

**ELEKTROSTATİK MEMS EYLEYİCİLERİN VOLTAJ-
KONUM FONKSİYONUNUN ANALİTİK OLARAK
MODELLENMESİ VE YAPAY ZEKA TEKNİKLERİYLE
OPTİMİZE EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

CEVHER AK

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

**MERSİN
EKİM - 2016**

**ELEKTROSTATİK MEMS EYLEYİCİLERİN VOLTAJ-
KONUM FONKSİYONUNUN ANALİTİK OLARAK
MODELLENMESİ VE YAPAY ZEKA TEKNİKLERİYLE
OPTİMİZE EDİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

CEVHER AK




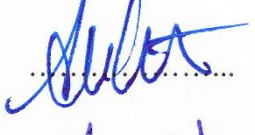
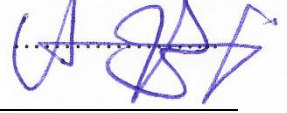
**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ**

**MERSİN
EKİM - 2016**

Cevher AK tarafından Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ danışmanlığında hazırlanan “Elektrostatik MEMS Eyleyicilerin Voltaj-Konum Fonksiyonunun Analitik Olarak Modellenmesi ve Yapay Zeka Teknikleriyle Optimize Edilmesi” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Prof. Dr. Ali AKDAĞLI	
Üye	Prof. Dr. Hüseyin CANBOLAT	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Murat AKSOY	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Ahmet Naci METE	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ~~28~~ 28/10/2016 tarih ve 2016-137/39 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Ayla CELİK
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmamada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel, ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
- Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi

beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with specified ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific Works about the case of exploitation of the others' work.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

27 Ekim 2016 / 27 October 2016

İmza / Signature



Cevher AK

ÖZET

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan yeni cihaz ve ürünler insanların yaşantısında giderek daha fazla yer almaktadır. Günümüzde insanlar hem iletişim kurabilmek, hem de günlük hayatlarının gereksinimlerini daha pratik bir şekilde karşılayabilmek adına birçok teknolojik cihaza ihtiyaç duymaktadırlar. İlerleyen teknolojinin insan hayatına daha fazla müdahil olmasının sonucu olarak birçok alanda makineler insanların yerini almış, insan gücü yerine makina kullanımı ve otomasyon giderek yaygınlaşmıştır. Bu güç değişimi bilim ve sanayi dünyasının hem daha ekonomik ve küçük boyutlu hem de daha işlevli cihazlar ortaya çıkarmaya odaklanmasını kaçınılmaz kılmıştır. Bugün gelinen noktada, yeni teknolojiye sahip cihazların çevresel değişkenleri otomatik algılayacak şekilde çok işlevli olmaları amaçlanmaktadır ve bunun yegane yolu bu cihazların sensörlerle donatılmasıdır. Günümüzde hem çevresel değişkenleri algılama hem de bu değişkenlere cevap verme bakımından ihtiyaç duyulan birçok elektromekanik sensörün üretiminde Mikro Elektromekanik Sistemler (MEMS) ve MEMS eyleyicilerden faydalanılmaktadır. Bu sebeple, gerek boyut avantajı gerekse üretim kolaylığı bakımından MEMS giderek daha fazla yaygınlaşmakta ve önem kazanmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda bilim insanları MEMS eyleyicilerin mekanik hareketlerini tahmin edebilmek için birçok matematiksel model ortaya koymuştur. Fakat literatürdeki modellerin bir kısmı deneysel veriler ile karşılaştırıldığında yeterince hassas sonuçlar verememekte, diğer bir kısmı ise çok karmaşık hesaplama ifadeleri içerdiğinden pratik anlamda uygulanabilirliğini kaybetmektedir. Dolayısıyla hem hassas hem de hızlı sonuç veren ve hesaplanması daha kolay yeni bir matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışma, hem eyleyici için daha hassas kontrol imkanı sunan hem de deneysel ölçümlere daha yakın sonuçlar veren yeni matematiksel ifadeler elde edebilmek amacıyla yapılmıştır. Öncelikle sonlu eleman metodu(SEM) kullanan COMSOL™ programı yardımıyla MEMS eyleyiciler için benzetimler oluşturulmuştur. Elde edilen benzetim sonuçları kullanılarak, MATLAB™ programı yardımıyla matematiksel modeller oluşturulmuştur. Nihai olarak bu modeller en iyi sonuçları verecek şekilde hem yapay zeka teknikleri ile optimize edilmiş hem de yapay sinir ağı ile modellenmiştir. Böylece hem gerçek ölçümlere daha yakın sonuçlar veren hem de hızlı ve kolay hesaplanabilen matematiksel formüller ile modeller literatüre ve pratik kullanıma sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: MEMS, Elektrostatik Eyleyiciler, Çökme Limiti, Çökme Voltajı, Optimizasyon

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ, Mersin Üniversitesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ABSTRACT

The new devices and products have emerged with the development of technology has taken place in daily life more and more. Nowadays, people to be able to both communicate and meet their daily needs have used many technological devices. Because of advancing technology being more involved in the lives of people, the machines have replaced humans in many areas has become widespread by using machines instead of human power and automation. This shifting has inevitably made the world of science and industry focusing to produce both more economical, smaller and more functional devices. At this point on, it is intended to make these devices multi-functional for automatically detecting the environmental variables and the only way doing this is to equip these new technology devices with sensors. Today, in the manufacturing of the many electromechanical sensors, which are needed in respect to both detecting the environmental variables and reacting to them, it has been utilized Micro Electromechanical Systems (MEMS) and MEMS actuators. For this reason, MEMS have become more popular and widespread due to both the small dimensions and ease of fabrication. Several mathematical models have been published to predict the mechanical motion of the MEMS actuators. However, the results of the some published models are not agreed well with the experimental results, while some other models are comprised of the complex computational steps that are restraining their practical implementation. Therefore, it is needed to construct a new and simple mathematical model which is time and computationally efficient to predict experimental results accurately.

This study aims to construct new models that provide controlling the actuators more precisely and give accurate results with respect to measurements. Firstly, MEMS actuators are simulated by using COMSOL™ software that is based on the finite element method (FEM). By taking into account the results of the simulations, mathematical models are developed by MATLAB™. Ultimately, both artificial intelligence techniques and the artificial neural network model to give results that are more accurate have optimized to derive mathematical expressions. Thus, the mathematical formula and models that give results that are more precise in an easy and time efficient way are presented to literature and use of practical studies.

Keywords: MEMS, Electrostatic Actuators, Pull-In Limit, Pull-In Voltage, Optimization

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ali YILDIZ, Department of Electrical - Electronics Engineering, Mersin University

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında ve yürütülmesinde emeği geçen ve çalıŐmalarımın her aşamasında yardımını esirgemeyen, daima sabır ve anlayıŐ gösteren değerli tez danıŐmanım Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ'a çok teşekkür ederim.

Tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR, Prof. Dr. Ali AKDAĞLI ve Yrd. Doç. Dr. Murat AKSOY'a, ayrıca doktora savunma jürimde yer alan Prof. Dr. Hüseyin CANBOLAT, Doç. Dr. Yuriy MISHCHENKO ve Yrd. Doç. Dr. Ahmet Naci METE'ye ve ayrıca değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Seda ERMİŐ'e yardımlarından, katkılarından ve bana aktardıkları çok kıymetli tecrübelerinden ötürü en içten teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışma boyunca maddi ve manevi desteğini, en zor vakitlerimde anlayıŐ ve güler yüzlerini esirgemeyen sevgili eŐime, çocuklarıma, aileme ve tüm dostlarıma teŐekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bu tezi, bu günlere gelmemde sonsuz emeđi bulunan ve benden sevgi ve Őefkatini hiçbir zaman esirgemeyen rahmetli anneme ve babama ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
2.1. MEMS Eyleyicilerin Çökme Kararsızlığı Durumu	4
2.2. MEMS Eyleyicilerin Matematiksel Modellenmesi	9
3. MATERYAL ve YÖNTEM	16
3.1. Sonlu Elemanlar Metodu	16
3.2. ANSYS Benzetim Programı	20
3.2.1. ANSYS Programında Benzetim Oluşturma	20
3.2.1.1. Eleman Tipinin Belirlenmesi	21
3.2.1.2. Problem Geometrisinin Belirlenmesi	22
3.2.1.3. Problem Geometrisine Uygulanacak Etkinin Belirlenmesi	22
3.2.1.4. Problem Geometrisi İçin Ağ Yapısının Oluşturulması	23
3.2.1.5. Problem Geometrisi İçin Sınır Koşullarının Belirlenmesi	24
3.3. COMSOL Benzetim Programı	25
3.3.1. Mikro Elektromekanik Sistemlerin Benzetimi	25
3.4. Matlab™ Programı	28
3.5. Yapay Zeka Optimizasyon Teknikleri	28
3.5.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	29
3.5.2. Genetik Algoritma (GA)	30
3.5.3. Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA)	30
3.5.4. Yapay Isıl İşlem Algoritması	31
3.5.5. Tabu Arama	31
3.5.6. Arı Kolonisi Algoritması	31
3.6. Yapay Sinir Ağları	32
3.6.1. YSA'ların Özellikleri	32
3.6.2. YSA'ların Kullanıldığı Alanlar	33
3.6.3. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması	34
3.6.3.1. İleri Beslemeli YSA'lar	34
3.6.3.2. Geri Beslemeli YSA'lar	34
3.6.4. Yapay Sinir Ağlarının Öğrenme Türleri	34
3.6.4.1. Danışmanlı Öğrenme	34
3.6.4.2. Danışmansız Öğrenme	34
3.6.5. Yapay Sinir Ağlarının Bölümleri	34
3.6.5.1. Girdiler	34
3.6.5.2. Ağırlıklılar	35
3.6.5.3. Toplama Fonksiyonu (Birleştirme Fonksiyonu)	35
3.6.5.4. Aktivasyon Fonksiyonu	35
3.6.5.5. Çıktılar	35
3.6.6. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi	35
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	37

4.1. Benzetim Sonuçları	37
4.2. Bir Ucu Bağlı Eyleyiciler İçin Formül Çalışmaları	38
4.2.1. Pivot Modeli ve Formül İfadesi	41
4.2.2. Pivot Modelinde Kuvvetlerin Gerçek Yerlerine Yerleştirilmesi	46
4.3. İki Ucu Bağlı Eyleyiciler İçin Formül Çalışmaları	53
4.3.1. Dört Pivot Modeli ve Formül İfadesi	55
4.3.2. Dört Pivot Modeline Artık Stres İfadesinin Yerleştirilmesi	62
4.4. İki Ucu Bağlı Eyleyiciler İçin Optimizasyon Çalışması	66
4.5. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Yapay Sınır Ağı Modeli	77
4.5.1. YSA'nın Modellenmesi ve Eğitilmesi	77
4.5.2. YSA Modelinin Benzetim Verileri ile Test Edilmesi	81
4.6. Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması	88
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	93
5.1. Bir Ucu Bağlı Eyleyici İçin Formül Sonuçları	93
5.2. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Formül Sonuçları	94
5.3. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Optimizasyon Sonuçları	94
5.4. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Yapay Sınır Ağı Sonuçları	95
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	107

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Çökme noktalarının başlangıç mesafesine oranı	40
Tablo 4.2. Bir ucu bağlı eyleyici için yapılmış çalışmaların karşılaştırılması	51
Tablo 4.3. Değişik uzunluklar için benzetimlerin karşılaştırılması	51
Tablo 4.4. Bir ucu bağlı eyleyicinin benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	52
Tablo 4.5. Bir ucu bağlı eyleyici için yapılan benzetimlerin karşılaştırılması	53
Tablo 4.6. Değişik başlangıç mesafeleri için çökme oranı benzetim sonuçları	56
Tablo 4.7. COMSOL ve Denklem (4.43) sonuçlarının karşılaştırılması	61
Tablo 4.8. Çeşitli artık stres (σ) değerlerine sahip eyleyici parametreleri	62
Tablo 4.9. Artık stres (σ) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması	63
Tablo 4.10. Artık stres (σ) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması	64
Tablo 4.11. Genişlik (w) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması	65
Tablo 4.12. Açıklık (g) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması	66
Tablo 4.13. 216 adet benzetim için kullanılan eyleyici parametreleri	70
Tablo 4.14. Denklem (4.48) için optimizasyon ile bulunan katsayılar	71
Tablo 4.15. Literatürde daha önce çalışılmış eyleyici parametreleri	71
Tablo 4.16. Literatürdeki çalışmaların Denklem (4.50) ile kıyaslanması	73
Tablo 4.17. Literatürde daha önce çalışılmış eyleyici parametreleri	74
Tablo 4.18. Literatürdeki çalışmaların Denklem (4.50) ile kıyaslanması	74
Tablo 4.19. Deneysel ölçümlerin Denklem (4.50) ile kıyaslanması	75
Tablo 4.20. Deneysel ölçümlerin Denklem (4.50) ile kıyaslanması	76
Tablo 4.21. 333 adet benzetim için kullanılan eyleyici parametreleri	78
Tablo 4.22. YSA modelinin benzetim sonuçları ile test edilmesi	82
Tablo 4.23. Literatürde çalışılmış eyleyicilerin fiziksel parametreleri [120]	83
Tablo 4.24. Benzetim ve hesaplama sonuçlarının YSA ile kıyaslanması	84
Tablo 4.25. Literatürde çalışılmış eyleyicilerin fiziksel parametreleri [120]	84
Tablo 4.26. Literatürde çalışılmış eyleyicilerin fiziksel parametreleri [120]	85
Tablo 4.27. Deneysel ölçümlerin YSA ile karşılaştırılması	85
Tablo 4.28. Deneysel ölçümlerin YSA ile karşılaştırılması	87
Tablo 4.29. Üç yöntemin karşılaştırılması için eyleyici parametreleri	88
Tablo 4.30. Parametrelere göre CoSolve [120] ile yöntemlerin kıyası	89
Tablo 4.31. Üç yöntemin ölçümler [120] ile karşılaştırılması ($E=168$ GPa)	90
Tablo 4.32. Üç yöntemin ölçümler [120] ile karşılaştırılması ($E=138$ GPa)	90
Tablo 4.33. Üç yöntemin benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması	91
Tablo 4.34. Her üç yöntemin benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması	92

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. MEMS eyleyicilerin avantajları ve kullanım alanları [24]	5
Şekil 2.2 Bir uçtan bağlı eyleyicinin 2B ANSYS benzetim yan görüntüsü	6
Şekil 2.3. Bir uçtan bağlı eyleyicinin 3B COMSOL benzetimi	6
Şekil 2.4. Her iki uçtan bağlı eyleyicinin 2B ANSYS benzetim yan görüntüsü	7
Şekil 2.5. Her iki uçtan bağlı eyleyicinin 3B COMSOL benzetim görüntüsü	7
Şekil 2.6. Çökme kararsızlığını kestirebilmek için geliştirilen lumped modeli	10
Şekil 2.7. Elde edilen ilk matematiksel ifadenin temel eyleyici modeli	11
Şekil 3.1. Belli bir yüzeyin SEM için ağlara ayrılması	16
Şekil 3.2. Alanlar kullanılarak oluşturulmuş eyleyici görünümü	22
Şekil 3.3. Eyleyicinin bulunduğu hava (vakum) ortamının modellenmesi	22
Şekil 3.4. Model için oluşturulmuş ağ yapısının görünümü	23
Şekil 3.5. Ağ yapısının yakından görünümü	23
Şekil 3.6. Ağ yapılarının nokta (nod) olarak gösterimi	24
Şekil 3.7. Sınır koşullarının problem geometrisine uygulanması	24
Şekil 3.8. COMSOL 3B olarak oluşturulan geometri	26
Şekil 3.9. İki ucu bağlı eyleyicinin başlangıç koşulları	27
Şekil 3.10. İki ucu bağlı eyleyicinin haritalanmış gösterimi	27
Şekil 4.1. Bir ucu bağlı eyleyicinin ANSYS ve COMSOL benzetimi	37
Şekil 4.2. İki ucu bağlı eyleyicinin ANSYS ve COMSOL benzetimi	38
Şekil 4.3. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin şematik gösterimi	39
Şekil 4.4. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin temsili gösterimi	39
Şekil 4.5. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin için pivot modeli	42
Şekil 4.6. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin kapasitans hesap gösterimi	42
Şekil 4.7. Bir uçtan bağlı eyleyicinin için temsili kuvvet noktaları	45
Şekil 4.8. Bir uçtan bağlı eyleyicinin için sonsuz küçük kapasitans gösterimi	47
Şekil 4.9. Bir ucu bağlı eyleyicinin a) sembolik ve b) değersel kuvvet noktaları	49
Şekil 4.10. İki uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin şematik gösterimi	54
Şekil 4.11. İki uçtan bağlı eyleyicinin elektrostatik kuvvet altındaki durumu	55
Şekil 4.12. İki uçtan bağlı eyleyicinin dört pivotlu modeli	57
Şekil 4.13 Eğimli ve simetrik yapıdaki bölümlerin kapasitans değeri	57
Şekil 4.14. Temsili kuvvetlerinin konumları ve gösterimleri	59
Şekil 4.15. İki uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin perspektif gösterimi	68
Şekil 4.16. İki uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin kapasitans modeli	68
Şekil 4.17. 216 adet eyleyici için yapılan benzetim ve hesaplama sonuçları	72
Şekil 4.18. Değişik uzunluklarda 11 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği	75
Şekil 4.19. Değişik uzunluklarda 10 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği	76
Şekil 4.20. Çok katmanlı perseptron tabanlı YSA modeli	77
Şekil 4.21. YSA modelinin eğitim şeması	79
Şekil 4.22. 297 adet eyleyici için yapılan benzetim ve YSA sonuçları	80
Şekil 4.23. Eğitilmiş YSA modelinin test şeması	81
Şekil 4.24. Değişik uzunluklarda 11 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği	86
Şekil 4.25. Değişik uzunluklarda 10 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği	87

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma/Simge	Tanım	Birimi
E	Elastikiyet Sabiti	(kg/m ²)
σ	Artık stres	(kg/m ²)
k	Yay değeri	(kg/m)
V	Voltaaj değeri	(Volt)
g	Paralel plakalar arası başlangıç açıklığı	(m)
t	Üst plakanın kalınlığı	(m)
δ	Üst plakanın deformasyon miktarı	(m)
x	Paralel kapasitörlerde plakalar arası mesafe	(m)
w	Plakaların genişliği	(m)
L	Paralel kapasitörlerde plaka uzunluğu	(m)
U_e	Paralel kapasitörlerde depolanan enerji	(J)
F_e	Elektrostatik kuvvet	(J/m)
F_s	Yay kuvveti	(kg)
A	Paralel kapasitörlerde plaka alanı	(m ²)
ϵ_0	Havanın dielektrik sabiti	(F/m)
C	Kapasitans değeri	(F)
M	Bükülme momenti	(N.m)
ν	Poisson's ratio	

1. GİRİŞ

Teknoloji günlük hayatımızın her aşamasında giderek daha fazla yer almaya başlamıştır. Çağımızda insan yaşamını teknolojiden uzak düşünmek nerdeyse imkânsız hale gelmiştir. Teknolojik çalışmalar birçok farklı kolda ve alanda ilerlemektedir. Teknolojinin temel amacı insanlığın problemlerine çözüm sunarak, günlük hayatı daha kolay hale getirmektir. Teknolojinin hayatımızda bu kadar önemli yer tutmasının ana sebebi, işlerin daha hızlı ve daha az hatayla yapılabilmesini sağlamasıdır. Özellikle son teknoloji akıllı cihazların sahip olduğu sensörler ve algılayıcılar sayesinde insan faktörü devreden çıkarılarak, insanların kendi duyularıyla fark edemeyecekleri hassasiyetlerde ölçümler yapılabilmekte ve yer, zaman veya mekan ayırt etmeksizin otomatik olarak gerekli işlemler yerine getirilebilmektedir. Dolayısıyla, teknolojik cihazların sahip olduğu sensör ve algılayıcılar ne kadar hassas/doğru ölçüm yapar ve doğru sonuç üretebilirse, onlara bağlı cihazların da işlerini o derece doğru ve güvenli yapabilmesi mümkün olur. Son zamanlarda kablosuz iletişimin artmasıyla taşınabilir akıllı cihazların bireysel kullanımı da oldukça yaygınlaşmıştır. Modern akıllı telefon ve tabletlerde, hareketi, basıncı, nemi, sıcaklığı, ivmeyi, vs. ölçebilen birçok dahili sensör bulunmaktadır. Bu sensörler sayesinde, bireysel cihazlar dahi birçok farklı işte kullanılabilir. Bu tarz cihazların işlevselliği, sensörlerin küçük boyutlarda üretilebilmesi ve çok az enerji ile çalışabilmeleri ile mümkün olmaktadır. Bundan dolayı, mevcut sensörlerin birçoğunun temelini oluşturan ve ileride daha yüksek kullanım potansiyeline sahip MEMS eyleyiciler, sahip oldukları boyut avantajı, üretim ve işletim kolaylığı sebebiyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Elektronik, haberleşme, bilgisayar, otomotiv, savunma, sağlık ve biyomedikal gibi birçok alanda MEMS teknolojisi halihazırda yoğun şekilde kullanılmaktadır. Dolayısıyla, MEMS teknolojisinin gelişmesi insanlığın yaşam kalitesini direk olarak etkilemektedir.

MEMS eyleyiciler, günümüz teknolojik cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin; haberleşme cihazlarında RF anahtar [1-4], biyolojik test cihazlarında bakteri tespiti için yük veya basınç sensörü [5-8], yüksek hızlı ışık modülatörlerinde ışığı yönlendirmek amacıyla ayna [9, 10] ve biyomedikal uygulamalarda kimyasal madde sensörü [11] olarak direk kullanımları mevcuttur. Bunun yanı sıra bütünleşik devrelerde hafıza elemanı [12, 13] olarak kullanımları da söz konusudur. Sonuç olarak, MEMS eyleyicilerin günümüz teknolojisinde bu kadar yaygın kullanılması ve hassas ölçümler için önemli olmaları nedeniyle, bağlı oldukları cihazlara doğru ölçüm iletmeleri veya istenen çıkışları üretebilmeleri büyük önem arz etmektedir. İşte bu noktada, MEMS eyleyicilerin hangi girişlere/çıkışlara göre istenen çıkışları/girişleri üreteceklerini önceden kestirebilmek ve istenen tasarımlarda üretilebilmelerini sağlamak, onların matematiksel olarak modellenmeleriyle mümkündür.

Matematiksel modelleme sayesinde hem zamandan hem de olası istenmeyen yanlış üretimlerin masraflarından tasarruf edilmiş olacaktır. Bu noktadan yola çıkarak matematiksel modellemeye bağlı tasarım kısmının, diğer aşamalara göre daha fazla önem arz ettiğini söylemek yanlış olmaz. Çünkü tasarımı hatalı veya eksik yapılmış bir çalışmanın doğru sonuçlar vermeyeceği açıktır. Bu güne kadar eyleyicilerin matematiksel modellerini yapmak için genel olarak birçok yöntem ve model sunulmuştur. Bu matematiksel modellerden bazıları basit ama yeterince hassas ve doğru sonuçlar veremezken, daha hassas sonuçlar veren modellerse oldukça karmaşık ve zaman alıcı hesaplama yöntemleri içermektedirler.

Bu tez çalışmasında amaç, MEMS eyleyicinin konum ve voltaj değerlerinin hesaplanabilmesi için analitik ve numerik yöntemler geliştirmek ve doğrulamalarını yapmaktır. Geliştirilen yöntemler sayesinde, eyleyicilerin hassas kontrolü sağlanacak ve yeni tasarımlarda ortaya çıkacak olası istenmeyen durumların maliyetinden, enerjisinden ve zamanından tasarruf edilmiş olacaktır. Bu amaçla, öncelikle sonlu eleman metodu (SEM) kullanan benzetim programları kullanılarak değişik parametrelere ve boyutlara sahip çok sayıda, bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı elektrostatik eyleyicinin benzetimi yapıldı ve gerekli veriler elde edildi. Sonrasında elde edilen veriler ışığında, eyleyicilerin çökme voltajlarının ve çökme noktalarının hangi parametreler tarafından kontrol edildiği analiz edildi. Analiz ve araştırmalar sonucunda, hem kolay hesaplanabilecek, hem de gerçek ölçüm sonuçlarına yakın sonuçlar verebilecek analitik modeller geliştirildi. Öncelikle, kütle-yay modelinden yola çıkılarak, yeni hareket modelleri ortaya kondu ve buna göre yeni modeller tasarlandı. MATLAB™ programı kullanılarak, çıkarılan modellerin matematiksel denklemlere dönüştürülmesi sağlandı. Hem bir ucu bağlı hem de iki ucu bağlı eyleyici tipleri için matematiksel denklemler oluşturuldu. Bu denklemler, çalışmada yapılan benzetim sonuçları ile karşılaştırıldı. Denklemlerin geçerliliğini daha geniş ölçekte kanıtlamak ve daha önce yapılmış hesaplama yöntemlerine göre üstünlüklerini göstermek adına, literatürdeki benzetim sonuçlarıyla ve gerçek ölçüm sonuçlarıyla da karşılaştırmalar yapıldı. İki ucu bağlı eyleyiciler yapıları gereği, bir ucu bağlı eyleyicilerden farklı olarak, üretim sırasında yapılarında stres oluşabildiğinden dolayı, bu tür eyleyicilerin çökme voltajı ve çökme limitlerini tahmin etmek ve modellemek göreceli olarak daha zor olmaktadır. Bu noktadan hareketle, iki ucu bağlı eyleyiciler için elde edilen matematiksel ifade; yapay zeka teknikleri ile optimize edilerek, gerçek ölçüm sonuçlarına daha yakın sonuçlar veren bir denkleme dönüştürüldü. Optimizasyon işlemi sonrası, iki ucu bağlı eyleyiciler için elde edilen formülün daha önce elde edilen analitik denkleme göre iyi sonuçlar verdiği görüldü. Ayrıca iki ucu bağlı eyleyiciler için yapay sinir ağları kullanılarak yeni bir model oluşturuldu ve bu sayede istenen eyleyici parametreleri girilerek çökme voltajını tahmin edecek bir yapay sinir ağı meydana getirildi.

Tezin ilk bölümlerinde; literatüre sunulmuş olan teorik ve deneysel çalışmalardan bahsedilmiş, ilerleyen bölümlerde ise kullanılan yöntem ve yazılımlar hakkında bilgi verilerek ortaya çıkan modellerin nasıl elde edildiği ve geçerlilikleri adım adım gösterilmiştir. Son olarak, ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilerek ilerde yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.



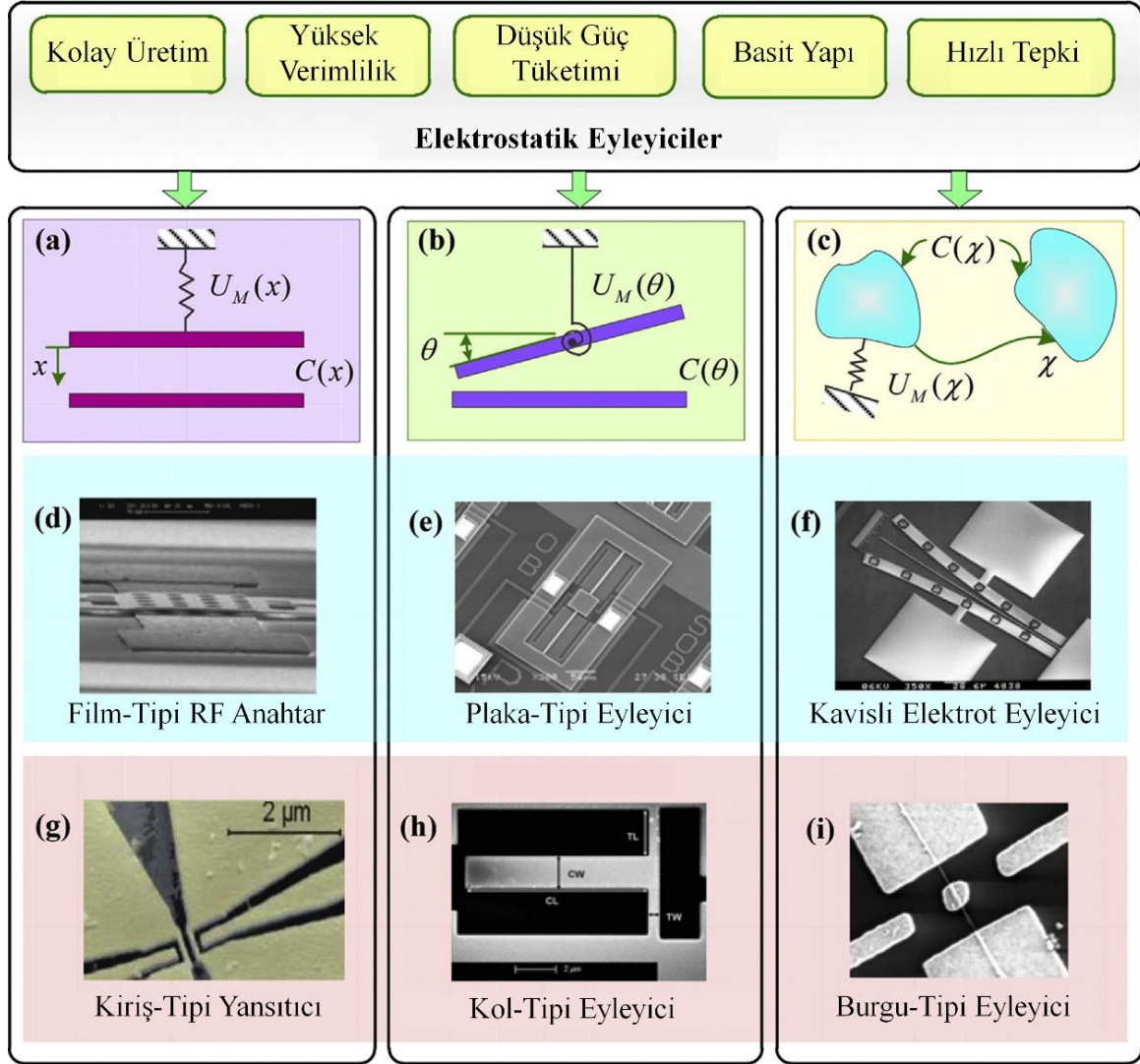
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. MEMS Eyleyicilerin Çökme Kararsızlığı Durumu

Elektrostatik kuvvetle hareket sağlamak, sahip olduğu birçok avantajdan dolayı MEMS çalışmalarındaki en popüler konulardan birisidir. Bugüne kadar birçok MEMS eyleyici türü geliştirilmiş ve sayısız uygulamada kullanılmıştır. Başlıca uygulama alanlarından bazıları, mikro/nano motorlar, mikro/nano RF anahtarlar, mikro/nano röleler, mikro/nano yansıtıcılar, mikro aynalar, mikro pompalar, mikro vanalar, mikro/nano filtrelerdir [13-23]. Şekil 2.1. MEMS elektrostatik eyleyicilerin avantajlarına ve tipik bazı kullanım alanlarına dair genel bir bakış sunmaktadır [24]. MEMS eyleyiciler bir kaç yönüyle değişik kategorilerde aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

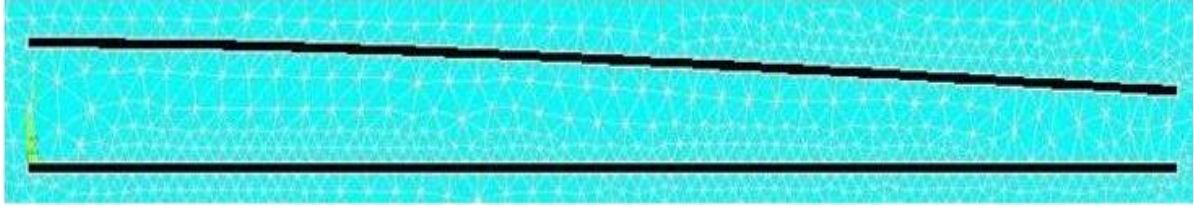
- (1) Hareket durumlarına göre: Bükülme veya burulma şeklinde harekete sahip eyleyiciler [25-32].
- (2) Şekillerine göre: Paralel plaka şeklinde (yatay veya dikey hareket edebilen) veya tarak tarzı birbirine geçmeli yapıya sahip (yanal, dikey ve dönme şeklinde hareket edebilen) eyleyiciler [15, 29, 31, 33-35].
- (3) Eleman yapılarına göre: Kiriş-tipi (beam-type), Kol-tipi (cantilever-type), her iki uçtan sabitlenmiş Köprü-tipi (fixed-fixed ve bridge-type) [30-36], Plaka-tipi [27], Film-tipi [26] ve özel tipte olan (S-tipi [37], lale-tipi [38], kazık-tipi [39], U-tipi [40], çok katmanlı [41, 42] gibi).

Elektrostatik MEMS eyleyiciler, genel olarak karşılıklı etkileşebilecek ve en az biri hareket yeteneğine sahip plaka veya yapılardan oluşmaktadır. MEMS eyleyicilerin hareket mekanizması, mikro düzeydeki göreceli yoğun ve farklı enerji seviyelerinden etkilenir. Bu sebeple, yüksek dereceli doğrusal olmayan dinamik ve kararsız durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu kararsız durumlar bozulma veya çökme kararsızlığı (pull-in instability) olarak adlandırılır. Çökme kararsızlığı, yüksek seviyede doğrusal olmayan dinamik bir durumdan ileri gelmektedir ve MEMS eyleyicilerin hareket ve çalışma limitlerini belirleyen hayati öneme sahip bir olgudur.

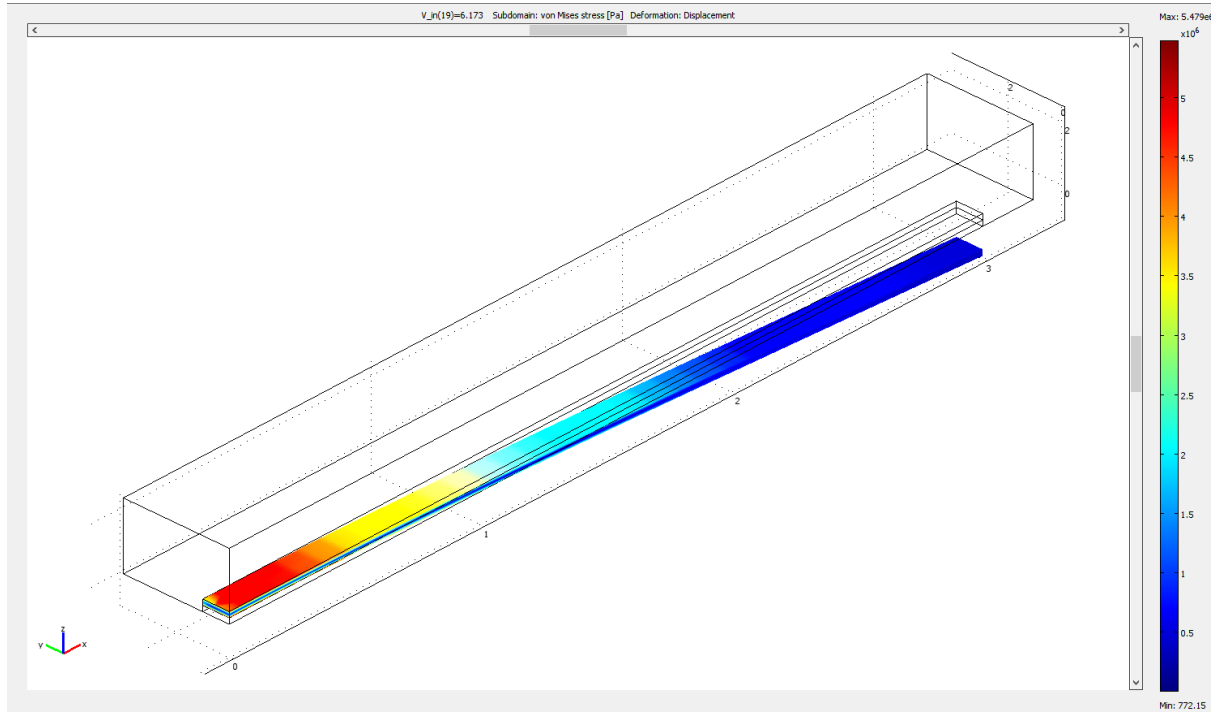


Şekil 2.1. MEMS eyleyicilerin avantajları ve kullanım alanları [24]

MEMS eyleyicilerin performansı, doğalarındaki bu kararsız durumdan oldukça etkilenmektedir. Çökme kararsızlığı, eyleyiciye uygulanan elektrostatik kuvvetin; hareket yeteneğine sahip eyleyici plakalardan en az birini hareket ettirmesi ve eyleyici yapısının bir noktadan sonra kararsız bir duruma geçerek bozulmasıyla meydana gelir. Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.'de sırasıyla, bir ucu sabit (kol-tipi) MEMS eyleyicilerin 2 boyutlu (2B) ANSYS ve 3 boyutlu (3B) COMSOL benzetimleri görülmektedir. Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.'te de iki ucu sabit (köprü-tipi) MEMS eyleyicilerin 2 boyutlu (2B) ANSYS ve 3 boyutlu (3B) COMSOL benzetimleri görülmektedir. Şekillerden de görülebildiği gibi uygulanan voltaj neticesinde oluşan elektrostatik kuvvet nedeniyle, hareket edebilen elektrotlarda deformasyon veya mekanik hareket meydana gelmektedir.



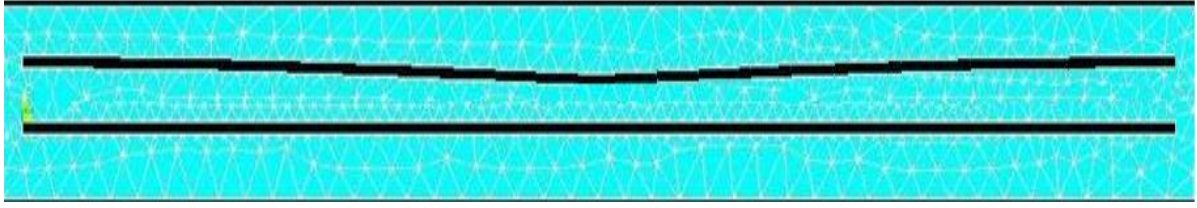
Şekil 2.2. Bir uçtan bağlı eyleyicinin 2B ANSYS benzetim yan görüntüsü



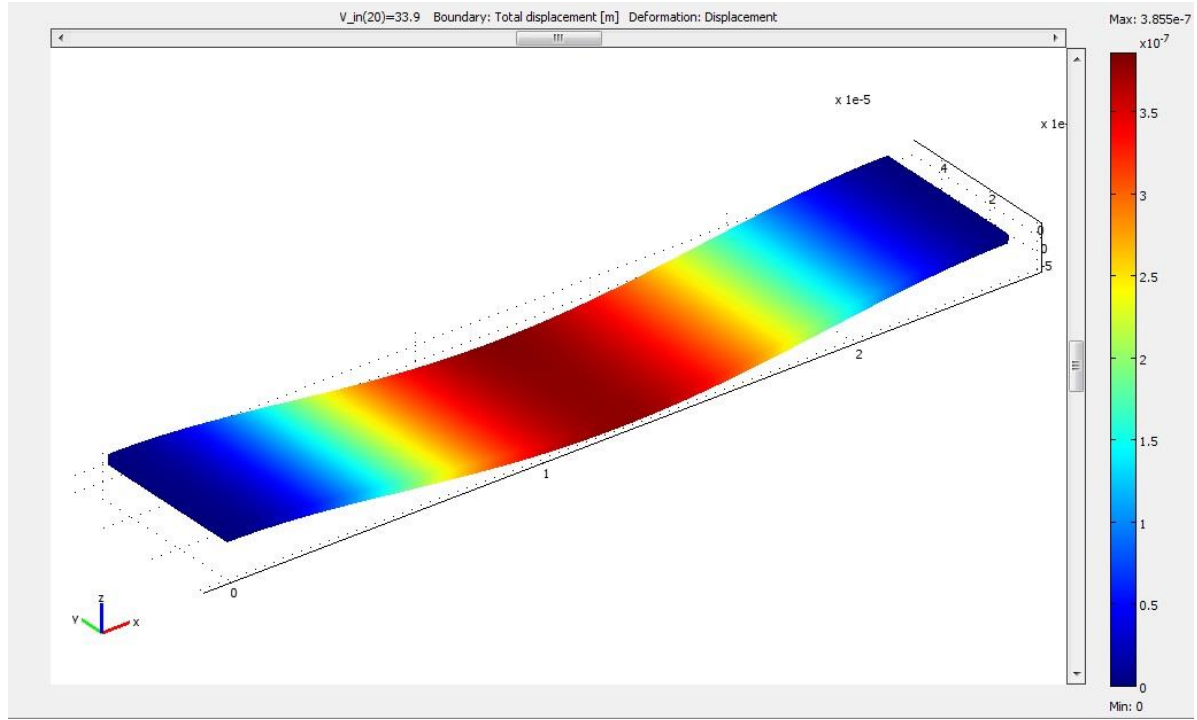
Şekil 2.3. Bir uçtan bağlı eyleyicinin 3B COMSOL benzetimi

Bir noktadan sonra eyleyici yapısının bozulmasında, eyleyiciyi harekete zorlayan elektrostatik kuvvetin, elektrotlar arasındaki mesafe azaldıkça üssel olarak artması buna mukabil elektrostatik kuvveti dengeleyen yapısal geri çekme kuvvetinin ise doğrusal olarak artması ile oluşan asimetrik durum etkilidir. Buradaki kararsızlık sadece statik olmama durumu değildir, aynı zamanda dinamik bir kararsızlık da söz konusudur [43].

Bolotin [44] çökme kararsızlığı durumunu, eyleyicilerin mekanik yapılarında var olan dinamik kararsızlıklar ışığında tasvir etmiştir. MEMS elektrostatik eyleyicilerin sahip olduğu avantajlardan dolayı eyleyicilerin kullanımlarının artması, söz konusu çökme kararsızlığının tespiti ve çözümüne yönelik matematiksel modelleme çalışmalarına ilgiyi gün geçtikçe arttırmaktadır.



Şekil 2.4. Her iki uçtan bağlı eyleyicinin 2B ANSYS benzetim yan görüntüsü



Şekil 2.5. Her iki uçtan bağlı eyleyicinin 3B COMSOL benzetim görüntüsü

Çökme kararsızlığı olgusuyla ilgili ilk öncü çalışmalar Nathanson [45] ve Taylor [46] tarafından 1960'ların sonlarında yapılmıştır. Onlarca yıldır birçok araştırmacı doğrusal olmayan bu kararsız durumu anlamaya ve tanımlamaya odaklanmıştır. Çökme kararsızlığını analiz etmek için birçok benzetim ve model geliştirilirken, örneğin; Lumped kütle-yay modeli [47], basitleştirilmiş yapılar için analitik modeller [41, 48], azaltılmış dizi modelleri [49-51], Full-Lagrange metodu [52, 53], Lyapunov üstel yöntemi [54], güvenilirlik tabanlı tasarım ve optimizasyon metodu [55], karbon nano tüpler için moleküler dinamik modelleme [56] gibi. Bunların dışında, Pelesko ve Bernstein [57], Lin ve Wang [58], Batra [14], Zhang [59] ve Chuang [19] tarafından geniş kapsamlı birçok inceleme, benzetim çalışması ve matematiksel model sunulmuştur. Çökme analizi, duruma göre ana iki gruba ayrılabilir. İlki, yarı-statik yaklaşımlar kullanılarak analiz edilmesi; ikincisi, daha çok dinamik değişkenler baz alınarak analiz edilmesidir [60]. Elektrostatik kuvvetin etkilerine ilaveten geometrik boyutlarının, malzeme özelliklerinin, yüzey etkilerinin [61-66], sıcaklık etkilerinin [67, 68], boyut bağlantılı etkilerin

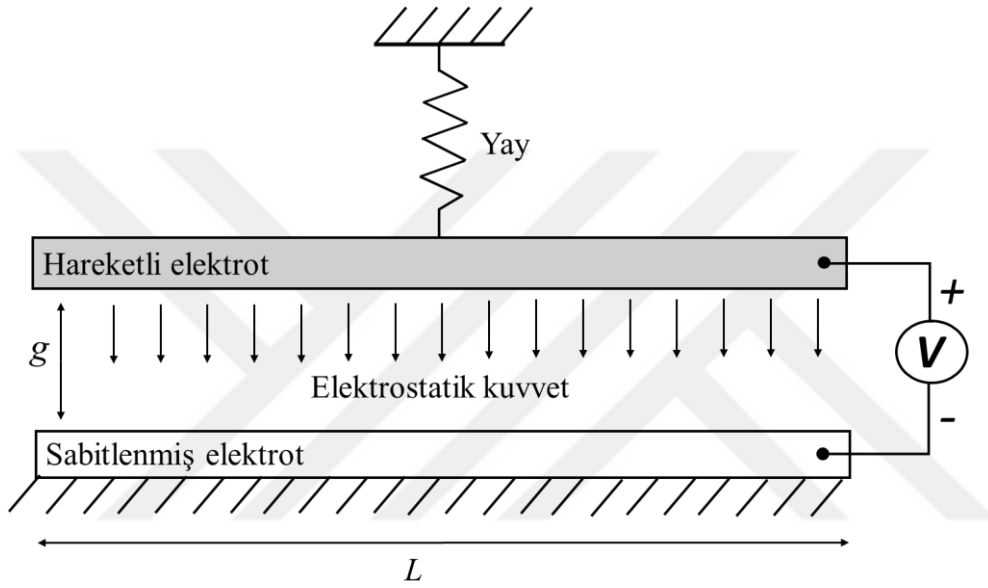
[69-72], sıkıştırılmış filmlerin gaz üzerinde etkilerinin [73-76], sıvı yük etkilerinin [77, 78], mekanik şok ve gürültü etkilerinin [79-84] de çökme kararsızlığı üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir. Bunların yanında, MEMS aygıtlar için çökme kararsızlığının karmaşık dinamikleri de geniş olarak çalışılmıştır [60, 85, 86]. Luo ve Wang [47] tarafından MEMS eyleyicilerin modellenmesi için kapasitör-yay modeli sunulmuştur. Zhao [51] tarafından elektrostatik mikro aynalarda çökme kararsızlığı üzerinde analizler yapılmıştır. Krylov ve Maimon [85] tarafından elektrostatik eyleyicilerin geçici dinamikleri üzerine detaylı bir çalışma sunulmuştur. Neilson ve Barbastathis [86] tarafından enerji-denge metodu kullanılarak paralel plaka eyleyicilerin dinamik çökme kararsızlığı üzerine bir çalışma yapılmıştır. Fang ve Li [60] tarafından MEMS eyleyicilerin dinamik çökme kararsızlığının tahmini ve analitik modellenmesi konusunda kısa bir inceleme ortaya konulmuştur. Casimir ve van der Waals kuvvetlerinin çökme kararsızlığı üzerindeki etkileri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [87-89]. Nano RF anahtarlarda [90] ve grafin filmlerde [91] çökme kararsızlığı konuları da son zamanlarda oldukça ilgi çekmektedir. Dahası, MEMS aygıtlarında, çoklu fiziksel alanların girişim yapması, yapışma durumunun gerçekleşmesi, yalıtkan değişimi, elektrostatik boşalma ve yapısal bozulmalar [19, 24, 92, 93] gibi birçok sorun çökme kararsızlığı kaynaklı olduğundan bu sorun göz ardı edilemez. Frekans ayar derecesi de çökme kararsızlığından etkilenmektedir [60, 94-97]. Buna ek olarak, manyeto-statik eyleyiciler [53, 98, 99] ve dielektrik elastomer eyleyiciler de [100-103] çökme kararsızlığından mustarıdır. Dolayısıyla, eyleyicilerin hareketlerinin ve çökme voltajının doğru tahmini, elektrostatik MEMS aygıtların kullanımını ve gelişimini de hızlandırmaktadır. Çökme kararsızlığı durumunu MEMS aygıtların tasarım ve kullanımlarında limitler oluşturmaktadır. Çökme kararsızlığı durumunun nasıl kontrol edilebileceği veya bastırılabilirliği, eyleyici hareketindeki limitlerin nasıl aşılabileceği gibi konular MEMS aygıtları için oldukça önem arz etmektedir. Birçok araştırmacı bu konulara ilgi göstermekte ve çeşitli yaklaşımlarda bulunmaktadır. Örneğin, hareket limitini ve kararlılığı artırma konularında, mekanik modifikasyonlar [104-106] ve kontrol yöntemleri [107-109] geliştirilmiştir. Rocka ve arkadaşları [110] mikro eyleyicilerin hareket limitlerini geliştirmek için sunulmuş yöntemlerden ve çalışmalardan karşılaştırmalı bir derleme yaptılar. Oluşması istenmeyen çökme kararsızlığı durumunun, çeşitli kuvvet dağılım metotları kullanarak azaltılabileceği raporlandı [111-113]. Açık ve kapalı çevrim kontrol metotlarının MEMS aygıtlarında uygulanması ve sonuçlarının karşılaştırılması ile ilgili bir çalışma Borovic ve arkadaşları tarafından sunulmuştur [114]. Shirazi ve arkadaşları [115] karşılaştırmalı bir gözden geçirme çalışması yaparak, elektrostatik MEMS eyleyicilerin plakalar arasındaki mesafenin kontrolü ile ilgili bir yaklaşım ortaya koydular. MEMS aygıtların kontrolü ile ilgili teknik incelemeler yapılmıştır [116, 117].

Aslında çökme durumu çoğu MEMS aygıtlar için istenmeyen bir durum olsa da, bu durum sensör mekanizmaları ve mikro ölçekte güçlü bir mekanik kuvvetin ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılabilir. Bazı aygıtlarda örneğin; MEMS RF anahtarlarının ve ivme-ölçerlerin iş görebilmesi için çökme durumunun oluşmasına ihtiyaç vardır [26, 40, 118 ve 119]. Ayrıca çökme durumu eyleyicinin boyut ve malzeme özelliklerine bağlı olduğundan, çökme durumu tersine işletilip eyleyici karakteristiğini ortaya çıkarmada da test aracı olarak kullanılabilir. Örneğin, en önemli testlerden bazıları, eyleyicinin malzeme özelliği olan elastikiyet sabiti (Young's modulus), tabaka kayma etkisi, artık stres (residual stress) ve benzeri [41, 70, 120-122] özelliklerin ölçülebilmesidir. Son yıllarda MEMS aygıtlarda, çökme kararsızlığıyla ilgili çok kapsamlı ve önemli incelemeler yapılarak, yukarıda da bahsedilen çoğu sorunun tespiti yapılmıştır [14, 19, 59, 110, 115, 123 ve 124]. Bu sorunların çözümü için, MEMS eyleyicilerin matematiksel olarak modellenmesi ve çökme noktası ile çökme voltajının kestirilebilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2. MEMS Eyleyicilerin Matematiksel Modellenmesi

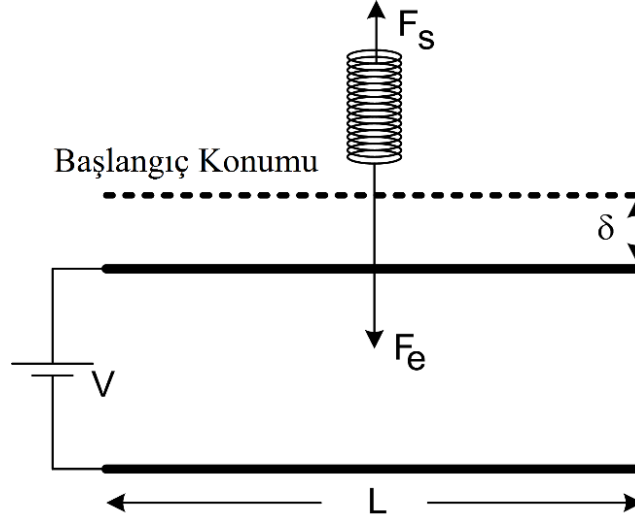
Çökme kararsızlığı durumu, MEMS aygıtlara has benzersiz bir durumdur. Makro-ölçekte gözlemlenmeyen fakat mikro ölçekte elektromekanik girişim olayından dolayı ortaya çıkmakta olan bu durum, ilk olarak Nathanson [45] tarafından 1967 yılında raporlanmıştır. Birçok araştırmacı mikro ölçekte gerçekleşen bu durumu açıklamaya çalışmıştır [110, 125 ve 126]. Araştırmacılar, bugüne kadar çökme durumuyla ilgili çok sayıda numerik çalışmalar yapmış [96, 127-129] ve çökme noktasının tespiti için değişik hesaplama yöntemleri geliştirmişlerdir [130]. MEMS teknolojisinin hızla gelişmesinden dolayı çökme kararsızlığını tam olarak anlamak ve gerçekleştiği noktayı en iyi yaklaşımla tahmin etmek büyük önem arz etmektedir. 1960'ların sonlarında Taylor [34] elektro hidrodinamik konusunda çalışırken çok çarpıcı bir keşifte bulunmuştur ve elektrik voltajının belli bir seviyesinden sonra sabun köpüklerinin birbirine yapıştığını gözlemlemiştir. Bu deneyde sabun köpükleri iki farklı iletken tüpün her bir ucuna yerleştirilmiş ve birbirlerinden izole şekilde tutulmuştur. En etkileyici ve sürpriz gözlem, belli bir voltaj seviyesine gelindiğinde iki tüpün ucunda duran köpük filmlerinin aniden birbirine yapışarak kararlı durumlarından, kararsız duruma geçmeleri olmuştur. İşte bu kararsız durum ilk olarak Nathanson [45] tarafından çökme kararsızlığı (pull-in instability) ve bu kararsızlığın gerçekleştiği voltaj seviyesi de çökme voltajı (pull-in voltage) olarak adlandırılmıştır. Çökme kararsızlığı olayını deneysel olarak gözlemleyebilmek için Poelma [131] eyleyiciye uyguladığı voltajı yavaş yavaş arttırarak, sistemin kararlı durumdan kararsız duruma geçtiği anı tespit etmiştir. Anlık çökme durumu yani çökme kararsızlığı, deneysel olarak gözlemlenmiş ve elektrotun çökmeden hemen önce titreşme durumuna geçip sonrasında çöktüğü tespit edilmiştir. Dahası, çökme kararsızlığı deneyi eyleyicilerin üretildiği malzemelerin özelliklerini belirlemede

de kullanılmıştır [131, 132]. Sonuç olarak, MEMS eyleyicilerde görülen bu kararsızlık durumunun anlaşılması ve kontrol edilebilmesi teknolojik açıdan oldukça büyük önem arz etmektedir. 1967 yılında Nathanson [45] elektrostatik eyleyicilerin çökme durumlarını kestirebilmek için elektrostatik-elastik yay tabanlı ilk matematiksel modeli ortaya koymuştur. Sonrasında ortaya çıkan hemen hemen tüm matematiksel modeller onun ortaya koyduğu kütle-yay modelinden türetilmiştir. Şekil 2.6.'da çökme kararsızlığını kestirebilmek ve matematiksel olarak hesaplayabilmek için ilk geliştirilen kütle-yay modeli görülmektedir. Daha sonra, bu model Lumped model olarak anılmıştır.



Şekil 2.6. Çökme kararsızlığını kestirebilmek için geliştirilen Lumped modeli

Lumped modeline ayrıntılı bir şekilde bakıldığında, üst ve alt elektrotlar arasında uygulanan gerilim, elektrostatik bir çekim kuvveti meydana getirir ve plakaları birbirine doğru yaklaşmaya zorlar. Malzemelerin bükülmeye karşı verdiği doğal tepki sonucu üst elektrot, elektrostatik kuvvetin tam tersi yönünde bir geri çekme (tepki) kuvveti oluşturur. Lumped modelinde bu tepki Şekil 2.7.'deki gibi bir yay kuvveti olarak tasvir edilmektedir ve üst elektrotun bir piston gibi sadece aşağı yukarı hareket ettiği varsayılır.



Şekil 2.7. Elde edilen ilk matematiksel ifadenin temel eyleyici modeli

Şekil 2.7.'deki yapı dengedeysen, yukarı doğru çeken yay kuvveti (F_s) ve aşağı doğru çeken elektrostatik kuvvet (F_e) birbirini dengelemektedir. Dengede olan kuvvetlerin toplamının sıfır olması kuralından yola çıkarak, kuvvet eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_e = F_s \quad (2.1)$$

F_s yay kuvveti, yay sabiti (k) ve yayın gerilme miktarı (δ) ile çarpımına eşittir.

$$F_s = k\delta \quad (2.2)$$

F_e elektrostatik kuvvet ise eyleyiciye uygulanan voltaja bağlı olarak üst elektrotu aşağı çeken kuvvettir. Eyleyicinin yapısının bir kapasitöre benzetilebileceği daha önce belirtilmiştir. Bu sebeple V voltajı uygulanan C kapasitansının depoladığı enerji (U) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$U = \frac{1}{2}CV^2 \quad (2.3)$$

Depolanan enerji ile elektrostatik kuvvet arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$\Delta U = -F_e \Delta x \quad (2.4)$$

Burada, iki elektrot arasındaki başlangıç açıklığına g dersek ve uygulanan voltaj sonucu aşağıya doğru aldığı mesafeye de δ dersek; elektrotların denge durumundayken aralarındaki mesafe $x=g-\delta$ olur.

Denklem (2.4)'ten F_e çekilirse;

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{dU}{dx} = -F_e \quad (2.5)$$

Enerji ifadesi (U) Denklem (2.5)'te yerine yazılırsa;

$$F_e = -\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} CV^2 \right) \quad (2.6)$$

Paralel plaka şeklinde olan kapasitansın değeri [4].

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{x} \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A elektrotların yüzey alanını ve ϵ_0 ise havanın dielektrik sabitini ifade etmektedir. Kapasitör ifadesi x 'e bağlı olduğundan elektrostatik kuvvet ifadesi şu şekilde yazılabilir.

$$F_e = -\frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dx} \quad (2.8)$$

Gerekli türev işlemi yapıldıktan sonra, elektrostatik kuvvet şu hale dönüşür.

$$F_e = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2x^2} \quad (2.9)$$

Her iki kuvvet ifadesi bulunduktan sonra, (2.1) nolu denklemde yerlerine yazılırsa;

$$\frac{\epsilon_0 AV^2}{2x^2} = k\delta \quad (2.10)$$

$\delta = g - x$ eşitliği (2.10) nolu denklemde yerine yazılırsa;

$$\frac{\epsilon_0 AV^2}{2x^2} = k(g - x) \quad (2.11)$$

haline dönüşür. Bu noktadan sonra yapılması gereken, (2.11) nolu denklemden voltaj ifadesinin (V) eşitliğin bir tarafına alınmasıdır.

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 A} (x^2 g - x^3)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.12)$$

Voltaj ifadesi elde edildikten sonra, bulunacak iki önemli değer vardır. İlki, çökme noktası değeri diğeri ise çökme voltajı değeridir. Bir denklemin bağlı olduğu değişkene göre türevi alındıktan

sonra sifira eşitlenir ve denklem çözülürse; bulunan kökler denklemin azami veya asgari değer aldığı noktaları verir. Çünkü bu noktalarda denklemin grafiğindeki eğim sıfır olduğu için türevde sıfır olur. Bu sebeple (2.12) nolu denklemin x 'e göre türevi alınır ve sifira eşitlenirse; eşitlik şu hale gelir.

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 A}} \frac{1}{2} \frac{(2xg - 3x^2)}{(x^2g - x^3)^{\frac{1}{2}}} = 0 \quad (2.13)$$

(2.13) nolu ifadenin sıfır olabilmesi için tek koşul; aşağıdaki ifadenin sıfır olmasıdır.

$$(2xg - 3x^2) = 0 \quad (2.14)$$

İfade ikinci dereceden bir denklem olduğundan iki kökü vardır ve kökleri bulunursa;

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = \frac{2}{3}g$$

Deformasyon ifadesinin azami olabilmesi için, x_2 'nin doğru kök olduğu görülür çünkü voltaj değeri bu noktada en büyük değerini alır. Dolayısıyla doğru kök ikinci olandır [45].

$$x_{kritik} = \frac{2}{3}g \quad (2.15)$$

$\delta+x=g$ olduğundan dolayı, bu eşitlikten deformasyon miktarı (δ_{kritik}) çekilirse [45];

$$\delta_{kritik} = \frac{1}{3}g \quad (2.16)$$

elde edilir. (2.16) nolu ifade önemli bir eşitliktir. Çünkü eyleyicinin üst plakasının gelebileceği azami noktayı ($\delta_{çökme}$) ifade etmektedir. (2.16) nolu ifadenin (2.12) nolu eşitlikte yazılması, azami voltaj ($V_{çökme}$) değerini verir.

$$V_{çökme} = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 A} \left(\left(\frac{2}{3}g \right)^2 g - \left(\frac{2}{3}g \right)^3 \right)} \quad (2.17)$$

Bu denklem sadeleştirilirse; Lumped modelden elde edilen ilk matematiksel ifade elde edilmiş olur [45];

$$V_{çökme} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{kg^3}{\epsilon_0 A}} \quad (2.30)$$

Burada, k yay sabitini, g iki elektrot arasındaki başlangıç açıklığını, ϵ_0 havanın dielektrik sabitini ve A elektrotların yüzey alanını ifade etmektedir.

Lumped modelin literatüre sunulmasından sonra, çökme kararsızlığını hesaplamak için bugüne kadar birçok numerik, analitik ve deneysel çalışma ve formül çalışması yapılmıştır [95, 133-140]. Bu çalışmaların yanında, Osterberg-Senturia [120] deneysel ve benzetim verilerine dayanarak, bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı MEMS eyleyicilerin çökme limitlerini ve çökme voltajlarını bulmak için bir ifade elde etmişlerdir. Pamidighantam ve arkadaşları [95] Lumped modeli temel alarak bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı elektrostatik eyleyiciler için yeni bir formül geliştirmişlerdir. Bochobza-Degani ve Nemirovsky [133] elektrostatik eyleyicilerin parametrelerini belirlemek için Lumped modelden yola çıkarak analitik bir çözüm sunmuşlardır. O'Mahony ve arkadaşları [134] MEMS eyleyiciler için yaptıkları SEM tabanlı benzetimleri kullanarak, çökme kararsızlık noktasını ve voltajını hesaplamada genellikle göz ardı edilen bazı etkileri hesaba katan yeni bir formül sunulmuştur. Hu ve arkadaşları [135] bir ucu bağlı eyleyicilerin statik ve dinamik elektrostatik karakteristiklerini Floquet teorisini kullanarak analiz etmişlerdir. Chowdhury ve arkadaşları [136] bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı MEMS eyleyicilerin çökme voltajını hesaplamak için basit bir formül modeli geliştirdiler. Sadeghian ve arkadaşları [1] genelleştirilmiş türevsel kareleme metodunu (Generalized differential quadrature metod, GDQM) kullanarak, bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı elektrostatik eyleyicilerin MEMS anahtarlamadaki çökme voltajı davranışlarını incelemişlerdir.

Ballestra ve arkadaşları [137] eyleyicilerin statik davranışlarını kestirebilmek için deneysel tabanlı numerik bir yöntem geliştirmişlerdir. Chatterjee ve Pohit [50] çökme durumun gerçekleşmesinde doğrusal olmayan geometrik değişimlerin önemli bir rol oynadığını ve iki elektrot arasındaki başlangıç açıklığının geniş olduğu durumlar için yeni bir yöntem önermişlerdir. Sadeghian ve Rezazadeh [1], GDQM ve Galerkin Method (GM) arasında karşılaştırma yaparak, iki ucu bağlı eyleyiciler için çökme davranışlarını analiz etmişlerdir. Haluzan ve arkadaşları [138] SEM tabanlı ANSYS programını kullanarak, bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı eyleyiciler için çökme voltajı ve çökme durumunu bulmak için benzetimler yapmışlardır.

Daha yakınlarda, Joglekar ve Pawaskar [139], Ritz enerji tekniğini kullanarak, bir uçtan bağlı MEMS eyleyicilerin statik çökme parametrelerini tahmin için bir formül geliştirmişlerdir. Do ve arkadaşları [140], parçalı üst üste binme tekniğini kullanarak, bir ucu bağlı eyleyicilerin çökme voltajı ve çökme noktasını hesaplamak için genelleştirilmiş bir formül çıkarmışlardır.

Mikro eyleyicilerin boyut oranları ve üretildikleri malzemeler, özellikle mikro ve nano MEMS aygıtlarının tasarımında baskın bileşenlerdendir [141, 142]. Bu sebeple, eyleyici boyut oranlarının çökme voltajı ve çökme noktası üzerinde nasıl etki ettikleri ile ilgili çalışmalar literatürde yer bulmaktadır. Örneğin, çok yakınlarda Wang ve arkadaşları [143], iki ucu bağlı mikro eyleyiciler için GDQM metodunu kullanarak, boyut-bağılantılı bir hesaplama modeli sunmuşlardır. Yin ve arkadaşları [144] GDQM metodu ve modifiye edilmiş stres çifti teorisini kullanarak, mikro eyleyiciler için boyut-bağılantılı çalışmalar yapmışlardır. Rahaeifard ve arkadaşları [145] sonlu fark metodunu kullanarak, bir ucu bağlı mikro eyleyiciler için çökme ve statik çökme voltajı durumlarını incelemişlerdir. Baghani [146] modifiye edilmiş değişim iterasyonları metodu ve modifiye edilmiş stres çifti teorisini kullanarak, elektrostatik bir ucu bağlı mikro eyleyiciler için boyut-bağılantılı analitik bir çalışma yapmışlardır.

Bu tez çalışmasında amaç, bir uçtan bağlı ve iki uçtan bağlı MEMS eyleyicilerin çökme voltajını ve çökme noktasını hesaplamak için, daha hassas, kolay ve hızlı sonuçlar veren matematiksel ve numerik modeller geliştirmektir. Bu amaca yönelik olarak, sonlu eleman metodu (SEM) kullanan ANSYS ve COMSOL programları sayesinde çeşitli eyleyicilerin benzetimleri yapılmış, benzetim sonuçlarına göre MATLAB™ programı kullanılarak uygun analitik ve empirik modeller geliştirilmiş ve sonunda bu modeller, daha iyi sonuçları verecek şekilde yapay zeka teknikleriyle optimize edilmiştir. Daha sonra yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak iki ucu bağlı eyleyiciler için yeni bir YSA modeli oluşturulmuştur. Böylece girilen eyleyici parametreleri kullanılarak çökme voltajını hesaplayan bir YSA meydana getirilmiştir. En nihayetinde, empirik olarak ve optimizasyon işlemi neticesinde elde edilen matematiksel ifadeler ile YSA modeli, literatürde daha önce sunulmuş hem hesaplama yöntemleriyle, hem de benzetim ve gerçek ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve doğrulamaları yapılmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Sonlu Elemanlar Metodu

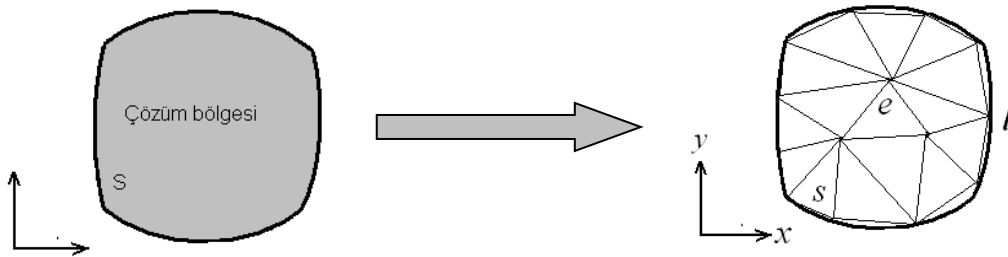
Sonlu elemanlar metodu (SEM) mühendislik problemlerine etkin çözüm sağlayan ve birçok yazılım (ANSYS ve COMSOL vs.) tarafından kullanılan sayısal bir tekniktir. Köprü, uçak ve gemi gibi karmaşık hesaplamalar gerektiren birçok yapının maruz kaldığı etki (basınç, ağırlık, sıcaklık vb.) sonucu oluşan stres, uzama, bükülme, genişleme gibi değişimlerin hesabı için SEM sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanında MEMS'teki problemlerin çözümünde de yaygın olarak kullanılmaktadır. SEM, bir sistemin potansiyel enerjisi gibi bir fonksiyonelin yaklaşık bir minimizasyonudur. Örneğin; elektrostatik alan analizinde minimize edilecek fonksiyonel sınırlı bir hacim içindeki elektrostatik enerjidir [147]. Burada W enerji, E elektrostatik kuvveti, v sınırlı hacmi, V voltajı ve x, y, z sırasıyla boyutları ifade edecek şekilde; elektrostatik potansiyel aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$W = \frac{1}{2} \oint_v \epsilon E^2 dv \quad (3.1)$$

İfade edilen elektrostatik potansiyeli,

$$W = \frac{1}{2} \epsilon \oint_v \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] dv \quad (3.2)$$

gibi yazılabilir.



Şekil 3.1. Belli bir yüzeyin SEM için ağırlara ayrılması

Şekil 3.1.'de görülen sınırlı S yüzeyi için iki boyutlu bir duruma ait, aşağıdaki fonksiyoneli dikkate alalım.

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \oint_S \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] ds \quad (3.3)$$

SEM'in uygulandığı sistemdeki enerji varyasyonu sınırlı S bölgesi içinde, küçük değişimlerine göre önemsiz olduğundan enerji fonksiyoneli minimize edilir. Bundan dolayı S bölgesi içindeki potansiyel, aşağıdaki gibi enerjideki diferansiyel değişim sıfıra eşitlenerek bulunur.

$$dW = 0 \quad (3.4)$$

Sonlu eleman analizinde ilgili bölge, Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi eleman olarak bilinen n sayıda üçgen (veya dörtgen) ağ elemanlarına bölünür. Eğer potansiyelin bilinmediği m nod varsa; eşitliğimiz şu hale dönüşür.

$$dW = \frac{\partial W}{\partial V_1} dV_1 + \frac{\partial W}{\partial V_2} dV_2 + \dots + \frac{\partial W}{\partial V_m} dV_m = 0 \quad (3.5)$$

Burada, V_1, V_2, \dots, V_m sırasıyla $1, 2, \dots, m$ nodlarındaki potansiyellerdir. Bu eşitliğin sağlanması için dV elemanları sıfır olamayacağından; $\frac{\partial W}{\partial V}$ elemanları enerji fonksiyonelinin minimizasyonu için sıfır olmalıdır.

Buna göre;

$$\frac{\partial W}{\partial V} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W}{\partial V_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial W}{\partial V_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.6)$$

olur.

Ayrıca e 'nci elemanın içindeki elektrik enerjisi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \varepsilon \int_{s^{(e)}} \left[\left(\frac{\partial V^{(e)}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V^{(e)}}{\partial y} \right)^2 \right] ds^{(e)} \quad (3.7)$$

Sonuç olarak bölgenin tamamındaki toplam enerji;

$$W = W^{(1)} + W^{(2)} + \dots + W^{(n)} = \sum_{e=1}^n W^{(e)} \quad (3.8)$$

veya;

$$W = \sum_{e=1}^n \frac{1}{2} \varepsilon \int_{s^{(e)}} f_e^T f_e ds^{(e)} \quad (3.9)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada;

$$f_e = \begin{bmatrix} \frac{\partial W^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial W^{(e)}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

dir. "e" elemanı içindeki potansiyel dağılım için;

$$L_1^{(e)}(x, y), L_2^{(e)}(x, y), \text{ ve } L_3^{(e)}(x, y)$$

biçim fonksiyonları ve $V_1^{(e)}, V_2^{(e)}, V_3^{(e)}$ nod potansiyelleri ile yaklaşık çözümü;

$$V^{(e)}(x, y) = L_1^{(e)}(x, y)V_1^{(e)} + L_2^{(e)}(x, y)V_2^{(e)} + L_3^{(e)}(x, y)V_3^{(e)} \quad (3.11)$$

olarak varsayalım; iki boyutlu geometri için biçim fonksiyonları;

$$L_i^{(e)}(x, y) = \frac{A_i^{(e)}}{A^{(e)}} \quad i = 1, 2 \text{ ve } 3 \quad (3.12)$$

ile tanımlanır.

Burada $A^{(e)}$ elemanın alanı, $A_i^{(e)}$ ise "e" elemanındaki bir kısmın alanıdır.

$$A_i^{(e)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_{i+1} & y_{i+1} \\ 1 & x_{i+2} & y_{i+2} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2 \text{ ve } 3 \quad (3.13)$$

den hesaplanabilir.

$\frac{\partial V^{(e)}}{\partial x}$ ve $\frac{\partial V^{(e)}}{\partial y}$ aşağıdaki gibi değerlendirilerek hesaplanabilir.

$$\frac{\partial V^{(e)}}{\partial x} = \frac{\partial L_1(x, y)}{\partial x} V_1 + \frac{\partial L_2(x, y)}{\partial x} V_2 + \frac{\partial L_3(x, y)}{\partial x} V_3 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial V^{(e)}}{\partial y} = \frac{\partial L_1(x, y)}{\partial y} V_1 + \frac{\partial L_2(x, y)}{\partial y} V_2 + \frac{\partial L_3(x, y)}{\partial y} V_3$$

f_e aşağıdaki gibi yeniden oluşturulabilir.

$$f_e = T^{(e)} V^{(e)} \quad (3.15)$$

Burada;

$$T^{(e)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1^{(e)}(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial L_2^{(e)}(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial L_3^{(e)}(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial L_1^{(e)}(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial L_2^{(e)}(x, y)}{\partial y} & \frac{\partial L_3^{(e)}(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$V^{(e)} = \begin{bmatrix} V_1^{(e)} \\ V_2^{(e)} \\ V_3^{(e)} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak;

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \int_{s^{(e)}} V^{(e)T} T^{(e)T} T^{(e)} V^{(e)} ds^{(e)} \quad (3.18)$$

olarak düzenlenebilir. Nod potansiyellerine göre W 'nin kısmi türevleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{dW}{dV} = \sum_{e=1}^n \varepsilon \int_{s^{(e)}} T^{(e)T} T^{(e)} V^{(e)} ds^{(e)} \quad (3.19)$$

kullanılarak;

$$\sum_{e=1}^n \varepsilon \int_{s^{(e)}} T^{(e)T} T^{(e)} V^{(e)} ds^{(e)} = 0 \quad (3.20)$$

elde edilir ki; buradan nod potansiyelleri belirlenmiş ve problem çözümlenmiş olur.

3.2. ANSYS Benzetim Programı

ANSYS yazılımı, bir yapının uygulanan fiziksel etki altında nasıl davrandığını simüle etmekte kullanılan genel amaçlı bir sonlu elemanlar metodu (SEM) yazılımıdır [148]. Söz konusu benzetimler, elektromanyetik alanlar, ısı transferi akışkanlar mekaniği, dayanıklılık ve titreşim gibi birçok alanı kapsamaktadır. Yapılan 2 veya 3 boyutlu benzetimler sayesinde, ürünlerin henüz ilk örnekleri üretilmeden bilgisayar ortamında test edilmelerine olanak sağlamaktadır. Bu sayede, eğer varsa yapıların zayıf noktalarının tespit edilmesi, iyileştirilmesi, ömür hesaplarının yapılması ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır. Modüler yapısı sayesinde ANSYS yazılımı sadece gerekli özelliklerin alınmasına fırsat vererek, sonradan da ilave edilebilen SEM modülleri ile masa üstünde kullanılan diğer mühendislik yazılımları ile bütünleşmiş bir şekilde çalışabilmektedir.

ANSYS yazılımı hem oluşturulmuş geometrik şekil datalarını dışarıdan alabilmekte hem de içindeki işlem alanı ile kendi içinde geometrik şekiller oluşturulmasına imkan vermektedir. Yine aynı işlem alanı içinde hesaplama için gerekli olan haritalama modeli yani ağlar da oluşturulmaktadır. Fiziksel etkilerin tanımlanmasından sonra gerçekleştirilen analiz neticesinde sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilmektedir. ANSYS yazılımı ile özellikle algoritmalarının çeşitliliği, zamana bağımlı fiziksel etki özellikleri ve doğrusal olmayan malzeme modelleri sayesinde yüksek seviyedeki analizler hızlı, güvenilir ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. ANSYS yazılımı fiziğin çok çeşitli disiplinlerinde benzetim imkanı verdiği için aşağıdaki uygulama alanlarında da sıklıkla kullanılır [148]. Örneğin, savunma sanayi, elektronik sanayi, biyomedikal makine ve uygulamalar, genel makina sanayi, inşaat mühendisliği, otomotiv sanayi, ulaştırma sanayi, inşaat, kimya ve çevre sanayi, uzay ve havacılık sanayi gibi birçok kullanım alanı mevcuttur.

3.2.1. ANSYS Programında Benzetim Oluşturma

ANSYS yazılımında bir problemin SEM ile modellenmesi, çözümlenmesi ve çözüm sonuçlarının analiz edilmesi, paket programlarda üç ayrı modülde gerçekleştirilmektedir. Analizde modele sınır şartlarının uygulanmasına kadar olan işlemler programın ön işlemci modülünde, modelin çözümlenmesi çözümleyici modülünde ve ek hesaplamalar ile sonuçların sayısal veya görsel değerlendirilmesi ise son işlemci modülünde gerçekleştirilmektedir. ANSYS klasik ara yüz programında bir problemi çözmek için, kabaca aşağıdaki işlemlerin sırasıyla yapılması gerekmektedir;

1. Öncelikle kullanılan materyalin ve ortam özelliklerinin girilmesi gerekir. Materyalin kullanıldığı ortamın da özellikleri önemlidir. Çünkü kullanılan materyal ortama göre farklı tepkiler verebilmektedir.
2. Çözülecek problemin, geometrik modelinin oluşturulması gerekir. ANSYS programında bir modelin geometrisini oluşturmak için çeşitli seçenekler mevcuttur. Bunlar;
 - i) Üç boyutlu koordinat sistemine göre (x,y,z) noktaların (key point) tanımlanması gerekir ve noktalar kullanılarak istenen geometri oluşturulabilir.
 - ii) Bir çizginin oluşması için gereken iki adet noktanın üç boyutlu koordinat sistemine göre $(x_1,y_1,z_1; x_2,y_2,z_2)$ konum bilgisinin girilmesi gerekir, daha sonra oluşturulan çizgiler kullanılarak istenen geometri oluşturulabilir.
 - iii) Bir alanın oluşması için gereken dört adet noktanın, üç boyutlu koordinat sistemine göre $(x_1,y_1,z_1; x_2,y_2,z_2; x_3,y_3,z_3; x_4,y_4,z_4)$ konum bilgisinin girilmesi gerekir, daha sonra oluşturulan alanlar kullanılarak istenen geometri oluşturulabilir.
 - iv) Bir hacmin oluşması için gereken sekiz adet noktanın, üç boyutlu koordinat sistemine göre $(x_1,y_1,z_1; x_2,y_2,z_2; x_3,y_3,z_3; x_4,y_4,z_4; x_5,y_5,z_5; x_6,y_6,z_6; x_7,y_7,z_7; x_8,y_8,z_8)$ konum bilgisinin girilmesi gerekir, daha sonra oluşturulan hacimler kullanılarak istenen geometri oluşturulabilir.
3. İstenen geometriyi oluşturmak için gerekli işlemlerin yapılması gerekir. Örneğin, geometriyi oluşturmak için alanlar kullanılmışsa; bu alanlar üzerinde gerekli işlemler yapılmalıdır (alanların birbirine eklenmesi, birbirinden çıkarılması, yan yana yapıştirilmesi vs.).
4. Uygulanacak etkinin hangi yönde ve nereye uygulanacağını tanımlanması ve etkinin büyüklüğünün ($V=10$ volt gibi) girilmesi gerekir.
5. Geometri için ağ yapılarının oluşturulması gerekir. Çünkü ANSYS programı, problemin benzetimini oluşturmak için SEM kullanır. ANSYS'te ağ yapılarının oluşturulması için çeşitli metotlar vardır. Ağ yapıları isteğe bağlı olarak otomatik oluşturulabilir.
6. Problem için geometrinin sınır koşullarının girilmesi gerekir. Sınır koşulları, geometrinin hangi noktalarda veya hangi doğrultularda hareket edemeyeceğini belirler.
7. Son adım olarak problemin çözümü için gerekli işlemlerin yapılması ve çözümün tekrarlanma (iterasyon) sayısının girilmesi gerekir.

3.2.1.1. Eleman Tipinin Belirlenmesi

Eleman tipi olarak 2 boyutlu sekiz düğüm noktalı eş parametrik dörtgen eleman olan Plane 82 kullanılmıştır. Eş parametrik terimi sonlu elemanın geometrisini ve eleman içinde

bilinmeyen değerleri (genlik) tanımlayan fonksiyonların aynı olduğunu ifade eder. Bu tip elemanlar hesaplama etkinliği nedeniyle sonlu eleman programlarında tercih edilir. Plane 82 elemanı fiziksel koordinatlarda eğri kenarlı genel dörtgen formunu aldığından eğri yüzeylerin modellenmesinde doğruluk derecesi daha yüksek neticeler vermektedir.

3.2.1.2. Problem Geometrisinin Belirlenmesi

Problemin geometrisinin oluşturulmasında, üç boyutlu koordinat sistemine göre dört adet nokta (key point) $(x_1, y_1, z_1 \ x_2, y_2, z_2 \ x_3, y_3, z_3 \ x_4, y_4, z_4)$ ile oluşturulmuş alanlar kullanılmıştır. Eyleyicinin her bir elektrotu bir alanı ifade eder. Böylece, eyleyicinin geometrisi, doğrudan alanlar kullanılarak kolayca oluşturulmuş olur (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Alanlar kullanılarak oluşturulmuş eyleyici görünümü

Eyleyicinin geometrisi oluşturulduktan sonra, eyleyicinin içerisinde bulunduğu hava (vakum) ortamının programda oluşturulması gerekir (Şekil 3.3.). Çünkü eyleyicinin bulunduğu ortamın eyleyicinin hareketi üzerinde etkisi vardır.



Şekil 3.3. Eyleyicinin bulunduğu hava (vakum) ortamının modellenmesi

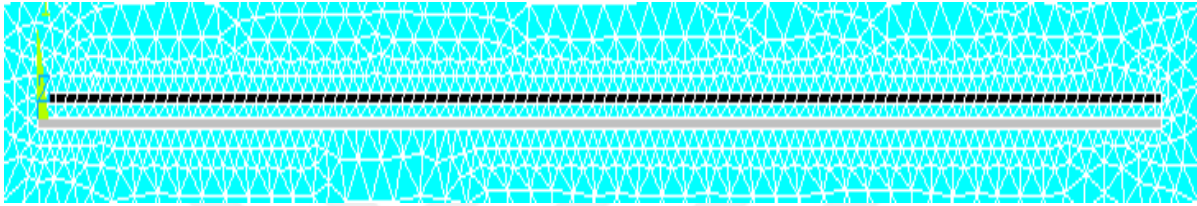
3.2.1.3. Problem Geometrisine Uygulanacak Etkinin Belirlenmesi

Problemin geometrisi ve bulunduğu dış ortam oluşturulduktan sonra geometriye etki edecek etkiyi (basınç, ağırlık, sıcaklık vb.) tanımlamak gerekmektedir. Bu etki elektrostatik mikro eyleyici için potansiyel farkıdır. Voltaj iki elektrot arasına uygulanmakta ve her iki elektrotu bir birine doğru çekmektedir. Alt elektrot tümüyle zemine sabitlendiği için hiç bir noktada hareket etmeyecek fakat üst elektrot sabitlendiği noktalar dışında diğer elektrota doğru hareket

edecektir. Uygulanan voltaj ve her iki elektrotun da iletken olmasından ötürü, elektrotların birbirini gören yüzeyleri boyunca bir elektrostatik kuvvet oluşturacaktır.

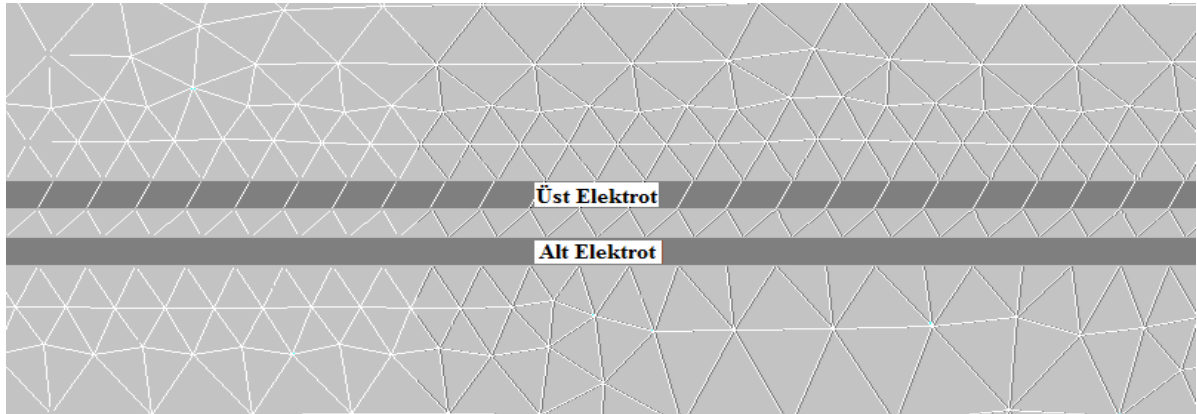
3.2.1.4. Problem Geometrisi İçin Ağ Yapısının Oluşturulması

Sonlu eleman metodunun eyleyici modeline uygulanması için Şekil 3.4.'deki gibi geometri üzerinde ağ yapılarının oluşturulması gerekir. ANSYS'te bu ağ yapıları üçgen veya dörtgen olabilir. Ağ yapıları, en fazla etkiye maruz kalan yerlerde daha yoğun oluşturulur. Bunun sebebi daha yoğun etkiye maruz kalan bölgelerin daha hassas analiz edilmelerini sağlamaktır.



Şekil 3.4. Model için oluşturulmuş ağ yapısının görünümü

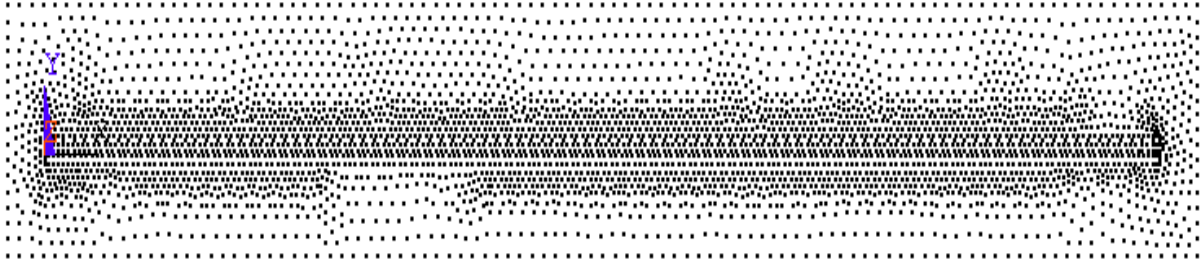
Problemin geometrisi üzerinde ne kadar çok ağ yapısı oluşturulursa çözüm o kadar hassas olur. Fakat ağ yapılarının çok fazla olması aynı zamanda çözümün zorlaşmasına ve uzamasına sebep olur. Problemin geometrisi üzerinde, daha fazla etkiye maruz kalacak bölgelerde (genellikle bağlantı veya uç noktalar), diğer bölgelere göre daha fazla ağ oluşturmak en iyi çözüm olacaktır. Ağ yapılarının nasıl oluşturulduğunu daha iyi anlamak için Şekil 3.5.'e bakmak faydalı olur.



Şekil 3.5. Ağ yapısının yakından görünümü

Şekil 3.5.'den de görüldüğü gibi üst ve alt elektrotun çevresinde diğer noktalara göre daha sık ağ oluşturulmuştur. Bunun sebebi eyleyici geometrisi üzerinde bu bölgelerin diğer bölgelere göre çözüm üzerinde daha fazla etkili olmasıdır. Alt elektrotun tümüyle alt zemine sabitlenmiş olması

ve bunun sonucunda alt elektrotun hiç hareket etmemesi sebebiyle, alt elektrot üzerinde ağ yapıları oluşturulmamıştır. Ağ yapıları oluşturulduktan sonra çözümün yapılabilmesi için bu üçgen ağların birleştiği noktaların (nod) oluşturulması gerekir. Ağ yapıları elektrotların çevrelerindeki bölgelerde daha yoğun olduğu için, noktalar bu bölgelerde daha yoğun olmuştur (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Ağ yapılarının nokta (nod) olarak gösterimi

3.2.1.5. Problem Geometrisi İçin Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Eyleyiciye uygulanan etki belirlendikten sonra, bu etkiye maruz kalan geometrinin hangi noktalarda veya hangi yöne hareket edemeyeceğini yani sınır koşullarını belirlemek gerekir. Problemin çözümünde doğru sonuçlar elde etmek için, sınır koşullarının mutlaka programa girilmesi gerekir. Eyleyicinin gerçek modelinde üst elektrot, sol uç noktada bir yalıtkan aracılığıyla alt elektroda sabitlendiğinden dolayı bu nokta hiç bir yönde hareket edememektedir. Bu hareket kısıtlamasını eyleyici geometrisine uygulamak için, programda sınır koşulları oluşturulmuş ve benzetim 2 boyutlu yapıldığından dolayı, üst elektrotun UX ve UY yönlerinde hareket etmesi engellenmiştir (Şekil 3.7.). Sınır koşulları belirtildikten sonra, çözümün tamamlanabilmesi için son olarak elektrotların yapıldığı maddenin elastikiyet sabiti (Young's modulus, E), uzama oranının (Poisson's ratio, ν) ve çözümün tekrarlanma (iterasyon) sayısının girilmesi gerekir. Tüm bu işlemler yapıldıktan sonra problem çözüme hazırdır.



Şekil 3.7. Sınır koşullarının problem geometrisine uygulanması

3.3. COMSOL Benzetim Programı

COMSOL elektrik, mekanik, sıvıların akışı ve kimyasal uygulamalar için geliştirilmiş olan ve fizik tabanlı problemlerin numerik metotlarla (SEM vb.) modellenmesi ve simüle edilmesi için kullanılan genel amaçlı yazılımdır [149]. COMSOL ile çoklu fizik ve girişim problemleri de hesaplanabilmektedir. 30'dan fazla ekleme ürünü ile ihtiyaç duyulan konuların araç kutularını temin ederek; elektrik, mekanik, sıvıların akışı ve kimyasal uygulamalar için kolaylıkla kullanılabilir. Ayrıca birçok teknik çizim, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve ECAD yazılımıyla birlikte çalışabilmekte ve gerekli çizim veya taslaklar dışarıdan dahil edilebilmekte ya da dışarı aktarılabilir. COMSOL Sonlu Eleman Analizi (SEA) tabanlı bir yazılım olup, esnek ve kullanıma hazır COMSOL Desktop® ara yüzü sayesinde istenen birçok ürünün sanal olarak modellenmesi için kullanılabilir. COMSOL sayesinde istenen matematiksel ifade veya koşullar, örneğin; malzeme özellikleri, sınır koşulları, kaynaklar, topraklama noktaları veya parçalı diferansiyel denklemleri belirleyerek problem bu temelde çözümlenebilir. Ayrıca, girilen denklemlere veya modele göre yeni fizik ara yüzleri de oluşturulabilir. Kullanıcı bu ara yüzleri, sadece probleme özgü basitleştirebilir ve sadece kullanacağı şekilde özelleştirebilir.

3.3.1. Mikro Elektromekanik Sistemlerin Benzetimi

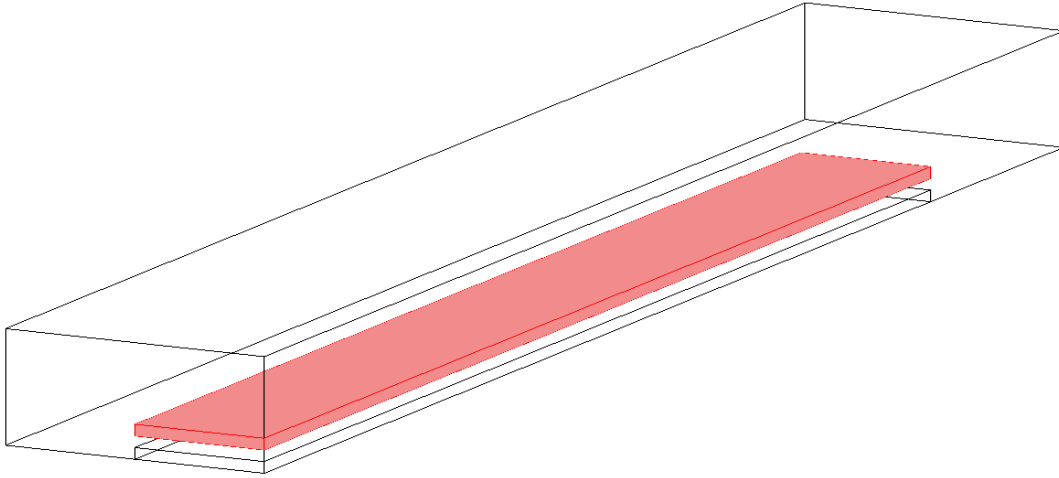
Mikro elektromekanik sistemlerin tasarım ve modellenmesi çok özel bir mühendislik disiplini. MEMS cihazlar, çok küçük boyutlara sahip, mikro yansıtıcılar, mikro jiroskoplar, mikro ivmeölçerler ve mikro eyleyiciler gibi birçok fiziksel olguya göre çalışan aygıtlardır. Yani, ideal bir sanal gerçekleştirme olanağı sağlayan COMSOL sayesinde birçok MEMS aygıtı için benzetim yapılabilir. Sahip olduğu MEMS modülünün içindeki önceden tanımlı birçok ara yüz modelleme aracı sayesinde, çeşitli kuplajlı fizik modelleri, elektromanyetik-yapı, ısı-yapı veya sıvı-yapı problemleri çözümlenebilir. Modellemede birçok etkiyi incelenebilir. Örneğin; katı baskı-malzeme için ince-film gaz etkisi, izotropik olmayan kayıp-faktörü, çapa etkisi ve termo-elastik etki gibi. Ayrıca, elastik titreşim ve dalgalar için, mükemmel uyumlu katmanlar oluşturulabilir. Bununla birlikte, MEMS modülü ile kalıcı veya geçici durum analizleri de yapılabilir. Örneğin, tam-bağlanmış eigen-frekansı, parametrik, yarı-statik ve frekans cevabı analizleri gibi. Ayrıca, Lumped modeli temel alınarak, paralel plakaların kapasitans değeri, empedansı, giriş direnci ölçülebilir ve SPICE Netlists arayüzü sayesinde harici elektrik devrelerine, devre elemanı olarak bağlayarak incelenebilir. MEMS kütüphanesinde, birçok mikro aygıt modeli hazır bulunmakta ve kullanıcıya öğrenme aşamasında yararlı olması için sunulmaktadır. Bu sayede, karmaşık mikro elektromekanik modellerin nasıl oluşturulabileceği görülmüş olur. Ayrıca, oluşturulacak model

hazır bulunanlarla benzerlik taşıyorsa, kullanıcıya çok büyük bir kolaylık ve zaman avantajı da sağlamış olur.

MEMS Modül kütüphanesinde bölümler aşağıdaki gibi ayrılmıştır.

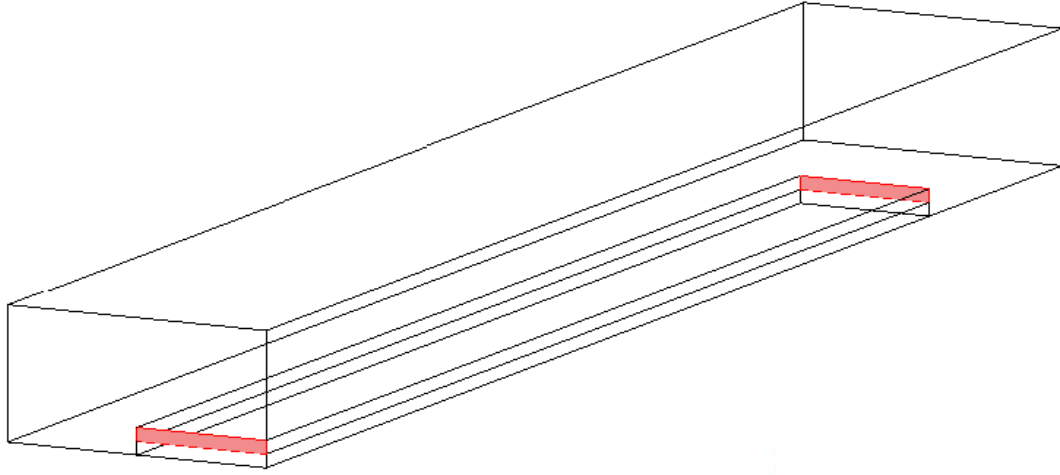
- Eyleyici modelleri
- Sensör modelleri
- Mikro akışkan modelleri
- Piezoelektrik modelleri

Bir MEMS aygıtını modellemek için öncelikle model ara yüzünden, istenen eyleyici ve çözüm türüne göre model oluşturmanız gerekir. Sonrasında, aygıtın geometrisini oluşturmak gerekir. Bunun için ya direk olarak COMSOL modelleme aracı kullanılabilir veya başka bir CAD yazılımından model içe aktarılabilir. Şekil 3.8.'de COMSOL geometri oluşturma ara yüzünde 3B olarak oluşturulmuş bir eyleyici modeli görülmektedir. Eğer dışarıdan model aktarılacak ise, ya mekanik CAD model kullanılmalı ya da CAD için tasarlanmış LiveLink™ araçlarından biri tercih edilmelidir. Aynı şekilde, ECAD modül sayesinde elektronik plan da içe aktarılabilir.



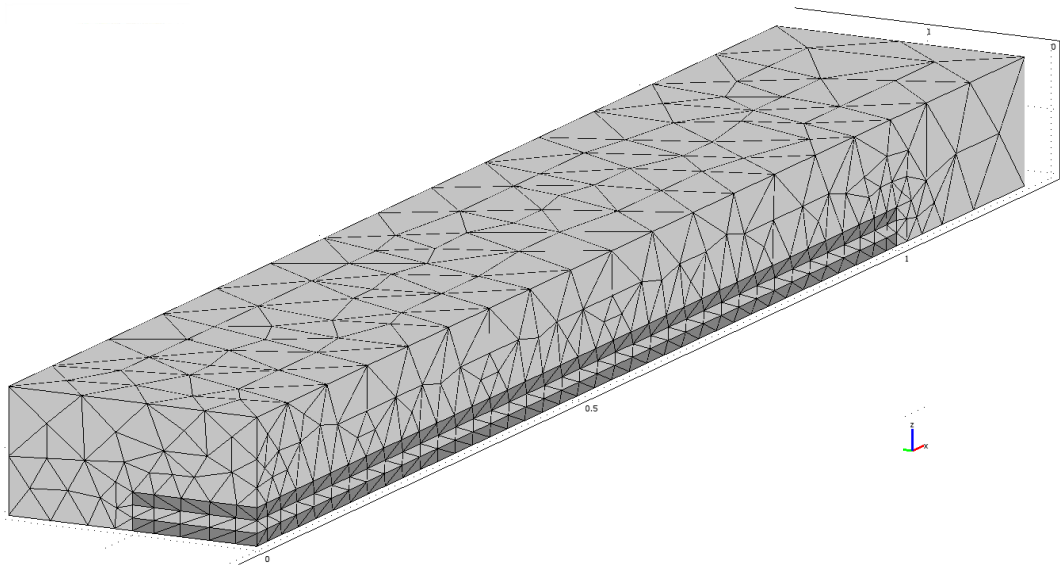
Şekil 3.8. COMSOL 3B olarak oluşturulan geometri

Geometrik model oluşturulduktan sonra, sıradaki adım uygun malzeme özelliklerini ve uygun fizik ara yüzünü seçmektir. Başlangıç koşulları bu fizik ara yüzünde tanımlanmalıdır. Şekil 3.9.'da iki ucu bağlı bir eyleyicinin fizik ara yüzünde başlangıç koşulu olarak iki uçtan sabitlenmesi görülmektedir. Eğer bir ucu bağlı bir eyleyici tasarlamak istenirse, sınır koşulu olarak sadece bir uçtan sabitlenmesi seçilmelidir.



Şekil 3.9. İki ucu bağlı eyleyicinin başlangıç koşulları

Sıradaki adım haritalandırma ve çözüm yolunu seçmektir. Şekil 3.10. COMSOL geometri haritalandırma özelliğiyle bir MEMS eyleyicinin haritalanmış halini göstermektedir. Tüm bu aşamalar, COMSOL Desktop® içinde ulaşılabilir ve yapılabilir durumdadır. Çözüm yöntemi, çalışılan ara yüz için otomatik olarak ayarlanır ancak yetkin kullanıcılar çözümleme yöntemlerinde değişiklik yapabilirler. Ayrıca diğer birçok programla ilinti kurularak, model için Microsoft® Excel® programından veri alımı yapılabilir. LiveLink™ ara yüzü Excel® içinde benzetim yürütebilmenize ve oradan veri veya malzeme parametreleri alış-verişine olanak vermektedir. Eğer bir komut dosyası vasıtasıyla çalışma seçilirse, MATLAB® ile bütünleşmiş çalışarak ortak benzetimler yürütülebilir ve COMSOL'dan MATLAB'a sonuçlar aktarılabilir.



Şekil 3.10. İki ucu bağlı eyleyicinin haritalanmış gösterimi

3.4. MATLAB™ Programı

MATLAB yazılımı programlama, hesaplama ve problem çözümlerinin görüntülemesinde teknik hesaplamalar yapabilen yüksek seviyeli bir dildir. Çeşitli kullanım alanları şunlardır.

- Matematik ve teknik hesaplama
- Algoritma ve program geliştirimi
- Veri sağlama
- Modelleme, benzetim, ve prototiplendirme
- Veri analizi ve görüntüleme
- Bilimsel ve mühendisliksel grafikler
- Grafikselle kullanıcı arabirimi oluşturmayı da içeren uygulama geliştirimi

MATLAB, temel veri elemanı, boyutlandırmaya gerek duymayan, dizi olan bir interaktif yazılımdır. Bu, birçok teknik hesaplama problemlerini, özellikle matris ve vektör formülasyonlu olanları çok hızlı bir şekilde çözmeyi sağlar.

MATLAB, birçok kullanıcının katkısıyla zamanla çok gelişmiştir. Bilim araştırmalarında, matematik, mühendislik ve bilimdeki temel ve ileri dersler için standart bir eğitimsel araçtır. MATLAB, araç kutuları olarak adlandırılan eklenebilir uygulama ve özel çözümler ailesi özelliğine sahiptir. MATLAB kullanıcılarının birçoğu için çok önemli olan araç kutuları, özel teknolojiyi öğrenme ve uygulamaya olanak tanır. Araç kutuları, MATLAB ortamını, hususi problem sınıflarını çözmek için genişleten MATLAB fonksiyonlarının (m-dosyaları) kapsamlı koleksiyonlarıdır. Sinyal işleme, kontrol sistemleri, sinir ağları, bulanık mantık, dalgacıklar, benzetim ve birçok başka alanlarda araç kutuları mevcuttur.

3.5. Yapay Zeka Optimizasyon Teknikleri

Parametre sayısının çok olduğu ve sonuçların analitik olarak bulunamadığı birçok mühendislik probleminin çözümünde klasik çözüm teknikleri yetersiz kalmaktadır [150]. Günümüzde yapay zeka optimizasyon tekniklerinin karmaşık problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Teknolojide yaşanan büyük gelişim neticesinde, sayısal modellemeler ve çözümler için bilgisayar kullanımı oldukça artmıştır. Yapay zeka optimizasyon tekniklerinin kullanımındaki amaç maliyet ve zamandan tasarruf sağlayarak en uygun çözüme ulaşmaktır. Geliştirilen teknikler doğrultusunda doğru analiz yapabilme ve pratik karar verme gibi insana özgü olan özellikleri kullanarak karar veren veya tavsiyelerde bulunan sistemlerin

geliştirilmesi ile daha hızlı ve gerçekçi çözümler elde edilmektedir. Birçok uygulama alanında karşılaşılan problemler, doğrusal veya doğrusal olmayan optimizasyon problemi olarak modellenebilmektedir. Uygulamalardaki problemlerin büyük bir bölümü doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Doğrusal olmayan problemlerin çözümüne yönelik olarak geliştirilmiş birçok teknik söz konusudur. Özellikle değişken sayısına ve veri tiplerine bağlı olarak problemlerin zorluk dereceleri de artabilmektedir. Bu tip problemlerin analitik yöntemlerle çözümü, hem problemin yapısına bağlı olarak modellemede hem de çözüm sürecinde zorluklar içermektedir. Bunun sonucunda, ya istenen sonuca hiç ulaşamamakta ya da kabul edilebilir süreler içinde olmamaktadır. Bunların üstesinden gelebilmek için sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Özellikle popülasyon temelli sezgiseller çok noktalı arama prosedürleri sayesinde, hızlı bir şekilde sonuç verebilmektedirler. Bunlardan bazıları parçacık sürü optimizasyonu, genetik algoritma, diferansiyel gelişim algoritması, bulanık mantık, karınca kolonisi algoritması, benzetilmiş tavlama ve arı kolonisi algoritmalarıdır. Uygulama sonuçları göstermektedir ki yapay zeka optimizasyon algoritmaları probleme bağımlı algoritmalarıdır. Yani bir problemde başarılı olurken diğer bir problem için aynı şekilde başarılı olmayabilirler.

3.5.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Sezgisel yöntemlerden biri olan PSO tekniği ilk olarak kuş ve balık sürülerinin hareketlerinden esinlenerek doğrusal olmayan sayısal problemlere en iyi sonuçları bulmak için ortaya atılmıştır [151]. PSO popülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemi olup çok parametrelili ve çok değişkenli optimizasyon problemlerine çözümler üretmek için kullanılmaktadır. Parçacık sürü kavramı basitleştirilmiş sosyal sistemin bir benzetimi olarak ortaya çıkmıştır. Başlangıçtaki amaç, kuş ya da balık sürü koreografisinin grafiksel olarak benzetimlerini yapmaktır. Ancak grafiksel benzetimden sonra, parçacık sürü modelinin bir optimizasyon yöntemi olarak kullanılabilmesi keşfedilmiştir. Kuş toplulukları gerçek yiyecek kaynağını bilmemelerine rağmen, yiyecek kaynağından ne kadar uzakta olduklarını öğrenmeye çalışırlar. Öğrenmek için izlenen yöntem yiyecek kaynağına en yakın olan kuşu izlemektir. PSO'da her bir kuş parçacık olarak, kuş topluluğu da sürü olarak temsil edilir. Parçacık hareket ettiğinde, kendi koordinatlarının uygunluk değeri yani yiyeceğe ne kadar uzaklıkta olduğu hesaplanır. Bir parçacık, koordinatlarını, hızını yani çözüm uzayındaki her boyutta ne kadar hızla ilerlediği bilgisini, şimdiye kadar elde ettiği en iyi uygunluk değerini ve bu değeri elde ettiği koordinatları hatırlamalıdır. Çözüm uzayında her boyuttaki hızının ve yönünün her seferinde nasıl değişeceği, komşularının en iyi koordinatları ve kendi kişisel en iyi koordinatlarının birleşiminden elde edilecektir.

3.5.2. Genetik Algoritma (GA)

Şu ana kadar geliştirilmiş en popüler optimizasyon tekniklerindedir. Kromozom olarak adlandırılan alternatif çözümler setine dayalı olarak çalışan bu algorithmada genellikle ikili kodlama kullanılmakta, değişkenler ikili sistemde temsil edilmektedir. İkili kodlamayla çalışan GA'lar gezgin satıcı benzeri problemlerde oldukça etkili olarak çalışmaktadır. Bununla birlikte, uygulamada gerçek değer parametrelili birçok bilimsel ve mühendislik problemiyle karşılaşmaktadır. Gerçek parametrelili problemlerin ikili kodlamalı standart genetik algoritmalarla çözümünde birtakım güçlükler söz konusudur. Sayısal parametrelerin söz konusu olduğu problemlerde, ikili tamsayılarla çalışan klasik genetik algoritmalar geniş dinamik sahayı tam olarak temsil edememekte, performansı yetersiz kalmaktadır. Bu güçlüklerin üstesinden gelebilmek için ikili klasik GA'da birtakım değişiklikler yapılmıştır. Bunun yanında, gerçek parametrelili problemlere yönelik olarak yeni GA'lar geliştirilmiştir.

3.5.3. Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA)

Popülasyon tabanlı sezgisel bir algoritma olan DGA özellikle tamamen düzenlenmiş uzayda tanımlı ve gerçek değerli tasarım parametrelerini içeren fonksiyonları optimize etmek amacıyla kullanılan bir algoritmadır. Geliştirildiğinden bu yana konuyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Farklı problemlere yönelik, farklı yapılar ve farklı parametrelerle çalışan birçok DGA geliştirilmiştir. Temel olarak GA'ya dayanmaktadır. Popülasyon tabanlıdır. Aynı anda birçok noktada araştırma yapmaktadır. İterasyonlar boyunca, operatörler yardımıyla problemin çözümü için daha iyi sonuçlar araştırılmaktadır. Klasik ikili GA'dan farklı olarak değişkenler gerçek değerleriyle temsil edilmektedir. GA'da da gerçek değerlerle kodlama kullanılmaktadır. Ancak genetik operatörlerdeki birtakım değişikliklerle, gerçek değerlerle kodlamanın kullanıldığı problemlerin çözüm performansı arttırılmaya çalışılmıştır. GA'daki çaprazlama, mutasyon ve seçim operatörleri DGA'da da kullanılmaktadır. Farklı olarak her bir operatör tüm popülasyona sırayla uygulanmamaktadır. Kromozomlar tek tek ele alınmakta, rasgele seçilen diğer üç kromozomda kullanılarak yeni bir birey elde edilmektedir. Bu işlemler sırasında mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılmış olmaktadır. Mevcut kromozomla elde edilen yeni kromozomun uygunlukları karşılaştırılarak uygunluğu daha iyi olan, yeni birey olarak bir sonraki popülasyona aktarılmaktadır. Böylelikle seçim operatörü de kullanılmış olmaktadır. Üretilen çözümlerin kalitesi, amaç fonksiyonuna yaptıkları katkıyla (uygunluk değeri) ölçülmektedir. DGA'nın diğer sezgisellere önemli bir üstünlüğü de kolayca kodlanabilmesidir. Diğer algoritmalar için binlerle ifade edilen satırdan oluşan kodlar söz konusu iken DGA için yaklaşık 20 satırlık kod yeterli olmaktadır.

3.5.4. Yapay Isıl İşlem Algoritması

Tavlama benzetimi yöntemi olarak da literatürde geçen yapay ısı işlem algoritmaları, ilk karşılaşılana daha iyi çözümü kabul ederek en iyiyi arama metodlarının temelinde bir değişik uygulama biçimidir. Her adımda daha iyi bir noktaya gitmeyi hedefleyen gradyan ile arama yönteminden farklı olarak, bu algoritmanın en önemli dezavantajı, süreç içinde giderek azalan bir olasılıkla daha kötü bir çözüme varmaya neden olabilir.

3.5.5. Tabu Arama

Tabu tanımlayarak arama temelinde bir çözümün çevresinde yerel en iyi çözümü arayan gradyan yönteminin bir uyarlamasıdır. Algoritmanın bir yerel en iyi çözümden ayrıldıktan hemen sonra tekrar aynı yerel en iyi çözüme yönelmemesi için algoritmanın attığı son adımlar tabu ilan edilir. Tabu listesi dinamiktir. Her yeni bir eleman tabu listesine girdiğinde, tabu listesinde en çok kalmış olan eleman liste dışına çıkarılır. Bu şekilde algoritmaya bir hafıza kazandırılmış olur.

3.5.6. Arı Kolonisi Algoritması

Bal arılarının yiyecek arama yöntemleri, öğrenme, bilgi paylaşımı ve ezberleme kabiliyetleri, yakın zamanda sürü zekasında oldukça ilgi çeken araştırma konularından olmuştur. Doğal bir bal arısı kolonisinde arılar arasında yapılacak işlere göre bir görev dağılımı bulunmaktadır. Bal arıları bu görev paylaşımını merkezi bir yönetim sistemi olmadan, kendi başlarına gerçekleştirmektedirler. Bu görev paylaşımı ve kendi başına organize olabilme sürü zekâsının iki belirgin özelliğidir. Temel olarak ortaklaşa zekânın ortaya çıkmasını sağlayan optimum yiyecek arama modelinde üç ana bileşen vardır. Bunlar yiyecek kaynakları, görevli işçi arılar ve görevsiz işçi arılardır. Ayrıca bu optimum model yiyecek kaynağına yönelme ve yiyecek kaynağını bırakma olmak üzere iki farklı modda çalışmaktadır. Arılar bal, polen veya nektar bulmak için yiyecek kaynaklarına ulaşma ihtiyacı duymaktadırlar.

Yiyecek kaynağının kıymeti, yuvaya olan mesafesine, çeşidine, nektar yoğunluğuna, nektarın çıkarılmasının kolaylığına vs. birçok etkene bağlı olmaktadır. Ayrıca kolay ifade edilmesi açısından sadece yiyecek kaynağının zenginliği gibi sadece bir özellik de ele alınabilir. Görevli işçi arılar, nektarın, önceden keşfedilmiş olan belli kaynaklardan sağlanmasından sorumludurlar ve gittikleri kaynağın kalitesi ve yeriyle ilgili bilgileri kovadaki diğer arılarla paylaşmaktadırlar. Görevsiz kaşif işçi arılar ise nektar toplanabilecek alternatif yeni yiyecek kaynaklarını aramaktadırlar. Bir içgüdüye ya da dış bir etkiye bağlı olarak rastgele kaynak arayışında olan kaşif

arılar ve kovanda bekleyip görevli arıları izleyerek bu arılar tarafından paylaşılan bilgi vasıtasıyla yeni bir kaynağa doğru yönelen gözcü arılar olmak üzere görevi belirsiz iki tür arı bulunmaktadır. Kaşif arıların sayısının kovandaki diğer arılara oranı %5 ile %10 arasında olmaktadır. Ortaklaşa bilginin oluşumundaki en önemli neden arılar arasındaki bilgi paylaşımıdır. Yiyecek kaynağının yeri ve kalitesi hakkındaki bilgi paylaşımı kovandaki dans alanında gerçekleşmektedir. Dans eden arıya diğer arılar antenleri aracılığıyla dokunarak kaynağın tadı ve kokusu hakkında da bilgi edinirler.

Arıların yiyecek arama davranışı modellenerek geliştirilen en güncel algoritma Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAKA)'dır. Bu algortmada temel alınan modelde basit olması nedeniyle bazı kabuller yapılmaktadır. Buna göre, (kaynak sayısı = görevli arı sayısı = işçi arıların sayısı) olarak belirlenmektedir ve nektarı tükenmiş kaynağın görevli arısı kaşif arıya dönüşmektedir. Yiyecek kaynaklarındaki nektar miktarı, kaynaklarla ilgili çözümlerin uygunluğuna ve bu kaynakların yerleri ise optimizasyon problemine ait olası çözümlere karşılık gelmektedir. YAKA en fazla nektara sahip yiyecek kaynağının yerini bulmaya çalışarak uzaydaki çözümlerden problemin minimumunu veya maksimumunu veren çözümü bulmaya çalışmaktadır.

3.6. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin yeni bilgiler üretebilme ve keşfedebilme gibi yeteneklerinden esinlenerek geliştirilmiş ve bu yeteneklerin matematiksel olarak modellenmesi ve otomatik olarak gerçekleştirilebilmesi amacı ile ortaya çıkmış bilgisayar sistemleridir. Bu konu üzerindeki çalışmalar beyni oluşturan biyolojik birimler olan nöronların modellenmesi ve bilgisayar sistemlerinde uygulanması ile başlamış daha sonraları bilgisayar sistemlerinin gelişimine de paralel olarak birçok alanda kullanılır hale gelmiştir [152].

3.6.1. YSA'ların Özellikleri

YSA'lar, uygulanan ağ modeline göre çeşitli karakteristik özellikler göstermelerine karşın temel bazı ortak özelliklere sahiptirler.

- 1) YSA'lar çok sayıda nörondan oluşmaktadır ve bu nöronlar aynı anda çalışarak karmaşık görevleri yerine getirebilirler. İşlem sırasında nöronlardan her hangi biri işlevini kaybetse bile sistem güvenli bir şekilde işlemeye devam edebilir.

- 2) Eğitim sırasında kullanılan sayısal verilerden yola çıkarak genel bir çözüm uzayı oluşturması ve eğitimde yer almayan veriler için de anlamlı sonuçlar ortaya koyabilmesi en büyük avantajıdır.
- 3) YSA'lar makina öğrenmesi gerçekleştirirler. YSA'ların ana işlevi bilgisayarların öğrenmesini sağlamaktır. Örnek olaylar için eğitilerek benzer durumlar karşısında da uygun kararlar verebilmeyi sağlarlar.
- 4) Bilgiyi işleme yöntemleri klasik programlama mantığından farklıdır. Bu sebeple klasik programlamanın sahip olduğu çoğu olumsuz durum ortadan kaldırılabilir.
- 5) Eğitim sonrasında kazanılan bilgiler YSA'nın kendisinde ve ağa dağılmış şekilde saklanır. Klasik programlamadaki gibi bilgiler veri tabanları veya dosyalarda değil, ağın tamamına yayılarak, ağ bağlantılarında saklanmaktadır. Bu sayede, tek başına hiçbir anlam taşımayan nöronlardan bazılarının kaybolması, istenen sonuçların üretilmesinde sorun teşkil etmez.
- 6) YSA'lar eğitimde verilen örnekleri kullanarak ve genellemeler çıkararak öğrenirler. YSA'nın başarısı, seçilen örnek uzayı ile doğru orantılıdır, YSA'ya verilen örnek uzay tüm yönleri ile gösterilemez ise YSA istenmeyen sonuçlar verebilir. Verilen örnek uzay geniş seçilir ve doğru öğretilirse, daha önce gösterilmeyen girdiler için de doğru sonuçlar üretebilirler.
- 7) YSA'ların en önemli dezavantajı makina bağımlı olmalarıdır. Üzerinde çalıştırılacak bir bilgisayar olmadan YSA'lar işe yaramazlar.
- 8) YSA'ların parametrelerinin belirlenmesinde de belli bir kural yoktur. Ağdaki öğrenme katsayısı, nöron sayısı, katman sayısı gibi parametreler bir kurala bağlı olmadan her problem için farklı olarak belirlenmektedir.
- 9) YSA'nın eğitiminin ne zaman sonlandırılması gerektiğine dair belli bir şart yoktur. İstenen sonuçlardaki hatanın belirli bir değerin altına inmesi eğitimin bitirilebileceği anlamına gelmektedir.

3.6.2. YSA'ların Kullanıldığı Alanlar

YSA'lar birçok alanlarda kullanılmakla birlikte en bilinen kullanım alanları: Elektronikte; devre bozulma analizi, doğrusal olmayan modelleme vs. Finansta; değer biçme, piyasa performans analizi, bütçe tahmini vs. Üretimde; imalat süreç denetimi, ürün tasarımı, makina bozulma tahmini, mukavemet analizi, kalite denetimi, iş tabloları oluşturma vs. Sağlıkta; kanser ve kalp krizi tanısı ve tedavisi, EEG, ECG, MR, ilaç etkileri analizi, kan analizi ve sınıflandırma vs. Robotikte; yörünge denetim, kaldıraç robotları, görüntü algılama, kablosuz sistemler, en iyi yol seçimi vs. Dil denetiminde; sözcük tanıma, yazı ve konuşma çevrimi ve tercüme vs. Telekomünikasyonda; görüntü ve veri karşılaştırma, filtreleme, eko ve gürültü algılama, ses ve görüntü işleme vs. Güvenlikte; parmak izi, retina ve yüz tanıma-eşleştirme vs. kapsamaktadır.

3.6.3. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması

3.6.3.1. İleri beslemeli YSA'lar

İleri beslemeli YSA'larda nöronlar girişten çıkışa doğru katmanlar halindedir. Bir katmandan sadece kendinden sonraki katmanlara bağlantı oluşmaktadır. YSA'ya girilen veriler giriş katmanına sonrasında sırasıyla ara katmanlardan ve çıkış katmanından işlenerek geçer ve kullanıcıya iletilir.

3.6.3.2. Geri beslemeli YSA'lar

İleri beslemeli YSA'lardan farklı olarak, kendinden önceki katmanda veya kendi katmanında bulunan bir nörona da girdi olarak bağlanabilir. Bu yapısı ile geri beslemeli YSA'lar lineer olmayan bir davranış göstermekte ve geri besleme özelliğini kazandıran bağlantıların bağlantı şekline göre farklı davranışta ve yapıda geri beslemeli yapay sinir ağları elde edilebilir.

3.6.4. Yapay Sinir Ağlarının Öğrenme Türleri

3.6.4.1. Danışmanlı öğrenme

Öğrenme sırasında YSA'ya verilen giriş değerleri için çıktı değerleri de verilerek, istenen çıktılara göre sonuç üretmesi istenir. Bu sayede YSA'ya verilen girdilere göre istenen sonuçları üretebilmek için her nöron hesaplanan hata oranına göre kendi ağırlıklarını günceller.

3.6.4.2. Danışmansız öğrenme

Danışmansız öğrenmede YSA'ya sadece örnek girdiler verilir fakat herhangi bir beklenen çıktı bilgisi verilmez. Girişte verilen bilgilere göre YSA kendi içinde sınıflandırma yaparak kendi bağlantılarını oluşturur.

3.6.5. Yapay Sinir Ağların Bölümleri

3.6.5.1. Girdiler

Girdiler YSA'ya girilen verilerdir.

3.6.5.2. Ağırlıklar

YSA'ya gelen girdiler çekirdeğe ulaşmadan önce oluşan bağlantıların ağırlığıyla çarpılarak çekirdeğe gönderilir. Böylece girdilerin istenen çıktılar üstündeki etkisi ayarlanabilmektedir. Ağırlıkların değeri pozitif, negatif veya sıfır olabilir. Değeri sıfır olan ağırlıkların çıktı üzerinde herhangi bir etkisi olmamaktadır.

3.6.5.3. Toplama Fonksiyonu (Birleştirme Fonksiyonu)

Bir YSA nöronuna ağırlıklarla çarpılarak gelen girdileri toplayarak o nöronun net girdisini hesaplayan bir fonksiyondur. En uygun toplama fonksiyonu belirlenirken belli bir kural yoktur ve genellikle deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir.

3.6.5.4. Aktivasyon fonksiyonu

Nörona gelen net girdiyi işleyerek bu girdiye karşılık üreteceği çıktıyı belirler. Genellikle lineer olmayan bir aktivasyon fonksiyonu seçilir. YSA'ların özelliği olan "lineer olmama" aktivasyon fonksiyonlarının lineer olmamasından ileri gelmektedir. Fonksiyon seçilirken dikkat edilmesi gereken şey türevinin kolay hesaplanabilir olmasıdır. En yaygın kullanılan fonksiyon "Sigmoid" fonksiyonudur.

3.6.5.5. Çıktılar

YSA'nın işlemler sonunda ortaya koyduğu verilerdir.

3.6.6. Yapay Sinir Ağlarının Eğitilmesi

İnsan beyni doğum sonrası gelişim evresinde duyu organları vasıtasıyla çevresinden algıladığı davranışları yorumlar ve edindiği bu tecrübeleri diğer davranışlarında kullanır. Artık karşısına çıkan olaylar karşısında nasıl tepki vereceğini çoğu zaman bilmektedir. Fakat hiç karşılaşmadığı bir durum karşısında yine tecrübesiz kalabilir. YSA'lar da öğrenme sürecinde de dış ortamdan veriler alınır ve aktivasyon fonksiyonu tarafından işlenerek bir çıkış üretilir. Bu çıkış, istenen çıkışla kıyaslanarak hata oranı tespit edilir. Çeşitli öğrenme işlemleri ve ağırlık ayarlamalarıyla hata azaltılıp istenen çıkışa ulaşılmaya çalışılır. Eğer YSA istenen amaca yaklaşmış ise ağırlık değerleri korunur. Tüm bu sürece öğrenme süreci denmektedir. YSA öğrendikten sonra önceden gösterilmeyen girdiler verilip, YSA çıkışıyla yeni veri çıkışları

kıyaslanır. Eğer yeni girilen veriler için istenen sonuçlara yeterince iyi yaklaşıyorsa YSA iyi öğrenmiş demektir. YSA'ya eğitim için verilen örnekler için istenen sonuçlara yakın sonuçlar üretiyor fakat test örnekleri için hatalı sonuçlar üretiyorsa YSA iyi öğrenmemiş, ezberlemiş demektir. Genelde sahip olunan örneklerin %80'i YSA'ya verilip eğitilir. Kalan %20'lik veri ağın test edilmesi için saklanır ve eğitim sonunda YSA sınanır. Böylece YSA'nın doğrulanması yapılır.

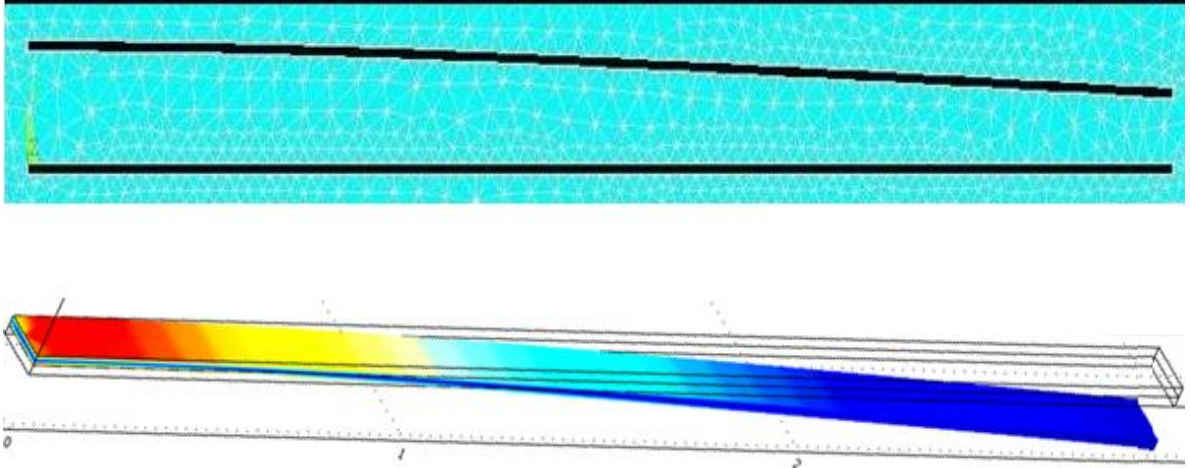


4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Benzetim Sonuçları

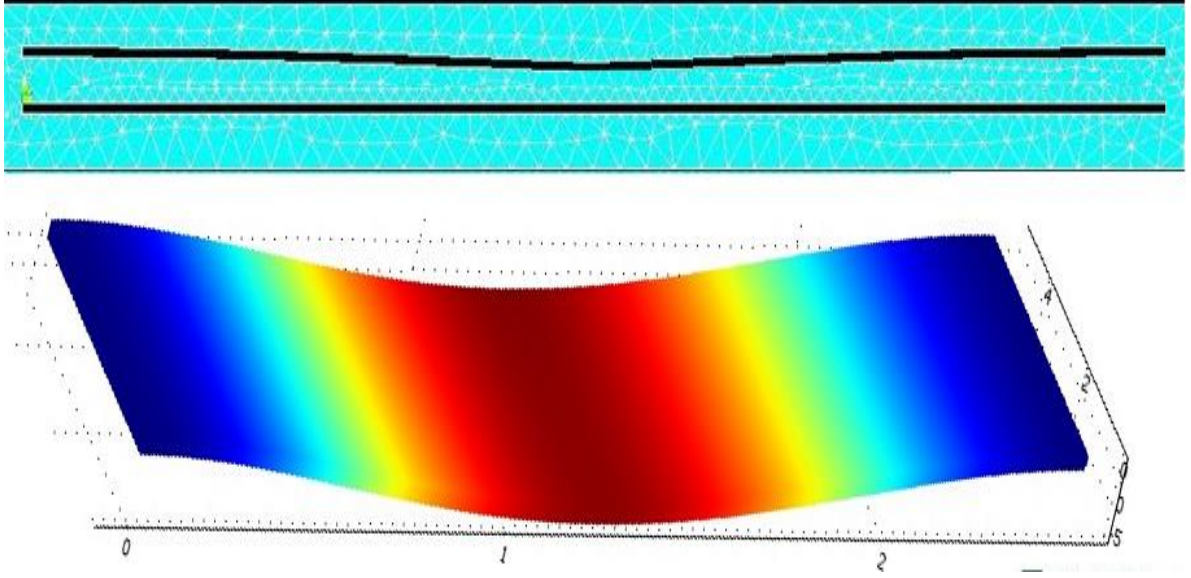
Benzetim programları problemi görsel ve matematiksel olarak çözen SEM tabanlı yazılımlardır. Eğer problemin geometrisi ve sınır şartları doğru temsil edilmişse, eyleyicinin analizinde analitik çözüme tatminkar bir yaklaşım sağlanabilir. Önceki bölümlerde ana hatlarıyla anlatılan tüm benzetim çalışmaları 2 boyutlu olarak ANSYS ve 3 boyutlu olarak da COMSOL programında yapılarak eyleyiciler analiz edilmiş ve aşağıda sırasıyla verilen önemli sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Bir ucu bağlı eyleyicilerin uygulanan voltaj sonucu alt elektrota doğru Şekil 4.1.'deki gibi deforme oldukları ve deformasyon miktarının uygulanan voltaj değeri, eyleyicinin uzunluğu ve genişliği ile doğru; elektrotlar arasındaki mesafe, üst elektrotun kalınlığı ve elastik modülü ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. Bir ucu bağlı eyleyicinin ANSYS ve COMSOL benzetimi

- 2) İki ucu bağlı eyleyicilerin uygulanan voltaj sonucu alt elektrota doğru Şekil 4.2.'deki gibi deforme oldukları ve deformasyon miktarının uygulanan voltaj değerinin, eyleyicinin uzunluğu ve genişliği ile doğru; elektrotlar arasındaki mesafe, üst elektrotun kalınlığı, elastik modülü ve varsa artık stres ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. İki ucu bağlı eyleyicinin ANSYS ve COMSOL benzetimi

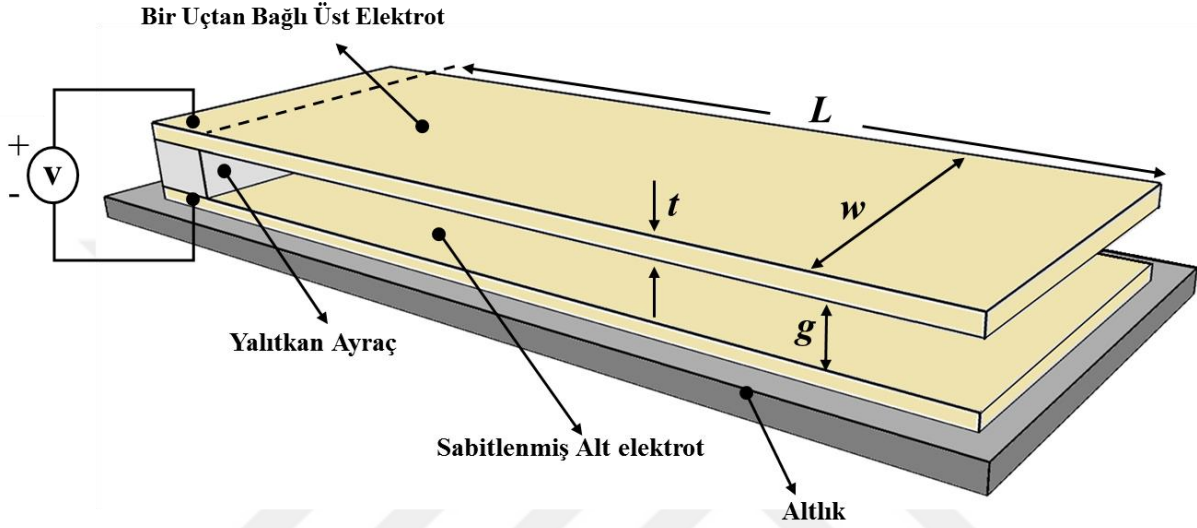
- 3) Eyleyicilere uygulanan voltaj arttırıldıkça, üst elektrotun deforme olmaya devam ettiği fakat belli bir noktadan sonra aniden çökerek alt elektroda yapıştığı gözlemlenmiştir.
- 4) Yapılan birçok benzetim ve gözlem neticesinde, üst elektrotun aniden çöküp alt elektroda yapışmadan hemen önceki çökme noktası (δ) değeri ile eyleyicinin elektrotları arasındaki başlangıç mesafesi (g) arasında sabit bir oran olduğu ve diğer değişkenlerden etkilenmediği teyit edilmiştir.
- 5) Elde edilen sonuçlara göre, bir ucu bağlı eyleyici için; çökme noktası değeri (δ) ile başlangıç mesafesi (g) arasındaki sabit oranın %44 olduğu yani $\delta=0.44g$ ve iki ucu bağlı eyleyici için %40 yani $\delta=0.4g$ olduğu belirlenmiştir.

Yapılan benzetimler neticesinde elde edilen tüm veriler, bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı elektrostatik MEMS eyleyicilerin uygulanan voltaj sonucu uğradıkları deformasyon ve çökme noktalarının matematiksel olarak hesaplanabilmesi için oluşturulacak formül için kullanılmıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısmında, sırasıyla bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı eyleyicilerin çökme noktasına kadar olan aralıktaki hareketinin matematiksel olarak nasıl oluşturulduğu ve bu ifadeden çökme noktası ve çökme voltajının nasıl bulunduğu yer almaktadır.

4.2. Bir Ucu Bağlı Eyleyiciler İçin Formül Çalışmaları

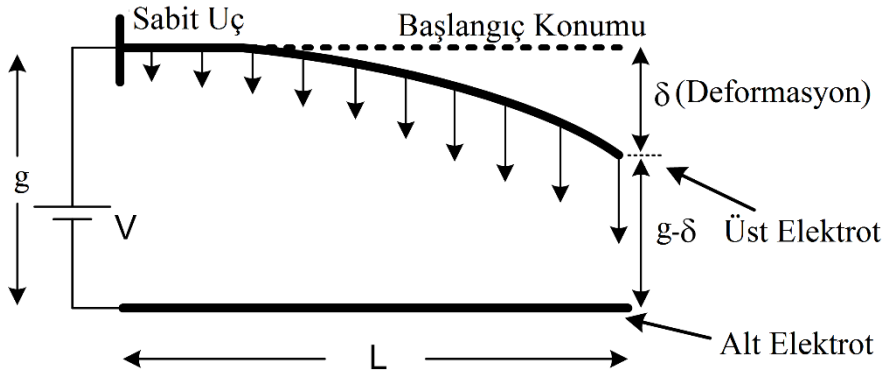
Elektrostatik bir uçtan bağlı eyleyiciler düşük güç tüketimleri, küçük boyutları ve kullanışlı yapıları gereği oldukça popülerdirler. Bir ucu bağlı eyleyiciler pek çok MEMS aygıtta kullanılmaktadırlar. Örneğin; basınç sensörü olarak [153, 154], mikrodalga RF anahtar olarak

[155-157], akış kontrol sensörü olarak [158-160], mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığı olarak [161-163], kimyasal ve biyolojik sensör olarak [164-166] ve enerji toplayıcı olarak [167-169] mikro elektromekanik sistemlerde kullanılabilirler. Bir uçtan bağlı MEMS eyleyiciler, adından da anlaşılacağı gibi, bir ucundan aralarında yalıtkanlık sağlayacak bir ayraç konularak, tümüyle sabitlenmiş başka bir elektrotun üzerinde asılı kalacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Şekil 4.3.'te bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 4.3. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin şematik gösterimi

Üst elektrotun bir ucu sabitken, diğer ucu hareket edebilecek kabiliyettedir. İki elektrot arasında DC bir voltaj uygulandığında, üst elektrotun serbest ucu oluşan elektrostatik kuvvet nedeniyle aşağı elektrota doğru hareket etmektedir. Bu hareketin temsili gösterimi Şekil 4.4.'ten görülebilir.



Şekil 4.4. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin temsili gösterimi

Uygulanan voltaj arttıkça üst elektrotun deformasyonu artmakta ve bir noktadan sonra diğer elektrot üzerine çökmektedir. Bu çökme noktasına kadar olan eyleyici hareketini matematiksel olarak ifade etmek kolay değildir. Çünkü söz konusu hareket doğrusal değildir ve mikro ölçeklerdeki mekanik girişim olayından dolayı kestirilebilmesi çok zordur. İkinci bölümde bahsedildiği gibi, bu hareketin matematiksel olarak ilk ifadesi Lumped model olarak bilinmektedir ve birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Lumped model çökme noktasını başlangıç açıklığının 1/3'ü olarak ifade etmektedir. Lakin bu oranın iyi bir yaklaşım olmadığı ve daha yüksek bir oran olması gerektiği, Tablo 4.1.'deki benzetim sonuçlarıyla da görülmüştür. Ayrıca, bu oranın eyleyicinin diğer boyutlarından bağımsız sabit bir oran olduğu ve değişmediği de gözlemlenmiştir.

Tablo 4.1. Çökme noktalarının başlangıç mesafesine oranı

Eyleyicinin Başlangıç Açıklığı ($g, \mu\text{m}$)	Çökme Noktası ($\delta, \mu\text{m}$)		Çökme Noktası / Başlangıç Açıklığı (δ/g)	
	ANSYS	COMSOL	ANSYS	COMSOL
2	0.881	0.884	0.4405	0.4420
4	1.761	1.769	0.4403	0.4422
5	2.202	2.212	0.4404	0.4424
10	4.403	4.424	0.4403	0.4424
20	8.809	8.848	0.4405	0.4424

Bunun yanında, daha önce birçok araştırmacı da hem deneysel hem de numerik çalışmalarla, Lumped modelin ortaya koyduğu 1/3 oranının doğru olmadığı ve daha yüksek bir oran olması gerektiği sonucunu ortaya koymuşlardır [34, 60, 95 ve 135].

Bir ucu bağlı eyleyicinin söz konusu hareketini matematiksel olarak modellemek için bugüne kadar birçok çalışma sunulmuştur. Bunlardan, Hu ve arkadaşları [135], dağınık enerji yaklaşımını kullanarak, potansiyel enerji ve kinetik gerilme durumlarından faydalanarak toplam enerji ifadesini ortaya çıkarmışlardır. Bu ifadeye Hamilton prensiplerini uygulayarak, küçük yer değiştirme yaklaşımı kabulüyle Taylor serisine açarak formüle etmişlerdir. Elde edilen formül başlangıç pozisyonu için Taylor serisine açıldığından, üst elektrotun başlangıç durumundan uzaklaşmasıyla hata oranları neredeyse %10'lara kadar artmaktadır. Başka bir çalışmada ise, genelleştirilmiş diferansiyel kareleme metodu uygulanarak hesaplamalar yapılmaya çalışılmış ve yüksek dereceli polinom yaklaşımıyla formül oluşturmuşlardır [1]. Deformasyon küçük iken, yani üst elektrot çökme noktasından uzakta iken bu yaklaşım kısmen işe yarasa da, çökme noktasına yakın yerlerde pekiyi neticeler vermemektedir ve hata oranları %5'leri bulmaktadır. Nispeten iyi sonuçlar veren karşılaştırmalı bir çalışma da VLSI devre yöntemi ve doğrusal bir yaklaşım kullanılarak ortaya konmuştur [136]. Ayrıca, elde ettikleri hesaplama ifadelerinde elektrostatik

kaçış alanlarını (fringing field) da hesaba katmışlardır. Söz konusu çalışmada geliştirilen yöntem nispeten iyi sonuçlar verse de sadece çökme voltajını hesaplayabilmek için oluşturulmuş ve çökme noktasına kadar olan kararlı bölgede konum ve voltaj arasındaki bağlantıyı veren herhangi bir hesaplama yöntemi sunulmamıştır.

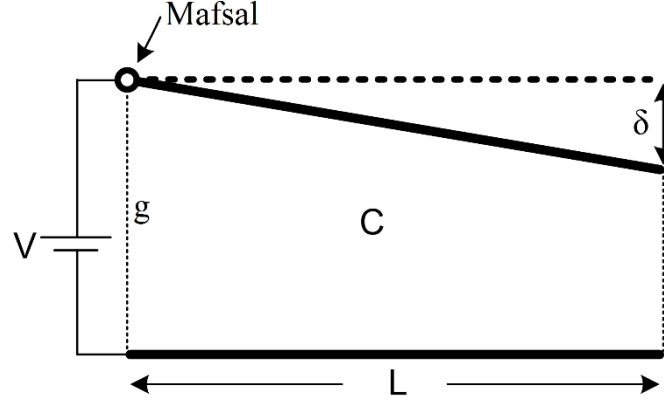
Bu bölümde, bir ucu bağlı MEMS eyleyicinin voltaj uygulanmaya başlanıp, çökme noktasına varana kadar olan kararlı durum aralığı için voltaj-konum ifadesi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matematiksel ifadeden çökme noktası elde edilerek, çökme noktasındaki voltaj değerini verecek formül elde edilmiştir. Elde edilen voltaj- konum ifadesi, eyleyiciyi bükülmez bir yapı varsayarak, bağlı olduğu noktada dönebilen ve onu geri çeken yay kuvveti tarafından dengelenen bir pivot sistemi olarak modellenmiştir. Bu yaklaşımdan çıkarılan basit matematiksel ifade, eyleyicinin başlangıç noktasından çökme noktasına kadar olan tüm kararlı bölgedeki voltaj-konum değerleri için geçerlidir. Ayrıca eyleyicinin çökme noktası, elde edilen formülden yola çıkılarak, iki elektrot arasındaki başlangıç mesafesinin %44'ü olarak bulunmuştur. Bu çıkarımlar, hem benzetim hem de literatürdeki deneysel ölçüm değerleriyle oldukça iyi uyumaktadır. Formülün geçerliliğini göstermek için daha önce yapılmış hesaplama çalışmalarıyla da kıyaslamalar yapılmıştır. Örneğin, çökme noktasına yakın voltaj değerleri için %1'den az hata ile deneysel sonuçlarla uyduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, %4'ten az hata oranlarıyla da SEM tabanlı benzetimlerle uyumludur. Bunlara ek olarak, daha zor hesaplama yöntemleri içeren önceki çalışmalara göre de daha yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir [170]. Sonraki adımlarda, elde edilen matematiksel ifadelerin nasıl elde edildiği açıklanmıştır.

4.2.1. Pivot Modeli ve Formül İfadesi

Bu kısımda, bir ucu bağlı elektrostatik eyleyici için yeni bir model sunularak, eyleyici hareketinin matematiksel ifadesi oluşturulmuştur. Gerçekte, sabitlendiği noktada eyleyicinin hem açısı hem de konumu değişmemelidir. Fakat Lumped modelde, eyleyicinin sabitlendiği noktada sadece açının değişmediği böylece bir piston misali sadece aşağı-yukarı hareket ettiği yaklaşımı kullanılırken, bu yeni modelimizde sabit ucun konumunun değişmediği ama açının değişebileceği şeklinde bir yaklaşım yapılmıştır. Böylelikle, sabitlendiği uçta eyleyicinin bir pivot misali bağlantı noktası etrafında dönebildiği varsayılmıştır. Bu sebeple, Şekil 4.5.'ten de görülebilen bu model Pivot modeli olarak adlandırılmıştır.

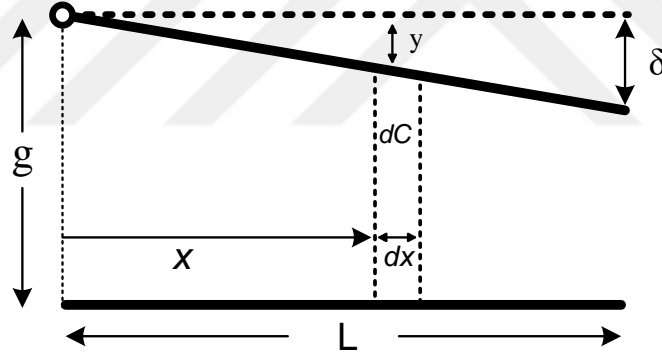
Pivot modeli bir ucu bağlı eyleyici için iyi bir model yaklaşımı olmakla beraber aynı zamanda istenen konum-voltaj değerlerine göre oldukça iyi sonuçlar veren matematiksel bir formülün türetilmesine de temel oluşturmaktadır. Bu yaklaşım modelinde matematiksel ifadenin

basitliği için, kaçış alanları (fringing field) hesaba katılmamakta ideal şartlar altında sadece kapasitans-enerji modeli temelinde hesaplamalar yapılmaktadır.



Şekil 4.5. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin için pivot modeli

Eğer üst elektrotun serbest ucunun aşağıya indiği mesafeye δ dersek, pivot modelindeki yapı göz önüne alınarak;



Şekil 4.6. Bir uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin kapasitans hesap gösterimi

C değerindeki eğimli kısmın kapasitansı, paralel plaka kapasitans gibi varsayılan sonsuz küçük dC kapasitanslarının integralenmesiyle bulunur. Şekil 4.16.'dan yola çıkarak, sonsuz küçük kapasitans değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$dC = \epsilon_0 \frac{dA}{g - y} \quad (4.1)$$

Burada, dA değeri sonsuz küçük kapasitansın sonsuz küçük alanını ifade etmektedir ve $w dx$ değerine eşittir. w değeri elektrotun genişliği, dx ise sonsuz küçük uzunluğu ifade etmektedir. Eşitlik (4.1)'deki "y" ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$y = \delta \frac{x}{L} \quad (4.2)$$

Burada, “ δ ” uygulanan voltaj sonucu uç kısımda meydana gelen deformasyon mesafesini ifade etmektedir ve aynı zamanda düz kısmın deformasyon miktarına eşittir. Bu sebeple, Denklem (4.1) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$dC = L\epsilon_0 \frac{w}{Lg - \delta x} dx \quad (4.3)$$

Böylelikle, C kapasitansının değeri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$C = \int dC = L \epsilon_0 w \int_{x=0}^L \frac{dx}{Lg - \delta x} \quad (4.4)$$

Burada, integral işlemi sonucunda; Şekil 4.6.’daki yapının kapasitans değeri C aşağıdaki gibi bulunur.

$$C = \frac{\epsilon_0 w L}{\delta} \ln \left(\frac{g}{g - \delta} \right) \quad (4.5)$$

Burada, ϵ_0 havanın dielektrik sabiti ve w eyleyicinin genişliğini ifade etmektedir. Detaylı kapasitans hesaplama çalışmaları daha önce yaptığımız çalışmalardan bulunabilir [170-172]. Sonrasında, bu kapasitans değerine bağlı olarak elektrostatik kuvvet ifadesi aşağıda verilen aşamalarda hesaplanacaktır. F_e elektrostatik kuvvet eyleyiciye uygulanan voltaja bağlı olarak üst elektrotu aşağı çeken kuvvettir. Öncelikle eyleyici yapısının bir kapasitöre benzetilebileceği çok aşikardır. Bu sebeple V voltajı uygulanan Denklem (4.5)’de ifade edilen C değerindeki kapasitansın depoladığı enerji U aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.6)$$

Depolanan enerji ile elektrostatik kuvvet arasındaki ilişki

$$dU = -F_e d\delta \quad (4.7)$$

şeklindedir.

Denklemden F_e çekilirse;

$$F_e = -\frac{dU}{d\delta} \quad (4.8)$$

Enerji ifadesi Denklem (4.7) Denklem (4.8)'te yerine yazılırsa;

$$F_e = -\frac{1}{2}V^2 \frac{dC}{d\delta} \quad (4.9)$$

Denklem (4.5), Denklem (4.9)'da yerine konulur ve gerekli türev işlemi yapılırsa, elektrostatik kuvvet şu hale dönüşür.

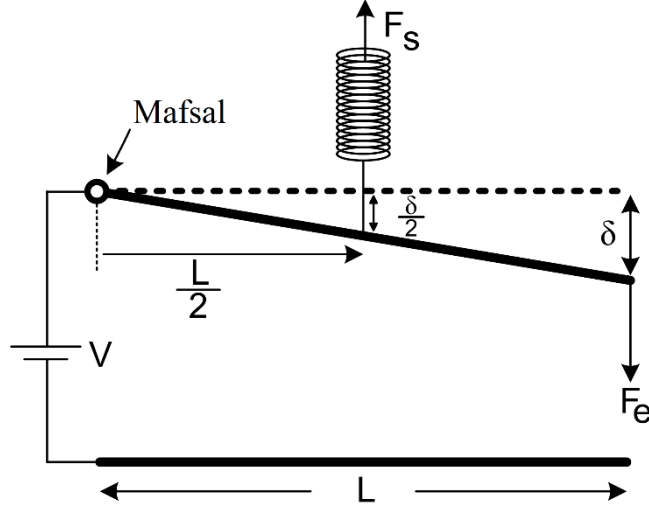
$$F_e = \frac{\epsilon_0 w L V^2}{2} \left[\frac{\delta + (g - \delta) \ln\left(\frac{g - \delta}{g}\right)}{\delta^2 (g - \delta)} \right] \quad (4.10)$$

Burada elektrostatik kuvvet üst elektrotun tüm uzunluğu boyunca yayılmakta ve bu durumu matematiksel olarak ifade edebilmek oldukça zor olmaktadır. İfadenin basitliği adına bu elektrostatik kuvvet, temsili noktasal bir kuvvet olarak ifade edilecektir. Bu aşamada, noktasal olarak kabul edilen temsili elektrostatik kuvvetin hangi noktada olması gerektiğini bulmak gerekmektedir.

Öncelikle, işlem basitliği ve işlem sonucunu etkilemeyeceği için, temsili kuvvet rastgele bir noktada varsayılacak; sonrasında olması gerektiği yer hesaplanacaktır. Şekil 4.8. de bir uçtan bağlı eyleyicinin rastgele ve geçici olarak seçilmiş elektrostatik kuvvet ve geri çekme yay kuvveti noktaları görülmektedir. Kuvvetlerin olması gereken asıl noktaları ve voltaj-konum ifadesinin elde edilmesi ilerdeki aşamalarda gösterilecektir.

Geçici seçilmiş orta noktaya göre yay kuvveti ifadesi şöyledir.

$$F_s = \frac{\delta}{2} k \quad (4.11)$$



Şekil 4.7. Bir uçtan bağlı eyleyicinin için temsili kuvvet noktaları

Burada; k yay sabitidir. Şekil 4.7.'daki sistem dengedeysen, pivot noktasına göre moment eşitliğini şöyle yazılabilir.

$$\frac{\delta}{2} k = \varepsilon_0 w L \left[\frac{\delta - \ln\left(\frac{g}{g-\delta}\right)(g-\delta)}{\delta^2 (g-\delta)} \right] V^2 \quad (4.12)$$

Buna göre; voltaj ifadesi eşitliğin bir tarafına alınırsa, voltaj ifadesi şöyle olur.

$$V = \left[\frac{k \delta^3 (g-\delta)}{2 \varepsilon_0 w L \left(\delta - \ln\left(\frac{g}{g-\delta}\right)(g-\delta) \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

Çökme limiti olarak adlandırılan nokta, Denklem (4.13)'teki voltaj ifadesinin δ değişkenine göre türevinin alınıp, sifıra eşitlenmesiyle bulunur. Üst elektrotun bu limitten sonra çökmekte olduğu kabul edilmektedir. Bu noktadan hareketle türev ifadesi şöyle olur.

$$\frac{dV}{d\delta} = - \sqrt{\frac{k\delta}{2\varepsilon_0 w L (g-\delta)}} \left[\frac{4\delta^2 - 3g\delta + (3\delta^2 - 6g\delta + 3g^2) \ln\left(\frac{g}{g-\delta}\right)}{\left[\delta - \ln\left(\frac{g}{g-\delta}\right)(g-\delta) \right]^{\frac{3}{2}}} \right] = 0 \quad (4.14)$$

Denklem (4.14)'un analitik çözümü sonrası, ifadenin sifıra eşitliğini sağlayan kökü yani çökme noktası numerik yöntemler kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\delta_{\text{çökme}} = 0.4404g \quad (4.15)$$

Bu çökme noktası sonucu, hem bu çalışma için gerçekleştirilmiş ve Tablo 4.1.'de görülen benzetim sonuçlarıyla hem de daha önce yapılmış deneysel bir çalışmayla [135] da oldukça iyi örtüşmektedir. Eğer Denklem (4.13)'deki voltaj ifadesini elde edebilmek için geçici olarak seçtiğimiz kuvvet noktalarını başka yerlerde seçilseydi bile, Denklem (4.15)'de bulunan çökme noktası değeri yine de değişmeyecekti. Çünkü kuvvet noktalarının seçimi, (4.14)'deki denklemin köklerini etkilemez ve kökler kuvvet noktalarından ziyade elektrotun şekline bağlı oluşmaktadır.

Kuvvet noktalarının keyfi seçimi sadece doğru çökme noktasını doğru şekilde verir. Bu rastgele seçim, voltaj değerlerini verecek matematiksel ifade için bu şekilde kullanılamaz. Bu sebeple, bir sonraki aşamada bu kuvvet noktalarının olması gereken gerçek yerler hesaplanacaktır.

4.2.2. Pivot Modelinde Kuvvetlerin Gerçek Yerlerine Yerleştirilmesi

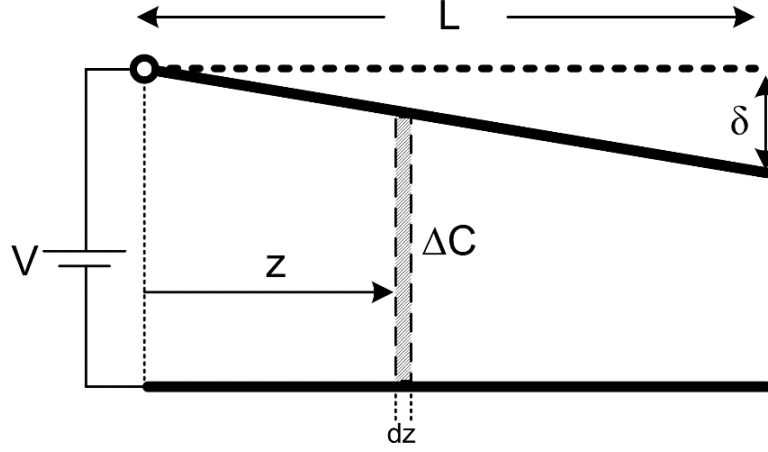
Temsili olarak noktasal varsayılan elektrostatik kuvvetin etki ettiği noktayı bulabilmek adına, tam olarak çökme pozisyonunda durmuş olan eyleyicinin uzunluğu boyunca her noktada etkisi altında kaldığı sonsuz küçük elektrostatik kuvvet hesaplanıp, pivot noktasına göre noktasal kuvvetin moment eşitliği yazılmıştır. Çökme pozisyonunda duran eyleyicinin, uzunluğu boyunca sahip olduğu noktasal kapasitans değerinin temsili durumu Şekil 4.8.'den görülebilir.

Şekil 4.8.'de görülen sonsuz küçük kabul edilen ΔC kapasitans değeri şöyle yazılabilir.

$$\Delta C = \frac{\epsilon_0 w L}{gL - \delta z} dz \quad (4.16)$$

Sonrasında, sonsuz küçüklükte kapasitans değerine göre sonsuz küçüklükte elektrostatik kuvvet ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$dF_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{d(\Delta C)}{d(gL - \delta z)} = \frac{\epsilon_0 w L V^2}{2} \frac{z}{(gL - \delta z)^2} dz \quad (4.17)$$



Şekil 4.8. Bir uçtan bağlı eyleyicinin için sonsuz küçük kapasitans gösterimi

Eyleyici boyunca etki eden sonsuz küçük elektrostatik kuvvetlerin toplamı, Denklem (4.17)'un eyleyici boyunca integrallenmesi ile hesaplanabilir ve bu toplam elektrostatik kuvvet ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}
 F_e &= \frac{\epsilon_0 w L V^2}{2} \int_{z=0}^L \frac{z}{(gL - \delta z)^2} dz \\
 &= \frac{\epsilon_0 w L V^2}{2} \left[\frac{\delta + (g - \delta) \ln \left(\frac{g - \delta}{g} \right)}{\delta^2 (g - \delta)} \right] \quad (4.18)
 \end{aligned}$$

Ayrıca, Denklem (4.17)'te verilen sonsuz küçük elektrostatik kuvvet ifadesinin pivot noktasına göre momentinin alınmasıyla, sonsuz küçük moment ifadesi elde edilir. Sonsuz küçük elektrostatik kuvvetin, pivot noktasına olan mesafeye ki bu mesafeye “ z_e ” dersek, çarpımından sonsuz küçük moment ifadesi şu şekilde yazılabilir.

$$dM_e = dF_e z = \frac{\epsilon_0 w L V^2}{2} \frac{z^2}{(gL - \delta z)^2} dz \quad (4.19)$$

Eyleyici yapısı için toplam elektrostatik moment ifadesi, (4.19) nolu denklemin eyleyici uzunluğu boyunca integralinin alınmasıyla elde edilebilir. Bu integral ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}
M_e &= \frac{\varepsilon_o w L V^2}{2} \int_{z=0}^L \frac{z^2}{(gL - \delta z)^2} dz \\
&= \frac{\varepsilon_o w L^2 V^2}{2} \left[\frac{2g\delta - \delta^2 + 2g(g - \delta) \ln\left(\frac{g - \delta}{g}\right)}{\delta^3 (g - \delta)} \right]
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Eyleyici boyunca dağılmış toplam elektrostatik kuvvet Denklem (4.18) ve aynı şekilde, eyleyici boyunca dağılmış toplam elektrostatik moment Denklem (4.20) hesaplandıktan sonra, noktasal kabul edilen temsili kuvvet ve moment ifadesi şu şekilde yazılabilir.

$$M_e = F_e z_e \tag{4.21}$$

Burada, z_e noktasal temsili elektrostatik kuvvetin (F_e) pivot noktasına olan uzaklığını ifade etmektedir. Denklem (4.18) ve (4.20) birlikte çözüldüğünde, pivot noktasına uzaklığı ifade eden z_e değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$z_e = \frac{L \left[2g\delta - \delta^2 + 2g(g - \delta) \ln\left(\frac{g - \delta}{g}\right) \right]}{\delta \left[\delta + (g - \delta) \ln\left(\frac{g - \delta}{g}\right) \right]} \tag{4.22}$$

Eyleyici tam çökme durumunda varsayılp, Denklem (4.15)'de bulunan değer; Denklem (4.22)'te yerine yazılırsa temsili noktasal kuvvetin pivot noktasına olan uzaklığı z_e aşağıdaki gibi bulunmuş olur.

$$z_e \Big|_{\delta=0.44g} = 0.73L \tag{4.23}$$

Eyleyici yapısının yay ile ifade edilen geri çekme kuvveti, yapısal olarak tüm eyleyici boyunca etki etmektedir. Fakat bu kuvvetin de matematiksel ifadenin basitliği adına temsili noktasal olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Söz konusu geri çekme kuvveti, temsili noktasal bir kuvvet olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_s = k\delta \left(\frac{z_s}{L} \right) \tag{4.24}$$

Burada, z_s değeri de yay kuvvetinin olması gerektiği noktayı ifade eder. k yay sabitidir ve bir ucu bağlı eyleyici için yay sabiti aşağıdaki gibi ifade edilir [173].

$$k = \frac{2}{3} Ew \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (4.25)$$

Burada; E eyleyicinin yapıldığı malzemenin elastikiyet sabiti (Young's modulus), t üst eyleyicinin kalınlığı, w eyleyicinin genişliği ve L eyleyicinin uzunluğunu ifade eder. Denklem (4.24)'te, Denklem (4.25) yerine konulursa yay kuvveti şöyle yazılır.

$$F_s = \frac{2}{3} Ew \delta \left(\frac{t}{L} \right)^3 \left(\frac{z_s}{L} \right) \quad (4.26)$$

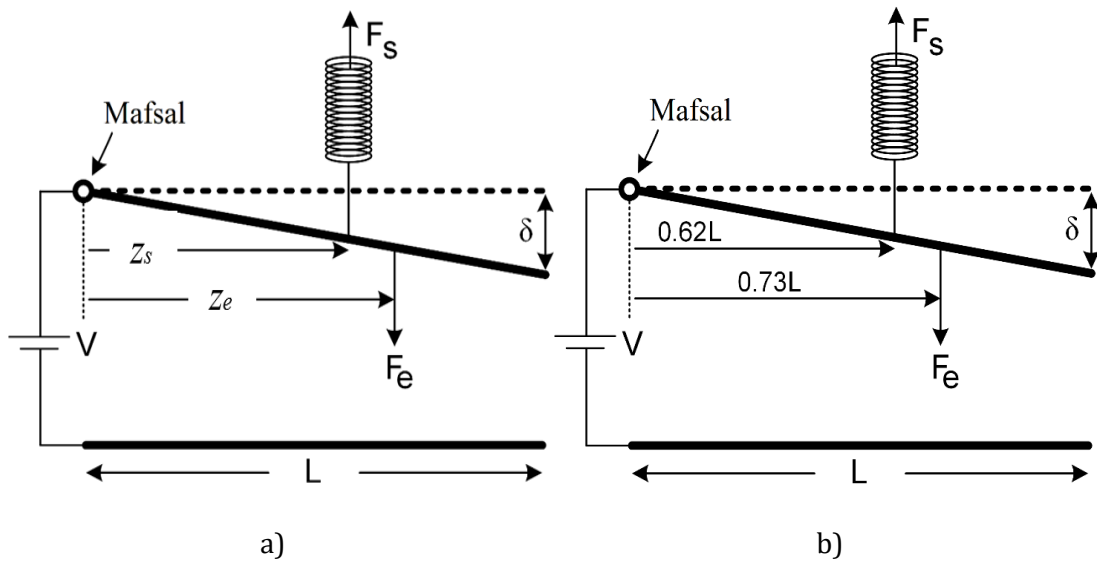
Eyleyici dengedeysen, eyleyiciye etki eden karşılıklı momentlerin eşit olması gerektiğinden, geri çeken yay kuvveti ve elektrostatik kuvvet arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$z_s F_s = z_e F_e \quad (4.27)$$

Burada, Denklem (4.18) ve (4.23)'da elde edilen ifadeler, Denklem (4.26) ile beraber Denklem (4.27)'te yerine yazılırsa; yay kuvvetinin olması gereken yeri ifade eden z_s şöyle bulunur.

$$z_s = 0.62L \quad (4.28)$$

Tüm bulunan değerlerden sonra, eyleyiciye etki eden temsili noktasal elektrostatik ve yay kuvveti ifadelerinin yerleri Şekil 4.9.'daki gibi olur.



Şekil 4.9. Bir ucu bağlı eyleyicinin; a) sembolik ve b) değersel kuvvet noktaları

Model ilk oluşturulmaya başlandığında, bu noktalar rastgele seçilmiş olduğundan voltaj eşitliği doğru sonuç veremezdi, çünkü doğru katsayılara sahip değildi. Fakat gerekli hesaplamalardan sonra oluşturulan model, matematiksel olarak doğru sonuçlar üretecektir. Elde edilen kuvvet noktaları ve değerlerinden yola çıkarak, eyleyici yapısı için doğru sonuçlar verecek voltaj ifadesi daha önce bulunan ifadelerin Denklem (4.23)'te yerine konularak aşağıdaki gibi bulunur.

$$V(\delta) = \frac{21}{25} \left[\frac{Et^3 \delta^3 (g - \delta)}{\varepsilon_0 L^4 \left(\delta - \ln \left(\frac{g}{g - \delta} \right) (g - \delta) \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.29)$$

Denklem (4.13) ve Denklem (4.29)'dan görüldüğü gibi sadece ifadelerdeki katsayılar farklıdır. Dolayısıyla, çökme noktasının durumunda herhangi bir değişim söz konusu değildir. Denklem (4.29)'da elde edilen ifade eyleyicinin çökme noktasına gelene kadarki tüm pozisyonlarında gerekli voltaj değerini verebilecek bir formüldür. Eğer sadece çökme durumu için gerekli voltaj değeri bilinmek istenirse; (4.15) nolu denklemde bulunan değer, Denklem (4.29)'da yerine konularak hesaplanabilir. Çökme durumunda gereken çökme voltajı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{\text{Çökme}} = \frac{27}{50} \left[\frac{Et^3 g^3}{\varepsilon_0 L^4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.30)$$

Çökme voltajı değeri için sadece Denklem (4.30) kullanılmıştır. Çünkü birçok çalışma sadece çökme voltajını verecek formüller geliştirmiştir. Çalışmanın şimdiye kadar olan kısmında bir ucu bağlı eyleyicilerin sadece çökme voltajını verecek Denklem (4.30) değil aynı zamanda çökme pozisyonuna gelene kadar ki tüm konumlarda voltaj hesaplayabilecek bir formül de geliştirilmiştir (4.29). Örneğin; Chowdhury ve arkadaşları [136] çökme voltajı dışında herhangi bir konum için voltaj hesaplayabilecek herhangi bir ifade sunmamışlardır. Yine aynı şekilde O'Brien ve arkadaşları [174] nispeten daha iyi model geliştirmişlerdir fakat yine de hata oranlarını yeterince düşürememişlerdir. Denklem (4.30) kullanılarak elde edilen sonuçlar diğer çalışmalar ile karşılaştırıldığında, elde edilen formülün deneysel ölçüm ve benzetim sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği görülebilir. Tablo 4.2.'de COMSOL benzetim programında örnek bir eyleyici için hesaplanan çökme voltajı ile Pivot modelinden (Denklem 4.30) ve literatürdeki çalışmanın [174] verdiği sonuç yüzde hata oranlarıyla verilmiştir.

Tablo 4.2. Bir ucu bağlı eyleyici için yapılmış çalışmaların karşılaştırılması

Çökme Voltajları (Volt)			COMSOL sonucuna göre % hata oranı	
COMSOL	[174]	Pivot Modeli Denklem (4.30)	[174]	Pivot Modeli Denklem (4.30)
21.17	19.18	21.97	9.40	3.78

($L=160 \mu\text{m}$; $g=2 \mu\text{m}$; $w=6 \mu\text{m}$; $t=2 \mu\text{m}$; $E=150 \text{ GPa}$)

COMSOL benzetim sonuçları temel alındığında, Tablo 4.2.'den de görüldüğü gibi, Pivot modelin literatürde sunulmuş olan bir çalışmadan [174] daha yakın sonuç vermektedir. Polisilikon malzemesi eyleyicilerin üretiminde sıklıkla kullanılan ve oldukça iyi verim alınan standart bir malzemedir [175, 177]. Bu sebeple literatürde yapılan çalışmalarda verilen değişik elastikiyet sabitleri dışında tüm benzetim sonuçlarında, vakum altında kimyasal buhar kaplama tekniğiyle üretilen polisilikonun ortalama elastikiyet sabiti olan 170 GPa [177] değeri temel alınmıştır. Tablo 4.3. ve Tablo 4.4.'te ANSYS ve COMSOL'da yapılan benzetimler ve Pivot denkleminle hesaplanan değerlerin karşılaştırılması ve yüzde hatalar ile bunların ortalaması olan Ortalama Yüzde Hata (OYH) verilmiştir.

Tablo 4.3. Değişik uzunluklar için benzetimlerin karşılaştırılması

Eyleyici Uzunluğu (μm)	Çökme voltajı değerleri (Volt)			Pivot ile % hata oranları	
	Pivot Modeli Denklem (4.30)	ANSYS	COMSOL	ANSYS	COMSOL
150	26.619	27.341	27.070	2.712	1.694
200	14.973	15.418	15.240	2.972	1.783
250	9.583	9.899	9.760	3.298	1.847
300	6.655	6.828	6.780	2.600	1.878
400	3.743	3.860	3.820	3.126	2.057
500	2.396	2.472	2.450	3.172	2.254

OYH

2.98

1.92

($g = 2 \mu\text{m}$; $w = 50 \mu\text{m}$; $t = 2 \mu\text{m}$; $E = 170 \text{ GPa}$)

Tablo 4.3.'den de görüldüğü gibi, bir ucu bağlı eyleyici için yapılan benzetim çalışmaları ve Pivot modelinden elde edilen denklemin verdiği sonuçlardan daha iyi bir şekilde uyumaktadır. Fakat daha fazla karşılaştırma yapılarak, denklemin güvenilirliği test edildi. Bu karşılaştırmaların bir kısmı yapılan benzetim sonuçlarıyla, bir kısmı da literatürde yapılmış olan deneysel çalışma sonuçlarıyla yapıldı.

Tablo 4.4.'den görüldüğü gibi, bir ucu bağlı eyleyici için başlangıç açıklığından başlayarak çökme limitine gelene kadar yapılan voltaj testlerinde benzetim sonuçları ve Pivot modelinden elde edilen sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum gözlenmektedir. Bu uyumun sadece çökme

voltajı denklemi olan (4.30) için değil, çökme durumuna gelene kadarki tüm konumları hesaplamada kullanılabilen Denklem (4.29) için de geçerli olduğu görülmüştür.

Tablo 4.4. Bir ucu bağlı eyleyicinin benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

Deformasyon (μm) (% δ/g)	Hesaplanan Voltaj Değeri (Volt)			Pivot ile % hata oranları	
	Pivot Modeli Denklem (4.29)	ANSYS	COMSOL	ANSYS	COMSOL
0.0583 (%02.91)	09.797	10.0	09.85	2.075	0.544
0.1386 (%06.93)	14.689	15.0	14.78	2.119	0.621
0.2714 (%13.57)	19.574	20.0	19.72	2.178	0.747
0.5165 (%25.83)	24.431	25.0	24.68	2.328	1.018
0.6028 (%30.14)	25.387	26.0	25.70	2.414	1.233
0.7419 (%37.10)	26.324	27.0	26.69	2.566	1.389
0.7654 (%38.27)	26.417	27.1	26.80	2.586	1.450
0.7963 (%39.82)	26.512	27.2	26.91	2.597	1.503
0.8146 (%40.73)	26.553	27.25	26.97	2.624	1.569
0.8808 (%44.04)	26.619	27.341	27.07	2.712	1.694
OYH				2.42	1.18

($L = 150 \mu\text{m}$; $g = 2 \mu\text{m}$; $w = 50 \mu\text{m}$; $t = 2 \mu\text{m}$; $E = 170 \text{ GPa}$)

Tablo 4.4.'te görülen karşılaştırmalar benzetim çalışmalarıyla yapıldığı için, deneysel çalışmalar ile yapılan karşılaştırmalar denklemin, geçerliliğini pekiştirmiş olacaktır. Bu sebeple literatürdeki deney sonuçlarıyla ve hesaplama yöntemleriyle de karşılaştırma yapılacaktır. Burada söz konusu hesaplama yöntemleri [1, 135] oldukça zahmetli ve hesaplaması zaman alan yöntemlerdir. Bu sebeple Pivot modelinin denklemi hem kolay hem de yakın sonuçlar verdiği için önceki çalışmalara göre oldukça kullanışlı ve avantajlıdır [171].

Tablo 4.5.'ten de görüldüğü gibi, deneysel sonuçlar temel alındığında da Pivot modeli diğer zahmetli hesaplama yöntemlerinden [1, 135] daha yakın sonuçlar vermektedir. Ayrıca söz konusu deneysel çalışmada çökme voltajı değeri olarak 68.5 V ölçüldüğü belirtilmiştir. Pivot modelinin denklemiyle çökme voltajı hesaplandığında çökme voltajı 68.1 V bulunmuştur. Bu da gösterir ki, %0.6 gibi bir hata oranıyla çökme voltajı ve ortalama %0.52 hata ile de çökme konumuna kadar olan tüm konum değerleri için gerekli voltaj hesaplanabilmektedir. Özellikle dikkat çekilmesi gereken nokta, çökme durumuna yaklaştıkça Pivot modelinin hata oranlarının düştüğü ve bu sayede kritik değer olan çökme voltajının daha az hatayla hesaplanabildiğidir.

Tablo 4.5. Bir ucu bağlı eyleyici için yapılan benzetimlerin karşılaştırılması

Voltaj (Volt)	Plakalar arasında kalan mesafe ($g-\delta$, μm)				Deneysel [135] ve % hata oranları		
	Deneysel [135]	Hesaplamalar (Volt)			[1]	[135]	Denklem (4.29)
		[1]	[135]	Denklem (4.29)			
20	90.5	90.2	90.2	90.3	0.3	0.3	0.2
40	84.6	84.1	84.3	84.7	0.6	0.4	0.1
60	70	69.1	71.5	71.3	1.3	2.1	1.9
65	64	59.6	67.2	64.1	6.9	5.0	0.2
67	59	-	65.0	59.1	-	10.2	0.2
OYH					2.28	3.60	0.52

($L = 20 \text{ mm}$; $w = 5 \text{ mm}$; $t = 57 \mu\text{m}$; $g = 92 \mu\text{m}$; $E = 156 \text{ GPa}$)

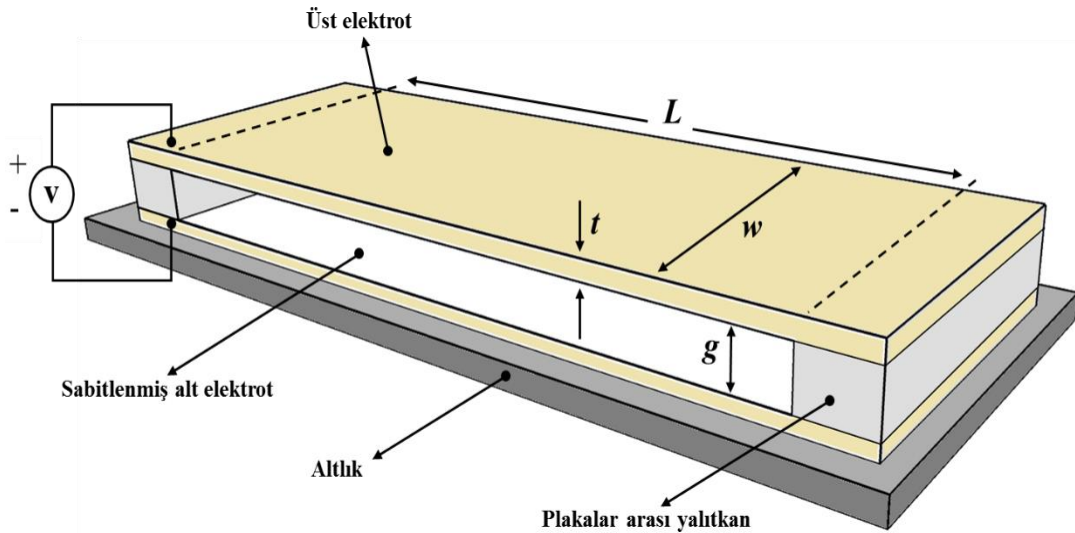
Çalışmanın şu ana kadarki kısmında, bir ucu bağlı eyleyicilerin modellenmesi ve modelden çökme voltajını verecek matematiksel ifadenin çıkarımı yapılmıştır. Elde edilen matematiksel ifadenin hassasiyeti ve güvenilirliğinin test edilmesi açısından, sırasıyla benzetim çalışmaları ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Öncelikle, eyleyiciler için kritik öneme sahip çökme noktasının belirlenmesi, elde edilen denklemden çıkarıldı. Çökme noktası değeri, elektrotlar arasındaki başlangıç değerinin %44.04'ü bulunarak, deney ve benzetim (ANSYS ve COMSOL) sonuçlarıyla onaylandı. Daha önce Lumped modelden elde edilen çökme noktası %33.3 olarak bulunmuştu, bu değer yeterince iyi bir yaklaşım olmadığı görüldü. Ayrıca, Pivot modelinin Denklem (4.15)'de bulunan çökme notasını iyi tahmin etmekle kalmayıp, Denklem (4.30)'dan hesaplanan çökme voltajını ve Denklem (4.29)'dan hesaplanan çökme durumuna kadar olan kararlı tüm konumlarda da diğer hesaplama yöntemlerine [1, 135, 174] göre hem zahmetsiz hem de daha hassas sonuçlar verdiği benzetim (ANSYS ve COMSOL) sonuçları ve deneysel [135] verileriyle gösterildi. [170].

4.3. İki Ucu Bağlı Eyleyiciler İçin Formül Çalışmaları

İki ucu bağlı elektrostatik MEMS eyleyiciler sahip oldukları yüksek hassasiyet, küçük boyutlar, düşük güç tüketimleri ve yeni tasarımlarla kolay üretilebilmeleri gibi avantajları dolayısıyla oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Kullanım alanlarından bazıları; mikro elektromekanik varaktör [178], kardiyovasküler kateter için kan basıncını ölçecek kapasitif basınç sensörü [179], kütle sensörü [180], RF mikro anahtar [181, 182], enerji toplayıcı MEMS aygıt [168], ve küçük güç detektörü [183] gibi alanları kapsamaktadır.

Çalışmanın bu kısmında, iki ucu bağlı elektrostatik MEMS eyleyicilerin çökme noktası, çökme voltajı ve çökme noktasına kadar olan tüm konumları için gereken voltaj değerini

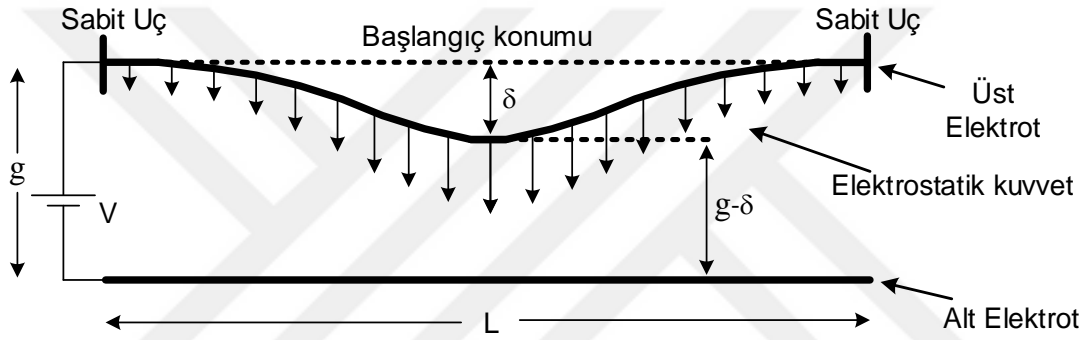
hesaplayabilecek matematiksel bir ifade geliştirildi. Sonrasında, deneysel [184] ve benzetim çalışmaları ile elde edilen ifadelerin geçerliliği ve hassasiyeti test edildi. İki ucu bağlı eyleyiciler Şekil 4.10.'dan da görüldüğü gibi, birbirine paralel duran ve başlangıçta aralarında g kadar açıklık bulunan iki adet iletken elektrottan meydana gelmektedirler. Bu elektrotlardan bir tanesi tümüyle sabit olup hiç bir şekilde hareket edemezken; diğeri iki uçtan sabitlenmiş olup, hareket kabiliyetine sahiptir. Buradaki söz konusu hareket mekanik anlamda bir deformasyondan ileri gelmektedir. İki ucu bağlı eyleyicide bu deformasyon orta noktada meydana gelmektedir. Bir ucu bağlı eyleyicide ise bu durum serbest olan uçta oluşmaktadır. Eyleyicinin elektrotlarına DC bir voltaj uygulandığında, elektrostatik çekim kuvvetinden dolayı üst elektrot alttaki elektrota doğru deformasyona uğrayarak yaklaşmaktadır. Deforme olmaya başlayan üst elektrot yapısı gereği üzerine etkiyen kuvvete direnç göstermekte ve başlangıç konumuna geri gelmeye çalışmaktadır. Uygulanan voltaj arttıkça deformasyon da artmakta ve elektrotlar arasındaki mesafe gitgide kapanmaktadır. Mesafe kapandıkça, elektrostatik kuvvet üssel olarak artmaya devam etmektedir, fakat dengeleyici mekanik kuvvet aynı oranda artmamaktadır. Bu sebeple kritik bir noktadan sonra, üstteki elektrot, alt elektrot üzerine çökerek yapının bozulmasına neden olmaktadır. Çökmenin gerçekleştiği bu nokta çökme noktasıdır ve bu noktada uygulanmış olan voltaj değeri de çökme voltajıdır. Üst elektrotun söz konusu elektrostatik kuvvet altındayken uğradığı deformasyon, Şekil 4.11.'de görülmektedir. Eyleyicinin üst elektrotunun sabitlendiği noktalarda, sıfır-açı ve sıfır-hareket sınır koşulları mevcuttur.



Şekil 4.10. İki uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin şematik gösterimi

İki ucu bağlı eyleyici, bir ucu bağlı eyleyiciden farklı olarak serbest olduğu herhangi bir uç olmadığından, eyleyici elektrotları arasına voltaj uygulandığında orta noktadan deformasyona

uğramaktadır. Dolayısıyla, oluşan deformasyonu matematiksel olarak ifade etmek, oluşan doğrusal olmayan durumun daha karmaşık olmasından dolayı nispeten daha zor olmaktadır. İki ucu bağlı eyleyici için yapılan yaklaşım modeli iki bölümden oluşmaktadır. Öncelikle, elektrostatik eyleyicinin bir önceki bölümde olduğu gibi modellenmesi yapılacak ve analitik olarak matematiksel ifadesi elde edilecek, sonrasında; iki ucu bağlı eyleyicilere has olan artık stres durumunun elde edilen matematiksel ifadeye eklendi. Artık stresin var olmadığı eyleyici durumları için, ilk elde edilen matematik ifade oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Fakat üretim sırasında eyleyici üzerinde artık stres oluştuğu zaman çökme durumunu ve çökme voltajını ilk ifade ile doğru hesaplamak kolay olmamaktadır. Bu sebeple, artık stres durumunun oluştuğu durumları da hesaplayabilmek için denklemlerde gerekli değişikliklerin yapılması gerekir.



Şekil 4.11. İki uçtan bağlı eyleyicinin elektrostatik kuvvet altındaki durumu

Bir ucu bağlı eyleyicide olduğu gibi burada da, çökme noktasının tespiti oldukça önem arz etmektedir. Bu değer, elektrotlar arasındaki başlangıç mesafesinin yaklaşık %40'ı olarak bulundu ve ayrıca, çökme voltajının ve çökme noktasına kadar olan tüm konumlar için gereken voltajı verecek denklem ifadesi de elde edilerek çeşitli eyleyici boyutları için hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, benzetim ve deneysel verilerle karşılaştırılarak test edildi [184].

4.3.1. Dört Pivot Modeli ve Formül İfadesi

İki ucu bağlı eyleyici için çökme voltajı ve çökme değerini tahmin etmek oldukça hayati öneme sahiptir. Ancak, mikro boyutta meydana gelen mekanik girişim olayı ve eyleyicinin doğrusal olmayan davranışlarından dolayı çökme değerini ve çökme voltajını kestirebilmek ve matematiksel olarak ifade etmek oldukça zor olmaktadır. Bugüne kadar iki ucu bağlı elektrostatik MEMS eyleyiciler için, çökme noktasını ve çökme voltajını hesaplayabilmek için birçok metot geliştirilmiş ve birçok çalışma yapılmıştır [1, 45, 86, 135, 136 185-188]. Ancak bu çalışmaların çoğunda, değişik çökme noktaları bulmuşlardır. Fakat iki ucu bağlı eyleyicinin 3B olarak; SEM

tabanlı COMSOL programında benzetimlerinin yapılmasıyla çökme noktasının başlangıç mesafesinin yaklaşık %40'ı olduğu görülmüştür. Bu değer ayrıca, yapılmış deneysel çalışmalar [1, 120, 189] ile de uyumludur. Tablo 4.6. polisilikon parametreleri kullanılarak değişik başlangıç açıklıklarına sahip iki ucu bağlı eyleyicileri için yapılmış benzetim çalışmalarını göstermektedir. Tablo 4.6.'dan da görüldüğü gibi, başlangıç açıklıkları değişse de, çökme noktasının başlangıç açıklığına oranı değişmemektedir. Bu oran iki ucu bağlı eyleyici için yaklaşık %40 bulunmuştur. Ayrıca, bu oran eyleyicinin diğer parametrelerinden bağımsızdır.

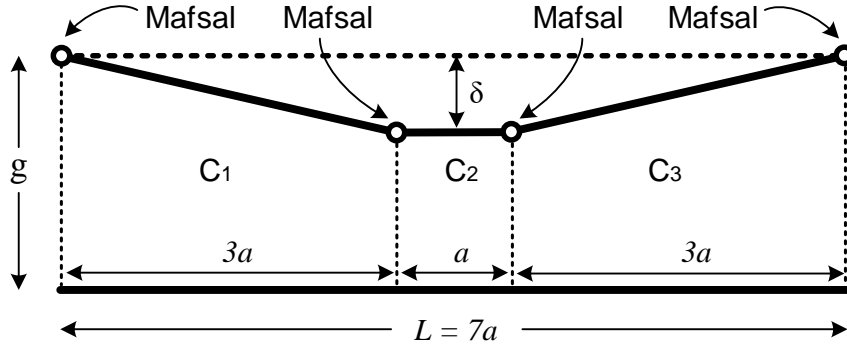
Tablo 4.6. Değişik başlangıç mesafeleri için çökme oranı benzetim sonuçları

Plakalar Arası Başlangıç Mesafesi (g , μm)	Çökme Noktası (δ , μm)	Başlangıç Mesafesi/Çökme Noktası (δ/g)
2	0.797	0.3985
4	1.594	0.3985
5	1.992	0.3984
10	3.984	0.3984

($L = 200 \mu\text{m}$; $w = 50 \mu\text{m}$; $t = 1 \mu\text{m}$; $E = 160 \text{ GPa}$; $\nu = 0.22$)

Sonraki kısımda; iki ucu bağlı eyleyicinin sadece çökme noktasındaki voltajını değil, aynı zamanda çökme noktasına kadar olan tüm konumlar için voltaj hesabını yapabilecek matematiksel bir ifadenin oluşturulması ele alındı. Şekil 4.10.'da eyleyicinin gerçek deformasyon hareketini modelleyen yapının matematiksel olarak ifade edilmesi, yapının doğrusal olmayışından ötürü oldukça zordur. Bu sebeple, modelin bazı yaklaşımlarla basitleştirilmesi ile daha basit bir matematiksel ifade ortaya çıkarıldı. Üst elektrotun, dört adet pivot noktasına bağlı hareket eden üç bölümden oluştuğu varsayıldı.

Eyleyicinin sabitlendiği noktalarda birer adet olmak üzere, ortaya yakın bölgede ise kalan iki adet pivot yer aldı. Sabit noktalardaki, pivot noktaları sadece dönme sağlayacak ve yukarı-aşağı veya sağa-sola hareket edemeyeceği varsayıldı. Orta bölümdeki, iki adet pivotun bağlı olduğu düz kısım ise; sadece eyleyicinin hareketine bağlı olarak aşağı-yukarı hareket edebileceği varsayıldı. Şekil 4.12. eyleyicinin 4 adet pivot ile basitleştirilmiş modelini ve pivot noktalarını göstermektedir. Eyleyicinin toplam uzunluğu, $7a$ olarak ifade edilmiş ve sadece yukarı-aşağı hareket edebilen düz kısmın uzunluğu a , simetrik eğimli kısımlar ise $3a$ uzunlukta olacak ve bükülmeden hareket edecek şekilde düşünülmüştür. Yapının bu şekilde modellenmesi ve uzunluk oranlarının seçimi, benzetim ve deneysel verilerden yola çıkılarak ve farklı birçok değerler denenerek belirlenmiştir.

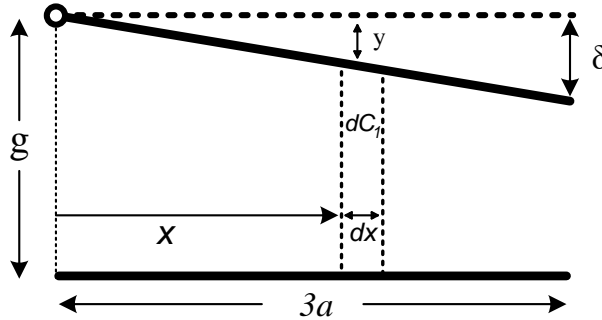


Şekil 4.12. İki uçtan bağlı eyleyicinin dört pivotlu modeli

Yeni model sabit noktalarda, sıfır-açı koşulunu sağlamasa da, sıfır-hareket koşulunu yerine getirmektedir. Yeni model Çoklu Pivot Modeli (ÇPM) olarak adlandırılmıştır. Modeldeki pivot noktaları, sistemi basitleştirebilmek adına oluşturulmuştur. Bu sebeple, benzetim ve deneysel veriler temel alınarak empirik yöntem ile istenen sonuçlara göre sistem kurgulanmıştır. Yapılan birçok deneme ile eyleyicinin uzunluğunun 7 eşit parçadan oluştuğu varsayılmış ve bir parçası orta kısımda bulunan düz kısım için ayrılmış, kalan 6 parça ise eşit ve simetrik olacak şekilde eğimli bölümlere paylaştırılmıştır. Bu sebeple, yan bölümler 3 parçaya denk gelecek uzunlukta olmuşlardır. Tüm bu modelleme ve varsayımlardan sonra, sistemin kapasitanslarının hesaplanması aşamasına gelinmiştir. $L/7$ uzunluğunda olan düz orta kısmın kapasitans değeri C_2 aşağıdaki gibi kolayca hesaplanır.

$$C_2 = \frac{1}{7} \frac{\epsilon_0 w L}{(g - \delta)} \quad (4.31)$$

Yan bölümlerin kapasitans değerleri simetriden dolayı eşit olacaktır. Fakat eğimden dolayı hesaplanması düz kısım kadar kolay olmayacaktır. Eşit olan kenar kısımlarından bir tanesinin kapasitans değeri Şekil 4.13.'deki yapıdan hesaplanacaktır.



Şekil 4.13. Eğimli ve simetrik yapıdaki bölümlerin kapasitans değeri

C_1 değerindeki eğimli kısmın kapasitansı, paralel plaka kapasitans gibi varsayılan sonsuz küçük dC_1 kapasitanslarının integralenmesiyle bulunur. Şekil 4.13.'den yola çıkarak, sonsuz küçük kapasitans değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$dC_1 = \varepsilon_0 \frac{dA}{g - y} \quad (4.32)$$

Burada, dA değeri sonsuz küçük kapasitansın sonsuz küçük alanını ifade etmektedir ve $w dx$, değerine eşittir. w değeri kapasitans kısmının genişliği, dx ise sonsuz küçük uzunluğunu ifade etmektedir. Denklem (4.32)'deki y ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$y = \delta \frac{x}{3a} \quad (4.33)$$

Burada, δ uygulanan voltaj sonucu uç kısımda meydana gelen deformasyon mesafesini ifade etmektedir ve aynı zamanda düz kısmın deformasyon miktarına eşittir. Bu sebeple, Denklem (4.32) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$dC_1 = 3a\varepsilon_0 \left(\frac{w}{3ag - gx} \right) dx \quad (4.34)$$

Böylelikle, C_1 kapasitansının değeri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$C_1 = \int dC_1 = 3a\varepsilon_0 w \int_{x=0}^{3a} \frac{dx}{3ag - gx} \quad (4.35)$$

Burada, a değeri yerine konulduğunda; C_1 ve C_3 kapasitans değerleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$C_1 = C_3 = \frac{3}{7} \frac{\varepsilon_0 w L}{\delta} \ln \left(\frac{g}{g - \delta} \right) \quad (4.36)$$

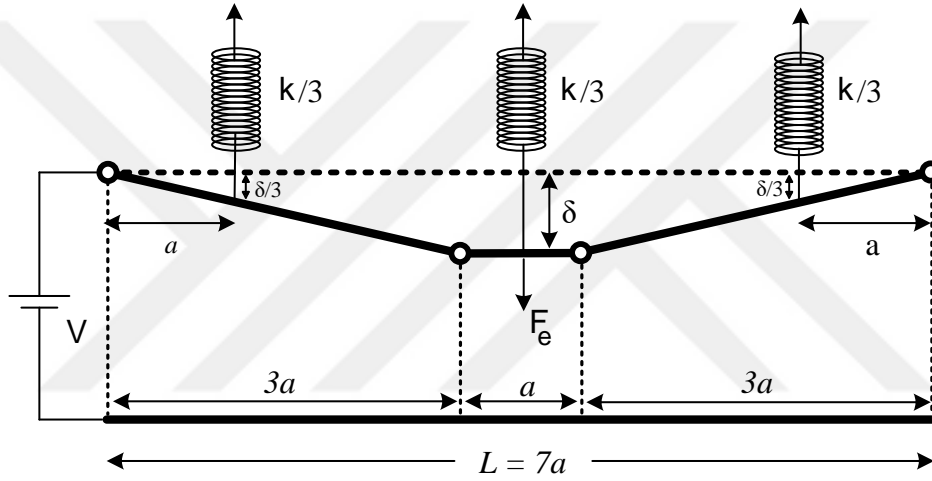
Gerçek bir eyleyicide uygulanan voltajdan kaynaklı elektrostatik kuvvet doğrusal değildir ve düzgün dağılmamıştır. Bu sebeple, elektrostatik kuvvet temsili olarak noktasal varsayılmadıkça; model için basit bir matematiksel ifade elde etmek oldukça güç olacaktır. Dolayısıyla, elektrostatik kuvvet temsili olarak noktasal varsayıldı ve modelde uygun yere yerleştirildi. Elektrostatik kuvvetin, alt elektrota en yakın noktada en büyük değerde olacağından ve sistemin simetrik yapısından dolayı eyleyicinin orta kısmında yer alan düz kısmında yer aldığı, kötü bir varsayım olmamaktadır.

Modelde basitliği koruyabilmek için, elektriksel kaçış alanları (fringing field) göz ardı edilmiştir. Ayrıca, elektrostatik kuvveti dengelemek için; temsili yay kuvvetleri de uygun

noktalara yerleştirilmiştir. Bu noktalar, benzetim ve deneysel sonuçlar baz alınarak seçilmiştir. Modelde istenen sonuçların elde edilmesi için yay kuvveti tek nokta yerine, üç ayrı kısma bölünmüştür. İki adet yay simetrik olarak, sabit noktalara “ a ” kadar yani $L/7$ uzaklığa, sonuncusu ise tam orta noktaya yerleştirilmiştir. Şekil 4.14.’te hem elektrostatik kuvvetin hem de yay kuvvetlerinin yerleri görülebilir. Sonsuz küçük elektrostatik kuvvet ifadesi şöyle yazılabilir.

$$dF_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{d\delta} \quad (4.37)$$

Burada, C değeri; V voltajı uygulanan yapının toplam kapasitans değerini ifade etmektedir. Buna göre, elektrostatik kuvvet aşağıdaki gibi bulunabilir.



Şekil 4.14. Temsili kuvvetlerinin konumları ve gösterimleri

$$F_e = -\frac{\epsilon_0 w L}{14} \left(\frac{5\delta^2 - 6\delta g + (6\delta^2 + 6g^2 - 12\delta g) \ln\left(\frac{g}{g-\delta}\right)}{\delta^2 (g-\delta)^2} \right) V^2 \quad (4.38)$$

Ve yay sabiti, “ k ” iki ucu bağlı eyleyici için şu şekilde ifade edilir [173].

$$k = 32 \hat{E} w \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (4.39)$$

Burada;

$$\hat{E} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \quad (4.40)$$

Burada, E , ν ve t sırasıyla; malzemenin elastikiyet sabitini, uzama katsayısını ve eyleyicinin kalınlığını ifade etmektedir. E yerine \hat{E} kullanılarak, denklemin geniş eyleyiciler ($w \geq 5t$) [120] için de geçerli sonuçlar vermesi sağlandı. Yay kuvveti üç kısma bölüdüğü için, her bölümün yay sabiti üçte bir değerinde olacaktır. Modelin geometrik yapısından da anlaşılacağı üzere orta kısımda olan yay δ kadar gerildiğinde, kenardaki yaylar $\delta/3$ kadar gerilmiş olur. Buradan yola çıkarak, yay kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_s = \delta \left(\frac{k}{3} \right) + 2 \left(\frac{\delta}{3} \right) \left(\frac{k}{3} \right) = \frac{160}{9} \frac{\delta E w}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (4.41)$$

Modelde kuvvetler dengede olduğunda, aşağı doğru etki eden kuvvetler ile yukarı doğru etki eden kuvvetler birbirine eşit olmak durumundadır, bu sebeple; Denklem (4.38) ve Denklem (4.41)'in eşitliğinden aşağıdaki ifade ortaya çıkar.

$$-\frac{\varepsilon_0 w L}{14} \left(\frac{5\delta^2 - 6\delta g + (6\delta^2 + 6g^2 - 12\delta g) \ln \left(\frac{g}{g-\delta} \right)}{\delta^2 (g-\delta)^2} \right) V^2 = \frac{160}{9} \frac{\delta E w}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (4.42)$$

Denklem (4.42)'den voltaj ifadesi eşitliğin bir tarafına alındığında, eyleyici için voltaj sonuçlarını verecek ifade şu hale gelir.

$$V = \left(\frac{2240}{9} \frac{-Et^3 \delta^3 (\delta - g)^2}{\varepsilon_0 L^4 (1-\nu^2) \left(\ln \left(\frac{g}{g-\delta} \right) (6\delta^2 + 6g^2 - 12\delta g) + 5\delta^2 - 6\delta g \right)} \right)^{(1/2)} \quad (4.43)$$

Denklem (4.43) sadece çökme durumu için gerekli voltajı değil, çökme durumuna gelene kadarki tüm açıklıkta gerekli voltaj değerlerini hesaplayabilecek bir formüldür. Bu formülden elde edilen sonuçlar COMSOL benzetim sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, formülün geçerliliği ve güvenilirliği daha iyi görülmüş olur. Tablo 4.7.'dan görüldüğü gibi örnek bir eyleyici parametreleri baz alındığında; formül sonuçları ve COMSOL benzetimleri arasında OYH %1'in altında kalmaktadır. Birçok MEMS sensör açık/kapalı konumunda çalıştığından, eyleyicilerin çökme noktasını ve çökme voltajını doğru hesaplayabilmek; eyleyicinin üretilmeden önce sahip olacağı hareket aralığı veya çalışma voltajını bilmek açısından oldukça önem taşımaktadır. Çökme noktası, Denklem (4.43)'un δ 'ya göre türevinin alınıp, sıfıra eşitlenmesi ile bulunabilir. Bulunacak bu nokta çökme noktası [86] ve çökme noktasında uygulanan voltaj değeri ise çökme voltajı olarak adlandırılmaktadır. Uygulanan voltaj değeri çökme voltajını geçtiğinde, çökme noktası aşılmış olur ve hemen sonra eyleyici kararsız hale geçip, alt elektrotun üzerine çöker.

Tablo 4.7. COMSOL ve Denklem (4.43) sonuçlarının karşılaştırılması

Deformasyon (μm)	Uygulanan Voltaj Değeri (Volt)		COMSOL ve Denklem (4.43) % hata
	COMSOL	Denklem (4.43)	
0.0116	5	04.96	0.97
0.0493	10	09.91	0.93
0.0739	12	11.89	0.90
0.1062	14	13.88	0.85
0.1496	16	15.87	0.80
0.1775	17	16.86	0.82
0.2125	18	17.86	0.80
0.2594	19	18.84	0.85
0.3445	20	19.81	0.98
0.3891	20.19	19.96	1.14
OYH			0.90

$$(L = 350 \mu\text{m}; g = 1 \mu\text{m}; t = 3 \mu\text{m}; E = 169 \text{ GPa}; \nu = 0.06)$$

Denklem (4.43) gerekli türev işlemine tabi tutulduktan sonra, elde edilen ifadenin sadece pay kısmı alınıp sifıra eşitlenerek, çökme noktası bulunur. İfadenin paydası kökleri etkilemediğinden hesaba katılmayacaktır. Türevi alınmış ifadenin pay kısmında kökleri verecek bölüm aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$18 \ln \left(\frac{g}{g - \delta} \right) (g - \delta)^3 - \delta (2g - 3\delta)(9g - 7\delta) = 0 \quad (4.44)$$

Denklem (4.44)'ün analitik çözümü çok kolay olmadığından, ifadenin numerik çözümü yapılmış ve gerekli kök aşağıdaki gibi bulunmuştur. Bulunan bu ifade iki ucu bağlı eyleyici için, çökme noktasını ifade etmektedir.

$$\delta_{\text{Çökme}} \cong 0.4g \quad (4.45)$$

Denklem (4.45) yani elde edilen çökme noktası ifadesi, Denklem (4.43)'da yerine konulursa; çökme voltajını verecek ifade elde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_{\text{Çökme}} = \sqrt{\frac{7218}{625} \frac{Eg^3t^3}{(1 - \nu^2)\epsilon_0 L^4}} \quad (4.46)$$

Denklem (4.46), eyleyiciye uygulanabilecek azami voltaj değerini yani çökme voltajını vermektedir. Bu değerden daha yüksek potansiyel farklar üst elektrotun çökmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla, çökme voltajını bilmek, eyleyicinin tasarımı ve kullanımı için büyük önem taşımaktadır.

4.3.2. Dört Pivot Modeline Artık Stres İfadesinin Yerleştirilmesi

Yapılan benzetim sonuçları baz alındığında, üretim aşamasında üzerinde herhangi bir artık stres oluşmadığı varsayılan eyleyiciler için, çökme voltajının hesaplanmasında Denklem (4.46) oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Fakat Denklem (4.46) ifadesinde artık stresin hesaba katılacağı herhangi bir değişken bulunmadığından, artık stres olduğu varsayılan eyleyicilerin çökme voltajı hesaplamasında, benzetim sonuçlarına kıyasla büyük sapmalar ortaya çıkmaktadır.

Denklem (4.46)'ye artık stres ifadesini analitik olarak yerleştirmek mümkün değildir çünkü artık stres durumu; eyleyicinin fiziksel üretim aşamasında ortaya çıkan bir durumdur. Bu sebeple, benzetim sonuçları ve deneysel veriler göz önüne alınarak; istenen sonuçlara göre artık stres ifadesi empirik olarak Denklem (4.46)'ye yerleştirilmiştir. Artık stres (σ) ifadesinin denkleme eklenmesinden sonra, denklem aşağıdaki hale dönüşmüştür.

$$V_{\text{çökme}} = \left(\frac{\left(\sigma t \left(\frac{t}{L} \right)^{1.1} + \frac{65}{9} \frac{E g t^3}{(1-\nu^2) L^3} \right)}{\frac{61 \varepsilon_0 L}{99 g^2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.47)$$

Artık stres etkisinin çökme voltajı üzerindeki etkisini göstermek amacıyla, Tablo 4.8.'de verilen eyleyici parametreleri için; artık stres ifadesinin yer almadığı Denklem (4.46) ve artık stres ifadesinin yer aldığı Denklem (4.47) kullanılarak çökme voltajları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Tablo 4.9.'dan da görüldüğü gibi daha önce literatürde sunulmuş ve oldukça karmaşık hesaplama yöntemleri kullanan çalışmalar [1, 120, 136] ve deneysel olarak geçerliliği gösterilmiş olan CoSolve benzetim [120] verileriyle karşılaştırılmış ve yüzde hata oranları belirtilmiştir.

Tablo 4.8. Çeşitli artık stres (σ) değerlerine sahip eyleyici parametreleri

Eyleyici Parametreleri	1	2	3	4	5	6
Uzunluk (μm)	250	250	250	350	350	350
Artık Stres (MPa)	0	100	-25	0	100	-25

($w = 50 \mu\text{m}$; $t = 3 \mu\text{m}$; $g = 1 \mu\text{m}$; $E = 169 \text{ GPa}$; $\nu = 0.06$)

Tablo 4.9.'dan görüldüğü gibi, pozitif artık stres değeri çökme voltajını arttırırken; negatif artık stres değeri ise düşürmektedir. Fakat Denklem (4.46) artık stres değerini ifade eden herhangi bir değişken içermediğinden artık stres değişimlerine karşı duyarlılık gösterememektedir.

Denklem (4.46) yerine oluşturulan Denklem (4.47), içerdiği değişken sayesinde; artık stres değişimlerine uygun sonuçlar üretmiştir. Tablo 4.9. Denklem (4.46) ve (4.47)'den elde edilen sonuçların, deneysel olarak onaylanmış benzetim sonuçlarına göre yüzde hatalarını göstermektedir.

Bu sonuçlara göre, artık stres değeri sıfır olan eyleyiciler için, her iki denklem de yakın ve düşük hata oranlarına sahip iken, artık stres değeri sıfırdan farklı olan eyleyiciler karşılaştırmaya dahil edildiğinde Denklem (4.46)'nın ortalama hata oranı %23.76'ye çıkmakta, Denklem (4.47)'nin hata oranı ise ortalama %1.19'da kalmaktadır. Bu sonuçlar da göstermektedir ki, Denklem (4.47) içerdiği artık stres ifadesi sayesinde benzetim verilerine göre daha doğru sonuçlar vermektedir.

Denklem (4.47)'nin geçerliliği ve güvenilirliğini daha fazla göstermek adına; çeşitli boyut ve parametreler denenerek COMSOL programında polisilikon malzemeden oluşan eyleyiciler için benzetimler yapılmış ve neticeleri, Denklem (4.47)'den hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.9. Artık stres (σ) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması

Eyleyici Numarası	CoSolve [120] Benzetim	Hesaplama yöntemleri (Volt)			Denklemler (Volt)	
		[1]	[120]	[136]	(4.46)	(4.47)
1	40.10	39.13	39.50	39.60	39.13	39.42
2	57.60	57.62	56.90	57.40	39.13	57.03
3	33.60	33.63	33.70	33.71	39.13	33.61
4	20.30	20.36	20.20	20.20	19.96	20.11
5	35.80	35.99	35.40	35.91	19.96	35.25
6	13.70	13.60	13.80	13.71	19.96	13.97
Eyleyici Numarası	-	Hesaplama yöntemleri ve CoSolve benzetim [120] verileri arasındaki % hatalar				
		[1]	[120]	[136]	(4.46)	(4.47)
1	-	2.41	1.50	1.25	2.41	1.70
2	-	0.03	1.22	0.35	32.07	0.99
3	-	0.09	0.30	0.33	16.46	0.03
4	-	0.30	0.50	0.50	1.67	0.94
5	-	0.53	1.11	0.31	44.25	1.54
6	-	0.73	0.73	0.07	45.69	1.97
OYH		0.68	0.89	0.47	23.76	1.19

Tablo 4.10.'dan görüldüğü gibi, çeşitli boyutlara ve değişik artık stres değerlerine sahip eyleyiciler için yapılan benzetimler neticesinde elde edilen veriler ve Denklem (4.47)'den hesaplanan sonuçlar ortalama %2.55 hata oranıyla uyusmaktadır.

Özellikle başlangıç açıklık (g) mesafesi az olan eyleyici durumları için, hata değerleri daha da düşük çıkmaktadır. Bu da, Denklem (4.47)'te elde edilen ifade oldukça yakın sonuçlar verebilen güvenilir bir formül olduğunu göstermektedir.

Elde edilen formülün her açıdan test edilebilmesi ve geçerliliğinin onaylanması için, Tablo 4.11.'de verilmiş olan eyleyici parametrelerine göre COMSOL benzetimleri yapılmış ve aynı parametreler kullanılarak denklem sonuçları hesaplanarak aynı Tabloda karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.10. Artık stres (σ) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması

Artık Stres σ (MPa)	Eyleyici Boyutları (μm)			Çökme Voltajı (Volt)		COMSOL & (4.47) % Hata
	Uzunluk (L)	Kalınlık (t)	Açıklık (g)	COMSOL	Denklem (4.47)	
0	100	2	1	134.70	132.53	1.61
-25	100	2	1	130.30	127.74	1.96
100	100	2	1	150.00	150.18	0.12
0	200	2	1	33.60	33.13	1.40
-25	200	2	1	29.00	28.40	2.07
100	200	2	1	47.50	47.55	0.11
0	300	3	2	78.30	76.52	2.27
-25	300	3	2	67.90	68.49	0.87
100	300	3	2	109.00	102.51	5.95
0	400	3	2	44.01	43.04	2.20
-25	400	3	2	34.00	34.88	2.59
100	400	3	2	72.00	66.30	7.92
0	500	4	2	42.83	42.41	0.98
-25	500	4	2	33.30	32.71	1.77
100	500	4	2	68.10	68.64	0.79
0	750	5	3	49.10	48.39	1.45
-25	750	5	3	32.80	34.99	6.68
100	750	5	3	87.00	82.53	5.14
OYH						2.55

($E = 160 \text{ GPa}$; $\nu = 0.22$; $w = 50 \mu\text{m}$)

Burada dikkat çekilmesi gereken kısım, Tablo 4.11.'de formülün test edildiği değişkenin eyleyicinin genişliği olmasıdır. Denklem (4.47) eyleyicinin genişliğini hesaba katacak bir değişkene sahip değildir.

Tablo 4.11.'den de görülebileceği gibi, genişlik değeri (w) dışında diğer tüm parametreleri aynı olan eyleyici durumları için Denklem (4.47) hep aynı sonuçları vermiştir. Bu durum formülün zayıf kalan bir yönüdür. Bu sebeple çalışmanın ileriki bölümlerinde söz konusu genişlik

(w) değişkeninin de denkleme eklenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Tablo 4.12.'de çeşitli başlangıç açıklıklarına (g) sahip eyleyiciler için yapılmış 3B COMSOL benzetim verileri ile aynı parametreler kullanılarak hesaplanmış Denklem (4.47) sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.11. Genişlik (w) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması

Genişlik (w , μm)	Eyleyici Boyutları (μm)			Çökme Voltajı (Volt)		COMSOL & (4.47) % Hata
	Uzunluk (L)	Kalınlık (t)	Açıklık (g)	COMSOL	Denklem (4.47)	
1	200	2	1	32.20	33.13	2.89
2	200	2	1	32.60	33.13	1.63
5	200	2	1	32.90	33.13	0.70
10	200	2	1	33.10	33.13	0.09
20	200	2	1	33.30	33.13	0.51
50	200	2	1	33.60	33.13	1.40
1	500	4	2	41.00	42.41	3.44
2	500	4	2	41.40	42.41	2.44
5	500	4	2	41.80	42.41	1.46
10	500	4	2	42.10	42.41	0.74
20	500	4	2	42.30	42.41	0.26
50	500	4	2	42.83	42.41	0.98
OYH						1.38

($E = 160 \text{ GPa}$; $\nu = 0.22$; $\sigma = 0$)

Tablo 4.12.'den de görüldüğü gibi, değişik açıklık değerleri (g) için denklem farklı sonuçlar vermektedir. Ancak, açıklık değeri yüksek olduğunda; formülün sonuçlarının benzetim verilerine göre hata oranları yüksek olmaktadır. Yani küçük açıklık değerleri için iyi sonuçlar veren Denklem (4.47), büyük değerler için kötü sonuçlar üretmektedir. Bunun sebebi, elektrotlar arasındaki açıklık arttıkça; kaçış alanları (fringing field) etkisinin atması ve dolayısıyla eyleyici hareketindeki doğrusal olmayan durumun daha da artarak eyleyici hareketindeki tahmin edilebilirliği azaltmasıdır. Sonuç olarak, elde edilen ifadenin küçük açıklık durumları ($g/t \leq 1$) için uygun ve güvenilir bir denklem olduğu görülmüştür.

Tablo 4.12. Açıklık (g) değerleri için çökme voltajlarının karşılaştırılması

Başlangıç Açıklığı (g , μm)	Eyleyici Boyutları (μm)			Çökme Voltajı (Volt)		COMSOL & Denk. (4.47) % hata
	Uzunluk (L)	Kalınlık (t)	Genişlik (w)	COMSOL	Denk. (4.47)	
1	200	2	50	33.60	33.13	1.40
2	200	2	50	99.50	93.71	5.82
3	200	2	50	196.00	172.17	12.16
5	200	2	50	520.00	370.45	28.76
2	500	4	50	42.83	42.41	0.98
3	500	4	50	79.80	77.91	2.37
4	500	4	50	126.00	119.95	4.81
6	500	4	50	249.00	220.38	11.49
OYH						8.47

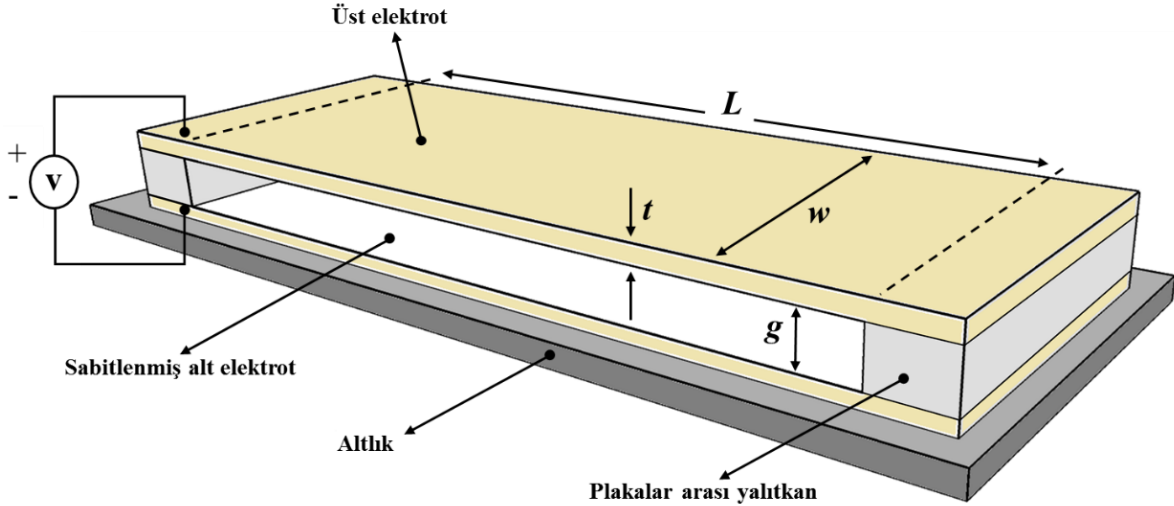
$$(E = 160 \text{ GPa}; \nu = 0.22; \sigma = 0)$$

4.4. İki Ucu Bağlı Eyleyiciler İçin Optimizasyon Çalışması

Çalışmanın bu bölümünde, iki ucu bağlı eyleyicilerin çökme voltajını hesaplamak için analitik olarak oluşturulmuş matematiksel ifadenin gerçek ölçümlere daha yakın sonuçlar vermesi için optimize edilmesi yer almaktadır. Bu optimizasyon sonucunda iki ucu bağlı elektrostatik eyleyicilerin çökme voltajını verecek, basit ve hesaplanması kolay matematiksel bir ifade ortaya çıkmıştır. Öncelikle, SEM tabanlı COMSOL programıyla çok çeşitli boyutlara ve parametrelere sahip iki ucu bağlı MEMS eyleyici için benzetimler yapılmıştır. Sonrasında, benzetim verileri ve önceki analitik denklem göz önüne alınarak; bilinmeyen katsayılara sahip, yeni bir matematiksel model oluşturuldu. Bu modelin katsayıları yapay zeka optimizasyon teknikleri yardımıyla bulunarak, modelde yerine konulmuş ve yeni çökme voltajını verecek denklem elde edilmiştir. Optimizasyon işlemi, bilinmeyen katsayıları benzetim sonuçlarına göre uyarladığından; optimizasyon sonucu elde edilen yeni formülün daha önceki analitik denkleme göre büyük avantajı vardır. Bu avantaj, optimizasyon sonucu oluşturulan formülün; benzetim ve deneysel çalışmalarda var olan ama analitik ifadede yer almayan bozucu etkileri (kaçış alanları, merkez hattı gerilmesi ve boyut etkileri vb.) dolaylı olarak hesaba katmasıdır.

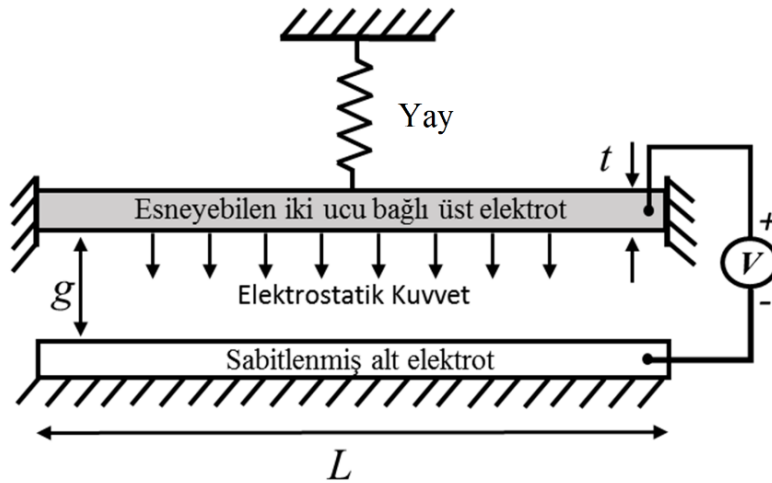
Literatürde daha önce MEMS eyleyicilerin çökme durumunun analizini yapan birçok numerik [127, 130, 131], analitik [41, 125, 171, 190] ve deneysel [48, 124, 137] çalışma bulunmaktadır. Bunun yanında, çökme voltajının tahmini için; kendilerine göre çeşitli avantajlara/dezavantajlara sahip birçok çalışmada yer vardır [1, 27, 95, 120, 134, 136, 138, 139, 189, 191-193]. Söz konusu çalışmalardan bazıları, eyleyicinin boyutlarından kaynaklı etkileri ve

uygulanan voltaj sonucu eyleyici üzerinde oluşan elektrostatik alan kaynaklı bozucu etkileri (kaçış alanları, merkez hattı gerilmesi vb.) ilaveten hesaba katmakta iken diğerleri katmamaktadır. Rokni ve arkadaşları [192], Fredholm integral eşitliklerinden ve modifiye edilmiş stres çifti teorisinden yola çıkarak bozucu etkileri de hesaba katan, boyut bağlantılı analitik bir metod geliştirdiler. Bilindiği gibi, deneysel ölçümlere en yakın sonuçlar sonlu eleman metodu ile elde edilebilir. Fakat bu yöntem oldukça zahmetli ve zaman alan bir işlemdir ve mutlaka bilgisayar yardımına ihtiyaç duyulur. Zaten hali hazırda benzetim programlarının kullandığı hesaplama yöntemi bu metottur. Dolayısıyla, MEMS aygıtların kullanımındaki artış, çökme voltajı hesabının kolay ve zahmetsizce hesaplanmasını zorunlu kılmaktadır. Sonuç olarak, bu kısımdaki çalışmanın ilham kaynağı; herhangi bir matematik veya bilgisayar altyapısı olmaksızın, MEMS eyleyicilerin çökme voltajını gerçeğe yakın, kolay ve zahmetsiz hesaplayabilen bir denklem ortaya çıkarmaktır. Çökme voltajını hesaplayacak denklem, ekte verilen toplamda 950 adet değişik eyleyici simüle edilip, içinden seçilen 216 adet benzetim verisi kullanılarak ve optimizasyon işlemi uygulanarak oluşturulmuştur. Benzetim için, sonlu eleman yöntemini tabanlı COMSOL programı kullanılırken, optimizasyon için yapay zeka optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Her benzetim için sırasıyla Şekil 4.15.'te görülen birer parametre; uzunluk (L), genişlik (w), kalınlık (t), başlangıç açıklığı (g) veya yapının doğasında var olan elastikiyet sabiti (E), uzama oranı (ν) veya artık stres (σ) değiştirilerek, o parametrenin çökme voltajı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Analiz ve çıkarımlara göre, çökme voltajını verecek bilinmeyen katsayılara sahip matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin katsayıları da, yapay zeka optimizasyon teknikleriyle bulunmuştur. Elde edilen nihai formülün, geçerliliğini ve güvenilirliğini göstermek adına, literatürde yer alan deneysel ve deneysel olarak geçerliliği kanıtlanmış benzetim çalışmalarıyla kıyaslamalar yapılmıştır ve daha önceki hesaplama metodlarına göre başarı durumu gösterilmiştir. Literatürde daha önce sunulmuş hesaplama çalışmaları göz önüne alındığında, bu çalışmada elde edilen formülün en büyük avantajı; sonuçlarının gerçek ölçümlere yakın olmasına ek olarak bu sonuçların çok basit ve zahmetsiz bir yolla hesaplanabilmesidir. Daha önce de vurgulandığı gibi MEMS eyleyicilerin çökme voltajını gerçeğe yakın olarak hesaplayabilmek MEMS aygıtların tasarımında hayati öneme sahiptir. Ancak mikro ölçekteki eyleyici yapısının doğasında var olan doğrusal olmayan bozucu etkiler (kaçış alanları, merkez hattı gerilmesi ve boyut etkileri vs.) hesaplamayı daha da karmaşık ve zor hale getirmektedirler. Bu bozucu etkilerin analitik olarak modellenmesi hayli zordur ve dolayısıyla, basit analitik bir model oluşturmak oldukça önemlidir.



Şekil 4.15. İki uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin perspektif gösterimi

Bu çalışmanın bir önceki bölümünde, iki ucu bağlı eyleyici için Şekil 4.16.'da görülen paralel kapasitans modelinden yola çıkılarak çökme voltajını hesaplayacak analitik bir denklem elde edilmişti. Ancak denklem analitik olarak oluşturulduğu için, bozucu etkileri hesaba katmak mümkün olmaktan uzaktır. Dolayısıyla söz konusu formülün zayıf kaldığı yönler tespit edilmişti. Bu noktada optimizasyon işlemi ile analitik formülün zayıf kaldığı noktalarda da iyi sonuçlar verebilen yeni bir model tasarlanmıştır.



Şekil 4.16. İki uçtan bağlı elektrostatik eyleyicinin kapasitans modeli

Söz konusu paralel kapasitans modelinden analitik olarak elde edilmiş olan çökme voltajı formülü aşağıdaki gibi sunulmuştur. Bu modelde bozucu etkiler göz ardı edilmekte ve sadece statik durumlar hesaba katılmaktadır. Ayrıca deneysel ve benzetim sonuçlarında da etkisi olduğu

görülen eyleyici genişliği (w) Denklem (4.47)'de yer almadığından genişlik değişimlerine karşı hassasiyet gösterememektedir.

$$V_{\text{çökme}} = \left(\frac{\left(\sigma t \left(\frac{t}{L} \right)^{1.1} + \frac{65}{9} \frac{Egt^3}{(1-\nu^2)L^3} \right)}{\frac{61 \varepsilon_0 L}{99 g^2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.47)$$

Denklem (4.47)'de doğrudan eyleyicinin genişliğini ifade eden herhangi bir değişken olmadığından optimizasyon işleminde bu değişkenin denkleme konulması gerekmektedir. COMSOL programında iki ucu bağlı MEMS eyleyiciler için yapılan 950 adet benzetim içinden küçük deformasyon değerlerine sahip ($g/t \leq 1$) [136] olan ve Tablo 4.13.'te parametreleri verilen 216 değişik eyleyici seçilerek gerekli optimizasyon çalışması yapılmıştır. Deneysel ölçümler [48, 120, 124, 137] ve benzetim çalışmalarından görülmüştür ki, çökme voltajı eyleyicinin boyutlarının (L , w , t ve g) ve malzeme özelliklerinin (E , ν ve σ) bir fonksiyonudur. Bu sebeple, söz konusu boyut ölçüleri ve malzeme özellikleri kullanılarak yapılmış olan 216 adet değişik eyleyici örneğinin çökme voltajı sonuçları kullanılarak yeni bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu matematiksel model oluşturulurken, elde edilen modelden daha karmaşık ve daha basit modeller de denendi. Ancak daha basit olan modeller yeterince iyi sonuç vermezken; daha karmaşık olanlar nispeten daha iyi sonuç vermelerine rağmen basit olan model daha kullanışlı olduğu için optimum model tercih edilmiştir. Basit yapısı ve verdiği yakın sonuçlar sebebiyle tercih edilen model aşağıda verilmiştir.

$$V_{\text{çökme}} = \left(c_1 \frac{\sigma t^{c_2} g^{c_3}}{\varepsilon_0 L^{c_4}} + c_5 \frac{Eg^{c_6} t^{c_7}}{(1-\nu^2) \varepsilon_0 L^{c_8}} \left(\frac{w}{L} \right)^{c_9} \right)^{c_{10}} \quad (4.48)$$

Burada c_1 , c_2 , ... c_{10} oluşturulan modelin bilinmeyen katsayılarıdır ve yapay zeka optimizasyon tekniği ile aşağıda denklemi verilen Ortalama Yüzde Hatanın (OYH) minimize edilmesi amaçlanarak bulunmuşlardır.

$$\text{OYH} = \frac{100}{N} \sum_1^N \left| \frac{V_{\text{çös}} - V_{\text{çöh}}}{V_{\text{çös}}} \right| \quad (4.49)$$

$V_{\text{çös}}$ ve $V_{\text{çöh}}$ sırasıyla benzetim sonucu elde edilen ve Denklem (4.48)'den hesaplanan çökme voltajı değerleridir. Yapay zeka optimizasyon yöntemi kullanılarak bulunan katsayılar Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.13. 216 adet benzetim için kullanılan eyleyici parametreleri

Eyleyici grubu	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Benzetim sayısı	36	36	36	36	36	36
L	50	100	200	300	400	500
w	20, 50	20, 50	20, 50	20, 50	20, 50	20, 50
t	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5
g	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4, 5
σ Artık Stres (MPa)	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100
E Elastik Sabiti (GPa)	160, 169	160, 169	160, 169	160, 169	160, 169	160, 169
ν Uzama Oranı	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22

Tablo 4.14. Denklem (4.48) için optimizasyon ile bulunan katsayılar

c₁	c₂	c₃	c₄	c₅	c₆	c₇	c₈	c₉	c₁₀
2.5	1.2	2.8	2	12	3	3	4	0.015	0.5

Bulunan katsayıların Denklem (4.48)'de yerine konmasıyla matematiksel ifade aşağıdaki gibi yazılabilir.

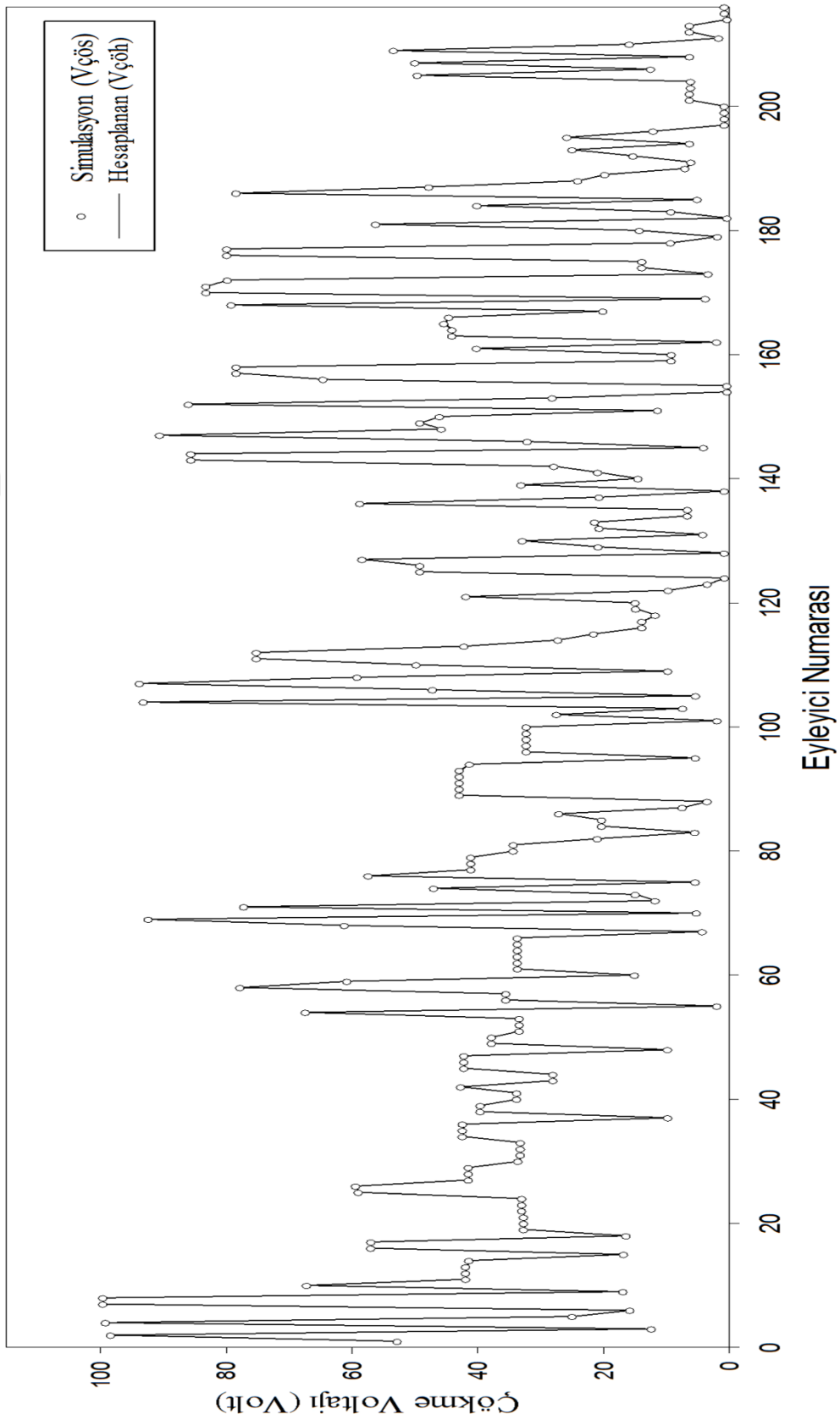
$$V_{\text{çökme}} = \left(2.5\sigma \frac{t^{1.2} g^{2.8}}{\varepsilon_0 L^2} + 12 \frac{Eg^3 t^3}{(1-\nu^2)\varepsilon_0 L^4} \left(\frac{w}{L} \right)^{0.015} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.50)$$

Değişik parametrelere sahip eyleyiciler için SEM metodu ile yapılan toplamda 950 adet COMSOL benzetimi arasından küçük deformasyon ($g/t \leq 1$) şartına uyan 216 adedi için çökme voltajları hesaplanmış ve benzetim sonuçlarıyla beraber Şekil 4.17.'deki grafikte gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, benzetim ve hesaplama sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum vardır. Benzetim ve hesaplama sonuçları arasındaki OYH'nin %1'in altında olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla kendi içinde tutarlı bu sonuçlar, elde edilen hesaplama formülünün geçerliliğini göstermektedir. Formülün çok yönlülüğünü ve geçerliliğini göstermek adına birçok karşılaştırma daha yapılmıştır. Gerekli karşılaştırmaları yapabilmek adına, Denklem (4.50)'deki denklem ile Tablo 4.15.'te verilmiş olan literatürde sunulmuş eyleyici parametreleri kullanılarak çökme voltajları hesaplanmıştır.

Tablo 4.15. Literatürde daha önce çalışılmış eyleyici parametreleri

Eyleyici Numarası	Eyleyici Boyutları (μm)				Uzama Oranı ν	Elastik Sabiti E (GPa)	Artık Stres σ (MPa)
	L	w	t	g			
1	250	50	3	1	0.32	169	0
2	250	50	3	1	0.06	169	0
3	250	50	3	1	0.06	169	100
4	250	50	3	1	0.06	169	-25
5	350	50	3	1	0.06	169	0
6	350	50	3	1	0.06	169	100
7	350	50	3	1	0.06	169	-25

Litaratürde, Tablo 4.15.'teki eyleyici parametreleri kullanılarak sunulmuş birçok çökme voltajı hesaplama yöntemi vardır. Dolayısıyla, iki ucu bağlı eyleyici için sunulmuş teorik hesaplama yöntemleri [1, 95, 120, 134, 136, 138, 189, 192] ve bu çalışmada elde edilen Denklem (4.50) sonuçları, deneysel olarak geçerliliği kanıtlanmış olan CoSolve benzetim [120] verileriyle kıyaslanarak, yüzde hata oranlarıyla birlikte Tablo 4.16.'da verilmiştir. Tablo 4.16.'nın son satırı tüm yöntemler için hesaplanan OYH değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.17. 216 adet eyleyici için yapılan benzetim ve hesaplama sonuçları

Tablo 4.16.'daki karşılaştırmalar neticesinde bulunan OYH değerlerine bakıldığında, bu çalışmada elde edilen Denklem (4.50)'nin sonuçları daha önce literatürde sunulmuş çoğu çalışma sonucundan daha iyi olduğu görülmektedir. Tablo 4.16.'daki bazı noktalarda nispeten daha iyi sonuçlar veren başka çalışmalar olsa da söz konusu değerleri veren hesaplama yöntemleri oldukça karmaşık ve zaman alıcı olan (genelleştirilmiş türevsel kareleme metodunu veya Fredholm integral denklemleri ile modifiye edilmiş stres (Modified Stress Couple) çifti gibi) yöntemlerdir. Dolayısıyla, hem kolay hesaplanabilen hem de doğru sonuçlar veren bir formülün elde edilmesi perspektifinden bakıldığında en optimum hesaplama yöntemi bu çalışmada ortaya konan formüldür.

Tablo 4.16. Literatürdeki çalışmaların Denklem (4.50) ile kıyaslanması

#	Benzetim [120]	Çökme Voltajı Değerleri (Volt)								
		[1]	[95]	[120]	[134]	[136]	[138]	[189]	[192]	(4.50)
1	41.20	-	42.54	41.50	41.20	41.72	41.70	41.42	-	41.52
2	40.10	39.13	40.38	39.50	39.10	39.60	39.56	39.31	39.40	39.41
3	57.60	57.62	58.87	56.90	56.85	57.40	57.35	57.45	57.37	56.95
4	33.60	33.63	34.12	33.70	33.22	33.71	33.50	33.26	33.43	33.62
5	20.30	20.36	20.60	20.20	19.95	20.20	20.19	20.06	20.10	20.06
6	35.80	35.99	36.77	35.40	35.60	35.91	35.71	36.02	35.94	35.56
7	13.70	13.60	13.63	13.80	13.45	13.71	13.42	13.35	13.50	13.66
#	-	Benzetim [120] ve Hesaplama metotları arasındaki % hatalar								
		[1]	[95]	[120]	[134]	[136]	[138]	[189]	[192]	(4.50)
1	-	-	3.25	0.73	0.00	1.26	1.21	0.53	-	0.78
2	-	2.42	0.70	1.50	2.49	1.25	1.35	1.97	1.75	1.72
3	-	0.03	2.20	1.22	1.30	0.35	0.43	0.26	0.40	1.13
4	-	0.09	1.55	0.30	1.13	0.33	0.30	1.01	0.51	0.06
5	-	0.30	1.48	0.49	1.72	0.49	0.54	1.18	0.99	1.18
6	-	0.53	2.71	1.12	0.56	0.31	0.25	0.61	0.39	0.67
7	-	0.73	0.51	0.73	1.82	0.07	2.04	2.55	1.46	0.29
OYH		0.68	1.77	0.87	1.29	0.58	0.87	1.16	0.92	0.83

Formülün geçerliliğini pekiştirmek adına, deneysel olarak ölçümleri yapılmış Tablo 4.17.'de verilen değişik parametrelere sahip eyleyiciler için de çökme voltaj hesaplamaları yapılarak gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Tablo 4.17.'de ki verilen parametrelere sahip eyleyiciler için deneysel ölçüm [189] ve teorik [192, 193] çalışma sonuçları Tablo 4.18.'de listelenerek; deneysel ölçümlere göre hesaplama yöntemlerinin hata oranları verilmiştir.

Tablo 4.17. Literatürde daha önce çalışılmış eyleyici parametreleri

Benzetim Numarası	Eyleyici Boyutları (μm)				Uzama Oranı ν	Elastik Sabiti E (GPa)	Artık Stres σ (MPa)
	L	w	t	g			
1	210	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$
2	310	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$
3	410	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$
4	510	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$

Tablo 4.18.'den de görüldüğü gibi, Tablo 4.17.'de verilen parametrelere göre yapılmış olan deneysel ölçümlere en yakın OYH değerine sahip hesaplama yöntemi bu çalışmada elde edilmiş olan Denklem (4.50)'dir.

Tablo 4.18. Literatürdeki çalışmaların Denklem (4.50) ile kıyaslanması

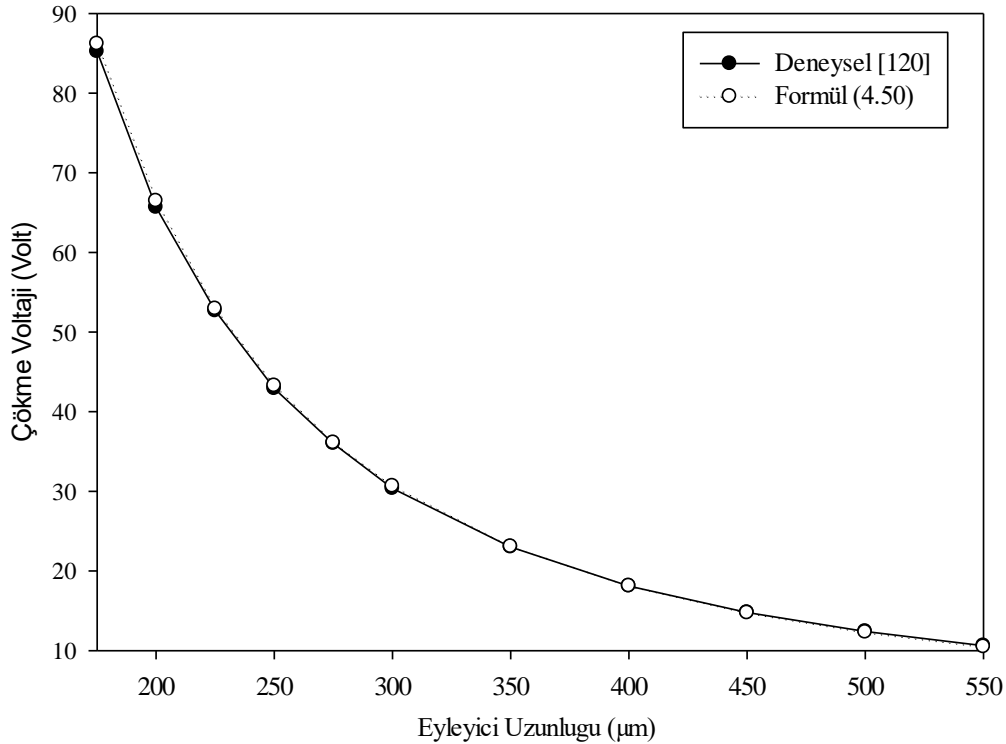
#	Çökme voltajı değeri (Volt)				Hesaplama metotlarının Deneysel [189] ölçüm ile % hata oranları		
	Deneysel [189]	Hesaplanan			[192]	[193]	(4.50)
		[192]	[193]	(4.50)			
1	27.95	28.24	28.10	27.88	1.04	0.54	0.25
2	13.78	14.14	14.00	14.08	2.61	1.6	2.18
3	9.13	8.94	8.90	8.974	2.08	2.52	1.71
4	6.57	6.415	6.40	6.489	2.36	2.59	1.23
OYH					2.02	1.81	1.34

Denklem (4.50)'nin deneysel verilerle karşılaştırılması ve küçük hata oranlarıyla sonuç vermesi, ifadenin geçerliliğini ve güvenilirliğini pekiştirmiştir. Ayrıca, literatürdeki diğer bir deneysel ölçüm sonuçlarıyla [120] da ilave karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu bölümde sırasıyla iki ayrı kristal düzlem yapısına sahip alttaşlar üzerinde üretimi yapılan eyleyicilerin değişik uzunlukları için çökme voltajı değerleri verilerek gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Tablo 4.19.'da kristal düzlem <110> için toplamda 11 değişik uzunluktaki eyleyicinin çökme voltajı ölçümleri ve bu uzunluklar için Denklem (4.50)'den elde edilmiş çökme voltajı sonuçları verilmiştir. Kristal düzlem 110 için yapılmış olan ölçüm sonuçları, optimizasyon sonucu elde edilmiş olan Denklem (4.50) hesaplama sonuçlarıyla ortalama olarak %0.69 hata oranıyla örtüşmektedir. Bu uyum formülün oldukça iyi bir matematiksel yaklaşım olduğunu göstermektedir. Tablo 4.19.'daki veriler kullanılarak, söz konusu uyumun kolaylıkla görülmesi amacıyla Şekil 4.18.'de grafik olarak gösterilmiştir. Tablo 4.20.'de kristal düzlem <100> için toplamda 10 değişik uzunluktaki eyleyicinin çökme voltajı ölçümleri ve bu uzunluklar için Denklem (4.50)'den elde edilmiş çökme voltajı sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.19. Deneysel ölçümlerin Denklem (4.50) ile kıyaslanması

Eyleyici Uzunluğu (μm)	Çökme Voltajları (Volt)			Deneysel [120] ile hata (%)	
	Deneysel [120]	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)
175	85.22	85.97	86.20	0.88	1.15
200	65.67	66.31	66.45	0.97	1.19
225	52.68	52.82	52.93	0.26	0.47
250	42.91	43.16	43.26	0.59	0.82
275	36.00	36.01	36.11	0.03	0.31
300	30.37	30.57	30.67	0.64	0.99
350	23.00	22.95	23.07	0.21	0.30
400	18.11	17.99	18.13	0.64	0.11
450	14.78	14.58	14.74	1.35	0.27
500	12.40	12.13	12.30	2.20	0.81
550	10.61	10.30	10.49	2.90	1.13
OYH				0.97	0.69

($w=50 \mu\text{m}$, $t=2.94 \mu\text{m}$, $g=1.05 \mu\text{m}$, $\sigma=10 \text{ MPa}$, $E=168 \text{ GPa}$, $\nu=0.06$)



Şekil 4.18. Değişik uzunluklarda 11 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği

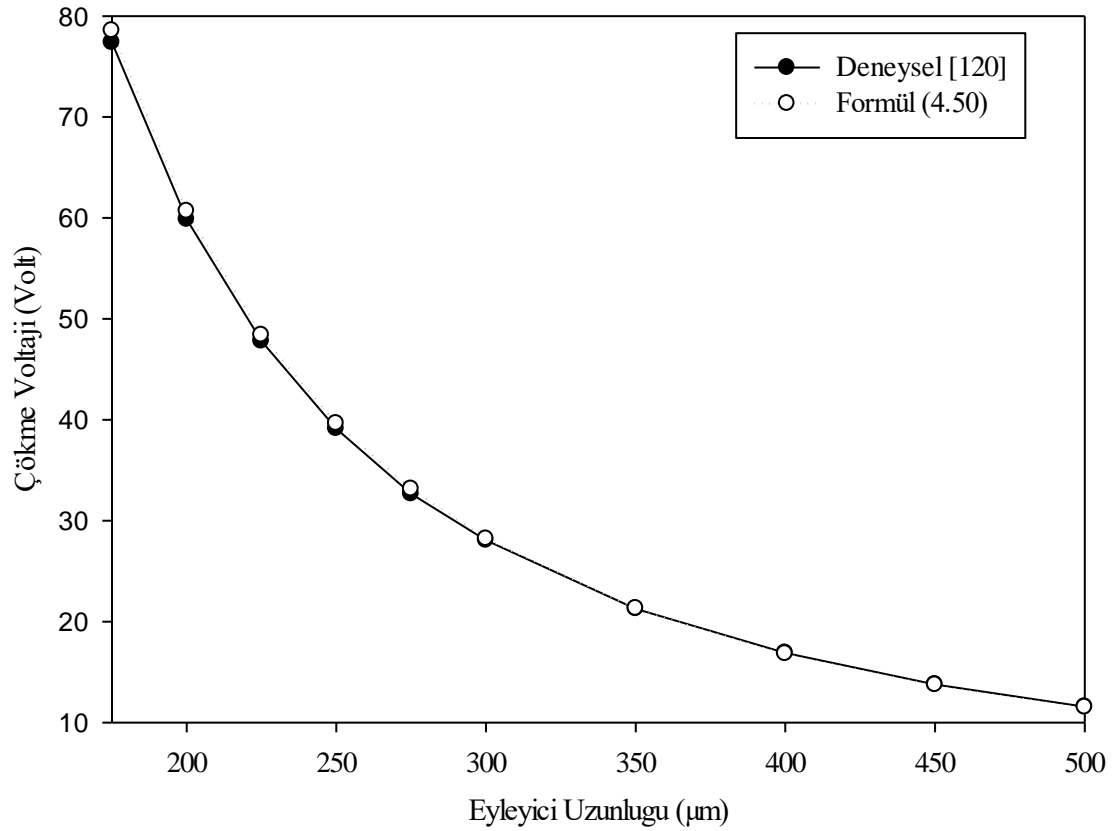
Kristal düzlem 100 için yapılmış olan ölçüm sonuçları, optimizasyon sonucu elde edilmiş olan Denklem (4.50) hesaplama sonuçlarıyla ortalama olarak %0.89 hata oranıyla örtüşmektedir.

Tablo 4.20.'daki veriler kullanılarak, söz konusu uyumun rahatça görülmesi amacıyla Şekil 4.19.'de grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.20. Deneysel ölçümlerin Denklem (4.50) ile kıyaslanması

Eyleyici Uzunluğu (μm)	Çökme Voltajları (Volt)			Deneysel [120] ile hata (%)	
	Deneysel [120]	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)
175	77.38	78.35	78.56	1.25	1.52
200	59.86	60.52	60.67	1.10	1.35
225	47.79	48.29	48.40	1.04	1.28
250	39.12	39.53	39.64	1.04	1.33
275	32.65	33.04	33.15	1.18	1.53
300	28.06	28.09	28.21	0.12	0.53
350	21.26	21.18	21.32	0.39	0.28
400	16.90	16.67	16.83	1.36	0.41
450	13.78	13.56	13.74	1.57	0.29
500	11.56	11.33	11.52	2.02	0.35
OYH				1.11	0.89

($w=50 \mu\text{m}$, $t=2.94 \mu\text{m}$, $g=1.05 \mu\text{m}$, $\sigma=10 \text{ MPa}$, $E=138 \text{ GPa}$, $\nu=0.06$)



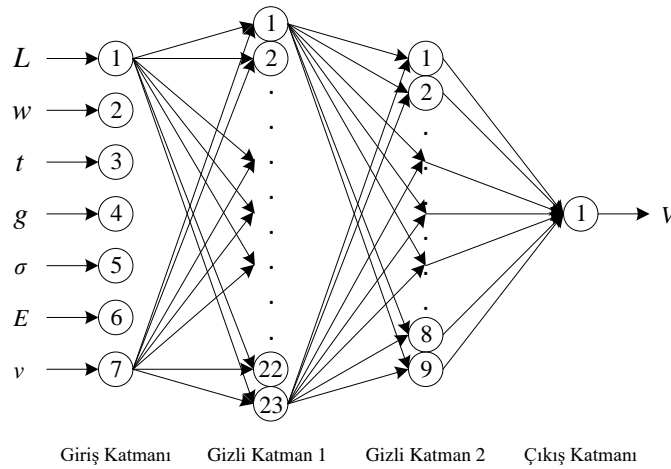
Şekil 4.19. Değişik uzunluklarda 10 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği

4.5. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Yapay Sinir Ağı Modeli

Tezin bu bölümünde, iki ucu bağlı eyleyicinin çökme voltajının tahmini için ileri beslemeli, geri yayımlı ve çok katmanlı perseptron temelli bir Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli oluşturulmuştur. Önerilen YSA modeli, değişik fiziksel parametrelere sahip 333 adet iki ucu bağlı eyleyici için yapılmış ve çökme voltajı 300 V'tan küçük olduğu olan SEM tabanlı benzetim verisi kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ, 333 adet veri arasından rastgele seçilen 297 adet veri ile eğitilmiş ve kalan 36 adet veri ile de test edilmiştir. YSA, eğitim sonuçlarıyla %0.3 ve test sonuçlarıyla da %0.4 ortalama hatayla uyuşmaktadır. YSA modeli benzetim verisiyle oluşturulduğu için, analitik matematiksel modellerden farklı olarak, eyleyicinin hareketine tesir eden tüm fiziksel etkiler hesaba katılmış olmaktadır. Elde edilen YSA modelinin güvenilirliğini ve geçerliliğini test etmek adına, daha önce literatürde sunulmuş benzetim, hesaplama modeli ve deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır. Söz konusu 333 adet SEM COMSOL yazılımı ile yapılmış eyleyici benzetimine ait fiziksel parametreler Tablo 4.21.'de verilmiştir. Bu 333 adet veri içinden rastgele 36 adeti seçilerek YSA eğitime dahil edilmemiş ve kalan 297 adet veri YSA eğitimi için kullanılmıştır. Eğitim sonucunda ortaya çıkan YSA modeli, 36 adet veri ile test edilerek modelin güvenilirliği sınanmıştır.

4.5.1. YSA'nın Modellenmesi ve Eğitilmesi

İki ucu bağlı eyleyicinin fiziksel parametrelerinin giriş olarak verildiği ve çökme voltaj değerinin çıkış olarak istendiği bir yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. YSA modeli çok katmanlı perseptron temelinde Şekil 4.20.'de gösterildiği gibi 7 nöronlu bir adet giriş katmanına, sırasıyla 23 ve 9 nörona sahip 2 adet gizli katmana ve 1 nöronlu 1 adet çıkış katmanına sahiptir.

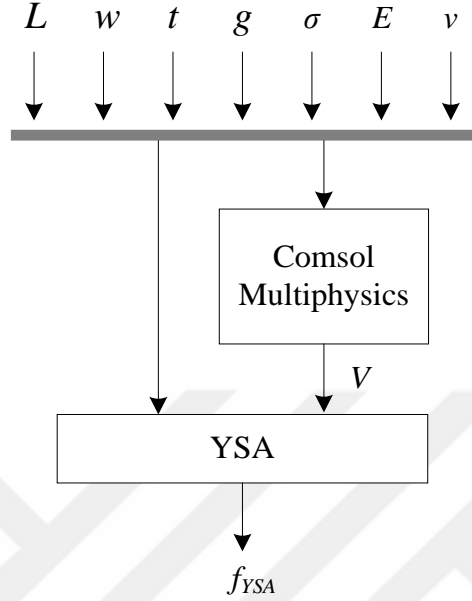


Şekil 4.20. Çok katmanlı perseptron tabanlı YSA modeli

Tablo 4.21. 333 adet benzetim için kullanılan eyleyici parametreleri

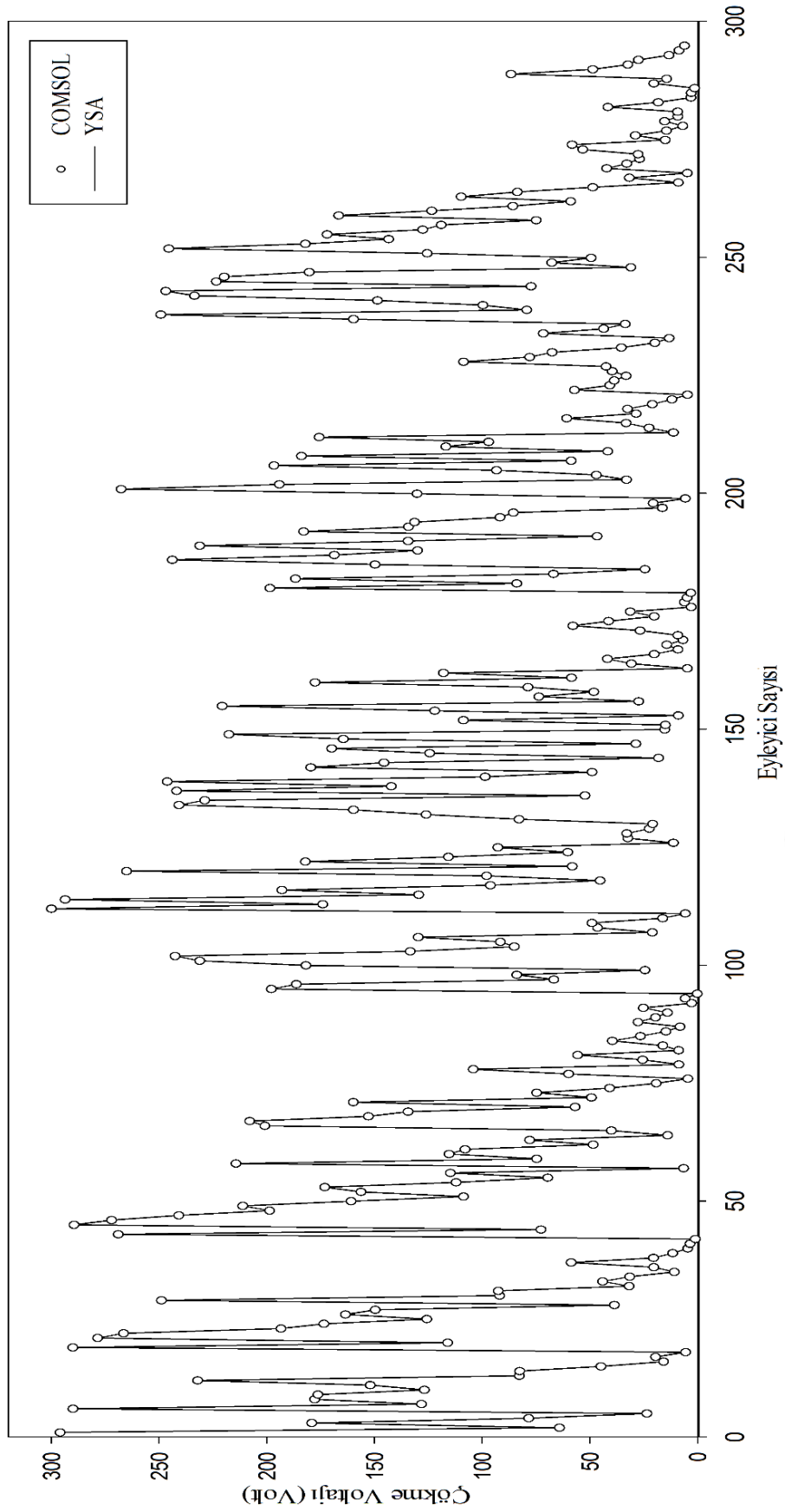
Eyleyici grubu	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Benzetim sayısı	55	55	55	55	55	55
	50	100	200	300	400	500
L						
w	1, 20, 50	1, 20, 50	1, 20, 50	1, 20, 50	1, 20, 50	1, 20, 50
T Eyleyici Boyutları (μm)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10
	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10
σ Artık Stres (MPa)	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100	-25, 0, 100
E Elastik Sabiti (GPa)	160, 169	160, 169	160, 169	160, 169	160, 169	160, 169
ν Uzama Oranı	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22	0.06, 0.22

YSA'nın eğitimi için 297 adet eyleyicinin COMSOL benzetim sonuçları ve eyleyici boyutları (L , w , t , g) ve malzeme karakteristikleri (E , ν ve σ) modele direk giriş olarak verilmiştir. Şekil 4.21.'den YSA modelinin eğitim şeması görülmektedir.



Şekil 4.21. YSA modelinin eğitim şeması

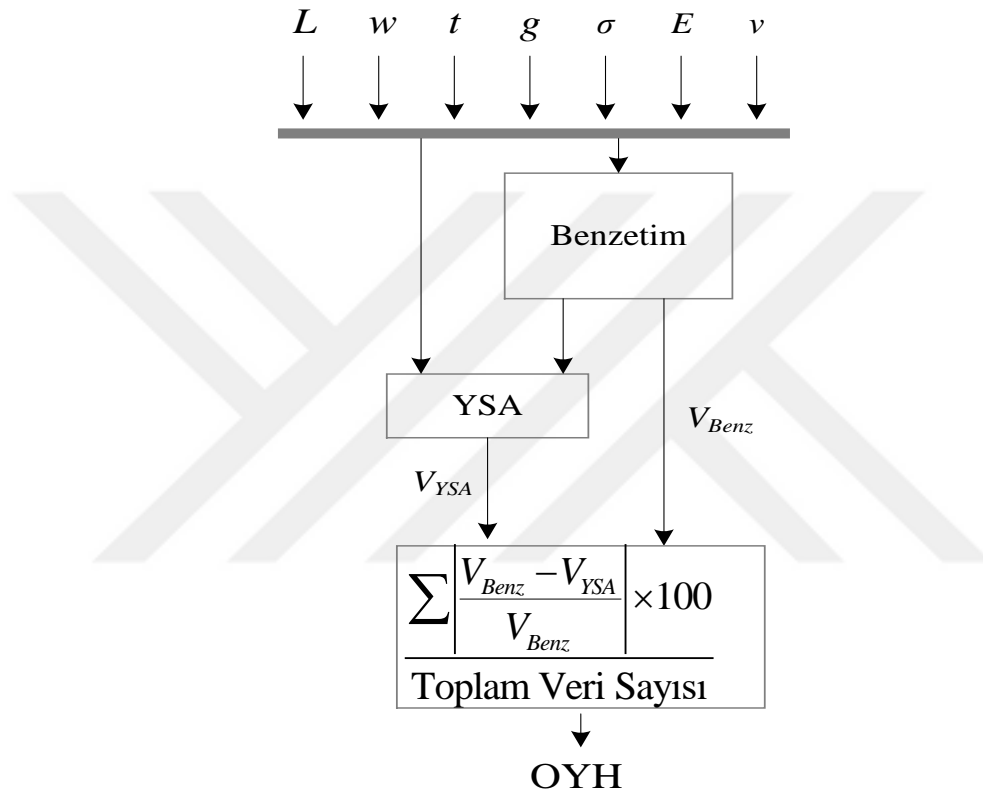
Eğitim fazında YSA modeli için, birçok parametre değiştirilerek basitten karmaşığa doğru birçok model denendi. Örneğin, Şekil 4.20.'de gösterilen gizli katman ve nöron sayıları azdan çoğa arttırılarak en az katman ve en az nöron sayısı ile en iyi sonuçları verecek yapının elde edilmesi amaçlandı. Daha az sayıda katman ve nöron yeterince iyi sonuçlar veremezken, daha fazla sayıda olmaları ise modeli çok fazla karmaşık hale getirdiğinden, optimum sayı yukarıda belirtildiği gibi bulundu. Ayrıca, her katman için kullanılan transfer fonksiyonları da sırasıyla denenerek, en iyi sonuçlar giriş ve çıkış katmanı için "purelin" fonksiyonu, 1. gizli katman için "tangent sigmoid" ve 2. gizli katman için "log sigmoid" fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. YSA'nın öğrenme fonksiyonu olarak hızlı ve iyi yaklaşım performansından dolayı Levenberg-Marquardt (LM) fonksiyonu kullanılmıştır. Epochs sayısı, momentum parametresi (μ), maksimum μ , μ artış ve azalışı, minimum alçalma derecesi ve seed değeri sırasıyla, 254, 0.01, 10^{10} , 4, 0.1, 10^{-10} ve 2023687050 olarak seçilmiştir. Şekil 4.22.'de verilen grafikteki YSA modeli sonuçları ve COMSOL benzetim sonuçları ortalama %0.3 hata ile uyumluluk göstermektedirler.



Şekil 4.22. 297 adet eyleyici için yapılan benzetim ve YSA sonuçları

4.5.2. YSA Modelinin Benzetim Verileri ile Test Edilmesi

Tüm çözüm uzayını temsil eden toplamda 330 adet benzetim verisi içerisinde rastgele seçilmiş 35 adedi, eğitilmiş YSA modelinin test edilmesi için kullanılmıştır. Test yöntemini gösteren uygulama şeması Şekil 4.23.'de verilmiştir. YSA modelinden ve COMSOL benzetim sonuçlarından elde edilen veriler Tablo 4.22.'de yüzde hata oranları ve OYH değeri ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.23. Eğitilmiş YSA modelinin test şeması

Tablo 4.22.'den de görüldüğü gibi, eğitilmiş YSA modeli ve benzetim verileri arasında oldukça iyi bir uyum söz konusudur. Tüm değerler için OYH değeri %0.4 iken, en büyük hata değeri ise 33. veride %1.68 olarak bulunmuştur.

Tablo 4.22. YSA modelinin benzetim sonuçları ile test edilmesi

#	Eyleyici Boyutları (μm)				Çökme Voltajı (Volt)		COMSOL ve YSA % hata
	<i>L</i>	<i>w</i>	<i>t</i>	<i>g</i>	COMSOL	YSA	
1	50	1	0.5	2	296.00	296.00	0.00
2	50	1	1	1	184.56	185.40	0.46
3	100	1	0.5	4	290.00	290.01	0.00
4	100	1	1	1	47.70	47.65	0.10
5	100	20	1	2	167.90	168.41	0.30
6	100	50	1	1	49.90	50.41	1.02
7	200	1	1	3	86.30	85.25	1.22
8	200	1	1	6	266.60	266.60	0.00
9	200	1	2	4	278.60	278.60	0.00
10	200	1	3	3	290.10	290.09	0.00
11	200	1	4	1	90.50	90.61	0.12
12	200	20	0.5	6	293.60	293.60	0.00
13	200	20	1	2	41.90	41.93	0.07
14	200	20	1	5	300.00	299.99	0.00
15	200	20	2	3	194.80	194.61	0.10
16	200	20	4	2	265.20	265.19	0.00
17	200	50	2	2	99.10	99.48	0.38
18	200	50	4	2	267.70	267.71	0.00
19	200	50	5	0.5	46.00	46.17	0.37
20	500	1	1	5	41.70	41.86	0.38
21	500	1	2	3	29.50	29.55	0.17
22	500	1	2	6	102.50	102.76	0.25
23	500	1	3	10	269.00	269.03	0.01
24	500	1	4	1	14.20	14.13	0.49
25	500	1	5	6	272.10	272.13	0.01
26	500	1	6	5	274.50	271.05	1.26
27	500	1	10	3	289.50	289.51	0.00
28	500	20	2	4	53.10	53.56	0.87
29	500	20	3	4	85.10	85.34	0.28
30	500	20	4	1	14.83	14.62	1.42
31	500	20	6	2	77.10	77.06	0.05
32	500	50	1	2	6.75	6.64	1.63
33	500	50	2	1	5.35	5.44	1.68
34	500	50	3	3	53.30	52.80	0.94
35	500	50	4	2	42.83	42.68	0.35
36	500	50	5	1	20.85	20.74	0.53
OYH							0.40

($E = 160 \text{ GPa}$, $\sigma = 0$, $\nu = 0.22$)

Bu kısımda, YSA modelinin güvenilirliğini ve geçerliliğini test etmek bakımından daha önce literatürde sunulmuş deneysel ölçümler, benzetimler ve hesaplama yöntemi sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapılmıştır. Öncelikle, Tablo 4.23.'deki eyleyici parametreleri kullanılarak daha önce literatürde sunulmuş ve deneysel ölçümlerle doğrulanmış CoSolve SEM benzetim [120] verileri ve 8 adet hesaplama metodu [1, 95, 120, 134, 136, 138, 189, 192] sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapılarak, karşılaştırma sonuçları ve ortalama yüzde hata oranları Tablo 4.24.'de verilmiştir.

Tablo 4.23. Literatürde çalışılmış eyleyicilerin fiziksel parametreleri [120]

Eyleyici Numarası	Eyleyici Boyutları (μm)				Uzama Oranı ν	Elastik Sabiti E (GPa)	Artık Stres σ (MPa)
	L	w	t	g			
1	250	50	3	1	0.32	169	0
2	250	50	3	1	0.06	169	0
3	250	50	3	1	0.06	169	100
4	250	50	3	1	0.06	169	-25
5	350	50	3	1	0.06	169	0
6	350	50	3	1	0.06	169	100
7	350	50	3	1	0.06	169	-25

Tablo 4.24.'den görüldüğü gibi, YSA sonuçları diğer hesaplama yöntemlerine göre deneysel olarak doğrulanmış benzetim verilerine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Sadece bir kaç noktada nispeten daha yüksek hatalı sonuçlar verse de, ortalama hata olarak %0.44 ile en düşük hatayı vermektedir.

Tablo 4.24. Benzetim ve hesaplama sonuçlarının YSA ile kıyaslanması

#	Benzetim [120]	Çökme Voltajı Değerleri (Volt)								YSA
		[1]	[95]	[120]	[134]	[136]	[138]	[189]	[192]	
1	41.20	-	42.54	41.50	41.20	41.72	41.70	41.42	-	41.20
2	40.10	39.13	40.38	39.50	39.10	39.60	39.56	39.31	39.40	40.10
3	57.60	57.62	58.87	56.90	56.85	57.40	57.35	57.45	57.37	57.59
4	33.60	33.63	34.12	33.70	33.22	33.71	33.50	33.26	33.43	33.60
5	20.30	20.36	20.60	20.20	19.95	20.20	20.19	20.06	20.10	20.31
6	35.80	35.99	36.77	35.40	35.60	35.91	35.71	36.02	35.94	35.79
7	13.70	13.60	13.63	13.80	13.45	13.71	13.42	13.35	13.50	13.68
#	-	Benzetim [120] ve Hesaplama metotları arasındaki % hatalar								YSA
		[1]	[95]	[120]	[134]	[136]	[138]	[189]	[192]	
1	-	-	3.25	0.73	0.00	1.26	1.21	0.53	-	0.00
2	-	2.42	0.70	1.50	2.49	1.25	1.35	1.97	1.75	0.00
3	-	0.03	2.20	1.22	1.30	0.35	0.43	0.26	0.40	0.02
4	-	0.09	1.55	0.30	1.13	0.33	0.30	1.01	0.51	0.00
5	-	0.30	1.48	0.49	1.72	0.49	0.54	1.18	0.99	0.05
6	-	0.53	2.71	1.12	0.56	0.31	0.25	0.61	0.39	0.03
7	-	0.73	0.51	0.73	1.82	0.07	2.04	2.55	1.46	0.15
OYH		0.68	1.77	0.87	1.29	0.58	0.87	1.16	0.92	0.04

Tablo 4.25.'de verilen eyleyici parametreleri için literatürde yapılmış deneysel ölçümler [189] ve YSA sonuçları karşılaştırılmış ve diğer hesaplama yöntemlerine [192-193] göre yüzde hata oranları Tablo 4.26.'te verilmiştir.

Tablo 4.25. Literatürde çalışılmış eyleyicilerin fiziksel parametreleri [120]

Benzetim Numarası	Eyleyici Boyutları (μm)				Uzama Oranı ν	Elastik Sabiti E (GPa)	Artık Stres σ (MPa)
	L	w	t	g			
1	210	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$
2	310	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$
3	410	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$
4	510	100	1.5	1.18	0.30	151	$6/(1-\nu)$

Tablo 4.26.'den görüldüğü gibi, YSA sonuçları diğer hesaplama yöntemlerine göre deneysel ölçüm verilerine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Tüm noktalarda daha düşük hata değeri veren YSA modeli, ortalama hata olarak %0.08 ile oldukça düşük hata değeri vermektedir.

Tablo 4.26. Literatürde çalışılmış eyleyicilerin fiziksel parametreleri [120]

#	Çökme voltajı değeri (Volt)				Hesaplama metotlarının Deneysel [189] ölçüm ile % hata oranları		
	Deneysel [189]	Hesaplanan			[192]	[193]	YSA
		[192]	[193]	YSA			
1	27.95	28.24	28.10	27.96	1.04	0.54	0.04
2	13.78	14.14	14.00	13.76	2.61	1.6	0.15
3	9.13	8.94	8.90	9.14	2.08	2.52	0.11
4	6.57	6.415	6.40	6.57	2.36	2.59	0.00
OYH					2.02	1.81	0.08

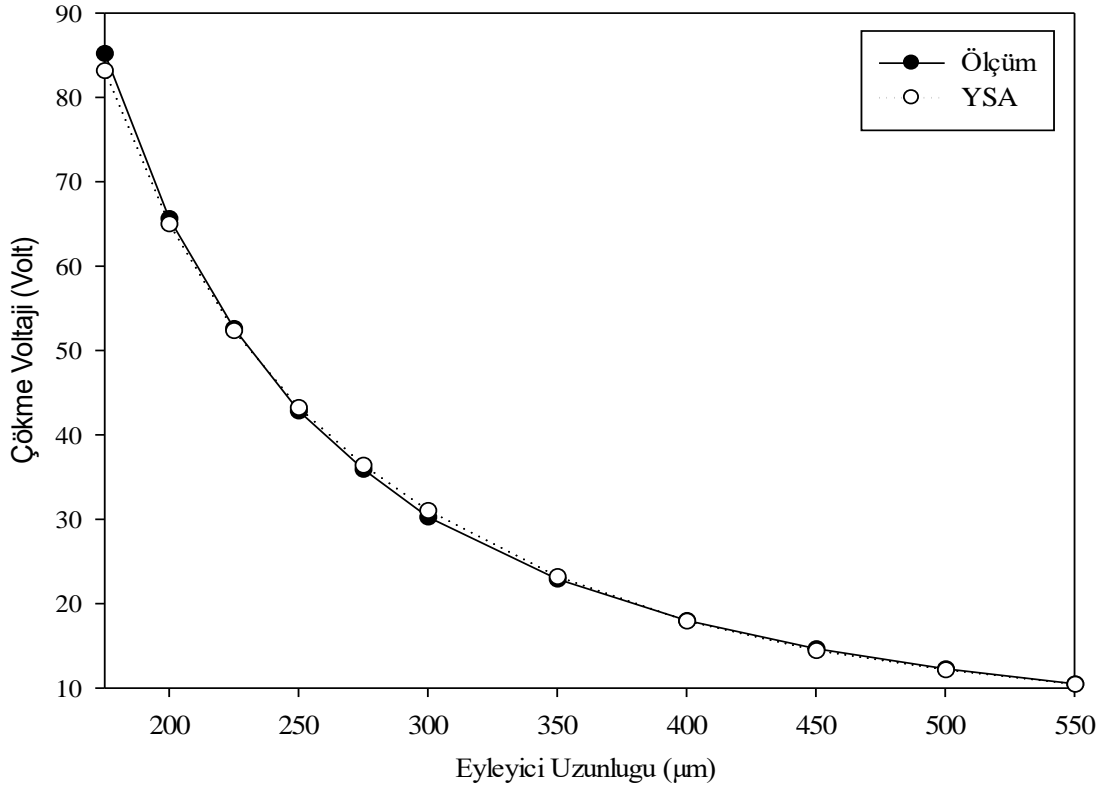
YSA modelinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması ve düşük hata oranlarıyla sonuç vermesi, modelin geçerliliğini ve güvenilirliğini pekiştirmiştir. Ayrıca, literatürdeki diğer bir deneysel ölçüm sonuçlarıyla [120] da ilave karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu bölümde sırasıyla iki ayrı kristal düzlem yapısına sahip alttaşlar üzerinde üretimi yapılan eyleyicilerin değişik uzunlukları için çökme voltajı değerleri verilerek gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Tablo 4.27.'de kristal düzlem <110> için toplamda 11 değişik uzunluktaki eyleyicinin çökme voltajı ölçümleri ve bu uzunluklar için YSA modelinden elde edilmiş çökme voltajı sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.27. Deneysel ölçümlerin YSA ile karşılaştırılması

Eyleyici Uzunluğu (μm)	Çökme Voltajları (Volt)		Deneysel [120] ve YSA arasındaki % hata
	Deneysel [120]	YSA	
175	85.22	85.04	0.21
200	65.67	65.84	0.26
225	52.68	52.49	0.36
250	42.91	42.90	0.02
275	36.00	35.84	0.44
300	30.37	30.50	0.43
350	23.00	23.12	0.52
400	18.11	18.32	1.16
450	14.78	14.97	1.29
500	12.40	12.47	0.56
550	10.61	10.53	0.75
OYH			0.55

($w=50 \mu\text{m}$, $t=2.94 \mu\text{m}$, $g=1.05 \mu\text{m}$, $\sigma=10 \text{ MPa}$, $E=168 \text{ GPa}$, $\nu=0.06$)

Kristal düzlem <110> için yapılmış olan ölçüm sonuçları, eğitim sonucu elde edilen YSA sonuçlarıyla ortalama olarak %0.55 hata oranıyla örtüşmektedir. Bu uyum modelin oldukça iyi bir YSA olduğunu göstermektedir. Tablo 4.27.'daki veriler kullanılarak, söz konusu uyumun kolaylıkla görülmesi amacıyla Şekil 4.24.'de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Değişik uzunluklarda 11 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği

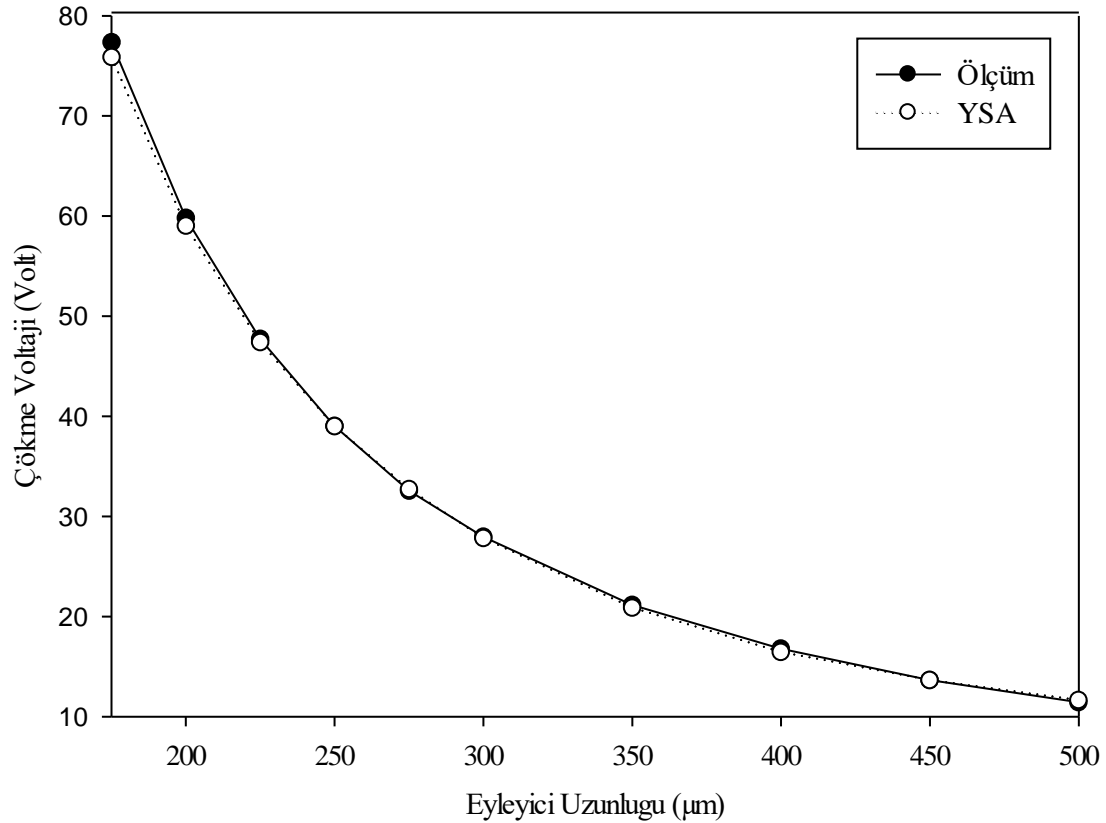
Tablo 4.28.'de kristal düzlem <100> için toplamda 10 değişik uzunlukta eyleyicinin çökme voltajı ölçümleri ve bu uzunluklar için YSA'dan elde edilmiş çökme voltajı sonuçları verilmiştir.

Kristal düzlem 100 için yapılmış olan ölçüm sonuçları, YSA hesaplama sonuçlarıyla ortalama olarak %1.0 hata oranıyla örtüşmektedir. Bu uyum modelin oldukça iyi bir YSA olduğunu göstermektedir. Tablo 4.28.'daki veriler kullanılarak, söz konusu uyumun kolaylıkla görülmesi amacıyla Şekil 4.25.'de grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.28. Deneysel yapılmış ölçümlerin YSA ile karşılaştırılması

Eyleyici Uzunluğu (μm)	Çökme Voltajları (Volt)		Deneysel [120] ve YSA arasındaki hata (%)
	Deneysel [120]	YSA	
175	77.38	78.80	1.84
200	59.86	60.19	0.55
225	47.79	47.79	0.00
250	39.12	39.12	0.00
275	32.65	32.81	0.49
300	28.06	28.06	0.00
350	21.26	21.48	1.03
400	16.90	17.14	1.42
450	13.78	14.05	1.96
500	11.56	11.72	1.38
OYH			0.87

($w=50 \mu\text{m}$, $t=2.94 \mu\text{m}$, $g=1.05 \mu\text{m}$, $\sigma=10 \text{ MPa}$, $E=138 \text{ GPa}$, $\nu=0.06$)



Şekil 4.25. Değişik uzunluklarda 10 eyleyicinin ölçüm ve hesaplama grafiği

4.6. Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, iki ucu bağlı eyleyiciler için çökme voltajını hesaplamak amacıyla bu tez kapsamında geliştirilen üç hesaplama yönteminin birbiriyle karşılaştırılarak, avantaj ve dezavantajlarının değerlendirilmesi yer almaktadır. İki ucu bağlı eyleyicilerin çökme voltajını verecek analitik bir formülün elde edilmesi için, benzetim programları ile değişik boyut ve parametrelere sahip çok sayıda iki ucu bağlı elektrostatik eyleyicinin benzetimi yapıldı. Eyleyicinin mekanik modeli oluşturularak, analitik formülü elde edildi. İki ucu bağlı eyleyicilerin üretim aşamasında yapılarında oluşabilecek stresin analitik olarak modellenmesi zor olduğundan ilave çalışmalar ile analitik formülden, empirik formül olan Denklem (4.47) elde edildi.

Benzetimler ve literatürdeki teorik ve deneysel sonuçlar kullanılarak yapılan kıyaslamalarla Denklem (4.47)'nin geçerliliği gösterildi. İki ucu bağlı eyleyicilerin çökme voltajını verecek bir formülün, yapay zeka optimizasyon yöntemi kullanılarak elde edilebilmesi için, benzetim programı ile değişik parametrelere sahip ilave 950 adet eyleyicinin benzetimi yapıldı ve analiz edildi. 950 adet benzetim sonucu içinden ($g/t \leq 1$) koşuluna uyan 216 adedi kullanılarak belirsiz katsayılı matematiksel bir model oluşturuldu ve yapay zeka optimizasyon teknikleriyle yeni bir formüle yani Denklem (4.50)'ye dönüştürüldü.

Benzetimler ve literatürdeki teorik ve deneysel sonuçlar ile Denklem(4.50)'nin geçerliliği gösterildi. İki ucu bağlı eyleyicilerin çökme voltajını verecek yeni bir model, Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi kullanılarak elde edildi. Benzetimi yapılmış olan, 950 adet benzetim verisinden çökme voltaj değeri 300 Volttan küçük olan 333 adedi belirlendi ve bu veriler ile YSA modelinin eğitimi yapılarak, test edildi. Benzetimler ve literatürdeki teorik ve deneysel sonuçlar ile YSA'nın geçerliliği gösterildi.

Tablo 4.29. Üç yöntemin karşılaştırılması için eyleyici parametreleri

Eyleyici Numarası	Eyleyici Boyutları (μm)				Uzama Oranı ν	Elastik Sabiti E (GPa)	Artık Stres σ (MPa)
	L	w	t	g			
1	250	50	3	1	0.32	169	0
2	250	50	3	1	0.06	169	0
3	250	50	3	1	0.06	169	100
4	250	50	3	1	0.06	169	-25
5	350	50	3	1	0.06	169	0
6	350	50	3	1	0.06	169	100
7	350	50	3	1	0.06	169	-25

İki ucu bağlı eyleyiciler için geliştirilen her üç yöntemin karşılaştırılması için daha önce literatürde kullanılmış olan ve Tablo 4.29.'da gösterilen 7 adet değişik parametre için yapılmış hesaplamalar kullanılarak, hangi yöntemin ne oranda iyi bir yaklaşım gösterdiği Tablo 4.30.'da gösterildi. Tablo 4.29.'da verilen iki ucu bağlı eyleyicilere ait 7 adet parametre için benzetimi yapılmış ve deneysel olarak doğrulanmış CoSolve [120] sonuçlarına göre YSA modeli, tüm parametre değerlerinde, bu tez çalışmasında elde edilen diğer 2 hesaplama yönteminden daha yakın sonuçlar vermiştir.

Tablo 4.30. Parametrelere göre CoSolve [120] ile yöntemlerin kıyası

Eyleyici Numarası	CoSolve [120] Benzetim	Hesaplama yöntemleri (Volt)			CoSolve [120] ile Hata (%)		
		Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA
1	40.1	39.42	39.4	41.20	1.7	1.7	0.00
2	41.2	41.53	41.5	40.10	0.80	0.7	0.00
3	57.6	57.03	57.0	57.59	0.99	1.1	0.02
4	33.6	33.61	33.6	33.60	0.03	0.1	0.00
5	20.3	20.11	20.1	20.31	0.94	1.2	0.05
6	35.8	35.25	35.6	35.79	1.54	0.7	0.03
7	13.7	13.97	13.7	13.68	1.97	0.3	0.15
OYH					1.14	0.83	0.04

YSA modeli daha yakın sonuçlar üretme bakımından avantaja sahipken, YSA modelinin çalışabilmesi için bilgisayar alt yapısına ihtiyaç duyulduğundan, diğer 2 yöntem daha kolay hesaplanabilirlik bakımından avantaja sahiptir.

Tablo 4.31.'de elastik sabiti (E) 168 GPa olan bir malzemedan çeşitli uzunluklarda üretilmiş ve deneysel ölçüm sonuçları verilmiş iki ucu bağlı bir eyleyici için, her üç yöntemin hesaplama sonuçları yer almaktadır.

Tablo 4.31.'den de görüldüğü gibi YSA modeli ortalama yüzde hata olarak deneysel sonuçlara göre en düşük sonucu verse de, bazı noktalarda diğer hesaplama yöntemleri daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu da göstermektedir ki, hesaplama yöntemi olarak her üç yöntem arasından YSA seçildiğinde her zaman en iyi sonuç elde edileceği garanti edilememektedir.

Tablo 4.31. Üç yöntemin ölçümler [120] ile karşılaştırılması ($E=168$ GPa)

Eyleyici Uzunluğu (μm)	Çökme Voltajları (Volt)				Deneysel [120] ile Hata (%)		
	Deneysel [120]	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA
175	85.22	85.97	86.20	85.04	0.88	1.15	0.21
200	65.67	66.31	66.45	65.84	0.97	1.19	0.26
225	52.68	52.82	52.93	52.49	0.26	0.47	0.36
250	42.91	43.16	43.26	42.90	0.59	0.82	0.02
275	36.00	36.01	36.11	35.84	0.03	0.31	0.44
300	30.37	30.57	30.67	30.50	0.64	0.99	0.43
350	23.00	22.95	23.07	23.12	0.21	0.30	0.52
400	18.11	17.99	18.13	18.32	0.64	0.11	1.16
450	14.78	14.58	14.74	14.97	1.35	0.27	1.29
500	12.40	12.13	12.30	12.47	2.20	0.81	0.56
550	10.61	10.30	10.49	10.53	2.90	1.13	0.75
OYH					0.97	0.69	0.55

($w=50 \mu\text{m}$, $t=2.94 \mu\text{m}$, $g=1.05 \mu\text{m}$, $\sigma=10$ MPa, $E=168$ GPa, $\nu=0.06$)

Tablo 4.32.'de elastik sabiti (E) 138 GPa olan bir malzemedeki çeşitli uzunluklarda üretilmiş ve deneysel ölçüm sonuçları verilmiş iki ucu bağlı bir eyleyici için, her üç yöntemin hesaplama sonuçları yer almaktadır. Tablo 4.32.'den de görüldüğü gibi YSA modeli ortalama yüzde hata olarak deneysel sonuçlara göre en düşük sonucu verse de, diğer hesaplama yöntemleri bazı noktalarda daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu da göstermektedir ki, formül olarak elde edilen Denklem (4.47) ve (4.50) hem pratik hesaplama bakımından hem de bazı noktalarda daha yakın sonuçlar üretme bakımından avantaja sahiptirler.

Tablo 4.32. Üç yöntemin ölçümler [120] ile karşılaştırılması ($E=138$ GPa)

Eyleyici Uzunluğu (μm)	Çökme Voltajları (Volt)				Deneysel [120] ile Hata (%)		
	Deneysel [120]	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA
175	77.38	78.35	78.56	78.80	1.25	1.52	1.84
200	59.86	60.52	60.67	60.19	1.10	1.35	0.55
225	47.79	48.29	48.40	47.79	1.04	1.28	0.00
250	39.12	39.53	39.64	39.12	1.04	1.33	0.00
275	32.65	33.04	33.15	32.81	1.18	1.53	0.49
300	28.06	28.09	28.21	28.06	0.12	0.53	0.00
350	21.26	21.18	21.32	21.48	0.39	0.28	1.03
400	16.90	16.67	16.83	17.14	1.36	0.41	1.42
450	13.78	13.56	13.74	14.05	1.57	0.29	1.96
500	11.56	11.33	11.52	11.72	2.02	0.35	1.38
OYH					1.11	0.89	0.87

($w=50 \mu\text{m}$, $t=2.94 \mu\text{m}$, $g=1.05 \mu\text{m}$, $\sigma=10$ MPa, $E=138$ GPa, $\nu=0.06$)

Bu bölümde, hesaplama yöntemleri arasında yapılan karşılaştırmalarda şimdiye kadar literatürdeki parametreler ve sonuçlar kullanıldı. Fakat hesaplamaya yöntemlerinin güçlü veya zayıf yönlerini daha iyi görebilmek bakımından, bu çalışmada yapılan benzetim sonuçları da kullanılarak gerekli kıyaslamalar yapıldı. Tablo 4.33.'de değişik eyleyici genişlikleri için yapılmış olan benzetim sonuçları temel alınarak, gerekli karşılaştırmalar yapıldı. Elde edilen hata değerlerine bakıldığında, Denklem (4.47) eyleyici genişliğini ifade eden herhangi bir değişken içermediğinden nispeten daha yüksek hata değerlerine sahiptir. Bu durum, Denklem (4.47)'nin diğer yöntemlere göre eyleyici genişlik değişimlerine daha duyarsız sonuçlar ürettiğini ve bu bakımdan dezavantaja sahip olduğunu göstermiştir.

Tablo 4.33. Üç yöntemin benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması

Eyleyici Genişliği ($w, \mu\text{m}$)	COMSOL Benzetim (Volt)	Hesaplama yöntemleri (Volt)			COMSOL ile % hata		
		Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA
$L = 200 \mu\text{m}, t = 2 \mu\text{m}, g = 1 \mu\text{m}$							
50	33.60	33.13	33.43	33.56	1.40	0.51	0.12
20	33.30	33.13	33.20	33.21	0.51	0.30	0.28
10	33.10	33.13	33.03	33.10	0.09	0.22	0.01
5	32.90	33.13	32.86	32.78	0.70	0.13	0.38
2	32.60	33.13	32.63	32.49	1.63	0.10	0.33
1	32.20	33.13	32.46	32.38	2.89	0.81	0.57
$L = 500 \mu\text{m}, t = 4 \mu\text{m}, g = 2 \mu\text{m}$							
50	42.83	42.41	42.50	42.68	0.98	0.78	0.35
20	42.30	42.41	42.20	42.44	0.26	0.23	0.32
10	42.10	42.41	41.99	42.20	0.74	0.27	0.23
5	41.80	42.41	41.77	41.70	1.46	0.08	0.23
2	41.40	42.41	41.48	41.25	2.44	0.20	0.36
1	41.00	42.41	41.27	41.08	3.44	0.65	0.19
OYH					1.38	0.36	0.28

Tablo 4.34.'de iki ucu bağlı eyleyicilerin plakaları arasında bulunana başlangıç mesafesinin (g) değişik değerleri için yapılmış olan benzetim sonuçları temel alınarak, hesaplama yöntemleri arasında gerekli karşılaştırmalar yapıldı. Tablo 4.34.'de ki yüzde hata değerlerine bakıldığında, özellikle başlangıç açıklık değerleri büyük olan eyleyiciler için Denklem (4.47) ve (4.50) kötü sonuçlar vermektedirler. Zaten bu denklemlerin elde edildiği bölümde de vurgulandığı gibi, bu denklemler başlangıç açıklıklarının, eyleyici kalınlıklarına oranla küçük olduğu ($g/t \leq 1$) eyleyiciler için yakın sonuçlar vermektedirler. Dolayısıyla, Tablo 4.34.'de ($g/t \leq 1$) oranının sağlanmadığı yerlerde hata oranları artmıştır.

Tablo 4.34. Her üç yöntemin benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılması

Başlangıç Açıklığı (g , μm)	COMSOL Benzetim (Volt)	Hesaplama yöntemleri (Volt)			COMSOL ile % hata		
		Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA	Denk. (4.47)	Denk. (4.50)	YSA
$L = 200 \mu\text{m}$, $w = 50 \mu\text{m}$, $t = 2 \mu\text{m}$							
1	33.6	33.13	33.43	33.56	1.4	0.51	0.12
2	99.5	93.71	94.55	99.48	5.82	4.97	0.02
3	196	172.17	173.70	196.91	12.16	11.38	0.47
5	520	370.45	373.74	505.51	28.76	28.13	2.79
$L = 500 \mu\text{m}$, $w = 50 \mu\text{m}$, $t = 4 \mu\text{m}$							
2	42.83	42.41	42.50	42.68	0.98	0.78	0.35
3	79.8	77.91	78.07	79.65	2.37	2.17	0.19
4	126	119.95	120.20	125.96	4.81	4.61	0.03
6	249	220.38	220.81	249.52	11.49	11.32	0.21
OYH					8.47	7.98	0.52

YSA modeli tüm başlangıç açıklığı değerleri için oldukça yakın sonuçlar verdiği için diğer yöntemlere göre bu bakımdan büyük avantaja sahiptir. Daha önce de bahsedildiği gibi, YSA modelinin yegane dezavantajı bilgisayar altyapısına ihtiyaç duyması ve nispeten hesaplanmasının zor olmasıdır. Diğer hesaplama yöntemleri basit bir bilimsel hesap makinasıyla hesaplanabildiğinden ve günümüz teknolojisinde entegre devrelere gömülü olarak kullanımları da mümkün olduğundan pratik kullanım ve kolay hesaplanabilme avantajlarına sahiptirler.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bir ucu bağlı ve iki ucu bağlı MEMS eyleyicinin konum ve voltaj değerlerinin hesaplanabilmesi için analitik ve numerik yöntemler geliştirmiş ve doğrulamaları yapılmıştır. Bu yöntemler sayesinde, MEMS eyleyicilerin hassas kontrolü sağlanabilecek ve yeni tasarımlarda olası istenmeyen durumların önceden belirlenebilmesi sayesinde; maliyet, enerji ve zamandan tasarruf edilebilecektir.

5.1. Bir Ucu Bağlı Eyleyici İçin Formül Sonuçları

Tezin bu kısmında, elektrostatik bir ucu bağlı MEMS eyleyiciler için uygulanan voltaj ve oluşan deformasyon miktarı arasındaki bağlantıyı veren ve çökme voltajını hesaplayan analitik bir denklem elde edilmiştir. Denklemlerin elde edildiği eyleyici modeli, bir uçtan pivot noktasına bağlı, düz, bükülmeyen ve yay kuvveti ile dengelenen bir yapı olarak ifade edilmiştir. Modelde elektrostatik kuvvet ve yay kuvveti eşitliğinden, başlangıç noktasından çökme noktasına kadar olan tüm kararlı bölgede istenen deformasyon miktarına göre uygulanması gereken voltaj değerini hesaplayacak bir denklem elde edilmiştir. Ayrıca, bir ucu bağlı eyleyiciler için çökme noktası tespit edilerek, çökme noktasının; başlangıç açıklığının %44'ü olduğu ve bu oranın benzetim (ANSYS, COMSOL) ve deneysel [1, 135] çalışmalarla da uyumlu olduğu gösterilmiştir. Daha önce literatürde sunulmuş Lumped model çökme noktası olan %33 oranı ile karşılaştırıldığında, çökme değeri olarak %44 bulunmuş olması, önerilen formülün deneysel ve benzetim sonuçlarına daha yakın sonuçlar veren bir matematiksel model olduğunu teyit etmiştir. Bir ucu bağlı eyleyici için önerilen model, başlangıçtan çökme noktasına kadar olan kararlı bölgede; uygulanan voltaj ve deformasyon miktarı arasında deneysel ölçüm ve benzetim verileri ile uyumlu sonuçlar veren bir formüldür. Tüm kararlı bölgede, istenen deformasyon miktarına göre uygulanması gereken voltaj değerini hesaplayan ve çökme voltajını veren formülün elde edilmiş olması daha önce literatürde yapılmış birçok çalışmanın [136, 174] eksik yönünü gidermiştir. Sonlu eleman analizi tabanlı ANSYS ve COMSOL benzetim verileri ve önerilen formül sonuçları arasındaki yüzde hata oranları tüm değerler için %4'ün altında olmakla birlikte en büyük hata değeri %3.78 olarak görülmüştür. Benzetim karşılaştırmalarına ilaveten deneysel ölçümlerle de karşılaştırmalar yapılarak, önerilen formülün geçerliliği pekiştirilmiştir. Deneysel ölçümlerle denklem sonuçları arasındaki ortalama hata oranları %1'in altında kalmıştır. Ayrıca, önerilen çökme voltajı formülü literatürde sunulmuş hesaplanması ve uygulanması zor olan birçok metotla [1, 135, 174] da kıyaslanmıştır. Önerilen denklem, söz konusu metotlara göre hem kolay ve zahmetsiz hem de gerçeğe daha yakın sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla, önerilen formülün bir ucu bağlı eyleyiciler için daha pratik ve daha doğru sonuç üreten basit bir matematiksel ifade olduğu görülmüştür. Bu sayede, birçok MEMS tasarım ve üreticisi için, tasarım ve üretim öncesi

hesaplamlarda kullanılabilir, herhangi bir matematiksel veya bilgisayar altyapısı gerektirmeyen bir hesaplama yöntemi ortaya konulmuştur.

5.2. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Formül Sonuçları

Bu bölümdeki çalışmalar neticesinde, iki ucu bağlı elektrostatik MEMS eyleyiciler için hem çökme voltajını ve hem de çökme noktasına kadar olan kararlı bölgede istenen deformasyon miktarına göre uygulanması gerek voltajı hesaplayacak bir denklem elde edilmiştir. Tüm kararlı bölge için gerekli voltaj hesabını yapan analitik denklemden çökme noktası değeri tespit edilmiştir. Çökme noktası değeri, başlangıç açıklığının %40'ı olarak bulundu. Bu çökme noktası değerinin, hem ANSYS ve COMSOL benzetim verileri hem de deneysel ölçümlerle [120] uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, başlangıç noktasından çökme noktasına kadar olan kararlı aralıkta, yapılmış olan COMSOL™ benzetim verileri ve önceki deneysel ve teorik çalışmalarla tüm değerler için %2'nin altında oldukça iyi bir uyum gözlemlendi. Önerilen çökme voltajı hesaplama formülü, yukarıda bahsedildiği gibi deneysel ve benzetim verilerine uyumlu sonuçlar verse de, büyük başlangıç aralık değerlerine sahip eyleyiciler ve değişik genişlik değerlerine sahip eyleyiciler için nispeten kötü sonuçlar vermiştir. Çünkü başlangıç açıklığı büyük olan yapılarda kaçış alanları (fringing field) etkisi artmakta ve analitik olarak oluşturulan denklem bu etkiyi hesaba katmadığı için hata oranı artmaktadır. Buna ilaveten, denklem eyleyicinin genişliği için herhangi bir değişken içermediği için, değişik eyleyici genişlikleri için aynı sonuçları vermekte ve hata oranları değişmektedir. Sonuç olarak, nispeten küçük başlangıç açıklığı değerlerine ($g/t \leq 1$) sahip eyleyici yapıları için denklem başarılı sonuçlar vermektedir. Bu bölümde elde edilen denklem, literatürdeki hesaplama yöntemlerine göre hem kolay hesaplanabilirlik hem de gerçek ölçümlere daha yakın sonuçlar verme bakımından üstünlüğe sahiptir.

5.3. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Optimizasyon Sonuçları

Çalışmanın bu kısmında, iki ucu bağlı eyleyiciler için çökme voltajı hesabını yapacak kolay hesaplanabilen ve basit bir denklem önerilmiştir. Önerilen denklem, yapılan benzetim verileri kullanılarak; yapay zeka algoritmasıyla optimizasyon işlemi sonucunda oluşturulmuş ve daha önceki bölümde analitik olarak elde edilen formülün zayıf kaldığı noktaları güçlendirmek adına yapılmıştır. Optimizasyon işleminin istenen sonuçlara göre modeli oluşturması sayesinde; dolaylı olarak da olsa, bir önceki analitik modelde hesaba katılmayan bozucu etkiler (kaçış alanları, düzlem bükülmesi ve boyut etkiler vs.) hesaba katılmıştır. Elde edilen denklem sadece benzetim verileri sayesinde oluşturulduğundan, geçerliliğini göstermek adına daha önce yapılmış deneysel [120, 189] ve teorik [1, 95, 120, 134, 136, 138, 189, 192] çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tüm

karşılaştırma durumlarında, en büyük hata değeri %2.18 olarak bulundu ve sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu gözlemlendi. Çeşitli durumlarda, daha önce sunulmuş olan bazı karmaşık hesaplama yöntemleri [1, 136] ortalama olarak; önerilen denklemden daha iyi sonuç verseler de, önerilen formülün kolay hesaplanabilir oluşu ve herhangi bir bilgisayar yardımı bile gerektirmemesi diğer yöntemlere göre büyük avantaj sağlamaktadır. Önerilen formülün hem geçerliliğinin yüksek oluşu hem de basitliği sayesinde, birçok bilim insanı ve tasarımcı tarafından çalışmalarının doğrulanması ve yeni yapıların tasarlanması için kullanılabilir. İki ucu bağlı MEMS eyleyiciler için optimizasyon sonucu elde edilen denklem, daha önce analitik olarak oluşturulmuş olan denkleme göre daha kapsamlı ve daha iyi sonuçlar verdiği için, optimizasyon işlemi ileride bir ucu bağlı eyleyiciler için de uygulanabilir. Bu sayede şu an olduğundan daha iyi sonuçlar veren matematiksel ifadeler elde edilebilir.

5.4. İki Ucu Bağlı Eyleyici İçin Yapay Sinir Ağı Sonuçları

Çalışmanın son kısmında, iki ucu bağlı eyleyiciler için çökme voltajı hesabını yapacak yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Önerilen model, yapılan benzetim verileri kullanılarak; yapay sinir ağları eğitimi sonucunda oluşturulmuş ve daha önceki bölümlerde analitik yolla oluşturulan ve optimizasyon sonucu elde edilen denklemlerin zayıf kaldığı noktaları güçlendirmek adına yapılmıştır. YSA modelinin istenen eğitim verilerine göre modeli oluşturması sayesinde; dolaylı olarak da olsa, bir önceki analitik modelde ihmal edilen bozucu etkiler (kaçış alanları, düzlem bükülmesi ve boyut etkiler vs.) hesaba katılmıştır. Elde edilen YSA sadece benzetim verileri sayesinde oluşturulduğundan, geçerliliğini göstermek adına daha önce yapılmış deneysel [120, 189] ve teorik [1, 95, 120, 134, 136, 138, 189, 192] çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tüm karşılaştırma durumlarında, en büyük hata değeri %3.87 olarak bulunmuş ve oldukça iyi uyumlar gözlemlenmiştir. Önerilen YSA modeli tüm durumlar için ortalama olarak, daha önce sunulmuş hesaplama yöntemlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Önerilen YSA'nın doğruluk oranının yüksek oluşu sayesinde, birçok bilim insanı ve tasarımcı tarafından çalışmalarının doğrulanması ve yeni yapıların tasarlanması için kullanılabilir. YSA yönteminin tek dezavantajı, YSA modelinin üzerinde çalıştırılacağı bir bilgisayar sistemine ihtiyaç duyulmasıdır. İki ucu bağlı MEMS eyleyiciler oluşturulan YSA, daha önce analitik olarak oluşturulmuş olan denklemlere göre daha kapsamlı ve daha iyi sonuçlar verdiği için, YSA oluşturma işlemi, ileride bir ucu bağlı eyleyiciler için de uygulanabilir. Bu sayede bir ucu bağlı eyleyiciler için de, şu anki analitik hesaplamalara göre daha iyi sonuçlar veren YSA modelleri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Sadeghian, H., Rezazadeh, G. ve Osterberg, P. M. "Application of the Generalized Differential Quadrature Method to the Study of Pull-In Phenomena of MEMS Switches", *J. Microelectromech. Syst.*, 16(6), (2007).
- [2] Mercado, L. L., Kuo, S. M., Lee, T. Y. T., ve Liu, L. "A Mechanical Approach to Overcome RF MEMS Switch Stiction Problem", *Elect. Comp. and Tech. Conf.*, s.377-384, (2003).
- [3] Sadeghian, H., H., Rezazadeh, Malekpour, E., ve Shafipour, A. "Pull-In Voltage of Fixed-Fixed End Type MEMS Switches with Variative Electrostatic Area", *Sensors & Transducers Mag.*, 66(4): 526-533, (2006).
- [4] Elshurafa, A. M. ve El-Masry, E. I. "Finite-Element Modeling of Low-Stress Suspension Structures and Applications in RF MEMS Parallel-Plate Variable Capacitors", *IEEE Trans. On Microwave The. And Tech.*, 54(5), (2006).
- [5] Duval, F. F.C., Wilson, S. A., Ensell, G., Evanno, N. M.P., Cain, M. G. ve Whatmore, R. W. "Characterisation of PZT thin film micro-actuators using a silicon micro-force sensor", *Sensors and Actuators A*, 112:155-161, (2004).
- [6] Wang, W., Tatic-Lucic, S., Brown, W. L., ve Vinci, R. "Design of a bidirectional MEMS actuator with high displacement resolution, large driving force and power-free latching", *Microelectronic Eng.*, 85: 587-598, (2008).
- [7] Zhu, Y., Moldovan, N. ve Espinosa, H. D. "A microelectromechanical load sensor for in situ electron and x-ray microscopy tensile testing of nanostructures" *Applied physics letters*, 86, (2005).
- [8] Dastider, S.G.; Barizuddin, S.; Dweik, M.; Almasri, M. A micromachined impedance biosensor for accurate and rapid detection of E. coli O157:H7. *RSC Adv.* 2013, 3, 26297–26306.
- [9] Suzuki, J., Komai, A., Ohuchi, Y., Tezuka, Y., Konishi, H., Nishiyama, M., Suzuki, Y. ve Owa, S. "Micro-Mirror on Ribbon-Actuator (MOR) for High Speed Spatal Light Modulator", *Micro Elec. Mech. Syst. IEEE 21. Int. Conf.*, s.762-765, (2008).
- [10] Wang, Z. F., Noell, W., Zickar, M., de Rooij, N. ve Lim, S. P. "Development of Scanning MEMS Mirror with New Assembly Structure", *DTIP of MEMS & MOEMS*, (2006).
- [11] V. Saxena, T. J. Plum, J. R. Jessing and R. Jacob Baker, "Design and fabrication of a MEMS capacitive chemical sensor system," *Microelectronics and Electron Devices*, 2006. WMED '06. 2006 IEEE Workshop on, Boise, ID, 2006, pp. 2 pp.-18. doi: 10.1109/WMED.2006.1678286.
- [12] Chen, B., Miao, J. ve Tay, F. E. H. "Fabrication and characterization of DRIE-micromachined electrostatic microactuators for hard disk drives", *Microsyst Technol*, 13(1): 11-19, (2006).
- [13] Lu, M. S.- C., ve Fedder, G. K. "Position Control of Parallel-Plate Microactuators for Probe-Based Data Storage", *J. Microelectromech. Syst.*, 13(5), (2004).
- [14] R.C. Batra, M. Porfiri, D. Spinello, Review of modeling electrostatically actuated microelectromechanical systems *Smart Mater, Struct* 16 (2007) R23–R31.
- [15] W.C. Tang, T-C.H. Nguyen, R.T. Howe, Laterally driven polysilicon resonant microstructures *Sensors and Actuators* 20 (1989) 25–32.
- [16] R.N. Dean Jr., A. Luque, Applications of microelectromechanical systems in industrial processes and services *IEEE Trans, Ind. Electron.* 56 (2009) 913-925.

- [17] K. Eom, H.S. Park, D.S. Yoon, T. Kwon, Nanomechanical resonators and their applications in biological/chemical detection: Nanomechanics principles Phys, Reports 503 (2011) 115–163.
- [18] W.M. Zhang, G. Meng, Nonlinear dynamic analysis of electrostatically actuated resonant MEMS sensors under parametric excitation, IEEE Sens J. 7 (2007) 370–380.
- [19] W.C. Chuang, H.L. Lee, P.Z. Chang, Y.C. Hu, Review on the modeling of electrostatic MEMS Sensors 10 (2010) 6149–6171.
- [20] K.W. Oh, C.H. Ahn, A review of microvalves J, Micromech. Microeng. 16 (2006) R13–R39.
- [21] A. Nisar, N. Afzulpurkar, B. Mahaisavariya, A. Tuantranont, MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications Sensors and Actuators B 130 (2008) 917–942.
- [22] R.J. Pryputniewicz, Progress in microelectromechanical systems Strain 43 (2007) 13–25.
- [23] D. Liu, K.-C. Friend, J.L. Yeo, A brief review of actuation at the micro-scale using electrostatics, electromagnetics and piezoelectric ultrasonics Acoust, Sci. and Tech. 31 (2010) 115–123.
- [24] W.-M. Zhang, H. Yan, Z.-K. Peng and G. Meng, “Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review,” Sensors and Actuators A: Physical, 214, 187–218 (2014).
- [25] Y. Nemirovsky, O. Bochobza-Degani, A methodology and model for the pullin parameters of electrostatic actuators J, Microelectromech. Syst. 10 (2001) 601–615.
- [26] S. Jaibir, K. Nagendra, D. Amitava, Fabrication of low pull-in voltage RF MEMS switches on glass substrate in recessed CPW configuration for V-band application J, Micromech. Microeng. 22 (2012) 025001.
- [27] K.B. Lee, Closed-form expressions for pull-in parameters of two-degree-of-freedom torsional microactuators J, Micromech. Microeng. 17 (2007) 1853–1862.
- [28] K.B. Lee, Design methodology for variable capacitors J, Micromech. Microeng. 18 (2008) 025016.
- [29] W. Xiang, C. Lee, Nanoelectromechanical torsion switch of low operation voltage for nonvolatile memory application Appl, Phys. Lett. 96 (2010) 193113.
- [30] L. Pescini, H. Lorenz, R.H. Blick, Mechanical gating of coupled nanoelectromechanical resonators operating at radio frequency Appl, Phys. Lett. 82 (2003) 352–354.
- [31] A.M. Fennimore, T.D. Yuzvinsky, W.Q. Han, M.S. Fuhrer, J. Cumings, A. Zettl, Rotational actuators based on carbon nanotubes Nature 424 (2003) 408–410.
- [32] R. Legtenberg, J. Gilbert, S.D. Senturia, M. Elwenspoek, Electrostatic curved electrode actuators J, Microelectromech. Syst. 6 (1997) 257–265.
- [33] B. Yang, C. Lee, R.K. Kotlanka, J. Xie, S.P. Lim, A MEMS rotary comb mechanism for harvesting the kinetic energy of planar vibrations J, Micromech. Microeng. 20 (2010) 065017.
- [34] R. Legtenberg, A.W. Groeneveld, M. Elwenspoek, Comb-drive actuators for large displacements J, Micromech. Microeng. 6 (1996) 320–329.
- [35] P.M. Sousa, V. Chu, J.P. Conde, Reliability and stability of thin-film amorphous silicon MEMS resonators J, Micromech. Microeng. 22 (2012) 065030.
- [36] Z. Yang, G. Ding, H. Cai, X. Xu, H. Wang, X. Zhao, Analysis and elimination of the ‘skip contact’ phenomenon in an inertial micro-switch for prolonging its contact time J, Micromech. Microeng. 19 (2009) 045017.

- [37] S. Stemme, Design and fabrication aspects of an S-shaped film actuator based DC to RF MEMS switch J, *Microelectromech. Syst.* 13 (2004) 421–428.
- [38] H. Sasaki, M. Shikida, K. Sato, A force transmission system based on a tulipshaped electrostatic clutch for haptic display devices J, *Micromech. Microeng.* 16 (2006) 2673–2683.
- [39] M. Kawaguchi, K. Yamano, K. Okuda, T. Jimbo, N. Ishii, The characteristics evaluation of stacked-type electrostatic actuators by the neural network Lecture, *Notes in Computer Science* 4693 (2007) 1059–1065.
- [40] Y. Qian, L. Lou, M.J. Tsai, C. Lee, A dual-silicon-nanowires based U-shape nanoelectromechanical switch with low pull-in voltage *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 113102.
- [41] H. Rong, Q.-A. Huang, M. Nie, W. Li, An analytical model for pull-in voltage of clamped-clamped multilayer beams *Sens, Actuators A* 116 (2004) 15–21.
- [42] M. Nie, Q.-A. Huang, W. Li, Pull-in characterization of doubly-clamped composite beams *Sens, Actuators A Phys.* 151 (2009) 118–126.
- [43] SunY, D. Piyabongkarn, A. Sezen, B.J. Nelson, R. Rajamani, A high-aspect-ratio two axis electrostatic microactuator with extended travel range *Sens, Actuators A Phys.* 102 (2002) 49–60.
- [44] V.V. Bolotin, Dynamic instabilities in mechanics of structures *ASME Appl, Mech. Rev.* 52 (1999) R1–R9.
- [45] H.C. Nathanson, W.E. Newell, R.A. Wickstrom, J.R. Davis, The resonant gate transistor *IEEE Trans, Electron. Devices* 14 (1967) 117–133.
- [46] G.I. Taylor, The coalescence of closely spaced drops when they are at different electric potentials, *Proc. Roy. Soc. A* 306 (1968) 423–434.
- [47] A.C.J. Luo, F.Y. Wang, Chaotic motion in a Micro-Electro-Mechanical System with non-linearity from capacitors *Commun, Nonlinear Sci. Numer. Simulation* 7 (2002) 31–49.
- [48] O. Bochobza-Degani, Y. Nemirovsky, Experimental verification of a design methodology for torsion actuators based on a rapid pull-in solver J, *Microelectromech. Syst.* 13 (2004) 121–130.
- [49] M.I. Younis, E.M. Abdel-Rahman, A. Nayfeh, A reduced-order model for electrically actuated microbeam-based MEMS J, *Microelectromech. Syst.* 12 (2003) 672–680.
- [50] S. Chatterjee, G. Pohit, A large deflection model for the pull-in analysis of electrostatically actuated microcantilever beams J, *Sound Vib.* 322 (2009) 969–986.
- [51] A.H. Nayfeh, M.I. Younis, E.M. Abdel-Rahman, Reduced-order models for MEMS applications *Nonlinear Dyn.* 41 (2005) 211–236.
- [52] S.K. De, N.R. Aluru, Full-Lagrangian schemes for dynamic analysis of electrostatic MEMS J, *Microelectromech. Syst.* 13 (2004) 737–758.
- [53] S.K. De, N. Aluru, R A hybrid full-Lagrangian technique for the static and dynamic analysis of magnetostatic MEMS J, *Micromech. Microeng.* 16 (2006) 2646–2658.
- [54] S. Krylov, Lyapunov exponents as a criterion for the dynamic pull-in instability of electrostatically actuated microstructures *Int, J. Non-Linear Mech.* 42 (2007) 626–642.
- [55] M. Raulli, K. Maute, Reliability based design optimization of MEMS considering pull-in *ASME Trans, J. Mech. Design* 131 (2009) 061014.

- [56] M.M.S. Fakhrabadi, P.K. Khorasani, A. Rastgoo, M.T. Ahmadian, Molecular dynamics simulation of pull-in phenomena in carbon nanotubes with Stone–Wales defects *Solid State Commun.* 157 (2013) 38–44.
- [57] Pelesko J A and Bernstein D H 2002 *Modeling MEMS and NEMS* Chapman Hall and CRC Press.
- [58] R. Lin, W. Wang, Structural dynamics of microsystems-current state of research and future directions *Mech, Syst. Signal Process.* 20 (2006) 1015–1043.
- [59] W.M. Zhang, G. Meng, D. Chen, Stability, nonlinearity and reliability of electrostatically actuated MEMS devices *Sensors* 7 (2007) 760–796.
- [60] Y. Fang, P. Li, A new approach and model for accurate determination of the dynamic pull-in parameters of microbeams actuated by a step voltage *J, Micromech. Microeng.* 23 (2013) 045010.
- [61] Ansari R. Gholami R, Shojaei M F, Mohammadi V and Darabi M A 2012 Surface stress effect on the pull-in instability of hydrostatically and electrostatically actuated rectangular nanoplates with various edge supports *ASME J. Eng. Mater. Technol.* 134 041013.
- [62] Ma J B, Jiang L and Asokanthan S F 2010 Influence of surface effects on the pull-in instability of NEMS electrostatic switches *Nanotechnol.* 21 505708.
- [63] Y.T. Beni, A. Koochi, A.S. Kazemi, M. Abadyan, Modeling the influence of surface effect and molecular force on pull-in voltage of rotational nano–micro mirror using 2-DOF model *Can, J. Phys.* 90 (2012) 963–974.
- [64] J.S. Duan, R. Rach, A.M. Wazwaz, Solution of the model of beam-type microand nano-scale electrostatic actuators by a new modified Adomian decomposition method for nonlinear boundary value problems, *Int. J. Nonlinear Mech.* 49 (2013) 159–169.
- [65] J.S. Duan, R. Rach, A pull-in parameter analysis for the cantilever NEMS actuator model including surface energy, fringing field and Casimir effects, *Int. J. Solids Struct.* 50 (2013) 3511–3518.
- [66] A. Farrokhhabadi, R. Rach, M. Abadyan, Modeling the static response and pullin instability of CNT nanotweezers under the Coulomb and van der Waals attractions, *Physica E* 53 (2013) 137–145.
- [67] Z. Yong, H.D. Espinosa, Effect of temperature on capacitive RF MEMS switch performance—a coupled field analysis *J, Micromech. Microeng.* 14 (2004) 1270–1279.
- [68] S. Talebian, G. Rezazadeh, M. Fathalilou, B. Toosi, Effect of temperature on pullin voltage and natural frequency of an electrostatically actuated microplate *Mechatron.* 20 (2010) 666–673.
- [69] M. Asghari, M.H. Kahrobaiyan, M.T. Ahmadian, A nonlinear Timoshenko beam formulation based on the modified couple stress theory *Int, J. Eng. Sci.* 48 (2010) 1749–1761.
- [70] H. Sadeghian, C.K. Yang, J.F.L. Goosen, E. van der Drift, A. Bossche, P.J. French, F. van Keulen, Characterizing size-dependent effective elastic modulus of silicon nanocantilevers using electrostatic pull-in instability *Appl, Phys. Lett.* 94 (2009) 221903.
- [71] Y. Fu, J. Zhang, Size-dependent pull-in phenomena in electrically actuated nanobeams incorporating surface energies *Appl, Math. Model.* 35 (2011) 941–951.

- [72] J. Abdi, A. Koochi, A.S. Kazemi, M. Abadyan, Modeling the effects of size dependence and dispersion forces on the pull-in instability of electrostatic cantilever NEMS using modified couple stress theory *Smart Mater, Struct.* 20 (2011) 055011.
- [73] M.H. Bao, H. Yang, Squeeze film air damping in MEMS *Sens. Actuators A Phys* (2007) 3–27.
- [74] P. Li, R. Hu, Y. Fang, A new model for squeeze-film damping of electrically actuated microbeams under the effect of a static deflection *J, Micromech. Microeng.* 17 (2007) 1242–1251.
- [75] W.M. Zhang, G. Meng, Nonlinear dynamical system of micro-cantilever under combined parametric and forcing excitations in MEMS *Sens, Actuators A* 119 (2005) 291–299.
- [76] W.M. Zhang, G. Meng, X.Y. Wei, A review on slip models for gas microflows *Microfluid, Nanofluid.* 13 (2012) 845–882.
- [77] G. Rezazadeh, M. Fathalilou, R. Shabani, S. Tarverdilou, S. Talebian, Dynamic characteristics and forced response of an electrostatically-actuated microbeam subjected to fluid loading *Microsyst, Tech.* 15 (2009) 1355–1363.
- [78] N. Sharafkhani, R. Shabani, S. Tariverdilo, G. Rezazadeh, Stability analysis and transient response of electrostatically actuated microbeam interacting with bounded compressible fluids *ASME J, Appl. Mech.* 80 (2013) 011024.
- [79] J. De Coster, H.A.C. Tilmans, J.T.M. van Beek, T.G.S.M. Rijks, R. Puers, The influence of mechanical shock on the operation of electrostatically driven RF-MEMS switches *J, Micromech. Microeng.* 14 (2004) S49.
- [80] M. Younis, R. Miles, D. Jordy, Investigation of the response of microstructures under the combined effect of mechanical shock and electrostatic forces *J, Micromech. Microeng* 16 (2006) 2463–2474.
- [81] M. Ibrahim, M.I. Younis, The dynamic response of electrostatically driven resonators under mechanical shock *J, Micromech. Microeng.* 20 (2010) 025006.
- [82] F.M. Alsaleem, M.I. Younis, M. Ibrahim, A study for the effect of the PCB motion and electrostatic force on the dynamics of MEMS devices under mechanical shock *J, Microelectromech. Syst.* 18 (2009) 597–609.
- [83] H.M. Ouakad, M.I. Younis, F. Alsaleem, Dynamic response of an electrostatically actuated microbeam to drop-table test, *J. Micromech. Microeng.* 22 (2012) 095003.
- [84] W.M. Zhang, O. Tabata, T. Tsuchiya, G. Meng, Noise-induced chaos in the electrostatically actuated MEMS resonators *Phys, Lett. A* 375 (2011) 2903–2910.
- [85] S. Krylov, R. Maimon, Pull-in dynamics of an elastic beam actuated by continuously distributed electrostatic force *J, Vib. Acoust.* 126 (2004) 332–342.
- [86] G.N. Nielson, G. Barbastathis, Dynamic pull-in of parallel-plate and torsional electrostatic MEMS actuators *J, Microelectromech. Syst.* 15 (2006) 811–821.
- [87] F.W. DelRio, M.P. de Boer, J.A. Knapp, E.D. Reedy Jr., P.J. Clews, M.L. Dunn, The role of van der Waals forces in adhesion of micromachined surfaces, *Nature Mater.* 4 (2005) 629–634.
- [88] A. Gusso, G.J. Delben, Dispersion force for materials relevant for micro- and nanodevices fabrication, *J. Phys. D: App. Phys.* 41 (2008) 175405.
- [89] R. Esquivel-Sirvent, M.A. Palomino-Ovando, G.H. Cocolletzi, Pull-in control due to Casimir forces using external magnetic fields *Appl, Phys. Lett.* 95 (2009) 051909.

- [90] N. Taghavi, H. Nahvi, Pull-in instability of cantilever and fixed-fixed nanoswitches, *Eur. J. Mech. A-Solid*. 41 (2013) 123–133.
- [91] X. Liu, N.G. Boddeti, M.R. Szpunar, L. Wang, M.A. Rodriguez, R. Long, J. Xiao, M.L. Dunn, J.S. Bunch, Observation of pull-in instability in graphene membranes under interfacial forces *Nano Lett.* 13 (2013) 2309–2313.
- [92] M.P. De Boer, T.A. Michalske, Accurate method for determining adhesion of cantilever beams *J. Appl. Phys.* 86 (1999) 817–827.
- [93] O. Loh, X. Wei, C. Ke, J. Sullivan, H.D. Espinosa, Robust carbon nanotube-based nanoelectromechanical devices: Understanding and eliminating prevalent failure modes using alternative electrode materials *Small* 7 (2011) 79–86.
- [94] D. Elata, H. Bamberger, On the dynamic pull-in of electrostatic actuators with multiple degrees of freedom and multiple voltage sources *J. Microelectromech. Syst.* 15 (2006) 131–140.
- [95] S. Pamidighantam, R. Puers, K. Baert, H.A.C Tilmans, Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed-fixed and fixed-free end conditions *J. Micromech. Microeng.* 12 (2002) 458–464.
- [96] A.H. Nayfeh, M.I. Younis, Dynamics of MEMS resonators under superharmonic and subharmonic excitations *J. Micromech. Microeng.* 15 (2005) 1840–1847.
- [97] A.K. Pandey, Effect of coupled modes on pull-in voltage and frequency tuning of a NEMS device, *J. Micromech. Microeng.* 23 (2013) 085015.
- [98] Y. Nemirovsky, I. Zelniker, O. Degani, G. Sarusi, A methodology and model for the pull-in parameters of magnetostatic actuators *J. Microelectromech. Syst.* 14 (2005) 1253–1264.
- [99] T.L. Tang, W. Fang, Magnetostatic torsional actuator with embedded nickel structures for the improvement of driving force and wobble motion *J. Micromech. Microeng.* 21 (2011) 095007.
- [100] M. Moscardo, X. Zhao, Z. Suo, Y. Lapusta, On designing dielectric elastomers *J. Appl. Phys.* 104 (2008) 093503.
- [101] C. Keplinger, M. Kaltenbrunner, N. Arnold, S. Bauer, Röntgen's electrode-free elastomer actuators without electromechanical pull-in instability, *PNAS* 107 (10) (2010) 4505–4510.
- [102] D. De Tommasi, G. Puglisi, G. Saccomandi, G. Zurlo, Pull-in and wrinkling instabilities of electroactive dielectric actuators *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 (2010) 325501.
- [103] X. He, H. Yong, Y. Zhou, The characteristics and stability of a dielectric elastomer spherical shell with a thick wall *Smart Mater, Struct.* 20 (2011) 055016.
- [104] E.S. Hung, S.D. Senturia, Extending the travel range of analog-tuned electrostatic actuators *J. Microelectromech. Syst.* 8 (1999) 497–505.
- [105] D.M. Burns, V.M. Bright, Nonlinear flexures for stable deflection of an electrostatically actuated micromirror *Proc, SPIE: Microelectron. Struct. MEMS Opt. Process. III* 3226 (1997) 125–135.
- [106] H. Ren, F. Tao, W. Wang, J. Yao, An out-of-plane electrostatic actuator based on the lever principle *J. Micromech. Microeng.* 21 (2011) 045019.
- [107] J.I. Seeger, B.E. Boser, Charge control of parallel-plate, electrostatic actuators and the tip-in instability *J. Microelectromech. Syst.* 12 (2003) 656–671.

- [108] D.H.S. Maithripala, J.M. Berg, W.P. Dayawansa, Control of an electrostatic MEMS using static and dynamic output feedback *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control* 127 (2005) 443–450.
- [109] L. Castaner, J. Pons, R. Nadal-Guardia, A. Rodriguez, Analysis of extended actuation range of electrostatic actuators by current pulse drive, *Sensors Actuators A* 90 (2001) 181–190.
- [110] L.A. Rocha, E. Cretu, R.F. Wolffenbuttel, Using dynamic voltage drive in a parallel-plate electrostatic actuator for full-gap travel range and positioning *J. Microelectromech. Syst.* 15 (2006) 69–83.
- [111] B. Legrand, A.S. Rollier, D. Collard, L. Buchaillet, Suppression of the pull-in instability for parallel-plate electrostatic actuators operated in dielectric liquids *Appl. Phys. Lett.* 88 (2006) 034105.
- [112] F. Lakrad, M. Belhaq, Suppression of pull-in instability in MEMS using a highfrequency actuation, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* 15 (2010) 3640–3646.
- [113] F. Lakrad, M. Belhaq, Suppression of pull-in in a microstructure actuated by mechanical shocks and electrostatic forces, *Int. J. Non-Linear Mech.* 46 (2011) 407–414.
- [114] B. Borovic, A.Q. Liu, D. Popa, H. Cai, F.L. Lewis, Open-loop versus closed-loop control of MEMS devices: choices and issues *J. Micromech. Microeng.* 15 (2005) 1917–1924.
- [115] F.A. Shirazi, J.M. Velni, K.M. Grigoriadis, An LPV design approach for voltage control of an electrostatic MEMS actuator *J. Microelectromech. Syst.* 20 (2011) 302–311.
- [116] B. Borovic, F.L. Lewis, W. McCulley, A.Q. Liu, E.S. Kolesar, D.O. Popa, Control issues for microelectromechanical systems *IEEE Control Syst.* 26 (2006) 18–21.
- [117] A. Ferreira, S.S. Aphale, A survey of modeling and control techniques for micro- and nanoelectromechanical systems *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews* 41 (2011) 350–364.
- [118] L.A. Rocha, R.A. Dias, E. Cretu, L. Mol, R.F. Wolffenbuttel, Auto-calibration of capacitive MEMS accelerometers based on pull-in voltage *Microsyst. Technol.* 17 (2011) 429–436.
- [119] R.A. Dias, E. Cretu, R. Wolffenbuttel, L.A. Rocha, Pull-in-based g-resolution accelerometer: Characterization and noise analysis *Sens. Actuators A Phys* (2011) 47–53.
- [120] P.M. Osterberg, S.D. Senturia, M-Test: A test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures *J. Microelectromech. Syst.* 6 (1997) 107–118.
- [121] H. Rokni, W. Lu, A continuum model for the static pull-in behavior of graphene nanoribbon electrostatic actuators with interlayer shear and surface energy effects, *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 153512.
- [122] H.Y. Liu, Z.F. Zhou, W.H. Li, Q.-A. Huang, An online test structure for the thermal expansion coefficient of surface micromachined polysilicon beams by a pull-in approach *J. Micromech. Microeng.* 22 (2012) 055017.
- [123] Y. Huang, A.S.S. Vasan, R. Doraiswami, M. Osterman, M. Pecht, MEMS reliability review, *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 12 (2012) 482–493.
- [124] J.I. Siddique, R. Deaton, E. Sabo, J.A. Pelesko, An experimental investigation of the theory of electrostatic deflections, *J. Electrostatics* 69 (2011) 1–6.
- [125] L.A. Rocha, E. Cretu, R.F. Wolffenbuttel, Analysis and analytical modeling of static pull-in with application to mems-based voltage reference and process monitoring *J. Microelectromech. Syst.* 13 (2004) 342–354.

- [126] L.A. Rocha, E. Cretu, R.F. Wolffenbuttel, Behavioural analysis of the pull-in dynamic transition J, *Micromech. Microeng.* 14 (2004) S37–S42.
- [127] D. Elata, O. Bochobza-Degani, Y. Nemirovsky, Analytical approach and numerical -lines method for pull-in hyper-surface extraction of electrostatic actuators with multiple uncoupled voltage sources J, *Microelectromech. Syst.* 12 (2003) 681–691.
- [128] V. Leus, D. Elata, On the dynamic response of electrostatic mems swithces J, *Microelectromech. Syst.* 17 (2008) 236–243.
- [129] A. Fargas-Marques, J. Casals-Terre, A.M. Shkel, Resonant pull-in condition in parallel-plate electrostatic actuators J, *Microelectromech. Syst.* 16 (2007) 1044–1053.
- [130] S.D.A. Hannot, D.J. Rixen, A palette of methods for computing pull-in curves for numerical models of microsystems *Finite Elements in Analysis and Design* 67 (2013) 76–90.
- [131] R.H. Poelma, H. Sadeghian, S.P.M. Noijen, J.J.M. Zaal, G.Q. Zhang, A numerical experimental approach for characterizing the elastic properties of thin films: application of nanocantilevers, *J. Micromech. Microeng.* 21 (2011) 065003.
- [132] A. Khiat, R.H. Poelma, G.Q. Zhang, F. Heuck, F.D. Tichelaar, M. Sarno, P. Ciambelli, S. Fontorbes, L. Arurault, U. Staufer, Mechanical characterization of individual polycrystalline carbon tubes for use in electrical nano-interconnects, *Microelectron. Eng.* 98 (2012) 317–320.
- [133] O. Bochobza-Degani, Y. Nemirovsky, Modeling the pull-in parameters of electrostatic actuators with a novel lumped two degrees of freedom pull-in model, *Sensors Actuat. A* 97–98 (2002) 569–578.
- [134] C. O'Mahony, M. Hill, and A. Mathewson, "Analysis of Electromechanical Boundary Effects on the Pull-in of Micromachined Fixed-fixed Beams", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, pp. 75-80, 2003.
- [135] Hu, Y.C., Chang, C.M. ve Huang, S.C. "Some Design Considerations on the Electrostatically Actuated Microstructures," *Sensors and Actuators A*, 112: 155-161, (2004).
- [136] Chowdhury, S., Ahmadi, M. ve Miller, W. C. "Pull-in Voltage Study of Electrostatically Actuated Fixed-Fixed Beams Using a VLSI On-Chip Interconnect Capacitance Model", *J. Microelectromech. Syst.*, 15(3), (2006).
- [137] A. Ballestra, E. Brusa, M.G. Munteanu, A. Somá, Experimental characterization of electrostatically actuated in-plane bending of microcantilevers, *Microsystem Technologies* 14 (2008) 909–918.
- [138] D.T. Haluzan, D.M. Klymyshyn, S. Achenbach, M. Börner, Reducing pull-in voltage by adjusting gap shape in electrostatically actuated cantilever and fixed-fixed beams, *Micromachines* 1 (2010) 68–81
- [139] M.M. Joglekar, D.N. Pawaskar, Closed-form empirical relations to predict the static pull-in parameters of electrostatically actuated microcantilevers having linear width variation, *Microsystem Technologies* 17 (2011) 35–45.
- [140] C. Do, M. Lishchynska, K. Delaney, M. Hill, Generalized closed-form models for pull-in analysis of micro cantilever beams subjected to partial electrostatic load, *Sensors and Actuators A* 185 (2012) 109–116.
- [141] C. Liu, *Foundations of MEMS*, Pearson Education Inc., 2006.
- [142] X. Li, B. Bhushan, K. Takashima, C.W. Baek, Y.K. Kim, Mechanical characterization of micro/nanoscale structures for MEMS/NEMS applications using nanoindentation techniques, *Ultramicroscopy* 97 (2003) 481–494.

- [143] B. Wang, S. Zhou, J. Zhao, X. Chen, Size-dependent pull-in instability of electrostatically actuated microbeam-based MEMS, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 21 (2011) 1–6.
- [144] L. Yin, Q. Qian, L. Wang, Size effect on the static behavior of electrostatically actuated microbeams, *Acta Mechanica Sinica* 27 (2011) 445–451.
- [145] M. Rahaeifard, M.H. Kahrobaiyan, M. Asghari, M.T. Ahmadian, Static pull-in analysis of microcantilevers based on the modified couple stress theory, *Sensors and Actuators A* 171 (2011) 370–374.
- [146] M. Baghani, Analytical study on size-dependent static pull-in voltage of microcantilevers using the modified couple stress theory, *International Journal of Engineering Science* 54 (2012) 99–105.
- [147] Moaveni, S. “Finite element analysis : theory and application with Ansys”, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2. baskı, 822 s., (2003).
- [148] Erişim: <http://www.ansys.com/>, (15-05-2016).
- [149] Erişim: <https://www.COMSOL.com/>, (15-05-2016).
- [150] Coşkun A. 2007. Yapay zeka optimizasyon teknikleri: literatür değerlendirmesi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları.
- [151] S.Akyol, B. Alataş, Güncel Sürü Zekası Optimizasyon Algoritmaları. Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 1, 36-50 (2012).
- [152] Erişim: <http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/IleriAlgoritmaAnalizi/IleriAlgoritmaAnalizi-5.Hafta-YapaySinirAglari.pdf>, (15-05-2016).
- [153] Wang, Y.-T.; Hu, T.-C.; Tong, C.-J.; Lin, M.-T. Novel full range vacuum pressure sensing technique using free decay of trapezoid micro-cantilever beam deflected by electrostatic force. *Microsyst. Technol.* 2012, 18, 1903–1908.
- [154] Lindley, R.E.; Parkes, A.M.; Keen, K.A.; Mcnaghten, E.D.; Orr-Ewing, A.J. A sensitivity comparison of three photoacoustic cells containing a single microphone, a differential dual microphone or a cantilever pressure sensor. *Appl. Phys. B* 2007, 86, 707–712.
- [155] Lee, H.-C.; Park, J.-H.; Park, Y.-H. Development of shunt type ohmic RF MEMS switches actuated by piezoelectric cantilever. *Sens. Actuators A Phys.* 2007, 136, 282–290.
- [156] Hah, D.; Yoon, E. A Low-Voltage Actuated Micromachined Microwave Switch Using Torsion Springs and Leverage. *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* 2000, 48, 2540–2545.
- [157] Chang, C.; Chang, P. Innovative micromachined microwave switch with very low insertion loss. *Sens. Actuators A Phys.* 2000, 79, 71–75.
- [158] Ozaki, Y.; Ohya, T.; Yasuda, T.; Shimoyama, I. An Air Flow Sensor Modeled on Wind Receptor Hairs of Insects. In *Proceedings of the IEEE MEMS 2000 Conference*, Miyazaki, Japan, 23–27 January 2000; pp. 531–536.
- [159] Wang, Y.-H.; Lee, C.-Y. A MEMS-based Air Flow Sensor with a Free-Standing Microcantilever Structure. *Sensors* 2007, 7, 2389–2401.
- [160] Barth, S.; Koch, H.; Kittel, A.; Peinke, J.; Burgold, J.; Wurnus, H. Laser-Cantilever-Anemometer A new high resolution sensor for air and liquid flow. *Rev. Sci. Instrum.* 2005, 76, 75110–75116.
- [161] Kamusuki, S.; Fujii, M.; Takekoshi, T.; Tezuka, C.; Atobe, M. A high resolution, electrostatically-driven commercial inkjet head. In *Proceedings of the Thirteenth*

- Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Miyazaki, Japan, 23–27 January 2000; pp. 793–798.
- [162] Bietsch, A.; Zhang, J.; Hegner, M.; Lang, H.P.; Gerber, C. Rapid functionalization of cantilever array sensors by inkjet printing. *Nanotechnology* 2004, 15, 873–780.
- [163] Kaisei, K.; Kobayashi, K.; Matsushige, K.; Yamada, H. Fabrication of ionic liquid thin film by nano-inkjet printing method using atomic force microscope cantilever tip. *Ultramicroscopy* 2010, 110, 733–736.
- [164] Rogers, B.; Manning, L.; Jones, M.; Sulchek, T.; Murray, K.; Beneschott, B.; Adams, J.D.; Hu, Z.; Thundat, T.; Cavazos, H.; et al. Mercury vapor detection with a self-sensing, resonating piezoelectric cantilever. *Rev. Sci. Instrum.* 2003, 74, 4899–4901.
- [165] Lavrik, N.V.; Sepaniak, M.J.; Datskos, P.G. Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors. *Rev. Sci. Instrum.* 2004, 75, 2229–2251.
- [166] Sharma, H.; Mutharasan, R. Rapid and sensitive immune detection of *Listeria monocytogenes* in milk using a novel piezoelectric cantilever sensor. *Biosens. Bioelectron.* 2013, 45, 158–162.
- [167] Saadon, S.B.; Sidek, O.B.; Hamad, O.S. Vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters using cantilever beams. *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.* 2010, 4, 1219–1224.
- [168] Shen, D.; Park, J.-H.; Ajitsaria, J.; Choe, S.-Y.; Wickle III, H.C.; Kim, D.J. The design, fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting. *J. Micromech. Microeng.* 2008, 18, 55017.
- [169] Yu, H.; Zhou, J.; Deng, L.; Wen, Z. A Vibration-Based MEMS Piezoelectric Energy Harvester and Power Conditioning Circuit. *Sensors* 2014, 14, 3323–3341.
- [170] Ak, C.; Yildiz, A. A New Analytical Model to Estimate the Voltage Value and Position of the Pull-In Limit of a MEMS Cantilever. *Micromachines* 2016, 7, 53.
- [171] C. Ak, “Dynamic Position Control of Electrostatic Actuators”, M.Sc. Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin University, Mersin, TURKEY, pp. 38-65, 2008.
- [172] A. Yildiz, C. Ak, and H. Canbolat, “New approach to pull-in limit and position control,” in *Electrostatics*, chapter 6, pp. 139-150, In-Teh, Rijeka, Croatia, 2012..
- [173] Saha, S. C., Hanke, U., Jensen, G. U. ve Saether, T. “Modeling of Spring Constant and Pull-down Voltage of Non uniform RF MEMS Cantilever”, *IEEE Behavioral Modeling and Simulation Workshop*, s.56-60, (2006).
- [174] O’Brien, G.J.; Monk, D.J.; Lin, L. MEMS Cantilever Beam Electrostatic Pull-in Model. *SPIE Proceed. Des. Charact. Packag. MEMS Microelectron. II* 2001, 4593, 31–34.
- [175] Ozdemir, S.; Akhtar, S.; Gunal, O.E.; Khater, M.E.; Saritas, R.; Abdel-Rahman, E.M.; Yavuz, M. Measuring the Quality Factor in MEMS Devices. *Micromachines* 2015, 6, 1935–1945.
- [176] Palevicius, P.; Ragulskis, M.; Palevicius, A.; Ostasevicius, V. Applicability of Time-Averaged Holography for Micro-Electro-Mechanical System Performing Non-Linear Oscillations. *Sensors* 2014, 14, 1805–1821.
- [177] Sharpe, W.N., Jr.; Yuan, B.; Vaidyanathan, R.; Edward, R.L. Measurements of Young’s modulus, Poisson’s ratio, and tensile strength of polysilicon. In *Proceedings of the Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Nagoya, Japan, 26–30 January 1997; pp. 424–429.
- [178] Anindya Lal Roy, Anirban Bhattacharya, Ritesh Ray Chaudhuri, and Tarun Kanti Bhattacharyya, “Analysis of the Pull-in phenomenon in Microelectromechanical Varactors”, 25th Conference on VLSI Design, pp. 185-190, Hyderabad, 2012.

- [179] Hin-Leung Chau, and K.D. Wise, "An ultraminiature solid-state pressure sensor for a cardiovascular catheter," *IEEE Trans. Electronic Devices*, vol. 35(12), pp. 2355-2362, 1988.
- [180] Wenhua Zhang, Rajashree Baskaran, Kimberly L. Turner, "Effect of cubic nonlinearity on auto-parametrically amplified resonant MEMS mass sensor", *Sensors and Actuators A*, vol. 102, pp. 139-150, 2002.
- [181] Sergio P. Pacheco, Linda P. B. Katehi, and Clark T. C. Nguyen, "Design of Low Actuation Voltage RF MEMS Switch", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 165-168, Boston, MA, USA, 2000.
- [182] Hyun-Ho Yang, Jeong Oen Lee, and Jun-Bo Yoon, "Maneuvering Pull-in Voltage of an Electrostatic Micro-Switch by Introducing a Pre-charged Electrode", *IEEE International Electron Devices Meeting*, pp. 439-442, Washington, DC, USA, 2007.
- [183] Pritiraj Mohanty, Darrell A. Harrington, Michael L Roukes, "Measurement of small forces in micron-sized Resonators", *Physica B*, pp. 2143-2144, 2000.
- [184] C. Ak, A. Yıldız, "An Inversely Designed Model for Calculating Pull-in Limit and Position of Electrostatic Fixed-Fixed beam Actuator", *Mathematical Problems in Engineering* 2014, Article ID 391942, 7 pages. doi:10.1155/2014/391942.
- [185] M. Mojahedi, M. Moghimi Zand, M.T. Ahmadian, "Static Pull-in Analysis of Electrostatically Actuated Microbeams Using Homotopy Perturbation Method", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, pp. 1032-1041, 2010.
- [186] Yuh-Chung Hu and Guan-De Lee, "A Closed Form Solution for the Pull-in Voltage of the Micro Bridge", *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 10, pp. 147-150, 2007.
- [187] Lukas Mol, Luis A. Rocha, Edmond Cretu, and Reinoud F. Wolffenbuttel, "Full-Gap Positioning of Parallel-Plate Electrostatic MEMS Using On-off Control", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1464-1468, Vigo, 2007.
- [188] Kwadwo O. Owusu and Frank L. Lewis, "Solving the Pull-in Instability Problem of Electrostatic Microactuators Using Nonlinear Control Techniques", *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pp. 1190-1195, Bangkok, Thailand, 2007.
- [189] Tilmans HAC, Legtenberg R (2007) Electrostatically Driven Vacuum Encapsulated Polysilicon Resonators: Part II. Theory and Performance. *Sensors and Actuators A* 45:67-84. doi:10.1016/0924-4247(94)00813-2
- [190] Rottenberg X, Wolf ID, Nauwelaers BKJC, Raedt WD, Tilmans HAC (2007) Analytical model of the DC actuation of electrostatic MEMS devices with distributed dielectric charging and nonplanar electrodes. *J Microelectromech Syst* 16:1243-1253. doi: 10.1109/JMEMS.2007.899334
- [191] Lee KB, Lin L, Cho YH (2008) A closed-form approach for frequency tunable comb resonators with curved finger contour. *Sens Actuators A Phy.* 141:523-529. doi:10.1016/j.sna.2007.10.004
- [192] Rokni H, Seethaler RJ, Milani AS, Hosseini-Hashemi S, Li X-F (2013) Analytical closed-form solutions for size-dependent static pull-in behavior in electrostatic micro-actuators via Fredholm integral equation. *Sensors and Actuators A: Physical* 190:32-43. doi:10.1016/j.sna.2012.10.035
- [193] Kuang JH, Chen CJ (2004) Dynamic characteristics of shaped micro-actuators solved using the differential quadrature method. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14:647-655. doi: 10.1088/0960-1317/14/4/028

ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: Cevher AK

Doğum Tarihi: 16.09.1985

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	Suruç Lisesi	1998-2001
Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2001-2006
Yüksek Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2006-2008

(Varsa) Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Öğretim Görevlisi	Toros Üniversitesi	2015 - Devam
Ziyaretçi Araştırmacı	University of Missouri (ABD)	2012 - 2013
Araştırma Görevlisi	Mersin Üniversitesi	2006 - 2014

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

Tezler

1. Elektrostatik Eyleyicilerin Dinamik Konum Denetimi (Yüksek Lisans)

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. **Ak, C.**, Yıldız, A., Akdagli, A. "A Novel Expression Obtained By Using Artificial Bee Colony Algorithm to Calculate Pull-In Voltage of Fixed-Fixed Micro-Actuators", Gazi Üniversitesi Dergisi, Ağustos-2016 (Kabul edildi).

2. **Ak, C.**, Yıldız, A., Akdagli, A., Biçer, M. Berkan. "Computing the Pull-In Voltage of Fixed-Fixed Micro-Actuators by Artificial Neural Network", Microsystem Technologies, 22(164):1-10, 2016. doi: 10.1007/s00542-016-3128-4

3. **Ak, C.**, Yıldız, A. "A New Analytical Model to Estimate the Voltage Value and Position of the Pull-In Limit of a MEMS Cantilever", Micromachines, 7(53), 2016. doi:10.3390/mi7040053

4. **Ak, C.**, Yildiz, A. "An Inversely Designed Model for Calculating Pull-In Limit and Position of Electrostatic Fixed-Fixed Beam Actuators," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014, Article ID: 391942, 7 pages, 2014. doi:10.1155/2014/391942.

Uluslararası Kitapta Bölümler

1. A. Yildiz, **C. Ak**, and H. Canbolat, "New Approach to Pull-In Limit and Position Control of Electrostatic Cantilever Within the Pull-in Limit", in Electrostatics, chapter 6, pp. 139–150, In-Tech, Rijeka, Croatia, 2012.

Uluslararası Bildiriler

1. **Ak, C.**, Yildiz, A., "A New Model to Calculate Pull-in Limit and Position of Fixed-Fixed Beam Electrostatic Actuator", 6th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NANOTR-VI), 15-18 June 2010, Izmir, Turkey.

2. Ozdemir, C., Demirci, S., Yilmaz, B., **Ak, C.**, Yigit, E., "A New and Practical Formulation of Bistatic Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging and Verification of the Formulation using Numerical Examples", Int. Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO'2009 , Bursa , Vol. Electronic, Bursa, 2009.

Ulusal Bildiriler

1. **AK, C.**, Yildiz, A., "Elektrostatik Mikro Eyleyicilerin Çökme Limitine Yeni Bir Yaklaşım", Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, BMYS'2008, 15-17 Kasım, p. 667-675, Eskişehir, Türkiye (2008).

Burs, Proje ve Destekler

Kapsam	Yıl	Durumu
TeknoGirişim Sermayesi Desteği (Sanayi Bakanlığı)	2014-2015	Tamamlandı
YurtDışı Doktora Araştırma Bursu (Tübitak)	2012-2013	Tamamlandı
Bilimsel Araştırma Projesi (ME. Ü.)	2008-2009	Tamamlandı

Verilen Dersler

Ders Adı (Dili)	Görev Yeri	Dönem
Intro. to Electrical Engineering (İng.)	Toros Üniversitesi	2015 - 2016
Microprocessors (İng.)	Toros Üniversitesi	2015 - 2016