

**ELEKTROSTATİK EYLEYİCİLERİN DİNAMİK
KONUM DENETİMİ**

CEVHER AK

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
HAZİRAN-2008**

**ELEKTROSTATİK EYLEYİCİLERİN DİNAMİK KONUM
DENETİMİ**

CEVHER AK

**Mersin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Ana Bilim Dalı**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ**

**MERSİN
Haziran -2008**

Bu tezin gerek bilimsel içerik, gerekse elde edilen sonuçlar açısından tüm gerekleri sağladığı kanaatine ulaşan ve aşağıda imzaları bulunan biz jüri üyeleri, sunulan tezi oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul ediyoruz.

Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ

Jüri Üyesi
Prof. Dr. Ruhi KAPLAN

Jüri Üyesi
Yrd. Doç. Dr. Hüseyin CANBOLAT

Bu tezin Fen Bilimleri Enstitüsü yazım kurallarına uygun olarak yazıldığı Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../.....tarih ve/..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mahir TURHAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ÖZ

Teknoloji günlük hayatımızın her aşamasında gün geçtikçe daha fazla yer almaya başlamıştır. Teknolojinin temel amacı insanlığın problemlerine çözüm sunarak hayatını daha kolay hale getirmektir. Son zamanlarda kablosuz iletişimin artmasıyla taşınabilir cihazların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Taşınabilir sistemlerin üretiminde iki önemli hedef öne çıkmaktadır. Bunlardan birisi cihazlarda tüketilen enerjinin minimum düzeye indirgenmesi, diğeri ise cihazda kullanılan devre elemanları boyutlarının küçültülmesidir. Bu amaca yönelik çalışmalar özellikle MEMS (Mikro Elektromekanik Sistemler) ve MEMS sistemlerin bir dalı olan elektrostatik mikro-eyleyiciler üzerine yoğunlaşmıştır.

Bugüne kadar bilim insanları elektrostatik eyleyicilerin matematiksel hesaplamalarını yapmak için genel olarak “lumped” modelinden elde edilen matematiksel formülü kullandılar. Bu model ve formül eyleyici için basit fakat yeterince hassas olmayan sonuçlar vermektedir. Eyleyici için daha hassas kontrol imkanı ve gerçeğe daha yakın bir model elde etmek amacıyla eyleyici için sonlu eleman metodunu (FEM-Finite Element Method) kullanan ANSYS programı yardımıyla bir benzetim oluşturuldu. Bu benzetim sonuçları ışığında, MATLAB programı yardımıyla matematiksel hesaplamalar yapılarak daha hassas sonuçlar veren ve aynı zamanda “lumped” modeli formülü ile aynı basitlikte olan yeni bir model ve formül geliştirildi.

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

ABSTRACT

Technology has been getting into the every stage of our daily life more and more. The main goal of the technology is to make our life easy by finding solutions to mankind's problems. Recently, with increasing the wireless communication, mobile devices are being used widely. Two crucial factors are of importance. The first one is to reduce the energy which is consumed in the mobile devices, and the second one is to minimize the size of them. Therefore, studies have been focused especially on MEMs (Micro-electromechanical Systems) and electrostatic micro-actuators that is a branch of MEMS.

Scientists have been using the formula derived from Lumped model when they need calculations about electrostatic actuators. This model and formula is very simple but not sensitive enough. In order to have more sensitive formula which gives realistic result, a new approach proposed by the help of ANSYS which is using Finite Element Method (FEM). In the light of simulation outcomes, a new model has been formulated which is as simple as lumped model, by the help of MATLAB for calculations.

Keywords: MEMS, Electrostatic actuators, pull-in limit, pull-in voltage

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında emeği geen ve alıŐmalarımın her aşamasında hibir yardımını esirgemeyen tez danıŐmanım Yrd. Do. Dr. Ali YILDIZ'a, tezin tamamlanmasında değerli katkı ve deneyimlerini paylaŐan saygıdeğer juri üyelerime ve bu çalışmaya destek veren Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi(BAP)'ne en içten teŐekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu tezin hazırlanmasında maddi ve manevi desteğini, en zor vakitlerimde anlayıŐ ve güler yüzlerini esirgemeyen sevgili aileme ve tüm dostlarıma teŐekkürü bir borç bilirim.

Son olarak bu tezi, bu günlere gelmemde sonsuz emeği bulunan ve benden sevgi ve Őefkatini hiç esirgemeyen rahmetli anneme ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. MİKRO EYLEYİCİLERİN(ME) KULLANIM ALANLARI.....	3
2.1.1. Anahtar(Switch) Olarak Kullanım.....	4
2.1.2. Algılayıcı(Sensör) Olarak Kullanım.....	5
2.1.3. Ayna(Mirror) Olarak Kullanım	6
2.1.4. Entegre Devrelerde(IC) Hafıza Elemanı olarak Kullanım.....	8
2.2. MİKRO EYLEYİCİNİN YAPISI	9
2.3. PROBLEMİN TANIMLANMASI.....	10
2.4. SINIR KOŞULLARI VE EYLEYİCİYE UYGULANMASI.....	13
2.4.1. Sabit Noktada Açının Korunumu	14
2.4.2. Sabit Noktada Konumun Korunumu	15
2.5. LUMPED MODELİ	15
2.6. DİĞER SINIR KOŞULU	19
3. MATERYAL ve METOD	21
3.1. ANSYS PROGRAMI.....	21
3.1.1. Sonlu Eleman Metodu(FEM)	23
3.1.2. Yeni Tasarımın Benzetim Modeli	27
3.1.2.1. Eleman tipinin belirlenmesi.....	29
3.1.2.2. Problemin geometrisinin belirlenmesi	29
3.1.2.3. Geometriye uygulanacak etkinin belirlenmesi	30
3.1.2.4. Geometri için ağ yapısının oluşturulması	30
3.1.2.5. Geometri için sınır koşullarının belirlenmesi.....	32
3.1.2.6. Benzetim sonuçları	33

3.2. MATLAB PROGRAMI	34
3.2.1. Yeni Model İçin Matlab Kullanımı	35
3.3. YENİ TASARIM VE EYLEYİCİNİN MATEMATİKSEL İFADESİ.....	38
3.3.1. Yeni Tasarımın Mekanik Modeli.....	38
3.3.2. Yeni Tasarımın Matematiksel İfadesi.....	41
3.3.2.1. Yay değerinin(k) bulunması.....	41
3.3.2.2. Kapasitans(C) değerinin bulunması.....	45
3.3.2.3. Yay kuvveti(F_y) ifadesinin bulunması.....	49
3.3.2.4. Elektrostatik kuvvet(F_e) ifadesinin bulunması	51
3.3.2.5. Kuvvet eşitliğinden voltaj(V) ifadesinin bulunması.....	53
3.3.2.6. Kritik deformasyon(v_{kritik}) ve kritik voltaj(V_{kritik}) ifadesinin bulunması	54
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	55
4.1. BULGULAR.....	55
4.1.1. Yeni Tasarımın Benzetim ve Lumped Model ile Karşılaştırılması ..	56
4.1.2. Yeni Tasarımın Daha Önceki Çalışmalarda elde edilmiş Deneysel ve Analitik sonuçlarla Karşılaştırılması	61
4.2. TARTIŞMA	66
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	67
5.1. SONUÇLAR	67
5.2. ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ	74
EKLER.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>SAYFA</u>
Çizelge 4.1. Deformasyon miktarlarına göre gerekli voltaj miktarları.....	57
Çizelge 4.2. Eyleyici uzunluklarına göre gerekli voltaj değerleri.....	59
Çizelge 4.3. Plakalar arasındaki açıklık miktarına göre gereken voltaj miktarı .	60
Çizelge 4.4. Eyleyiciye uygulanan voltaja göre plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için, daha önce yapılmış olan deneysel ve analitik çalışmalardan[10] alınan veriler ve hata değerleri	62
Çizelge 4.5. Eyleyiciye uygulanan voltaja göre plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için, yeni tasarım ve daha önce yapılmış olan deneysel sonuçlardan[10] alınan veriler ve hata değerleri	62
Çizelge 4.6. Eyleyiciye uygulanan voltaja göre plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için, daha önce yapılmış olan deneysel[10] ve analitik çalışmalardan[1] alınan veriler ve hata değerleri	63
Çizelge 4.7. Plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için deneysel[10], Yeni tasarım ve Ansys benzetim modelinden alınan veriler.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>SEKİL</u>	<u>SAYFA</u>
Şekil 2.1. MEMS eyleyicinin boyutlarından örnek bir görünüm	3
Şekil 2.2. MEMS eyleyicinin boyutlarından farklı bir örnek.....	4
Şekil 2.3. Eyleyicinin mantıksal olarak 1(açık) olma durumu	4
Şekil 2.4. Eyleyicinin mantıksal olarak 0(kapalı) olma durumu	5
Şekil 2.5. Eyleyicinin sensör olarak kullanılmasına bir örnek.....	6
Şekil 2.6. Eyleyicinin ayna olarak kullanılmasına bir örnek.....	7
Şekil 2.7. Eyleyicinin ayna uygulamasında kullanılma şekli.....	7
Şekil 2.8. Eyleyicinin hafıza elemanı olarak kullanılması	8
Şekil 2.9. Eyleyicilerin üst üste ve yan yana yerleştirilmesi ile oluşturulmuş hafıza yığını	8
Şekil 2.10. Eyleyicinin çapraz açıdan görünüşü	9
Şekil 2.11. Bir ucu sabit eyleyicinin yandan görünüşü	9
Şekil 2.12. Eyleyicinin üstten görünüşü	10
Şekil 2.13. Gerilim uygulandığında eyleyicinin durumu	10
Şekil 2.14. Eyleyiciye uygulanan gerilim sonucu üst plakanın alt plakaya teması ..	10
Şekil 2.15. Eyleyiciye uygulanan fiziksel kuvvet ve eyleyici yapısı..	11
Şekil 2.16. Eyleyiciye uygulanan fiziksel kuvvet sonucu oluşan deformasyon	11
Şekil 2.17. Eyleyici için sınır koşullarının belirlenmesi	14
Şekil 2.18. Eyleyici için ilk sınır koşulunun uygulanması	14
Şekil 2.19. Eyleyici için ikinci sınır koşulunun uygulanması	15
Şekil 2.20. Eyleyici için lumped modeli	15
Şekil 2.21. Deformasyon miktarı ve lumped modeli	16
Şekil 2.22. İkinci sınır koşulu için eyleyici modeli	19
Şekil 2.23. İkinci sınır koşulu için eyleyicinin tam modeli.....	20
Şekil 3.1. Belli bir yüzeyin FEM için ağlara ayrılması.....	23
Şekil 3.2. Alanlar kullanılarak oluşturulmuş eyleyici geometrisinin görünümü	29
Şekil 3.3. Eyleyicinin içinde bulunduğu hava(vakum) ortamının modellenmesi ..	29
Şekil 3.4. Eyleyici modeli için oluşturulmuş ağ yapısının görünümü	30
Şekil 3.5. Ağ yapısının yakından görünümü	31
Şekil 3.6. Ağ yapılarının nokta(nod) olarak gösterimi	31

Şekil 3.7. Sınır koşullarının modele uygulanması	32
Şekil 3.8. Sınır koşullarının yakından görünümü	32
Şekil 3.9. Eyleyicinin deforme olmuş görüntüsü	33
Şekil 3.10. İkinci sınır koşulunun eyleyiciye uygulanmasının görünümü	38
Şekil 3.11. Eyleyici için ikinci sınır koşulu ve yay modelinin görünümü	38
Şekil 3.12. Eyleyici için ANSYS programında oluşturulmuş benzetim şekli.....	39
Şekil 3.13. Benzetim sonuçları gözönüne alınarak oluşturulan eyleyici modeli....	39
Şekil 3.14. Eyleyici için oluşturulan yeni model.....	40
Şekil 3.15. Eyleyiciye fiziksel bir kuvvetin uygulanması.....	41
Şekil 3.16. Eyleyicinin hareketli kısmı	44
Şekil 3.17. Eyleyicinin kapasitans ifadesi.....	45
Şekil 3.18. Eyleyicinin ikinci kısmı için birim kapasitans gösterimi	46
Şekil 3.19. Eyleyici için yay kuvveti gösterimi.....	49
Şekil 3.20. Yayın gerilme miktarı ile deformasyon miktarı arasındaki ilişki	49
Şekil 3.21. Eyleyiciye etki eden kuvvetlerin gösterimi	53
Şekil 4.1. Çizelge 4.1.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi	58
Şekil 4.2. Çizelge 4.2.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi	59
Şekil 4.3. Çizelge 4.3.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi.....	61
Şekil 4.4. Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.4.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi	63
Şekil 4.5. Deneysel çalışma ve lumped model sonuçlarının yeni model sonuçları ile karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.6. Çizelge 4.7.'de gösterilen verilerin grafik halinde gösterimi	65

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

E	: Young's modulus.....	(kg/m ²)
I	: Moment of inertia	(m ⁴)
k	: Yay değeri	(kg/m)
q	: Uzunluk başına kuvvet.....	(N/m)
V	: Voltaj değeri	(Volt)
V_{kritik}	: Kritik voltaj değeri.....	(Volt)
d	: Paralel kapasitörlerde plakalar arası başlangıç mesafesi	(m)
v	: Üst plakanın deformasyon miktarı	(m)
x	: Paralel kapasitörlerde plakalar arası mesafe	(m)
v_{kritik}	: Üst plakanın kritik deformasyon miktarı	(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_y	: Yay kuvveti	(kg)
A	: Paralel kapasitörlerde plaka alanı	(m ²)
ϵ_0	: Havanın dielektrik sabiti(8.85e-12).....	(F/m)
C	: Kapasitans değeri.....	(F)
M	: Bükülme momenti	(N.m)
ν	: Poisson's ratio	

1. GİRİŞ

Günümüzde insan yaşamını teknolojiden uzak düşünmek nerdeyse imkânsız hale gelmiştir. Teknolojik çalışmalar birçok farklı kolda ve birçok farklı alanda ilerlemektedir. Bu alanlardan birisi de Mikro Elektromekanik Sistemler (MEMS)'dir. Gün geçtikçe hem MEMS teknolojisi gelişmekte hem de kullanım alanları artmaktadır. Bu sebeptendir ki, MEMS her gün daha fazla önem kazanmaktadır. Elektronik, iletişim, bilgisayar, otomotiv, savunma ve biyomedikal gibi birçok alanda MEMS teknolojisi kullanılmaktadır. Dolayısıyla, MEMS teknolojisinin gelişmesi insanlığın yaşam kalitesini direkt olarak etkilemektedir. Diğer teknolojik alanlarda olduğu gibi MEMS alanında da yapılan çalışmalar daha yüksek performans ve daha düşük maliyet sağlamayı amaçlamaktadır.

Mikro elektrostatik eyleyiciler(MEE) MEMS teknolojisindeki çalışma alanlarından birisidir. MEE'ler bir çok alanda kullanılmaktadır. Anahtar(switch)[1,2,3], algılayıcı(sensor)[4,5,6,21], ayna(mirror)[7,8] ve entegre devrelerde hafıza elemanı[9,20] olarak kullanım bu alanlardan bazılarıdır. MEMS alanındaki çalışmalar belli bir disiplin içinde yapılmak zorundadır. Çalışmalarda yapılacak tüm işlemler, tasarıma göre önceden belirlenmelidir, aksi takdirde; tasarımda yapılan herhangi bir yanlış, benzetim ve üretim aşamasında yanlışlara sebep olacak, dolayısıyla büyük bir zaman ve para israfına sebep olacaktır. Bu noktadan yola çıkarak tasarım kısmının, diğer aşamalara göre daha fazla önem arz ettiğini söylemek yanlış olmaz. Çünkü tasarımı hatalı veya eksik yapılmış bir çalışmanın doğru sonuçları vermeyeceği açıktır.

Bu güne kadar eyleyicilerin matematiksel hesaplamalarını yapmak için genel olarak Lumped modeli[10] kullanıldı. Araştırmacıların bu modeli kullanma sebepleri; formülün sonuçları kolayca vermesidir. Fakat bu modelin eksikliği yeterince hassas sonuç vermemesidir. Bu çalışmada daha hassas sonuçlar veren ve aynı zamanda lumped modeli ile aynı basitlikte olan yeni bir model ve formül geliştirildi. Tezin ilk bölümlerinde, eyleyicilerin kullanım alanlarından bahsedilmiş ve daha önce kullanılan model hakkında bilgi verilmiştir. İlerleyen bölümlerde

eyleyicinin benzetim modelinin ANSYS'te nasıl hazırlandığı ve modelin matematiksel hesaplamalarının MATLAB'da nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Son bölümlerde modelin matematiksel formülü çıkarılmış ve formül, hem lumped modeli ve simülasyon sonuçları ile hemde başka bilim insanlarının yaptığı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

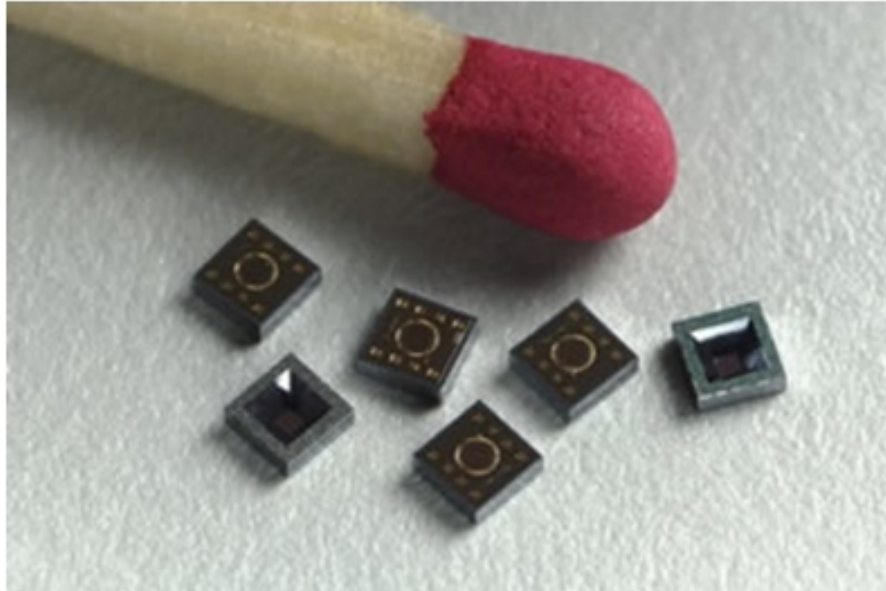
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. MİKRO EYLEYİCİLERİN(ME) KULLANIM ALANLARI

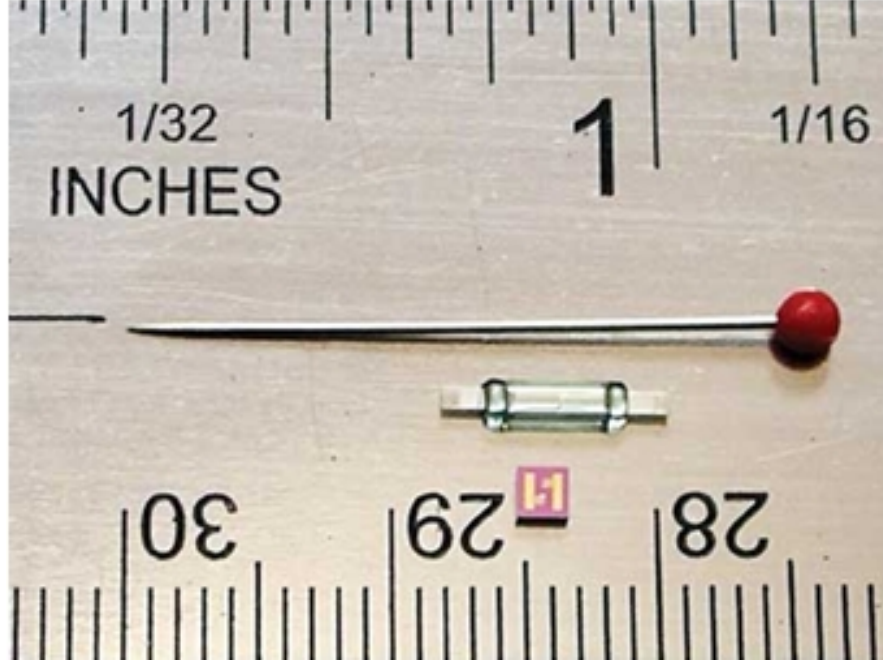
Günümüz teknolojisinde taşınabilir bir sistemin veya cihazın boyutlarının küçük olması çok önemlidir. Eğer Şu an kullanılan teknolojide boyutlar da küçültölme imkanı olmasaydı; günümüzde kullanılan bütün taşınabilir cihazlarda taşıma ve kullanım zorluğu olacaktı.

Mikro-eyleyiciler adından da anlaşılacağı gibi mikro boyuttadırlar, bunu daha iyi anlamak ve mikro eyleyicilerin kullanıldığı devrelerin ne denli küçük olabileceklerini görmek için Şekil 2.1. ve Şekil 2.2.'ye bakmak faydalı olacaktır. Eyleyiciler bu yönleri ile ileri teknoloji alanlarında çokça kullanılmakta ve bu konu üzerinde çalışmak gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır.

MEE'lerin kullanım alanları çok geniş olmakla beraber, çok yoğun olarak kullanıldıkları bazı uygulamalar mevcuttur. AŞağıda bu uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir.



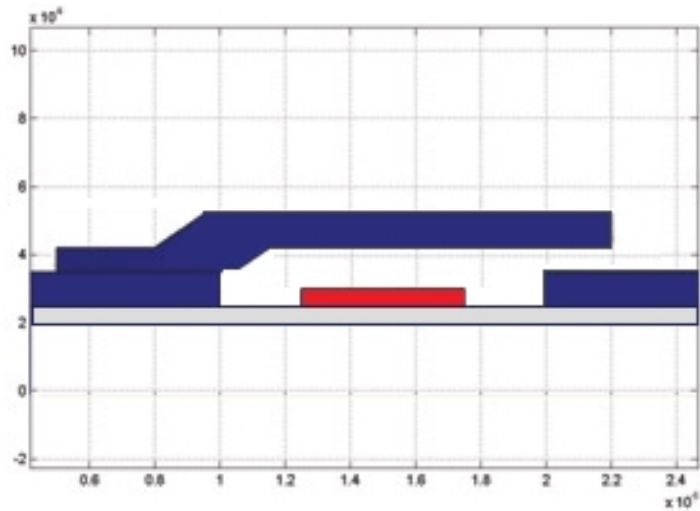
Şekil 2.1. MEMS Eyleyicinin boyutlarından örnek bir görünüm



Şekil 2.2. MEMS eyleyicinin boyutlarından farklı bir örnek

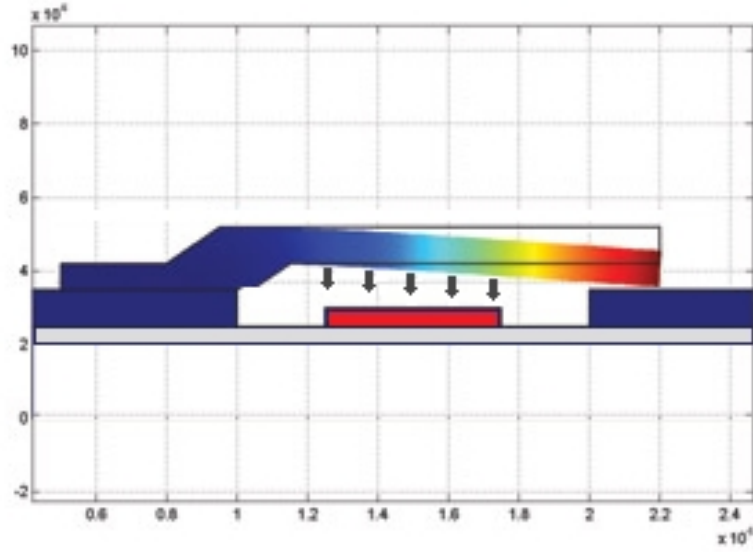
2.1.1. Anahtar(Switch) Olarak Kullanım

Mikro-eyleyicilerin kullanıldığı alanlardan en yaygın olanı, anahtar(switch) olarak kullanımdır. Anahtar olarak kullanımda, eyleyicinin üst plakasının, alt plakaya değmesi(contact) veya değmemesi(contactless) gibi iki durum vardır. Eyleyicinin değmemesi durumu sayısal(digital) sistemlerde 1(açık) ve değmesi durumu 0(kapalı) olarak ifade edilir. Bu yapıyı daha iyi anlayabilmek için şekil 2.3.'e bakmak gerekir.



Şekil 2.3. Eyleyicinin mantıksal olarak 1(açık) olma durumu

Şekil 2.3.'e bakıldığında; üst elektrot ile sağ elektrot(sağ altta bulunan kısım) birbirine değmemekte dolayısıyla mantıksal olarak 1(açık) olma durumu oluşmaktadır. Eğer üst elektrotla alt elektrot(alтта ortada bulunan kısım) arasına voltaj uygulanırsa; oluşacak elektrostatik kuvvet nedeniyle üst elektrotta bir deformasyon oluşacak ve üst elektrot sağ elektroda değecek, bunun sonucu mantıksal olarak 0(kapalı) durumu oluşacaktır(şekil 2.4.).

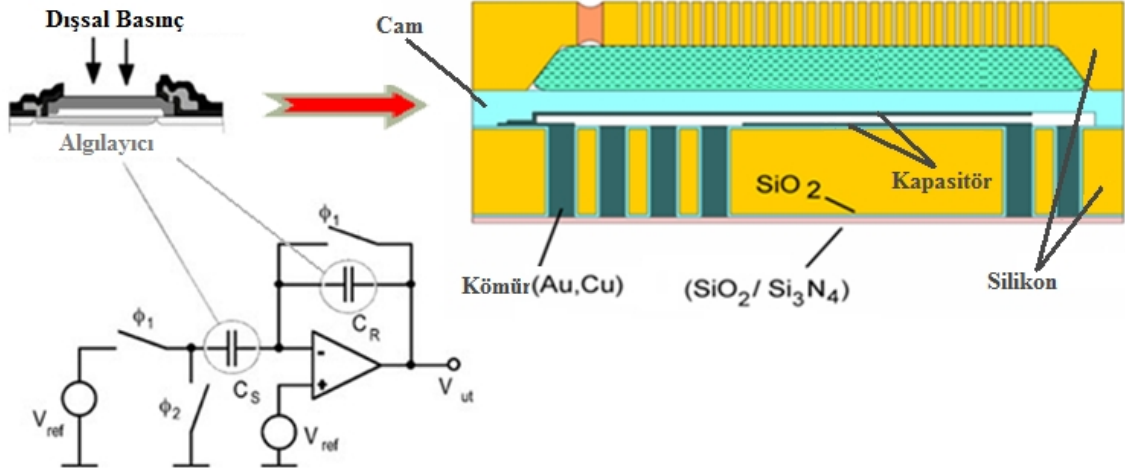


Şekil 2.4. Eyleyicinin mantıksal olarak 0(kapalı) olma durumu

Sonuç olarak şekil 2.3. ve şekil 2.4.'e baktığımızda eyleyicinin sahip olabildiği 1(açık) ve 0(kapalı) durumları dolayısıyla, elektronik devreler için anahtar olarak kullanılabilirler anlaşılmaktadır.

2.1.2. Algılayıcı(Sensör) Olarak Kullanım

Mikro eyleyicilerin kullanıldığı alanlardan biriside algılayıcı(sensör) olarak kullanımdır. Bu kullanımına şekil 2.5.'teki yapı örnek verilebilir. Bu yapıya yakından bakılırsa; şeklin sol alt kısmında, elektronik bir devre şeması görülmektedir. Bu devre şemasında iki tane kapasitör bulunmaktadır. Bu kapasitörler mikro eyleyicilerden oluşturulmuş basınç sensörleridir. Bu sensörler, üzerlerine düşen basınç oranında bir kapasitans değeri oluşturmaktadırlar. Kapasitans değerinin değişmesi neticesinde, elektronik devrenin giriş değerine(V_{ref}) göre çıkış değeri(V_{out}) değişmiş olur.



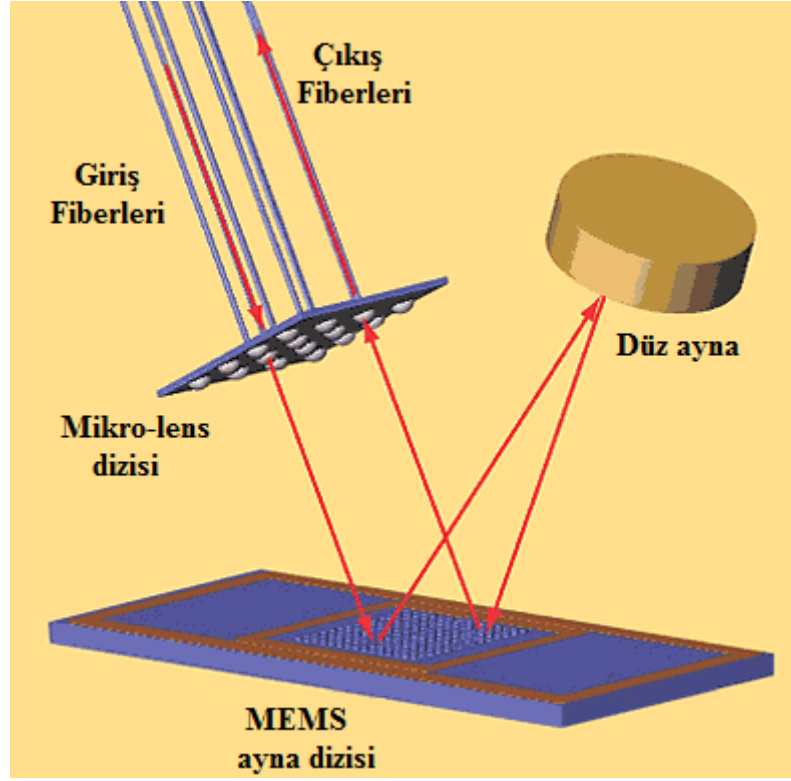
Şekil 2.5. Eyleyicinin sensör olarak kullanılmasına bir örnek

Şekil 2.5.'in sağ üst kısmında bulunan yapı, basınç sensörünün nasıl çalıştığının anlaşılmasına yardımcı olacaktır. Bu yapının içerisinde mikro-eyleyici, kapasitör olarak gösterilmiştir. Bu yapının üzerine düşen basınç, eyleyicinin hareket edebilen üst plakasının, sabit olan alt plakasına olan uzaklığını ve dolayısıyla kapasitör değerini değiştirir. Bu nedenle eyleyicinin(kapasitör) bağlandığı elektrone devrede, çıkış değeri değişmiş olur.

2.1.3. Ayna(Mirror) Olarak Kullanım

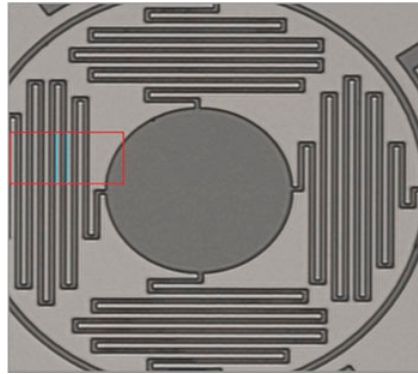
Mikro eyleyicilerin bir kullanım alanı da ayna(mirror) olarak kullanımdır. Eyleyiciye voltaj uygulandığında, eyleyicinin üst plakası alt plakaya doğru deforme olur. Eyleyicinin ayna olarak kullanımında, belirli bir noktadan gelen ışık verisi, eyleyicinin üst plakasının deformasyon miktarına göre, istenen noktaya yansıtılır(şekil 2.6.).

Şekil 2.6.'dan da görüldüğü gibi, giriş fiberleri olarak adlandırılan fiber optik kablolar vasıtasıyla gelen ışık verisi, öncelikle eyleyici dizisine gelmektedir. Eyleyici(ayna dizisi) dizisine gelen ışık, eyleyicinin üst plakasının deforme miktarına göre, düz aynaya doğru yansıtılmaktadır. Işık düz aynadan geldiği açı ile geri yansır ve tekrar eyleyicilerden oluşan ayna dizisine gelir. Son olarak ayna dizisine gelen ışık, çıkış fiberleri olarak adlandırılan, fiber optik kablolardan istenen kabloya yansıtılmış(gönderilmiş) olacaktır.



Şekil 2.6. Eyleyicinin ayna olarak kullanımına bir örnek

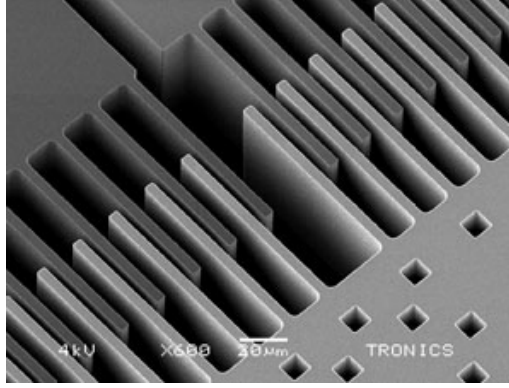
Şekil 2.6.'daki yanyana dizilmiş ayna dizisinin yapısını anlamak için, şekil 2.7.'deki yapıya bakmak gerekir. Şekil 2.7.'ye bakıldığında, yuvarlak aynanın kenarlarına birbirlerine paralel olarak yerleştirilmiş mikro-eyleyiciler görülebilir. Bu eyleyicilere uygulanan voltaj neticesinde, ortada bulunan yuvarlak yansıtıcı kısım(ayna) gelen ışını istenen yöne yansıtılmış olur.



Şekil 2.7. Eyleyicilerin ayna uygulamasında kullanılma şekli

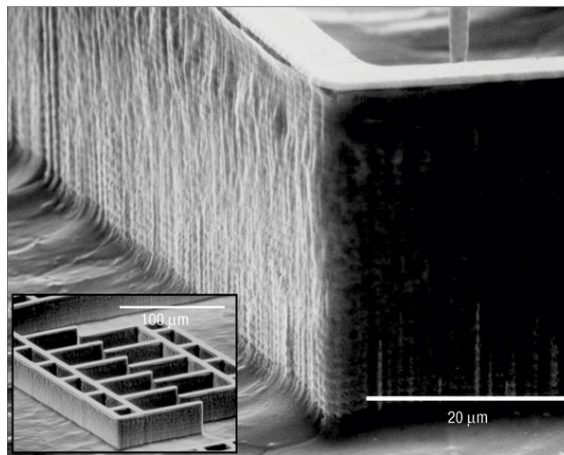
2.1.4. Entegre Devrelerde(IC) Hafıza Elemanı olarak Kullanım

Elektronik hafıza elemanları kendi içinde bulunan hücreler sayesinde bilgi saklayabilirler. Hücrelerin mantıksal(logic) olarak 0(kapalı) veya 1(açık) olma durumları bilginin ikilik sisteme göre kodlanması imkanı yaratır ve bu sayede bu bilgi saklanabilir. Bu hücreler elektronik yapılardır ve flip-flop olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.8. Eyleyicilerin hafıza elemanı olarak kullanılması

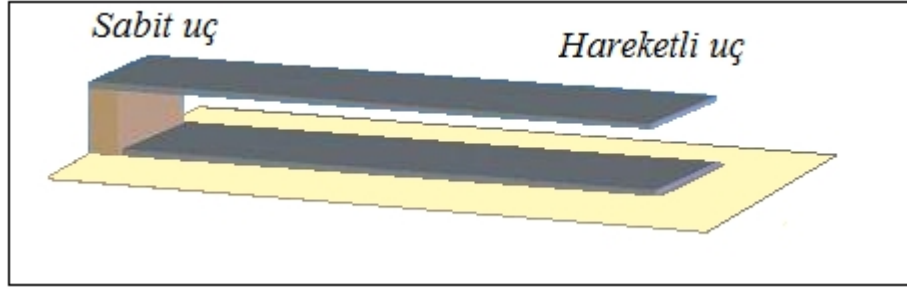
Dolayısıyla mikro-eyleyicileri de flip-flop yapılarına benzetebiliriz, çünkü mikro-eyleyicilerde mantıksal(logic) olarak 0(kapalı) veya 1(açık) olma durumlarını oluşturabilirler, dolayısıyla entegre devrelerde hafıza elemanı olarak da kullanılmaktadırlar. Bu yapının nasıl olduğu şekil 2.8. dan daha iyi görülebilir. Eyleyiciler yan yana veya üst üste konumlandırılarak(şekil 2.9.) eyleyici dizileri oluşturulabilir ve daha fazla hafıza kapasitesi elde edilebilir.



Şekil 2.9. Eyleyicilerin üst üste ve yan yana yerleştirilmesi ile oluşturulmuş hafıza yığını

2.2. MİKRO EYLEYİCİNİN YAPISI

Mikro Elektrostatik Eyleyicileri(MEE) modellemeden önce nasıl bir yapıya sahip olduklarına bakmakta yarar vardır. MEE'ler üstte ve altta birer olmak üzere iki tane "elektrot" denilen, iletken plakaya(yüzeye) sahiptirler(şekil 2.10.).



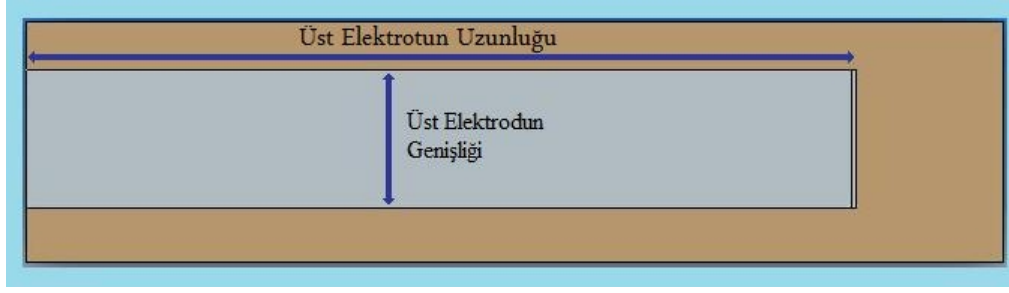
Şekil 2.10. Eyleyicinin çapraz açıdan görünüşü

Genellikle alt elektrot tümüyle tabana sabitlenmiş olmasına karşın, üst elektrot uygulamalara göre farklılık göstermekle beraber, bir veya daha fazla noktadan alt elektroda paralel ve aralarında belli bir hava boşluğu olacak şekilde, yalıtkan bir madde ile sabitleme işlemi yapılır(şekil 2.11.). Hava boşluğu, üst elektrodun hareketinin kısıtlanmasını önlemek amacıyla bırakılır.



Şekil 2.11. Bir ucu sabit eyleyicinin yandan görünüşü

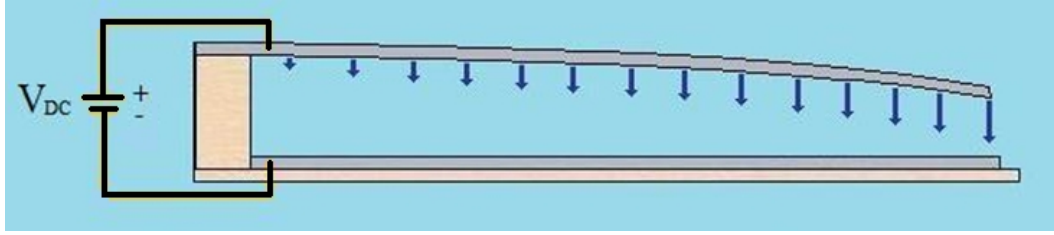
Bu tezde, üst elektrodu bir uçtan sabitlenmiş olan eyleyici yapısı incelenecektir(şekil 2.10., şekil 2.11. ve şekil 2.12.).



Şekil 2.12. Eyleyicinin üstten görünüşü

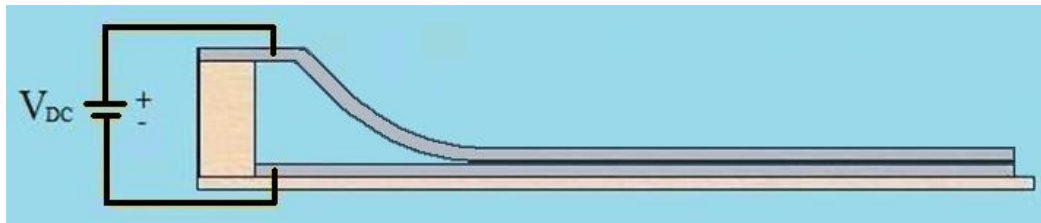
2.3. PROBLEMİN TANIMLANMASI

MEE'nin alt ve üst iletken elektrotlarına Doğru Akım (DC) gerilim uyguladığında üst elektrodun sabit olan ucu gerilim nedeniyle deforme olur, yani alt elektroda yaklaşır(Şekil 2.13.).



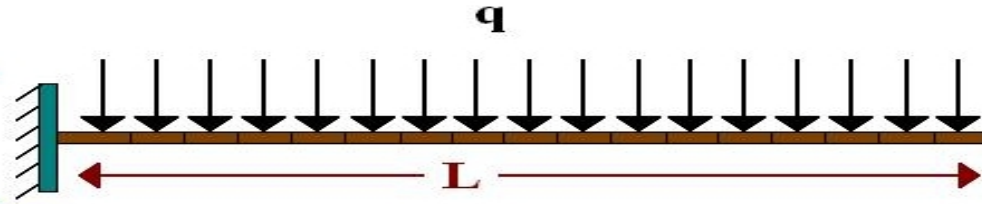
Şekil 2.13. Gerilim uygulandığında eyleyicinin durumu

Gerilim uygulamaya devam edildikçe, üst elektrodun alt elektroda yaklaşması da devam edecektir. Sonuçta öyle bir nokta gelecektir ki; üst elektrot aniden alt elektroda yapışıp kalacaktır(Şekil 2.14.). Üst elektrodun alt elektroda yapışmadan hemen önceki geldiği noktaya, azami hareket limiti veya azami deformasyon miktarı denilmektedir. Azami hareket noktasında, eyleyiciye uygulanan gerilime de azami voltaj değeri denilmektedir.



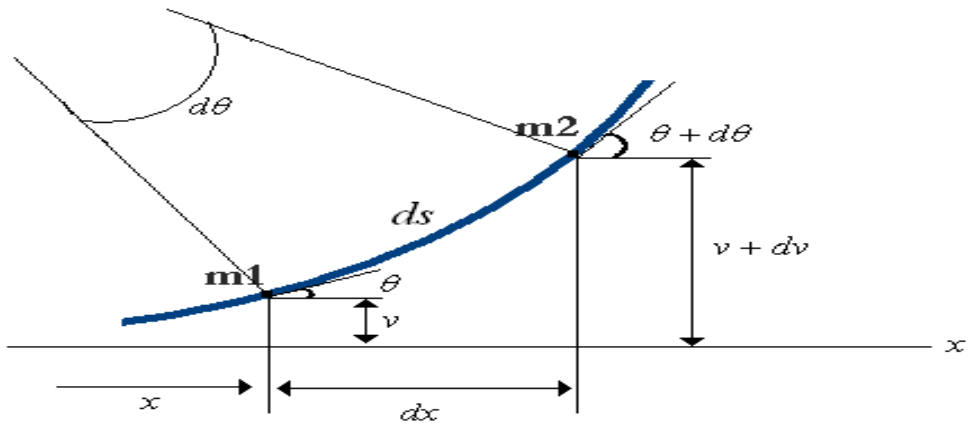
Şekil 2.14. Eyleyiciye uygulanan gerilim sonucu üst plakanın alt plakaya yapışması

Dikkat edilmesi gereken bir nokta da, üst elektrodun hareketinin doğrusal olmadığıdır, bu sebeple yıllar boyunca bilim adamları bu doğrusal olmayan karmaşık yapıyı çözmek için uğraştılar[10,12,13]. Azami voltaj değeri ve azami deformasyon miktarı, bilim adamlarının üzerinde durduğu önemli bir noktadır. Bu değerleri bilmek yapının kontrolü için çok önemlidir, ayrıca uygulanan voltaj sonucu, üst elektrodunun alt elektroda yaklaşması(deformasyonu) doğrusal olmadığından bu değerleri bulmak ve bu hareketi matematiksel olarak ifadelendirmek kolay olmamaktadır. Şimdi bu hareketin matematiksel ifadesine bakmak için, öncelikle üst plakaya Şekil 2.15.'teki gibi, birim uzunluk başına, fiziksel bir kuvvetin etki ettiğini varsayalım.



Şekil 2.15. Eyleyiciye uygulanan fiziksel kuvvet ve eyleyici yapısı

Eyleyiciye uygulanan fiziksel kuvvet sonucu, eyleyicide bir deformasyon oluşur(Şekil 2.16.). Eyleyici üzerinde iki tane rastgele nokta seçilip bunlar arasındaki ilişkiye bakılırsa, eyleyici yapısı daha iyi anlaşılmış olur.



Şekil 2.16. Eyleyiciye uygulanan fiziksel kuvvet sonucu oluşan deformasyon

Eyleyiciye uzunluğu boyunca uygulanan mekanik kuvvet ile deformasyon arasındaki ilişki şu şekilde olmaktadır.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \quad [11] \quad (2.1)$$

$$\tan \theta = \frac{dv}{dx} \quad (2.2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{dv}{dx}\right) \quad (2.3)$$

$$\cos \theta = \frac{dx}{ds} \quad (2.4)$$

$$\sin \theta = \frac{dv}{ds} \quad (2.5)$$

Çıkarılan ifadeler, üst plakanın gerçek hareketi göz önüne alınarak çıkarılmıştır. Üst plakanın yapıldığı madde genellikle, çelik veya poli-silikon gibi oldukça sert ve bükülmesi zor bir madde olmaktadır. Bu sebeple üst plakadaki m_1 ve m_2 noktaları arasındaki bükülmeden dolayı oluşan açı($d\theta$), iki nokta arasındaki mesafeye(ds) göre çok küçük kalmakta dolayısıyla ihmal edilebilmektedir.

Eyelyicinin bu özelliği göz önüne alındığında önceki ifadeler şu hale dönüşür;

$$\theta \approx 0 \quad (2.6)$$

$$\cos \theta \cong 1 \quad \frac{dx}{ds} \Rightarrow dx \cong ds \quad (2.7)$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \quad \frac{d\theta}{ds} \cong \frac{d\theta}{dx} \quad (2.8)$$

$$\tan \theta = \theta \Rightarrow \tan \theta \frac{dv}{dx} \Rightarrow \theta = \frac{dv}{dx} \quad (2.9)$$

$$\kappa = \frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (2.10)$$

$$-q = EI \frac{d^2\kappa}{dx^2} \quad [11] \quad (2.11)$$

$$-q = EI \frac{d^4v}{dx^4} \quad (2.12)$$

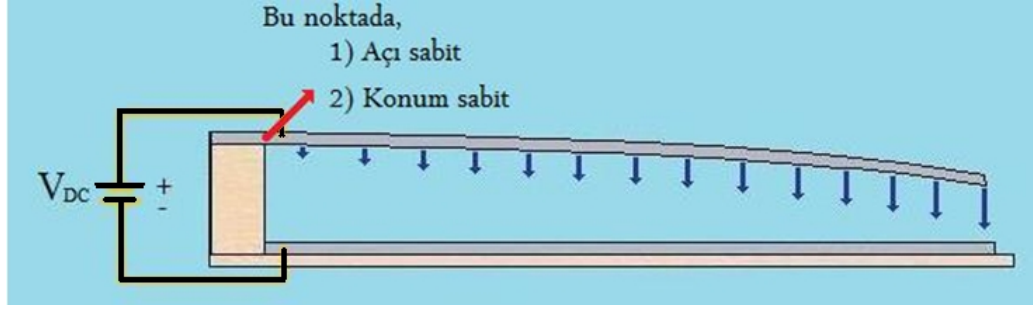
Elde edilen (2.12) nolu denklemden deformasyon(v) ifadesi çekilirse; denklem şu hale dönüşür.

$$v = \frac{1}{EI} \left(-\int \int \int \int q \cdot dx + C_1 x^3 + C_2 x^2 + C_3 x + C_4 \right) \quad (2.13)$$

Elde edilen bu son ifade analitik olarak çözülememektedir, çünkü integral sabitlerinin(C_1, C_2, C_3, C_4) bulunabilmesi için en az 4(dört) tane denklemin veya sınır koşulunun bulunması gerekir. Gerekli olan bu 4(dört) sınır koşulundan sadece 2 tanesi(C_3, C_4) elde edilebildiğinden, bu ifadenin analitik çözümü mümkün olamamaktadır. Üst elektrota uygulanan fiziksel etki,serbest uçta daha fazla olduğu için, eyleyicinin hareketi lineer olamamakta ve çözüm daha da zorlaşmaktadır. Yukarıdaki matematiksel ifadenin çözülebilmesi için elde edilen sınır koşullarının bulunması ve bazı yaklaşımların yapılması gereklidir.

2.4. SINIR KOŞULLARI VE EYLEYİCİYE UYGULANMASI

Eyleyicinin hareketini modellerken, iki önemli sınır koşuluna(kısıtlamaya) dikkat etmek gereklidir. Bu sınır koşullarından ilki, üst elektrodun sabit noktada alt elektroda yaklaşmadığı, diğeri ise üst elektrodun sabit noktada açısının değişmediğidir(şekil 2.17.). Bu iki sınır koşulunun oluşmasının sebebi, üst elektrodun bu noktada sabitlenmiş olmasıdır.

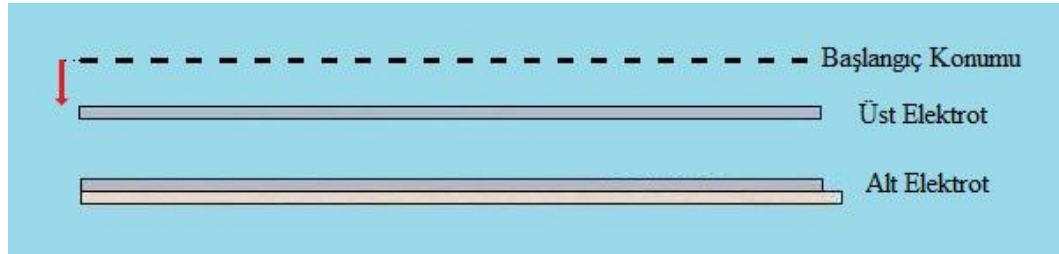


Şekil 2.17. Eyleyici için sınır koşullarının belirlenmesi

Dikkat edilirse her iki elektrot iletken olup, birbirine paralel durmakta ve aralarında hiçbir iletken bulunmamaktadır. Eyleyici bu yapıyla bir kapasitöre benzetilebilir, bu sayede gerekli matematiksel hesaplamalar yapılabilir.

2.4.1. Sabit Noktada Açının Korunumu

Daha önce bahsedildiği gibi eyleyici için iki sınır koşulu mevcuttu, bu sınır koşullarından ilki olan açının korunması kısıtlaması gözönüne alınır ve bu kısıtlamaya göre eyleyici yeniden tasarlanırsa, eyleyicinin durumu şekil 2.18.'deki gibi olur.

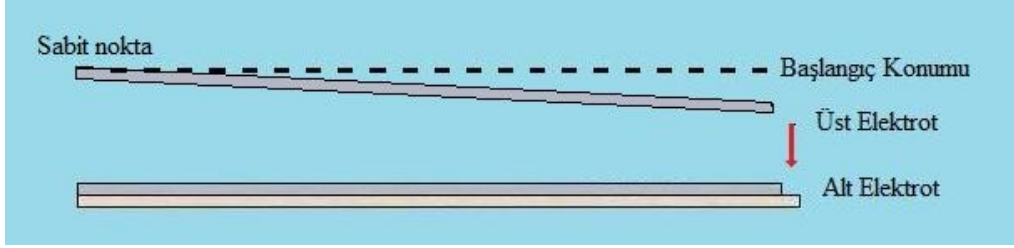


Şekil 2.18. Eyleyici için ilk sınır koşulunun uygulanması

Bu yapıda üst elektrodun bükülmesi gibi bir durum söz konusu değildir. Bu yaklaşımda, uygulanan gerilim nedeniyle üst elektrot tümüyle alt elektroda yaklaşmaktadır. Bu yapıya Lumped modeli de denilmektedir[10,12,13]. Bu yaklaşımın, matematiksel hesaplamaları ileride ayrıntılı olarak verilecektir. Bu yaklaşımda eyleyici sadece dikey yönde hareket edebilmekte ve bu sayede matematiksel hesaplama oldukça basitleşmektedir, ama gerçek modele yeterli ölçüde bir yaklaşım olmamaktadır.

2.4.2. Sabit Noktada Konumun Korunumu

Sınır koşullarından ikincisi olan sabit noktada konumun değişmemesi gözönüne alınıp, ilk sınır koşulu olan sabit noktada açının değişmemesi gözardı edilir ve buna göre eyleyiciyi yeniden tasarlanırsa; eyleyicinin modeli şekil 2.19.'daki gibi olur.

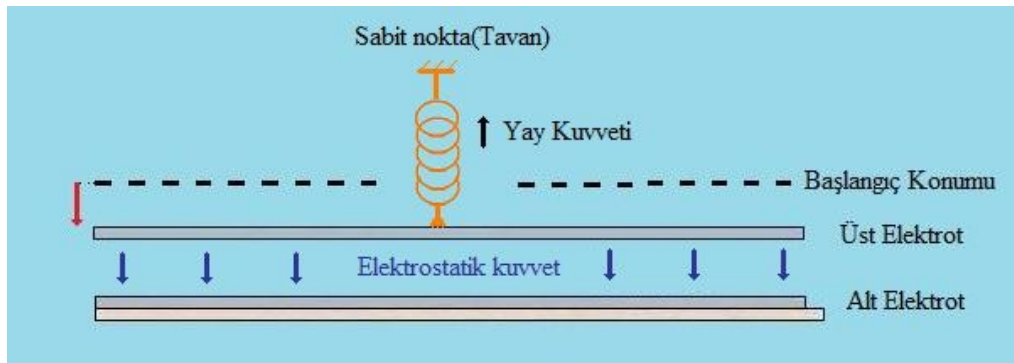


Şekil 2.19. Eyleyici için ikinci sınır koşulunun uygulanması

Bu modelde eyleyicinin doğrusal hareket ettiği varsayılmış, bu sebeple açının değişimi göz ardı edilmiş olur. Bu modelde üst elektrot her noktada aynı miktarda hareket etmediğinden, bu modelin matematiksel hesaplamaları, bir önceki modele göre daha karmaşıktır. Bu modelin hareketinin gerçek modelle ne ölçüde örtüştüğü ileri bölümlerde ayrıntılı olarak verilecektir.

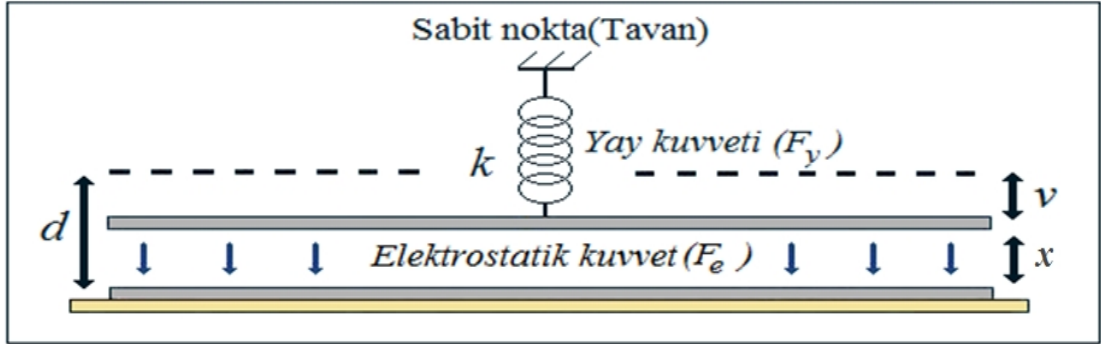
2.5. LUMPED MODELİ

Yıllar boyunca, araştırmacılar elektrostatik eyleyicilerin hareket limitini hesaplamak için lumped modelini kullandılar[10,12,13]. Bu model daha öncede bahsedildiği gibi eyleyici için sadece ilk sınır koşulu olan, sabit noktada açının değişmemesini gözönüne almakta ve bu yaklaşım sonucu ile ortaya bir matematiksel model koymaktadır.



Şekil 2.20. Eyleyici için lumped modeli

Lumped modeline ayrıntılı bir şekilde bakıldığında, üst ve alt elektrotlar arasında uygulanan gerilim sebebiyle bir elektrostatik çekim kuvveti oluşmakta ve maddelerin bükülmeye karşı verdiği doğal tepki sonucu üst çubuk, elektrostatik kuvvetin tam tersi yönde bir geri çekme(tepki) kuvveti oluşturur. Lumped modelinde bu tepki kuvveti bir yay kuvveti olarak tasvir edilmektedir(şekil 2.20.).



Şeki 2.21. Deformasyon miktarı ve lumped modeli

Şekil 2.21.'deki yapı dengedeysen, yukarı doğru çeken yay kuvveti(F_y) ve aşağı doğru çeken elektrostatik kuvvet(F_e) birbirini dengelemektedir. Denge de olan kuvvetlerin toplamının sıfır olması kuralından yola çıkarak, kuvvet eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$F_e = F_y \quad (2.14)$$

F_y yay kuvveti, yay sabiti(k) ve yayın gerilme miktarı(v) ile çarpımına eşittir.

$$F_y = kv \quad (2.15)$$

F_e elektrostatik kuvvet ise eyleyiciye uygulanan voltaja bağlı olarak üst elektrodu aşağı çeken kuvvettir. Öncelikle eyleyicinin yapısının bir kapasitöre benzetilebileceği daha önce belirtilmişti. Bu sebeple kapasitansın depoladığı enerji(U) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.16)$$

Depolanan enerji ile elektrostatik kuvvet arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$dU = -F_e dx \quad (2.17)$$

Şekil 2.21.'den görüldüğü gibi $x=d-v$ dir ve bu değer elektrotların denge durumundayken aralarındaki mesafedir.

Denklemden F_e çekilirse;

$$F_e = -\frac{dU}{dx} \quad (2.18)$$

Enerji ifadesi(U) yerine yazılırsa;

$$F_e = -\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} CV^2 \right) \quad (2.19)$$

Paralel plakalı kapasitansın değeri aşağıdaki gibi yazılır.

$$C = \frac{\epsilon_o A}{x} \quad (2.20)$$

Sadece kapasitör ifadesi x 'e bağlı olduğundan sadece onun türevi sıfırdan farklı olur. Bu sebeple elektrostatik kuvvet ifadesi şu şekilde yazılabilir.

$$F_e = -\frac{1}{2} \frac{dC}{dx} V^2 \quad (2.21)$$

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

$$F_e = \frac{\epsilon_o AV^2}{2x^2} \quad (2.22)$$

Her iki kuvvet ifadesi bulunduktan sonra, (2.14) nolu denklemde yerlerine yazılırsa;

$$\frac{\epsilon_o AV^2}{2x^2} = kv \quad (2.23)$$

$v=d-x$ eşitliği (2.23) nolu denklemde yerine yazılırsa; denklem şu hale gelir.

$$\frac{\epsilon_o AV^2}{2x^2} = k(d-x) \quad (2.24)$$

Bu noktadan sonra yapılması gereken, (2.24) nolu denklemden voltaj ifadesinin(V) eşitliğin bir tarafına alınmasıdır.

$$V = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 A}} (x^2 d - x^3)^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

Voltaj ifadesi elde edildikten sonra, bulunacak iki önemli değer vardır. İlki, azami deformasyon değeri diğeri ise azami voltaj değeridir.

Bir denklemin bağlı olduğu değişkene göre türevi alındıktan sonra sıfıra eşitlenir ve denklem çözülürse; bulunan kökler denklemin azami veya asgari değer aldığı noktalardır. Bu sebeple (2.25) nolu denklemin x 'e göre türevi alınır ve sıfıra eşitlenirse; eşitlik şu hale gelir.

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 A}} \frac{1}{2} \frac{(2xd - 3x^2)}{(x^2 d - x^3)^{\frac{1}{2}}} = 0 \quad (2.26)$$

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

$$(2xd - 3x^2) = 0$$

İfade ikinci dereceden bir denklem olduğundan iki kökü olur, kökleri bulunursa;

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 \\ x_2 &= \frac{2}{3}d \end{aligned}$$

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.

$$x_{kritik} = \frac{2}{3}d \quad [12] \quad (2.27)$$

$v+x=d$ olduğundan dolayı, bu eşitlikten deformasyon miktarı çekilirse;

$$v_{kritik} = \frac{1}{3}d \quad [13] \quad (2.28)$$

elde edilir.

(2.28) nolu ifade önemli bir eşitliktir, çünkü eyleyicinin üst plakasının gelebileceği azami noktayı (v_{kritik}) ifade etmektedir. (2.27) nolu ifadenin (2.25) nolu eşitlikte yazılması, azami voltaj (V_{kritik}) değerini verir.

$$V_{kritik} = \sqrt{\frac{2k}{\epsilon_0 A} \left(\left(\frac{2}{3} d \right)^2 d - \left(\frac{2}{3} d \right)^3 \right)} \quad (2.29)$$

Bu denklem sadeleştirilirse;

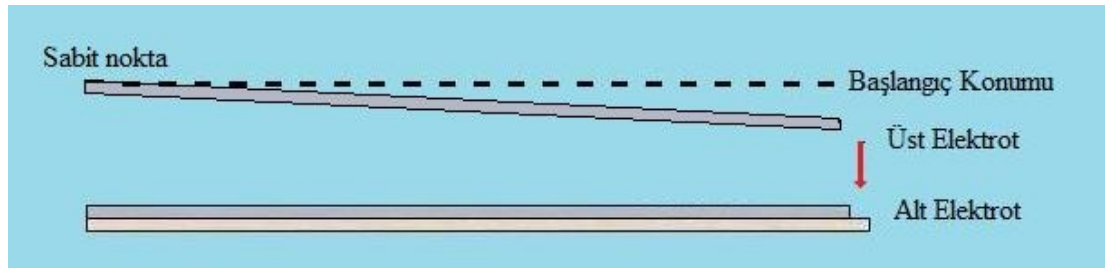
$$V_{kritik} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{kd^3}{\epsilon_0 A}} \quad (2.30)$$

ifadesi elde edilir[12, 13].

Lumped modelini, eyleyici hareketini modellemede yeterli hassasiyette görmemekteyiz. Çünkü öncelikle sınır koşullarından bir tanesi (sabit noktada konum değişmez) göz ardı edilmekte ve uygulanan gerilim sonucu üst plaka gerçekte bükülmeye uğramasına rağmen; bu modelde üst plakanın bükülmediği varsayılmıştır. Sonuç olarak bu model, eyleyicinin gerçek hareketine yeteri hassasiyette yaklaşmamaktadır. Dolayısıyla yeni bir model tasarlama ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

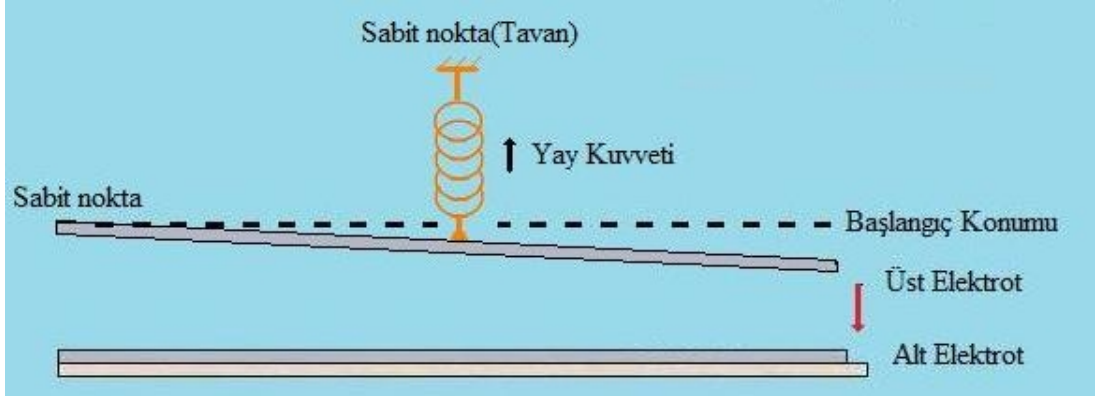
2.6. DİĞER SINIR KOŞULU

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, eyleyici için iki sınır koşulu vardı ve bunlardan ilki sabit noktada açının değişmediği diğeri ise konumun değişmediğiydi. Eyleyici için sadece ikinci sınır koşulu olan sabit noktada konumun değişmemesi göz önüne alındığında şekil 2.22.'deki model oluşmaktadır.



Şekil 2.22. İkinci sınır koşulu için eyleyici modeli

Bu model için lumped modelinde olduğu gibi tepki kuvveti bir yay kuvveti olarak düşünülürse, model şekil 2.23.'de ki hale dönüşür.



Şekil 2.23. İkinci sınır koşulu için eyleyicinin tam modeli

Bu modele bakıldığında, modelin lumped modele göre daha iyi bir yaklaşım olduğu görülür. Fakat bu yaklaşımında yeteri kadar hassas olduğunu düşünmemektediriz. Sabit noktada, açının sabit olması koşulunun göz ardı edilmesi gerçeğe yakın sonuçlar vermesi bakımından bu modelin bir eksikliğidir. Çünkü bu modelde sabit noktada konum değişmezken, açı değişmektedir. Dolayısıyla daha hassas bir model ortaya koyma gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

3. METERYAL VE METOT

3.1. ANSYS PROGRAMI

ANSYS yazılımı mühendislerin mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarda fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan interaksyonunu benzetim etmekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar metodu(FEM) yazılımıdır.

Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının benzetim edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu benzetimler neticesinde yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır.

Modüler yapısı sayesinde ANSYS yazılımı sadece ihtiyaç duyulan özelliklerin alınmasına fırsat vererek ilave edilebilen CAD ve FEA bağlantı modülleri ile masa üstünde kullanılan diğer mühendislik yazılımları ile entegre bir şekilde çalışabilmektedir.

ANSYS yazılımı hem dışarıdan CAD datalarını alabilmekte hem de içindeki işlem alanı imkanları ile geometri oluşturulmasına izin vermektedir. Gene aynı işlem alanı içinde hesaplama için gerekli olan sonlu elemanlar modeli yani ağ da oluşturulmaktadır. Yüklerin tanımlanmasından sonra ve gerçekleştirilen analiz neticesinde sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak elde edilebilir.

ANSYS yazılımı ile özellikle “contact” algoritmalarının çeşitliliği, zamana bağımlı yükleme özellikleri ve nonlinear malzeme modelleri sayesinde yüksek mühendislik seviyedeki analizleri hızlı, güvenilir ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

ANSYS Workbench parametrik CAD sistemlerini eşsiz bir otomasyon ve performans ile benzetim teknolojilerini entegre eden bir platformdur. ANSYS Workbench'in gücü yılların bilgi birikimi ile arkasında duran ANSYS çözücü algoritmalarından gelir. Ayrıca ANSYS Workbench'in amacı sanal ortamda ürünün verifikasyonunu ve iyileştirmesini sağlamaktır

Özellikle PC ile uyumluluğun üst seviyede olabilmesi için yazılmış olan ANSYS Workbench sadece bir arayüzden oluşan bir çalışma ortamıdır ve ANSYS Workbench ile herhangi bir ANSYS lisansına sahip herkes çalışabilir. Aynı alışılalmış ANSYS arabiriminde olduğu gibi ANSYS Workbench'de de kapasiteler sahip olunan lisansın doğrultusunda sınırlıdır[14].

ANSYS Yazılımı fiziğin çok çeşitli disiplinlerinde benzetim imkanı verdiği için aşağıdaki uygulama alanlarında rahatlıkla kullanılabilir[15].

- Otomotiv (Ana ve Yan Sanayi)
- Ulaştırma
- Çevre İnşaat Sanayi
- Havacılık ve Uzay
- Savunma Sanayi
- Elektronik Sanayi
- Elektrikli Ev Aletleri
- Biomedikal
- Genel Makina Sanayi
- İnşaat Mühendisliği
- Kimya Sanayi
- Güç Üretimi ve Turbo Makinalar

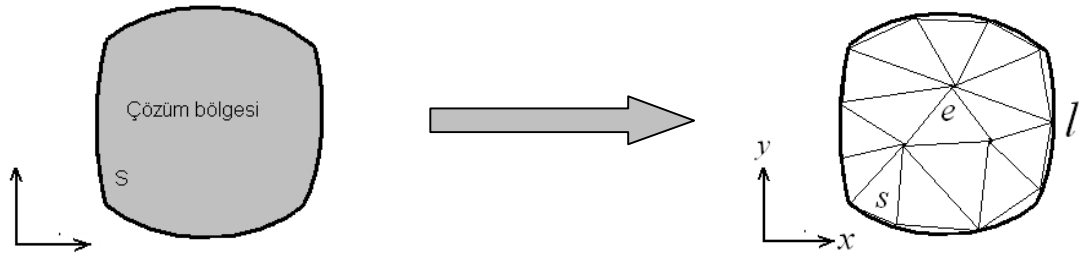
3.1.1. Sonlu Eleman Metodu(FEM)

Sonlu elemanlar metodu(FEM) mühendislik problemlerine yaklaşık çözüm sağlayan sayısal bir tekniktir. Köprü, uçak ve gemi gibi karmaşık hesaplamalar gerektiren bir çok yapının maruz kaldığı etki (basınç, ağırlık, sıcaklık vb.) sonucu oluşan stres, uzama, bükülme, genleşme gibi değişimlerin hesabı için FEM kullanılır. Bunun yanında MEMS'teki problemlerinin çözümünde de yaygın olarak kullanılmaktadır. FEM, bir sistemin potansiyel enerjisi gibi bir fonksiyonelin yaklaşık bir minimizasyonudur. Elektrostatik alan analizinde minimize edilecek fonksiyonel sınırlı bir hacim içindeki elektrostatik enerjidir[16].

$$w = \frac{1}{2} \int_v \epsilon E^2 dv$$

İfade edilen elektrostatik potansiyeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$w = \frac{1}{2} \epsilon \int_v \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] dv$$



Şekil 3.1. Belli bir yüzeyin FEM için ağırlara ayrılması

Şekilde görülen sınırlı "S" yüzeyi için iki boyutlu bir duruma ait, aşağıdaki fonksiyoneli dikkate alalım.

$$W = \frac{1}{2} \epsilon \int_s \left[\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] ds$$

FEM 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.

$$dW \Rightarrow 0$$

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.

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

Burada, V_1, V_2, \dots, V_m sırasıyla 1,2,...,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;

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

olur. Ve ayrıca e ninci elemanın içindeki elektrik enerjisi şu şekilde yazılır.

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

Sonuç olarak bölgenin tamamındaki toplam enerji;

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

veya;

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

ifadesi ile belirlenir. Burada;

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

dir. Ve “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;

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

olarak varsayalım; iki boyutlu geometri için biçim fonksiyonları;

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

ile tanımlanır.

Burada $A^{(e)}$ elemanının alanı, $A_i^{(e)}$ ise “e” elemanındaki bir kısmın alanıdır.

$$A^{(e)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & x_0 & y_0 \\ 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \end{bmatrix}$$

$$A_i^{(e)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_{i+1} & y_{i+1} \\ 1 & x_{i+2} & y_{i+2} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, 3 \text{ den hesaplanabilir.}$$

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

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

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

f_e aşağıdaki gibi yeniden oluşturulabilir.

$$f_e = T^{(e)} V^{(e)}$$

Burada;

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

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

dir.

Sonuç olarak;

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

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

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

kullanılarak;

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

elde edilir; buradan düğüm potansiyelleri belirlenmiş ve problem çözümlenmiş olur.

3.1.2. Yeni Tasarımın Benzetim Modeli

ANSYS programında bir problemin sonlu elemanlar metoduyla modellenmesi, çözümlenmesi ve çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi paket programlarda üç ayrı modülde gerçekleştirilmektedir. Analizde modele sınır şartlarının tatbik edilmesine 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 arayüz programında bir problemi çözmek için, kabaca aşağıdaki işlemlerin sırasıyla yapılması gerekmektedir.

- ✓ Öncelikle kullanılan meteryalin ve ortam özelliklerinin girilmesi gerekir. Meteryalin kullanıldığı ortamın da özellikleri önemlidir. Çünkü kullanılan meteryal ortama göre farklı tepkiler verebilmektedir.
- ✓ Çözümlemek istenen problemin, geometrik modelinin oluşturulması gerekir. ANSYS programında bir modelin geometrisini oluşturmak için çeşitli seçenekler mevcuttur. Bunlar;
 - ❖ Üç boyutlu koordinat sistemine göre (x,y,z) noktaların(key point) tanımlanması gerekir ve noktalar kullanılarak istenen geometri oluşturulabilir.
 - ❖ Bir çizginin oluşması için gereken iki adet noktanın(key point), 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.
 - ❖ Bir alanın oluşması için gereken dört adet noktanın(key point), 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.

- ❖ Bir hacmin oluşması için gereken sekiz adet noktanın(key point), 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.
- ✓ 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, yanyana yapıştırılması vs.).
- ✓ Uygulanacak etkinin hangi yönde ve nereye uygulanacağını tanımlanması ve etkinin büyüklüğünün(V=10 volt gibi) girilmesi gerekir.
- ✓ Geometri için ağ yapılarının oluşturulması gerekir, çünkü ANSYS programı, problemin benzetimini oluşturmak için sonlu eleman metodunu(FEM) kullanır. ANSYS'te ağ yapılarının oluşturulması için çeşitli metodlar vardır. Ağ yapıları isteğe bağlı olarak otomatik oluşturulabilir.
- ✓ Problem için geometrinin sınır koşullarının girilmesi gerekir. Sınır koşulları, geometrinin hangi noktalarda veya hangi doğrultularda hareket edemeyeceğini belirler.
- ✓ Son olarak problemin çözümü için gerekli işlemlerin yapılması ve çözümün tekrarlanma(iterasyon) sayısının girilmesi gerekir.

Yapılması gereken işlemlerden ana hatlarıyla bahsedildikten sonra yeni tasarımın benzetiminin oluşturulması için yapılan işlemler sırasıyla anlatılacaktır.

3.1.2.1. Eleman tipinin belirlenmesi

Eleman tipi olarak 2 boyutlu sekiz düğüm noktalı eşparametrik dörtgen eleman olan Plane 82 kullanılmıştır. Eşparametrik terimi sonlu elemanın geometrisini ve eleman içinde bilinmeyen değerleri(genlik) tanımlayan fonksiyonların aynı olduğunu ifade eder. Bu tip elemanlar hesaplama etkinliği nedeniyle (sayısal entegrasyon) sonlu eleman programlarında tercih edilir. Plane 82 elemanı fiziksel koordinatlarda eğri kenarlı genel dörtgen formunu aldığından eğri yüzeylerin modellenmesinde doğruluk derecesi daha yüksek neticeler elde edilmektedir.

3.1.2.2. Problemin 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 elektrodu bir alanı ifade eder. Böylece eyleyicinin geometrisi, doğrudan alanlar kullanılarak daha kolay oluşturulmuş olur(şekil 3.2.).



Şekil 3.2. Alanlar kullanılarak oluşturulmuş eyleyici geometrisinin 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.



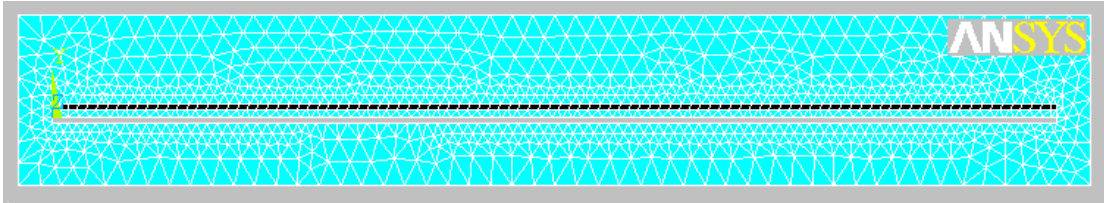
Şekil 3.3. Eyleyicinin içinde bulunduğu hava(vakum) ortamının modellenmesi

3.1.2.3. Geometriye uygulanacak etkinin belirlenmesi

Daha önce de belirtildiği gibi problemin geometrisi ve bulunduğu dış ortam oluşturulduktan sonra geometriye etki edecek etkiyi(basınç, ağırlık, sıcaklık vb.) tanımlamak gerekmektedir. Bu etki elektrostatik mikro-eyleyici için voltajdır. Voltaj iki elektrot arasına uygulanmakta ve her iki elektrodu bir birine doğru çekmektedir. Alt elektrot tümüyle zemine sabitlendiği için hiç bir noktada hareket etmeyecek fakat üst elektrot sabitlendiği noktalar dışında aşağıya doğru hareket edecektir. Uygulanan etki voltaj ve her iki elektrot da iletken olduğundan, elektrotların birbirini gören yüzeyleri boyunca bir elektrostatik kuvvet oluşacaktır.

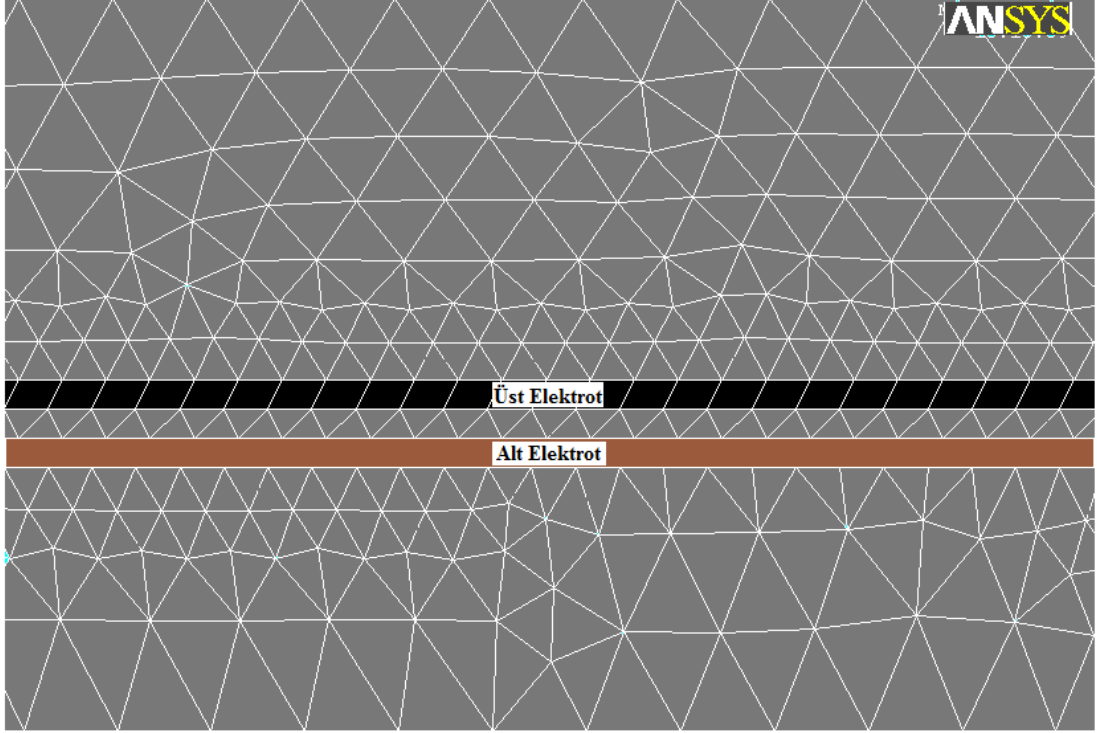
3.1.2.4. Geometri için ağ yapısının oluşturulması

Sonlu eleman metodunun eyleyici modeline uygulanması için geometri üzerinde ağ yapılarının oluşturulması gerekir(şekil 3.3.). 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

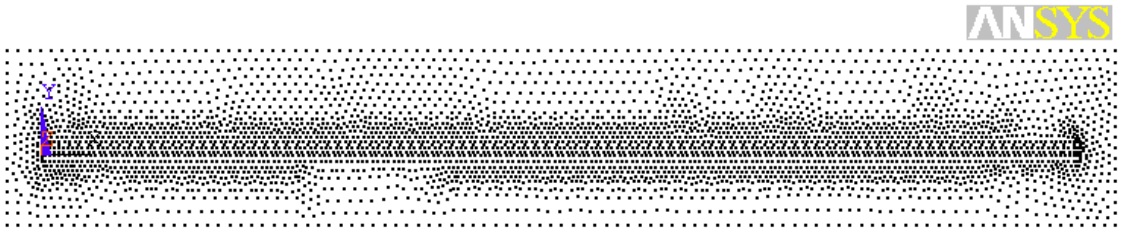
Problemin geometrisi üzerinde ne kadar çok ağ yapısı oluşturulursa çözüm o kadar hassas olur, Fakat ağ yapılarının çok fazla olması aynı zamanda çözümün zorlaşmasına ve uzamasına sebep olur. Problemin geometrisi üzerinde, daha fazla etkiye maruz kalacak bölgelerde(genellikle bağlantı veya uç noktalar), 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.'den de görüldüğü gibi üst ve alt elektrodun çevresinde diğer noktalara göre daha sık ağ oluşturulmuştur. Bunun sebebi eyleyici geometrisi üzerinde bu bölgelerin diğer bölgelere göre çözüm üzerinde daha fazla etkili olmasıdır.



Şekil 3.5. Ağ yapısının yakından görünümü

Alt elektrodun tümüyle alt zemine sabitlenmiş olması ve bunun sonucunda alt elektrodun hiç hareket etmemesi sebebiyle, alt elektrot üzerinde ağ yapıları oluşturulmamıştır.

Ağ yapıları oluşturulduktan sonra çözümün yapılabilmesi için bu üçgen ağların birleştiği noktaların(düğüm) oluşturulması gerekir. Ağ yapıları elektrotların çevrelerindeki bölgelerde daha yoğun olduğu için, noktalar bu bölgelerde daha yoğun oluşmuştur(şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Ağ yapılarının nokta(düğüm) olarak gösterimi

3.1.2.5. Geometri için sınır koşullarının belirlenmesi

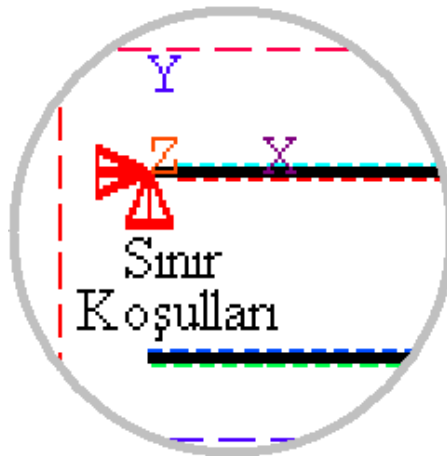
Eyleyiciye uygulanan etki belirlendikten sonra, bu etkiye maruz kalan geometrinin hangi noktalarda veya hangi yöne hareket edemeyeceğini yani sınır koşullarını belirlemek gerekir. Problemin çözümünde doğru sonuçlar elde etmek için, sınır koşullarının mutlaka programa girilmesi gerekir.

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 benztim 2 boyutlu yapıldığından dolayı, üst elektrodun UX ve UY yönlerinde hareket etmesi engellenmiştir(şekil 3.7.).



Şekil 3.7. Sınır kuşullarının oluşturulan geometriye uygulanmasının görünümü

Sınır koşullarını daha iyi anlamak ve daha iyi görebilmek için şekil 3.8.'e bakmak gerekir.



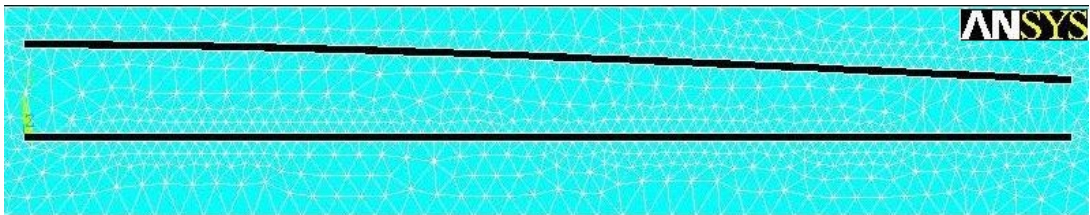
Şekil 3.8. Sınır koşullarının yakından görünümü

Sınır koşulları belirtildikten sonra, çözümün tamamlanabilmesi için son olarak elektrotların yapıldığı maddenin elastik modülü(Young's modulus(E)), bükülme oranının(Poisson's ratio(ν)) ve çözümün tekrarlanma(iterasyon) sayısının girilmesi gerekir. Tüm bu işlemler yapıldıktan sonra problem çözüme hazırdır.

3.1.2.6. Benzetim sonuçları

ANSYS programı problemi görsel ve matematiksel olarak çözmektedir. Eğer problemin geometrisi ve sınır şartları doğru temsil edilmişse, eyleyicinin analizinde analitik çözüme tatminkar bir yaklaşım sağlanabilir. Önceki bölümlerde ana hatlarıyla anlatılan tüm işlemler ANSYS programında yapılarak eyleyici analiz edilmiş ve aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir.

- I. Eyleyicinin uygulanan voltaj sonucu alt elektroda doğru şekil 3.9.'daki gibi deforme olduğu ve bu deformasyonun; uygulanan voltaj değeri, eyleyicinin uzunluğu ve genişliği ile doğru; elektrotlar arasındaki mesafe, üst elektrodun kalınlığı ve elastik modülü ile ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir.
- II. Eyleyiciye uygulanan voltaj arttırıldıkça, üst elektrodun deforme olmaya devam ettiği fakat belli bir noktadan sonra aniden çökerek alt elektroda yapıştığı gözlemlenmiştir.
- III. Yapılan bir çok uygulama ve gözlem neticesinde, üst elektrodun aniden çöküp alt elektroda yapışmadan hemen önceki kritik deforme(azami deformasyon) değeri ile eyleyicinin elektrotları arasındaki başlangıç mesafesi arasında sabit bir oran olduğu teyit edilmiştir.
- IV. Elde edilen sonuçlar neticesinde kritik deforme değeri(v_{kritik}) ile başlangıç mesafesi(d) arasındaki sabit oranın 0.44 olduğu bulunmuştur($v_{kritik} = 0.44 * d$).



Şekil 3.9. Eyleyicinin deforme olmuş görüntüsü

3.2. MATLAB PROGRAMI

MATLAB teknik hesaplamalar yapabilen yüksek-performanslı bir dildir. MATLAB, hesaplama, görüntüleme ve programlamayı, problemlerin ve çözümlerin benzer matematiksel gösterimler ile ifade edildiği kolay kullanılır bir ortama tümleştirir.

Çeşitli kullanım alanları şunlardır:

- Matematik ve hesaplama
- Algoritma geliştirimi
- Veri edinme
- Modelleme, benzetim, ve prototiplendirme
- Veri analizi, açın-sama, ve görüntüleme
- Bilimsel ve mühendisliksel grafikler
- Grafikselle kullanıcı arabirimi oluşturmayı da içeren uygulama geliştirimi

MATLAB, temel veri elemanı, boyutlandırmaya gerek duymayan, dizi olan bir enteraktif sistemdir. Bu, birçok teknik hesaplama problemlerini, özellikle matris ve vektör formülasyonlu olanları çok az bir zamanda çözmeyi sağlar.

MATLAB, geçmiş zaman zarfı boyunca birçok kullanıcıların katkısıyla çok gelişmiştir. Üniversite ortamlarında, matematik, mühendislik, ve bilimdeki temel ve ileri dersler için standart bir eğitimsel araçtır.

MATLAB, araçkütuları olarak adlandırılan eklenebilir uygulama-spesifik çözümler ailesi özelliğine sahiptir. MATLAB kullanıcıların birçoğu için çok önemli olan araçkütuları, spesifik teknolojiyi öğrenme ve uygulamaya olanak tanır. Araçkütuları, 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 kutularına sahiptir.

3.2.1. Yeni Model İçin Matlab Kullanımı

Yeni tasarım için genel olarak bütün matematiksel işlemler MATLAB programı vasıtasıyla yapılmıştır. Bu sebeple MATLAB programının yeni tasarımın oluşumunda nasıl kullanıldığı aşağıda adım adım anlatılmıştır.

- ✓ Tasarım kısmında(Bölüm 3.3.) belirtileceği gibi, yeni tasarımda eyleyicinin üst elektrodunun bir kısmının hareket etmediği varsayılmıştır. Bu kısmın bulunması büyük öneme sahiptir. Bu kısım, ANSYS programından örnek bir eyleyiciden alınan sonuçlar neticesinde, MATLAB programında bir m dosyası oluşturulmuş ve gerekli eşitlikler yazıldıktan sonra çözüme ulaşılmıştır. Eyleyicide sabit varsayılan kısmın bulunması için oluşturulmuş MATLAB m dosyası ek1.a. da verilmiştir.
- ✓ Eyleyici için sabit kabul edilen kısım bulunduktan sonra, geri kalan hareketli kısmı için kritik deformasyon(v_{kritik}) değerinin bulunması gerekir. Bu değer bulunması için hareketli kısma göre yeniden denklemler oluşturulmuş ve bu denklemlerden voltaj(V) ifadesi yazılmıştır. Bu voltaj ifadesi tasarım kısmında verildiği gibi, deformasyona(v) bağlı bir ifadedir. Dolayısıyla voltaj denkleminin türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesi ve bu eşitliğin sıfır olduğu deformasyon ifadesinin bulunması gerekir. Bu değer(v_{kritik}) azami deformasyon değeridir. Bu kiritik deformasyon değerinin bulunması için oluşturulmuş olan MATLAB m dosyası ek1.b. de verilmiştir.
- ✓ Önceki iki adımdaki işlemler başarılı bir şekilde yapıldıktan sonra, sıra bu denklemlerden veriler alma kısmına gelmiştir. Oluşturulan yeni tasarımın gerçeğe yakın bir model olup olmadığını anlamak için bu tasarımın matematiksel formülüne istenen deformasyon miktarı yazılarak, gerekli voltaj değerlerinin elde edilmesi gerekir. Elde edilen verilerin daha önceki model(lumped modeli) ile karşılaştırılabilmesi için aynı işlemlerin, lumped modelinin matematiksel formülüne de uygulanması gerekir. Her iki modelin matematiksel formülünden, istenen deformasyon miktarları için gerekli voltaj değerlerini bulan MATLAB m dosyası ek1.c. de verilmiştir.

- ✓ Son olarak, yeni tasarımın matematiksel formülü ve lumped formülünden veriler alınmış ve ANSYS benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Her üç veri kaynağından alınan veriler arasında karşılaştırmanın daha iyi yapılabilmesi ve sonucun daha iyi anlaşılması amacıyla bu veriler grafik halinde sunulmuştur. Sırasıyla aşağıda verilen örnek eyleyici boyutları için elde edilen veriler grafik haline getirilmiştir.

1. Aşağıdaki eyleyici boyutları için her üç kaynaktan(yeni tasarım formülü, lumped formülü ve ANSYS benzetimi) kritik deformasyon limiti içinde, değişik deformasyon miktarları için gereken voltaj miktarları bulunmuştur. Elde edilen verilerin grafik haline getirilmesi için MATLAB m dosyası oluşturulmuştur(ek 1.d.).

$$L=150e-6 \text{ m (Eyleyicinin uzunluğu)}$$

$$d=2e-6 \text{ m (Eyleyici plakaları arasındaki başlangıç mesafesi)}$$

$$E=170e6 \text{ PA (Eyleyicinin Young's modülü)}$$

$$t=2e-6 \text{ m (Üst plakanın kalınlığı)}$$

2. Aşağıdaki eyleyici boyutları için her üç kaynaktan(yeni tasarım formülü, lumped formülü ve ANSYS benzetimi) eyleyicinin kritik deformasyon noktasına gelebilmesi için, değişik eyleyici uzunluklarına göre gereken voltaj miktarı bulunmuştur. Elde edilen verilerin grafik haline getirilmesi için MATLAB m dosyası oluşturulmuştur(ek 1.e.).

$$v_{kritik}=0.44*d \text{ m (Eyleyicinin kritik deformasyon değeri)}$$

$$d=2e-6 \text{ m (Eyleyici plakaları arasındaki başlangıç mesafesi)}$$

$$E=170e6 \text{ PA (Eyleyicinin Young's modülü)}$$

$$t=2e-6 \text{ m (Üst plakanın kalınlığı)}$$

3. Aşağıdaki eyleyicinin iki plakası arasındaki başlangıç mesafesine göre, her üç kaynaktan(yeni tasarım formülü, lumped formülü ve ANSYS benzetimi) eyleyicinin kritik deformasyon noktasına gelebilmesi için gereken voltaj miktarları bulunmuş ve bu veriler grafik haline getirilmesi için MATLAB m dosyası oluşturulmuştur(ek 1.f.).

$$v = 0.44 * d \text{ m (Eyleyicinin azami deformasyon miktarı)}$$

$$L = 250e-6 \text{ m (Eyleyici uzunluğu)}$$

$$E = 170e6 \text{ Pa (Eyleyicinin elastikiyet sabiti)}$$

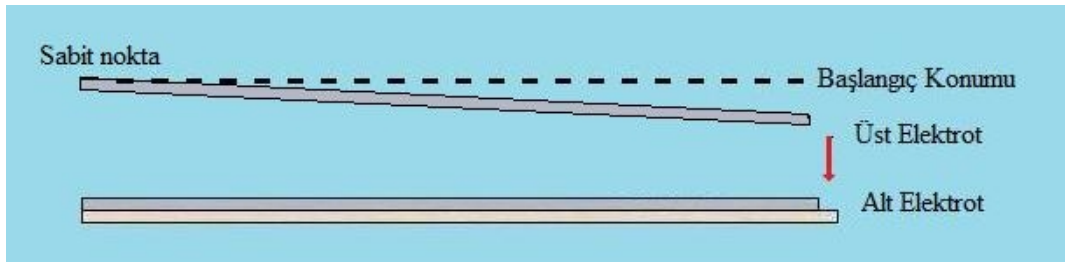
$$t = 2e-6 \text{ m (üst plakanın kalınlığı)}$$

Sonuç olarak yukarıda sırasıyla açıklandığı gibi MATLAB programı, mikro eyleyiciler için yapılan yeni tasarımın her aşamasında yoğun olarak kullanılmıştır.

3.3. YENİ TASARIM VE EYLEYİCİNİN MATEMATİKSEL İFADESİ

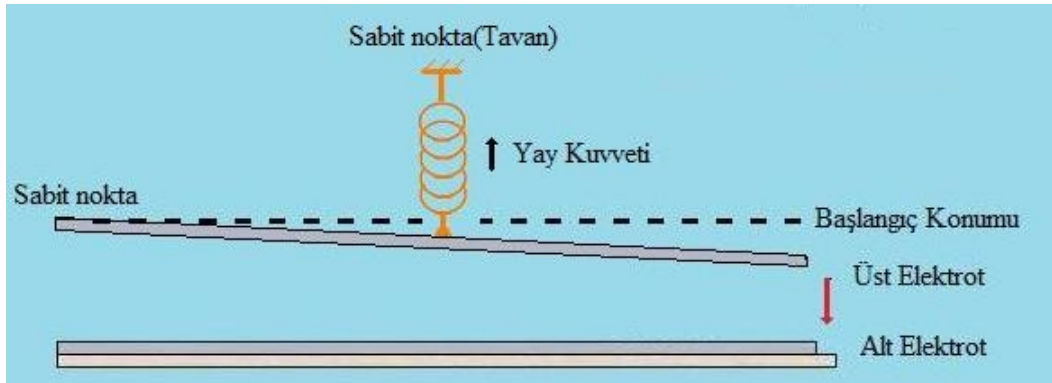
3.3.1. Yeni Tasarımın Mekanik Modeli

Lumped modeli daha önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde verilmişti. Bu modelde sadece bir tane sınır koşulu(sabit noktada açı değişmez) göz önüne alınmış fakat diğer sınır koşulu(sabit noktada konum değişmez) ihmal edilmiştir. Eyleyici için sadece ikinci sınır koşulu göz önüne alındığında ise eyleyici modeli şekil 3.10.'daki gibi olmaktadır.



Şekil 3.10. İkinci sınır koşulunun eyleyiciye uygulanmasının görünümü

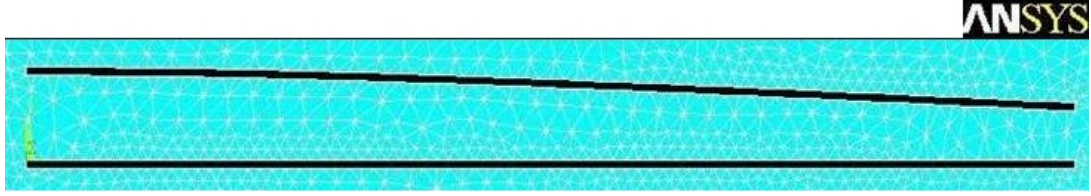
Bu model için lumped modelde olduğu gibi, üst elektrodun geri çekme kuvveti bir yay kuvveti olarak düşünülürse; model şekil 3.11.'deki hale dönüşür.



Şekil 3.11. Eyleyici için ikinci sınır koşulu ve yay modelinin görünümü

Bu modele bakıldığında; bu modelin lumped modele göre daha iyi bir yaklaşım olduğu görülebilir. Fakat bu yaklaşım modelinde de birinci sınır koşulu göz ardı edildiğinden bu yaklaşımında yeteri kadar hassas olduğu düşünülmemektedir. Sonuç olarak, daha hassas bir model ortaya koyma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

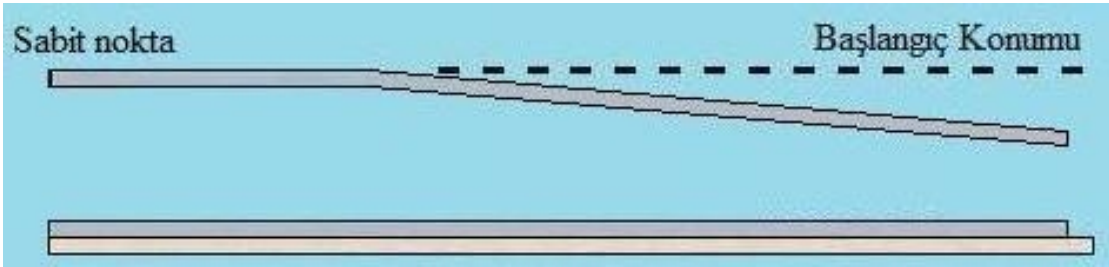
Eyleyici için önceki modellerden daha iyi bir model tasarlayabilmek için, ANSYS programı ile oluşturulmuş benzetime(şekil 3.12.) bakmak faydalı olur.



Şekil 3.12. Eyleyici için ANSYS programında oluşturulmuş benzetim şekli

Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi eyleyiciye uygulanan voltaj arttırıldıkça; üst elektrot bir noktadan sonra çöküp alt elektroda yapışmaktadır. Şekil 3.12.'de eyleyiciye uygulanan voltaj sonucunda üst plakanın çökmeden, gelebileceği en son nokta gösterilmektedir. Benzetimin bu noktada gösterilmesinin sebebi üst plakanın hareketinin tam olarak ne şekilde olduğunun görülmesini sağlamaktır.

Şekil 3.12.'deki benzetim şekline ayrıntılı olarak bakılarak; Yeni tasarlanacak model için iki önemli yaklaşım yapılabilir. İlk yaklaşım, üst plakanın sabit noktaya yakın bir kısmının hareket etmediğidir(şekil 3.13.). İkinci yaklaşım, üst plakanın sabit kabul edilen kısmı dışındaki bölümün doğrusal hareket ettiğidir(şekil 3.13.).



Şekil 3.13. Benzetim sonuçları gözönüne alınarak oluşturulan eyleyici modeli

Şekil 3.13.'teki eyleyici modelde, sabit noktada hem açı hemde konum değişmemektedir. Dolayısıyla her iki sınır koşulu da sağlanır. Üst plakanın hareketsiz kabul edilen kısmının toplam uzunluğuna oranı, ANSYS programında oluşturulan benzetim sonuçlarının, eyleyici için oluşturulan eşitliklerde yazılması ve MATLAB programında çözülmesi ile bulunmuştur.(ek.1.a)

Aynı yol izlenerek, yay kuvveti(F_y) ve elektrostatik kuvvetin(F_e) hangi noktalarda olması gerektiği de bulunmuştur(şekil 3.14.). Buna göre, sabit noktadan başlayarak bulunan ifadeler sırasıyla şöyledir.

Üst elektrodun hareketsiz kısmı;

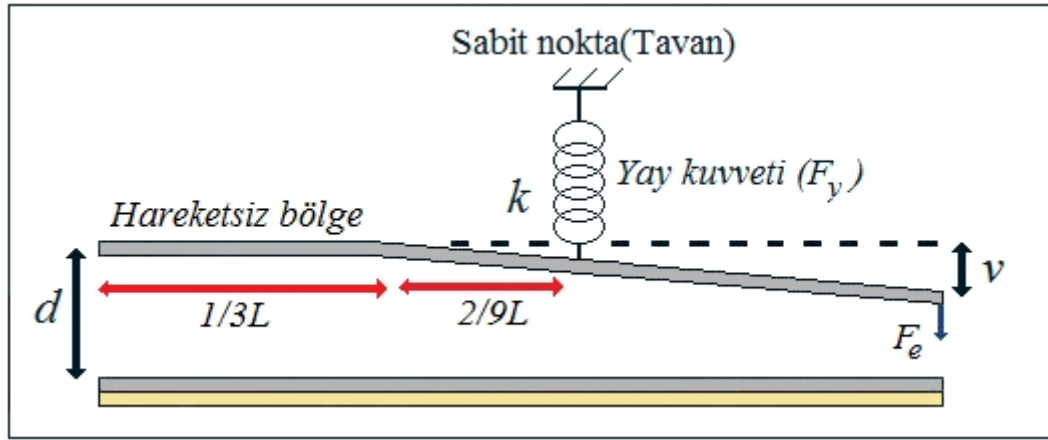
$$A = \frac{1}{3}L$$

Yay kuvvetinin etki ettiği nokta;

$$Y_k = A + \frac{2}{9}L = \frac{1}{3}L + \frac{2}{9}L = \frac{5}{9}L$$

Elektrostatik kuvvetin etki ettiği nokta;

$$E_k = Y_k + \frac{4}{9}L = \frac{5}{9}L + \frac{4}{9}L = L$$



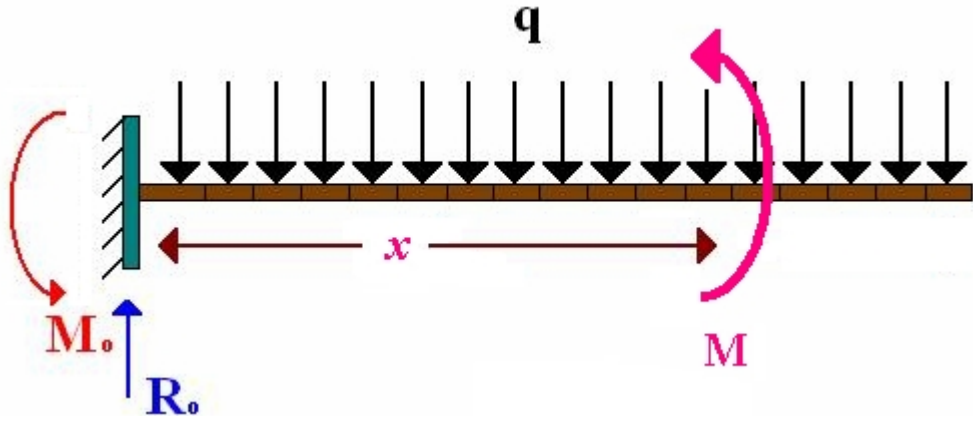
Şekil 3.14. Eyleyici için oluşturulan yeni model

Şekil 3.14.'teki modelden de görüldüğü gibi üst elektrot, alt elektroda serbest uça en fazla yaklaşır. Dolayısıyla elektrostatik kuvvet en yoğun olarak burada beklenir. Üst elektrodun alt elektroda en az yaklaştığı yer de, sabit noktadır. Bu sebeple, yay kuvvetinin de bu noktaya yakın bölgelerde yoğun olması gerekir. Sonuç olarak, kuvvetlerin yoğun oldukları bölgelerde, noktasal olarak seçilmiş olmaları mantıklıdır.

3.3.2. Yeni Tasarımın Matematiksel İfadesi

3.3.2.1. Yay sabitinin(k) bulunması

Eyleyicinin üst plakasının uygulanan voltaja karşı gösterdiği tepki kuvveti, lumped modelde olduğu gibi bir yay kuvveti olarak tasvir edilebilir. Yeni tasarımın matematiksel formülünü bulmak için yay kuvvetinin bulunması, dolayısıyla bu yay kuvvetinin oluşmasında etkili olan yay sabitinin bulunması gereklidir. Yay sabitinin bulunması için öncelikle eyleyicinin üst plakasına birim uzunluk başına fiziksel bir kuvvetin etki ettiği varsayılmıştır(şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Eyleyiciye fiziksel bir kuvvetin uygulanması

Eyleyicinin üst plakasının sabitlendiği noktanın plakaya uyguladığı bükme momenti(M_0) ve kaldırma kuvveti(R_0) yazılırsa[11];

$$M_0 = qL \frac{L}{2}, \quad R_0 = qL$$

Eyleyici için toplam gerilme momenti(M) yazılır ve yukarıdaki ifadeler yerlerine konursa; aşağıdaki ifadeler elde edilir[11].

$$M = -M_0 + R_0x - qx \frac{x}{2}$$

$$M = -q \frac{L^2}{2} + qLx - q \frac{x^2}{2}$$

Gerilme momenti(M) ile deformasyon miktarı(v) arasındaki ilişki şu şekildedir[11].

$$M = EIv'' \quad (3.1)$$

Gerilme momenti ifadesi yerine yazılıp, deformasyon miktarı(v) eşitliğin bir tarafında yazılırsa; aşağıdaki ifade elde edilir.

$$v'' = \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{q}{EI} \left(-\frac{L^2}{2} + Lx - \frac{x^2}{2} \right) \quad (3.2)$$

Deformasyon miktarının bir derece belirsiz integrali alınır; sırasıyla aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\int \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{q}{EI} \int \left(-\frac{L^2}{2} + Lx - \frac{x^2}{2} \right) dx \quad (3.3)$$

$$v' = \frac{dv}{dx} = \frac{q}{EI} \left(-\frac{L^2}{2}x + \frac{1}{2}Lx^2 - \frac{x^3}{6} \right) + C_1 \quad (3.4)$$

Deformasyon miktarının birinci derece türevi(v'); aynı zamanda üst plakanın yatay eksenle, deformasyondan dolayı oluşturduğu açığa eşittir[11]. C_1 integral sabitini bulmak için bu eşitliği kullanmak gerekir. Birinci sınır koşuluna göre sabit noktada açının sıfır olduğu bilindiğine göre, (3.4) nolu ifade $x=0$ için sıfıra eşittir, dolayısıyla C_1 integral sabiti sıfır bulunur.

$$v'(x=0) = 0 \Rightarrow C_1 = 0$$

Deformasyon değerinin(v) bulunması için (3.4) nolu ifadenin birkez daha integralinin alınması gerekir. Bu işlem yapıldıktan sonra (3.4) nolu denklem şu hale dönüşür.

$$v = \int \frac{dv}{dx} = \frac{q}{EI} \left(-\frac{L^2}{4}x^2 + \frac{1}{6}Lx^3 - \frac{x^4}{24} \right) + C_2 \quad (3.5)$$

İkinci sınır koşuluna göre, sabit noktada deformasyon miktarının(v) sıfır olduğu bilindiğine göre, (3.5) nolu ifade $x=0$ için sıfıra eşittir, dolayısıyla C_2 integral sabiti de sıfır bulunur.

$$v(x=0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0$$

Deformasyon değeri(v) son olarak şu şekilde yazılabilir.

$$v = \frac{q}{EI} \left(-\frac{L^2}{4} x^2 + \frac{1}{6} Lx^3 - \frac{x^4}{24} \right) \quad (3.6)$$

Eyleyicinin üst plakasında, maksimum deformasyon serbest uçta oluşmaktadır. Maksimum deformasyon miktarını(v_L) bulabilmek için, (3.6) nolu ifade de $x=L$ yazmak gerekir.

$$v_L = v(x=L) = -\frac{qL^4}{8EI} \quad (3.7)$$

Denklemlerde bulunan “ I ” ifadesi atalet momenti(moment of inertia) olup, üst plakanın genişliği(w) ve kalınlığı(t) ile ilgilidir, ve aşağıdaki şekilde yazılır[17].

$$I = \frac{1}{12} wt^3 \quad (3.8)$$

Bulunan ifade (3.7) nolu denklemde yerine yazılırsa; denklem şu hale gelir.

$$v_L = -\frac{3}{2} \frac{qL^4}{Ewt^3} \quad (3.9)$$

Yay sabiti(k) ve maksimum deformasyon(v_L) arasında şu şekilde bir ilişki vardır[17].

$$k = -\frac{P}{v_L} \quad (3.10)$$

(3.10) nolu denklemdeki “ P ” ifadesi eyleyici üzerine uygulanan toplam kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Eyleyici üzerine uygulanan birim uzunluk başına kuvvet olan ‘ q ’, eyleyicinin uzunluğu ile çarpılırsa; toplam kuvvet elde edilir.

$$P = qL \quad (3.11)$$

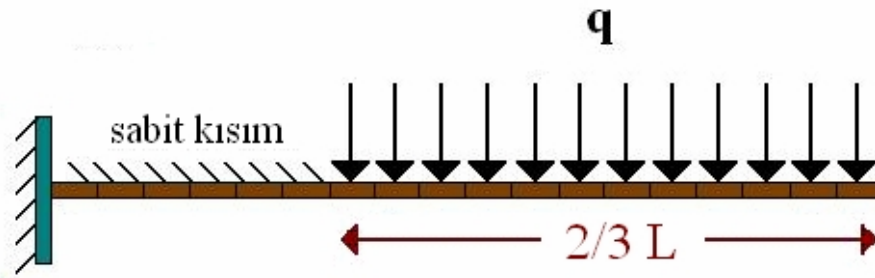
(3.11) nolu eşitlik, (3.10) nolu denklemde yazılırsa; yay sabiti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$k = -\frac{qL}{v_L} \quad (3.12)$$

Son olarak (3.9) nolu denklem, (3.12) nolu denklemde yerine yazılırsa; yay sabiti ifadesi şu hale dönüşür[17].

$$k = \frac{2}{3} Ew \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (3.13)$$

(3.13) nolu ifade üst elektrodun tüm uzunluğu(L) boyunca hareket etmesi sonucu elde edilen bir ifadedir. Fakat yeni tasarım modelinde hareketli kısım $2L/3$ olarak alınmıştır(şekil 3.16.).



Şekil 3.16. Eyleyicinin hareketli kısmı

(3.13) nolu ifade de L yerine $2L/3$ yazılırsa; yay sabiti değeri aşağıdaki gibi olur.

$$L \Rightarrow \frac{2}{3} L \quad \longrightarrow \quad k = \frac{9}{4} Ew \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (3.14)$$

Sonuç olarak yeni tasarım için yay sabiti değeri elde edilmiş olur.

3.3.2.2. Kapasitans değerinin(C) bulunması

Eyleyici için yeni tasarımda yapılan yaklaşımlara göre, eyleyicinin üst elektrodu iki kısma ayrılabilir(şekil 3.17.). Her bir kısımda bir kapasitans değeri oluşturu kabul edilir. Problemin çözümü için bu kapasitans değerlerinin(C_1 , C_2) bulunması gerekir.



Şekil 3.17. Eyleyici için kapasitans ifadesi

Paralel plakalı kapasitanslarda,

A : Plakaların alanı

d : Plakalar arasındaki mesafe

w : plakaların genişliği

L : plakaların uzunluğu

ϵ_0 : Havanın elektiriksel geçirgenliği($8.85e-12$ F/m)

olmak üzere; paralel kapasitanslarda plakaların alanı, plakaların uzunluğu(L) ile plakaların genişliğinin(w) çarpımına eşittir. Buna göre kapasitans değeri aşağıdaki gibi ifade edilir.

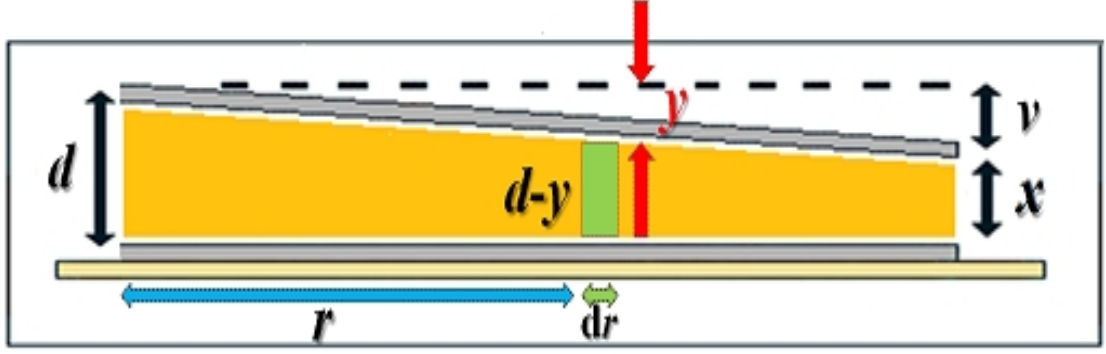
$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3.15)$$

Şekil 3.17.'de eyleyicinin ilk kısmına(birinci kısım) bakılırsa; bu kısmın(sabit kısım) uzunluğunun $L/3$ olduğu görülmektedir. Eyleyicinin bu kısmı için kapasitans ifadesi yazılırsa; aşağıdaki ifade elde edilir.

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon_0 \frac{w \left(\frac{1}{3} L \right)}{d} \quad (3.16)$$

Şekil 3.17.'ye bakıldığında, ikinci kısımda oluşan kapasitans değerinin sabit olmadığı ve deformasyon miktarıyla(v) değiştiiği görülmektedir. Bu sebeple kapasitans değeri, (3.16) nolu eşitlikte olduğu gibi basitçe yazılamamaktadır.

İkinci kısımda oluşan kapasitans değerinin bulunması için, bu kısmın birim kapasitanslardan (*küçük dikdörtgen kısım*) oluştuğu varsayılmaktadır (şekil 3.18.). Bu sebeple toplam kapasitans değerini bulmak için birim kapasitansların toplanması (integral alınması) gerekmektedir.



Şekil 3.18. Eyleyicinin ikinci kısmı için birim kapasitans gösterimi

Birim kapasitans değeri (dC_2), küçük bir paralel kapasitans gibi düşünülebilir. Buna göre birim kapasitans şu şekilde ifade edilebilir,

$$dC_2 = \epsilon_0 \frac{dA}{d-y} \quad (3.17)$$

Birim kapasitansın alındığı noktada (r) oluşmuş olan deformasyon ifadesi (y), üst plakanın en uç noktasında oluşan deformasyon (v) cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$y = v \frac{r}{(2/3)L} \quad (3.18)$$

(3.18) nolu ifade (3.17) nolu ifadede yerine yazılırsa; birim kapasitans aşağıdaki gibi olur.

$$dC_2 = \frac{2}{3} \epsilon_0 \frac{wLdr}{\frac{2}{3}dL - vr} \quad (3.19)$$

İkinci kısmın toplam kapasitans değerini bulmak için, birim kapasitans ifadesinin(dC_2) ikinci kısmın uzunluğu($(2/3)*L$) boyunca integralinin alınması gerekir. Gerekli integral işlemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_2 = \int dC_2 dr = \frac{2}{3} \varepsilon_0 wL \int_{r=0}^{r=\frac{2}{3}L} \frac{dr}{\frac{2}{3}dL - vr} \quad (3.20)$$

İntegral işlemi tamamlandıktan sonra, toplam kapasitans değeri(C_2),

$$C_2 = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 wL}{v} \ln\left(\frac{d}{d-v}\right) \quad (3.21)$$

aşağıdaki gibi yazılabilir.

İkinci kısmın kapasitans değeri(C_2) bulunduğundan sonra, bu ifadenin doğrulanması amacıyla şu durumun düşünülmesi faydalı olur. Eğer eyleyicinin ikinci kısmı deforme olmasaydı($v=0$ olma durumu), yani birinci kısım gibi sabit kabul edilseydi; paralel plakalı kapasitansa dönüştürdü ve kapasitans değeri aşağıdaki gibi kolayca yazılabilirdi.

$$C_2 = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 wL}{d} \quad (3.22)$$

Bu durumda, deformasyon miktarı($v=0$) sıfır alınır ve (3.21) nolu ifadede yerine yazılırsa; elde edilen ifadenin (3.22) nolu ifade ile aynı olması gerekir.

$$v = 0 \Rightarrow C_2 = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 wL}{0} \equiv \ln(1) = \frac{0}{0} \quad (3.23)$$

(3.21) nolu denlemden deformasyon miktarının($v=0$) sıfır alınması matematiksel olarak belirsiz bir ifade ortaya çıkarır. Bu belirsiz ifadeyi çözmek ve gerçek sonucunu ortaya çıkarmak için, Le Hospital[23] yöntemi kullanılmıştır.

Bu matematiksel yöntem, belirsiz ifadenin pay ve paydasının değişkene göre ayrı ayrı türevinin alınması ve elde edilmek istenen noktadaki değere limit ile yaklaşılmasıdır. Bu yöntem (3.21) nolu ifadeye uygulanırsa; aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$C_2 = \frac{2}{3} \varepsilon_0 w L \lim_{v \rightarrow 0} \frac{\frac{\partial}{\partial v} \left(\ln \left(\frac{d}{d-v} \right) \right)}{\frac{\partial}{\partial v} (v)} \quad (3.24)$$

(3.24) nolu ifade de gerekli türev işlemi yapılırsa; ifade aşağıdaki gibi olur.

$$C_2 = \frac{2}{3} \varepsilon_0 w L \lim_{v \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{1}{d-v} \right)}{1} \quad (3.24)$$

Son olarak, (3.24) nolu ifade de limit işlemide yapılırsa; elde edilmek istenen kapasitans ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$C_2 = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 w L}{d} \quad (3.25)$$

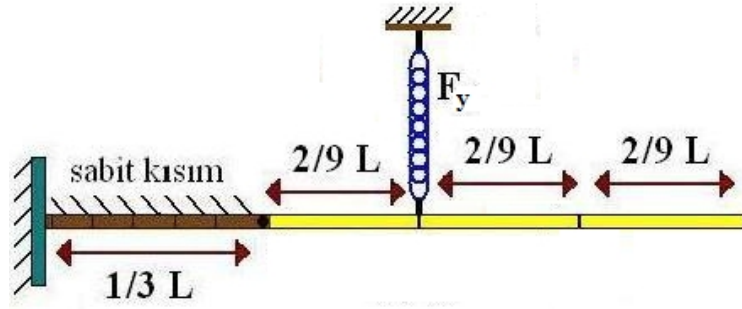
Tüm işlemler sonucu, (3.25) nolu ifade ile (3.22) nolu ifadenin eşit olduğu görülür ve eyleyicinin ikinci kısmı(hareketli kısım) için bulunan (3.21) nolu ifadenin doğruluğu ispatlanmış olur.

Yeni tasarlanan eyleyici modeli için toplam kapasitans değeri aşağıdaki gibi olur.

$$C_T = (C_1 + C_2) \frac{1}{3} \varepsilon_0 w L \left(\frac{1}{d} + \frac{2}{v} \ln \left(\frac{d}{d-v} \right) \right) \quad (3.26)$$

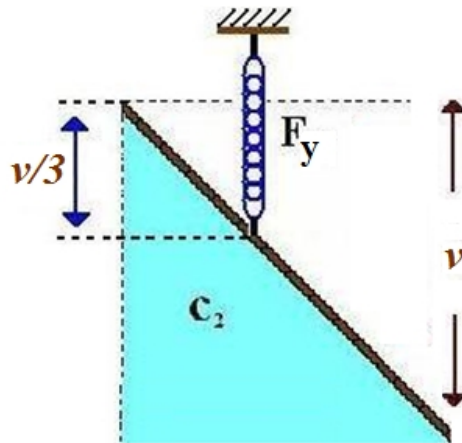
3.3.2.3. Yay kuvveti(F_y) ifadesinin bulunması

Eyleyicinin üst plakasının uygulanan etkiye(voltaj) karşı gösterdiği tepki kuvveti daha önce de belirtildiği gibi bir yay kuvveti olarak varsayılmıştır. Yay kuvvetinin eyleyiciye hangi noktada etki ettiği şekil 3.19.'dan görülebilir. Yay kuvvetinin etki ettiği noktanın nasıl bulunduğu daha önceki bölümde (Bölüm 3.3.1.) anlatılmıştı.



Şekil 3.19. Eyleyici için yay kuvveti gösterimi

Yay kuvveti(F_y) ifadesi genel olarak, yayın gerilme(veya sıkışma) miktarı ile yay sabitinin çarpımına eşittir. Eyleyicinin üst elektrotunun serbest ucunda oluşan deformasyon v ise, yayın gerilme miktarı $v/3$ olur. Bu eşitliği daha iyi anlamak için şekil 3.20'e bakmak faydalı olur.



Şekil 3.20. Yayın gerilme miktarı ile deformasyon miktarı arasındaki ilişki

Eyleyici için yay kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_y = \frac{v}{3}k \quad (3.27)$$

Yay kuvveti eşitliğinde, (3.14) nolu ifadedeki yay değeri(k) yazılırsa; yay kuvveti ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$F_y = \frac{v}{3} \left(\frac{9}{4} Ew \left(\frac{t}{L} \right)^3 \right) \quad (3.28)$$

Son olarak, elde edilen (3.28) nolu ifade düzenlenirse; yay kuvveti aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_y = \frac{3}{4} v Ew \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (3.29)$$

3.3.2.4. Elektrostatik kuvvet(F_e) ifadesinin bulunması

Önceki bölümlerde(bölüm 2.5.) lumped modelinin matematiksel ifadesi bulunurken, eyleyicinin paralel plakalı bir kapasitör olarak düşünülebileceği söylenmişti. Paralel plakalı kapasitörde depolanan enerji aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U_e = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.30)$$

Yeni tasarlanan eyleyici modelinde, eyleyicinin kapasitans değeri(C_1+C_2), (3.26) nolu ifade olarak bulunmuştu. Eyleyici içinde depolanan enerji, toplam kapasitans değerine bağlı olduğu için, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U_e = \frac{1}{2} (C_1 + C_2) V^2 \quad (3.31)$$

Eyleyici içinde depolanan enerji bulunduktan sonra, elektrostatik kuvvet(F_e) ile depolanan enerji(U_e) arasında, aşağıdaki eşitlik vardır.

$$F_e = -\frac{\partial U_e}{\partial (d-v)} \quad (3.32)$$

Elde edilen (3.32) nolu ifadede, eyleyicide depolanan enerji(U_e) ifadesi yerine yazılırsa; aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$F_e = -\frac{1}{2} \frac{\partial (C_1 + C_2) V^2}{\partial (d-v)} \quad (3.33)$$

(3.26) nolu ifadedeki toplam kapasitans değerinin(C_1+C_2) türevi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial (C_1 + C_2)}{\partial (d-v)} = \frac{\partial (C_1)}{\partial (d-v)} + \frac{\partial (C_2)}{\partial (d-v)}$$

Daha önce de belirtildiği gibi eyleyicinin birinci kısmında(sabit kısım) oluşan kapasitans değeri(C_1) sabit olduğundan, bu kapasitans değerinin türevi sıfır olur. Geriye sadece ikinci bölümdeki kapasitans(C_2) değeri kalır, bu kapasitans değerinin türevi aşağıdaki gibidir.

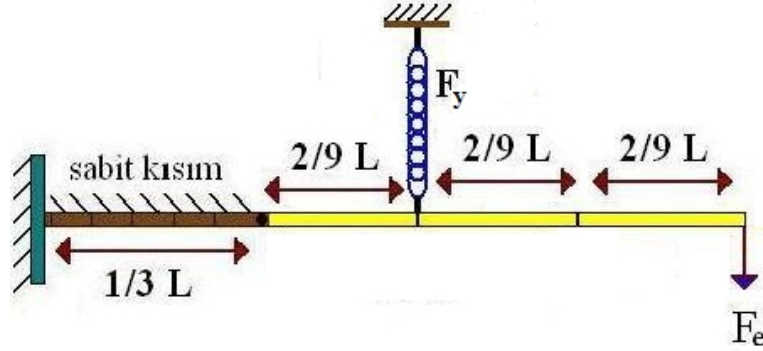
$$\frac{\partial(C_2)}{\partial(d-v)} = \frac{2}{3} \frac{\epsilon_0 w L}{v} \left(\frac{-\ln\left(\frac{d}{d-v}\right)}{v} + \frac{1}{v(d-v)} \right) \quad (3.34)$$

Eyleyiciye uygulanan voltaj(V), deformasyon değerinden bağımsız olup, sabit olduğu için türevi sıfır olur. (3.33) nolu ifadede sadece kapasitans değerinin türevi yazılırsa; elektrostatik kuvvet ifadesi aşağıdaki gibi bulunur.

$$F_e = \frac{1}{3} \epsilon_0 w L \left(\frac{v - (d-v) \ln\left(\frac{d}{d-v}\right)}{v^2 (d-v)} \right) V^2 \quad (3.35)$$

3.3.2.5. Kuvvet eşitliğinden voltaj(V) ifadesinin bulunması

Tasarım kısmında(bölüm 3.3.1.) bahsedildiği gibi, yay ve elektrostatik kuvvetleri üst elektrodun farklı noktalarına etki etmektedir(şekil 3.21.).



Şekil 3.21. Eyleyiciye etki eden kuvvetlerin gösterimi

Kuvvetler karşılıklı olarak, aynı noktaya etki etmediklerinden denge durumu için, kuvvetlerin sabit noktaya göre momentlerinin alınması gerekir. Denge de olan bir cisme etki eden toplam kuvvet sıfır olduğundan, kuvvet eşitliği aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\left(\frac{6}{9}L\right)F_e - \left(\frac{2}{9}L\right)F_y = 0 \quad (3.36)$$

(3.29) ve (3.35) nolu denklemlerde elde edilen ifadeler, (3.36) nolu denklemde yerlerine yazılırsa; eşitlik aşağıdaki gibi olur.

$$\left(\frac{2}{9}\varepsilon_o wL \left(\frac{v - (d-v)\ln\left(\frac{d}{d-v}\right)}{v^2(d-v)}\right) V^2\right) - \left(\frac{1}{6}vEw\left(\frac{t}{L}\right)^3\right) = 0 \quad (3.37)$$

Bu eşitlik(3.37) sadeleştirilip, voltaj ifadesi(V) eşitliğin bir tarafına alınır; eşitlik aşağıdaki gibi olur.

$$V = \left(\frac{3}{4} \frac{Et^3 v^3 (d-v)}{\varepsilon_o L^4 \left(v - (d-v)\ln\left(\frac{d}{d-v}\right)\right)}\right)^{(1/2)} \quad (3.38)$$

3.3.2.5. Kritik deformasyon(v_{kritik}) ve kritik voltaj(V_{kritik}) ifadesinin bulunması

Kritik deformasyon değeri, voltaj ifadesinin maksimum değer aldığı noktadır. Bu noktayı bulmak için, voltaj ifadesinin((3.38) nolu ifade) deformasyon miktarına(v) göre türevinin alınıp sifıra eşitlenmesi gerekir. Türevi alınmış denklem nümerik olarak çözümlerse, kritik deformasyon değeri(v_{kritik}) bulunmuş olur.

$$\frac{d}{dv}V = \left(\frac{-\frac{\sqrt{3}}{4} \left(4v^2 - 3dv + (3v^2 - 6dv + 3d^2) \ln\left(\frac{d}{d-v}\right) \right) v^2 Et^3}{\left(v^3 Et^3 (d-v) L^4 \varepsilon_o ((-d+v) \ln\left(\frac{d}{d-v}\right) + v) \right)^{3/2}} \right) = 0 \quad (3.39)$$

Türevi alınmış voltaj ifadesi nümerik olarak çözüldüğünde; kritik deformasyon değeri, iki elektrot arasındaki başlangıç mesafesi(d) cinsinden şu şekilde bulunur.

$$v_{Kritik} \cong 0.44d \quad (3.40)$$

Dikkat edilirse; bulunan kritik deformasyon değeri(v_{kritik}), eyleyicinin benzetim modelinde de (3.40) nolu denklemdeki ile aynı bulunmuştu($v_{kritik}=0.44d$). Bu bulgu matematiksel formül ile benzetim sonucunun uyduğunu göstermektedir.

Kritik deformasyon değeri voltaj denkleminde yazıldığında; voltaj ifadesi maksimum değer alır, bu değer kritik voltaj değeridir. (3.38) nolu voltaj ifadesine, kritik deformasyon değeri($v_{kritik}=0.44d$) yazılırsa; kritik voltaj değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_{kritik} = 0.5572 \sqrt{\frac{Ed^3 t^3}{\varepsilon_o L^4}} \quad (3.41)$$

Yapılan bu işlemlerden sonra şu çıkarım yapılabilir, eyleyiciye kritik voltaj değeri kadar voltaj uygulandığında; eyleyici kritik deformasyon değerine gelmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. BULGULAR

ANSYS programında hazırlanan benzetim modeli ve MATLAB programında yapılan hesaplamalar sonucu, mikro eyleyiciler için yeni bir tasarım hazırlandı(şekil 3.14.). Tasarlanan modelin, limit dahilinde($0 < v < v_{kritik}$) hareketi formülize edildi(denklem (3.18)). Elde edilen matematiksel formül için, kritik deformasyon miktarı(denklem (3.40.)) ve kritik voltaj değeri(denklem (3.41.)) bulundu. Elde edilen tüm bulgu ve denklemler aşağıda verilmiştir.

- ❖ Yeni tasarım için genel voltaj ifadesi;

$$V = \left(\frac{3}{4} \frac{Et^3 v^3 (d-v)}{\varepsilon_o L^4 \left(v - (d-v) \ln \left(\frac{d}{d-v} \right) \right)} \right)^{(1/2)} \quad (0 < v < 0.44d)$$

- ❖ Yeni tasarım için kritik deformasyon ifadesi;

$$v_{kritik} \cong 0.44d$$

- ❖ Yeni tasarım için kritik voltaj ifadesi;

$$V_{kritik} = 0.5572 \sqrt{\frac{Ed^3 t^3}{\varepsilon_o L^4}}$$

Yeni tasarım için yukarıdaki bulgular elde edildikten sonra, yeni model ve lumped model arasında karşılaştırma yapmak amacıyla, her iki modelin bulguları aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

4.1.1. Yeni Tasarımın Benzetim ve Lumped Model ile Karşılaştırılması

❖ Yeni tasarım modelinin genel voltaj ifadesi;

$$V = \left(\frac{3}{4} \frac{Et^3 v^3 (d-v)}{\varepsilon_0 L^4 \left(v - (d-v) \ln \left(\frac{d}{d-v} \right) \right)} \right)^{(1/2)} \xrightarrow{v_{kritik} \cong 0.44d} V_{kritik} = 0.5572 \sqrt{\frac{Ed^3 t^3}{\varepsilon_0 L^4}}$$

❖ Lumped modelinin genel voltaj ifadesi;

$$V = \left(\frac{4}{3} \frac{Et^3}{\varepsilon_0 L^4} \left(v(d-v)^2 \right) \right)^{(1/2)} \xrightarrow{v_{kritik} \cong 0.33d} V_{kritik} = 0.4444 \sqrt{\frac{Ed^3 t^3}{\varepsilon_0 L^4}}$$

Yukarıda elde edilen ifadelerin, ANSYS programında hazırlanan benzetim ile ne oranda örtüştüğünü anlamak amacıyla, çeşitli örnek eyleyici boyutları için yeni tasarım formülünden, lumped model formülünden ve ANSYS benzetim modelinden veriler alınmıştır. Bu veriler tablo haline getirilmiş, ve daha iyi karşılaştırma yapabilmek için de veriler grafik haline getirilmiştir. Aşağıda çeşitli örnek eyleyici boyutları için elde edilen veriler ve grafikleri verilmiştir.

1) Aşağıdaki özelliklere sahip bir mikro-eyleyicinin hareket limiti içerisinde, istenen deformasyon miktarlarının elde edilebilmesi amacıyla uygulanması gereken voltaj değerleri, *Benzetim verilerinden*, *Yeni tasarımın formülünden*(3.38) ve *Lumped modelinin formülünden*(2.25), örnek veriler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

❖ Eyleyici Boyutları:

$L=250e-6$ m (Üst plakanın uzunluğu)

$t=2e-6$ m (Üst plakanın kalınlığı)

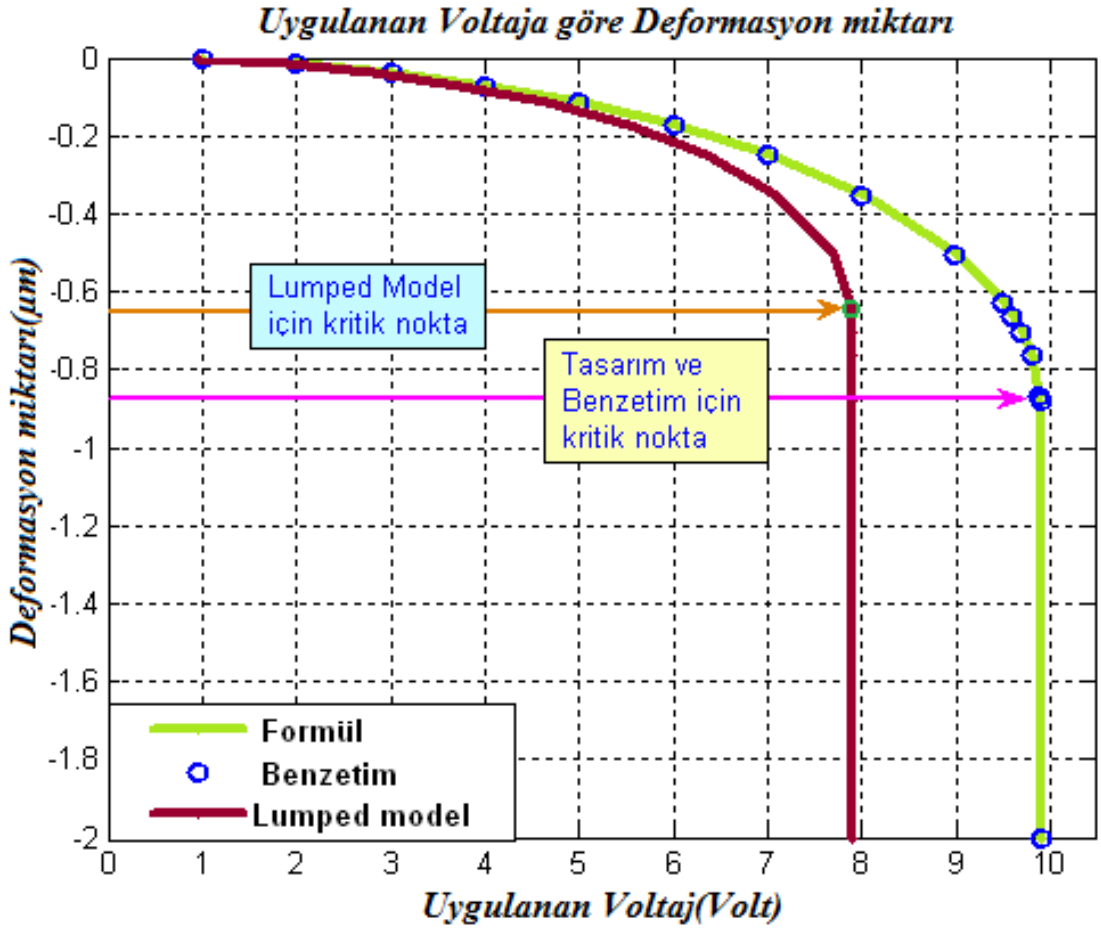
$d=2e-6$ m (İki plaka arasındaki başlangıç mesafesi)

$E=170e6$ PA (Young's modülü)

Veriler aşağıda tablo halinde sunulup, grafik haline getirilmiştir(şekil 4.1.). Ayrıca grafiğin oluşturulması için hazırlanan MATLAB m dosyası ek 1.d.'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deformasyon miktarlarına göre gerekli voltaj miktarları

DEFORMASYON MİKTARI(v) (Metre)	YENİ TASARIM (Volt)	ANSYS BENZETİM (Volt)	LUMPED MODEL (Volt)	LUMPED MODEL VE ANSYS BENZETİM HATA(%)	YENİ TASARIM VE ANSYS BENZETİM HATA(%)
0.0043e-6 m	1.007 V	1.000 V	0.948 V	5.130	0.690
0.0173e-6 m	2.013 V	2.000 V	1.893 V	5.335	0.685
0.0396e-6 m	3.020 V	3.000 V	2.828 V	5.710	0.680
0.0720e-6 m	4.026 V	4.000 V	3.750 V	6.250	0.663
0.1161e-6 m	5.033 V	5.000 V	4.651 V	6.978	0.662
0.1741e-6 m	6.037 V	6.000 V	5.520 V	7.995	0.616
0.2503e-6 m	7.037 V	7.000 V	6.342 V	9.388	0.537
0.3537e-6 m	8.037 V	8.000 V	7.094 V	11.32	0.467
0.5084e-6 m	9.032 V	9.000 V	7.705 V	14.38	0.362
0.6302e-6 m	9.518 V	9.500 V	7.879 V	17.06	0.192
0.6651e-6 m	9.616 V	9.600 V	7.888 V	17.83	0.175
0.7063e-6 m	9.712 V	9.700 V	7.895 V	Limit aşıldı	0.125
0.7615e-6 m	9.806 V	9.800 V	7.895 V	Limit aşıldı	0.109
0.8656e-6 m	9.885 V	9.895 V	7.895 V	Limit aşıldı	0.098
0.8805e-6 m	9.886 V	9.895 V	7.895 V	Limit aşıldı	0.091
2.0000e-6 m	9.886 V	9.895 V	7.895 V	Limit aşıldı	Limit aşıldı



Şekil 4.1. Çizelge 4.1.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi

- 2) Aşağıdaki boyutlara sahip eyleyicinin kritik deformasyon noktasına gelmesi için, eyleyici uzunluğuna (L) göre gereken voltaj değerleri (V), *Benzetim verilerinden*, *Yeni tasarımın formülünden*(3.38) ve *Lumped modelinin formülünden*(2.25), elde edilerek aşağıda tablo halinde verilmiştir.

❖ Eyleyici Boyutları:

$v=0.44*d$ (Kritik deformasyon değeri)

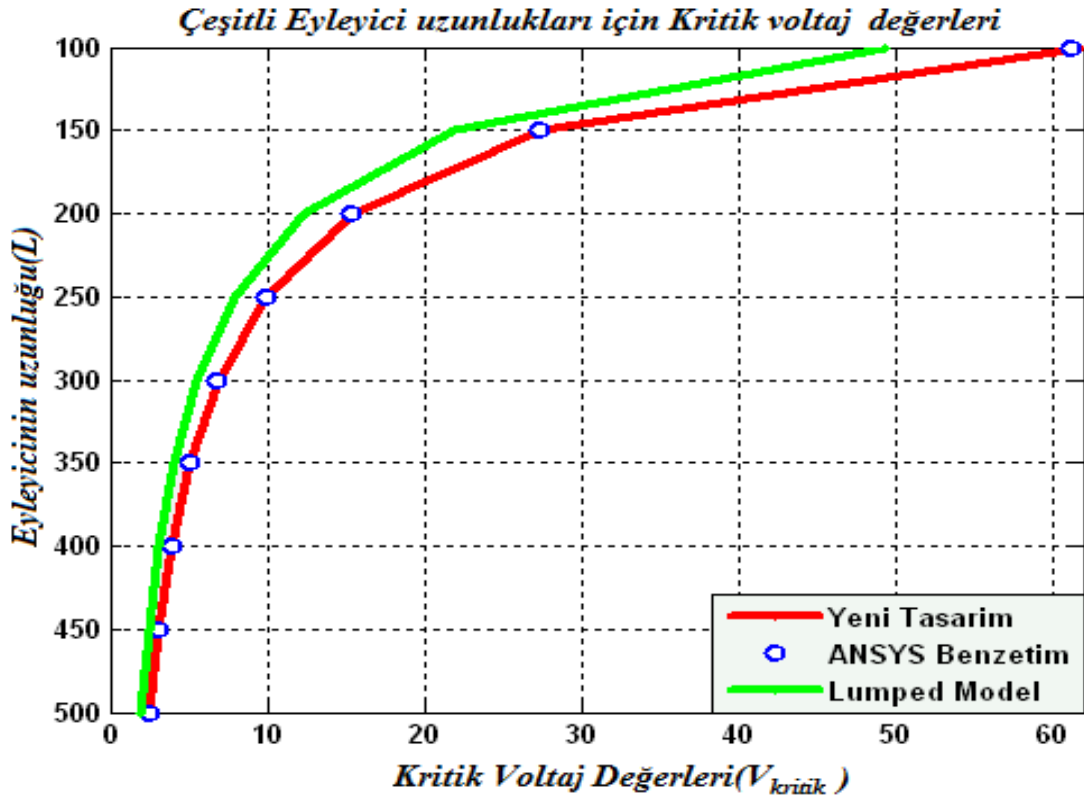
$t=2e-6$ m (Üst plakanın kalınlığı)

$d=2e-6$ m (İki plaka arasındaki başlangıç mesafesi)

$E=170e6$ PA (Young's modülü)

Çizelge 4.2. Eyleyici uzunluklarına göre gerekli voltaj değerleri

	YENİ TASARIM VERİLERİ	BENZETİM VERİLERİ	LUMPED MODEL VERİLERİ
EYLEYİCİNİN UZUNLUĞU(L)	AZAMI VOLTAJ MİKTARI(V)	AZAMI VOLTAJ MİKTARI(V)	AZAMI VOLTAJ MİKTARI(V)
100e-6 m	61.809 V	61.150 V	49.301 V
150e-6 m	27.470 V	27.340 V	21.911 V
200e-6 m	15.452 V	15.418 V	12.325 V
250e-6 m	9.889 V	9.898 V	7.888 V
300e-6 m	6.867 V	6.828 V	5.478 V
350e-6 m	5.045 V	5.043 V	4.024 V
400e-6 m	3.863 V	3.860 V	3.081 V
450e-6 m	3.052 V	3.053 V	2.434 V
500e-6 m	2.472 V	2.471 V	1.972 V



Şekil 4.2. Çizelge 4.2.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi

3) Aşağıdaki boyutlara sahip bir mikro eyleyicinin, kritik deformasyon noktasına gelmesi için, eyleyicinin plakaları arasındaki açıklık miktarına(d) göre uygulanması gereken voltaj değerleri, *Benzetim verilerinden*, *Yeni tasarımın formülünden*(3.38) *ve Lumped modelinin formülünden*(2.25), elde edilerek tablo halinde verilmiştir.

❖ Eyleyici boyutları:

$$v=0.44*d \quad (\text{Kritik deformasyon değeri})$$

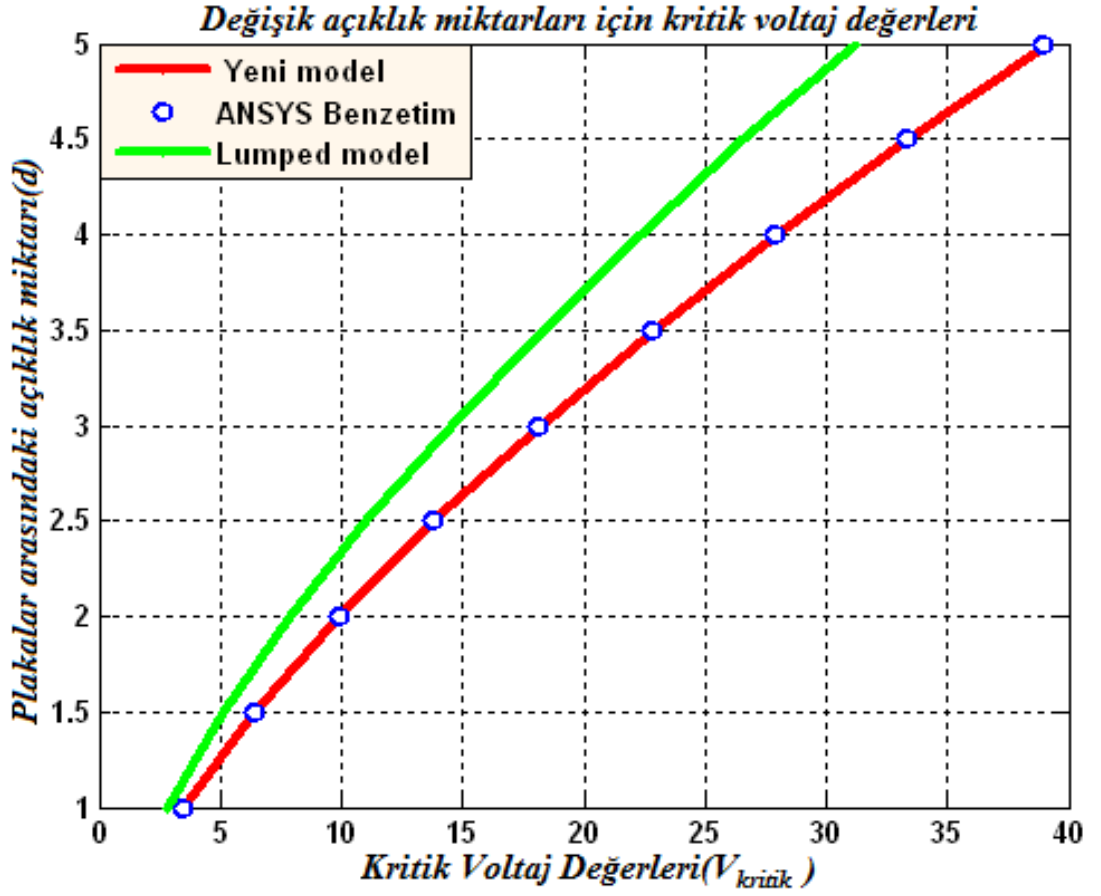
$$t=2e-6 \text{ m} \quad (\text{Üst plakanın kalınlığı})$$

$$L=250e-6 \text{ m} \quad (\text{Üst plakanın uzunluğu})$$

$$E=170e6 \text{ PA} \quad (\text{Elastik modülü})$$

Çizelge 4.3. Plakalar arasındaki açıklık miktarına göre gereken voltaj miktarı

PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(d)	YENİ TASARIM VERİLERİ	BENZETİM VERİLERİ	LUMPED MODEL VERİLERİ
	AZAMİ VOLTAJ MİKTARI(V)	AZAMİ VOLTAJ MİKTARI(V)	AZAMİ VOLTAJ MİKTARI(V)
1.0e-6 m	3.4964 V	3.4993 V	2.7889 V
1.5 e-6 m	6.4234 V	6.4237 V	5.1235 V
2.0e-6 m	9.8894 V	9.8985 V	7.8882 V
2.5e-6 m	13.8209 V	13.8020 V	11.0241 V
3.0e-6 m	18.1681 V	18.1351 V	14.4916 V
3.5e-6 m	22.8944 V	22.8064 V	18.2614 V
4.0e-6 m	27.9716 V	27.8906 V	22.3112 V
4.5e-6 m	33.3769 V	33.2906 V	26.6227 V
5.0e-6 m	39.0914 V	38.9645 V	31.1809 V



Şekil 4.3. Çizelge 4.3.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi

4.1.2. Yeni Tasarımın Daha Önceki Çalışmalarda elde edilmiş Deneysel ve Analitik sonuçlarla Karşılaştırılması

Aşağıdaki boyutlara sahip eyleyici için yapılmış analitik ve deneysel çalışmalardan, bazı sonuçlar elde edilmiştir[10]. Bu eyleyici boyutları kullanılarak yeni tasarımdan da gerekli sonuçlar elde edildi. Tüm sonuçlar tablo halinde aşağıda sunuldu.

❖ Eyleyici Boyutları:

$L=20e-3 \text{ m}$	(Üst plakanın uzunluğu)
$t=57e-6 \text{ m}$	(Üst plakanın kalınlığı)
$d=92e-6 \text{ m}$	(İki plaka arasındaki başlangıç mesafesi)
$E=155.8e6 \text{ PA}$	(Young's modülü)

Çizelge 4.4. Eyleyiciye uygulanan voltaja göre plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için, daha önce yapılmış olan deneysel ve analitik çalışmalardan[10] alınan veriler ve hata değerleri

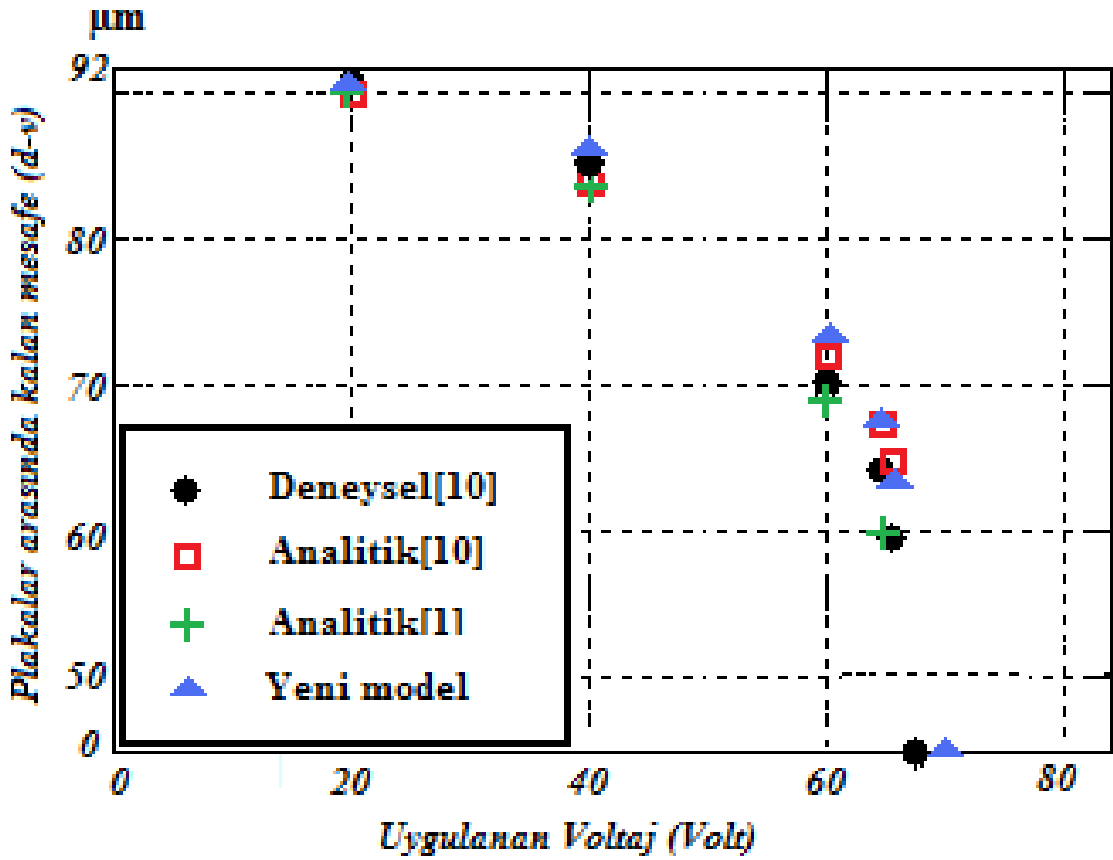
UYGULANAN VOLTAJ(V)	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(μm) DENEYSEL [10]	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(μm) ANALİTİK [10]	DENEYSEL[10] ve ANALİTİK[10] SONUÇLARI ARASINDAKİ HATA(%)
20	90.5	90.2	0.3
40	84.6	84.3	0.4
60	70.0	71.5	2.1
65	64.0	67.2	5.0
67	59.0	65.0	10.0
68.5	Limit Aşıldı	-	-

Çizelge 4.5. Eyleyiciye uygulanan voltaja göre plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için, yeni tasarım ve daha önce yapılmış olan deneysel sonuçlardan[10] alınan veriler ve hata değerleri

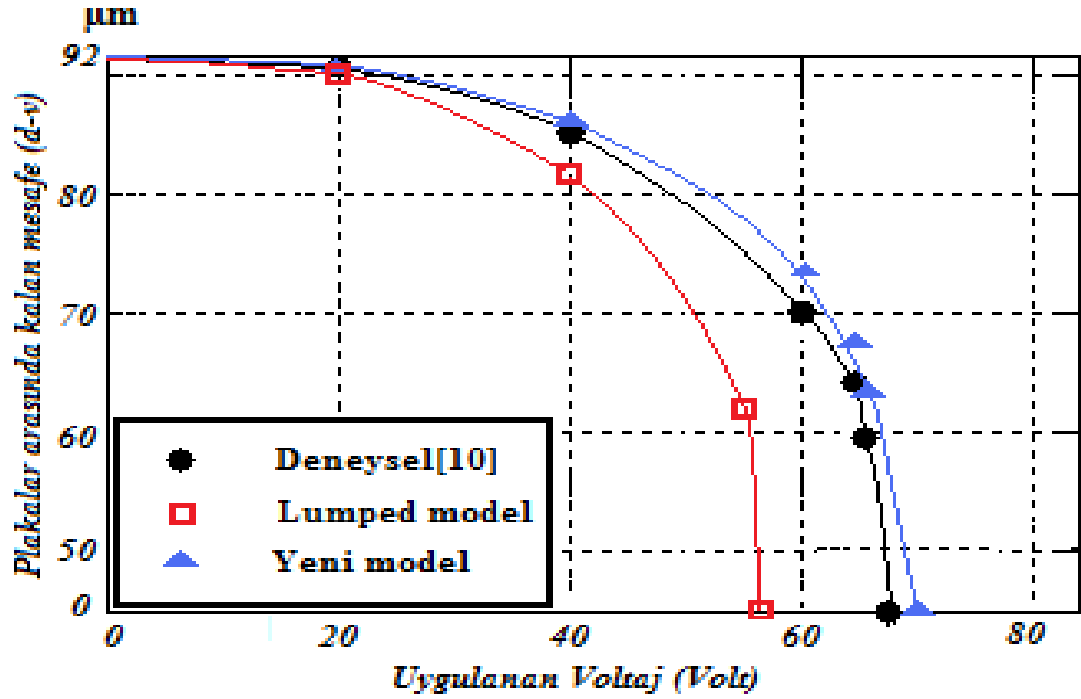
UYGULANAN VOLTAJ(V)	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(μm) DENEYSEL [10]	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(μm) YENİ TASARIM	DENEYSEL [10] ve YENİ TASARIM SONUÇLARI ARASINDAKİ HATA(%)
20	90.5	90.4	0.1
40	84.6	85.1	0.6
60	70.0	73.2	4.5
65	64.0	67.4	5.3
67	59.0	64.1	8.7
68.5	Limit Aşıldı	62.3	-
70	Limit Aşıldı	Limit Aşıldı	-

Çizelge 4.6. Eyleyiciye uygulanan voltaja göre plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için, daha önce yapılmış olan deneysel[10] ve analitik çalışmalardan[1] alınan veriler ve hata değerleri

UYGULANAN VOLTAJ(V)	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(μm) DENEYSEL [10]	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(μm) ANALİTİK [1]	DENEYSEL[10] ve ANALİTİK[1] SONUÇLAR ARASINDAKİ HATA(%)
20	90.5	90.2	0.3
40	84.6	84.1	0.6
60	70.0	69.1	1.2
65	64.0	59.6	6.8
67	59.0	-	-



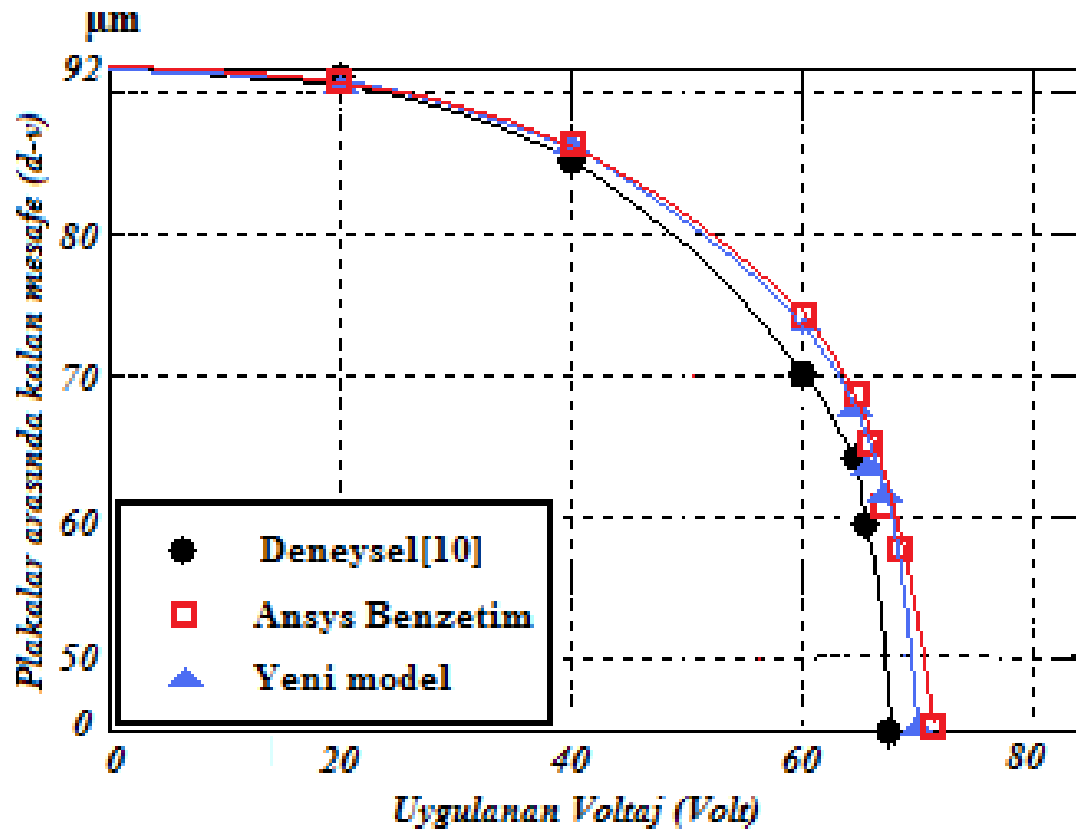
Şekil 4.4. Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.4.'de gösterilen verilerin grafik haline getirilmesi



Şekil 4.5. Deneysel çalışma ve lumped model sonuçlarının yeni model sonuçları ile karşılaştırılması

Çizelge 4.7. Plakalar arasında oluşan açıklık miktarı için deneysel[10], Yeni tasarım ve Ansys benzetim modelinden alınan veriler

UYGULANAN VOLTAJ(V)	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(µm) DENEYSEL [10]	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(µm) YENİ TASARIM	PLAKALAR ARASINDAKİ AÇIKLIK MİKTARI(µm) ANSYS BENZETİM
20	90.5	90.4	90.4
40	84.6	85.1	85.1
60	70.0	73.2	73.2
65	64.0	67.4	67.6
67	59.0	64.1	64.5
68.5	Limit Aşıldı	62.3	61.6
70	Limit Aşıldı	Limit Aşıldı	57.29
72	Limit Aşıldı	Limit Aşıldı	Limit Aşıldı



Şekil 4.6. Çizelge 4.7.'de gösterilen verilerin grafik halinde gösterimi

4.2. TARTIŞMA

- I. Şekil 4.1.'e bakıldığında; deformasyon miktarlarının küçük olduğu yerlerde, ANSYS benzetim, lumped model ve yeni tasarım sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fakat deformasyon miktarı arttıkça; lumped model sonuçlarında hata miktarı artmaktadır. Yeni modelin, hem kritik deformasyon değeri, hem de limit içerisindeki hareketi lumped modelden farklı bulunmuştur. Yeni tasarım modeli, bir önceki bölümde elde edilen sonuçlar dikkate alındığında; lumped modele göre, gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir.
- II. Şekil 4.2.'e bakılırsa; yeni tasarımın, boyu daha uzun eyleyici kullanıldığında; ANSYS benzetim, lumped model ve yeni tasarım sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir, fakat eyleyicinin boyu kısaldıkça; lumped model sonuçlarında hata miktarı artmaktadır.
- III. Şekil 4.3.'e bakılırsa; yeni tasarımın, eyleyicinin başlangıçta plakalar arasındaki açıklık miktarının küçük olduğu bölgelerde, ANSYS benzetim, lumped model ve yeni tasarım sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fakat plakalar arasındaki başlangıç mesafesi arttıkça; lumped model sonuçlarında hata miktarı artmaktadır.
- IV. Şekil 4.4.'e bakıldığında; yeni tasarım formülünün, yapılmış olan deneysel çalışmaya göre iyi bir yaklaşım olduğu, hatta analitik sonuçlardan[10] bazı noktalarda(yüksek deformasyon bölgesinde) daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.
- V. Şekil 4.5.'e bakıldığında; yeni tasarım modelinin, deneysel sonuçlara göre, lumped modelden daha iyi bir model olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, MEMS eyleyiciler için yeni bir yaklaşım yapılarak yeni bir model ve bu model için matematiksel formül elde edildi. Bu modelin, eyleyicinin gerçek hareketiyle ne ölçüde örtüştüğünü ortaya çıkarmak amacıyla, çeşitli örnek eyleyici boyutları kullanılarak, ANSYS programında hazırlanmış olan benzetim modeli, daha önce bulunmuş olan lumped modeli ve deneysel çalışmalarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucu yeni model için çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla bu sonuçlar yeni tasarımın gerçeğe yakın değerler verdiğini, ve eski modele göre daha iyi bir yaklaşım olduğunu göstermiştir. Yeni modelin eski çalışmalara göre ne avantajlar getirdiği aşağıda verilmiştir.

5.1. SONUÇLAR

- ❖ Yeni formül, giriş bölümünde belirtilen tüm kullanım alanlarında, yapılacak hesaplamalar için yeni avantajlar sağlar. Hangi uygulamada hangi avantajlar elde edildiği aşağıda verilmiştir.

- **Anahtar(switch) olarak kullanım:**

Eyleyicinin anahtar olarak kullanıldığı uygulamalarda, anahtarın mantıksal olarak 1(açık) veya 0(kapalı) olma durumlarından oluşabilmesi için kritik voltaj değerinin doğru hesaplanması gerekir. Kritik deformasyon değeri(v_{kritik}) eski modelde olduğu gibi $v=0.33*d$ alınırsa, gerçekte kritik deformasyon değeri $v=0.44*d$ bulunduğu için, uygulanan kritik voltaj değeri(V_{kritik}) üst elektrodu kritik deformasyon durumuna getiremeyecek, ve 0(kapalı) olarak görülmesi gereken durum yanlış olarak 1(açık) görünecektir. Buda eyleyicinin kullanıldığı alanlarda yanlış sonuçlar üretmesine neden olacaktır. Dolayısıyla yeni formül ile eyleyiciye uygulanması gereken voltaj değeri daha kesin bir şekilde hesaplanabilecek ve daha doğru sonuçların elde edilmesi sağlanacaktır.

- **Algılayıcı(sensör) olarak kullanım:**

Yeni modelde kritik deformasyon değerinin daha büyük bulunmuş olması, eyleyicinin elektronik devrelerde algılayıcı olarak kullanıldığı uygulamalarda, daha fazla bir alanı tarayabilmesini sağlar. Dolayısıyla daha büyük bir ölçekte kapasitans değeri oluşturmasını sağlar. Bu durumda algılayıcı için, daha geniş bir aralıkta algılama ve daha geniş aralıklarda veri ölçme imkanı sağlanır.

- **Ayna(mirror) olarak kullanım:**

Kritik deformasyon değerinin yeni modelde, eski modele göre daha büyük bulunmuş olması, daha fazla bir alanı tarayabilmesini sağlar. Bu durumda ayna için, daha geniş bir aralıkta hareket ve daha geniş aralıklarda kontrol imkanı sağlanır. Dolayısıyla ışık verisi geri yansıtılırken, ışığın daha fazla noktaya yansıtılması olanağı elde edilmiş olur.

- **Hafıza elemanı olarak kullanım:**

Eyleyicinin anahtar olarak kullanılmasında elde edilen tüm avantajlar, bu uygulama alanı için de geçerlidir.

- ❖ Yeni tasarım, gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği için, tüm uygulamalarda daha hassas kontrol imkanı sağlanacaktır. Bunu nasıl sağlayacağı aşağıda kısaca verilmiştir.

- **Anahtar(switch) olarak kullanım:**

Bu kullanım alanında, eyleyiciye uygulanan voltaj neticesinde, oluşacak deformasyon miktarı gerçeğe daha yakın olduğundan, anahtarın daha hassas kontrolü de sağlanmış olacaktır.

- **Algılayıcı(sensör) olarak kullanım:**

Bu kullanım alanında da, eyleyiciye dışarıdan uygulanan basınç miktarı neticesinde, eyleyicinin oluşturacağı kapasitans değeri, daha kesin ve gerçeğe daha yakın sonuçlar olacaktır.

- **Ayna(mirror) olarak kullanım:**

Eyleyicinin daha hassas kontrolü, bu uygulamada daha büyük öneme sahiptir. Çünkü eyleyicinin uygulanan voltaj neticesinde istediğimiz noktada olmaması, gelen ışık verisinin istenen noktadan farklı bir noktaya yansımaları demektir. Işığın istenen noktadan farklı bir noktaya yansımaları da, istenmeyen bir durumun ve veri hatalarının oluşması demektir. Bu sebeple özellikle bu uygulama alanında, eyleyicinin daha hassas kontrol edilmesi çok önem kazanmaktadır.

- **Hafıza elemanı olarak kullanım:**

Bu kullanım alanında, anahtar olarak kullanılmasına benzerdir. Eyleyiciye uygulanan voltaj neticesinde, oluşacak deformasyon miktarı gerçeğe daha yakın olacağından, eyleyicinin sayısal verileri saklayabilmek için, gereken 1(açık) veya 0(kapalı) durumu daha kesin bir şekilde oluşacak. Dolayısıyla veri saklama işlemi için veri kayıplarının önüne geçilmiş olacaktır.

5.2. ÖNERİLER

Mikro-eyleyiciler için yapılacak hesaplamalarda kullanılmak üzere geliştirilen formül ve model, %1'in altında bir hata payı ile ANSYS benzetim sonuçları ile örtüşmektedir. Bunun yanında, daha önce bilim insanları tarafından yapılmış olan deneysel ve analitik çalışmalarla[1,10] da iyi bir uyum gözlemlenmiştir.

MEMS alanında yapılan çalışmalar gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Bu sebeple, ülkemizin MEMS alanında çalışan bilim insanlarına daha fazla destek vermesi, tüm ülkemiz için faydalı olacaktır. İleride laboratuvar imkanlarının artması ve üretim imkanının elde edilmesi ile MEMS alanındaki çalışmalar daha da ilerleyecek ve yapılan teorik çalışmalar uygulamaya dönüşecektir. Dolayısıyla, bu çalışma, ileride üretim imkan elde edilmesi ve gerçeğe dönüşmesi ile daha fazla anlam ve değer kazanacaktır.

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] 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).
- [5] 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”, *Mikroelektronik Eng.*, **85**: 587-598, (2008).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).

- [10] 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).
- [11] Gere, J.M. "Mechanics of Materials", Boston, 6. baskı, 940 s., (2004).
- [12] Rochus, V., Rixen, D.J. ve Golinval, J.-C. "Electrostatic coupling of MEMS structures: transient simulations and dynamic pull-in", Nonlinear Analysis, **63**: 1619-1633, (2005).
- [13] 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).
- [14] Sonlu Elemanlar Analizleri ve ANSYS,
Erişim: <http://www.figes.com.tr/urunler/ansys/ansys.php>, (15.05.2008).
- [15] Sonlu Elemanlar Analizleri ve ANSYS
Erişim: <http://www.figes.com.tr/urunler/ansys/ansys.uygulamalar.php>,
(15.05.2008).
- [16] Moaveni, S. "Finite element analysis : theory and application with Ansys", Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2. baskı, 822 s., (2003).
- [17] 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).
- [18] Rhoads, J. F., Shaw, S. W. ve Turner, K. L. "The nonlinear response of resonant microbeams systems with purely-parametric electrostatic actuation", J. Micromech. Microeng., **(16)**:890-899, (2006).
- [19] Owusu, K. O. ve Fellow, F. L. "Solving the "pull-in" Instability Problem of Electrostatic Microactuators using Nonlinear Control Techniques", Proc. Of the 2nd IEEE international Conf. On Nano/Micro Engineered and Molecular Syst., Bangkok, Thailand, 16-19 Ocak, (2007).
- [20] 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).

- [21] Wang, Y. H., Lee, C. Y. ve Chiang, C. M. "A MEMS-based Air Flow Sensor with a Free-standing Micro-cantilever structure", *Sensors*, **7**:2389-2401, (2007).
- [22] 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).
- [23] Barcellos, A. (çeviri: Kuryel, B. Ve Balkan, F.) "Calculus ve analitik geometri", İstanbul, (1996).

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında ŞanlıUrfa'nın Suruç ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini burada tamamlayarak 2001 yılında Suruç Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Mersin Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bir yılı hazırlık olmak üzere, Mersin Üniversitesinde toplam 5 yıl lisans eğitimi aldı. 2006 yılında buradan mezun oldu ve aynı yıl Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Bu bölümde açılan araştırma görevliliği sınavını kazandı ve halen Mersin Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevliliğine devam etmektedir.

Adres:

Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü D-blok kat:3
Çiftlikköy kampüsü, 33342, Çiftlikköy/ MERSİN

EKLER

- 1.a.** Eyleyicinin üst elektrodunda sabit varsayılan kısmın bulunması için oluşturulmuş MATLAB m dosyası
- 1.b.** Eyleyici azami deformasyon değerini bulan MATLAB m dosyası
- 1.c.** Lumped modeli ve Yeni model için limit dahilinde istenen deformasyon miktarı için voltaj değerini bulan MATLAB m dosyası
- 1.d.** Lumped modeli, Yeni model ve ANSYS benzetim sonuçları için limit dahilinde deformasyon miktarına ile voltaj değerine göre grafik oluşturan MATLAB m dosyası
- 1.e.** Lumped modeli, Yeni model ve ANSYS benzetim sonuçları için Eyleyici uzunluğu ile azami voltaj değerine göre grafik oluşturan MATLAB m dosyası
- 1.f.** Lumped modeli, Yeni model ve ANSYS benzetim sonuçları için Eyleyicinin plakaları arasındaki açıklık miktarı ile azami voltaj değerine göre grafik oluşturan MATLAB m dosyası

EK 1.a. Eyleyicinin üst elektrodunda sabit varsayılan kısmın bulunması için oluşturulmuş MATLAB m dosyası

% Bu M file, Eyleyici için sabit kısmın tüm uzunluğuna oranını (2/3) bulur.

clear

clc

% A= Üst elektrodun sabit kısmı

syms x E0 w L d V t E A **% sembolik ifadeler**

C=((E0*w*A*L)/x). *log(d*A*L/(d*A*L-A*L*x)) **%kapasitans ifadesi**

pretty(C) **%kapasitans ifadesini formül halinde ekrana yazar.**

dC=diff(C,x) **%Kapasitansifadesinin "x"e göre türevini alır.**

pretty(dC) **%türevi alınmış kapasitans ifadesini formül halinde ekrana yazar.**

F1=(1/2)*dC **%elektrostatik kuvvet ifadesi**

pretty(F1) **%elektrostatik kuvvet ifadesini formül olarak ekrana yazdırır.**

k=(2/3)*E*w*(t/(A*L))^3 **%yay sabiti; çubuğun "A=L_nin oranı" kadar kısmı için**

pretty(k) **%yay sabiti ifadesini formül olarak ekrana yazdırır.**

Fk=(1/3)*x*k **%yay kuvveti ifadesi**

pretty(Fk)

V=(((1/3)*Fk)/(F1)).^(1/2) **%voltaj ifadesi**

pretty(V);

V=simplify(V);

pretty(V)

S1=subs(V,x,0.44e-6) **%A'yı bulmak için max 'v' değeri yerine konuldu**

S1=simplify(S1);

pretty(S1)

S2=subs(S1,d,2e-6) **%A'yı bulmak için 'd' değeri yerine konuldu**

S2=simplify(S2);

pretty(S2)

S3=subs(S2,t,2e-6) **%A'yı bulmak için 't' değeri yerine konuldu**

S3=simplify(S3);

pretty(S3)

S4=subs(S3,L,200e-6) **%A'yı bulmak için 'L' değeri yerine konuldu**

S4=simplify(S4);

pretty(S4)

S5=subs(S4,E,170e3)

%A'yı bulmak için 'E' değeri yerine konuldu

S5=simplify(S5);

pretty(S5)

S6=subs(S5,E0,8.842e-12)

%A'yı bulmak için 'd' değeri yerine konuldu

S7=simplify(S6);

pretty(S7)

z=774056185954304/213786441940651015625*11^(1/2)*13^(1/2)...

/(-78*log(5)-39*log(2)+39*log(3)+39*log(13)+11)^...

(1/2)*17^(1/2)*2736466456840333^(1/2); *%A'yı bulmak için denklemin diğer*

tarafi bulundu

V=9.8989; *%A'yı bulmak için 'Ansys'ten alınan voltaj değeri' yerine konuldu*

Ratio_L=(1/(v/z)^2)*1e-6 *% Ratio_L değeri A'ya eşittir.*

Ek 1.b. Eyleyici azami deformasyon değerini bulan MATLAB m dosyası

% Bu dosya max deformasyon miktarını bulmak içindir

clear

clc

syms x

A=2/3;

*C=((A)/x.*log(A/(A-A*x)))*

pretty(C)

dC=diff(C,x)

dC=simplify(dC)

pretty(dC)

*F1=(1/2)*dC*

pretty(F1)

Fk=(x/3)

pretty(Fk)

*V=(((1/3)*Fk./(F1))).^(1/2)*

pretty(V)

V=expand(V)

pretty(V)

dV=diff(V,x) %max deflection bulmak için voltaj denkleminin türevi sıfıra eşitleniyor

pretty(dV)

S=expand(dV)

S=simplify(S)

pretty(S)

*A=((4+3.*log(1/(1-x))).*(x^2)-(3+6.*log(1/(1-x))).*(x))+3.*log(1/(1-x))* %kök denklemi

pretty(A)

%X=0.4404235 ICIN COZUM'

F=subs(A,x,0.4404235) %denklem bu değer için sıfıra eşit bu sebeple Max deflection bu değerdir.

Ek 1.c. Lumped modeli ve Yeni model için limit dahilinde istenen deformasyon miktarı için voltaj değerini bulan MATLAB m dosyası

clear

clc

w=10e-6;

*E0=(1/(36*pi))*1e-9;*

E=170e9;

t=2e-6;

d=2e-6;

L=250e-6;

*v=(istenen deger)*1e-6;*

k=(9/4)(E*w*(t/L)^3);*

V=((3/4)(E*(t^3)*(v^3)*(d-v))/(E0*(L^4)*(-log(d/(d-v))*d+log(d/(d-v))*v+v)))^(1/2)*

Vmax=(0.3103(d^3*E*t^3)/(L^4*E0))^(1/2);* *%Maximum deflection için*
*bulunan Voltaj ifadesi "v=0.4404235*d" için çözüm*

Vlamp=((4/3)((E*t^3)*((d-v)^2)*d-(d-v)^3)/(L^4*E0))^(1/2)*

Ek 1.d. Lumped modeli, Yeni model ve ANSYS benzetim sonuçları için limit dahilinde deformasyon miktarına ile voltaj değerine göre grafik oluşturan MATLAB m dosyası

%(L=250, d=2, E=170 GPA)

%değişik eyleyici açıklık miktarları için(y1), uygulanabilecek voltaj değerleri

```
x1=[1.0069 2.0137 3.0205 4.0265 5.0331 6.0370 7.0376 8.0374 9.0326 9.5183  
9.6168 9.7122 9.8063 9.8853 9.8866 9.91];
```

%from formula

```
y1=[-0.004304 -0.01737 -0.03966 -0.07206 -0.1161 -0.1741 -0.2503 -0.3537 -0.508 -  
0.6302 -0.6651 -0.7063 -0.7615 -0.8656 -0.8805 -2 ];
```

%value

```
x2=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 9.5 9.6 9.7 9.8 9.895 9.8956 9.9];
```

%from simulation

```
x3=[0.9487 1.8933 2.8287 3.7500 4.6511 5.5203 6.3428 7.0943 7.7052 7.8792  
7.8882];
```

```
figure1 = figure('PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],'PaperSize',[20.98  
29.68]);
```

%% Create figure

```
figure1 = figure(...  
'Color',[1 1 1],...  
'PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...  
'PaperSize',[20.98 29.68],...  
'PaperType','a4letter');
```

%% Create axes

```
axes1 = axes('Parent',figure1);  
title(axes1,'Several voltage levels for several gap of actuator');  
xlabel(axes1,'Voltage levels(V));
```

```

ylabel(axes1,'Deflection');
box(axes1,'on');
grid(axes1,'on');
hold(axes1,'all');

%% Create plot
plot1 = plot(...
x1,y1,...
'LineStyle','- ',...
'LineWidth',1.5,...
'Marker','.',...
'Parent',axes1);

%% Create plot
plot2 = plot(...
x2,y1,...
'Color',[1 0 0],...
'LineStyle','-',...
'LineWidth',1.5,...
'Marker','.',...
'Parent',axes1);

%% Create legend
legend1 = legend(axes1,{' Form formula','From simulation'},'Position',[0.131
0.1087 0.2911 0.1444]);

```

Ek 1.e. Lumped modeli, Yeni model ve ANSYS benzetim sonuçları için Eyleyici uzunluğu ile azami voltaj değerine göre grafik oluşturan MATLAB m dosyası

```
%(d=2e-6 m, vmax=0.44*d, E=170 GP t=2e-6 m)  
%değişik eyleyici boyları için(y1), max deflection için uygulanabilecek max voltaj  
değerleri  
x1=[2.4724 3.0523 3.8631 5.0456 6.8677 9.8894 15.4523 27.4707 61.8090];  
%from formula  
y1=[500 450 400 350 300 250 200 150 100]; %value  
x2=[2.4715 3.0530 3.8604 5.0433 6.8284 9.8985 15.4179 27.3408 61.1502 ];  
%from simulation  
x3=[1.9721 2.4346 3.0813 4.0246 5.4779 7.8882 12.3253 21.9117 49.3013 ];  
%from lump model  
  
figure1 = figure('PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],'PaperSize',[20.98  
29.68]);  
  
%% Create figure  
figure1 = figure(...  
'Color',[1 1 1],...  
'PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...  
'PaperSize',[20.98 29.68],...  
'PaperType','a4letter');  
  
%% Create axes  
axes1 = axes('Parent',figure1);  
title(axes1,'max voltage levels for several lenght of actuator');  
xlabel(axes1,'Max Voltage (Vmax)');  
ylabel(axes1,'Lenght of actuator');  
box(axes1,'on');  
grid(axes1,'on');  
hold(axes1,'all');
```

```
%% Create plot  
plot1 = plot(...  
    x1,y1,...  
    'LineStyle', '-.', ...  
    'LineWidth', 1.5, ...  
    'Marker', '!', ...  
    'Parent', axes1);
```

```
%% Create plot  
plot2 = plot(...  
    x2,y1,...  
    'LineStyle', ':', ...  
    'LineWidth', 1.5, ...  
    'Marker', '!', ...  
    'Parent', axes1);
```

```
%% Create plot  
plot3 = plot(...  
    x3,y1,...  
    'LineStyle', '-', ...  
    'LineWidth', 1.5, ...  
    'Marker', '!', ...  
    'Parent', axes1);
```

```
%% Create legend  
legend1 = legend(axes1,{' Form formula','From simulation','From Lump  
    model},'Position',[0.6149 0.7802 0.2911 0.1444]);
```

Ek 1.f. Lumped modeli, Yeni model ve ANSYS benzetim sonuçları için Eyleyicinin plakaları arasındaki açıklık miktarı ile azami voltaj değerine göre grafik oluşturan MATLAB m dosyası

*%(L=250, v_{max}=0.44*d, E=170 GPA t=2e-6 m) % değişik açıklık miktarları için(y1), max deflection için uygulanabilecek max voltaj değerleri*

x1=[3.4964 6.4234 9.8894 13.8209 18.1681 22.8944 27.9716 33.3769 39.0914];

%from formula

y1=[1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5]; *%value*

x2=[3.4993 6.4237 9.8985 13.8020 18.1351 22.8064 27.8906 33.2906 38.9645];

%from simulation

x3=[2.7889 5.1235 7.8882 11.0241 14.4916 18.2614 22.3112 26.6227 31.1809];

%from lump model

figure1 = figure('PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],'PaperSize',[20.98 29.68]);

%% Create figure

figure1 = figure(...

'Color',[1 1 1],...

'PaperPosition',[0.6345 6.345 20.3 15.23],...

'PaperSize',[20.98 29.68],...

'PaperType','a4letter');

%% Create axes

axes1 = axes('Parent',figure1);

title(axes1,'max voltage levels for several gap of actuator');

xlabel(axes1,'Max Voltage (V_{max})');

ylabel(axes1,'Gap of actuator');

box(axes1,'on');

grid(axes1,'on');


```
hold(axes1,'all');
```

```
%% Create plot
```

```
plot1 = plot(...  
    x1,y1,...  
    'LineStyle','-',...'  
    'LineWidth',1.5,...'  
    'Marker','.',...'  
    'Parent',axes1);
```

```
%% Create plot
```

```
plot2 = plot(...  
    x2,y1,...  
    'LineStyle',':',...'  
    'LineWidth',1.5,...'  
    'Marker','.',...'  
    'Parent',axes1);
```

```
%% Create plot
```

```
plot3 = plot(...  
    x3,y1,...  
    'LineStyle','-',...'  
    'LineWidth',1.5,...'  
    'Marker','.',...'  
    'Parent',axes1);
```

```
%% Create legend
```

```
legend1 = legend(axes1,' Form formula','From simulation','From Lump  
model'),'Position',[0.131 0.7801 0.2911 0.1444]);
```