

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RF MEMS ANAHTARININ
TASARIM VE YORULMA ANALİZİ

RIZA MELİH KÖKSALLI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2020

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RF MEMS ANAHTARININ
TASARIM VE YORULMA ANALİZİ

RIZA MELİH KÖKSALLI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM

GEBZE
2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DESIGN AND FATIGUE ANALYSIS OF
RF MEMS SWITCH**

R.MELİH KÖKSALLI
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM

GEBZE
2020

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05/02/2020 tarih ve 2020.08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 12/02/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Liza Melih Kayaalli'nin tez çalışması Melih Melih Kayaalli Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Ahmet Sınar Ekten

ÜYE

: Prof. Dr. Ali Tangel

ÜYE

: Prof. Dr. Mehmet Ali Arslan

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Teknolojinin hızla ilerlemesi mikro-nanoteknoloji uygulamalarını popüler hale getirmiştir ve bu alanda önemli bir yere sahip olan mikro-elektromekanik sistemlerin (MEMS) uygulamaları da doğru orantılı olarak artmıştır. MEMS grubuna ait Radyo Frekansı (RF) uygulamaları özellikle haberleşme alanında çok önem kazanmıştır. Bunun en önemli sebeplerinden birkaçı, çok düşük ekleme kaybı, çok düşük güç gereksinimi ve yarı iletken anahtarlar kullanılarak daha yüksek izolasyon elde etme gibi özellikleridir. Bu avantajları sayesinde oldukça popüler hale gelmişlerdir. RF MEMS cihazların tasarımı için yapılan çalışmaların çoğunda ya statik ve yorulma hesabı yapılmakta, ya çekme gerilme voltajı hesaplanmakta ya da üretim süreçleri anlatılmaktadır. Bu 3 kriter birleştirilerek en verimli anahtar tasarımı ve üretimi için yapılan çalışma sayısı literatürde yok denecek kadar azdır. Bu tezde eksik olan bu 3 kriterin de olduğu bir çalışma yaparak (statik, yorulma analizi, çekme voltaj hesabı, üretim prosesi) daha etkili bir RF giriş anahtar ortaya koymak hedeflenmiştir. Bu tasarım da konsol tipi RF anahtar yapısının paralel plâka kapasitörleri göz önüne alınarak tasarımı gerçekleştirilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile statik analizi, yorulma analizi ve analitik olarak da çekme voltajı sonuçları hesaplanmıştır. Bu analizler devamlı yüke maruz kalan giriş tipi anahtarın güvenli bir şekilde ve daha uzun döngüde çalışması için oldukça önemlidir. Ayrıca incelenen yapıların daha verimli hale gelmesi için geometri üzerinde iyileştirmeler yapılarak yorulma ömründe, çekme gerilmesinde azalma sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konsol tipi Giriş, Mekanik Analiz, Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS), Polisilisyum, Radyo Frekansı (RF), Statik Analiz, Yorulma Analizi.

SUMMARY

The rapid advance of technology has made micro-nanotechnology applications popular and the applications of micro-electromechanical systems (MEMS), which have an important place in this field, have increased in proportion. Radio Frequency (RF) applications belonging to MEMS group have gained importance especially in the field of communication. Some of the most important reasons for this are features such as very low insertion loss, very low power requirement and higher isolation using semiconductor switches. Thanks to these advantages they have become quite popular. In most of the work done for the design of RF MEMS devices, either static and fatigue calculations are made, tensile stress voltage is calculated or production processes are explained. By combining these 3 criteria, the number of studies for the most efficient switch design and production is almost nonexistent in the literature. In this thesis, it is aimed to reveal a more effective RF beam switch by conducting a study with these 3 criteria (static, fatigue analysis, tensile voltage calculation, production process) which are missing in this thesis. In this design, the console type RF switch structure was designed by taking parallel plate capacitors into consideration and the static voltage, fatigue analysis and analytically pull in voltage results were calculated with the finite element method. These analyzes are essential for the safe and long cycle operation of the beam type switch, which is constantly exposed to the cycle load. In addition, improvements have been made on geometry to make the structures examined more efficient, thereby reducing fatigue life and pull in stress.

Key Words: Cantilever Beam, Mechanical Analysis, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Polysilicon, Radio Frequency (RF), Static Analysis, Fatigue Analysis.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın yolunu açan danışmanım Doç. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM'e,

Konsol giriş proses sürecini oluştururken yardımlarını esirgemeyen ve önümü açan Aziz Ulvi ÇALIŞKAN ve tüm çalışma arkadaşlarıma,

Göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili eşim Dilek Çelik KÖKSALLI'ya, hayatımda çok önemli bir yere sahip olan Hasan Uğur BERKTÜRK'e ve Ailem'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. RF ANAHTARLAR	3
2.1. RF MEMS Seri Anahtar Yapısı	3
2.2. RF MEMS Paralel Anahtar Yapısı	4
2.3. RF MEMS Seri Anahtarının Detaylı Yapısı	6
3. MEKANİK ANALİZLER	11
3.1. Seçilen Malzemenin Özellikleri	11
3.2. Malzeme Özellikleri	13
3.3. S-N (Gerilim –Çevrim Sayısı) Tablosu	13
3.4. Mems Kiriş Tipleri ve Malzeme Özellikleri	16
3.5. Sonlu Elemanlar Metodu	17
3.5.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Kısa Tarihi	17
3.5.2. Uygulama Alanları	18
3.5.3. Problemlerde Uygulanması	18
3.5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri	18
3.5.5. ANSYS Sonlu Elemanlar Programı	19
3.5.6. Hesaplama Adımları :	20
3.5.6.1. Program açılması	20
3.5.6.2. Malzeme Bilgisi	21
3.5.6.3. Geometri oluşturulması ya da dışarıdan getirilmesi	22
3.5.6.4. Ağ oluşturma (Elemanlara bölme)	23

3.5.6.5. Sınır koşullarının belirlenmesi;	24
3.6. Statik Analiz	25
3.7. Yorulma Analizi	29
3.7.1 Yorulma Değişkenleri	30
3.7.2 Yorulma Analizi Modelleri	31
3.7.3 Yükleme Durumu Seçimi	31
3.7.3.1. Sabit Genlikte Yükleme (Constant Amplitude Loading)	31
3.7.3.2. Değişken Genlikte Yükleme (Non-Constant Amplitude Loading)	32
3.7.3.3. Orantılı veya Orantısız Yükleme (Proportional, Non-Proportional Loading)	32
3.7.4 Emniyet katsayısı kavramı	33
3.8. Çekme voltajı (Pull in Voltage) hesapları	34
3.9. Kriterin karşılaştırılması	36
3.9.1 Klasik geometri için yapılan çalışmalar	37
3.9.2 Değişik geometri için yapılan çalışmalar	42
4. KONSOL KİRİŞİN ÜRETİM SÜRECİ	45
5. SONUÇLAR VE YORUMLAR	52
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	57
EKLER	58

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
V	: Çekme voltajı
I	: Atalet momenti
k	: Yay sabiti
w	: Kiriş Genişliği
L	: Kiriş Uzunluğu
h	: Kiriş Kalınlığı
d	: Plâka arası boşluk
ϵ	: Dielektrik katsayısı
E	: Youngs modülü
A	: Etki eden Elektrot alanı
μm	: Mikrometre
Hz	: Hertz
dB	: Desibel
F	: Kuvvet
x	: Mesafe
C	: Kapasitans
m	: Kütle
b	: Sönümleme Katsayısı
eV	: Elektron Volt
Ω	: Ohm
Å	: Angstrom
σ	: Gerilim
MEMS	: Mikro Elektro Mekanik Sistemler
RF	: Radyo Frekansı
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
NMOS	: N-tipi metal oksit yarıiletken
PMOS	: P tipi Transistör
DC	: Doğru Akım
IC	: Bütünleşmiş devre

Si	: Silisyum
Pa	: Paskal
MPa	: Mega Paskal
GPa	: Giga Paskal
SEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
RCA	: Standart pul temizleme adımları kümesi
Al	: Aluminyum
ANSYS	: Sonlu Elemanlar Programı
PIN	: Diyot
FET	: Alan Etkili Transistör
LPCVD	: Düşük Basınçta Kimyasal Buhar Biriktirme
POUT	: Çıkan Güç
IL	: Araya Girme Kaybı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Seri Anahtar Yapısı.	3
2.2: Seri Anahtar Yapısının Basit Modeli.	3
2.3: Seri Anahtar Yapısının Açık (aşağı) ve Kapalı (yukarı) Pozisyonu.	4
2.4: Paralel Anahtar Yapısı.	4
2.5: Paralel Anahtar Yapısının Basit Modeli.	4
2.6: Paralel Anahtar Yapısının Açık (aşağı) ve Kapalı (yukarı) Pozisyonu.	5
2.7: RF MEMS Anahtar Yapısı.	6
2.8: RF MEMS Anahtar Yapısı.	6
2.9: Kapasitans Yapısı.	7
2.10: Elektrostatik Aktüatör Şeması.	7
2.11: Maksimum Çekme Gerilimi Grafiği ($x=d/3$ için).	9
2.12: Ölçülerin Detaylı Gösterimi.	9
3.1: Paralel Plâka Gösterimi.	12
3.2: Polisilisyumun S-N Eğrisi.	13
3.3: Polisilisyumun S-N Grafiği.	15
3.4: A Tipi Kiriş.	16
3.5: B Tipi Kiriş.	16
3.6: C Tipi Kiriş.	16
3.7: D Tipi Kiriş.	17
3.8: Mesh Eleman Tipi-1.	18
3.9: Mesh Eleman Tipi-2.	19
3.10: Mesh Eleman Tipi-3.	19
3.11: Ansys Analiz Adımları.	20
3.12: Ansys Modül Seçilmesi.	20
3.13: Ansys'e Geometri Yükleme.	22
3.14: Ansys'te Mesh Belirleme.	22
3.15: Mesh Yakınsama.	24
3.16: Sınır Koşullarının Belirlenmesi.	25
3.17: Analiz edilen geometri (200 x 200 x 2 μ m).	27
3.18: Analiz edilen geometri (160 x 24 x 1 μ m).	27

3.19:	Analiz edilen geometri (100 x 6 x1 μm).	28
3.20:	Değişik Ölçülerde Konsol Kiriş Üst Görünümleri.	29
3.21:	Gerilmenin Zamana Bağlı Grafiği.	30
3.22:	Tam Tekrarlı Sabit Genlikte Yükleme.	32
3.23:	Değişken Genlikte Yükleme.	32
3.24:	Orantılı veya Orantısız Yükleme.	33
3.25:	Ön Gerilim Uygulama.	34
3.26:	Etkin Elektrod alan Görüntüsü-1.	35
3.27:	Etkin Elektrod alan Görüntüsü-2.	35
3.28:	Etkin Elektrod alan Görüntüsü-3.	36
3.29:	Etkin Elektrod alan Görüntüsü-4.	36
3.30:	L/w Oranı Gerilim Grafiği.	37
3.31:	L/w Oranı Ömür Grafiği.	38
3.32:	L/w Oranı Çekme Gerilimi Grafiği.	38
3.33:	L/h Oranı Gerilim Grafiği.	39
3.34:	L/h Oranı Ömür Grafiği.	39
3.35:	L/h Oranı Çekme Gerilimi Grafiği.	40
3.36:	L Gerilim Grafiği.	41
3.37:	L Ömür Grafiği.	41
3.38:	L Çekme Gerilim Grafiği.	41
3.39:	Değişik Geometri Çalışması (140 x 30 x 2 μm).	42
3.40:	Değişik Geometri Çalışması (200 x 200 x 2 μm).	42
3.41:	Önerilen Tasarım Geometrisi (160 x 24 x 1 μm).	44
4.1:	Temiz Oda Genel Görünüm-1.	46
4.2:	Temiz Oda Genel Görünüm-2.	46
4.3:	Elektrodların Gösterildiği Anahtar Görüntüsü.	47
4.4:	SiO ₂ Tabakası Oluşumu.	47
4.5:	Silisyum Nitrür (Si ₃ N ₄) Tabakası Oluşumu.	48
4.6:	Polisilisyum I Tabakası Oluşumu.	48
4.7:	Polisilisyum I Tabakası Aşındırma.	48
4.8:	LPCVD Oksit Tabakası Oluşumu.	49
4.9:	LPCVD Oksit Tabakası Aşındırma.	49
4.10:	Polisilisyum II Tabakası Oluşumu.	50
4.11:	Polisilisyum II Tabakası Aşındırma.	50

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Polisilisyumun Mekanik Özellikleri.	13
3.2: Polisilisyumun S-N tablosu.	14
3.3: Polisilisyumun Mekanik Değerleri.	15
3.4: Polisilisyumun Mekanik Değerleri.	21
3.5: SEM Yakınsama Analizi.	24
3.6: Değişik Kiriş Tasarımları ve Sonuçları.	26
3.7: Farklı Geometri (200 x 200 x 2 µm) için Maksimum Gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri.	27
3.8: Farklı Geometri (160 x 24 x 1 µm) için Maksimum Gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri	28
3.9: Farklı Geometri (100 x 6 x 1 µm) için Maksimum gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri.	28
3.10: Emniyet Katsayıları.	33
3.11: L/w Oranı için Maksimum Gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri.	37
3.12: L/h Oranı için Maksimum gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri.	39
3.13: L Değişkeni için Maksimum Gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri.	40
3.14: Farklı Geometri (140 x 30 x 2 µm) için Maksimum Gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri.	42
3.15: Farklı Geometri (200 x 200 x 2 µm) için Maksimum Gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi Değerleri.	43

1. GİRİŞ

MEMS (Mikro-Elektromekanik Sistemler) mikro imalat teknolojisi kullanılarak mikro sistemi algılamak ve kontrol etmek amacıyla mekanik elemanların ve elektronik parçaların aynı alt tabakaya entegrasyonudur [9]. Bu cihazlar çevreyi algılama ve hareket için kullanılır [27]. MEMS cihazlarının boyutları, bir mikronun çok altından birkaç milimetreye kadar değişebilir [4].

Son yıllarda, MEMS tıbbi ve ticari uygulamalar için çok önemli hale gelmiştir. Düşük maliyetleri, küçük boyutları, düşük enerji tüketimi, standart yarı iletken üretim uyumluluğu ve ömrü, kullanışlı cihazlar olmalarını sağlamıştır. Ayrıca yüksek izolasyon nedeniyle giderek daha popüler hale gelmişlerdir [31].

MEMS uygulaması çevremizde birçok alanda görülebilir. Özellikle cep telefonlarında [10], tıbbi uygulamalar da, MEMS cihazları Biyo-MEMS, işitme ve görme yardımcıları, DNA dizileme ve biyo-sensörler gibi yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Ayrıca kablosuz iletişim, sensör biomedikal optik iletişim , anahtarlama matrisi, yedekleme anahtarları, ayarlanabilir filtreler, ayarlanabilir ve değiştirilebilir faz değiştiriciler, yeniden yapılandırılabilir antenler, empedans eşleştirme ağları alanlarında da kullanılmaktadırlar [7].

İletişim endüstrilerinde RF MEMS anahtarı PIN diyotları ve FET cihazlarından daha kullanışlıdır. Çünkü MEMS'in tasarım süreci akışkanlar, ısı etkiler, elektrostatik ve mekanik gibi farklı katmanlar içerir. Bu nedenle, bitmiş cihazın performansını simüle etmek için bu alanlar dikkate alınır [4].

Tüm bu temel gereksinimler mevcut teknoloji üzerinde yeni tasarımlara ve gelişmiş mimarilere olan ihtiyacı gösterir.

RF MEMS anahtar tasarımı için Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (CMOS) standart proses akışı çok uygundur ve artık kullanılan çoğu devre CMOS süreci ile elde edilir. Genelde konsol anahtarlar silikon, silikon nitrür ya da polimerden yapılır [2].

RF MEMS anahtarına bir elektrostatik kuvvet uygulandığında kiriş çekilir ve sistemdeki iki hattı birbirine bağlar. Düşük güç tüketimi, yüksek izolasyon gibi avantajları nedeniyle, MEMS anahtarları geleneksel anahtarların yerini almıştır. Elektrostatik çalıştırma MEMS anahtarlarda en çok tercih edilen çalıştırma yöntemidir çünkü uygulaması çok basittir ve yüksek verimliliğe sahiptir [4]. Daha güvenilir

MEMS anahtarı elde etmek için malzeme özellikleri, elektrostatik kuvvet, giriş sapması, sistemin sönümlenmesi matematiksel olarak incelenmelidir. Tüm bu çalışmalardan sonra, MEMS proses akışı araştırılmış ve temiz odalarda üretilmeye başlamıştır.

Konsol giriş anahtarı paralel plâka kapasitör gibi modellenmektedir. Bu nedenle, çalışma aralığı sağlamak için bir ön gerilme voltajı gereklidir [4]. Algılama yapısı için önemli bir tasarım gereklidir. Çekme işleminin gerçekleşmesi için sisteme belirli miktarda enerji verilir. Sistem güvenilirliği için çalıştırma geriliminin daha düşük olması önemlidir .

1.1 Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu çalışmanın amacı MEMS grubuna ait olan konsol giriş tipi RF anahtarlarının statik, yorulma ve çekme geriliminin hesaplarını yapmak, sonrasında geometri üzerinde çalışma yaparak yorulma ömrünü arttırmak, çekme gerilmelerini azaltmak bu şekilde kazanım sağlayıp en uygun boyutlar ve malzeme bilgisi ile üretim sürecini ortaya koymaktır.

Çalışmanın sonuçları, RF MEMS cihazları konsol giriş tipi anahtarların tasarımında malzeme ve ömrü hakkında araştırmacılara bilgi verecek olup devamlı yüke maruz kalan anahtarın güvenilir bir şekilde çalışması için yapılan araştırmalara ışık tutacaktır.

Bu tez kapsamında, öncelikle birinci bölümde giriş kısmı ve tezin amacı, katkısı ve içeriği anlatılmıştır.

İkinci bölümde RF anahtar türleri, çalışma yapılan anahtarın tüm özellikleri ve çalışma prensipleri, davranışlarını etkileyen denklemler anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, değişik geometrilere sahip anahtarların sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Ansys analiz programından yararlanılarak hem statik hem yorulma analizleri yapıp analitik olarak çekme gerilimleri hesaplanmıştır.

Dördüncü bölümde, bu tip konsol girişin üretim süreci detaylandırılmış olup süreçler hakkında geniş bilgi verilmiştir.

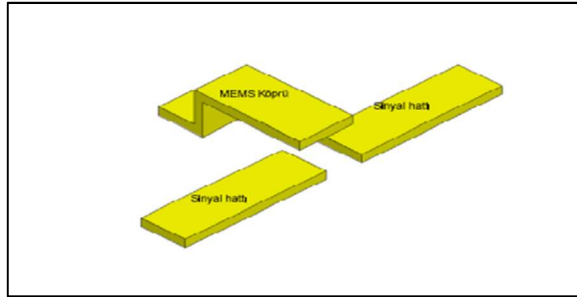
Beşinci bölümde, yapılan analizlerin sonucunda tüm veriler grafiklerle karşılaştırılıp azami verim için önerilen geometride ki anahtarın boyutları ve malzeme bilgisi verilmiştir.

2. RF ANAHTARLAR

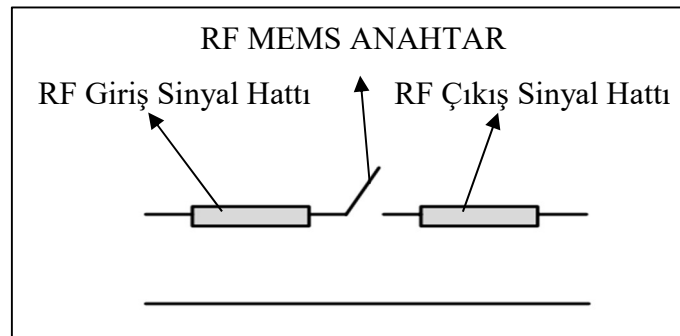
RF-MEMS anahtarlar, milimetrik dalga frekanslarında (0,1 ila 100 GHz) çalışacak şekilde tasarlanmış spesifik mikromekanik anahtarlardır. Bu anahtarlar seri ve paralel olmak üzere ikiye ayrılır ve Şekil 2.1, Şekil 2.4’de gösterilmiştir [7].

2.1. RF MEMS Seri Anahtar Yapısı

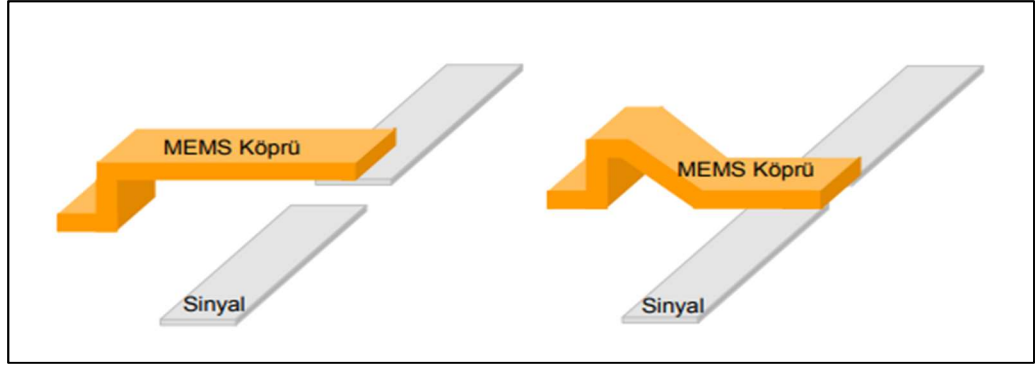
Seri yapılı RF MEMS anahtar basit devre modeli Şekil 2.2’de [7] yer almaktadır. Sistemde gerilim olmadığında açık devre, gerilim olduğunda kısa devre olmaktadır. Açık durumda sonsuz yalıtım, kısa devre durumunda sıfır araya girme kaybı sağlarlar. Giren gücün (PIN) çıkan güce (POUT) oranı araya girme kaybı (IL) olarak ifade edilir [20]. Burada araya girme kaybı giriş sinyalinin karşı sinyale oranıdır [14]. Şekil 2.3’de seri anahtarın konumu gösterilmiştir [7]. Çalışma aralıkları 0,1-40 GHz band aralığındadır. 1 GHz frekansında yaklaşık 50-60 dB civarlarında yüksek yalıtım sağlamaktadır [7].



Şekil 2.1: Seri anahtar yapısı.



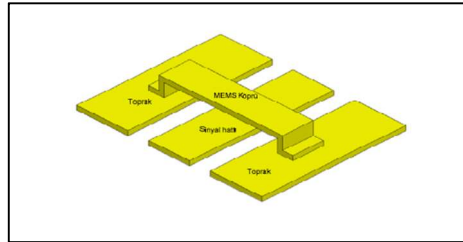
Şekil 2.2: Seri anahtar yapısının basit modeli.



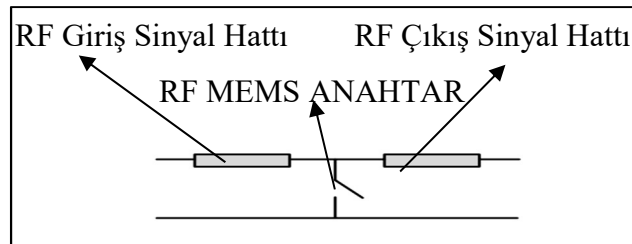
Şekil 2.3: Seri anahtar yapısının açık (aşağı) ve kapalı (yukarı) pozisyonu.

2.2. RF MEMS Paralel Anahtar Yapısı

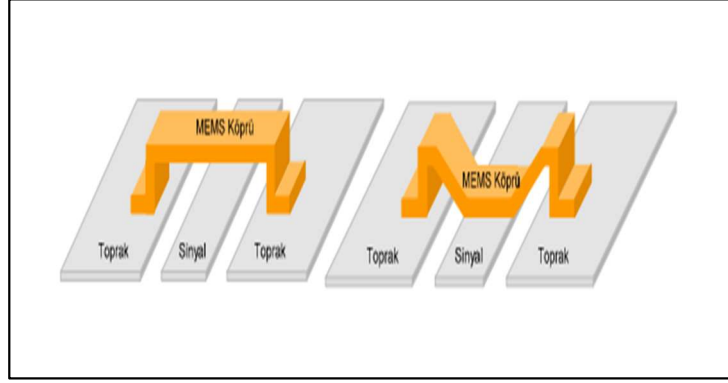
Paralel yapılı RF MEMS anahtar devresi, yapısı Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de yer almaktadır [7]. Paralel anahtarlarda toprak hat ile iletim hattı paraleldir. İdeal paralel anahtarlar açık durum konumunda sıfır araya girme kaybı, kısa devrede durum konumunda sonsuz yalıtım sağlamaktadır. Yüksek frekanslara uygun yapılar olup, 5-100 GHz band aralığında çalışmaktadır. 10-50 GHz frekansında aşağı durum konumunda 20 dB’den daha yüksek yalıtım sağlarlar [7]. Şekil 2.6’da konum pozisyonu gösterilmiştir [7].



Şekil 2.4: Paralel anahtar yapısı.



Şekil 2.5: Paralel anahtar yapısının basit modeli.



Şekil 2.6: Paralel anahtar yapısının açık (aşağı) ve kapalı (yukarı) pozisyonu.

RF MEMS yapılarının mekanik hareketleri;

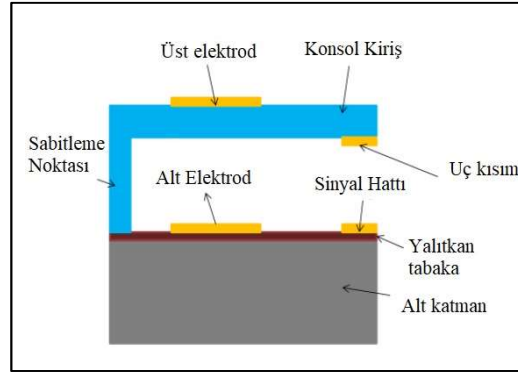
- Elektrostatik,
- Termal,
- Magnetostatik,
- Piezoelektrik olarak sağlanabilmektedir [12].

Elektrostatik anahtarlama, diğer anahtarlama tekniklerine göre daha basit üretime sahip olduğundan en çok tercih edilen tekniktir. Bu nedenle bu bölümde elektrostatik tür anahtarlar anlatılmaktadır.

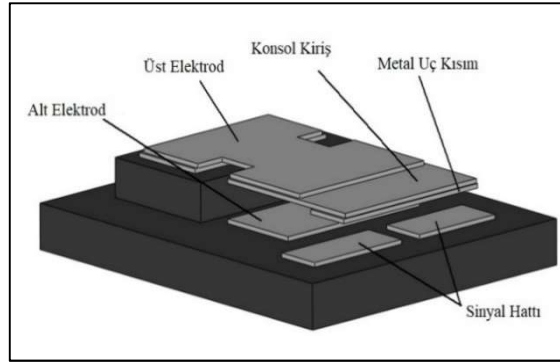
Bu çalışmada; DC kontaklı konsol giriş tipi seri anahtar seçilmiştir.

Bu anahtarın seçilmesinin nedeni; bu tür RF anahtarları, PIN diyotlara veya FET lere kıyasla düşük kayıp [1], düşük güç tüketimi [24], düşük bozulma ve daha yüksek kapalı durum yalıtımı sergilemesidir. Bununla birlikte, bu tür anahtarlar ticari veya uzay uygulamalarında kullanılmadan önce, milyarlarca döngüde güvenilir bir şekilde geçiş yapma kabiliyetini göstermeli ya da elektriksel ve RF performanslarını çok uzun süre korumak için bir yedekleme anahtarında olduğu gibi on yıl sonra bile anahtarın çalışmasını garanti etmelidirler. Yukarıdaki nedenlerden dolayı, RF MEMS anahtarları, gelecekteki düşük güçlü yüksek frekanslı kablolu yeniden yapılandırılabilir ağlar ve kablosuz iletişim sistemleri için adaydır .

2.3. RF MEMS Seri Anahtarının Detaylı Yapısı

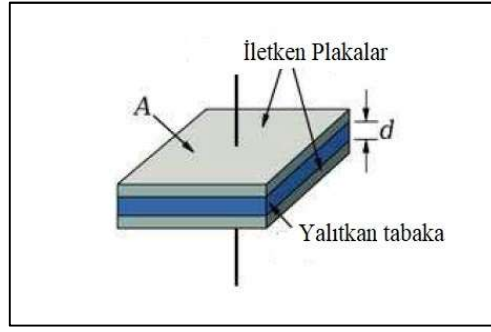


Şekil 2.7: RF MEMS anahtar yapısı.



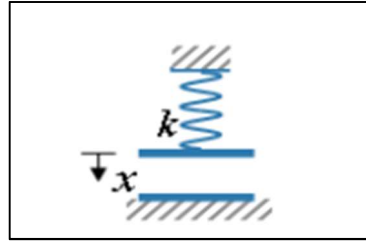
Şekil 2.8: RF MEMS anahtar yapısı.

Bir iletken yapı ile yer seviyesi arasında potansiyel bir fark uygulandığında, yapı elektrostatik kuvvetlerden dolayı deforme olur. Elastik kuvvetler yer değiştirmeyeyle doğrusal olarak büyürken, elektrostatik kuvvetler mesafenin karesiyle ters orantılı olarak büyür. Gerilim arttırıldığında, elektrostatik kuvvetin büyüme hızı elastik kuvvetin üstüne çıkıncaya kadar artar ve sistem fiziksel bir temas olmadan bir kuvvet dengesine ulaşamaz, bu nedenle çekme meydana gelir. Kritik voltaj, çekme voltajı olarak bilinir [4]. Anahtar yapısı detaylı olarak hem Şekil 2.7’de[2] hem Şekil 2.8’de [1] gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Kapasitans yapısı.

Şekildeki kapasitansın üzerine voltaj uygulandığında elektrostatik kuvvet levhaları $d-x$ kadar ki mesafeye çekmeye çalışacaktır. Küçük voltajlarda elektrostatik kuvvet yay kuvveti ile karşılanabilmektedir ($F_k = kx$). Fakat kritik voltaj olan çekme voltajını geçtiği zaman plâkalar birbirine yaklaşacaktır. Elektrostatik aktüatör anahtarlarının başarılı bir şekilde tasarlanması için çekme olayından önce çekme gerilmesi ve plâkalar arası mesafeyi tahmin etmek gerekir. Şekil 2.10’da elektrostatik aktüatör şeması görülmektedir ve burada plâka bir yaya (k) tutturulmuştur [4].



Şekil 2.10: Elektrostatik Aktüatör Şeması.

Şekil 2.9 da [4] , A elektrot örtüşme alanını [8], E boşluğun dielektrik katsayısını, $d-x$ boşluğu ifade etmektedir.

En basit olarak; sabit katsayılı ikinci dereceden denklemle tanımlanan tek serbestlik dereceli kütle modelinde:

- m : hareketli kütle plâkası,
- b : sönümleme katsayısı,
- k : yay sabitidir.

$$mx'' + bx' + kx = f(t) \quad (2.1)$$

Çekme gerilmesi için ilk olarak toplam enerji formülü yazılır.

$$E = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{(d-x)^2} V^2 + \frac{1}{2} kx^2 \quad (2.2)$$

Burada 1. terim gerilim kaynağı nedeniyle deforme olabilen kondansatörün elektrostatik potansiyelidir. İkinci terim ise yayda depolanan mekanik enerjiden kaynaklanmaktadır. Hareketli plâka üzerine etkiyen kuvvet denkleminin türetilmesi

$$F = -\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{(d-x)^2} V^2 - kx^2 \quad (2.3)$$

ile elde edilir.

Denge noktasında, $F = 0$, elektrostatik kuvvet ve yay kuvveti birbirine eşittir ve denklem (2.3) bize aşağıdaki denklemi elde etmemizi sağlar :

$$kx^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{(d-x)^2} V^2 \quad (2.4)$$

Denklem 2.4, uygulanan gerilim V 'in bir fonksiyonu olarak denge plâkası konumu x için çözülebilir.

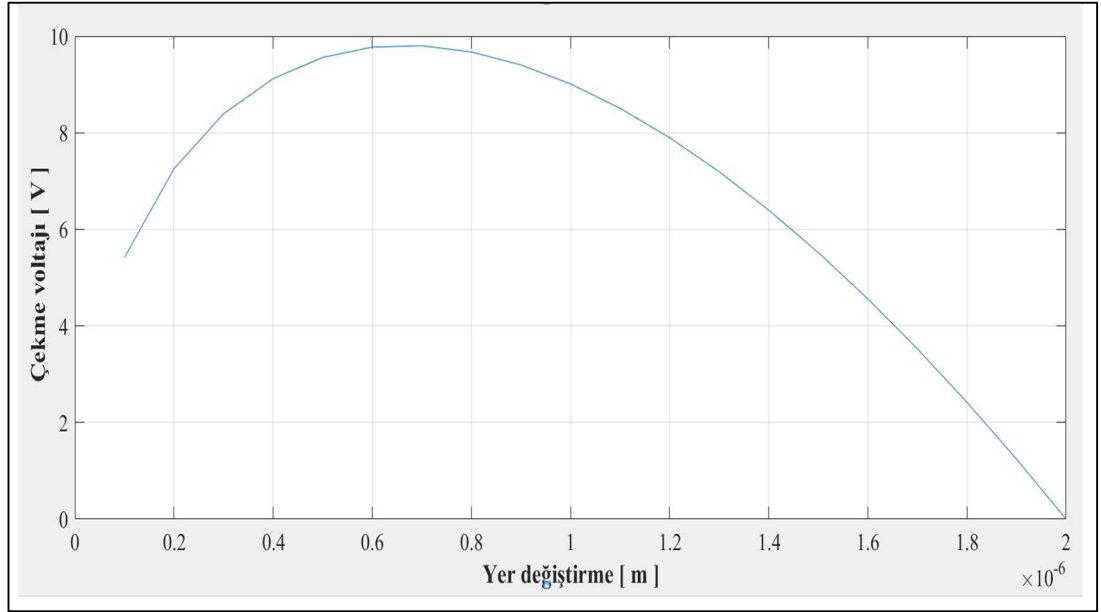
$$V_0 = \sqrt{\frac{2kx(d-x)^2}{\epsilon A}} \quad (2.5)$$

$x < d$ alanında, V , $x = d/3$ için maksimum değere sahiptir [3]. Bu noktayla ilişkili denge voltajına, çekme voltajı denir.

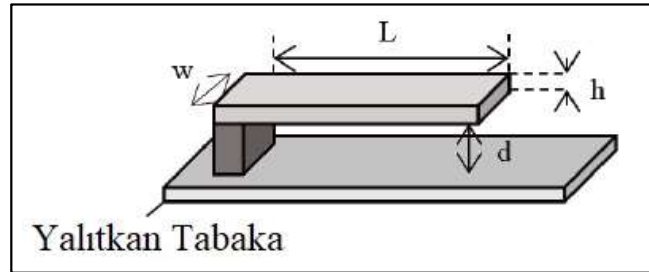
Denklemde x yerine $d/3$ yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$V_0 = \sqrt{\frac{8kd^3}{27\epsilon A}} \quad (2.6)$$

Bu çalışmada yer değiştirme $2 \mu\text{m}$ olarak tasarlanmıştır ve $2 \mu\text{m} / 3 = 0,666 \mu\text{m}$ yer değiştirme de maksimum çekme gerilmesi meydana gelmektedir.



Şekil 2.11: Maksimum çekme gerilimi grafiği ($x=d/3$ için).



Şekil 2.12: Ölçülerin detaylı gösterimi.

Ölçüleri $160\text{-}6\text{-}2 \mu\text{m}$ olan bir kiriş için çekme voltajı hesabı:

- L: Kiriş uzunluğu = $160 \mu\text{m}$
- k: Yay sabiti = $0,4658 \text{ N/m}$
- w: Kiriş genişliği = $6 \mu\text{m}$
- d: Hava boşluğu = $2 \mu\text{m}$
- h: Kiriş kalınlığı = $2 \mu\text{m}$

- A: Elektrod alanı [11]=960 μm^2
- ϵ : Boş alanın elektriksel geçirgenliği =8,85 x 10⁻¹²F/m

Yukarıda değerler denkleminde yerine konulunca:

Vçekme = 11,39 V olarak bulunur.

3. MEKANİK ANALİZLER

Mekanik analizler, konsol kirişte oluşan deformasyonlar ve buna bağlı olan gerilmelerin hesabı için kapsamlı olarak matematik denklemleri kullanarak davranışlarının incelenmesidir. Buradaki fizik modellerin çoğu kısmi türevli diferansiyel denklemler kullanılarak açıklanmıştır. Günümüzde de bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte bu denklemlerin, çözümü kolaylaşmıştır. Bu programlar sayesinde artık tasarımda en zayıf noktaların bile yerleri belirlenip kritik noktaların iyileştirilmesi sağlanabilmektedir.

Bu çalışma da sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan ANSYS 19.2 sürümü programı kullanılmıştır.

3.1. Seçilen Malzemenin Özellikleri

Bu çalışma için seçilen malzeme polisilisyumdur. Polisilisyum, yarı iletken ve MEMS cihazlarının imalatında kullanılır ve bu tür uygulamalar için en yaygın malzemedir. Polisilisyumun mikro yapısı depolama koşullarına bağlıdır [5].

Kimyasal buhar birikmesi yaklaşık 580 °C 'nin altında gerçekleştiğinde, biriken polisilisyum katmanlar şekilsiz iken, 580 °C 'nin üstündeki katmanlar polikristalindir [5]. Bu katmanlar, 600 °C 'nin üzerine bırakılırsa ince taneli yapı ve 625 °C 'nin üzerine bırakılırsa katman düzlemine dik olan iyi tanımlanmış koloner tane yapısı gösterir [5]. Tane yönelimi, katmanlar 600-650 °C arasında bırakıldığında ağırlıklı olarak {110} olurken, 650 ila 700 °C arasında bırakıldığında {100} yönünü gösterir.

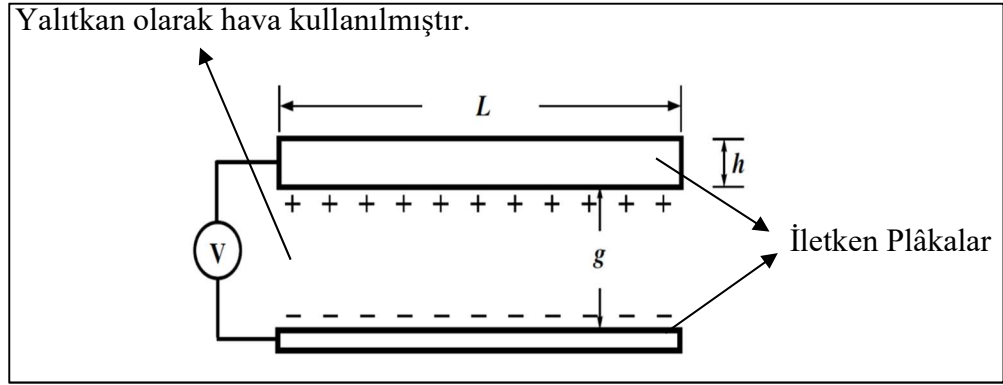
Doping, oksidasyon ve yüksek sıcaklıklar tanelerin büyümesine neden olarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olabilir. Polisilisyum tanecikleri genellikle tane büyüklüğü dağılımının 0,2 ila 0,5 mikron arasında olduğunu gösterir.

Polisilisyum malzemenin kullanımının çeşitli nedenleri vardır;

- Polisilisyumun işlenmesi standart IC üretim teknikleri ile tamamen uyumludur.
- Artık ve gradyan gerilmeleri sifıra yakın olarak azaltılabilir.
- Karmaşık parçaların üretilmesine izin veren çoklu silikon tabakaları biriktirilebilir ve birleştirilebilir.

- Polisilisyumun kimyasal buhar birikmesi yüksek uygunluk ve düzgün kaplama sağlar.
- Polisilisyum, sünme direnci ve yavaş çatlak büyümesi gibi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir [5].

Malzemelerin mekanik ve elektriksel özellikleri, malzemenin tek veya polikristal yapısına (tane büyüklüğü ve tane yönü), şekilsiz, biriktirilmiş veya tavllanmış gibi mikro yapıya bağlıdır.



Şekil 3.1: Paralel Plâka gösterimi.

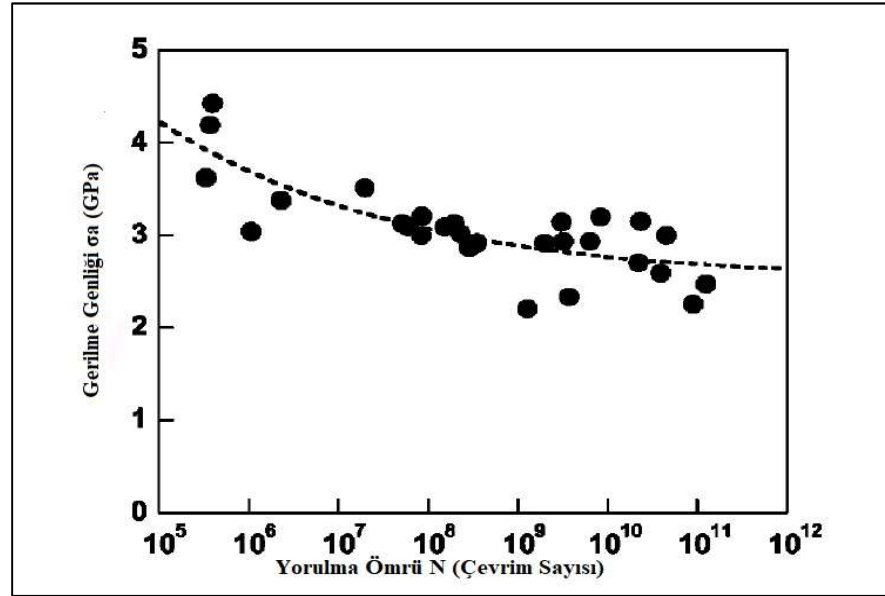
Bu çalışma için Si (1,0,0) p tipi (CZ), $15-25 \Omega / \text{cm}^2$ pul kullanılacaktır. Doping konsantrasyonu yaklaşık $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ dir [13]. Konsol giriş tipi anahtarı elde etmemiz için Şekil 3.1'deki gibi [4] hem iletken hem de yalıtkan iki yapıya ihtiyacımız vardır. Bu plâkalar iletken olup elektrostatik olarak harekete geçmektedirler. Ayrıca bu anahtarlar için kapasitif etkiye ihtiyaç bulunmaktadır. Daha sonra iletken plâkalar arasındaki dielektrik katman kullanılmıştır.

3.2. Malzeme Özellikleri

Tablo 3.1 de polisilisyumun mekanik özellikleri ve Şekil 3.2’de [5] S-N eğrisi verilmiştir.

Tablo 3.1 Polisilisyumun mekanik özellikleri.

Elastite Modülü	159 [19]	GPa
Yoğunluk	2330 [16]	kg/m ³
Poisson Oranı	0,23 [23]	
Sıkışmazlık Modülü	98,1	GPa
Kayma Modülü	64,6	GPa
Akma dayanımı	1,45	GPa
Kopma dayanımı	2,7	GPa



Şekil 3.2: Polisilisyumun S-N eğrisi.

3.3. S-N (Gerilim –Çevrim Sayısı) Tablosu

S-N (Wöhler eğrisi) sürekli yüklere maruz kalan bir malzemenin hangi çevrim sayısında hangi gerilme büyüklüğünde hasara uğradığını ifade eden bir eğridir. Malzemenin uygulanan yük altında hasara uğrayıp uğramadığını belirlemek için malzeme S-N eğrisi tanımlamak şarttır.

Aşağıda 40 kHz frekansta tanımlanan S-N değerlerini gösterilmektedir [6].

Tablo 3.2: Polisilisyumun S-N tablosu.

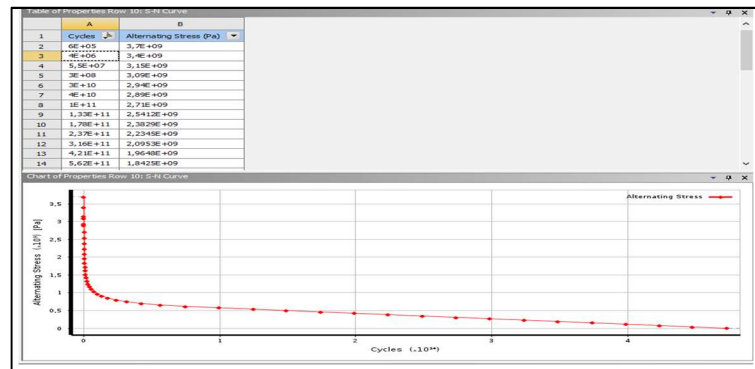
ÇEVİRİM SAYISI	GERİLİM (GPa)
600000	3,7
4000000	3,4
55000000	3,15
300000000	3,09
30000000000	2,94
40000000000	2,89
1×10^{11}	2,71
$1,33333 \times 10^{11}$	2,54121
$1,77778 \times 10^{11}$	2,382933
$2,37037 \times 10^{11}$	2,234515
$3,16049 \times 10^{11}$	2,09534
$4,21399 \times 10^{11}$	1,964834
$5,61866 \times 10^{11}$	1,842456
$7,49154 \times 10^{11}$	1,727701
$9,98872 \times 10^{11}$	1,620092
$1,33183 \times 10^{12}$	1,519187
$1,77577 \times 10^{12}$	1,424565
$2,3677 \times 10^{12}$	1,335838
$3,15693 \times 10^{12}$	1,252636
$4,20924 \times 10^{12}$	1,174617
$5,61232 \times 10^{12}$	1,101457
$7,48309 \times 10^{12}$	1,032854
$9,97746 \times 10^{12}$	0,968524
$1,33033 \times 10^{13}$	0,9082
$1,77377 \times 10^{13}$	0,851634
$2,36503 \times 10^{13}$	0,798591
$3,15337 \times 10^{13}$	0,748851
$4,20449 \times 10^{13}$	0,70221
$5,60599 \times 10^{13}$	0,658473
$7,47465 \times 10^{13}$	0,617461
$9,9662 \times 10^{13}$	0,579003
$1,25 \times 10^{14}$	0,540545
$1,49 \times 10^{14}$	0,502087
$1,74 \times 10^{14}$	0,463629
$1,99 \times 10^{14}$	0,425171
$2,24 \times 10^{14}$	0,386713
$2,49 \times 10^{14}$	0,348255
$2,74 \times 10^{14}$	0,309797

Tablo 3.2: Devam.

$2,74 \times 10^{14}$	0,309797
$2,99 \times 10^{14}$	0,271339
$3,24 \times 10^{14}$	0,232881
$3,49 \times 10^{14}$	0,194423
$3,74 \times 10^{14}$	0,155965
$3,99 \times 10^{14}$	0,117507
$4,24 \times 10^{14}$	0,07905
$4,48 \times 10^{14}$	0,040592
$4,73 \times 10^{14}$	0,002134

Tablo 3.3: Polisilisyumun mekanik değerleri.

Properties of Outline Row 3: Silicon			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2330	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	1,59E+11	Pa
7	Poisson's Ratio	0,23	
8	Bulk Modulus	9,8148E+10	Pa
9	Shear Modulus	6,4634E+10	Pa
10	S-N Curve	Tabular	
11	Interpolation	Linear	
12	Scale	1	
13	Offset	0	Pa
14	Tensile Yield Strength	1,45E+09	Pa
15	Tensile Ultimate Strength	2,7E+09	Pa

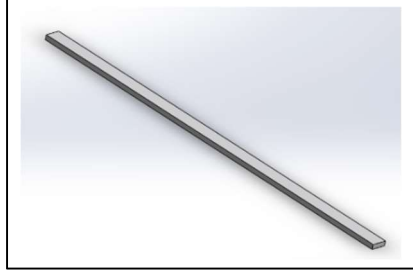


Şekil 3.3: Polisilisyumun S-N grafiği.

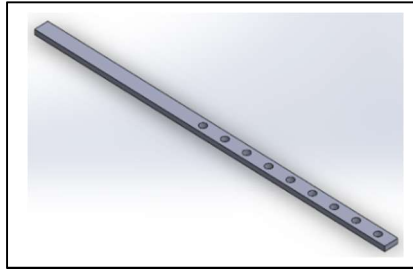
3.4. Mems Kiriş Tipleri ve Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada aşağıda şematik resimleri verilen anahtar tipleri tasarlanmış ve bunlara ait yukarıda bahsedilen statik, yorulma analizleri ve çekme gerilmeleri hesaplanmıştır.

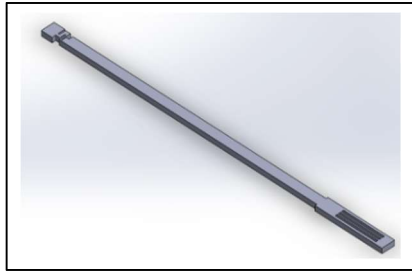
A tipi klasik bir kirişi göstermektedir. B şeklindeki tasarım hem ilk analizleri yapmak hem de referans olarak diğer tip kirişlerle karşılaştırmak açısından önemlidir. B, C ve D tipi t profili [15] kirişler de hem gerilmeleri hem yorulma ömürlerini karşılaştırmak için tasarlanmış kiriş tipleridir.



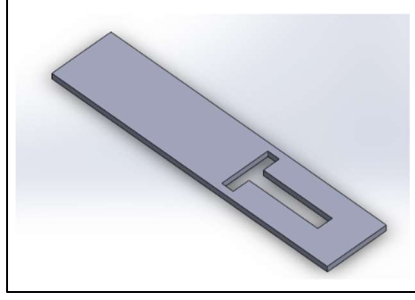
Şekil 3.4: A tipi Kiriş.



Şekil 3.5: B tipi Kiriş.



Şekil 3.6: C tipi Kiriş.



Şekil 3.7: D tipi Kiriş.

3.5. Sonlu Elemanlar Metodu

Karmaşık ve çok zaman alan problemler için yapıyı parçalayarak ayırma metodu ile problemlerin daha hızlı çözülme mantığı sonlu elemanların temel prensibidir. Çoğunlukla yaklaşık bir sonuç bulunur [25].

Bu yapı çözdürülürken farklı metodlarda (mesh tipi, boyutu) farklı sonuçlar ortaya çıkabilir, bu sebeple en uygun metodu çözümlemeden önce belirlemek gerekir.

3.5.1. Sonlu Elemanlar Metodunun Kısa Tarihi

Yakın tarihimizde, sonlu elemanlar metoduna benzer bir yöntem ilk kez Courant tarafından 1943'te ortaya atılmıştır. Bu yöntemde, üçgensel bölgeler üzerinde parçasal sürekli fonksiyonlar tanımlanmaktadır. Günümüzde bilinen sonlu elemanlar metodu ise, 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Top tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada, perçin bağlantılı profil ve üçgensel iç gerilmeli tabaka şeklindeki sonlu elemanların bir uçağın analizinde kullanımı incelenmiştir [25]. Günümüz bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile de, bu yöntem daha da ilerlemiş ve doğruluk oranı çok yüksek sonuçlar alınabilmektedir.

3.5.2. Uygulama Alanları

Sonlu elemanlar metodunun (SEM) bazı uygulama alanları her türlü uygulama alanları, özdeğer (eigenvalue), denge ve yayılma problemleridir. Mühendislik açısından sonlu elemanlar metodunun en geniş uygulama alanı mukavemet problemleridir. Mukavemet problemlerinde yer değişimi, kuvvet ve karma yöntem gibi üç yaklaşım dikkate alınmaktadır. Yer değişim yönteminde yer değişimleri ve dönmeler; kuvvet yöntemi yaklaşımında kuvvetler ve gerilmeler; karma yönteminde ise bilinmeyen veya serbest değişkenler kullanılmaktadır [25].

3.5.3. Problemlerde Uygulanması

SEM'in uygulanmasında yapının malzeme bilgisinin girilmesi, uygun ölçü ve metodlarla yapının sonlu parçalara ayrılması, sınır koşulların belirlenmesi (yer değiştirme, yük vb.), çözümleme ve sonuçların elde edilmesi adımları uygulanır.

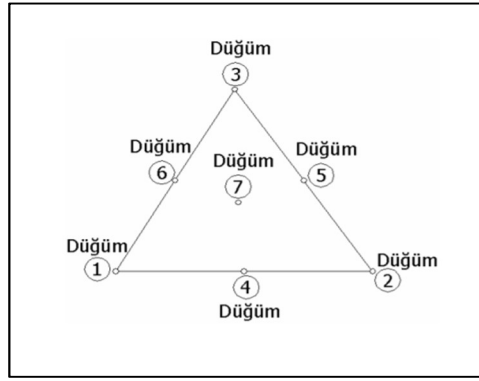
3.5.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri

Analizde doğru sonuca yaklaşmak için eleman tipi ve kullanılacak eleman sayısı çok iyi belirlenmelidir. Seçilen eleman tipi, geometrisi, malzeme özellikleri, yükleri ve yer değişimleri bakımından farklı eleman tipleri mevcuttur ve bu eleman tipleri şekil 3.8, şekil 3.9 ve şekil 3.10'da gösterilmiştir [25].



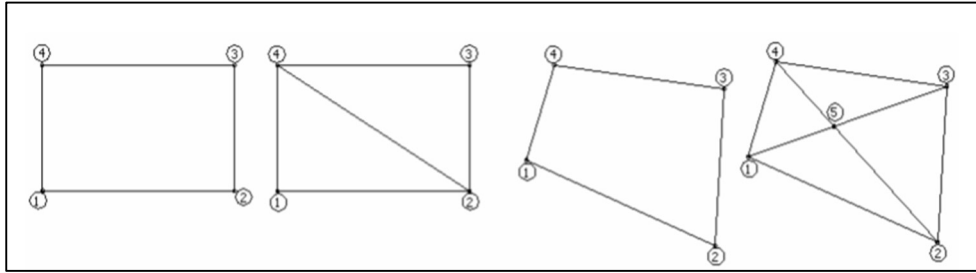
Şekil 3. 8: Mesh Eleman Tipi-1.

Şekil 3.9 da İki boyutlu sonlu elemanlarla tipi gösterilmiştir. İki boyutlu eleman tipleri arasında en basiti üçgen elemandır.



Şekil 3. 9: Mesh Eleman tipi-2.

Şekil 3.10’da gösterilen değişik iki boyutlu dörtgen sonlu eleman tiplerine örnekler soldan sağa doğru (iki boyutlu dikdörtgen, iki üçgenli dikdörtgen, dörtgen elemanı ve dört üçgenli dörtgen elemanı tipi sonlu elemanlar) verilmiştir.



Şekil 3. 10: Mesh Eleman tipi-3.

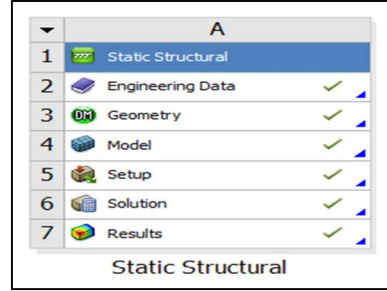
3.5.5. ANSYS Sonlu Elemanlar Programı

Bilgisayarlarda, SEM çeşitli programlar vasıtasıyla küçük sonlu elemanlara bölünerek analizler yapılmaktadır. Günümüzde, SEM için birçok yazılım mevcuttur. Bunlar , ANSYS , COMSOL , SOLIDWORKS vs. dir. Bu tez çalışmasında ANSYS kullanılmıştır. ANSYS bu çalışmadaki gibi çoklu fizik problemlerinde iyi sonuçlar vermektedir.

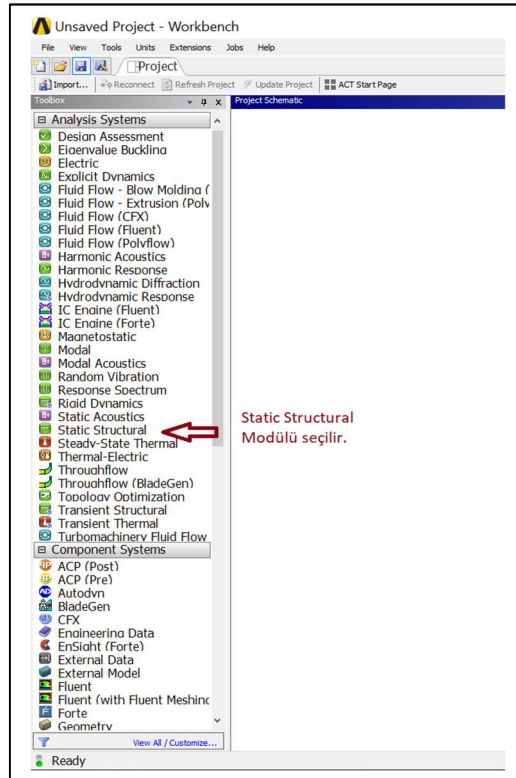
3.5.6. Hesaplama Adımları :

3.5.6.1. Program açılması

ANSYS başlatıldığında Şekil 3.11’de görülen ana pencere ekrana gelir. Detaylara girmeden önce ANSYS programının birkaç özelliği bilinmelidir.



Şekil 3. 11: Ansys analiz adımları.



Şekil 3. 12: Ansys modül seçilmesi.

Yukarıdaki pencereden , yorulma analizini simüle etmek için önce “Static Stuctural” modülü seçilir.

3.5.6.2. Malzeme Bilgisi

Malzeme kütüphaneden seçilir ve mekanik özellikler girilir. Bu mekanik özellikler sırasıyla;

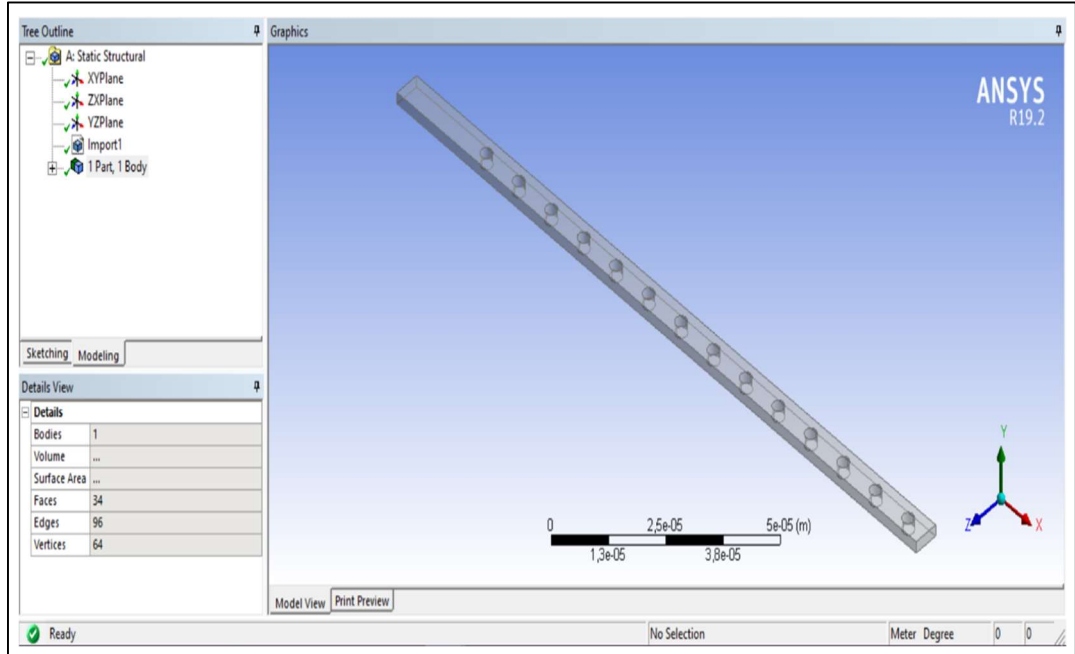
- Elastisite modülü,
- Yoğunluk,
- Poisson Oranı,
- Sıkışmazlık modülü,
- Kayma modülü,
- Akma dayanımı,
- Kopma dayanımıdır.

Tablo 3.4: Polisilisyumun mekanik değerleri.

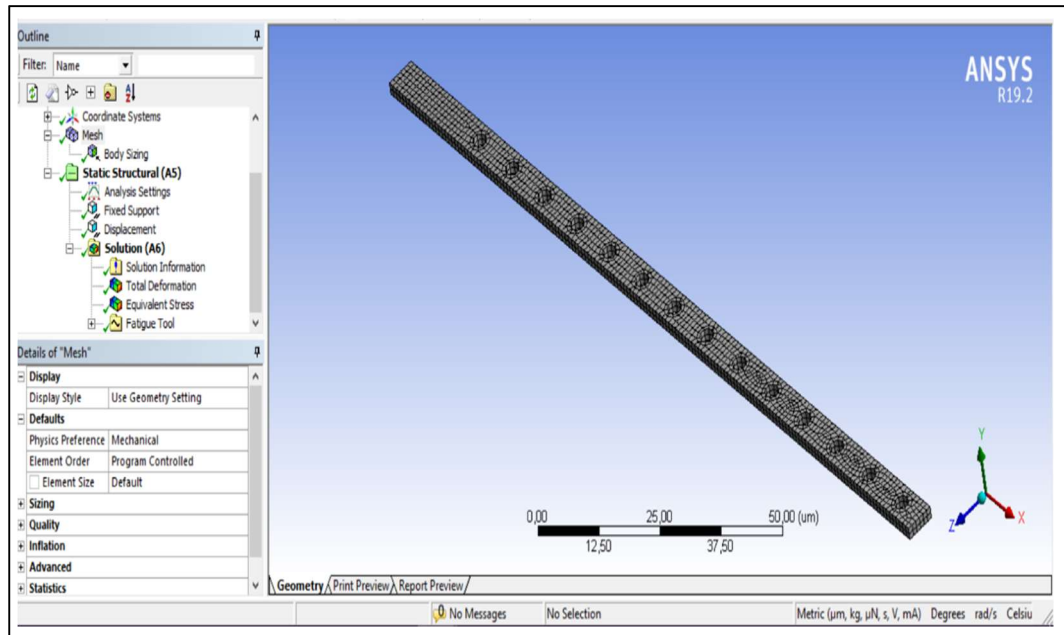
Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Silicon		Thermal_Materials.xml	
4	Structural Steel		General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Silicon				
	A	B	C	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2330	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	1,59E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,23		
8	Bulk Modulus	9,8148E+10	Pa	
9	Shear Modulus	6,4634E+10	Pa	
10	S-N Curve	Tabular		
11	Interpolation	Linear		
12	Scale	1		
13	Offset	0	Pa	
14	Tensile Yield Strength	1,45E+09	Pa	
15	Tensile Ultimate Strength	2,7E+09	Pa	

3.5.6.3. Geometri oluşturulması ya da dışarıdan getirilmesi



şekil 3. 13: Ansys'e geometri yükleme.



şekil 3. 14: Ansys'te mesh belirleme.

3.5.6.4. Ağ oluşturma (Elemanlara bölme)

Mesh üretme fiziksel bir tanım aralığını daha küçük tanım aralıklarına (elemanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Burada amaç bir diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Aynı zamanda hassasiyeti arttırarak doğru sonucu bulmak açısından bu adım oldukça önemlidir.

Mesh için eleman özellikleri belirlendikten sonra, model küçük elemanlara bölünür. Burada önemli olan seçilen eleman kullanılarak modelin nasıl daha iyi küçük parçalara bölüneceğidir. Bazı paket programlar bunu otomatik olarak yapmaktadır. Eğer istenirse manuel olarak da dışarıdan özellikler değiştirilebilir. Eleman sayısı arttırılarak, eleman tipi değiştirilerek, mesh üretim yöntemi değiştirilerek veya mesh üzerinde manuel olarak oynanarak çözüm yenilenebilir. Böylece sonuçlar arasındaki fark gözlenebilir. Oluşturulacak mesh için programa istenilen ölçü ve tip için giriş yapılmalıdır. Ayrıca kritik görünen yerlerde mesh yoğunluğu daha fazla yapılabilir. Birçok endüstri de sonlu elemanlar teknolojilerinin kullanıcısı olanlar, tasarım süreçlerini basitleştirmeye ihtiyaç duymaktadırlar.

Sonlu elemanlar teknolojileri arasında hangi elemanların en verimli olduğu ile alakalı çokça bilgi alışverişi olmuştur. Bu bilgiler ışığında, quadrilateral ve hexahedral şeklindeki elemanların üçgen ve tetrahedral şekilli elemanlara göre daha etkili oldukları sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca hexahedral şekilli elemanların kullanılması eleman sayısını önemli miktarda düşürebilir. Sonuç olarak daha düşük bilgisayar donanımı ve analiz zamanı elde edilir.

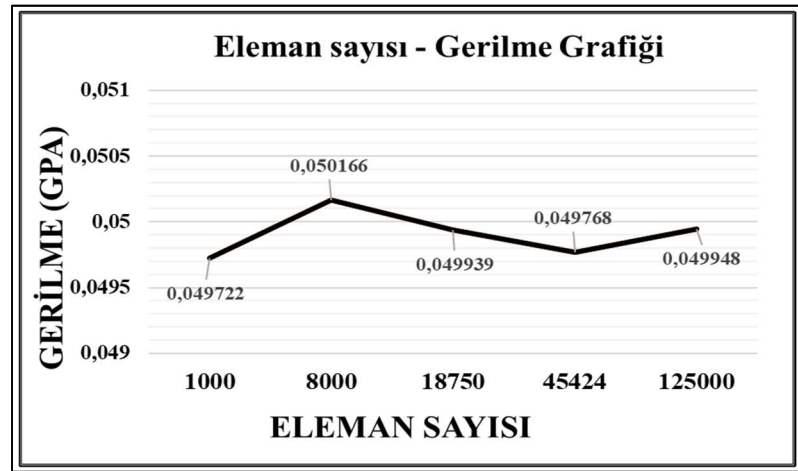
Yukarıdaki bilgiler ışığında eleman tipi hexahedral olarak seçilmiştir .

A tipi giriş için yakınsama çalışması

Analizlere başlamadan önce sonuçların doğruluğunu öngörme amacıyla bir yakınsama çalışması yapılmıştır. Bu amaçla 100-10-1 μm ölçülerine sahip olan geometri 1000, 8000, 18750, 45424 ve 125000 eleman sayısına bölünerek maksimum gerilim ve minimum ömür değerlerindeki değişiklikler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.5: SEM Yakınsama Analizi.

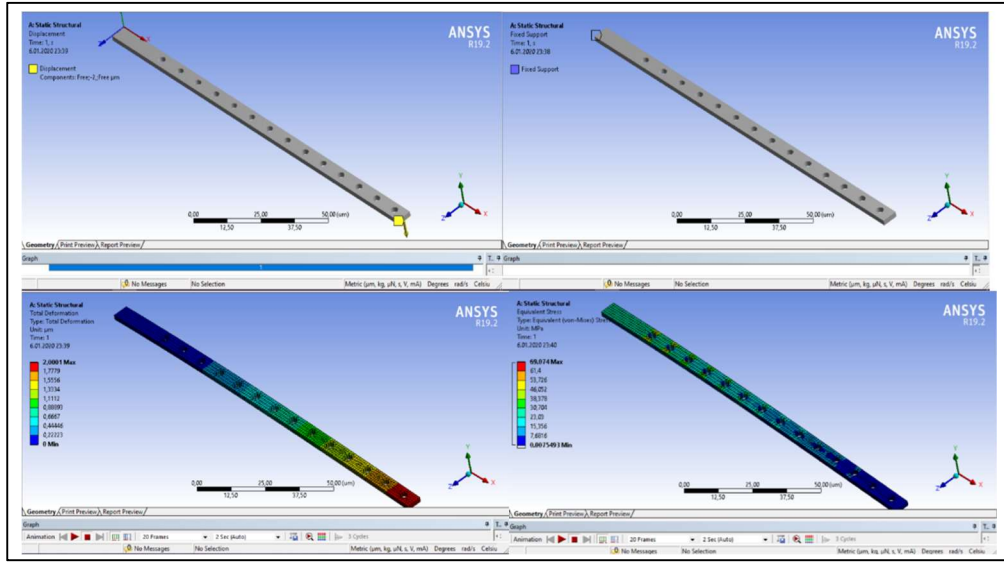
Eleman sayısı	Eleman Boyutu (μm)	Maksimum Gerilim değeri (MPa)	Minimum Ömür değeri (Çevrim Sayısı)
1000	1	49,722	$4,5823 \times 10^{14}$
8000	0,5	50,166	$4,5808 \times 10^{14}$
18750	0,4	49,939	$4,5816 \times 10^{14}$
45424	0,3	49,768	$4,5821 \times 10^{14}$
125000	0,2	49,948	$4,5815 \times 10^{14}$



Şekil 3.15: SEM Yakınsama Grafiği.

3.5.6.5. Sınır koşullarının belirlenmesi;

- Sabitleme noktası,
- Yer değiştirme bilgisi,
- Toplam deformasyon modülü eklenir,
- Eşdeğer gerilim modülü eklenir,
- Yorulma (Fatigue) Tool modülü eklenir.



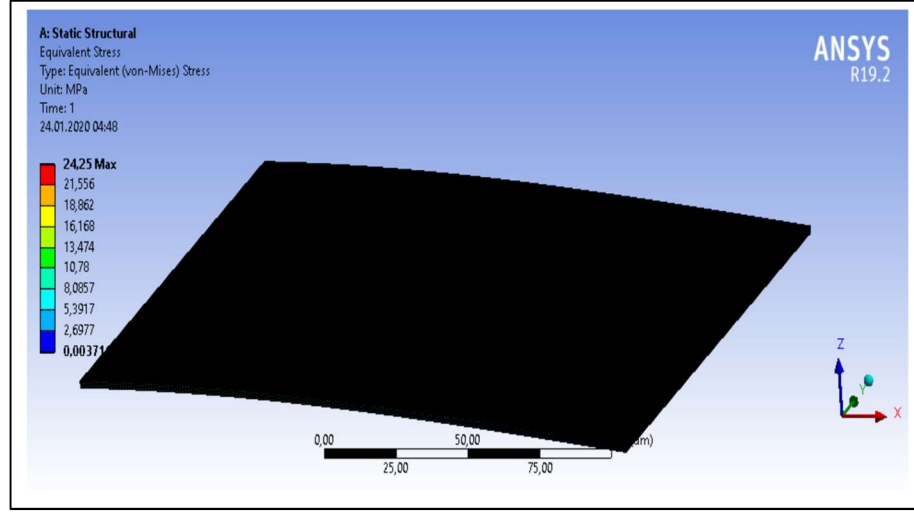
Şekil 3.16: Sınır koşullarının belirlenmesi.

3.6. Statik Analiz

Bu bölümde klasik geometri ve farklı şekillerde 15 farklı tasarımın analizi yapılmıştır. Bu farklı tasarımlara sahip kiriş geometrileri ve sonuçlar Tablo 3.6 da verilmiştir.

Tablo 3.6: Değişik Kiriş Tasarımları ve Sonuçları.

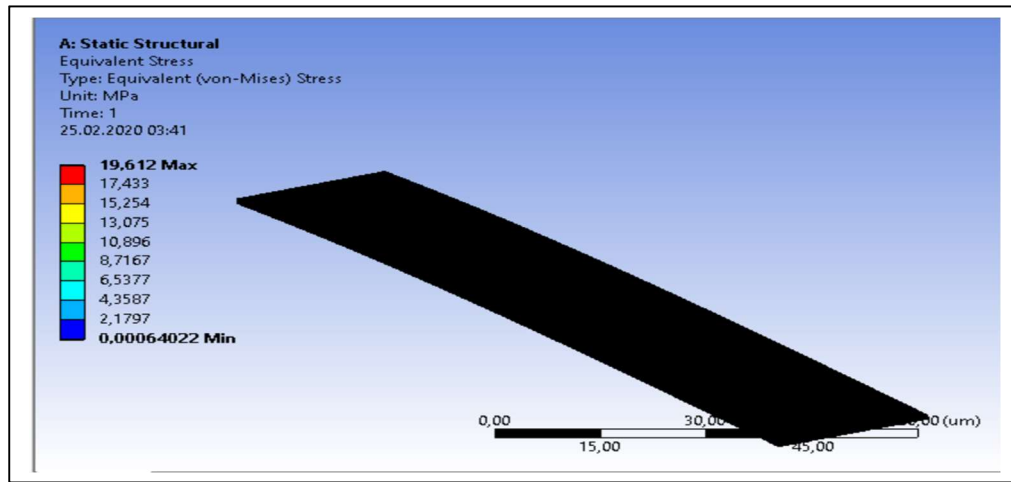
	Kiriş tipi	(Uzunluk-En - Kalınlık) (μm)	Maksimum Gerilim (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim Sayısı)	Elektrod Alanı	Çekme Gerilimi (V)
Tasarım-1	A tipi	100-10-2	110,22	$4,38 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	29,78
Tasarım-2	A tipi	120-20-2	77,15	$4,49 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	32,04
Tasarım-3	A tipi	140-30-2	56,25	$4,56 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	31,14
Tasarım-4	A tipi	140-30-2	945,16	$4,73 \times 10^{14}$	$10^6 \mu\text{m}^2$	66,44
Tasarım-5	A tipi	140-30-2	175,69	$4,18 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	31,14
Tasarım-6	A tipi	100-10-1	49,94	$4,58 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	10,53
Tasarım-7	A tipi	120-20-1	34,83	$4,63 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	11,32
Tasarım-8	A tipi	140-30-1	25,57	$4,66 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	11,01
Tasarım-9	A tipi	160-6-2	46,05	$4,59 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	11,39
Tasarım-10	B tipi	160-6-2	53,07	$4,56 \times 10^{14}$	$896 \mu\text{m}^2$	11,79
Tasarım-11	C tipi	160-6-2	206,51	$4,05 \times 10^{14}$	$684 \mu\text{m}^2$	13,5
Tasarım-12	A tipi	160-6-1	19,16	$4,68 \times 10^{14}$	$960 \mu\text{m}^2$	4,03
Tasarım-13	A tipi	200-200-2	25,24	$4,66 \times 10^{14}$	$4 \times 10^6 \mu\text{m}^2$	7,29
Tasarım-14	A tipi	160-24-1	19,12	$4,68 \times 10^{14}$	$3850 \mu\text{m}^2$	4,02
Tasarım-15	A tipi	100-6-1	48,88	$4,58 \times 10^{14}$	$600 \mu\text{m}^2$	10,31



Şekil 3.17: Analiz edilen geometri (200 x 200 x 2 μm).

Tablo 3.7: 200-200-2 μm ölçülerinde tasarım sonuçları.

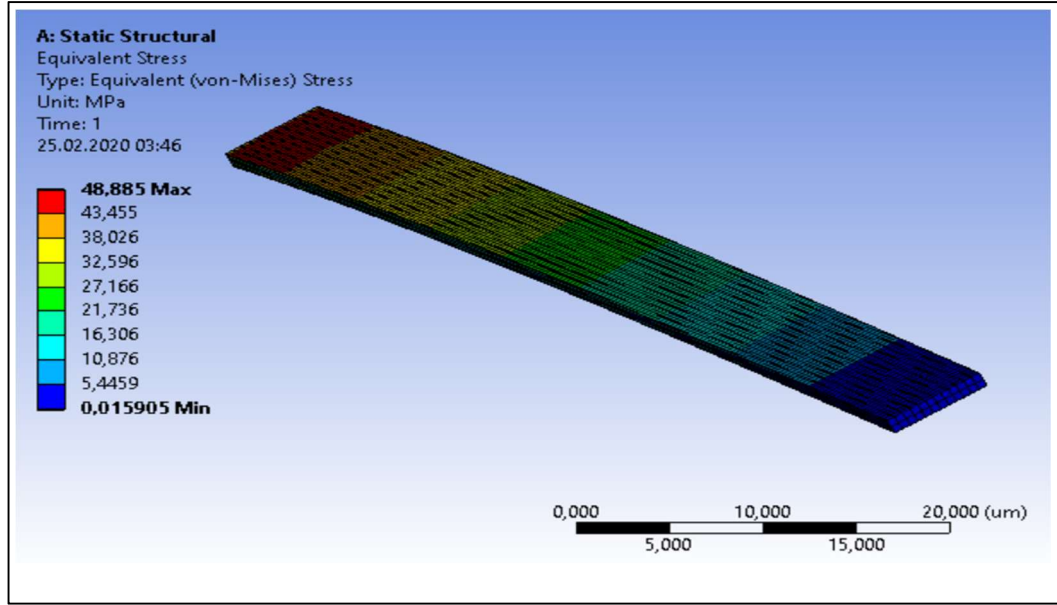
		Maksimum gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim Sayısı)	Çekme gerilmesi [V]
w=200 μm , h=2 μm	L=200 μm	25,24	$4,66 \times 10^{14}$	7,29



Şekil 3.18: Analiz edilen geometri (160 x 24 x 1 μm).

Tablo 3.8: 160-24-1 μm ölçülerinde tasarım sonuçları.

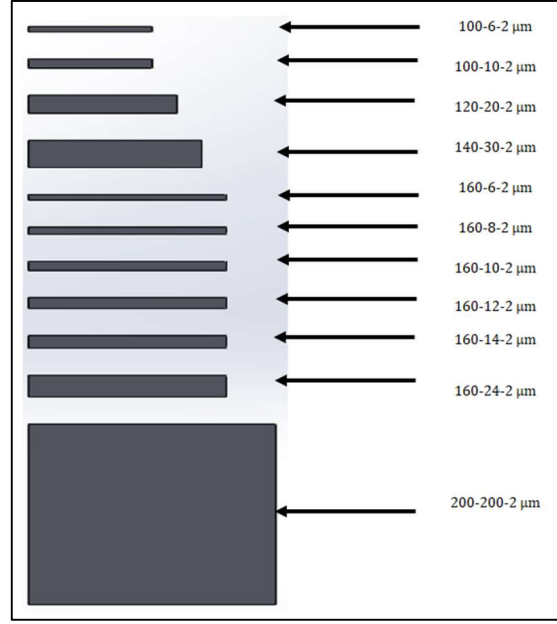
		Maksimum gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim Sayısı)	Çekme gerilmesi [V]
w=24, h=1 μm	L=160 μm	19,12	$4,68 \times 10^{14}$	4,02



Şekil 3.19: Analiz edilen geometri (100 x 6 x 1 μm).

Tablo 3.9: 100-6-1 μm ölçülerinde tasarım sonuçları.

		Maksimum gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim Sayısı)	Çekme gerilmesi [V]
w=6, h=1 μm	L=100 μm	48,88	$4,58 \times 10^{14}$	10,31



Şekil 3.20: Değişik Ölçülerde Konsol Kiriş Üst Görünümleri.

3.7. Yorulma Analizi

Çevrimsel olarak yüke maruz bırakılan malzemelerin hasara uğramasına malzeme yorulması denir. Gerilme genliği statik malzeme mukavemetinin çok altındaysa bile yorulma hasarı oluşabilmektedir. Bunun da en yaygın sebebi yorulmadır.

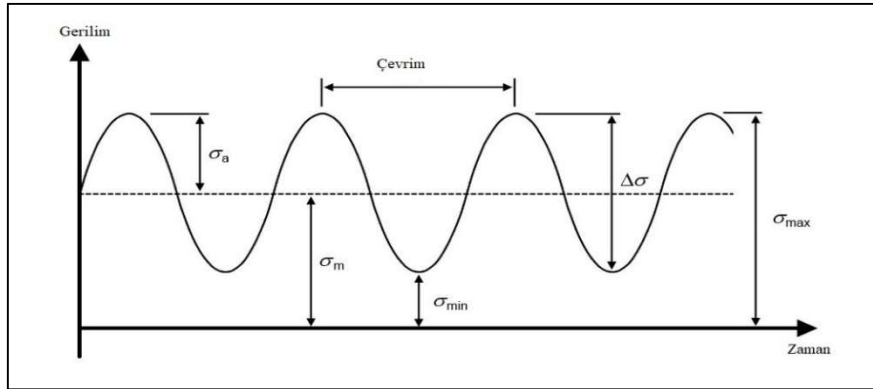
Hasar için üç aşama gereklidir;

- Yüksek sayıda çevrim gerçekleşirse mikroskobik düzeyde hasar oluşur ve makroskobik hale kadar ilerler.
- Makroskobik hal her yüklemede büyümeye devam eder.
- Hasarlı yapı yükü taşıyamadığından dolayı kırılır.

Yorulma olayı aslında birinci aşama olayıdır fakat bazı kaynaklar da son iki aşama içinde belirtilmektedir. Burada önemli olan çatlak oluşumundan önce hasarı önlemektir.

3.7.1 Yorulma Değişkenleri

Değişken bir yükün etkisinde, malzemedeki durum zamanla değişmektedir. Bu durum, gerilme ve şekil değiştirme gibi birçok farklı değişkenle tanımlanabilmektedir. Bir yük çevrimi, en üst ile bir sonraki en üst arasındaki bölge olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.21’de [30] yorulmaya sebep olan gerilmenin zamanla değişimi gösterilmektedir:



Şekil 3.21: Gerilmenin zamana bağlı grafiği.

Gerilme hesabı yapılırken değerler maksimum (σ_{max}) ve minimum (σ_{min}) arasında değişmektedir. Gerilmenin değişimi gerilme genliği (σ_a), ve ortalama gerilme (σ_m) tanımları ile bulunur. Ayrıca, gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) ve R-değeri (Gerilme oranı) de bir gerilme çevrimini tanımlamak için sıklıkla kullanılmaktadır. Farklı yorulma değişkenleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.2)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (3.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (3.4)$$

Yorulma hasarının en önemli parametresi gerilme genliğidir. Bununla birlikte, detaylı bir yorulma analizi için ortalama gerilme de hesaba katılmalıdır. Ortalama

gerilme, çekme gerilmesi olduğunda yorulmaya karşı duyarlılık artarken, basma gerilmesi olduğunda yapı daha yüksek gerilme genliklerine dayanabilmektedir[30].

Bu çalışmada 15 farklı tasarım için yapılan statik analiz sonucunda Ansys sonlu elemanlar programına malzeme özellikleri bölümünde girilen S-N eğrisi bize malzemenin ne zaman hasara uğrayacağını yani yorulma analizini verecektir. Bu analizlerde yer değiştirme 2 μm ve 33,6 μm olarak uygulanmıştır.

3.7.2 Yorulma Analizi Modelleri

- Yorulma analiz tipi (strain, stress life seçimi),
- Yükleme durumu seçimi,
- Ortalama gerilme etkileri,
- Çok eksenli gerilme düzeltme,
- Yorulma düzeltme faktörü [29].

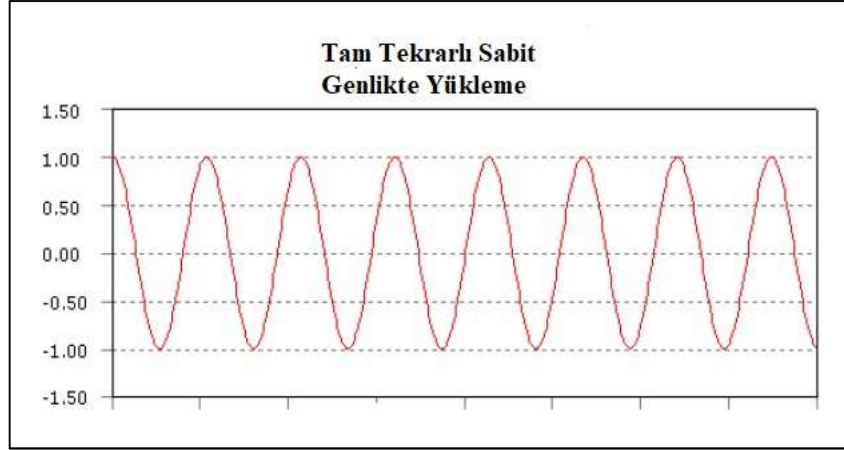
3.7.3 Yükleme Durumu Seçimi

Yorulma analizlerinde, Stress Life metodu kullanılmıştır.

- Sabit genlik, orantılı yükleme (Constant Amplitude, Propotional Loading)
- Sabit genlik, orantısız yükleme (Constan Amlitude , Non-Propotional Loading)
- Değişken genlik, orantılı yükleme (Non-Constant Amplitude , Propotional Loading)
- Değişken genlik , orantısız yükleme (Non-Constant Amplitude,Non-Propotional Loading)[29].

3.7.3.1. Sabit Genlikte Yükleme (Constant Amplitude Loading)

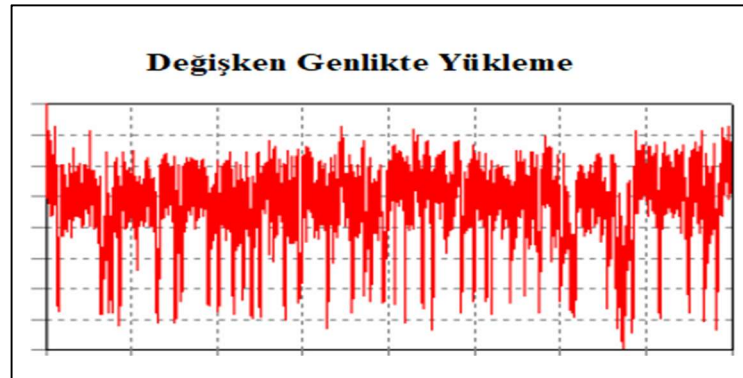
Bu yükleme de parçaya uygulanan maksimum ve minimum gerilmeler aynı büyüklüktedir ve buna “ Sabit Genlikli Yükleme ” denir ve şekil 3.22’ de gösterilmiştir [30].



Şekil 3.22: Tam Tekrarlı Sabit Genlikte Yükleme.

3.7.3.2. Değişken Genlikte Yükleme (Non-Constant Amplitude Loading)

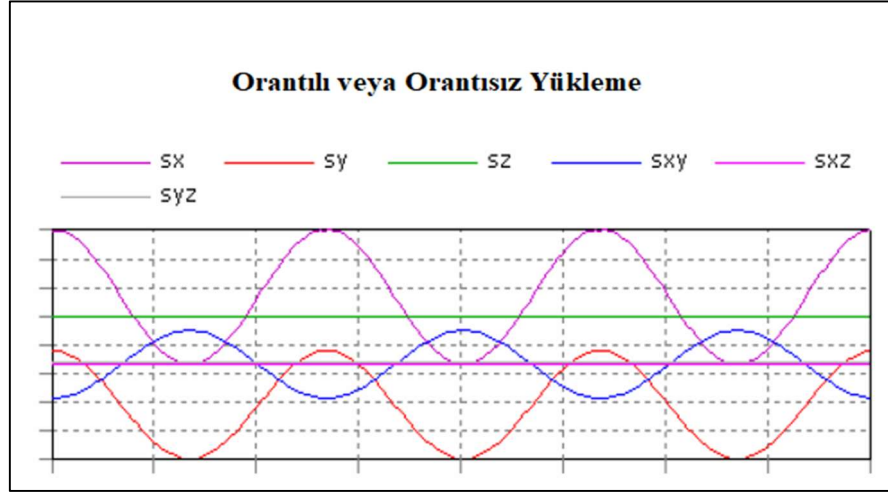
Bu yükleme de gerilme genlikleri ve ortalama gerilme hep farklıdır ve Şekil 3.23’ de gösterilmiştir [30].



Şekil 3.23: Değişken Genlikte Yükleme.

3.7.3.3. Orantılı veya Orantısız Yükleme (Proportional, Non-Proportional Loading)

Orantılı yüklemede, esas gerilmelerin oranı sabit olduğu ve zamanla değişmediği kabul edilir. Orantısız yüklemede ise gerilme bileşenleri ile ilgili herhangi bir bağlantı yoktur [21] ve şekil 3.24’de gösterilmiştir [30].



Şekil 3.24: Orantılı veya Orantısız Yükleme.

3.7.4 Emniyet katsayısı kavramı

Emniyet katsayısı en basit anlatımı ile malzemenin mukavemetinin parçada meydana gelen azami bileşik gerilmeye bölünmesiyle bulduğumuz sabit bir sayıdır [28]. Yorulma analizlerinde sistem için öngörülen bir emniyet katsayısı alınarak daha güvenilir yapılar oluşturulabilir.

Tablo 3.10: Emniyet katsayıları.

S=1,25.....1,5	Kontrol edilen şartlar, çok güvenilir malzeme, kuvvet değerleri kesin
S=1,5.....2	İyi bilinen malzemeler, sait ortam şartları, kuvvet değerleri kesin
S=2.....2,5	Sıradan malzemeler ve ortam şartları, normal yükler
S=2,5.....3	Daha az denenmiş malzemeler, normal işletme ve zorlanma durumundaki gevrek malzemeler
S=3.....4	Denenmemiş malzemeler, ortalama yük ve işletme koşulları
S=3.....4	İyi bilinen malzemeler, belirsiz ortam ve yükleme

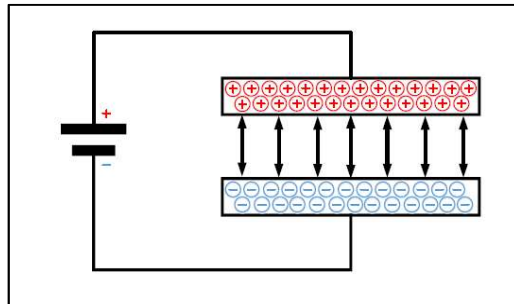
Tablo 3.10'da [28] belirtildiği gibi değişik sistemler için emniyet katsayıları verilmiştir. Bu çalışma için emniyet katsayısı 3 alınmıştır. Dolayısı ile tasarımlar içinden sadece 4. tasarım güvenli değildir çünkü polisilisyum akma dayanımı 1,45 GPa olup 4. tasarımda maksimum gerilme 945,16 MPa olarak hesaplanmıştır.

$1,45 / 0,945 = 1,53$ seçilen güvenlik katsayısının altında kaldığı için bu yapı güvenilir değildir.

3.8. Çekme voltajı (Pull in Voltage) hesapları

Mobil teknolojiler uzun zamandır RF anahtarlarını kullanmaktadırlar. Anahtarın temel işlevi aynı kalmasına rağmen, geçmişten farklı şekilde tasarlanmaktadır. Uzun süredir kullanılan elektronik ve mekanik anahtarların yerini alacak bir RF anahtarının tasarlanması ve üretilmesinde, MEMS teknolojilerinin kullanılması için çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışma, CMOS uyumlu çalışma voltajlarıyla daha yüksek RF gücünü işleyebilen bir RF MEMS anahtarı için bir tasarım ve üretim sürecini göstermektedir.

Anahtarın durumunu değiştirmek (on-off) için, anahtarın çalıştırma elektrotlarına çalıştırma voltajı uygulanır ve bu uygulama Şekil 3.25’ de gösterilmiştir [22]. Yüksek güç anahtarların tipik çalıştırma voltajları birkaç on volt ile yaklaşık yüz volt arasında değişir. Bu, anahtarın tasarımında önemli bir faktördür. Çünkü tek başına anahtarın diğer devrelerle uyumluluğunu belirler. Bazı durumlarda, çalıştırma voltajı yüksek olmasına rağmen, anahtarı ara yüz devresi ile uyumlu hale getirmek için voltaj ölçekleme devresi kullanılır. Bu yaklaşım pullar da çok güç tüketir. Çalıştırma voltajının büyüklüğünü etkileyen ana faktörler elektrot aralığı, çalıştırma elektrodu alanı ve iki elektrot arasındaki dielektrik malzemedir .



Şekil 3.25: Ön gerilim uygulandığında.

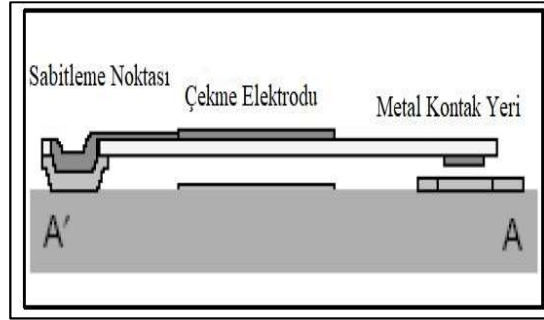
Örnek çekme gerilim değeri hesabı:

- L: Kiriş uzunluğu = 160 μm
- k: Yay katsayısı = 0.4658 N/m
- w: Kiriş genişliği = 6 μm
- d: Hava boşluğu = 2 μm
- h: Kiriş kalınlığı = 2 μm
- A: Elektrod alanı = 36 x 36 μm^2
- ϵ : Boş alanın elektriksel geçirgenliği = $8,85 \times 10^{-12}$ F/m
- $I = (w \times h^3) \div 12 = 4.0000 \times 10^{-24} \mu\text{m}^4$ [17]
- $k = (3 \times E \times I^3) \div L^3 = 0,4658$ [18]

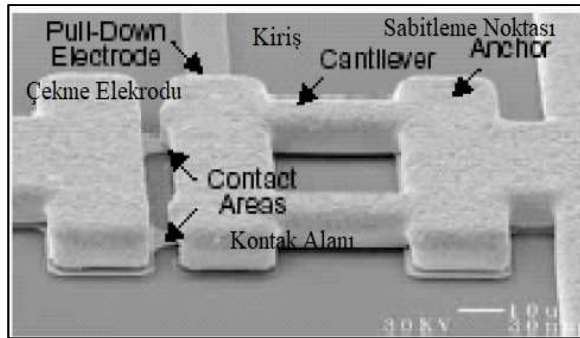
$$V (\text{çekme voltajı}) = \sqrt{(8 \times k \times (d^3)) / (27 \times \epsilon \times A)} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki değerler 3.5 eşitliğinde yerine yazılırsa çekme voltajı

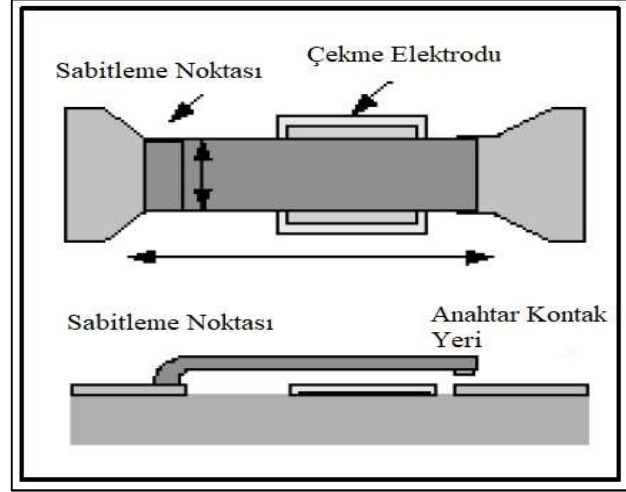
$V_{\text{çekme}} = 9,81$ V olarak hesaplanır.



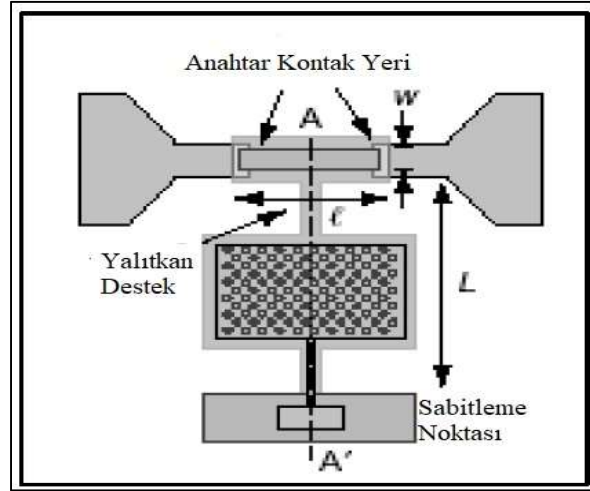
Şekil 3.26: Etkin Elektrod alan Görüntüsü-1.



Şekil 3.27: Etkin Elektrod alan Görüntüsü-2.



Şekil 3.28: Etkin Elektrod alan Görüntüsü-3.



Şekil 3.29: Etkin Elektrod alan Görüntüsü-4.

Şekil 3.26, şekil 3.27, şekil 3.28 ve şekil 3.30'da [8] elektrod alanları gösterilmiştir.

3.9. Kriterin karşılaştırılması

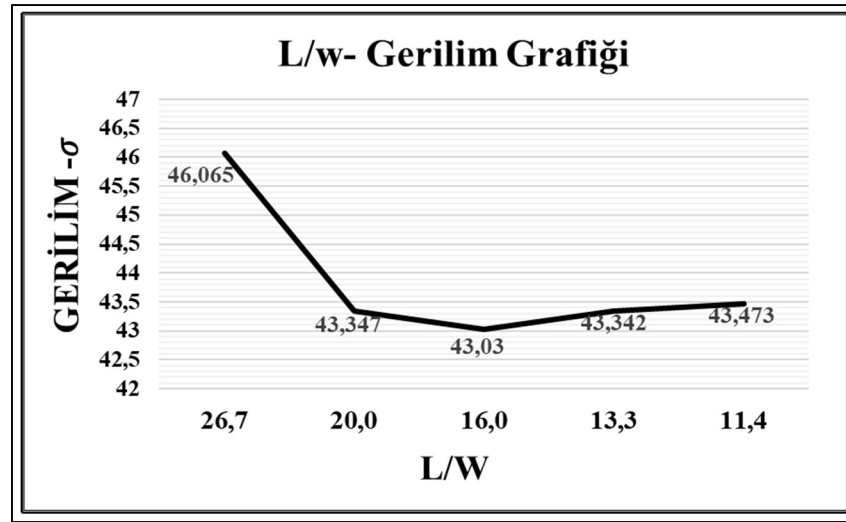
Yapılan analizler sonucunda RF MEMS tasarımını en verimli hale getirmek için bir model oluşturmak gerekmektedir. Aşağıda bir parametre sabit tutulup diğer parametreler için farklı değerlerde hesaplanan grafikler oluşturulmuştur ve bu sonuçlara göre yorumlar yapılmıştır.

3.9.1 Klasik geometri için yapılan çalışmalar

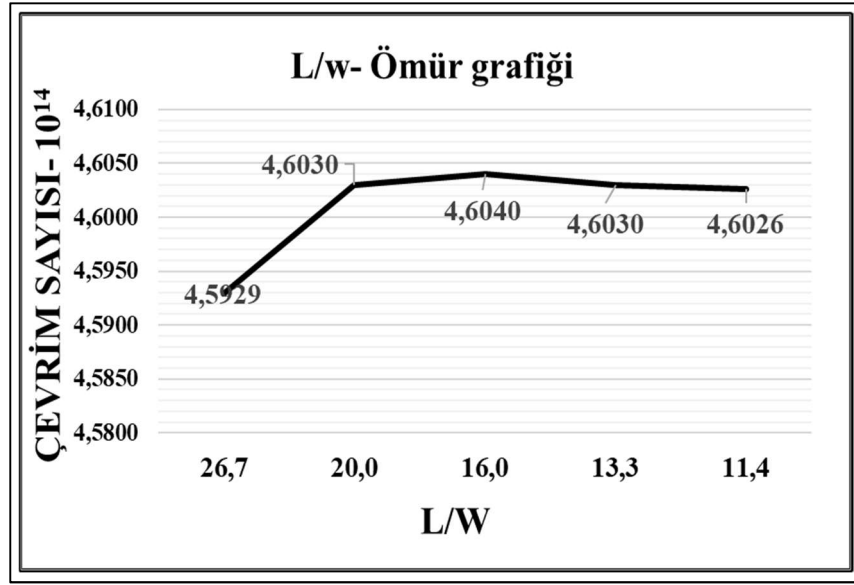
Burada kiriş uzunluğu (L), kiriş kalınlığı (h) 2 μm olarak sabit tutulup kiriş genişliğinin (w) farklı değerleri için hesaplar yapılmıştır. Buna göre yapılan analizler Tablo 3.8 ve Şekil 3.28 de verilmiştir.

Tablo 3.11: L/w oranı için Maksimum gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme gerilmesi değerleri.

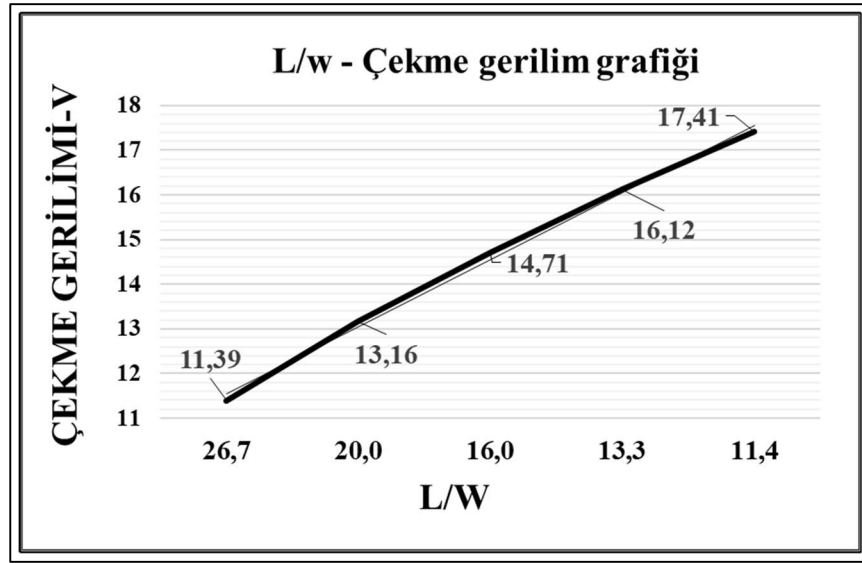
A TİPİ KİRİŞ		h = 2 μm	Maksimum gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim sayısı)	Çekme gerilmesi (V)
L=160	w= 6	L/w=26,66	46,065	$4,5929 \times 10^{14}$	11,39
L=160	w= 8	L/w=20	43,347	$4,603 \times 10^{14}$	13,16
L=160	w= 10	L/w=16	43,03	$4,604 \times 10^{14}$	14,71
L=160	w= 12	L/w=13,33	43,342	$4,603 \times 10^{14}$	16,12
L=160	w= 14	L/w=11,42	43,473	$4,6026 \times 10^{14}$	17,41



Şekil 3.30: L/w Oranı Gerilim Grafiği.



Şekil 3.31: L/w Oranı Ömür Grafiği.

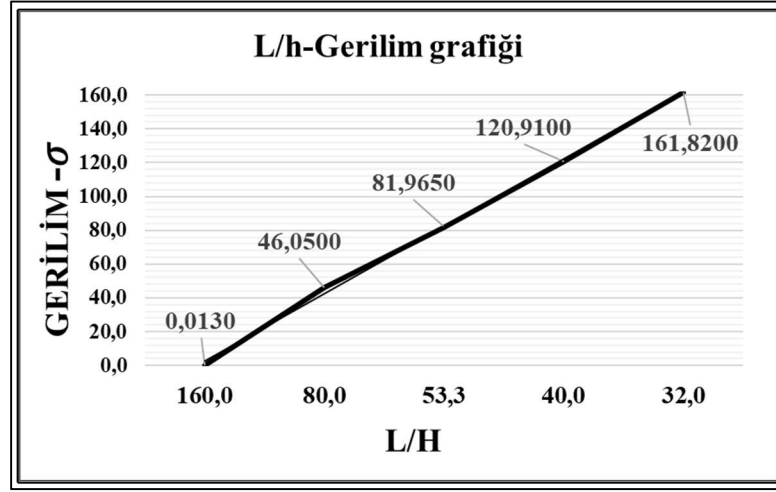


Şekil 3.32: L/w Oranı Çekme Gerilimi Grafiği.

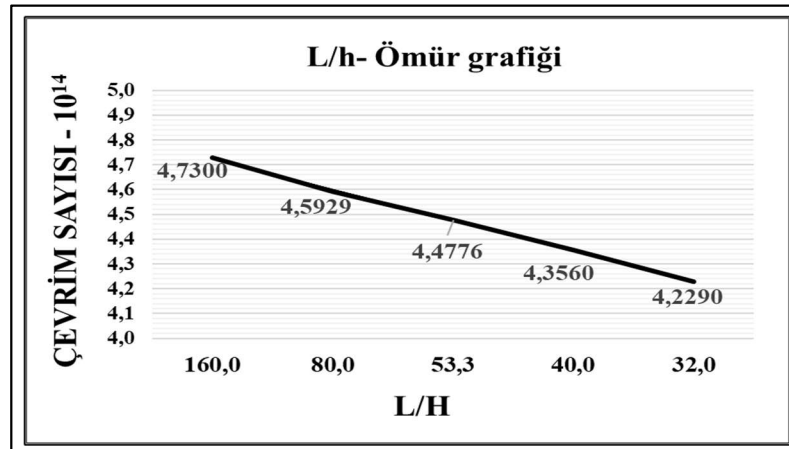
Burada kiriş uzunluğu (L) sabit tutulup kiriş kalınlığının (h) farklı değerleri için bir eğri oluşturulmaya çalışılmıştır. Kiriş genişliği (w) 6 μm olarak sabit alınmıştır.

Tablo 3.12: L/h oranı için Maksimum gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme gerilmesi değerleri.

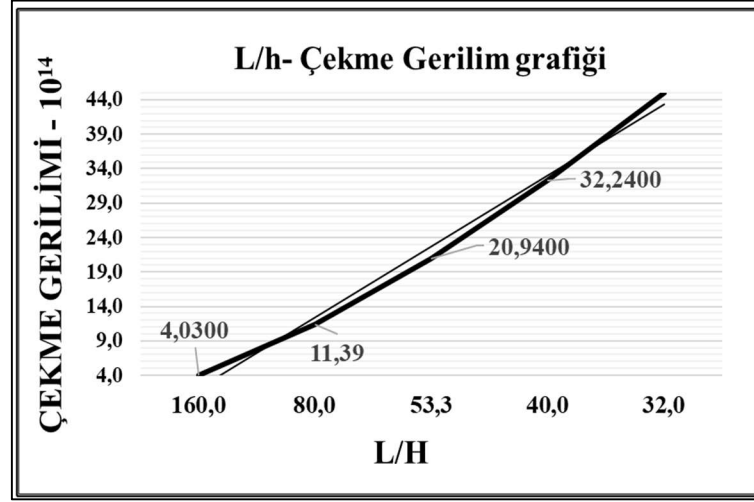
A TİPİ KİRİŞ (μm)		w= 6 μm	Maksimum gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim sayısı)	Çekme gerilmesi (V)
L=160	h= 1	L/h=160	19,189	$4,6815 \times 10^{14}$	4,03
L=160	h= 2	L/h=80	46,05	$4,5929 \times 10^{14}$	11,39
L=160	h= 3	L/h=53,33	81,965	$4,4776 \times 10^{14}$	20,94
L=160	h= 4	L/h=40	120,91	$4,356 \times 10^{14}$	32,24
L=160	h= 5	L/h=32	161,82	$4,2279 \times 10^{14}$	45,06



Şekil 3.33: L/h Oranı Gerilim Grafiği.



Şekil 3.34: L/h Oranı Ömür Grafiği

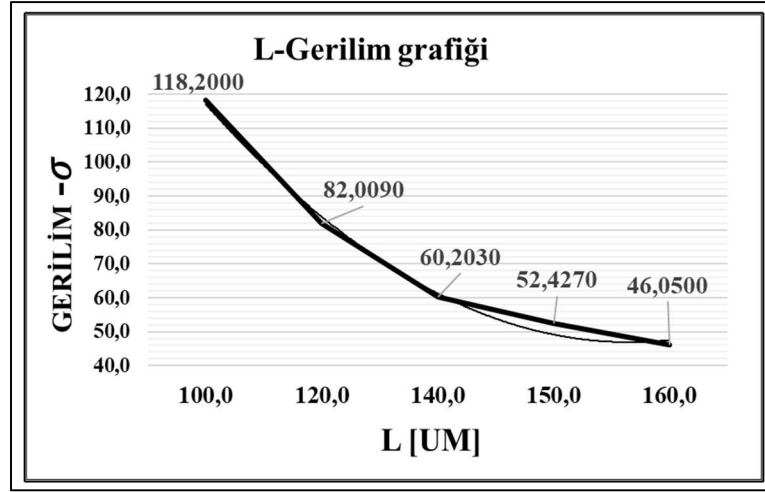


Şekil 3.35: L/h Oranı Çekme Gerilimi Grafiği.

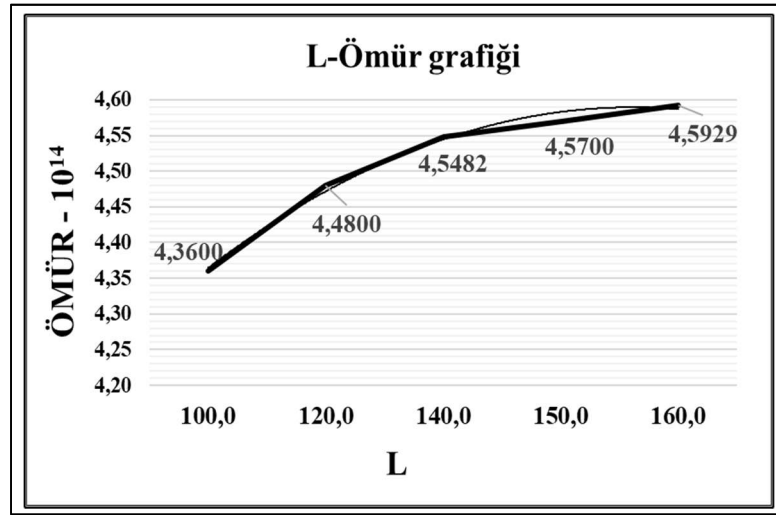
Burada kiriş genişliği (w) ve kiriş kalınlığı (h) sabit tutulup, kiriş uzunluğu (L) içi farklı değerlerde hesaplama yapılmıştır. Kiriş genişliği (w) 6 u ve kiriş kalınlığı (h) 2 μm olarak alınmıştır.

Tablo 3.13: L değişkeni için değerler.

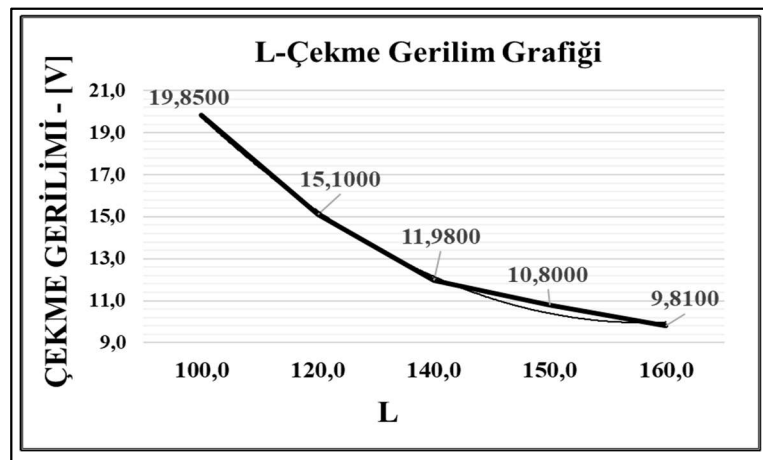
A TİPİ KİRİŞ (μm)		Maksimum gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim sayısı)	Çekme gerilmesi (V)
w=6, h=2	L=100	118,2	$4,3644 \times 10^{14}$	29,18
w=6, h=2	L=120	82,009	$4,4774 \times 10^{14}$	20,26
w=6, h=2	L=140	60,203	$4,5482 \times 10^{14}$	14,88
w=6, h=2	L=150	52,427	$4,5735 \times 10^{14}$	12,97
w=6, h=2	L=160	46,05	$4,5929 \times 10^{14}$	11,39



Şekil 3.36: L-Gerilim grafiği.

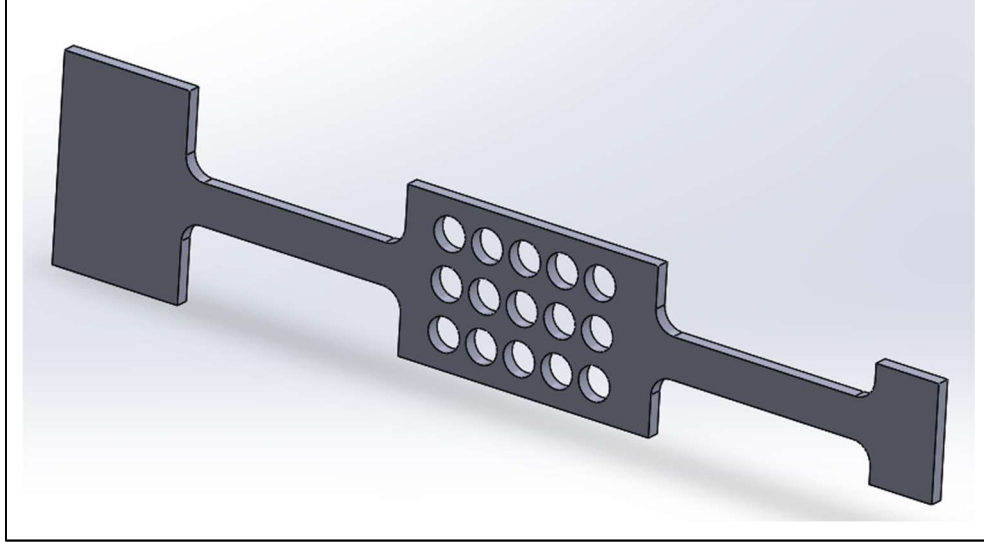


Şekil 3.37: L-Ömür grafiği.



Şekil 3.38: L-Çekme Gerilim Grafiği.

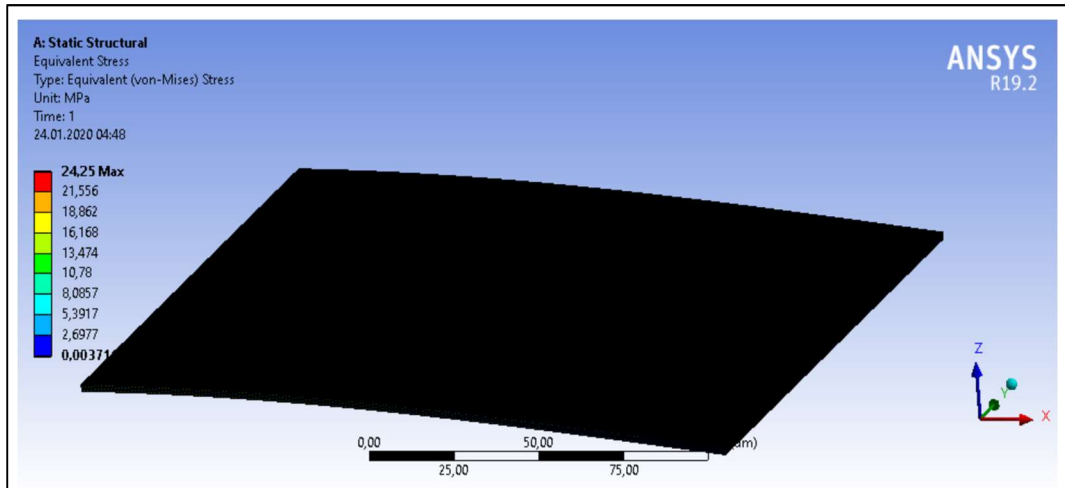
3.9.2 Değişik geometri için yapılan çalışmalar



Şekil 3.39: Değişik geometri çalışması (140 x 30 x 2 μm).

Tablo 3.14: Farklı geometri (140 x 30 x 2 μm) için Maksimum gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme gerilmesi değerleri.

A TİPİ KİRİŞ (μm)		Maksimum gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim Sayısı)	Çekme gerilmesi [V]
w=30, h=2	L=140	78,9	$4,4874 \times 10^{14}$	33,24



Şekil 3.40: Değişik geometri çalışması (200 x 200 x 2 μm).

Tablo 3.15: Farklı geometri (200 x 200 x 2 µm) için Maksimum gerilme (MPa), Minimum Ömür ve Çekme Gerilmesi değerleri.

A TİPİ KİRİŞ (µm)		Maksimum Gerilme (MPa)	Minimum Ömür (Çevrim Sayısı)	Çekme gerilmesi [V]
w=200, h=2	L=200	24,25	$4,6651 \times 10^{14}$	47,093

Yapılan değişik ölçülerin analizleri ışığında en uygun kiriş ölçüleri aşağıda ifade edilmiştir.

Kiriş uzunluğu (L) : 100-120-140-150-160 µm

Kiriş genişliği (w) : 6-8-10-12-14-24 µm

Kiriş kalınlığı (h) : 1 µm-2 µm

- L/w oranı düşük tutulmalı,

Kiriş uzunluğu (L) / Kiriş genişliği (w) = 160 µm (100 – 160 arası) / 24 µm (6 – 24 arası) = 6,667

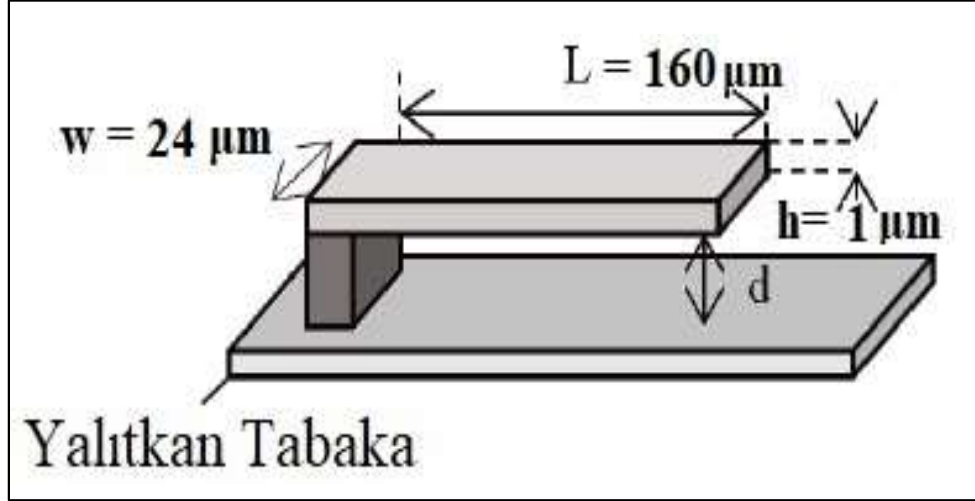
- L/h oranı yüksek tutulmalı,

Kiriş uzunluğu (L) / Kiriş kalınlığı (h) = 160 µm (100 – 160 arası) / 1 µm (1-2 arası) = 160

- L değeri yüksek tutulmalı,

Kiriş genişliği (w) / Kiriş kalınlığı (h) = 24 µm (6 – 24 arası) / 1 µm (1-2 arası) = 24

Yapılan optimizasyon sonucunda 160-24-1 µm ölçülerindeki geometrinin en uygun geometri olduğu görülmüştür.



Şekil 3.41: Önerilen tasarım geometrisi (160 x 24 x 1 μm).

4. KONSOL KİRİŞİN ÜRETİM SÜRECİ

Yarı iletken teknolojisi haberleşme, bilişim ve otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır ve bu alanlardaki gelişmeler aynı zamanda yarı iletken teknolojinin gelişimine bağlıdır. Yarı iletken teknolojisi temel olarak; optik yöntemler ve ince film kaplama teknolojileri (litografi) kullanılarak, kritik boyutun nanometre seviyesine inmesiyle birlikte gelişmektedir. Litografi prosesinin gelişimi sayesinde boyutların küçülerek birçok devrenin aynı anda üretilmesi, elektronik devrelerin ucuz ve az güç harcayan yapılar haline gelmesini sağlamıştır. Yarı iletken teknolojisinde, teknolojik seviyeyi belirleyen en önemli kriter tüm devredeki en küçük boyuttur ve kritik boyut olarak tanımlanır. Kritik boyutun küçülmesi daha hızlı çalışan devrelerin üretilmesini, iş kabiliyetinin artmasını, maliyetin düşmesini ve güç tüketiminin azalmasını sağlar ve kritik boyut küçüldükçe de litografi teknolojisindeki gelişmeler kaçınılmaz olmuştur. Günümüzde fotolitografi işlemi için tercih edilen yöntemlerden biri Ultraviyole (UV)-litografidir. Belirli bir dalga boyundaki UV ışık bir maske üzerinden, bu dalga boyundaki ışığa duyarlı, silisyum pul üzerine serilmiş olan fotoreziste (ışığa duyarlı polimer) iletilir. Maskenin üzerinde bulunan mikro ya da nano boyutlu şekiller, birbirini takip eden bir takım kimyasal işlemler sonunda yarı iletken üzerine transfer edilmiş olur [4].

Yarı iletken üretimi hem maliyetli hem de üretimi etkileyen çok fazla parametre olduğu için deneysel tasarım metodlarının, özellikle de Taguchi yönteminin sıklıkla kullanıldığı bir sektördür [26].

Konsol giriş tipi anahtarın malzemesi polisilisyum olup ölçüler mikron mertebesinde. Ayrıca bu anahtarların üretimi temiz odada gerçekleştirilmektedir. Partikül yapısının ayarlanabildiği ve mikropların ve başka parametrelerin girişini, minimum şekilde tutabilen, ayrıca diğer fiziksel koşulların kontrol edilebildiği yapılara temiz oda denir. Bu üretimlerde kullanılan bazı temiz odalar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de gösterilmiştir [4].

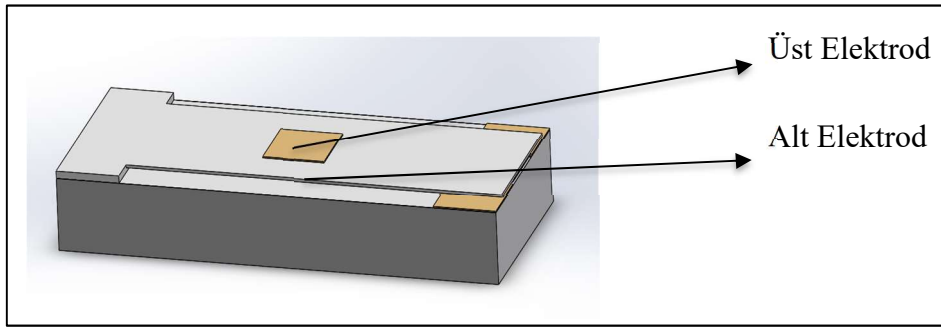


Şekil 4.1: Temiz Oda Genel Görünüm-1.



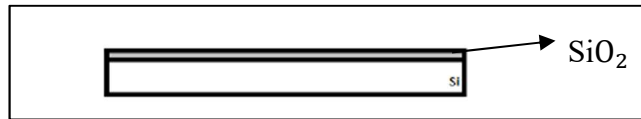
Şekil 4.2: Temiz Oda Genel Görünüm-2.

Bazı MEMS anahtarları tipik CMOS proseslerine uygun değildir. Bu çalışmada, polisilisyum konsol kiriş anahtarı üretim süreçleri açıklanmıştır. Ayrıca CMOS işlemini MEMS işlemiyle oldukça uyumluluk gösterir. Örneğin MEMS teknolojisinde, altın paralel plâka kapasitif alt elektrot için uygundur. Fakat CMOS çipinin iletkenliğini etkiler, bu nedenle bu çalışmada altın kullanılmayacaktır. Bu etki nedeniyle, katkılı polisilisyum alt elektrot için kullanılır. Eşik voltajını, rezonans frekansını ve maksimum kırılabilir mesafeyi belirleyen malzeme parametreleri, elastik modül, akma dayanımı ve dielektrik sabitidir.



Şekil 4.3: Elektrodların gösterildiği bir anahtar görüntüsü.

- 1.Adım : İlk olarak, silisyum pul kimyasal ıslak banyoda standart pul temizleme adımları kümesi (RCA) temizliği ile temizlenir.
- 2.Adım : Sonra pullar 900°C de O_2 ile $400 \text{ \AA}$ oksitlenir. Oksitlenme gerekli değildir, ancak nitrür ve silikon katman ara yüzü arasındaki gerilmeyi azaltır.



Şekil 4.4: SiO_2 tabakası oluşumu.

- 3.Adım : Oksitlemeden sonra yan duvar için LPCVD fırını ile Silisyum Nitrür (Si_3N_4) tabakası depolanır. Bu katman, altlık ile cihaz arasındaki dielektrik izolasyon gibi çalışır. Silisyum Nitrür tabakasının kalınlığı $1500 \text{ \AA}$ 'dır ve şekil 4.5'te gösterilmiştir [4].



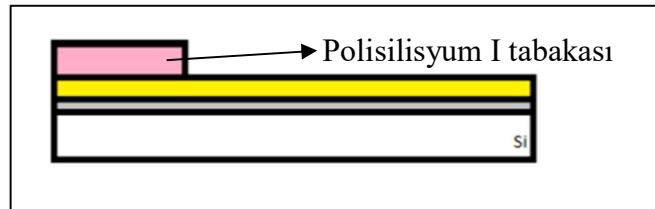
Şekil 4.5: Silisyum Nitrür (Si_3N_4) tabakası oluşumu.

- 4.Adım : Bu tabakanın üstünde, düşük basıçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) yöntemi ile 580°C de 100 mTorr da Polisilisyum tabakası depolanır (şekil 4.6) [4], katkılı polisilisyum I isimli $0.3\ \mu\text{m}$ kalınlığında polisilisyum oluşturulur.



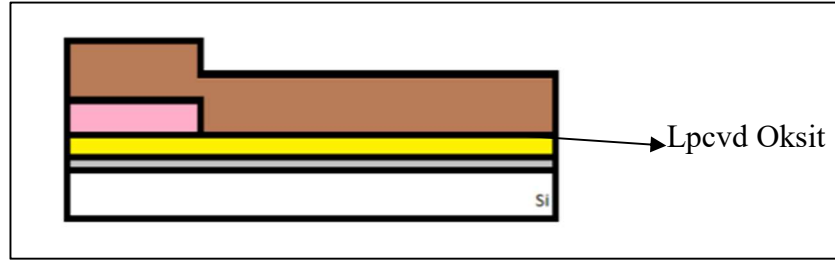
Şekil 4.6: Polisilisyum I tabakası oluşumu.

- 5.Adım : Ardından pullar fosfor (POCl_3) kaynağı ile katkılanır. Böylece polisilisyumun tane büyüklüğü değişir, Sonrasında tabaka direnci değeri yaklaşık $25\ \Omega / \text{cm}^2$ olur.
- 6.Adım : Ön yüz koruma ve arka yüz poli silme işlemi gerçekleştirilir.
- 7.Adım : Optik kontrol yapılır.
- 8.Adım : Pul temizliği yapılır.
- 9.Adım : Katkılı polisilisyum I tabakası, alt elektrot için fotolitografi kullanılarak ayarlanan ilk maske (dalga boyu $436\ \text{nm}$) ile şekillendirilir.
- 10.Adım : Daha sonra polisilisyum tabaka, reaktif ortamda iyon (RCI) aşındırma yöntemi ile aşındırılır (şekil 4.7) [4].



Şekil 4.7: Polisilisyum I tabakası aşındırma.

- 11.Adım : Polimer alma işlemi yapılır.(ICT yada O2 plazma)
- 12.Adım : Rezist silme işlemi gerçekleştirilir.
- 13.Adım : Optik kontrol yapılır.
- 14.Adım : Boyut ölçme gerçekleştirilir.
- 15.Adım : Pul temizliği yapılır.
- 16.Adım : LPCVD yöntemi ile silisyumdioksit tabakası depolanır 740° C' de 200 mTorr da, 2 µm kalınlığında LPCVD oksit oluşturulur (şekil 4.8) [4].



Şekil 4.8: LPCVD Oksit tabakası oluşumu.

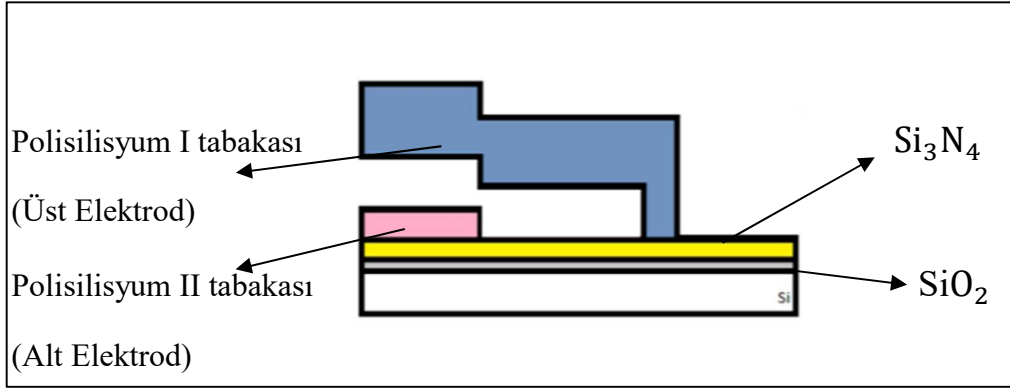
- 17.Adım : Kiriş şekillendirme gerçekleştirilir.
- 18.Adım : Kiriş aşındırma gerçekleştirilir (şekil 4.9) [4].



Şekil 4.9: LPCVD Oksit tabakası aşındırma.

- 19.Adım : Rezist silme işlemi gerçekleştirilir.
- 20.Adım : Pul temizliği yapılır.
- 21.Adım : Üst elektrodu oluşturmak için, LPCVD yöntemi ile 580 ° C' de 100 mTorr da polisilisyum depolanır (şekil 4.10) [4].

- 32.Adım : Rezist silme işlemi gerçekleştirilir.
- 33.Adım : Pul temizliği yapılır.
- 34.Adım : Al Metal depolama gerçekleştirilir.
- 35.Adım : Metal şekillendirme gerçekleştirilir.
- 36.Adım : Metal aşındırma gerçekleştirilir.
- 37.Adım : Rezist silme işlemi gerçekleştirilir.
- 38.Adım : Metal tavlama işlemi gerçekleştirilir.
- 39.Adım : Metal koruma işlemi gerçekleştirilir.
- 40.Adım : Oksit aşındırma işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 4.12: Tamamlanmış Mems Anahtarı.

- 41.Adım : Metal koruyucu silme işlemi gerçekleştirilir ve şekil 4.12’de [4] gösterildiği gibi RF Mems anahtarının üretimi tamamlanır .

5. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu tezin temel amacı, MEMS konsol giriş anahtarının tasarımı ve analizinin yapılmasıdır.

Aşağıda yapılan analizler sonucunda sınır koşulları (sabitlenme yeri ve 2 μm yer değiştirme) belirlenmiştir.

Elektrostatik olarak yapılan analizler sonucunda, sistemdeki elektrostatik kuvvetten maksimum voltaj değeri hesaplanmıştır bu da hava boşluğunun başlangıç koşulunun 1/3 ü olduğu durumda meydana gelir. Konsol giriş için farklı geometriler kullanılmıştır.

Mekanik olarak yapılan analizler sonucunda:

- L/w oranı ile ömür ters orantılıdır yani L/w oranı küçüldükçe gerilme değeri azalmıştır, dolayısı ile yapı ömrü uzamıştır.
- L/w oranı azaldıkça çekme gerilim değeri artmıştır.
- L/h oranı arttıkça gerilme azalır dolayısı ile ömür artmıştır.
- L/h oranı arttıkça çekme gerilim değeri azalmıştır.
- L arttıkça (w, h sabit) gerilme azalır, ömür artmıştır.
- L arttıkça (w, h sabit) çekme gerilim değeri azalmıştır.

Bu sınır koşullarına (sabitlenme yeri ve 2 μm yer değiştirme göz önüne alınarak) bağlı olarak en uygun tasarım normal şartlarda 8 nolu anahtar modelidir. Bu model ölçüleri 140-30-1 μm dir. Fakat yukarıdaki çıkarımlar göz önüne alınarak yapılan optimizasyon sonucunda 160-24-1 μm ölçülerindeki geometrinin en uygun geometri olduğu görülmüştür.

Daha sonraki çalışmalarda en uygun model farklı malzemeler ile kaplanarak hem yorulma ömründe, hem de elektriksel iletkenliğinde kazanım sağlanmaya çalışılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Gong Y., Zhang L., Zhao F., Meng C., Lv L., (2009), “Design Optimization of Cantilever Beam MEMS Switch”, International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Chengdu, China, 9-12 August 2009.
- [2] George R., Kumar C R S., Gangal S. A., (2018) “Design and Simulation of low actuation voltage Cantilever RF MEMS switches suitable for Reconfigurable antenna applications”, International Journal of Circuits and Electronics, 2367-8879, 19-28.
- [3] O'Brien G., Monk D J., Lin L., (2001), “MEMS cantilever beam electrostatic pull-in model”, International Symposium on Microelectronics and Mems, Proc. SPIE 4593, Design, Characterization, and Packaging for MEMS and Microelectronics II. Adelaide, Australia, 19 November 2001.
- [4] Ertanır A. Ö., (Temmuz 2011), “Design And Simulation of Electrostatically Actuated MEMS Cantilever Beam Switch”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Technical University Institute of Science and Technology.
- [5] Jadaan O. M., Bagdahn J., Nemeth N. N., Sharpe W N., (2003), “Probabilistic Weibull Behavior and Mechanical Properties of MEMS Brittle Materials”, Journal of Materials Science 38, 0022–2461, 4087 - 4113.
- [6] Hung J. N., Hocheng H., (2012), “Frequency effects and life prediction of polysilicon microcantilever beams in bending fatigue”, Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS, 021206, 1-6.
- [7] Özçakır E., (2010), “RF MEMS Aygıtlar için Dikey/Yatay Beslemeli Paket Yapısının Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [8] Lakamraju N. V., Phillips S. M., (2005), “Bi-stable RF MEMS switch with low actuation voltage”, Proceedings - 2005 International Symposium on Microelectronics, IMAPS 2005 Philadelphia, PA, United States, 25-29 Sep 2005.
- [9] Saxena A., Agrawal V. K., (2016), “Comparative Study of Cantilever RF MEMS Switch”, International Conference on Recent Trends in Engineering and Material Sciences (ICEMS-2016), 2214-7853, 10328–10331.
- [10] Jaafar H., Nan F. L., Yunus N. A. M., (2011), “Design and simulation of high performance RF MEMS series switch”, 2011 IEEE Regional Symposium on Micro and Nano Electronics, Kota Kinabalu, Malaysia, 28-30 Sept. 2011.
- [11] Kulkarni S. G., (2015), “A Novel Design of Cantilever RF MEMS Series Switch”, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE), 2278-2834, 42-47.

- [12] Lysenko E. I., Tkachenko A. V., Sherova E. V., Nikitin A. V., (2018), “Analytical Approach in the Development of RF MEMS Switches”, 2013 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), Barcelona, Spain, 16-18 April 2013.
- [13] İkizoğlu S., Ertanır A. Ö., (2014), “Design considerations of a MEMS cantilever beam switch for pull-in under electrostatic force generated by means of vibrations”, Jve International Ltd. Journal of Vibroengineering, 392-8716, 1106-1113.
- [14] Søråsen O., (2012), “Inf5490 Rf Mems Ln05: Rf Mems Switches, I”, Department of Informatics, UoO, Norwegian.
- [15] Satyanarayana T., Babu M. V., Lakshmi D. V., Reddy D. V. R. K. , (2016), “Modeling and Deformation Analysis of Piezoresistive Cantilever for Bio-sensing Applications”, Indian Journal of Science and Technology, 0974-5645, 1-7.
- [16] Acheli A., Serhane R., (2015), “Mechanical Behavior Simulation of MEMS-based Cantilever Beam Using COMSOL Multiphysics”, 4th International Congress in Advances in Applied Physics and Materials Science (APMAS 2014), Fethiye, Turkey, 24-27 April 2014.
- [17] Gorthi S., Mohanty A., Chatterjee A., (2006), “Cantilever beam electrostatic MEMS actuators beyond pull-in”, Journal of Micromechanics and Microengineering, 0960-1317, 1800-1810.
- [18] Dr. Thomas B. A., NarayanaSwamy G., Komalakumari, (2018), “Design of Highly Sensitive MEMS cantilever beam Using COMSOL Multiphysics” International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER), 2455-1457, 160-164.
- [19] Sharpe W. N., Jr., Hemker K. J., (2004), “MECHANICAL PROPERTIES OF MEMS MATERIALS”, AFRL-IF-RS-TR-2004-76 Final Technical Report, Dept of Mechanical Engineering, Johns Hopkins University, USA.
- [20] Dr. Celep M., Sakarya H. , (2019), “S-Parametre Ölçümleri” Ume, Tübitak, Türkiye.
- [21] Chaush Y., (2008), “Ansys Workbench ile Yorulma Analizi”, Makine Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Türkiye.
- [22] Al-Amin M. A., (2017), “An Investigation in Optimising RF MEMS Switching for Integrated Mobile Wireless Systems”, Doktora Tezi, Department of Engineering and Built Environment Anglia Ruskin University.
- [23] Sharpe. W. N., Jr., Yuan B., Vaidyanathan R., Edwards R. L., (1997), “Measurements of Young’s Modulus, Poisson’s Ratio, and Tensile Strength of Polysilicon”, Proceedings of the Tenth IEEE International Workshop on Microelectromechanical Systems, 424-429, Nagoya, Japan, 26-30 Jan. 1997.

- [24] Sha R., Ghatak R., Mahapatra R., (2013), “Impact of Beam Thickness and Air Gap on the Performance of Cantilever MEMS Switch”, International Journal of Electronics & Communication Technology, 2230-7109, 207-210.
- [25] Ünal B. (2008), “Jib Portal Kren Konstrüksiyonun Modellenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] Özdoğan Z., (Mayıs – 2014), “Polisilisyum Tabaka Üzerine Fotolitografi Yöntemi ile 0,3 μm Şekillendirme Prosesinin Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [27] Ahmed A. (December-2016), “Design, Simulation and Analysis of Piezoresistive Microcantilever for Biosensing Applications”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [28] Temiz V., “Makina Elemanlarının Sürekli Mukavemete Göre Hesabı”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye.
- [29] Özdemir N. Ö., (2009), “Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yorulma Mekaniği ve Uygulamaları”, Makine Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Türkiye.
- [30] Web 1, (2019), <https://www.serdarkorkut.com/2017/07/03/yorulma-nedir/>, (Erişim Tarihi: 15/02/2019).
- [31] Cotia A. Y., Bhatt V., (2012) “Design and Simulation of Micro-Cantilever Beams for variable capacitor”, International Conference & Workshop on Recent Trends in Technology, (TCET) 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Rıza Melih Köksallı 1986 yılında İstanbul’da doğdu. 2008 yılında Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü başarıyla tamamlamıştır. 2016 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. Ayrıca TÜBİTAK UEAKE bölümüne bağlı Yital bölümünde araştırmacı olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Köksallı R. M., Öktem A. S., (2019), “MEMS Cihazlarında Kullanılan RF MEMS Konsol Kiriş Anahtarın Statik Ve Yorulma Analizi”, MAS 10. Uluslararası Matematik-Mühendislik-Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, İzmir, Türkiye, 14-15 Aralık 2019.