yapıda olduğu görülmektedir. İlk yapı, voltaj arttıkça eyleyici hareketin daha hızlı hale gelmesidir. Bu yapı, elektrot kalınlıkları 10 ve 27 nm olan eyleyici numunelerinde oluşmaktadır. İkinci yapı, gerilim 3 V’tan 5 V’a yükseltilmesiyle gözlenen hareketin daha hızlı olması ve 5 V’dan 7 V’a yükseltilirken daha yavaşlaması veya yaklaşık olarak aynı kalmasıdır. Bu yapı, elektrot kalınlıkları 45, 67 ve 80 nm olan eyleyici numunelerinde oluşmaktadır. Bu nedenle, uyarma gerilimi veya elektrot kalınlığına göre eyleyici zaman sabiti değişimini tanımlayan genel bir model olmadığı için net bir sonuç elde edilememektedir. Bunun yanı sıra en hızlı zaman tepkisinin 7 V DC uyarılması altında 27 nm elektrot kalınlığındaki nafyon bazlı elektrot ile gözlemlendiği görülmüştür. Sonuçlar bir arada ele alındığında, 45 nm elektrot kalınlığına sahip eyleyici maksimum uç yer değiştirme değerine sahiptir ve 5 V ile uyarıldığında en hızlı ikinci tepkiye sahiptir. Nafyon bazlı eyleyicinin doğru akım karakteristiği incelendiğinde, belirli bir elektrot kalınlığına ve bir uyarım voltajına sahip olan herhangi bir İPMK eyleyicinin seçilmesinin, ileriye yönelik uygulama açısından değerlendirildiğinde optimizasyon gerektirdiğini göstermektedir.

### **3.3.3 Sonuçlar**

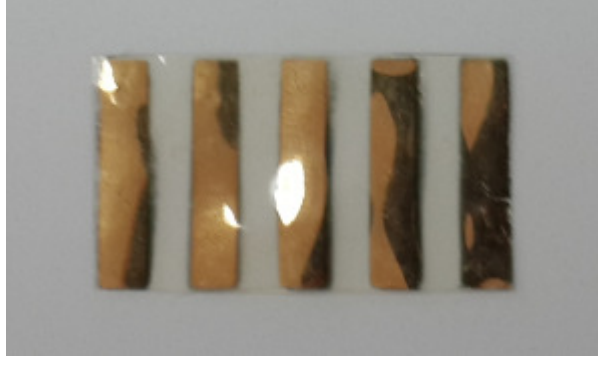
İPMK eyleyicilerin elektromekanik karakteristikleri, eyleyicilerin elektrot kalınlığı ve elektroaktif özellikleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Maksimum uç yer değiştirmesi ve zaman sabiti elektrot kalınlığı 10 ila 45 nm arasında arttıķa artmıŐ ve elektrot kalınlığı 45 ila 80 nm arasında arttığında azalmıŐtır. Nafyon tabanlı İPMK'in hareketine yol açan eğilme momenti, uygulanan elektrik alanın sonucu olan katyon hareketi nedeniyle gerçekleŐmektedir. Uygulanan elektrik alan, elektrik akısının konumsal yoğunluğunu etkilediği için doğrudan elektrot kalınlığı ile ilgilidir. Deneysel sonuçlar, uyarma gerilimleri ve elektrot kalınlığı açısından optimizasyonun, katyonlara etki eden elektriksel kuvvet ile eyleyicilerin rijitliği arasındaki deęiŐimin sonucu olduğunu göstermiştir.

## **3.4 Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) Deney Seti**

### **3.4.1 Giriş**

Doğru akım testlerinin ardından darbe genişliği modülasyonu (PWM) metodu kullanılarak eyleyicilerin testlerinin yapılmasına karar verilmiştir. Biyomimetik eyleyici tasarımında kullanılacak yöntem de dikkate alınarak, doğru akım testlerinde kontrolcü olarak National Instruments kartları yerine Arduino kullanılmıştır. Arduino ile beraber H köprüsü mantığında alıŐan L293D entegresi kullanılmıştır.

PWM metodu ile sürülecek numuneler, doğru akım testlerinde kullanılan 50 x 5 mm boyutu yerine daha kk eyleyici uygulamalarında kullanılabilme adına 20 x 5 mm boyutunda üretilmiştir (Şekil 3.19). Üretim metodu (PVD) deęiŐtirilmemiŐtir. Çevrimsel olarak daha uzun ömre sahip olması nedeniyle elektrot kalınlığı 80 nm seçilmiştir.



Şekil 3.19 20 x 5 mm boyutunda hazırlanan numuneler (Kişisel arşiv, 2014)

Testler doğru akım testlerinin yapıldığı düzenekte yapılmıştır. Görüntü işleme ile maksimum uç yer değiştirmesi ölçümünde önceki bölümlerde bahsedilen Matlab ve Kinovea yöntemleri kullanılmıştır.

#### **3.4.2 Darbe Genişliği Modülasyonu**

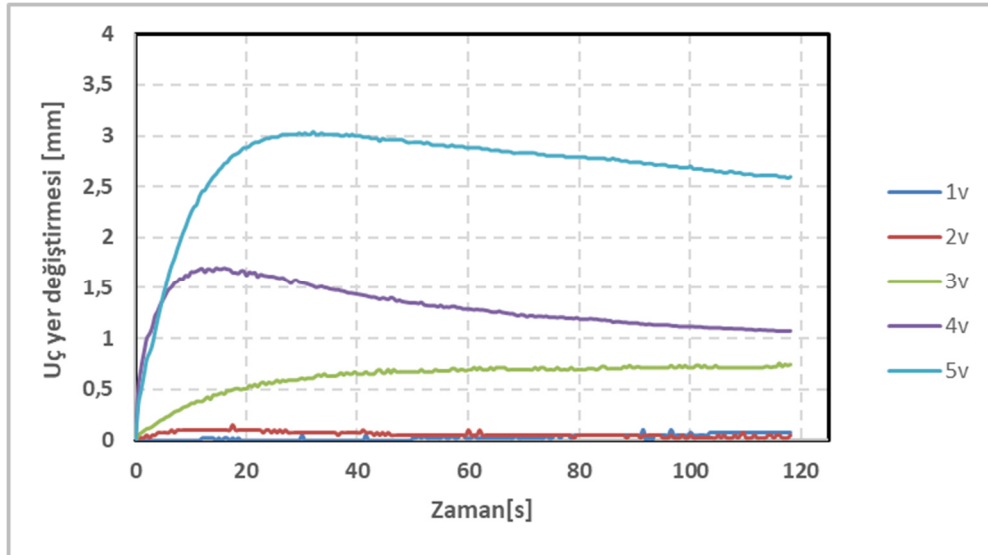
Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) elektromanyetik eyleyicilerde yaygın olarak kullanılan bir sürüş tekniğidir. Bir PWM sinyali üç parametreden oluşmaktadır. Bu parametreler; sinyalin genliği, frekansı ve doluluk oranıdır. Genlik, sürüş devresine uygulanan doğru akım gerilimin sabit değeridir. Bu gerilim, bir eyleyiciye verilebilecek maksimum voltaj değerini tanımlar. Genlikten daha düşük olan eşdeğer gerilim değerleri, PWM sinyalinin doluluk oranı değiştirilerek uygulanabilir. Doluluk oranı, besleme geriliminin belirli bir dönem boyunca ne kadar süreyle uygulanacağını tanımlar; PWM sinyalinin periyodunun yüzdesi olarak belirlenir. Çoğu uygulamada, PWM sinyali önceden tanımlanmış bir frekans ve büyüklükte kullanılır ve doluluk oranı, eyleyiciye güç aktarımını kontrol etmek için değiştirilecek olan serbest bir parametre olarak ayarlanır. Ancak bu çalışmada frekans ve genlik de PWM sinyallerinin karakteristik parametreleri olarak tanımlanmıştır.

Literatürde PWM yöntemi İPMK eyleyicileri tahrik etmek için uygulanmıştır ve PWM sürüş tekniğinin İPMK'in kendisini geri salmasını azaltma avantajına sahip olduğu görülmüştür (Chuc ve diğer., 2010; Li, Song, Wang, Xue, 2006). Shoji ve Komoda (2013) İPMK uygulamalarında PWM sürüş yöntemine odaklanmış ve sunulan sonuçlar, PWM tekniğini kullanarak elde edilen farklı voltaj modellerinin

eyleyicinin hareket kabiliyetini geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, PWM parametrelerinin İPMK eyleyici performansı üzerindeki etkileri konusunda daha fazla araştırma yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır (Shoji ve Komoda, 2013). PWM parametrelerinin İPMK eyleyicinin performansı üzerindeki etkisini araştırmak için üç deney seti üzerinde çalışılmıştır. İlk deney grubu, eyleyiciler sabit doğru akım gerilim ile tahrik edildiğinde eyleyici tepkisini gözlemek için tasarlanmıştır. Bu deneysel sonuçlar bir veri tabanlı dinamik model oluşturmak için kullanılmıştır. İkinci deney grubu, farklı frekanslarda doğru akım kare dalga sinyalleri uygulandığında eyleyici tepkisini gözlemek için tasarlanmıştır. Üçüncü deney grubu, farklı büyüklüklerde PWM sinyali uygulandığında eyleyici tepkisini gözlemek için tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar (cevap özellikleri ve modeller) PWM parametrelerinin sistemin performansı ve özellikleri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

### 3.4.3 Sabit Doğru Akım Testleri

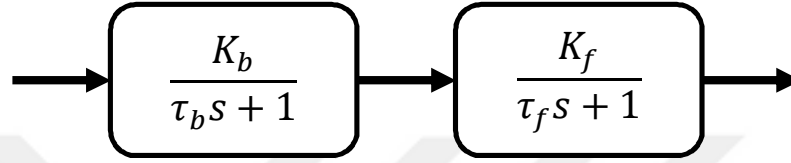
Bu deney seti, eyleyiciler 1, 2, 3, 4 ve 5 V sabit doğru akım gerilim seviyesi ile tahrik edildiğinde eyleyici tepkisini gözlemek için gerçeleştirilmiştir. Eyleyicinin zaman tepkileri, Şekil 3.20'te verilmiştir.



Şekil 3.20 Sabit doğru akım testleri uç yer değiştirmeleri

### 3.4.4 Basit İPMK Eyleyici Modeli

Nafyon tabanlı İPMK eyleyicilerin hareketinin, üzerlerinde oluşan bükülme momentinin bir sonucu olduğu bilinmektedir. Bu momente neden olan mekanizma, membranın bir tarafındaki uzamadır. Bu uzama, bir elektrik potansiyeli uygulandığında proton değişimi ile diyafram boyunca su / yük taşınması nedeniyle oluşur (Shahinpoor ve Kim, 2001).



Şekil 3.21 Basit model yaklaşımının blok diyagramı

Ayrıca, İPMK eyleyiciler fenomenolojik bir davranışa sahiptir. Eyleyiciler zaman geçtikçe geriye doğru (dinlenme pozisyonuna doğru) hareket eder. Bu mekanizmaya geri salma denir ve genellikle eyleyicinin ıslak ve nispeten kuru tarafları arasındaki iç basınç farkı ile ilişkilendirilir. Bu basınç farkı kuru tarafa doğru su akmasına neden olur, bu da bükülme anında rahatlatma sağlar (Shahinpoor ve Kim, 2001).

Bu çift yönlü çalışma mekanizması, Şekil 3.20'de verilen doğru akım deneylerinde açıkça görülebilir. Verilen eğriler analiz edildiğinde, eyleyicilerin dinamik tepkisinin bir hızlı ve bir yavaş dinamik içerdiği görülebilir. Bu nedenle, uyarım geriliminden uç deplasmanına transfer fonksiyonunu tanımlamak için, Şekil 3.21'te gösterildiği gibi basit ve deneysel bir veri tabanlı model önerilmiştir.

$$G_{IPMK}(s) = \frac{K_b}{\tau_b s + 1} \frac{K_f}{\tau_f s + 1} \quad (3.1)$$

$K_b$  ve  $K_f$ , DC kazancıdır ve  $\tau_b$  ve  $\tau_f$ , bir transfer fonksiyonunda meydana gelen hızlı ve yavaş zaman sabitleridir (Denklem (3.1)). Önerilen modelin adım yanıtı aşağıdaki gibi kolayca parametrelendirilebilir:



$$y(t) = C_0 + C_b e^{-t/\tau_b} + C_f e^{-t/\tau_f} \quad (3.2)$$

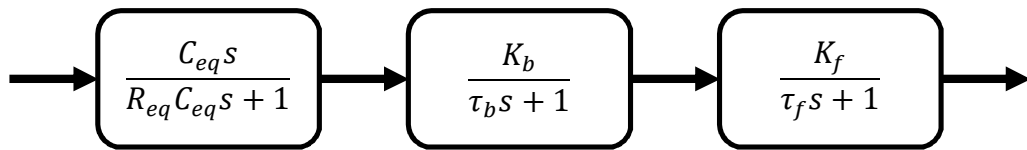
Matlab eğri uydurma araç kutusu, doğrusal akım test eğrileri için, denklem (3.2)'deki parametreleri tanımlamak için kullanılmıştır. Ancak elde edilen sonuçlar beklenenden farklı biçimlerde. Eğri denklemlerinin, denklem (3.3)'te olduğu gibi, tablo 3.1'de verilen a, b,  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları ile birlikte genel bir formda olduğu görülmektedir.  $R^2$ , belirtme katsayısıdır.

$$y(t) = ae^{\alpha t} + be^{\beta t} \quad (3.3)$$

Tablo 3.1 Doğru akım deneyleri eğri uydurma sonuçları

	<b>a</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>b</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>3 V</b>	0,683	0,00054	-0,663	-0,0695	0,9958
<b>4 V</b>	1,772	-0,00475	-1,613	-0,3412	0,9732
<b>5 V</b>	3,287	-0,00204	-3,241	-0,1202	0,9979

Elde edilen fonksiyonların (3.2)'de önerilen denklemin bir zaman türevinin formunda olduğu görülmektedir. Bu sonuç dikkate alındığında, önerilen blok şemasına bir türev bloğu eklenir (Şekil 3.22). Elektrik sisteminin transfer fonksiyonu, denklem (3.4)'de verildiği gibi, bir seri kondansatör ( $C_{eq}$ ) ve bir direnç ( $R_{eq}$ ) eşdeğeri için tanımlanabilir.



Şekil 3.22 Model yaklaşımıyla önerilen blok diyagramı

$$G_e(s) = \frac{i(s)}{V_0(s)} = \frac{C_{eq}s}{R_{eq}C_{eq}s+1} \quad (3.4)$$

Bu transfer fonksiyonu, kutup  $1 / (R_{eq}C_{eq})$  'den küçük olan giriş frekansları için türev alıcı gibi davranır. Bu türev işlemi,  $1 / s$  adım girişi teriminin iptaliyle sonuçlanır.

Bu nedenle, Şekil 3.22'de verilen blok diyagramın adım girişi tepkisi ve denklem (3.5)'deki sistem transfer fonksiyonu şekli, Şekil 3.20'de verilen genel bir forma sahiptir.

$$G(s) = \frac{C_{eq}s}{R_{eq}C_{eq}s+1} \frac{K_b}{\tau_b s+1} \frac{K_f}{\tau_f s+1} \quad (3.5)$$

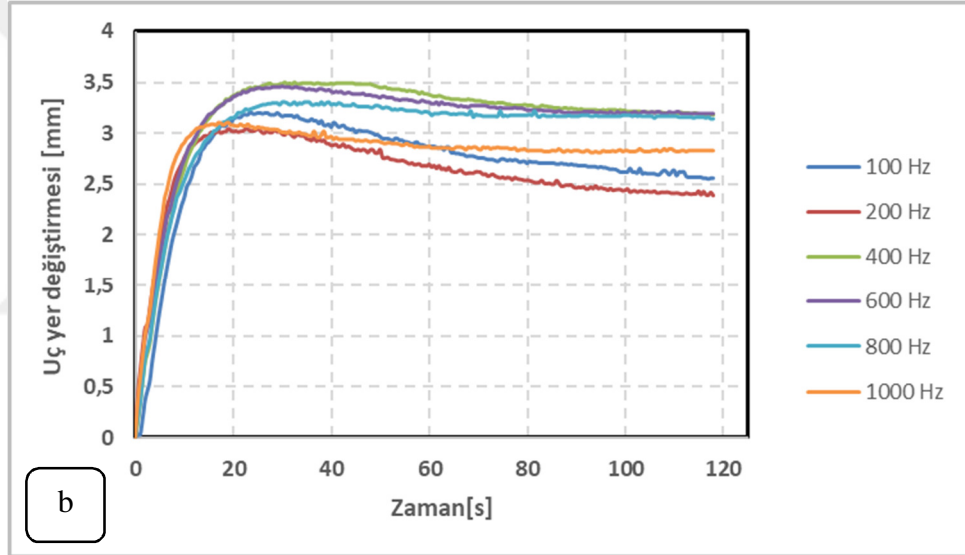
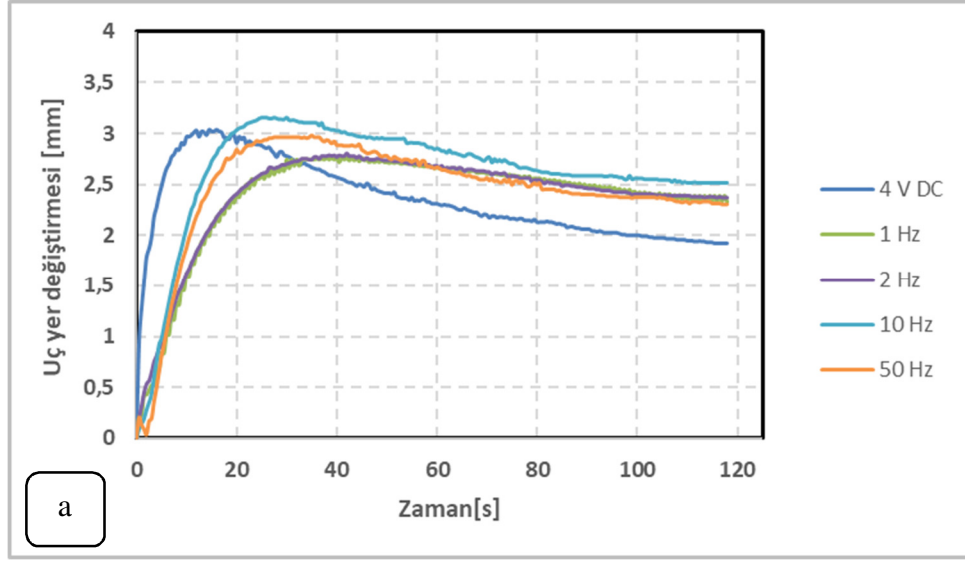
Elde edilen transfer fonksiyonu, eyleyici tarafından sürülen akım ile Bonomo, Fortuna, Giannone, Graziani ve Strazzeri (2006) tarafından diyafram yüzeylerinde indüklenen stres arasındaki lineer elektromekanik kuplaj transfer fonksiyonu için önerilene çok benzerdir (Bonomo ve diğer., 2006). Bununla birlikte, bu çalışmada transfer fonksiyonu, uyarma gerilimi ile uç yer değiştirmesi arasında tanımlanmıştır.

Geliştirilen doğrusal ilişkinin sadece bir deneysel sonuç için geçerli olduğu bilinmelidir. Ancak bulunan ilişki, sabit parametrelerin ortamın girdi seviyelerine ve nemine göre değişmesine izin vererek yeniden yapılandırılabilir ve daha geniş bir geçerlilik ölçeğine getirilebilir (McDaid, Aw, Haemmerle ve Xie, 2010). Bu çalışma bağlamında, bu model, farklı PWM frekansları ile çalıştırıldıklarında, eyleyicilerin dinamik yanıtlarındaki değişiklikleri araştırmak için kullanılmıştır.

#### **3.4.5 PWM Frekansının İPMK Eyleyiciler Üzerindeki Etkisinin Araştırılması**

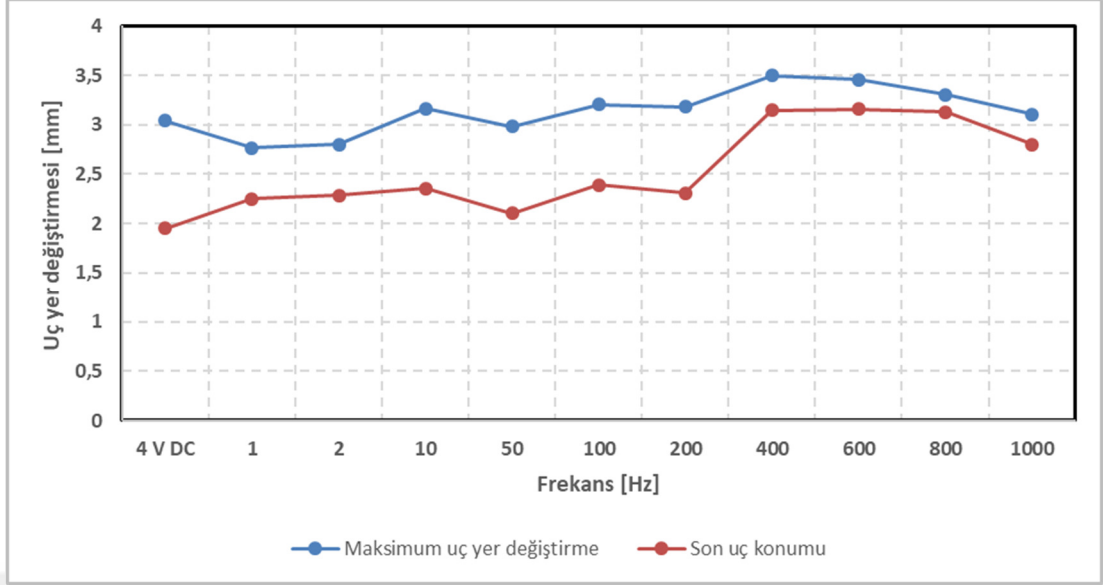
Bir PWM sürücü testini uygulamadan önce, tanımlanacak ilk kritik parametre, doğrudan eyleyicinin dinamik karakteristikleri ile ilgili olan PWM frekansıdır (Yılmaz ve diğer., 2014). Bu nedenle, ikinci deney grubu, uygun frekans aralığını belirlemek için PWM frekansının İPMK eyleyicinin performansı üzerindeki etkisine odaklanmıştır.

İPMK eyleyiciye 1, 2, 10, 50, 100, 200, 400, 600, 800 ve 1000 Hz. frekansları ile periyodun yarısı için yüksek ve diğer yarısı için düşük (% 50 doluluk oranı) olan bir kare dalga elektriksel çalıştırma sinyali uygulanır. Eyleyicinin zaman tepkileri Şekil 3.23'de sunulmuştur.



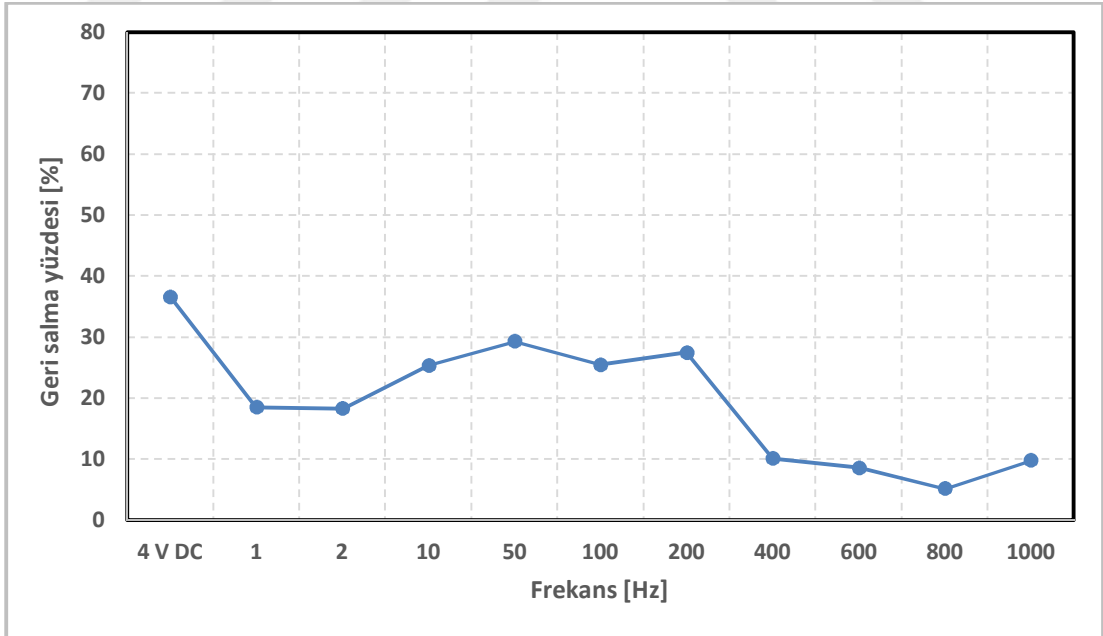
Şekil 3.23 PWM frekansına bağlı eyleyici uç yer değiştirmeleri (a) 0 – 50 Hz, (b) 100 – 1000 Hz

Şekil 3.23'de verilen deney sonuçları, uç yer değiştirmesinin maksimum değerinin 50 Hz'in üzerindeki frekanslar için yaklaşık olarak sabit kaldığını göstermektedir. 50 Hz altındaki frekanslar için cevaplarda net bir desen gözlenmemiştir. Öte yandan, Şekil 3.24'te verilen son uç yer değiştirmelerindeki frekans artışıdaki azalma eğilimi dikkat çekicidir.



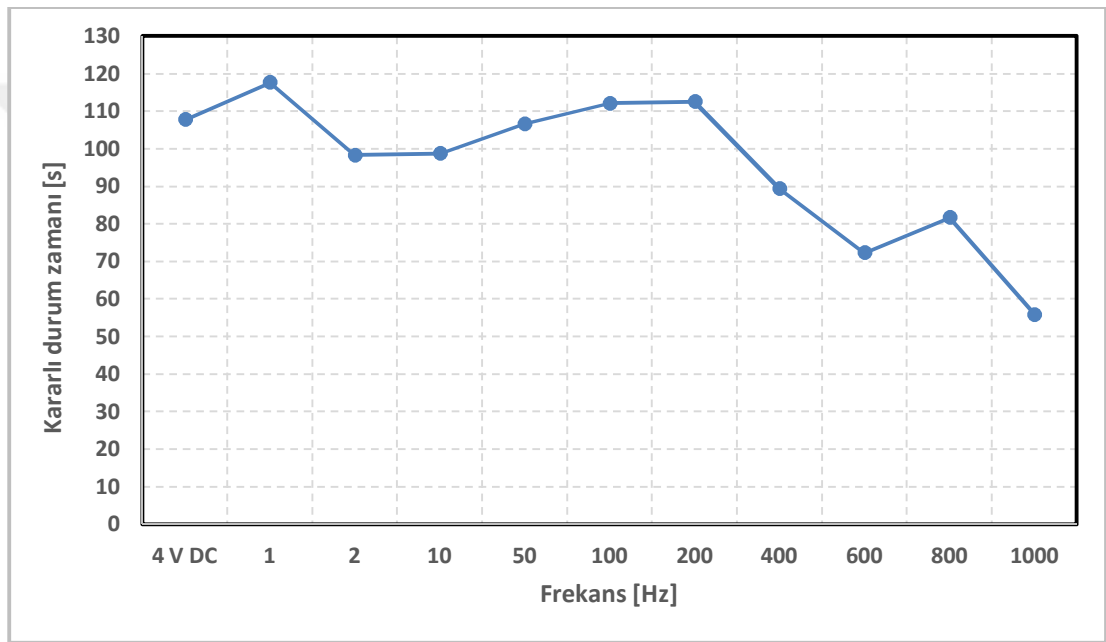
şekil 3.24 Frekansa bağlı maksimum ve son uç yer değiştirme değerleri

İPMK eyleyicilerin tekrarlanabilirliğinin düşük olduğu göz önüne alındığında, geri salma yüzdesi, maksimum ve son uç yer değiştirmelerini karşılaştırmak yerine zaman tepkilerinin performansını karşılaştırmak için kullanılmıştır (şekil 3.22).



şekil 3.25 Frekansa bağlı geri salma yüzdesi

Şekil 3.25, boyutsuz parametredeki değişimi ve PWM frekansına karşı geri salma yüzdesini gösterir. Düşme eğilimi, 50 Hz'in altındaki ve 400 Hz'in altındaki frekanslar için yine belirgindir. 400 Hz'in üzerindeki frekanslar için yaklaşık olarak sabit kalır ve geri salma yüzdesi %10'dan azdır. 400 Hz'den daha büyük frekansların çok benzer özelliklere sahip olduğu görülmüştür ve İPMK eyleyicileri sürerken PWM frekansı olarak kullanılabilirler. Ayrıca, eyleyicilerin zaman tepkisi biçimlerinin, Bonomo ve diğer. (2006) ve Kothera, Leo, Lacy (2008) tarafından da bildirildiği gibi, 50 Hz'in altındaki PWM frekansları için daha da kötüleştiği görülmektedir.



Şekil 3.26 Frekansa bağlı kararlı durum zamanı grafiği

Deney sonuçları ayrıca, Şekil 3.26'da verilen zaman ölçeği karakteristik 'kararlı durum zamanı' açısından da karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan kararlı durum zamanı, uç yer değiştirmenin nihai değerinin % 99'una ulaştığı anı ifade eder. Şekil 3.26, eyleyicilerin sabit durum süresinin PWM frekanslarına göre azalan eğilimini göstermektedir. En düşük sabit durum süresi 1000 Hz deneylerinde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, 600 Hz'in üzerindeki PWM frekanslarının sabit durum süresi bakımından benzer özelliklere sahip olduğu da görülmüştür.

Deney sonuçları ayrıca önceki bölümde verilen modelleme yaklaşımı ile analiz edilmiştir. Eğri uydurma MATLAB ile yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.2'de sıralanmıştır.

Tablo 3.2'deki satırlar, İPMK aktüatörünün yavaş ve hızlı dinamikleri referans alınarak hesaplanan  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayılarını göstermektedir. Yavaş hareket ön filtreden dolayı mevcut zayıflama etkisini gösterir. Ön filtrenin kutbunun, ileri dinamiği belirleyen kutba göre küçük olduğu görülmektedir. Bu kutup, PWM frekansı 0'dan 400 Hz'e yükselirken sifıra yaklaşmakta ve 400 Hz'den sonra, yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Ön filtrenin katsayısındaki bu değişiklik, yüksek PWM frekanslarında ön filtreleme nedeniyle eyleyicilerin uç yer değiştirmelerindeki bozulmayı azaltır ve bu etki, geri salmada bir iyileşme sağlar.

Tablo 3.2 Frekans deneyleri için eğri uydurma sonuçları

Frekans	a	$\alpha$	b	$\beta$	R <sup>2</sup>
4 V DC	3,16	-0,0048	-2,88	-0,34	0,9732
1 Hz	3,25	-0,0029	-3,37	-0,08	0,9933
2 Hz	3,23	-0,0030	-3,28	-0,08	0,9958
10 Hz	3,56	-0,0034	-4,04	-0,11	0,9776
50 Hz	3,44	-0,0038	-3,98	-0,11	0,9728
100 Hz	3,50	-0,0029	-4,01	-0,14	0,9816
200 Hz	3,26	-0,0029	-3,28	-0,20	0,9876
400 Hz	3,71	-0,0015	-3,91	-0,13	0,9963
600 Hz	3,57	-0,0011	-3,60	-0,15	0,9953
800 Hz	3,38	-0,0007	-3,52	-0,14	0,9966
1000 Hz	3,13	-0,0011	-3,40	-0,24	0,9784

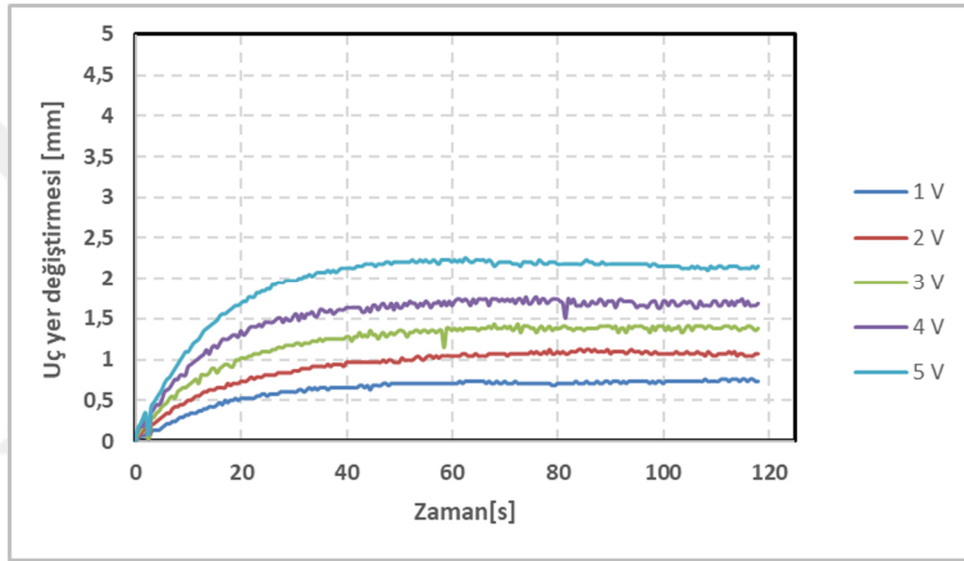
#### 3.4.6 PWM Sinyalinin Genliğinin İPMK Eyleyici Performansı Üzerindeki Etkisi

PWM sinyal değerinin büyüklüğünün İPMK çalıştırma performansı üzerindeki etkisini analiz etmek için üçüncü set deneyler yapıldı. Sürüş sinyallerinin frekansı, önceki deneylerde elde edilen minimum geri salma yüzdesi değeri dikkate alınarak 800 Hz olarak tanımlanmıştır. Deneyler, 1, 2, 3, 4 ve 5 V'luk bir doğru akım eşdeğer gerilim oluşturmak üzere farklı büyüklüklere ve doluluk oranlarına sahip olan belirli PWM sinyalleriyle (Tablo 3.3) aktive edildiğinde, eyleyicilerin uç yer değiştirmelerini gözlemlemek üzere düzenlenmiştir. Eyleyicilerin zaman tepkileri, Şekil 3.27, 3.28 ve

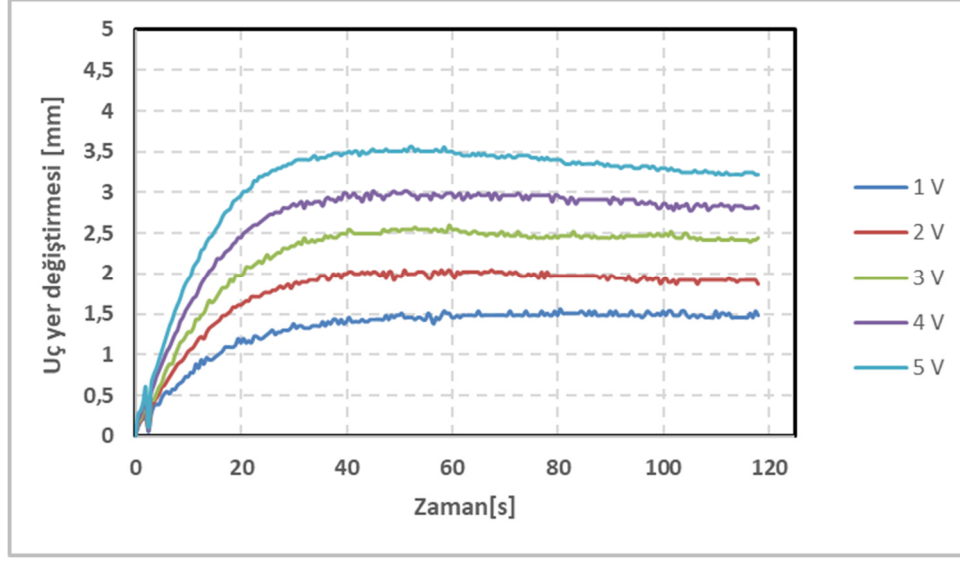
3.29'da verilmiştir. Her deneydeki son uç yer değiştirmesi de Şekil 3.30'da sunulmuştur.

Tablo 3.3 Sinyal genliği testleri PWM doluluk oranları

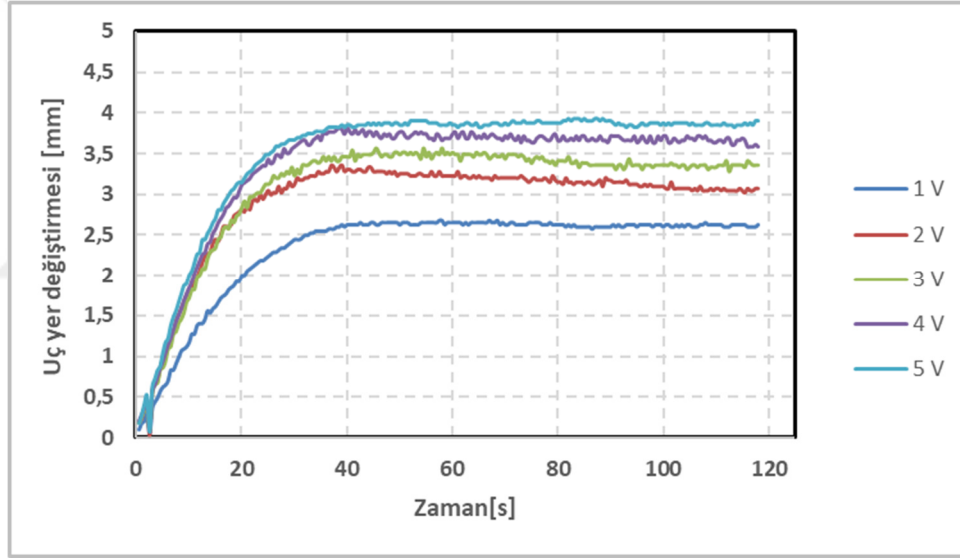
	1 V	2 V	3 V	4 V	5 V
6 V	% 16,67	% 33,33	% 50,00	% 66,67	% 83,33
8 V	% 12,50	% 25,00	% 37,50	% 50,00	% 62,50
10 V	% 10,00	% 20,00	% 30,00	% 40,00	% 50,00



Şekil 3.27 6V genlikte farklı doluluk oranlarının testleri



Şekil 3.28 8V genlikte farklı doluluk oranlarının testleri



Şekil 3.29 10 V genlikte farklı doluluk oranlarının testleri

Şekil 3.27, 3.28 ve 3.29'da verilen deneysel sonuçlar birkaç açıdan değerlendirilebilir:

Geleneksel doğru akım önbesleme tekniği ile karşılaştırılması:

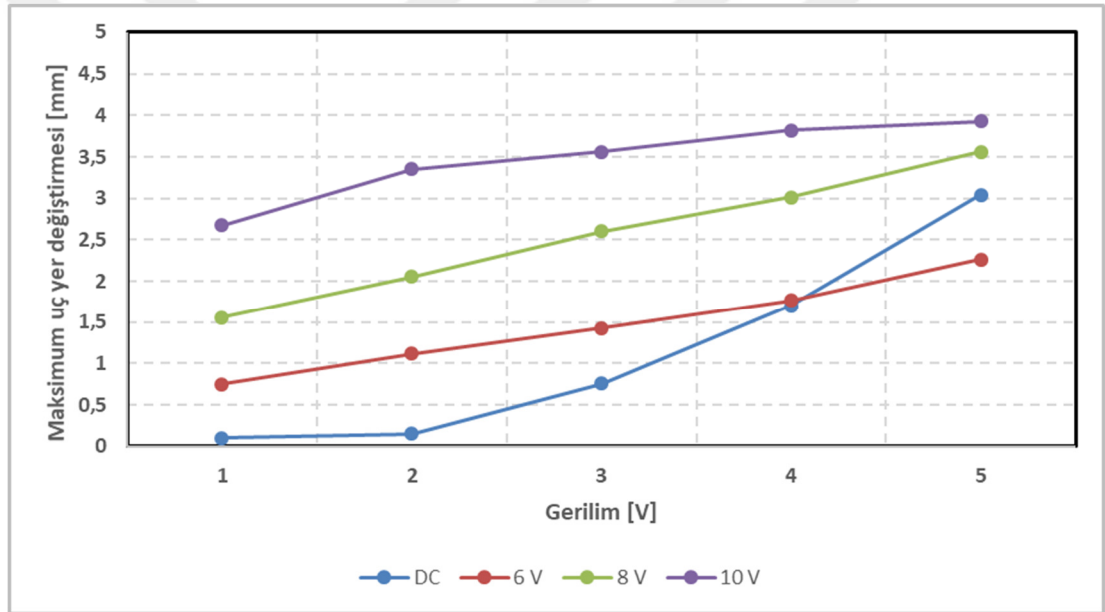
Eyleyici, doğru akım eşdeğer gerilimleri 1 V ve 2 V olan PWM uyarma sinyalleri uygulandığında hareket etmezken, eyleyici, doğru akım gerilimi 3 V'a eşit veya daha büyük olduğunda hareket ettiği gözlenmiştir. Uç yer değiştirme ilişkisi, PWM uyarma



sinyalleri için yaklaşık olarak doğrusalken ve DC öngerilim voltajları için doğrusal değildir.

Uyarma sinyalinin genliklerinin karşılaştırılması:

Eyleyici, PWM uyarma sinyalleri altında yanıt verirken, birbiriyle karşılaştırıldığında, genlikteki bir artışın uç yer değiştirmesinde bir artışa yol açtığı görülmektedir. Artışlar Tablo 3.4'te verilmiştir. Artış değerlerinin 6 ve 8 V için yaklaşık olarak sabit olduğu, ancak gerilim seviyesinin 10 V için arttıkça azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.30 PWM doluluk oranlarına göre maksimum uç yer değiştirmeleri

Volt başına doğrusal artış kontrol sistemleri için kritik bir özelliktir. Bu nedenle, performans değerlendirme (veya PWM büyüklük seçimi) kriteri olarak tanımlanmaktadır. Bu kriter göz önüne alındığında, 6 V ve 8 V arasındaki herhangi bir gerilim değerinin PWM uyarma sinyalinin büyüklüğü olarak uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.30'da verilen maksimum uç yer değiştirmelerine eğri uydurarak genlik seçmek için daha deterministik bir yöntemdir. Eğri uydurma işleminin eğimi ve belirlenme katsayısı, hem geçici performans hem de giriş çıkış ilişkisinin doğrusallığı açısından en uygun PWM büyüklüğünü bulmak için kullanılabilir. Tablo 3.5'te, 8 V'un

hem en dik eğime hem de en büyük belirleme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, büyüklük 8 V olarak seçilebilir.

Tablo 3.4 Son uç yer değiştirmedeki artış

	1 – 2 V	2 – 3 V	3 – 4 V	4 – 5 V
<b>DC</b>	0,05	0,60	0,94	1,34
<b>6 V</b>	0,36	0,31	0,34	0,49
<b>8 V</b>	0,49	0,53	0,44	0,53
<b>10 V</b>	0,68	0,21	0,26	0,10

Hem PWM frekans deneylerinde hem de büyüklük deneylerinde yapılan gözlemler, 80 nm elektrot kalınlığına sahip Nafion bazlı İPMK eyleyici kullanıldığında, genliklerin 6 - 8 Volt olarak, PWM frekanslarının 400-1000 Hz olarak seçilebileceğini göstermektedir.

Tablo 3.5 Eğri uydurma sonuçları

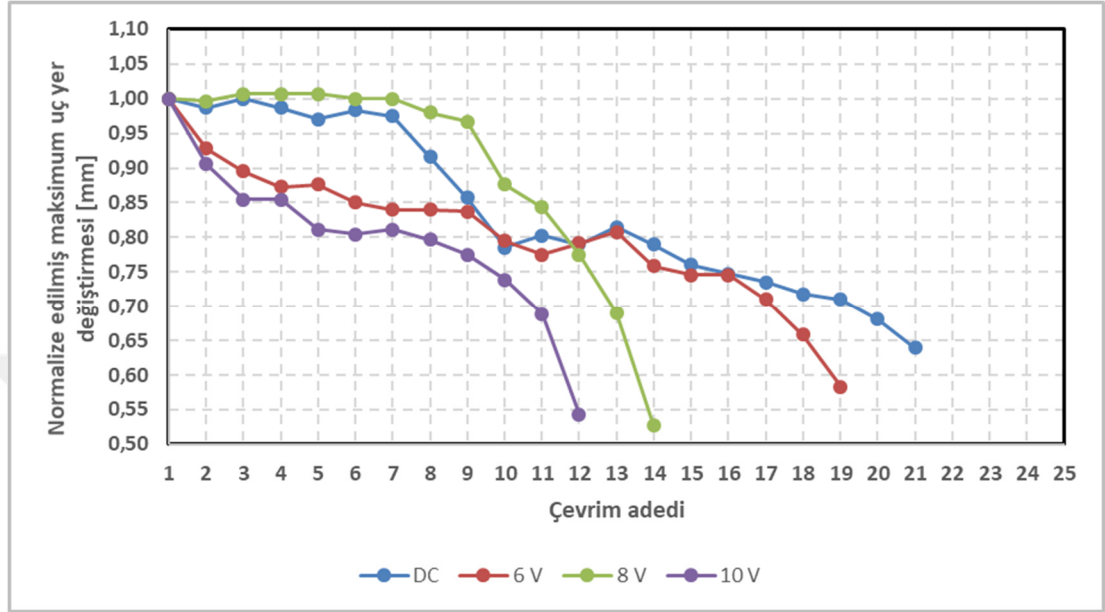
	Eğim	R <sup>2</sup>
<b>6 V</b>	0,3666	0,992
<b>8 V</b>	0,4966	0,998
<b>10 V</b>	0,2964	0,89

### 3.4.7 PWM Genliğinin İPMK Eyleyicinin Dayanım Performansı Üzerindeki Etkisi

Uç yer değiştirme deneylerinden elde edilen sonuçlar, PWM büyüklükleri olarak nispeten yüksek gerilim uygulanmasının İPMK eyleyicilerinin tepkisini iyileştirebileceğini göstermektedir. Öte yandan, bu yüksek genlikteki gerilimler, eyleyici yanıtında bir bozulmaya neden olabilir. Olası etkileri araştırmak için bir dizi deney yapılmıştır.

İPMK eyleyiciler, 3V'a denk gelen doluluk oranlarında 6, 8 ve 10 V'lik PWM sinyal büyüklüğüne 3 V doğrusal akım gerilim için çevrimsel teste tabi tutuldu. Deneyin süresi 200 s olarak belirlenmiştir. Gerilimler (3 V doğru akım gerilim veya 3 V doğru akım gerilime eş değer PWM) 100 saniye boyunca uygulandı ve takip eden 100 saniye

boyunca numuneye gerilim uygulanmadı. Bu deney, İPMK eyleyici numunelerinin maksimum uç yer değiştirmesinin büyüklüğü başlangıç değerinin %70,7'sine düşürülene kadar tekrarlanmıştır.



Şekil 3.31 Çevrim sayısına göre normalize edilmiş maksimum uç yer değiştirmesi grafiği

Her deney için normalize edilmiş maksimum uç yer değiştirme değerleri Şekil 3.31'de verilmiştir. Veriler normalleştirilmiş biçimde verilmiştir, çünkü büyüklükler Şekil 3.30'da verilen PWM gerilim genliğine göre değişmektedir. PWM gerilimi genliğini arttırmanın olumsuz etkisi açıkça görölmektedir. Eyleyicinin maksimum uç yer değiştirmesi, 3 V doğrusal akım gerilimi altında tekrarlanan 20 deneyde tanımlanan limitin altına düşer; bu, 80 nm'lik nispeten ince elektrot kalınlığından dolayı makul kabul edilebilirdir. Bu değer, sırasıyla 6, 8 ve 10 V PWM sinyal büyüklüğü ile 3 V doğrusal akım eşdeğer gerilimler altında 18, 13 ve 11 çevrim sayısına düşer. Bu sonuç, büyük PWM büyüklükleriyle kabul edilebilir eşdeğer gerilimlerde (yani 3 V) sürekli çalışmanın İPMK aktüatörlerinin dayanıklılığını azalttığını göstermektedir. Ayrıca, sistemin zaman yanıtının iyileştirilmesi göz önüne alındığında, dayanıklılıkta %10'luk bir azalma kabul edilebilir ise, 6 V PWM gerilim genliği tercih edilebilir.

### 3.4.8 Sonuç

Bu çalışmada, eyleyicinin uç yer değiştirmesi performansını PWM frekansı ve büyüklüklerine göre değerlendirmek için çalışmalar yapılmıştır.

PWM frekansı 0 Hz ila 1000 Hz arasında değiştirilmiştir. Sonuçlar, dinamik yanıt ve önerilen deneysel modelin parametrelerindeki farklılıklar açısından değerlendirilmiştir. Geri salmanın artan frekansla azaldığı gözlenmiştir. Bu eğilim gözlemlenerek, belirli bir İPMK eyleyici için PWM frekansının aralığı belirlenebildiği sonucuna ulaşılmıştır.



## BÖLÜM DÖRT

### NAFYON BAZLI EYLEYİCİ İLE BİYOMİMETİK UYGULAMALAR

Proje kapsamında geliştirilen İPMK eyleyiciler kullanılarak aşağıda belirtilen tiplerde biyomimetik uygulamalar gerçekleştirilmiştir:

- Fil hortumu eyleyici
- Sinerjist ve Agonist-Antagonist Kas Hareket prensibi ile çalışan eyleyici
- Balık yüzgeci eyleyici

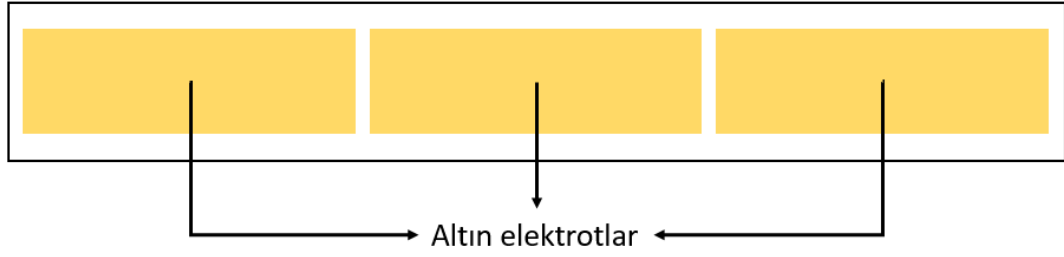
#### 4.1 Fil Hortumu Eyleyici

Bu çalışmada çok serbestlik dereceli robot kol olarak değerlendirilebilecek, fil hortumundan esinlenerek üretilen eyleyiciler kullanılmıştır. İyonik polimer metal kompozit eyleyiciler, makro ölçekte bakıldığında üzerlerine bir elektrik alan uygulandığında eğilme hareketi yapan eyleyiciler olarak tanımlanmaktadır. Buna uygun olarak mikro ölçekteki etkileşimler ve bunun doğurduğu makro hareket modellenmesi Nafion omurgalı eyleyici yapıları için McDaid ve diğer. (2010) tarafından verilmiştir. Bu eyleyici çalışma yapısı, klasik robot literatüründe Hannan ve Walker (2003) tarafından “continuum style” olarak tanımlanan robotların eyleyici mekanizmaları ile büyük benzerlik göstermektedir (Hannan ve Walker, 2003) (Şekil 4.1). Bu sebep ile bu çalışmada geliştirilmesi planlanan biyomimetik eyleyici yapılarından bir tanesi fil hortumunu esas almıştır.



Şekil 4.1 Fil hortumu (Hannan ve Walker, 2003)

Fillerin hortumları soluma, koku alma ve ses çıkarma gibi çeşitli işlevlerin yanında dokunma ve tutma gibi yeteneklere sahiptir. Hortumun sahip olduğu sarma ve bükme yapabilme yeteneği fillerin besin toplamasına ve ağırlık kaldırabilmesine olanak tanır. Hortumun büyük oranda kastan oluşan yapısı, filin bir kütüğü kaldırma gibi kaba işlerin yanında, daha hassas bir iş olan bir fıstığın kabuğunu içine zarar vermeden kırabilmesine de olanak sağlar. Fil hortumuna benzer yapıya sahip eyleyicinin öngörülen yapısı kademeli şekilde eyleyici boyunca farklı segmentlerde farklı eğilme yarıçapı üretebilecek şekilde elektrot bağlantılarına sahiptir. Fil hortumuna benzer hareket kabiliyetine sahip olacak biyomimetik eyleyicinin yapısı Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2 Referans İPMK tabanlı eyleyici yapısı

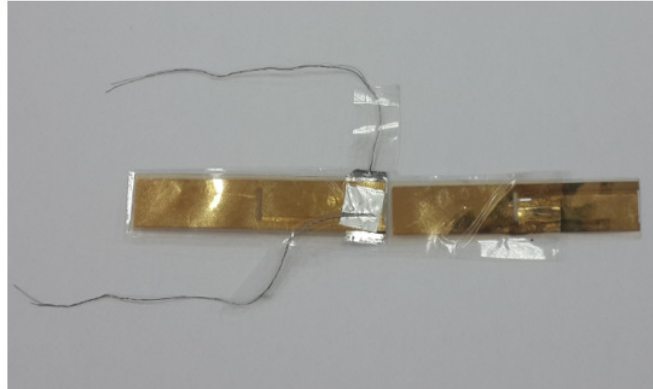
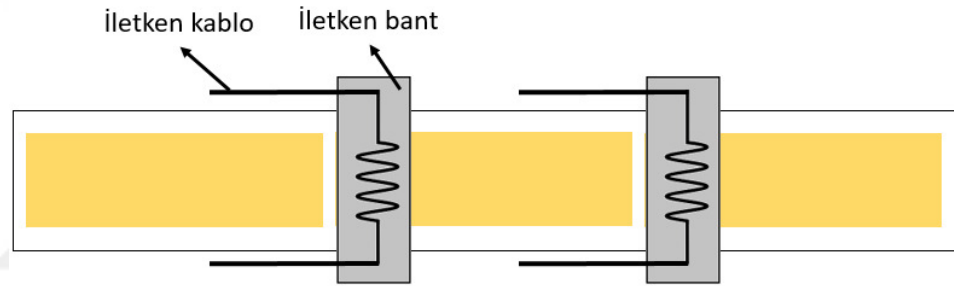
Şekil 4.2’de gösterilen İPMK eyleyici üzerine kaplanmış olan yüzeysel elektrotlar kullanılarak, eyleyici üzerindeki farklı noktalarda farklı elektriksel alan oluşturulması amaçlanmıştır. Böylelikle farklı elektriksel kuvvetlerin etkisi altındaki katyon hareketleri farklı eğilme yer değiştirmelerine sebep olacak ve böylelikle eyleyici eksenini doğrultusunda farklı eğrilik yarıçaplarında hareketler sergilenmesi mümkün olacaktır.

#### **4.1.1 Fil Hortumu Eyleyici 1. Versiyon İmalatı**

Eyleyici yapısal olarak iyonik polimerler ve PVD yöntemi ile kaplanmış 45nm kalınlığında altın elektrottan oluşmaktadır. Eyleyicinin elektrotlarının yapısal tasarımı öngörüldüğü gibi farklı segmentlerden oluşmaktadır. Böylelikle segmentlere farklı gerilim uygulanması mümkün olabilecektir ve iyonik polimer üzerinde mesafeye bağlı

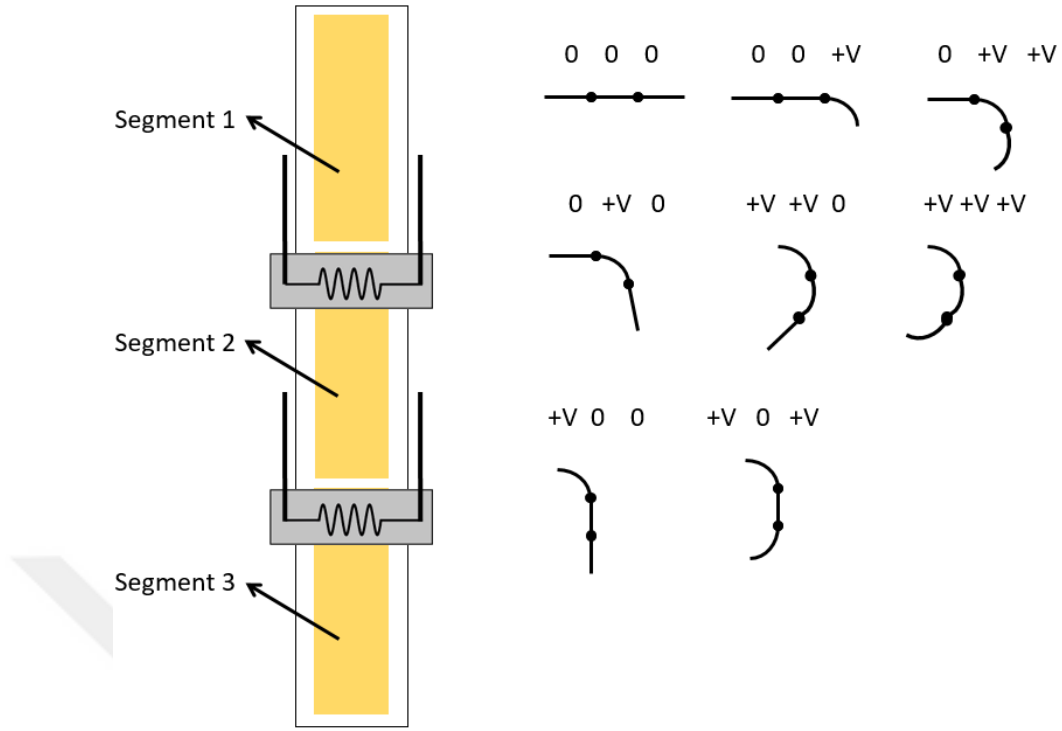
olarak farklı elektriksel alan değerleri elde edilebilecektir. Sonuç olarak eyleyicinin üzerinde elektrotlar boyunca farklı segmentlerde farklı eğrilik yarıçapı elde edilmesi mümkün olabileceği düşünülmüştür.

Fark edileceği üzere eyleyicinin düzgün çalışması için kritik nokta elektrot segmentlerine tahrik geriliminin ulaştırılmasıdır. Bu sebeple 1. versiyon eyleyicide 0,3 mm çaplı iletken kablo ve iletken alüminyum bant kullanılmıştır. şekil 4.3'de öngörülen bağlantı şeması ve bu n görülen bağlantının iki segmentli bir eyleyici üzerinde gerçekleşmiş hali görülmektedir. Eyleyicilerin ilk bağlantı noktaları daha önceki kısıkaç elektroda bağlanacağından o bölgeye iletken bantlı bağlantı yapılmamıştır.



şekil 4.3 Fil hortumu eyleyici 1. versiyon elektriksel bağlantısı (Kişisel arşiv, 2014)

Fil hortumu eyleyicilerin hareket performansını incelemek için 3 elektrotlu bir eyleyici için uygulanan gerilim değerlerine göre beklenen cevaplar şekil 4.4'de verilmiştir. Eyleyicilerin performansları bu hareket şemasına göre incelenmiştir.



Şekil 4.4 Üç segmentli bir fil hortumu eyleyicinin referans hareket dizgesi

İlk hareket denemeleri iki segmentli bir eyleyici yapısı ile denemiştir. Bu eyleyicinin her elektrot segmenti 5mm genişliğinde ve 50 mm uzunluğundadır. İki iletken segment arası 2 mm lik bir yalıtkan alan bırakılmıştır. Eyleyici denemelerinde daha önceki çalışmalarda en yüksek yer değıştirme değeri verdiikleri 5V tahrik gerilimi olarak uygulanmıştır. Eyleyiciler bir uçların ankastre mesnetlenmiş orta ve diğer uç nokta yer değıştirmeleri görüntü tabanlı ölçme sistemi ile izlenmiştir. Elde edilen en büyük yer değıştirmeler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Fil hortumu eyleyici 1. versiyon performans testi sonuçları

Uygulanan Gerilim [V]		Maksimum Yer Değıştirme [mm]	
Segment 1	Segment 2	Orta Nokta	Uç Nokta
0	5	5	12
5	0	12	17
5	5	6	14

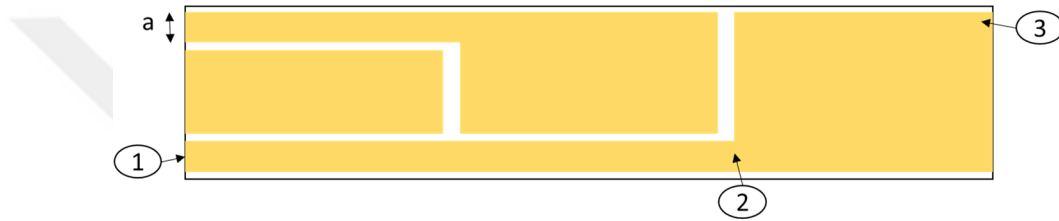
Elde edilen sonuçların beklenen performansın altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında elektriksel bağlantı şemasındaki düzensizliklerden dolayı



tekrarlanabilir ölçümler elde edilememiştir. Bu sebeple eyleyici imalatında değişikliğe giderek alternatif yapısal tasarım geliştirilmiştir.

#### 4.1.2 Fil Hortumu Eyleyici 2. Versiyon İmalatı

Yapısal iyileştirme, dışarıdan kablo ile tahrik voltajı uygulanması yerine akım yollarının eyleyici yüzeyine aktarılması ile yapılmıştır. Bu düzenleme için ilk elektrot aynı bırakılarak sonraki elektrotlar Şekil 4.5'te gösterildiği gibi ankastre mesnet bağlantı noktasına yani kısaç bağlantı noktasına taşınmıştır.



Şekil 4.5 Elektriksel bağlantı şeması elektrot yüzeylerine aktarılmış eyleyici referans tasarımı

Şekil 4.5'te üzerinde "a" ile gösterilen elektrot genişliği eyleyici performansı üzerinde iki açıdan etkilidir. İlk olarak "a"nın dar olması elektriksel direncinin yüksek olması sebebi elektriksel etki kaybına sebep olmaktadır. İkinci olarak ise eyleyicinin boyutunu büyütmemektedir ki bu da yumuşak yapısı sebebi ile eyleyicinin istenilen hareketleri yapamaması gibi bir etki doğurmaktadır. Bu iki ters etkileşim "a" kalınlığının en uygun değere ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Bu ayarlama için yüzey elektrotların elektriksel modeli, yüzey dirençleri cinsinden denklem 4.1'deki gibidir. En uygun "a" kalınlığını bulma çalışmasında diğer bütün bağlantı hatlarının yüzey direnci uzun olan bağlantı hattının direncinden düşük olacağından en uç noktadaki yüzey elektrotu esas alınmıştır.

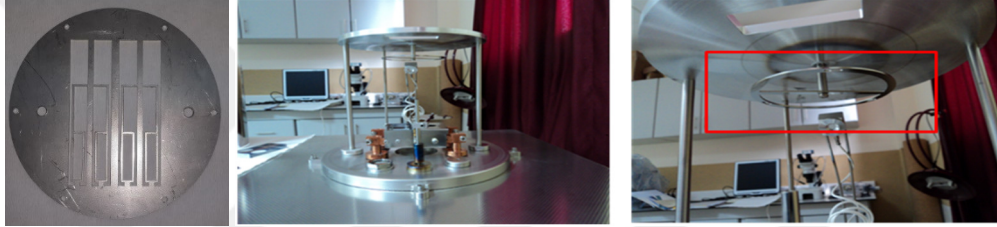
$$R_{uç} \cong R_{12} + R_{23} \quad (4.1)$$

Verilen denkleme göre elektrot etkisini incelemek için uygun metrik tüm elektrot direncinin tüm elektrot direncine oranı olarak denklem 4.2'de tanımlanmış ve hedef değer %10 olarak ön görülmüştür. Başlangıç olarak "a" değeri 1, 5, 2 ve 2,5 mm olarak

belirlenmiş ve uygun imalat için tasarım yapılmıştır. Buna göre verilen K parametresini %10 un altına düşüren “a” değeri en uygun kalınlık değeri olarak seçilecektir.

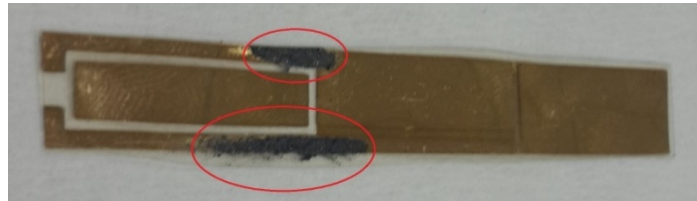
$$K \cong \frac{R_{12}}{R_{12}+R_{23}} \quad (4.2)$$

Biyomimetik eyleyicinin elektrot izinin oluşturulması için kalıp tasarlanmış ve üretilmiştir. Eyleyicinin PVD cihazı ile kaplanabilmesi için Şekil 4.6’da gösterilen şablonlar üretilmiştir. Şablonlar, 2 mm kalınlığında paslanmaz çelikten tel erezyon yöntemiyle üretilmiştir.



Şekil 4.6 Eyleyici kalıbı ve PVD Cihazı bağlantısı (Kişisel arşiv, 2014)

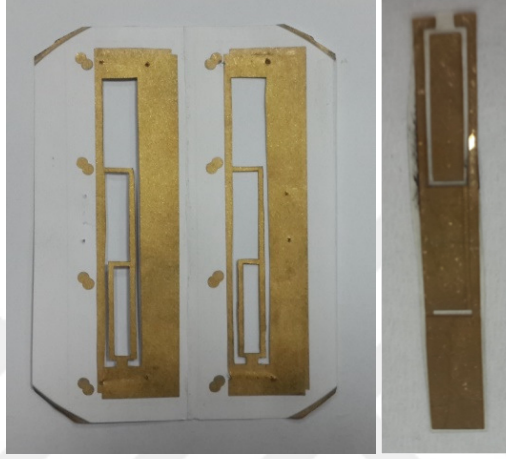
Şablonlar üretilecek eyleyicinin yapısına ve PVD cihazının boyutlarına uygun olarak tasarlanmıştır (Şekil 4.6). Şablonların PVD cihazına sabitlenebilmesi için 6 adet M3 delik açılmıştır. Bununla birlikte merkezleme pimleri için 2 adet 5 mm çaplı iki delik açılmıştır. Yapılan deneylerin ardından metal kalıp üretilen eyleyicilerde, Şekil 4.7’de görünen kısımlarında hata olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7 Hatalı eyleyici (Kişisel arşiv, 2014)

Söz konusu hata Şekil 4.5’te gösterilen 1-2 direncinin ölçülmesi sonucunda fark edilmiştir. Bu durum kalıp kalınlığı ile yol izi kalınlığının yaklaşık aynı mertebelerde olmasından dolayı kaplama esnasında kalıp köşelerinden altın buharının yansıyıp

farklı yerlere yönelmesinden film üzerinde altının homojen kaplanmamasından kaynaklanmaktadır. Fark edilen hata, problemlili noktaların gümüş pasta ile kaplanması yolu ile giderilmeye çalışılmıştır ama elde edilen sonuç bağlantı direncinin istenmeyen şekilde yüksek olması ile sonuçlanmıştır. Bu sebeple metal kalıp yerine kalınlığı düşük kâğıt kalıplar Şekil 4.8'deki gibi imal edilmiş ve istenilen elektrot şablonlarının eyleyici yüzeyine aktırılması gerçekleştirilmiştir.



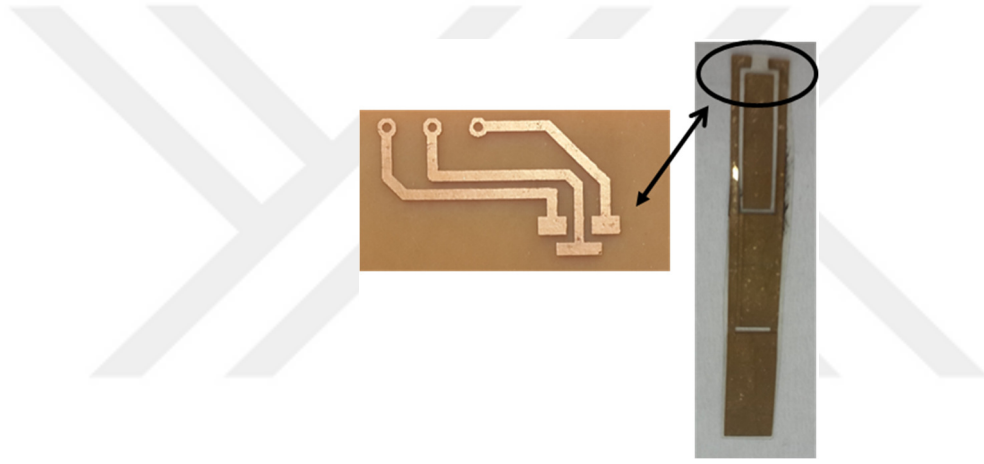
Şekil 4.8 Kağıt kalıplar ve üretilen eyleyici (Kişisel arşiv, 2014)

Kağıt kalıplar kullanılarak elektrot yol kalınlığı direnç ölçümleri yapılmış ve uygun elektrot kalınlığı 2 mm olarak bulunmuştur. Yapılan denemelerde  $a=1,5$  mm için kağıt kalıbın yüksek direnç gösterdiği yani metal kalıptaki sorunu tam olarak çözemediği ama buna karşılık olarak 2 mm ve 3 mm elektrot kalınlıklarında sırasıyla denklem 4.2'de verilen “K” değerinin 0,08 ve 0,05 olarak ölçüldüğü görülmüş dolayısı ile hedef şartımızı sağlayan en küçük “a” değeri en uygun değer olarak seçilmiştir.

#### 4.1.2.1 Elektrik Bağlantı Sistemi Geliştirilmesi

Şekil 4.9'dan da görüldüğü üzere elektrot uç kısmına elektrik bağlantısının yapılabilmesi için yeni bir bağlantı kartı imalat edilmesi gerekmektedir. Bu imalat için gerekli tasarımın yapılmasında iki temel faktör hesaba katılmıştır. İlk olarak bağlantı dirençlerini azaltmaya yönelik olarak baskı yüzeylerinin belirli bir alandan daha fazlasına sahip olması gerekmektedir ve eyleyici genişliği sabit olduğuna göre 3 elektrot bağlantı noktasının da yaklaşık aynı alana gelecek şekilde belirli bir en dar

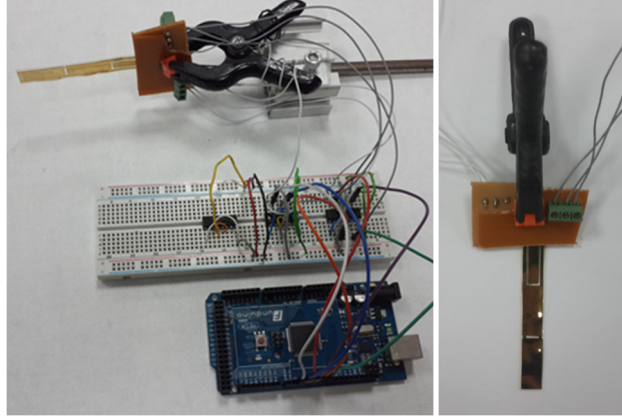
mesafede yerleştirilmesi gerekmektedir. İkinci olarak, birinci elektrotun elektriksel alanına ikinci ve üçüncü elektrot yollarının etkisini azaltmak ve ikinci elektrot elektrik alanına üçüncü elektrot yolunun etkisini azaltmak için alt yüzey elektrotu, aynı elektroda giden yollar alt alta gelecek şekilde değil de bir yüzeyde alt tarafta olan ilgili yüzey elektrotu yolunun diğer yüzeyde üst tarafta olacak şekilde yerleştirilmesi gerektiği öngörülmüş ve bu sebeple ayna görüntüsü simetrisine sahip şekilde kalıplar yerleştirilirmiş ve eyleyiciler imal edilmiştir. Bu sebeple bağlantı noktalarını oluşturan iki kartında aynı geometrik özelliğe sahip olması gerekmektedir. Yapılan tekrarlı denemeler sonucunda iki tasarım kriterini sağlayan bağlantı sistemi Şekil 4.9'daki gibi imal edilmiş ve imal edilen düzgün çalıştığı deneysel olarak test edilmiştir.



Şekil 4.9 Elektriksel bağlantı kartı ve performans test düzeneği (Kişisel arşiv, 2014)

#### 4.1.2.2 Fil Hortumu Eyleyici 2. Versiyon Performans Testleri

Fil hortumu eyleyicilerin hareket performansını incelemek için 3 elektrotlu bir eyleyici için uygulanan gerilim değerlerine göre beklenen cevaplar Şekil 4.4'de verilmişti. Eyleyicilerin performansları bu hareket şemasına göre incelenmiştir. Hareket denemelerinde yukarıda anlatılan tasarım süreci sonucunda elde edilmiş eyleyiciler kullanılmıştır (Şekil 4.10). Eyleyici denemelerinde daha önceki çalışmalarda en yüksek yer değiştirme değerini verdikleri 5 V tahrik gerilimi olarak uygulanmıştır. Eyleyiciler bir uçların ankastre mesnetlenmiş orta ve diğer uç nokta yer değiştirmeleri görüntü tabanlı ölçme sistemi ile izlenmiştir. Elde edilen en büyük yer değiştirmeler Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.10 İkinci versiyon fil hortumu eyleyici elektriksel bağlantılar (Kişisel arşiv, 2014)

Elde edilen sonuçlar, fil hortumu eyleyici yapısının belirli performans limitleri dahilinde belirgin bir kontrol edilebilirliği olduğunu göstermiştir. Buna karşılık tekrarlanabilirlik ve tutarlılık açısından sonuçların orta düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle dar iletim hatlarının ohmik ısınma sebebi ile performansı düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 4.2 Fil hortumu eyleyici 2. versiyon performans testi sonuçları

Uygulanan gerilim [V]			Yer değiştirme [mm]		
Segment 1	Segment 2	Segment 3	1. ara nokta	2. ara nokta	Uç nokta
0	0	5	2	4	9
0	5	0	3	6	10
5	0	0	5	7	11
0	5	5	2	6	11
5	5	0	7	11	14
5	0	5	6	7	10
5	5	5	7	13	17

#### 4.1.3 Fil Hortumu Eyleyici 2.1. Versiyon İmalatı

İkinci versiyon ile yapılan denemelerde elde edilen bilgilere dayanarak fil hortumu eyleyici üzerinde iletim yollarının genişletilmesi ve uca doğru sivrileşen yamuk şeklinde imalat şeklinde iyileştirilme çabalarına girişilmiştir. Burada amaçlanan daha

geniş iletim yolları kullanılması ve uca doğru değişen geometri ile eyleyici hareket direncinin azaltılması olmuştur. Buna göre elde edilen yapı Şekil 4.11’de verilmiştir.



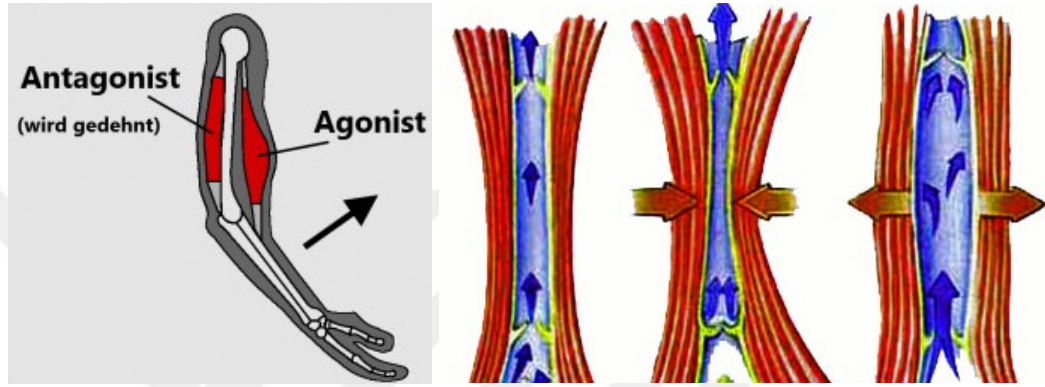
Şekil 4.11 Yapısal iyileştirme sonucu elde edilen ikinci fil hortum eyleyici (Kişisel arşiv, 2014)

Elde edilen yeni yapı ile ikinci versiyon eyleyiciye benzer hareket yapısı daha düşük genliklerle elde edilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen İPMK üzerine elektrot kaplanması ile elde edilen fil hortumu eyleyiciler, yüksek hareket genliklerine ulaşmalar da belirli sınır değerleri içerisinde çok serbestlik dereceli hareketleri gerçekleştirebilmişlerdir.

#### **4.2 Sinergist ve Agonist-Antagonist Kas Hareketi Prensibi İle Çalışan Eyleyici**

Çalışmanın bu aşamasında sadece polimer tabanlı eyleyicilerde yaşanan şekilsel bozukluğu ve belirsizlikleri ortadan kaldıracak iskeletli bir yapının tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Vücudumuzun kas-iskelet yapısı, eklemler ile birbirine bağlanmış kemiklerden oluşmaktadır. Eklemlere bağlı kaslar, vücut hareketleri için gerekli olan kuvveti sağlamaktadır. Harekete sebep olan kaslar birbirinden bağımsız olarak kasılmaktadırlar. Belirli bir eklemden bağlantıyı gerçekleştiren tüm kasların eş zamanlı ama bağımsız kasılması ile gözlemlenebilir hareket gerçekleştirilmektedir. Hareketin gerçekleşmesi esnasında sinergist kaslar bir takım gibi birlikte bir hareketin sergilenmesi için iş birliği ile çalışan kaslardır.

Agonist kaslar birincil olarak hareket uygulamasına katılırken, sinerjist kaslar ise destek işlevini gerçekleştirmektedirler. Antagonistler ise bir hareket sırasında – agonistlere karşı hareket eden- kaslardır. Agonistler ve antagonist kas grupları arasındaki karşılıklı etkileşim doğrudan hareketi belirlemektedir. Antagonist kaslara kol ve bacak kasları, Sinerjist kaslara ise karın ve sırt kasları örnek verilebilir (Şekil 4.12).

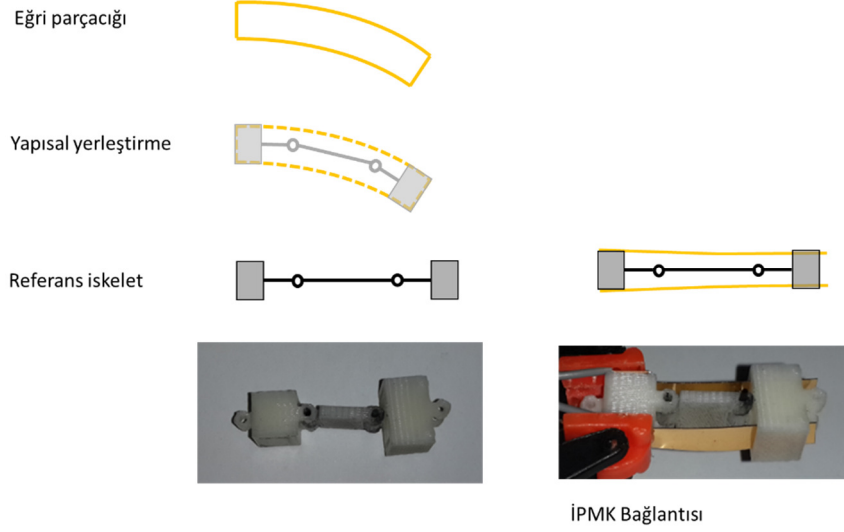


Şekil 4.12 İnsan vücudu kas hareketleri antagonist ve sinerjist çalışma (Kidskunst, b.t.)

Biyolojik temelli bu hareket elde etme sistemleri makro ölçekte çok sayıda robotik çalışmaya ilham vermiştir (Martinez-Villalpando, Weber, Elliot ve Herr, 2008; Northrup, Sarkar ve Kawamura, 2001). Bu çalışmalardan ilham alarak İPMK kompozitlerin hem agonist-sinerjist hem de agonist-antagonist eklem hareketi yaratabilme kapasiteleri araştırılmıştır.

#### 4.2.1 İskelet Yapısının Tasarlanması

Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere bu uygulamada İPMK eyleyiciler bir taşıyıcı iskelet ile desteklenecektir. Bu iskelet yapısı 3 parçalı olarak tasarlanmıştır. İki uç parça tasarlanan iskelet bir sonraki ve bir önceki uzuv bağlantısında hareket esnekliğine sahip olmasına orta parça ise uzvun bir doğrultuya yönelmesine yaramaktadır. Bu yapı ile yumuşak karakterli eyleyiciler ile elde edilen dağıtılmış harekete 3 doğru kullanarak bir geometrik yaklaşım elde edilmiştir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 İskelet yapısal tasarım ve nihai eyleyici yapısı (Kişisel arşiv, 2014)

İPMK eyleyicilerin eğilme hareketi yapan eyleyiciler olduğu bilinmektedir yani eyleyici ekseninin alt ve üst taraflarında simetrik uzama ve kısaltmalar oluşsa da simetri ekseninin boyu değişmemektedir. Bu durum eyleyicilerin iskelet yapısına bağlanması ile ilgili bir tasarım düzenlemesi yapılmasını gerektirmektedir. İPMK eyleyici hareketinin iskelete tam aktarımı için eyleyici şeritler bir uç parçaya sabitlenmiş diğer uç parçada ise eğrisel harekete olanak sağlayacak şekilde bir kanal içerisinde kılavuzlanmışlardır (Şekil 4.13).





Şekil 4.13’de görülen eyleyici iskeleti 3 boyutlu yazıcı kullanılarak ABS malzemeden imal edilmiştir. Kullanılan İPMK eyleyici 45 nm kalınlığında PVD ile kaplanmış altın elektrotlara sahiptir. Eyleyici boyutları 50 x 7 x 0,17 mm dir.

#### 4.1.3 Performans Testleri

Geliştirilen eyleyici yapısının agonist-sinerjist ve agonist-antagonist çalışma stratejileri ile hareket üretebilme kapasiteleri test edilmiştir. Eyleyicilerin performansı 5 V gerilim altında test edilmiştir. Eyleyici sistem hareketleri görüntü sistemi ile kaydedilmiş sonuçlar kinevoa programı ile işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.3 ve 4.4’de listelenmiştir.

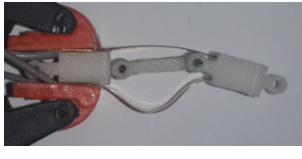

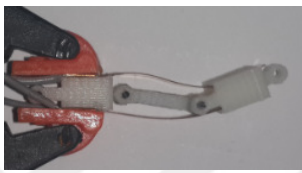
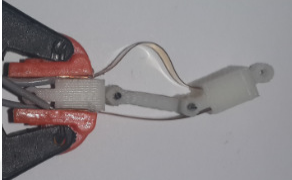


Tablo 4.3 Sinerjist çalışma esnasında elde edilen deneysel veriler

Uygulanan voltaj [V]		Hareket verileri		
1. İPMK eyleyici	2. İPMK eyleyici	t = 30 s fotoğraf	t = 60 s fotoğraf	Uç nokta yer değiştirmesi
5 V	5 V			12 mm
- 5 V	- 5 V			11 mm

Tablo 4.3 ve 4.4’de verilen sonuçlar göstermektedir ki geliştirilen İPMK tabanlı iskeletli eyleyici sistemi işlevseldir. Yapısal olarak hem aynı yönlü hem de ters etkileşimli çalışabilecek olarak tasarlanmış sistem her iki hareketi yapabilmektedir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki agonist-sinerjist çalışma esnasında daha yüksek hareket genliği elde edilmektedir. Ek olarak tüm sistemin hareketi eğrisel forma daha yakın olarak gözlemlenmektedir. Diğer taraftan agonist – antagonist çalışma stratejisi uç nokta yer değiştirmesini azaltmış ve eyleyici genel hareketini eğrisel formdan uzaklaştırmıştır.

Tablo 4.4 Agonist-antagonist çalışma esnasında elde edilen deneysel veriler

Uygulanan voltaj [V]		Hareket verileri		
1. İPMK eyleyici	2. İPMK eyleyici	t = 30 s fotoğraf	t = 60 s fotoğraf	Uç nokta yer değiştirmesi
5 V	- 5 V			5 mm
- 5 V	5 V			5 mm

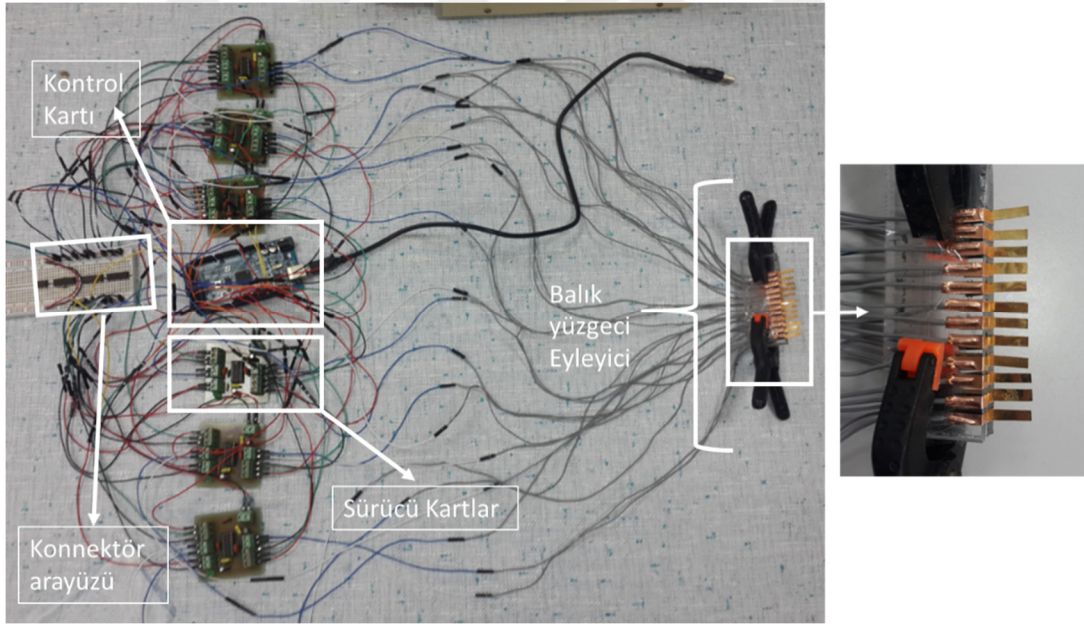
#### 4.3 Balık Yüzgeci Eyleyici

Çalışmanın son kısmında temelde çok serbestlik dereceli paralel bir eyleyici yapısı olarak değerlendirilebilecek bir balık yüzgeci eyleyici tasarlanmıştır. Su altı robotları biyomedikal ve deniz araştırmaları alanında yaygın olarak kullanılacağı ön görülen robotlardır. Bu robotlar ile ilgili tasarım eğilimi konvansiyonel denizaltı veya gemi benzeri yapılar yerine deniz canlısı formuna yakın tasarımlar yapmaktır. Bu sebeple alternatif hareket sağlayıcı mekanizmaların tasarımı imalatı ve üretilmesi özellikle biyomimetik çalışma alanının popüler bir konusudur (Berman, Kenneth, Sznitman ve Leshansky, 2013; Curet, Patankar, Lauder ve MacIver, 2010; Low ve Willy, 2006; Sefati ve diğer., 2013). Bu çalışmada, balık yüzgeci hareketini esas alan İPMK tabanlı bir eyleyici tasarımı yapılmıştır. Suda yaşayan canlılar genel olarak vücutlarının belirli kısımlarını dalgalandırarak hareket etmektedirler. Bu kısım canlıdan canlıya değişebilmektedir. Bazı canlılar tüm vücutlarını bazıları kuyruklarını veya vücutlarının çeşitli kısımlarına yerleştirilmiş yüzgeçlerini dalgalandırmaktadır (Curet ve diğer., 2010; Sefati ve diğer., 2013). Söz konusu balıkların yüzgeç dalgalanmaları olunca iki temel durum gözlenmektedir. Birincisi, balıkların sabit bir hızda durağan dış etki (akıntı yok) altında hareketinde yüzgeçlerin sabit dalga boylu bir uzaysal

dalgayı boylu boyunca aktardığı bir dalgalanma hareketidir (Low ve Willy, 2006). İkinci durumda ise, yüzgeç üzerinde iki uzaysal dalga gözlemlenir. Bu iki dalga hareketi yüzgeç uçlarından başlar ve yüzgecin içerisinde bir noktada birbirlerine kavuşurlar. Bu kavuşma noktasının konumu balığın ani olarak hareketinin yönünü değiştirmektedir. Bu sebeple bu ikinci dalgalanma hareketini balıklar ivmeli hareket gereksinimi olduğunda gerçekleştirmektedirler (Curet ve diğer., 2010; Sefati ve diğer., 2013).

#### 4.3.1 Eyleyici Tasarımı

Balık yüzgeci; eyleyici birbirine paralel ve bağımsız çalışabilen basit şerit İPMK eyleyicilerden oluşan bir sistemdir. Tasarlanan eyleyici sistemi 12 adet PVD yöntemiyle 80nm kalınlığında altın kaplanmış 20 x 5 x 0,17 mm ölçülerinde eyleyiciden oluşmaktadır (Şekil 4.14). Eyleyiciler 5 mm aralıkla yerleştirilmiştir.



Şekil 4.14 Balık yüzgeci eyleyici ve kontrol devreleri (Kişisel arşiv, 2014)

Eyleyiciyi sabitleyen deney düzeneği Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Daha önceden de belirtildiği üzere eyleyici 12 adet altın kaplı kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlara farklı gerilimler verilebilmesi amacıyla her bir kısma 2 taraftan gerilim verilebilecek şekilde 24 adet bakır iletken bant kesilmiş ve pleksi levha üzerine terminal uçlar

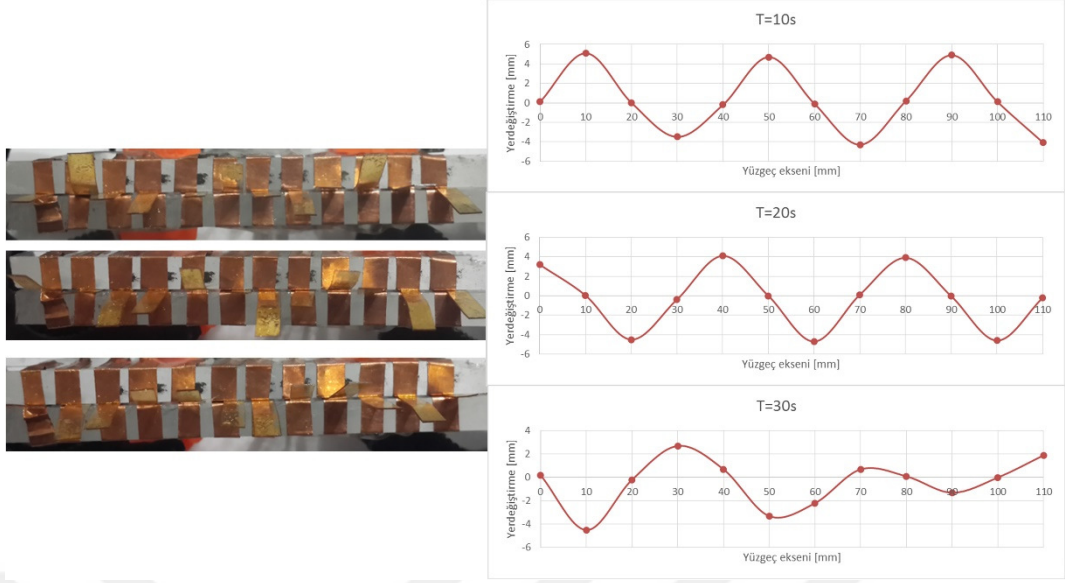
yapıştırılmıştır. İki levha kısaçak kullanılarak sabitlenmiştir. Çok sayıda iki yönlü çalışacak eyleyici için uygun elektronik devre tasarımı çalışmanın bir sonraki aşamasını oluşturmaktadır.

#### ***4.3.2 Elektronik Devre Tasarımı***

Oluşturulan balık yüzgeci eyleyici sisteminde 12 adet bağımsız ve iki yönlü eyleyici kullanılmıştır. İstenilen eyleyici hareketlerini gerçekleştirmek için H köprüsü devresi kullanılmıştır. Her H köprüsü için iki dijital kontrol sinyali hareket yönünü belirtmekte ve bir aktivasyon bacağı darbe genişliği modülasyonu sinyali ile tetiklenerek değişik gerilimlerin uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Bütün eyleyiciler Arduino Mega kartı ile kontrol edilmişlerdir. İstenilen hareketler kontrolcü hafızasına önceden yerleştirilmiştir. Kontrolcü gelen komuta göre istenilen hareket formunu gerçekleştirmektedir. Böylelikle sistem xbee kullanılarak geliştirilen kablosuz kontrol sistemine uyumludur ve kablosuz kontrol edilebilir. Şekil 4.14’de ise hazırlanan elektronik devre gösterilmiştir. Devrede; 6 adet L293D motor sürücü bulunmaktadır. Bir L293D sürücüsü 2 adet eyleyici sürme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle 24 farklı terminal için 6 adet L293D sürücü kullanılmıştır. Sürücü kartları Arduino Mega mikrokontrolcüsünün ilgili sinyali üreten pinlerine bağlanmıştır. Böylece Arduino Mega üzerinden farklı terminallere farklı gerilimler uygulanabilmektedir. Eyleyicilere 0 ila 6 V arası gerilim 500 Hz frekansında PWM sinyali ile doluluk oranı yazılımsal olarak kontrol edilerek verilmektedir.

#### ***4.3.4 Deney Sonuçları***

Kurulan deneysel sistem ile ilk olarak balık yüzgecinin sabit hızlı hareketini üreten, sabit genlikli (5 mm) ve 45 mm dalga boyuna sahip uzaysal dalga hareketini gerçekleştirip gerçekleştiremeyeceği test edilmiştir.

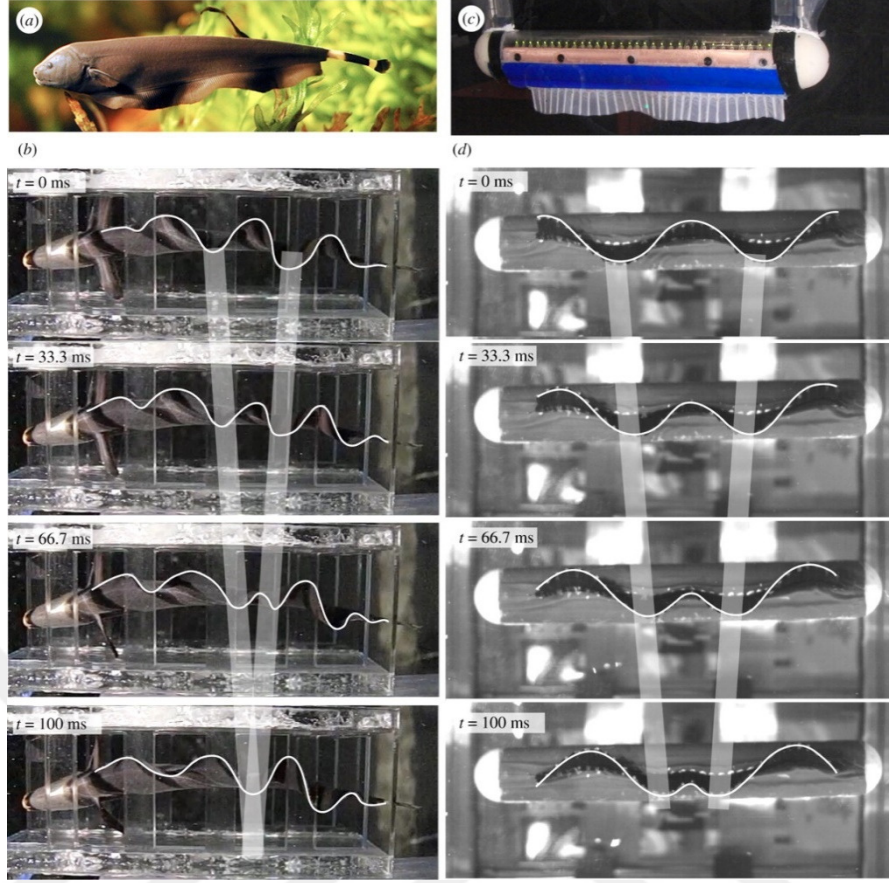


Şekil 4.15 Balık yüzgecinde tek dalgalı hareket (Kişisel arşiv, 2014)

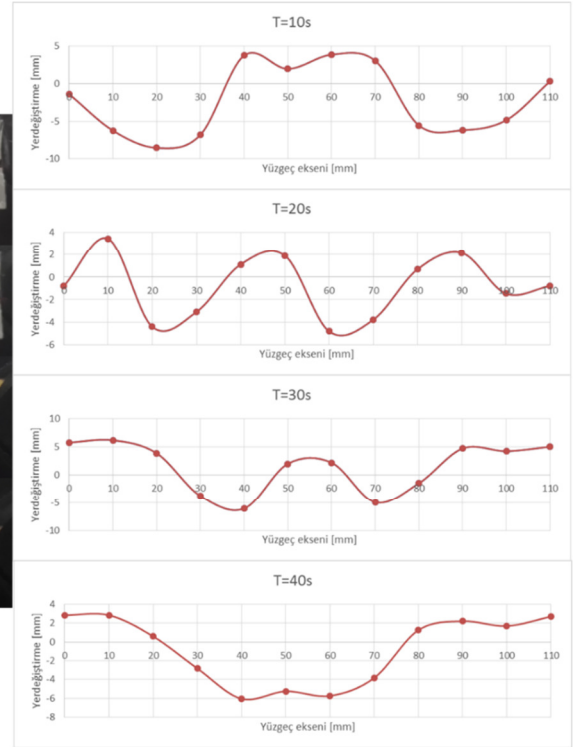
Elde edilen sonuçlar söz konusu dalgaının yaklaşık 0,5mm/s hız ile oluşturulan yüzgeç yapısı üzerinde hareket ettirilebildiğini göstermiştir. Elde edilen dalgalar Şekil 4.15' de gösterilmiştir.

İkinci olarak yukarıda anlatılan yüzgeçte hareket eden iki dalga olduğu durum test edilmiştir. Bu karmaşık hareket için literatürde verilen hareket şeması esas (Şekil 4.16) alınarak referans sinyaller oluşturulmuştur (Curet ve diğer., 2010).

Şekil 4.16' da verilen referans çalışmasında incelenen kara hayalet bıçak balığı ve kendi ürettikleri mekanik balık yüzgecinin performansı görülmektedir. Bu çalışmada verilen sonuçlar esas alınarak referans sinüs dalgaları 5mm genlikte 40 mm dalga boyuna sahip iki dalga yüzgecin iki ucundan uygulanmış ve 0,5 mm/s hızla kaydırılmıştır.



Şekil 4.16 Referans hareket formu (Curet ve diğer., 2010)



Şekil 4.17 Deneysel sonuçları (Kişisel arşiv, 2014)

Şekil 4.17’de deneylerden elde edilen sonuçlar görülmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki geliştirilen sistem istenilen hareket formunu sergileyebilmektedir fakat hareket hızları literatürde verilen mekanik sisteme nazaran daha yavaş olmaktadır.



## BÖLÜM BEŞ

### SONUÇ

İyonik polimer metal kompozit eyleyicilerin konvansiyonel olmayan robotik uygulamalarında gittikçe daha yaygın kullanılmaya başladığı görülmektedir. Farklı elektroaktif polimer ve elektrotlar kullanılarak istenilen tepkileri verebilen sensörler ve eyleyiciler üretmek mümkündür. Bu çalışmada biyomimetik uygulamalarda kullanılabilen bir iyonik polimer metal kompozit eyleyici yapısının tasarlanmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem kullanılarak Nafyon bazlı bir İPMK eyleyici üretilmiş ve bu eyleyicinin üç farklı biyomimetik uygulamadaki performansı incelenmiştir.

Çalışmanın ilk kısmında literatürdeki farklı elektroaktif polimerler ve elektrotlar incelenmiştir. Buna göre elektrot malzemesi olarak altın, üretim yöntemi olarak fiziksel buhar biriktirme yöntemi benimsenmiştir. Bundan sonra iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üretilen farklı elektrot kalınlıklarındaki İPMK eyleyicilerin birim basamak cevabı testleri yapılarak eyleyicinin tepkileri izlenmiştir. Elektrot kalınlığı ile elektroaktif özellikler arasında lineer olmayan bir ilişki olduğu görülmüştür.

Çalışmanın ikinci kısmında İPMK eyleyicilerin elektriksel olarak sürülmesi için darbe genişliği modülasyonu (PWM) yönteminin kullanılması önerilmiş ve bu yöntem kullanılarak üretilen eyleyicinin performansı arttırılmaya çalışılmıştır. Darbe genişliği modülasyonu parametreleri (frekans, doluluk oranı ve genlik) değiştirilerek deneyler yapılmış ve en uygun PWM parametreleri sistemin dinamik cevabı incelenerek belirlenmiştir. Bu tarz eyleyicilerin en büyük problemlerinden olan geri salma yüzdesi PWM metodu kullanılarak en düşük değere indirilmiştir.

Yapılan deneylerin ardından çalışmanın hedefi olan biyomimetik eyleyici üretimine geçilmiştir. Bu bağlamda, fil hortumu eyleyici, Sinerjist ve Agonist-Antagonist kas hareket prensibi ile çalışan eyleyici ve balık eyleyici tasarımları yapılmış ve her uygulama için avantajlı olduğu düşünülen kalınlık ve sürme metodu belirlenmiştir.



Elde edilen deneysel sonuçlar İPMK tabanlı biyomimetik eyleyicilerin uygulamalarda kullanılabilceğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarda eyleyicilerin performanslarının ancak sınırlı çalışma aralıklarında tatmin edici olduğu gözlenmiştir. Özellikle nem kaybı gibi durumlar göz önüne alındığında eyleyicinin uzun süreli kullanımdaki güvenilirliğinin düşük olduğu görülmüştür.



## KAYNAKLAR

- Alici, G., & Huynh, N. N. (2007). Performance quantification of conducting polymer actuators for real applications: a microgripping system. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 12(1), 73-84.
- Bar-Cohen, Y. (2001). Electroactive polymers as artificial muscles-reality and challenges. In *19th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 1492.
- Bar-Cohen, Y., & Bar-Cohen, Y. (2004). *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges*. Bellingham: WA: SPIE press.
- Bar-Cohen, Y. (2007). Focus issue on biomimetics using electroactive polymers as artificial muscles. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2(2).
- Bar-Cohen, Y. and Q. M. Zhang (2008). Electroactive polymer actuators and sensors. *MRS Bulletin*, 33(3), 173-181.
- Bar-Cohen, Y., Kim, K. J., Choi, H. R., & Madden, J. D. (2007). Electroactive polymer materials. *Smart Materials and Structures*, 16(2).
- Bay, L., Jacobsen, T., Skaarup, S., & West, K. (2001). Mechanism of actuation in conducting polymers: osmotic expansion. *The Journal of Physical Chemistry B*, 105(36), 8492-8497.
- Berman, R. S., Kenneth, O., Sznitman, J., & Leshansky, A. M. (2013). Undulatory locomotion of finite filaments: lessons from *Caenorhabditis elegans*. *New Journal of Physics*, 15(7), 075022.
- Bonomo, C., Fortuna, L., Giannone, P., Graziani, S., & Strazzeri, S. (2006). A nonlinear model for ionic polymer metal composites as actuators. *Smart Materials and Structures*, 16(1), 1.

- Calvert, P., & Rieke, P. (1996). Biomimetic mineralization in and on polymers. *Chemistry of Materials*, 8(8), 1715-1727.
- Caponetto, R., De Luca, V., Graziani, S., & Sapuppo, F. (2013). An optimized frequency-dependent multiphysics model for an ionic polymer–metal composite actuator with ethylene glycol as the solvent. *Smart Materials and Structures*, 22(12), 125016.
- Chuc, N. H., Vuong, N. H. L., Kim, D., Moon, H., Koo, J. C., Lee, Y., ... & Choi, H. R. (2010). Design and control of a multi-jointed robot finger driven by an artificial muscle actuator. *Advanced Robotics*, 24(14), 1983-2003.
- Curet, O. M., Patankar, N. A., Lauder, G. V., & MacIver, M. A. (2010). Aquatic manoeuvring with counter-propagating waves: a novel locomotive strategy. *Journal of The Royal Society Interface*, 8(60), 1041-1050.
- DeLuca, N. W. (2008). *Nafion® blend membranes for the direct methanol fuel cell*. Doktora Tezi, Drexel Üniversitesi, Philadelphia.
- Gall, K., Dunn, M. L., Liu, Y., Finch, D., Lake, M., & Munshi, N. A. (2002). Shape memory polymer nanocomposites. *Acta Materialia*, 50(20), 5115-5126.
- Hannan, M. W., & Walker, I. D. (2003). Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots. *Journal of robotic systems*, 20(2), 45-63.
- Kidskunst*, (b.t.). 20 Nisan 2018, <http://kidskunst.info/linked/muscle-roles-what-is-an-agonist-antagonist-stabilizer-6d7573636c65.htm>

- Kothera, C. S., Leo, D. J., & Lacy, S. L. (2008). Characterization and modeling of the nonlinear response of ionic polymer actuators. *Journal of Vibration and Control*, 14(8), 1151-1173.
- Lee, H. K., Choi, N. J., Jung, S., Park, K. H., Jung, H., Shim, J. K., ... & Kim, J. (2009). Electroactive polymer actuator for lens-drive unit in auto-focus compact camera Module. *ETRI Journal*, 31(6), 695-702.
- Lendlein, A., & Langer, R. (2002). Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications. *Science*, 296(5573), 1673-1676.
- Leng, J., Lu, H., Liu, Y., & Du, S. (2008). Conductive nanoparticles in electro activated shape memory polymer sensor and actuator. In *Nanosensors and Microsensors for Bio-Systems 2008*, 6931, 693109.
- Li, L., Song, J., Wang, H., & Xue, C. (2006). Linear subsystem model for real-time control of vehicle stability control system. In *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 1-6.
- Low, K. H., & Willy, A. (2006). Biomimetic motion planning of an undulating robotic fish fin. *Journal of Vibration and Control*, 12(12), 1337-1359.
- Martinez-Villalpando, E. C., Weber, J., Elliott, G., & Herr, H. (2008). Design of an agonist-antagonist active knee prosthesis. In *2008 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 529-534.
- Mazzoldi, A., & De Rossi, D. (2000). Conductive-polymer-based structures for a steerable catheter. In *Smart Structures and Materials 2000: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 3987, 273-281

- McDaid, A. J., Aw, K. C., Haemmerle, E., & Xie, S. Q. (2010). A conclusive scalable model for the complete actuation response for IPMC transducers. *Smart Materials and Structures*, 19(7), 075011.
- McDaid, A. J., Aw, K. C., Haemmerle, E., & Xie, S. Q. (2012). Control of IPMC actuators for microfluidics with adaptive “online” iterative feedback tuning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 17(4), 789-797.
- Northrup, S., Sarkar, N., & Kawamura, K. (2001). Biologically-inspired control architecture for a humanoid robot. In *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*, 2, 100-1105.
- Otero, T. F., & Cortes, M. T. (2004). Artificial muscle: movement and position control. *Chemical Communications*, (3), 284-285.
- Park, I. S., Jung, K., Kim, D., Kim, S. M., & Kim, K. J. (2008). Physical principles of ionic polymer–metal composites as electroactive actuators and sensors. *MRS bulletin*, 33(3), 190-195.
- Permapure, (b.t). 01 Nisan 2019, <https://www.permapure.com/resources/all-about-nafion-and-faq/>
- Punning, A., Johanson, U., Anton, M., Aabloo, A., & Kruusmaa, M. (2009). A distributed model of ionomeric polymer metal composite. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(14), 1711-1724.
- Scrosati, B. (Ed.). (1993). *Applications of electroactive polymers*. London: Chapman & Hall.
- Sefati, S., Neveln, I. D., Roth, E., Mitchell, T. R., Snyder, J. B., MacIver, M. A., ... & Cowan, N. J. (2013). Mutually opposing forces during locomotion can eliminate

- the tradeoff between maneuverability and stability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(47), 18798-18803.
- Shahinpoor, M., & Kim, K. J. (2001). Ionic polymer-metal composites: I. Fundamentals. *Smart materials and structures*, 10(4), 819.
- Shahinpoor, M., & Kim, K. J. (2004). Ionic polymer-metal composites: III. Modeling and simulation as biomimetic sensors, actuators, transducers, and artificial muscles. *Smart materials and structures*, 13(6), 1362.
- Shahinpoor, M., & Kim, K. J. (2004). Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications. *Smart materials and structures*, 14(1), 197.
- Shoji, E., & Komoda, Y. (2013). Pulse width modulation (PWM) control of the bending displacement and force generation of ionomer-based polymer actuators. *Polymers for Advanced Technologies*, 24(8), 752-757.
- Vunder, V., Punning, A., & Aabloo, A. (2012). Mechanical interpretation of back-relaxation of ionic electroactive polymer actuators. *Smart Materials and Structures*, 21(11), 115023.
- Wache, H. M., Tartakowska, D. J., Hentrich, A., & Wagner, M. H. (2003). Development of a polymer stent with shape memory effect as a drug delivery system. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 14(2), 109-112.
- Wallace, G. G., Teasdale, P. R., Spinks, G. M., & Kane-Maguire, L. A. (2002). *Conductive electroactive polymers: intelligent materials systems*. Boca Raton: CRC press.
- Xie, T., & Xiao, X. (2008). Self-peeling reversible dry adhesive system. *Chemistry of Materials*, 20(9), 2866-2868.

Yılmaz, O. C., Cetin, L., Gurses, B. O., Sen, İ., Ozdemir, O., Sarıkanat, M., ... & Mermer, O. (2014). Investigation of the effects of PWM parameters on ionic polymer metal composite actuators. *Smart Materials and Structures*, 23(9), 095024.

Yılmaz, O. C., Sen, I., Gurses, B. O., Ozdemir, O., Cetin, L., Sarıkanat, M., ... & Altinkaya, E. (2019). The effect of gold electrode thicknesses on electromechanical performance of nafion-based ionic polymer metal composite actuators. *Composites Part B: Engineering*, 165, 747-753.

