

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI
ELEKTRONİK BİLİM DALI

HEDEF ANALİTLERİN TESPİTİ İÇİN KULLANILABİLECEK
MEMS KAPASİTİF REZONATÖR GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET KAYA

DENİZLİ, ARALIK - 2021

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI
ELEKTRONİK BİLİM DALI



HEDEF ANALİTLERİN TESPİTİ İÇİN KULLANILABİLECEK
MEMS KAPASİTİF REZONATÖR GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET KAYA

DENİZLİ, ARALIK - 2021

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 116E231 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

MEHMET KAYA

ÖZET

HEDEF ANALİTLERİN TESPİTİ İÇİN KULLANILABİLECEK MEMS KAPASİTİF REZONATÖR GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET KAYA

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRONİK BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ SERDAR TEZ)

DENİZLİ, ARALIK - 2021

MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapıları ile kütle algılama uygulamaları son zamanların en popüler araştırma konularından biri haline gelmiştir. Bu yapılar, mikron ölçekteki boyutları ve rezonans çalışma modları sayesinde son derece hassas bir şekilde kütle algılaması yapmaktadırlar. Gelişmiş algılama özelliklerinin yanı sıra, hızlı tepki, düşük güç tüketimi ve entegre devrelerle uyumluluk gibi avantajları da mevcuttur. Bu tez çalışmasında, kütle algılama uygulamalarında kullanılabilecek bir MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının tasarımı, üretimi ve benzetim çalışmaları sunulmuştur. İlk aşamada, MEMS rezonatör yapısının tasarımı yapılmıştır. Ardından, tasarım parametrelerine göre önce teorik analiz, sonrasında da Elmer FEM yazılımı kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar doğrultusunda ilk olarak modal analiz ile yapının rezonans frekansları belirlenmiştir. Sonrasında yapının farklı DC kutuplama gerilimlerindeki statik bükülme karakteristiği incelenmiştir. Son olarak da literatürde ilk kez MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve simülasyon işleminin ardından MEMS rezonatör yapısı ODTÜ MEMS Merkezi'nde ürettirilmiştir. Üretim sonrasında ise Pamukkale Üniversitesi MEMS Laboratuvarı'nda üretilen yapının frekans testleri yapılmıştır. MEMS yapısının üretim sonrası karakteristiği, frekans testleri ile elde edilen deneysel veriler üzerinden parametre çıkarımı yapılarak incelenmiştir. Parametre çıkarımları sonucunda rezonatör yapısının tasarım parametreleri güncellenmiş ve ardından teorik analiz ile benzetim çalışmaları tekrarlanmıştır. Böylece, önerilen FEM modeli MEMS kapasitif tarak parmak rezonatörün frekans yanıtı için doğrulanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: MEMS, Elmer FEM, Parametre Çıkarımı, Kapasitif Rezonatör, Sonlu Elemanlar Metodu, Frekans Analizi.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A MEMS CAPACITIVE RESONATOR USABLE FOR DETECTION OF THE TARGET ANALYTE

MSC THESIS

MEHMET KAYA

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
ELECTRONIC SCIENCE
(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. SERDAR TEZ)**

DENİZLİ, DECEMBER 2021

Recently, mass sensing applications with MEMS comb drive capacitive resonator structures have become one of the most popular research topics. These structures can precisely detect mass amount due to its micron size and resonance modes. In addition to advanced detection properties, these structures also have many advantages such as fast response, low power consumption and compatibility with integrated circuits (ICs). In this thesis, the design, fabrication and simulation studies of the MEMS comb drive capacitive resonator structure which can be usable in the mass sensing applications are presented. In the first stage of the thesis study, the MEMS resonator structure is designed. Then, with respect to the design parameters, the theoretical analysis and simulation studies using Elmer FEM software are realized. In the FEM analyses, firstly, the resonance frequencies of the MEMS structure are determined by modal analysis. Afterwards, the static bending characteristic of the resonator structure at different DC bias voltages are investigated by the static analysis. Finally, for the first time in the literature, frequency analyzes are performed for the MEMS comb finger capacitive resonator structure using the finite element method. After the design and simulation studies, the MEMS resonator structure is produced at METU MEMS Center. The frequency tests of the produced MEMS resonator structure are realized in Pamukkale University MEMS Laboratory. The post-manufacture characteristic of the MEMS resonator structure is investigated by parameter extraction from the experimental data obtained by frequency tests. As a result of the parameter extractions, the design parameters of the resonator structure are updated and then the theoretical analysis and simulation studies are repeated. Thus, the proposed FEM model is verified for the frequency response analyses of MEMS comb drive structure.

KEYWORDS: MEMS, Elmer FEM, Parameter Extraction, Capacitive Resonator, Finite Element Method, Frequency Analysis.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
Sayfa	v
TABLO LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 MEMS Türleri	3
1.1.1 Mikro-sensörler.....	3
1.1.1.1 Piezorezistif Sensörler.....	3
1.1.1.2 Piezoelektrik Sensörler.....	3
1.1.1.3 Kapasitif Sensörler	4
1.1.1.4 Rezonatörler	4
1.1.1.4.1 Rezonans	4
1.1.2 Mikro-aktüatörler	6
1.1.2.1 Piezoelektrik Aktüatörler	6
1.1.2.2 Elektromanyetik Aktüatörler.....	6
1.1.2.3 Elektrotermal Aktüatörler	7
1.1.2.4 Elektrostatik Aktüatörler.....	7
1.2 Yaygın MEMS Yapıları	8
1.2.1 Mikro-kiriş Yapıları	9
1.2.2 Mikro-köprü Yapıları.....	9
1.2.3 Asılı MEMS Yapıları.....	10
1.3 MEMS Yapılarının Fabrikasyonu	11
1.3.1 Gövde Mikro-işleme	11
1.3.2 Yüzey Mikro-işleme	12
1.4 Yaygın MEMS Materyalleri.....	13
2. MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR TEORİSİ....	15
2.1 Yay Sabiti Tahmini	20
2.2 Sönümlenme Mekanizmaları.....	22
2.3 Elektrostatik Kapasitif Harekete Geçirme.....	23
2.4 Elektrostatik Yay Yumuşaması Etkisi.....	28
2.5 MEMS Kapasitif Rezonatör Devre Modeli	28
2.6 Elektrostatik Kapasitif Algılama	32
2.7 Kütle Artışı Sebebiyle Frekans Kayması	36
2.8 Parametre Çıkarımı.....	37
2.8.1 Yay İncelmesi Hesabı	37
2.8.2 Elektriksel Eşdeğer Devre Parametreleri	38
3. MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR YAPISININ TASARIMI, TEORİK ANALİZİ VE FEM ANALİZLERİ .43	
3.1 MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Teorik Analizi	44
3.2 Tasarım Parametrelerine Göre MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının FEM Analizleri	51

3.2.1	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının CAD Çizimi	51
3.2.2	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısına Ait 3-Boyutlu Modelin Ağ Yapısı Formuna Dönüştürülmesi	56
3.2.3	Elmer FEM Yazılımı ile MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Modal Analizi	58
3.2.4	Elmer FEM Yazılımı ile MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Statik Analizi	60
3.2.5	Elmer FEM Yazılımı ile MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Frekans Analizi	64
3.2.6	Elmer FEM Yazılımı İçin Kullanılan Algoritmaların Doğruluk Çalışmaları	71
4.	MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR YAPISININ ÜRETİMİ	80
5.	FREKANS TESTİ VE DENEYSEL SONUÇLAR.....	86
6.	PARAMETRE ÇIKARIMI SONUÇLARINA GÖRE GÜNCELLENEN MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR YAPISININ TEORİK ANALİZİ VE FEM ANALİZLERİ	90
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	100
8.	KAYNAKLAR.....	105
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	113

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Örnek bir mikro-kiriş yapısına ait SEM görseli (Suter ve diğ. 2011).....	9
Şekil 1.2: Örnek bir mikro-köprü yapısına ait SEM görseli (Rochus ve diğ. 2009).....	10
Şekil 1.3: Örnek bir asılı MEMS yapısına ait SEM görseli (Gupta 2000).....	11
Şekil 2.1: Örnek bir MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı.....	15
Şekil 2.2: Kütle-yay-sönümleyici sistemi	16
Şekil 2.3: (a) Kılavuzsuz yay yapısı (b) Kılavuzlu yay yapısı	21
Şekil 2.4: Paralel levha kapasitör yapısı ve bu levhaya ait uzunluk tanımları ..	24
Şekil 2.5: Örnek bir seri RLC devresi	29
Şekil 2.6: MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel terminalleri..	31
Şekil 2.7: MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel terminallerinin birleştirilmiş eşdeğer devresi	31
Şekil 2.8: MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel terminalleri ve algılayıcı kısmın elektriksel karşılığı.....	33
Şekil 2.9: Transempedans yükseltici devresi	35
Şekil 2.10: Transempedans yükseltici devresi	35
Şekil 2.11: MEMS rezonatör yapısına ait elektriksel eşdeğer devre	39
Şekil 2.12: Seri RLC devresine ait örnek bir kondüktans-frekans grafiği	40
Şekil 2.13: Seri RLC devresine ait örnek bir süseptans-frekans grafiği	41
Şekil 3.1: Tasarlanan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının 2-boyutlu gösterimi	44
Şekil 3.2: Tasarım parametrelerine göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının teorik dinamik yer değiştirme – frekans grafiği ($VDC = 35 V$ & $Vac = 2 V$)	46
Şekil 3.3: Tasarım parametrelerine göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının teorik kapasite – frekans grafiği ($VDC = 35 V$ & $Vac = 2 V$)	46
Şekil 3.4: Teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kondüktans – frekans grafiği ($Q = 100$).....	48
Şekil 3.5: Teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde süseptans – frekans grafiği ($Q = 100$).....	48
Şekil 3.6: Teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde elektriksel eşdeğer devreye ait eşdeğer kapasite – frekans grafiği ($Q = 100$)	49
Şekil 3.7: Şekil 2.10'da verilen eşdeğer devrenin kazanç ve fazının frekansa göre değişimi	50
Şekil 3.8: Şekil 2.10'da verilen eşdeğer devrenin çıkış geriliminin geçiş (transient) analizi sonucu	50
Şekil 3.9: Üretim için hazırlanan maske setindeki tarak parmak tasarımı	52
Şekil 3.10: Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analiz için sadeleştirilmiş tarak parmak tasarımı	52
Şekil 3.11: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait 2-boyutlu CAD çizimi	53

Şekil 3.12: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı ve hava katmanına ait 2-boyutlu CAD çizimi	54
Şekil 3.13: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait 3-boyutlu CAD çizimi	55
Şekil 3.14: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait sadeleştirilmiş 3-boyutlu CAD modeli.....	56
Şekil 3.15: Aynı sınır koşullarına sahip grupların sadeleştirilmiş 3-boyutlu modelde gösterimi	57
Şekil 3.16: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının sadeleştirilmiş 3-boyutlu modeline ait ağ yapısı çıktısı	58
Şekil 3.17: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin birinci mod rezonans frekansı çıktısı	59
Şekil 3.18: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin ikinci mod rezonans frekansı çıktısı	59
Şekil 3.19: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin üçüncü mod rezonans frekansı çıktısı	60
Şekil 3.20: Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analiz algoritması.	62
Şekil 3.21: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analizine ilişkin statik yer değiştirme – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması	63
Şekil 3.22: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analizine ilişkin kapasite – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması.....	64
Şekil 3.23: Elmer FEM yazılımı için geliştirilen frekans analizi algoritması... 68	68
Şekil 3.24: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme – frekans grafiği ($V_{DC} = 35 V$ & $V_{ac} = 2 V$).....	69
Şekil 3.25: Elmer FEM yazılımı için frekans analizi sonuçlarına göre kapasite hesabı algoritması.....	70
Şekil 3.26: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen kapasite hesabı analizine ilişkin kapasite – frekans grafiği	71
Şekil 3.27: Elmer FEM yazılımı için geliştirilen algoritmaların doğruluk çalışmaları için kullanılan giriş rezonatör yapısı (Bannon ve diğ. 2000)	72
Şekil 3.28: Şekil 3.27’de verilen giriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde statik elektrostatik kuvvet çıktısı	73

Şekil 3.29: Şekil 3.27’de verilen giriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde statik yer değiştirme çıktısı.....	73
Şekil 3.30: Şekil 3.27’de verilen giriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kapasite çıktısı.	74
Şekil 3.31: Şekil 3.27’de verilen giriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen modal analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde rezonans frekansı çıktısı.	75
Şekil 3.32: Şekil 3.27’de verilen giriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme çıktısı ($V_{DC} = 10 V, V_{ac} = 3 mV, E = 150 GPa$)....	76
Şekil 3.33: Şekil 3.27’de verilen giriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme çıktısı ($V_{DC} = 35 V, V_{ac} = 100 mV, E = 160 GPa$)..	76
Şekil 3.34: Şekil 3.27’de verilen giriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme çıktısı ($V_{DC} = 35 V, V_{ac} = 100 mV, E = 157 GPa$)..	77
Şekil 4.1: Maske setine ait çapa yapıları.	80
Şekil 4.2: Maske setine ait metal yollar.	81
Şekil 4.3: Tasarlanan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının maske seti.	81
Şekil 4.4: SOI pul piranha çözeltisi ile temizlenir.	82
Şekil 4.5: SOI pul üzerine fotodirenç kaplanır.....	82
Şekil 4.6: Fotodirenç şekillendirilir.	82
Şekil 4.7: SOI pul DRIE yöntemi ile aşındırılır.	82
Şekil 4.8: Cam pul piranha çözeltisi ile temizlenir.	82
Şekil 4.9: Cam pul üzerine Au (altın) kaplanır.	82
Şekil 4.10: Au üzerine fotodirenç kaplanır.	82
Şekil 4.11: Au üzerindeki fotodirenç şekillendirilir.....	82
Şekil 4.12: Au aşındırılır.	83
Şekil 4.13: Cam aşındırılır.	83
Şekil 4.14: Fotodirenç ve Au aşındırılır.	83
Şekil 4.15: Aşındırılan cam pul üzerine tekrar Au kaplanır.....	83
Şekil 4.16: Aşındırılmış cam pul üzerindeki Au fotodirenç ile kaplanır.	83
Şekil 4.17: Aşındırılmış cam pul üzerindeki fotodirenç şekillendirilir.....	83
Şekil 4.18: Aşındırılmış cam pul üzerindeki Au aşındırılır.	83
Şekil 4.19: Aşındırılmış cam pul üzerindeki fotodirenç aşındırılarak metal yollar oluşturulur.	83
Şekil 4.20: SOI ve cam pul anodik olarak yapıştırılır.	84
Şekil 4.21: SOI pulun alt yüzeyi DRIE yöntemi ile aşındırılır.	84
Şekil 4.22: SiO ₂ tabakası aşındırılır.	84
Şekil 4.23: a) MSOG yöntemi ile üretilen pul. (b) MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının optik görüntüsü. (c) MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının SEM görüntüsü.	85
Şekil 5.1: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının frekans testleri için oluşturulan test düzeneği.....	86
Şekil 5.2: Frekans testlerine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kondüktans – frekans grafiği.....	88

Şekil 5.3: Frekans testlerine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde süseptans – frekans grafiği.	88
Şekil 5.4: Frekans testlerine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kapasite – frekans grafiği.	89
Şekil 6.1: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde dinamik yer değiştirme – frekans grafiği.....	91
Şekil 6.2: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kapasite – frekans grafiği.	92
Şekil 6.3: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kondüktans – frekans grafiği.	93
Şekil 6.4: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde süseptans – frekans grafiği.	93
Şekil 6.5: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde elektriksel eşdeğer devreye ait eşdeğer kapasite – frekans grafiği.	94
Şekil 6.6: Güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin birinci mod rezonans frekansı çıktısı	95
Şekil 6.7: Güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin ikinci mod rezonans frekansı çıktısı.....	95
Şekil 6.8: Güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin üçüncü mod rezonans frekansı çıktısı	96
Şekil 6.9: Güncellenen tasarım parametrelerine göre Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analize ilişkin statik yer değiştirme – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması...	97
Şekil 6.10: Güncellenen tasarım parametrelerine göre Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analize ilişkin kapasite – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması...	97
Şekil 6.11: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme – frekans grafiği	99
Şekil 6.12: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen kapasite hesabı analizine ilişkin kapasite – frekans grafiği.....	99
Şekil 7.1: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile elde edilen kapasite sonuçları ile deneysel kapasite sonuçlarının kıyaslanması	101
Şekil 7.2: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile elde edilen kapasite sonuçları ile teorik eşdeğer kapasite sonuçlarının kıyaslanması	102

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: MEMS teknolojisinin uygulama alanları (Prime Faraday Technology Watch 2002).	1
Tablo 1.2: MEMS teknolojisinin kilometre taşları (Prime Faraday Technology Watch 2002).	2
Tablo 1.3: Algılama mekanizmalarına göre mikro-sensörlerin avantajları ve dezavantajları (Algamili ve diğ. 2021).	5
Tablo 1.4: Aktüasyon mekanizmalarına göre mikro-aktüatörlerin avantajları ve dezavantajları (Algamili ve diğ. 2021).	8
Tablo 1.5: Gövde mikro-işleme ile yüzey mikro-işleme tekniklerinin kıyaslanması (French ve Sarro 1998).	13
Tablo 2.1: Mekaniksel ve elektriksel model parametreleri.	30
Tablo 3.1: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait tasarım parametreleri.	43
Tablo 3.2: Tasarım parametrelerine göre farklı DC kutuplama gerilimleri varlığında teorik elektrostatik kuvvet, teorik statik yer değiştirme ve teorik kapasite cevabı.	45
Tablo 3.3: Farklı DC kutuplama gerilimlerine göre teorik olarak hesaplanan elektriksel eşdeğer devre parametreleri ($Q = 100$).	47
Tablo 3.4: Frekans analizi için hesaplanan Rayleigh katsayıları.	66
Tablo 3.5: Elmer FEM yazılımında elde edilen simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000) ve COMSOL Multiphysics simülasyon sonuçlarıyla (COMSOL Multiphysics – MEMS Module 2021) kıyaslanması.	78
Tablo 5.1: DC güç kaynağından ayarlanan DC kutuplama gerilimi değerleri ile yapıya uygulanan gerçek DC kutuplama gerilimi değerlerinin kıyaslanması.	87
Tablo 5.2: Deneysel veriler üzerinden gerçekleştirilen parametre çıkarımı sonuçları.	89
Tablo 6.1: Güncellenen tasarım parametreleri kullanılarak teorik olarak hesaplanan statik elektrostatik kuvvet ve statik yer değiştirme değerleri.	90
Tablo 6.2: Güncellenen tasarım parametreleri kullanılarak teorik olarak hesaplanan dinamik elektrostatik kuvvet.	91
Tablo 6.3: Güncellenen tasarım parametrelerine göre farklı DC kutuplama gerilimlerinde teorik olarak hesaplanan elektriksel eşdeğer devre parametreleri.	92
Tablo 6.4: Parametre çıkarımı sonucunda elde edilen parametrelere göre hesaplanan Rayleigh katsayıları.	98
Tablo 7.1: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analiz ve FEM analizi sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslanması.	103
Tablo 7.2: Bu tez kapsamında tasarımı ve üretimi yapılan rezonatör yapısıyla literatürde kütle uygulamaları için kullanılan bazı MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapılarının rezonans frekanslarının karşılaştırılması.	104

SEMBOL LİSTESİ

MEMS	:	Mikro-elektro-mekanik sistemler
FEM	:	Sonlu elemanlar metodu
LIGA	:	Lithographie Galvanoformung Abformung
CMOS	:	Tümleşik metal oksit yarı-iletken
RF	:	Radyo frekansı
RIE	:	Kuyu aşındırma işlemi
DRIE	:	Derin kuyu aşındırma işlemi
MSOG	:	Modifiye edilmiş cam üzerine silisyum
SOI	:	Yalıtkan üzerine Silisyum
Au	:	Altın
Si	:	Silisyum
H₂SO₄	:	Sülfürik asit
H₂O₂	:	Hidrojen peroksit
HF	:	Hidroflorik asit
KOH	:	Potasyum hidroksit
TMAH	:	Tetrametilamonyum hidroksit
EDP	:	Etilendiamin-pirokatekol
HNA	:	Hidroflorik-nitrik-asetik asit
BHF	:	Tamponlanmış hidroflorik asit
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
CAD	:	Bilgisayar destekli tasarım
RMS	:	Karekök ortalama
DC	:	Doğru akım
AC	:	Alternatif akım
<i>F</i>	:	Kuvvet
<i>m</i>	:	Kütle
<i>b</i>	:	Sönümlenme katsayısı
<i>k</i>	:	Yay sabiti
ω_0	:	Açısal rezonans frekansı
f_0	:	Rezonans frekansı
<i>Q</i>	:	Kalite faktörü
ω	:	Açısal frekans
$\tau_{1,2}$:	Homojen çözüme ait kökler
ζ	:	Sönümlenme oranı
<i>t</i>	:	Zaman
Hz	:	Hertz
θ	:	Faz açısı
<i>E</i>	:	Young modülü
<i>w</i>	:	Genişlik
<i>l</i>	:	Uzunluk
<i>d</i>	:	Açıklık
μ	:	Viskozite katsayısı
k_b	:	Boltzman sabiti
b_1	:	Sıkışan hava film sönümlenme katsayısı
b_2	:	Kayan hava film sönümlenme katsayısı
<i>dB</i>	:	Desibel
ϵ_0	:	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği

<i>V</i>	:	Volt
<i>η</i>	:	Transformatör katsayısı
<i>R_m</i>	:	Elektriksel eşdeğer devrenin direnci
<i>L_m</i>	:	Elektriksel eşdeğer devrenin bobini
<i>C_m</i>	:	Elektriksel eşdeğer devrenin kapasitesi
<i>G</i>	:	Kondüktans
<i>B</i>	:	Süseptans
<i>Y</i>	:	Admitans
<i>G_{max}</i>	:	Maksimum kondüktans değeri

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Serdar TEZ'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar 116E231 numaraları TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS), mekaniksel ve elektriksel bileşenlerin bir arada bulunduğu mikron boyutlarında tümleşik sistemler oluşturmak için kullanılan disiplinler arası bir proses teknolojisidir (Dölen ve Kaplan 2002). MEMS'in disiplinler arası doğası, entegre devre üretim teknolojisi, makine mühendisliği, malzeme bilimi, elektrik mühendisliği, kimya, optik ve akışkan mühendisliği gibi birçok teknik alanı beraberinde kullanır. Günümüzde MEMS teknolojisi, Tablo 1.1'de gösterildiği gibi birçok farklı uygulama alanında yer edinmiştir.

Tablo 1.1: MEMS teknolojisinin uygulama alanları (Prime Faraday Technology Watch 2002).

Otomotiv	Elektronik	Medikal	Haberleşme
Navigasyon sensörleri	Disk sürücü başlıkları	Tansiyon sensörleri	Ayarlanabilir antenler
Hava yastığı sensörleri	Püskürtmeli yazıcılar	DNA, RNA, enzim sensörleri	RF röle, anahtar ve filtreler
Fren kuvveti sensörleri	Yığın depolama sistemleri	Kas uyarıcıları	Gerilim kontrollü osilatörler
Akıllı lastikler	Deprem sensörleri	Protezler	Fiber optik elemanlar
Fren kuvveti sensörleri	Aviyonik basınç sensörleri	Kalp pilleri	Ayarlanabilir lazerler

MEMS'in tarihi, 1958'de Texas Instrumens'tan Jack Kilby tarafından bulunan entegre devre teknolojisi ile başlamıştır. Entegre devre, aynı veya farklı çeşit elektronik devre elemanlarının bir düzen ve amaç içerisinde aynı alt tabakada bir araya getirilmesiyle oluşan yeni bir eleman olarak tanımlanır. Entegre devre teknolojisinden önce transistör, direnç, kondansatör ve bobin gibi temel elektronik bileşenler, devre oluşturmak için bir araya getirilmeden önce ayrı ayrı imal edilirdi. Bu şekilde bir uygulamanın da uzun zaman gereksinimi ve büyük paketleme boyutları gibi dezavantajları vardı. Entegre devreler ise, ayrık elektronik bileşenlerden yapılan devrelere göre daha küçük ve daha hızlıdır. Dünyadaki ilk entegre devre, transistör,

kondansatör ve dirençler içeren bir germanyum çipinden yapılmıştır (Kilby 1976). Bu teknolojinin daha da geliştirilmesi ile 1961’de ilk Silisyum (Si) entegre devre icat edilmiştir. Silisyum, Germanyum’a göre daha ucuz ve işlenmesi daha kolaydır. Bu özellikleri sayesinde Silisyum ile entegre devre icadından sonra hem akademik hem de ticari olarak yeni bir çağ başlamıştır. MEMS kavramının ortaya çıkması da esas olarak entegre devre çalışmalarında yaşanan gelişmeler ışığında olmuştur. 1959 yılında, Nobel ödüllü ünlü fizikçi Richard Feynman tarafından yapılan konuşma ile mikro sistemlere dair ilk fikir ortaya atılmıştır. Feynman yaptığı bu konuşma ile iyon ışınli litografi, fotolitografi, kompakt disk teknolojisi, lazer ve radyo frekansı (RF) teknolojisi gibi birçok temel mikro-fabrikasyon kavramlarını sunmuştur. Diğer bazı önemli MEMS uygulamalarına ait kilometre taşları ise Tablo 1.2’de özetlenmiştir.

Tablo 1.2: MEMS teknolojisinin kilometre taşları (Prime Faraday Technology Watch 2002).

1961	İlk Silisyum basınç sensörü tanıtıldı
1967	Yüzey mikro-işlemenin icadı
1970	İlk Silisyum ivmeölçer tanıtıldı
1979	İlk mikro-işlenmiş mürekkep püskürtmeli yazıcı başlığı
1980	Yüzey mikro-işlenmiş Silisyum için ilk deneyler
1982	LIGA tekniği
1988	İlk MEMS konferansı
1992	Derin Reaktif İyon Aşındırma (DRIE) tekniğinin patenti alındı
1995	BioMEMS uygulamaları gelişmeye başladı
2000	MEMS optik-ağ bileşenleri piyasada popüler oldu

MEMS, bulunduğumuz yüzyıl için de en umut verici teknolojilerden biri olarak tanımlanmaktadır. Yarıiletken elektroniğini mikro-işleme teknolojisi ile birleştirerek hem endüstriyel hem de tüketici odaklı ürünlerde devrim yaratma potansiyeli kazanmıştır. Ayrıca toplu üretim teknikleri ile üretilme imkanına sahip oldukları için gitgide azalan boyut, hacim, ağırlık ve maliyet gibi avantajlarla yüksek performans ve güvenilirlik sağlamaktadır.

1.1 MEMS Türleri

En genel haliyle MEMS, Silisyum çip üzerine entegre edilmiş mikro-sensörler ve mikro-aktüatörlerden oluşur. Bu sistemler algılama, kontrol etme ve harekete geçirme becerilerine sahiptir (Bogue (2007), Fujita ve Toshiyoshi (1998)).

1.1.1 Mikro-sensörler

Mikro-sensörler, mekanik, termal, manyetik, kimyasal ve elektromanyetik gibi çeşitli enerji ve sinyaller ile çevreden bilgi toplamak için kullanılırlar (Bogue 2007). Algılama mekanizmalarına ve algılanan parametrelere bağlı olarak birçok farklı mikro-sensör türü mevcuttur. Aşağıda, sıkça kullanılan MEMS sensörlerinden birkaçı tanımlanmıştır.

1.1.1.1 Piezorezistif Sensörler

Uygulanan gerilme ile malzemenin direncindeki değişiklik olarak tanımlanan piezorezistif etki, kuvvet sensörleri (Liu ve diğ. 2011), basınç sensörleri (Pramanik ve diğ. 2006), gerilme sensörleri (Doelle ve diğ. 2006), mikrofonlar (Sheplak ve diğ. 1999), ivmeölçerler (Khir ve diğ. 2011), sıcaklık sensörleri (Cai ve diğ. 2018) ve kimyasal sensörler (Rahim ve diğ. 2008) gibi çeşitli uygulamalarda yaygın bir dönüşüm mekanizması olarak kullanılır.

1.1.1.2 Piezoelektrik Sensörler

Piezoelektrik sensörler, piezoelektrik kristal malzeme üzerinde uygulanan bir gerilme veya kuvvetin, kristal boyunca oluşturduğu potansiyel fark olarak tanımlanan piezoelektrik etkiyi kullanır. Ayrıca ters olarak, kristal malzemeye potansiyel fark uygulanmasıyla malzemede bir yer değiştirme veya bir gerilme de oluşturulabilir. Bu sensörler, hava yastığı sensörleri, disk sürücüler, mürekkep püskürtmeli yazıcı başlıkları ve park sensörleri gibi birçok amaçla kullanılır (Prime Faraday Technology Watch 2002).

1.1.1.3 Kapasitif Sensörler

Kapasitif algılama, en önemli hassas algılama mekanizmalarından biridir. Bu prensibi kullanan sensörlerin bir tarafı, bir veya daha fazla sayıda iletken ve sabit plakadan oluşur. Diğer tarafı ise yine bir veya daha fazla sayıda iletken fakat hareketli plakadan oluşur. Dielektrik malzeme içinde bulunan plakalara potansiyel fark uygulandığında plakalar arası kapasite meydana gelir. Hareketli plakanın yer değiştirmesiyle kapasite değeri değişerek algılama gerçekleştirilir. Kapasitif sensörler; ivme (Tsai ve diğ. 2009), nem (Lazarus ve diğ. 2010), basınç (Zhang ve diğ. 2011) gibi büyüklükleri ölçmede kullanılırlar.

1.1.1.4 Rezonatörler

Mikro-rezonatörler, kendi doğal frekanslarında titreşen mikro-işlenmiş yapılardır. Bu yapılar, mikro-kiriş (Caruntu ve Knecht 2015) veya mikro-köprü (Jmai ve diğ. 2017) gibi basit yapılardan veya tarak parmak yapıları (Han ve diğ. 2018) gibi daha kompleks yapılardan oluşabilir. Ayrıca membranlara tutturularak veya belirli bir maddeyi tutacak şekilde tasarlanabilirler. Membranın hareket ettirilmesiyle (Zou ve Seshia 2015) veya belirli maddenin tutulması (Tez ve Aytaşkın 2020) ile rezonans frekansının değişmesi prensibine göre çalışır.

1.1.1.4.1 Rezonans

Periyodik bir etkinin altında olan sistemlerde salınım meydana gelir. Salınımlar esnasında sistemin normal durumuna göre yaptığı yer değiştirme miktarına genlik denir. Bu salınımlar sistemin doğal frekansına eşit olursa, sistemin genliği sonsuza dek artma eğilimi gösterir ve bu olay rezonans olarak adlandırılır. Rezonans durumu, sistemin iki ya da daha fazla farklı yükleme biçimleri arasında enerji depolayabildiği veya transfer edebildiği noktalarda meydana gelir. Ancak salınımlar arasında sönüm adı verilen bazı kayıplar da söz konusudur. Sönüm küçük olduğunda rezonans frekansı yaklaşık olarak sistemin doğal frekansına eşit olur. Bazı sistemlerin de birden fazla farklı rezonans frekansı olabilir.

Doğada çok farklı ölçeklerde rezonanslar gözlemlenebilir. Bu duruma örnek olarak, ABD'nin Tacoma eyaletinde bulunan Tacoma Narrows köprüsünün yıkılışı gösterilebilir. Rüzgâr tarafından periyodik olarak kendi doğal frekansında uyarılan bu köprü, yüksek miktarlarda salınım yaparak kısa sürede yıkılmıştır. Bu örnekten farklı

Tablo 1.3: Algılama mekanizmalarına göre mikro-sensörlerin avantajları ve dezavantajları (Algamili ve diğ. 2021).

Algılama Mekanizması	Avantajlar	Dezavantajlar
Piezorezistif	<ul style="list-style-type: none"> • Basit yapı • Düşük maliyet • VLSI ile uyumluluk 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek güç gereksinimi • Tekrarlanabilirlik problemi
Piezoelektrik	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek frekans cevabı • Yüksek doğruluk • Yüksek hassasiyet 	<ul style="list-style-type: none"> • Sadece dinamik algılama mevcut • Şarj kaçakları
Kapatif	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek hassasiyet • Geniş aralık 	<ul style="list-style-type: none"> • Parazitik kapasitans • Karmaşık ölçüm devresi • Malzemeler arası etkileşim • Gürültüye duyarlı
Rezonatör	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek kalite faktörü • Entegre devrelerle uyumluluk • Kolay mekanik tasarım • Grup halinde ucuz üretim • Entegre devre üretim teknikleriyle benzer şekilde üretilebilme 	<ul style="list-style-type: none"> • Frekans stabilitesi (örnek olarak sıcaklıkla rezonans frekansının kayması)

olarak rezonans frekansının özelliklerinden faydalanmak adına sistemler, görüntüleme için kullanılan nükleer manyetik rezonansa olduğu gibi kasten de rezonansa konabilir. MEMS rezonatörleri de harici bir kuvvet ile rezonansa konarak algılama yapma amacıyla kullanılan yapılardır (Brand ve diğ. 2015).

Bu başlık altında ele alınan mikro-sensörler, avantajları ve dezavantajları ile Tablo 1.3'te kıyaslanmıştır.

1.1.2 Mikro-aktüatörler

Mikro-aktüatörler, elektrostatik, termal, elektromanyetik gibi enerji biçimlerini kinetik enerjiye dönüştüren yapılardır. Aşağıda, sıkça kullanılan MEMS aktüatörlerinden bazıları tanımlanmıştır.

1.1.2.1 Piezoelektrik Aktüatörler

Piezoelektrik etki, hem sensörlerde (Kon ve Horowitz 2008) hem de aktüatörlerde (Conway ve diğ. 2007) kullanılabilir. Piezoelektrik aktüasyonda, kristal malzeme üzerine potansiyel fark uygulanarak yer değiştirme elde edilir. Burada, potansiyel fark ile yer değiştirme miktarı doğru orantılıdır (Katzır 2006).

1.1.2.2 Elektromanyetik Aktüatörler

Elektromanyetik aktüatör, Lorentz kuvveti prensibine göre çalışır. Akım taşıyan bir iletken, statik bir manyetik alana yerleştirildiğinde iletken çevresinde başka bir alan üretilir. Üretilen bu alan ile statik alan etkileşime girerek bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet, mekanik yapının yer değiştirmesine neden olur. Elektromanyetik aktüatörler, mikro-pompa (Getprecharsawas ve diğ. 2006) ve mikro-röle (Hosaka ve diğ. 1994) gibi yapılarda kullanılırlar.

1.1.2.3 Elektrotermal Aktüatörler

Bu aktüatör mekanizması genellikle farklı termal genleşme katsayıları sahip iki farklı metalin birlikte üretildiği bimetalik yapılardır. Bu mekanizma, uygulanan elektriksel gerilim sonucunda oluşan akım kaynaklı ısınma ve genleşme ile yer değiştirme eldesi prensibine göre çalışır. Elektrotermal aktüatörler, mikro-robotik ve mikro-optik gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Potekhina ve Wang 2019).

1.1.2.4 Elektrostatik Aktüatörler

Elektrostatik aktüatörler, aralarında dielektrik malzeme bulunan, zıt yüklü ve biri hareketli diğeri sabit iki plaka arasında elektrostatik kuvvet oluşturulması prensibine göre çalışan yapılardır. Bu uygulamalarda plakalar arasındaki potansiyel fark değeri artırılarak elektrostatik kuvvet ve dolayısıyla yer değiştirme miktarı artırılır. Çoğu durumda, DC gerilim üzerine bindirilmiş AC sinyal ile yer değiştirme sağlanır. Bu aktüatörlerde yüksek yer değiştirme miktarları sağlayabilmek adına tarak parmak yapıları kullanılır (Legtenberg ve diğ. 1996). Tarak parmak yapıları, dielektrik malzeme içerisinde iç içe geçmiş çok sayıda parmak yapısından oluşur. Parmak sayısının artırılması, aynı potansiyel fark değerinde daha büyük elektrostatik kuvvetin oluşmasını sağlar. Bunun sonucu olarak da yer değiştirme miktarı artar. Tarak parmak yapıları ile elektrostatik aktüasyon mekanizması, ivmeölçerler (Kavitha ve diğ. 2016), jiroskoplar (Xie ve Fedder 2001), mikro-tarayıcılar (Liu ve diğ. 2013) gibi birçok MEMS uygulamasında kullanılmaktadır.

Bu başlık altında ele alınan mikro-aktüatörler, avantajları ve dezavantajları ile Tablo 1.4'te kıyaslanmıştır.

Tablo 1.4: Aktüasyon mekanizmalarına göre mikro-aktüatörlerin avantajları ve dezavantajları (Algamili ve diğ. 2021).

Aktüasyon Mekanizması	Avantajları	Dezavantajları
Piezoelektrik	<ul style="list-style-type: none">• Düşük tahrik voltajı• Görece yüksek yer değiştirme	<ul style="list-style-type: none">• CMOS teknolojisi ile manyetik materyalin fabrikasyon zorluğu• Boyut minyatürize zorluğu
Elektromanyetik	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek anahtarlama hızı• Düşük güç gereksinimi	<ul style="list-style-type: none">• Düşük yer değiştirme• Yüksek tahrik voltajı
Elektrotermal	<ul style="list-style-type: none">• Kolay fabrikasyon• Düşük tahrik voltajı	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek güç gereksinimi• Yavaş tepki süresi• Termal yorulma
Elektrostatik	<ul style="list-style-type: none">• Düşük güç tüketimi• Hızlı tepki süresi• CMOS teknolojisi ile entegrasyon kolaylığı• Çoğu imalat yöntemiyle uyumluluk	<ul style="list-style-type: none">• Yüksek tahrik voltajı• Pull-in sebebiyle sınırlı işlem yeteneği

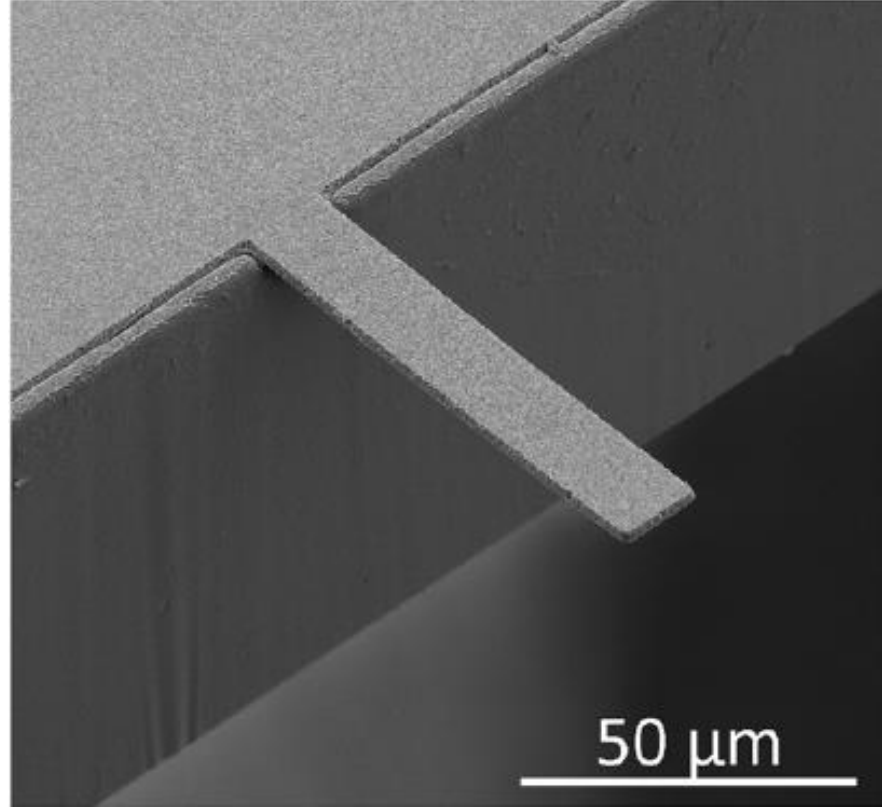
1.2 Yaygın MEMS Yapıları

MEMS yapıları, uygulamalara bağlı olarak farklı algılama ve harekete geçirme mekanizmaları kullanabilirken genellikle aynı temel mekanik yapılardan oluşur. Bu

yapılardan en yaygın olanları, mikro-kirişler, mikro-köprüler ve asılı MEMS yapıları olarak sınıflandırılabilir.

1.2.1 Mikro-kiriş Yapıları

Mikro-kiriş yapıları, bir ucundan desteklenen veya kenetlenen temel mekanik yapılardır. Bu yapılar, diğer yapılara kıyasla daha basit olduklarından fabrikasyonları oldukça kolaydır. Uygulamaları arasında atomik kuvvet mikroskobu uçları (Li ve diğ. 2020), RF anahtarları (Stefanini ve diğ. 2011) ve biyomedikal sensörler (Khoshnoud ve Silva 2012) gibi birçok alan vardır. Örnek bir mikro-kiriş yapısına ait SEM görseli, Şekil 1.1’de verilmiştir.

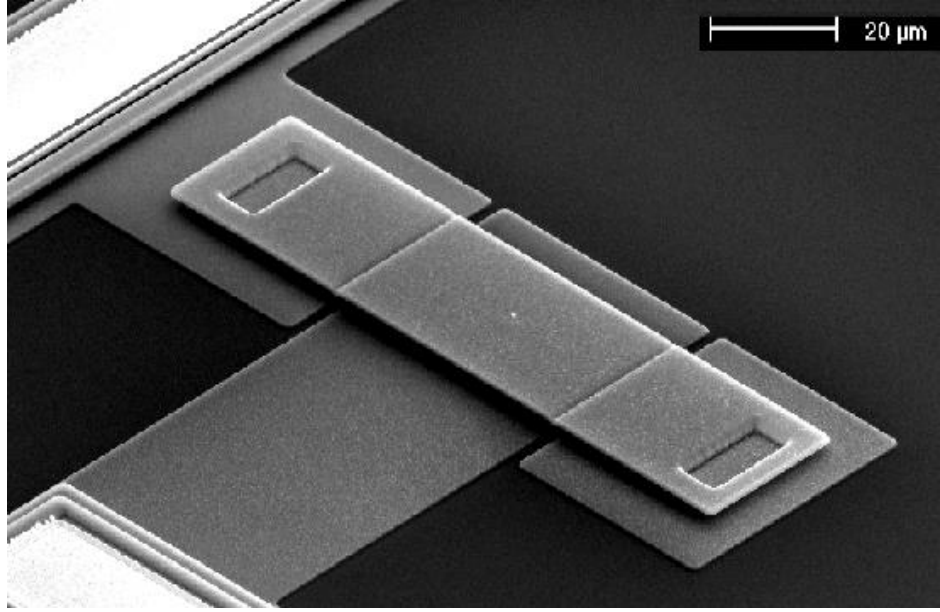


Şekil 1.1: Örnek bir mikro-kiriş yapısına ait SEM görseli (Suter ve diğ. 2011).

1.2.2 Mikro-köprü Yapıları

Mikro-köprü yapıları, Şekil 1.2’de SEM görseli verilen yapıda olduğu gibi iki ucundan sabitlenmiş, mikron boyutlarında dikdörtgen plaka yapısından oluşur. Bu

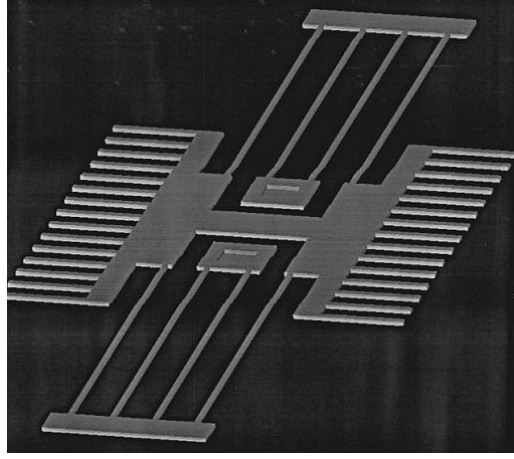
yapılar özellikle çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik algılama uygulamaları için kullanılır.



Şekil 1.2: Örnek bir mikro-köprü yapısına ait SEM görseli (Rochus ve diğ. 2009).

1.2.3 Asılı MEMS Yapıları

Asılı MEMS yapıları, belirli noktalardan kirişler ile desteklenerek veya kenetlenerek asılı tutulan mekanik yapılardır. Bu yapılar; membran, diyafram ve ataletsel kütle gibi farklı türlerden oluşurlar. Uygulamaları arasında basınç sensörü, kuvvet sensörü, kütle sensörü vb. mevcuttur. Örnek bir asılı MEMS yapısına ait SEM görseli, Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3: Örnek bir asılı MEMS yapısına ait SEM görseli (Gupta 2000).

1.3 MEMS Yapılarının Fabrikasyonu

Mikro-fabrikasyon, boyutları birkaç mikrometreden birkaç milimetreye değişen yapıların üretilmesi için kullanılan teknolojiler kümesidir. Literatürde çok sayıda mikro-fabrikasyon tekniği bulunmaktadır. MEMS yapıları genellikle gövde mikro-işleme (bulk micromachining) ve yüzey mikro-işleme (surface micromachining) teknikleri kullanılarak üretilirler.

1.3.1 Gövde Mikro-işleme

Gövde mikro-işleme, MEMS cihazlarında mikro yapılar oluşturmak için, genellikle Silisyum'dan oluşan alt tabakanın seçici olarak aşındırılması işlemidir (Kovacs ve diğ. 1998). Sıvı aşındırma, gövde mikro-işlemede ağırlıklı olarak kullanılan tekniktir (Burns 2011). Tipik olarak, bir Silisyum Dioksit tabakası, bir maske kullanılarak Silisyum plaka üzerine desenlendirilir. Silisyum Dioksit, Silisyum alt tabakanın belirli alanlarda aşınmasını korumak için kullanılır. Sıvı aşındırma, plaka yüzeyini aşındırmak için sıvı kimyasallar kullanan teknikleri ifade eder. Kullanılacak aşındırıcı, aşındırma hızı ve seçicilik düzeyi gibi faktörlere bağlı olarak belirlenir. Silisyum için kullanılan en yaygın sıvı aşındırıcılar, HF , Nitrik Asit ve Asetik Asit karışımından oluşan HNA gibi oryantasyondan bağımsız ve EDP, KOH ve TMAH vb. gibi oryantasyon bağımlı kimyasallardan oluşur.

Gövde mikro-işlemede kullanılan bir diğer aşındırma tekniği ise kuru aşındırmadır (Burns 2011). Kuru aşındırmada maskelenmiş yüzeye iyon gönderilerek yüzeyin istenilen boyutta aşındırılması sağlanır. Bu aşındırmada tekniğinde bir gaz içerisindeki iyonlar elektrik alan etkisiyle yönlendirilir. Burada gaza ek olarak kimyasal sıvı da kullanılabilir. Bu yöntem RIE (kuyu aşındırma tekniği) denir. Ayrıca literatürde RIE'nin gelişmiş hali olan DRIE (derin kuyu aşındırma tekniği)'de bulunmaktadır. DRIE yönteminde, RIE'ye kıyasla daha yüksek en-boy oranına sahip yapılar elde edilebilmektedir (Efil 2020).

1.3.2 Yüzey Mikro-işleme

Yüzey mikro-işleme, MEMS cihazlarında yine mikro yapılar oluşturmak için kullanılır (Bustillo ve diğ. 1998). Yüzey ve gövde mikro-işleme teknikleri arasındaki temel fark, yüzey mikro-işlemenin Silisyum tabakanın üzerinde bulunan katmanları aşındırmasıdır. Bazı diğer farklar ise Tablo 1.5'te verilmiştir. Bu işlemde üretim süreci, Silisyum üzerine yapısal ve gözden çıkarılabilir katmanların yerleştirilmesiyle başlar. Yapısal katmanlar, istenilen yapıları oluşturan katmanlardır. Gözden çıkarılabilir katmanlar ise aşındırılabilir katmanlardır ve yapısal katmanları desteklemek için kullanılırlar. Genellikle gözden çıkarılabilir katman olarak, termal ve kimyasal buhar biriktirme işlemlerinin bir kombinasyonu ile oluşturulan Silisyum Dioksit kullanılır. Bu işlemde yapısal katmanlar, gözden çıkarılabilir tabakanın üstüne seçici bir şekilde yerleştirilir ve sonrasında Silisyum Dioksit, uygun kimyasallar ile aşındırılır. Bu yöntem genellikle giriş ve köprü yapıları oluşturmak için kullanılır.

Tablo 1.5: Gövde mikro-işleme ile yüzey mikro-işleme tekniklerinin kıyaslanması (French ve Sarro 1998).

Gövde Mikro-işleme	Yüzey Mikro-işleme
Mekanik elemanlar, Silisyum plakının aşındırılmasıyla üretilir.	Mekanik elemanlar, gözden çıkarılabilir katman üzerinde oluşturulan yapısal katmanlar ile üretilir.
Silisyum tabaka ile yapılar oluşturulur.	Silisyum tabakanın üzerinde yapılar oluşturulur.
Nispeten büyük yapılar bu işleme üretilir.	Nispeten büyük yapıların üretilmesi zordur.
Gözden çıkarılabilir katmana ihtiyaç yoktur.	Gözden çıkarılabilir katmana ve bu katmanın aşındırılmasına ihtiyaç vardır.
İşlem daha ucuzdur ancak malzeme kaybı daha fazladır.	İşlem pahalıdır ancak daha az malzeme kaybı vardır.
Boyut kontrolü iyidir.	Boyut kontrol çok daha iyidir.
CMOS entegrasyonu makul düzeydedir.	CMOS entegrasyonu iyi düzeydedir.
Boyutlar küçüktür.	Boyutlar daha küçüktür.
Tipik olarak sıvı ve kuru aşındırma teknikleri beraber kullanır.	Kuru aşındırma teknikleri kullanır.

1.4 Yaygın MEMS Materyalleri

MEMS yapılarının üretilmesi için kullanılan materyal yelpazesi oldukça geniştir. MEMS alanında kullanılan materyallerden bazıları aşağıda verilmiştir:

- Tek kristal silisyum
- Poli-kristal silisyum
- Silisyum bileşikleri (Si_xN_y , SiO_2 , SiC , vb.)
- Metaller ve metalik bileşikler (Au, Cu, Al, ZnO, GaAs, IrO_x , CdS)
- Seramikler (Al_2O_3 ve daha birçok kompleks seramik materyal)
- Organik materyaller (elmas, polimer, enzim, DNA, vb.)

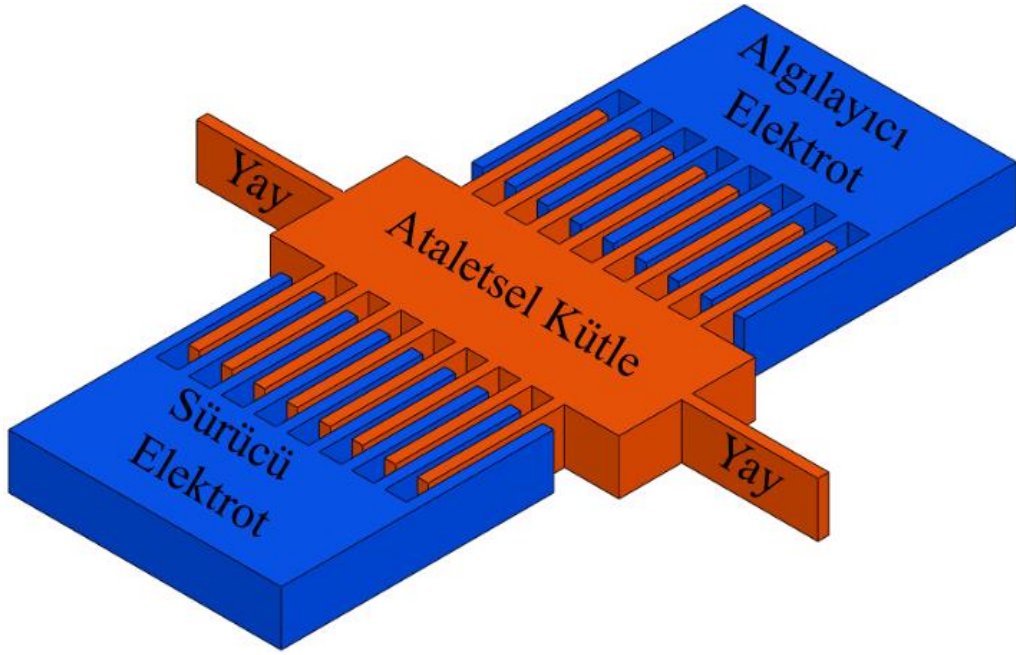
MEMS yapılarında en yaygın olarak kullanılan materyal Silisyumdur. Silisyumun MEMS ve diğer mikro-elektronik uygulamalarında popüler olmasının sebepleri şunlardır:

- i. Silisyum bol miktarda bulunur, ucuzdur ve oldukça yüksek saflık oranlarında işlenebilir.
- ii. Silisyumun ince film biriktirme kabiliyeti vardır.
- iii. Silisyum birçok ıslak ve kuru aşındırıcı materyal ile aşındırılabilir.
- iv. Çelik ile yaklaşık aynı Young modülü değerine sahiptir, fakat alüminyum kadar da hafiftir.
- v. Metallere benzer bir ısı iletkenliğine sahiptir. Termal genleşme katsayısı çoğu metala kıyasla düşüktür, bu sebeple termal şoka karşı dayanıklıdır.

Bu tez kapsamında ele alınan MEMS yapısı, tarak parmak yapıları kullanılarak oluşturulan ve elektrostatik aktüatör prensibiyle çalışan rezonatör sensörüdür. Bu uygulama, literatürde tarak parmak kapasitif rezonatör adıyla da bilinmektedir. Tarak parmak kapasitif rezonatör yapılarının yüksek kalite faktörü, hızlı tepki, düşük güç tüketimi ve entegre devrelerle uyumluluk gibi avantajları mevcuttur. Bu yapılar, sinyal filtreleme, kütle algılama, hareket algılama ve diğer birçok uygulama için kullanılırlar.

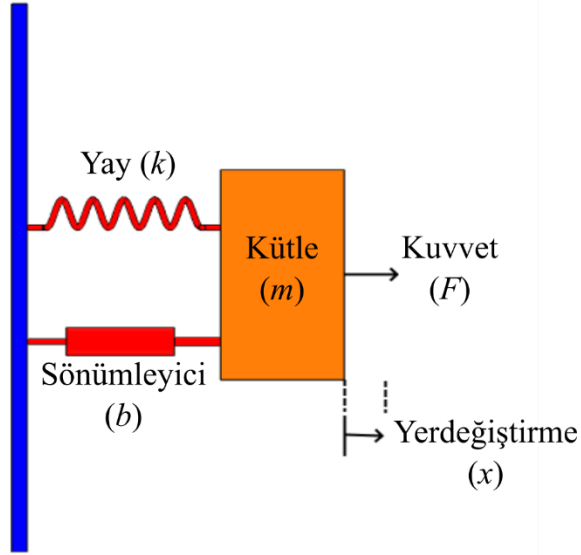
2. MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR TEORİSİ

MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı; kapasitif parmak bölgeleri, mekanik yaylar ve ataletsel kütle olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Kapasitif parmak bölgeleri ise sürücü ve algılayıcı elektrotlar olmak üzere iki kısma ayrılır. Şekil 2.1’de, örnek bir tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı görülmektedir.



Şekil 2.1: Örnek bir MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı.

Şekil 2.1’de gösterilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı, Şekil 2.2’de verilen kütle-yay-sönümleyici sistemiyle modellenir. MEMS rezonatör yapılarının karakteristiklerinin incelenebilmesi için bu model kullanılır.



Şekil 2.2: Kütle-yay-sönümleyici sistemi.

Denklem (2.1)'de, kütle-yay-sönümleyici sistemine ait diferansiyel denklem tanımlanmıştır (Mestrom ve diğ. 2008).

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F \quad (2.1)$$

Burada; m efektif kütle, b sönümlenme katsayısını, k mekanik yay sabitini, x ataletsel kütle için yer değiştirmesini ve F ataletsel kütleye etkiyen kuvveti niteler.

Rezonatör karakteristiğinin daha kolay bir şekilde incelenebilmesi için, Denklem (2.1) ile ifade edilen diferansiyel denklem, Laplace dönüşümü kullanılarak Denklem (2.2)'de gösterildiği gibi frekans bölgesine aktarılır.

$$ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s) = F(s) \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'ye göre, rezonatör yapısına ait transfer fonksiyonu Denklem (2.3)'te gösterildiği gibi elde edilir.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad (2.3)$$

İkinci dereceden sistemler için standart transfer fonksiyonu gösterimi Denklem (2.4)'te gösterildiği gibidir (Thompson 2013).

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2} \quad (2.4)$$

Burada; ω_0 sistemin rezonans frekansını, ζ ise sönümlenme oranını niteler. Denklem (2.3) ve Denklem (2.4) eşitlenirse, sistemin rezonans frekansı ve sönümlenme oranı sırasıyla Denklem (2.5) ve Denklem (2.6)'daki gibi elde edilir:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

$$\zeta = \frac{b}{2\sqrt{km}} \quad (2.6)$$

Osilasyon yapan sistemlerde osilasyonun verimini belirtmek için kullanılan kalite faktörü ile sönümlenme oranı arasındaki ilişki Denklem (2.7) ile ifade edilir:

$$Q = \frac{1}{2\zeta} \quad (2.7)$$

Buna göre, MEMS rezonatör yapısına ait kalite faktörü, Denklem (2.8)'de gösterildiği gibi elde edilir:

$$Q = \frac{\sqrt{km}}{b} = \frac{\omega_0 m}{b} \quad (2.8)$$

Laplace dönüşümü ile belirtilen transfer fonksiyonu ifadesini frekans bağımlı olarak yazabilmek için $s = j\omega$ eşitliği kullanılır. Buna göre, Denklem (2.3)'te verilen transfer fonksiyonunun frekans bağımlı gösterimi Denklem (2.9)'daki gibi elde edilir:

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{-m\omega^2 + jb\omega + k} \quad (2.9)$$

Denklem (2.5)'te verilen rezonans frekansı ile Denklem (2.8)'de verilen kalite faktörü eşitlikleri Denklem (2.9)'da yazılarak Denklem (2.10) elde edilir:

$$\frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{1}{k \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{Q\omega_0} \right)} \quad (2.10)$$

Osilasyon yapan sistemlerde maksimum yer değiştirme, rezonans frekansında elde edilir. Buna göre, MEMS rezonatör yapılarının maksimum yer değiştirmesini elde etmek için, Denklem (2.10)'da verilen ifadenin rezonans frekansındaki eşitliği hesaplanır:

$$\frac{X(\omega_0)}{F(\omega_0)} = \frac{Q}{jk} \quad (2.11)$$

Kütle-yay-sönümleyici sisteminde, yapıyı rezonans durumuna sokabilmek için sisteme genellikle harici bir sinüsoidal kuvvet uygulanır. Uygulanan bu kuvvetin $F = F_0 \sin(\omega t)$ olduğunu varsayarsak Denklem (2.1)'den Denklem (2.12) elde edilir (Brand ve diğ. 2015):

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t) \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) ile belirtilen sistemin zaman bölgesindeki cevabını incelemek için belirsiz katsayılar metodu ile homojen olmayan diferansiyel denklem çözümü yapılabilir. Buna göre sistemin genel cevabı, homojen çözüm ile özel çözümün toplamı ile elde edilir:

$$x_g = x_h + x_o \quad (2.13)$$

Sistemin homojen çözümü için:

$$m\ddot{x}_h + b\dot{x}_h + kx_h = 0 \quad (2.14)$$

Burada $x_h(t) = e^{\tau t}$ olarak alınırsa Denklem (2.14)'ün kökleri Denklem (2.15)'teki gibi elde edilir:

$$\tau_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4k}}{2m} \quad (2.15)$$

Denklem (2.15)'i rezonans frekansı ve sönümleme oranı cinsinden yazarsak (Brand ve diğ. 2015):

$$\tau_{1,2} = \omega_0 \left(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1} \right) \quad (2.16)$$

Bu durumda homojen çözüm Denklem (2.17)'deki gibi elde edilir:

$$x_h(t) = c_1 e^{\tau_1 t} + c_2 e^{\tau_2 t} \quad (2.17)$$

Burada c_1 ve c_2 keyfi sabitlerdir. Homojen çözüm, ζ 'nin alacağı değerlere göre üç gruba ayrılır:

- $\zeta > 1$ durumu (aşırı sönümlü sistem): Sistem çıkışı referans değere osilasyon yapmadan yakınsar. Aşırı sönümlü sistemlerde $\tau_{1,2}$ kökleri reel sayılardır. Buna göre sistemin homojen çözümü Denklem (2.18)'deki gibi elde edilir.

$$x_h(t) = e^{-\omega_0 \zeta t} (c_1 e^{\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}} + c_2 e^{-\omega_0 t \sqrt{\zeta^2 - 1}}) \quad (2.18)$$

- $\zeta = 1$ durumu (kritik sönümlü sistem): Sistem çıkışı hiç osilasyon yapmaksızın ve diğer tüm cevap türlerinden daha hızlı bir biçimde referans değere yakınsar. Kritik sönümlü sistemlerde $\tau_{1,2} = \omega_0$ olur. Buna göre sistemin homojen çözümü Denklem (2.19)'daki gibi elde edilir.

$$x_h(t) = e^{-\omega_0 t} (c_1 + c_2 t) \quad (2.19)$$

- $0 < \zeta < 1$ durumu (az sönümlü sistem): Sistem çıkışı referans değere, sönümlenen bir osilasyon yaparak yakınsar. Az sönümlü sistemlerde $\tau_{1,2}$ kökleri kompleks sayılardır. Buna göre sistemin homojen çözümü Denklem (2.20)'deki gibi elde edilir.

$$x_h(t) = e^{-\omega_0 \zeta t} (c_1 e^{j\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2}} + c_2 e^{-j\omega_0 t \sqrt{1 - \zeta^2}}) \quad (2.20)$$

Az sönümlü sistem için Euler denklemi kullanılarak homojen çözüm, Denklem (2.21)'deki gibi elde edilir:

$$x_h(t) = A e^{-\omega_0 \zeta t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (2.21)$$

Burada, A ve ϕ sırasıyla homojen çözüme ait genlik ve faz cevaplarıdır. Ayrıca ω_d sönümlü rezonans frekansı olarak adlandırılır.

Denklem (2.12) ile belirtilen sistemin özel çözümü için belirsiz katsayılar metodu kullanılabilir. Buna göre özel çözüm Denklem (2.22)'deki gibi ifade edilir:

$$x_{\ddot{o}}(t) = A_0 \cos(\omega t) + B_0 \sin(\omega t) \quad (2.22)$$

Çözümü basitleştirmek için Denklem (2.22)'de verilen ifade, Denklem (2.23)'teki gibi yazılabilir:

$$x_{\ddot{o}}(t) = X_0 \sin(\omega t - \theta) \quad (2.23)$$

Burada X_0 titreşimin genliği, θ ise faz titreşimin sinüsoidal kuvvete karşı faz gecikmesidir. Denklem (2.23) ile belirtilen özel çözüm ifadesini Denklem (2.12)'de yerleştirmek için, ifadenin birinci ve ikinci dereceden türevleri bilinmelidir:

$$\dot{x}_{\ddot{o}}(t) = \omega X_0 \cos(\omega t - \theta) \quad (2.24)$$

$$\ddot{x}_{\ddot{o}}(t) = -\omega^2 X_0 \sin(\omega t - \theta) \quad (2.25)$$

Denklem (2.23), Denklem (2.24) ve Denklem (2.25)'te belirtilen ifadeler Denklem (2.12)'de yerleştirilirse, Denklem (2.26) elde edilir:

$$X_0 \times [(k - m\omega^2) \sin(\omega t - \theta) + b\omega \cos(\omega t - \theta)] = F_0 \sin(\omega t) \quad (2.26)$$

Buradan titreşimin genliği ve faz gecikmesi sırasıyla Denklem (2.27) ve Denklem (2.28)'deki gibi elde edilir:

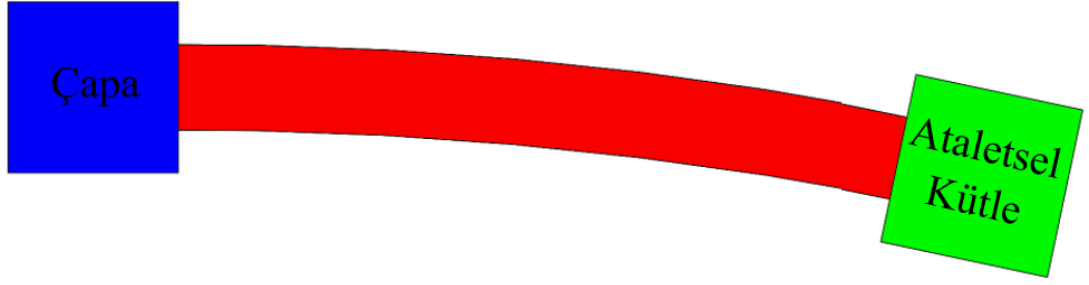
$$X_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (b\omega)^2}} \quad (2.27)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{b\omega}{k - m\omega^2}\right) \quad (2.28)$$

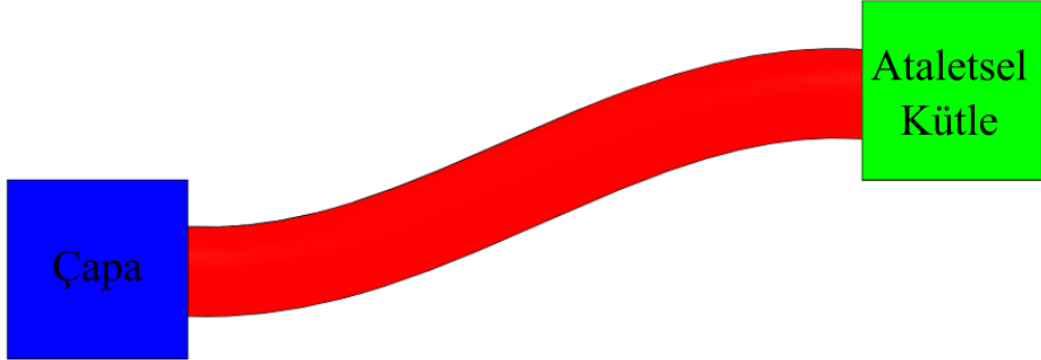
2.1 Yay Sabiti Tahmini

MEMS yapılarını etkileyen en önemli parametrelerden biri yay sabitidir. Yay sabitinin değerine göre ataletsel kütlelerin belirli eksenlerdeki hareketinin diğer eksenlere kıyasla daha çok olması sağlanabilir. Özellikle kapasitif rezonatör yapılarında ataletsel kütlelerin hareketi, algılayıcı elektroda aktarılacak akımı da etkilemektedir. Bu sebeple optimum yay sabitinin belirlenmesi gerekmektedir.

MEMS yapıları, çeşitli yay yapılarına sahip olacak şekilde tasarlanabilirler. Literatürde en çok kullanılan iki yay yapısı, kılavuzsuz yay yapısı ve kılavuzlu yay yapısıdır (Ocak 2010). Kılavuzsuz yay yapısı, yapının serbest ucu ile sabit ucu arasında paralel ilişkinin korunmadığı, kılavuzlu yay yapısı ise paralel ilişkinin korunduğu yay yapılarıdır. Bu yay yapıları Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2.3: (a) Kılavuzsuz yay yapısı (b) Kılavuzlu yay yapısı.

Bu tez kapsamında üretilen MEMS rezonatör yapısı, kılavuzlu yay yapılarına sahiptir. Kılavuzlu yay yapısı seri bağlı iki kılavuzsuz yay yapısı olarak düşünülebilir. Kılavuzsuz yay yapısına ait yay sabiti Denklem (2.29)'da verilmiştir (Ying ve diğ. 2007):

$$k_{kılavuzsuz} = \frac{Ehw^3}{4l^3} \quad (2.29)$$

Burada; E yay yapısına ait Young modülü değerini, h yay yapısının yapısal kalınlığını, w yay yapısının genişliğini ve l yay yapısının uzunluğunu belirtmektedir. Seri bağlı iki yay yapısına ait sistemin yay sabiti Denklem (2.30)'da tanımlanmıştır:

$$\frac{1}{k_{eş}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (2.30)$$

Buna göre kılavuzlu yay yapısına ait yay sabiti, Denklem (2.31)'deki gibi elde edilir:

$$k_{kılavuzlu} = \frac{Ehw^3}{l^3} \quad (2.31)$$

2.2 Sönümlenme Mekanizmaları

Sönümlenme, osilasyon yapan bir sistemin enerjisinin kayba uğramasıdır. Enerji kayıpları mikro-mekanik sistemlerin davranışlarını değiştirip performanslarını sınırlar. Sistem performansının doğru şekilde tahminin yapılabilmesi için sönümlenme mekanizmalarının modellenmesi önem kazanır.

MEMS yapıları genellikle hava gibi akışkan ortamlarda çalışmak üzere tasarlanırlar. MEMS yapısına ait ataletsel kütle ve altında bulunan alt katman tabaka arasındaki ortam akışkanı, ataletsel kütle hareketini sönümler. Hava ortamında bulunan yapılar için sıkışan hava film sönümlenme ve kayan hava film sönümlenme olmak üzere iki sönümlenme mekanizması gözlemlenir (Bao ve Yang 2007). Sıkışan hava film sönümlenme mekanizmasında ataletsel kütle ile alt tabaka arasında kalan hava molekülleri, ataletsel kütle hareketi ile sıkışır. Sıkışan hava film sönümlenme katsayısı Denklem (2.32)'de verilmiştir (Bao ve Yang 2007):

$$b_1 = \frac{\mu lw^3}{d^3} \beta(\eta) \quad (2.32)$$

Burada; μ akışkan viskozite katsayısını, l hareket eden alanın boyunu, w hareket eden alanın enini, d hareket eden alan ile alt tabaka arasındaki mesafeyi, $\beta(\eta)$ ise düzeltme

faktörünü belirtmektedir. η , w/l 'ye eşit olup kare geometri için $\beta(1) = 0.42$ ve dikdörtgen geometri için $\beta(0) = 1$ 'dir (Bao ve Yang 2007).

Kayan hava film sönümlenme mekanizması, ataletsel kütlelerin hareketi sonucunda ataletsel kütle ile alt tabaka arasında bulunan hava moleküllerinin sürtünmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Kayan hava film sönümlenme katsayısı Denklem (2.33)'te verilmiştir (Bao ve Yang 2007):

$$b_2 = \frac{\mu l w}{d} \quad (2.33)$$

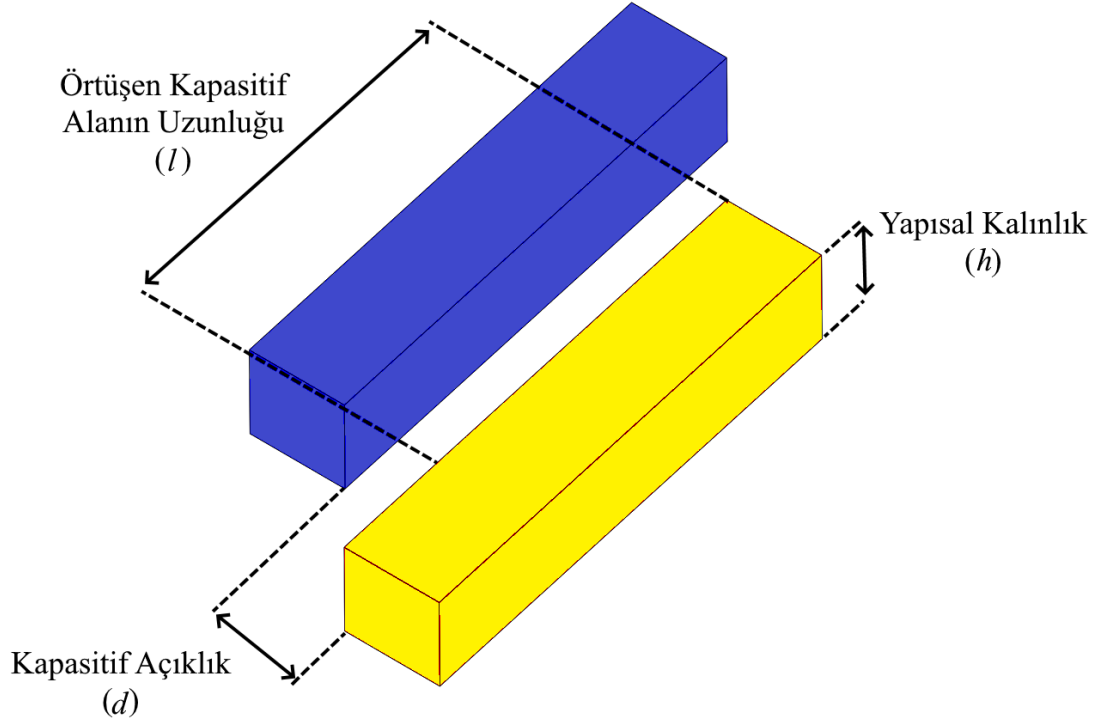
Burada; μ akışkan viskozite katsayısını, l hareket eden alanın boyunu, w hareket eden alanın enini, d ise hareket eden alan ile alt tabaka arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Mikro yapıya etki eden toplam sönümlenme katsayısı ise, Denklem (2.34)'te gösterildiği gibi sıkışan hava film sönümlenme ile kayan hava film sönümlenme katsayılarının toplamıyla elde edilir (Bao ve Yang 2007).

$$b_{toplam} = \frac{\mu l w^3}{d^3} \beta(\eta) + \frac{\mu l w}{d} \quad (2.34)$$

Mikro yapılar için, sıkışan hava film sönümlenme katsayısı, kayan hava film sönümlenme katsayısından daha baskın bir etkiye sahiptir (Bao ve Yang 2007). Bu sebeple, bu tez kapsamında ele alınan MEMS yapısı, sıkışan hava film sönümlenme mekanizmasını azaltacak şekilde tasarlanmıştır.

2.3 Elektrostatik Kapasitif Harekete Geçirme

Elektrostatik kapasitif harekete geçirme, aralarında dielektrik malzeme bulunan, biri sabit diğeri hareketli paralel levha kapasitörleri tarafından oluşturulan elektrostatik kuvvet ile gerçekleşir (Alper 2005). Şekil 2.4'te paralel levha kapasitör yapısı ve bu yapıya ait uzunluk ölçüleri verilmektedir.



Şekil 2.4: Paralel levha kapasitör yapısı ve bu levhaya ait uzunluk tanımları.

Paralel levhalara farklı kutuplama gerilimleri uygulandığında oluşan kapasite, Denklem (2.35)'te gösterildiği gibi ifade edilir:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} = \frac{\epsilon_0 h l}{d} \quad (2.35)$$

Levhalar arasında oluşan kapasiteden ötürü, enerji depolanması da mümkün olmaktadır. Depolanan enerji ise Denklem (2.36)'da gösterildiği gibi ifade edilir:

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad (2.36)$$

Burada; C paralel levhalar arasında oluşan toplam kapasite, V ise paralel levhalara uygulanan kutuplama gerilimidir. Paralel levhalar arasında depolanan enerjiden ötürü, yapıya elektrostatik kuvvet eder. Yapıya etkiyen elektrostatik kuvvet Denklem (2.37)'de tanımlanmıştır:

$$F = \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial x} V^2 \quad (2.37)$$

Burada x , hareketli levhaya etkiyen elektrostatik kuvvetten ötürü bu levhanın yer değiştirmesini niteler. x 'in hareket yönüne bağlı olarak elektrostatik harekete geçirme iki gruba ayrılır. İlk grup, kapasitif aralığın sabit bırakılarak örtüşen kapasitif alanın uzunluğunun değiştirilmesiyle elde edilir. Bu hareket yönüne sahip yapılarda, hareketli levhanın yer değiştirilmesiyle elde edilen kapasite ifadesi Denklem (2.38)'deki gibi tanımlanır:

$$C(x) = \frac{\varepsilon_0 h(l \pm x)}{d} \quad (2.38)$$

Buna göre, oluşan elektrostatik kuvvet Denklem (2.39)'da gösterildiği gibi elde edilir:

$$F = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 h}{d} V^2 \quad (2.39)$$

İkinci grup, örtüşen kapasitif alanın uzunluğunun sabit tutulup kapasitif açıklığın değiştirilmesiyle elde edilir. Bu hareket yönüne sahip yapılarda, hareketli levhanın yer değiştirilmesiyle elde edilen kapasite ve elektrostatik kuvvet ifadeleri ise sırasıyla Denklem (2.40) ve Denklem (2.41)'deki gibi tanımlanır:

$$C(x) = \frac{\varepsilon_0 hl}{(d \pm x)} \quad (2.40)$$

$$F = \mp \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 hl}{(d \pm x)^2} V^2 \quad (2.41)$$

Bu tez çalışmasında ele alınan tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı, örtüşen kapasitif alanın uzunluğunun değiştiği hareket türüne sahiptir. Bu hareket türüne sahip tarak parmak kapasitif rezonatör yapılarında, iç içe geçmiş parmaklar arasındaki toplam hava aralığı sayısı N olduğunda elde edilen kapasite ve elektrostatik kuvvet ifadeleri sırasıyla Denklem (2.42) ve Denklem (2.43) ile hesaplanır:

$$C = \frac{N\varepsilon_0 hl}{d} \quad (2.42)$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{N\varepsilon_0 h}{d} V^2 \quad (2.43)$$

MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının rezonans frekansında sürülebilmesi için, elektrostatik kuvvetin frekansı ile rezonatörün mekanik rezonans frekansı eşleşmelidir. Uygulanan potansiyel fark Denklem (2.44)'te gösterildiği gibi saf sinüsoidal olursa, elektrostatik kuvvet Denklem (2.45)'teki gibi elde edilir (Alper 2005).

$$V(t) = V_{ac} \sin(\omega_0 t) \quad (2.44)$$

$$F(t) = \frac{1}{2} \frac{N \epsilon_0 h}{d} \left(\frac{V_{ac}^2}{2} - \frac{V_{ac}^2}{2} \cos(2\omega_0 t) \right)^2 \quad (2.45)$$

Denklem (2.45) incelendiğinde, elektrostatik kuvvetin iki bileşeninin olduğu görülür. İlk bileşen, yapının statik yer değiştirmesine sebep olacak statik elektrostatik kuvveti ifade eder. İkinci bileşen ise, yapıyı rezonans frekansında sürmek için gerekli olan kuvveti tanımlar. Ancak burada elektrostatik kuvvete ait frekans, mekanik rezonans frekansının iki katına eşittir. Dolayısıyla rezonatör yapısının rezonans frekansında sürülebilmesi için, uygulanan sinüsoidal gerilimin frekansının mekanik rezonans frekansının yarısına eşit olması gerekir.

Rezonatör yapısına uygulanan potansiyel farkın, Denklem (2.46)'da ifade edildiği gibi DC gerilim üzerine bindirilmiş sinüsoidal olduğu durum ele alınırsa, elektrostatik kuvvet Denklem (2.47)'deki gibi elde edilir (Alper 2005).

$$V(t) = V_{DC} + V_{ac} \sin(\omega_0 t) \quad (2.46)$$

$$F(t) = \frac{1}{2} \frac{N \epsilon_0 h}{d} \left[\left(V_{DC}^2 + \frac{V_{ac}^2}{2} \right) + 2V_{DC} V_{ac} \sin(\omega_0 t) - \frac{V_{ac}^2 \cos(2\omega_0 t)}{2} \right] \quad (2.47)$$

Denklem (2.47) incelendiğinde, toplamda üç tane elektrostatik kuvvet bileşeni elde edildiği görülür. Burada ilk bileşen, statik elektrostatik kuvvet olarak adlandırılır. Statik elektrostatik kuvvet, Denklem (2.48)'de verilmiştir:

$$F_{statik}(t) = \frac{1}{2} \frac{N \epsilon_0 h}{d} \left(V_{DC}^2 + \frac{V_{ac}^2}{2} \right) \quad (2.48)$$

İkinci bileşen, Denklem (2.49) ile ifade edilen ve frekansı rezonatör yapısının mekanik rezonans frekansına eşit sinüsoidal elektrostatik kuvvet bileşenidir.

$$F_{dinamik}(t) = \frac{N\varepsilon_0 h}{d} V_{DC} V_{ac} \sin(\omega_0 t) \quad (2.49)$$

Üçüncü bileşen ise, frekansı rezonatör yapısının mekanik rezonans frekansının iki katına eşit olan sinüsoidal elektrostatik kuvvet bileşenidir. Üçüncü bileşen, rezonatör yapısının bant geçiren filtre özelliği göstermesi sebebiyle filtrelendir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında rezonatör yapısının statik ve dinamik olmak üzere iki farklı yer değiştirme moduna sahip olacağı görülür. Bu iki modun daha kolay incelenebilmesi için frekans bölgesinde inceleme yapılabilir. Buna göre, zaman bölgesi gösterimleri sırasıyla Denklem (2.48) ve Denklem (2.49)'da verilen statik elektrostatik kuvvet ve dinamik elektrostatik kuvvet ifadelerinin frekans bölgesi gösterimleri, sırasıyla Denklem (2.50) ve Denklem (2.51)'de verilmiştir (Bao 2005):

$$F_{statik}(\omega) = \frac{1}{2} \frac{N\varepsilon_0 h}{d} \left(V_{DC}^2 + \frac{V_{ac}^2}{2} \right) \quad (2.50)$$

$$F_{dinamik}(\omega) = \frac{N\varepsilon_0 h}{d} V_{DC} V_{ac} \sin(\omega_0 t) \quad (2.51)$$

Rezonatör yapısının frekans bölgesindeki statik yer değiştirmesine ait gösterimi, Denklem (2.50)'de verilen frekans bölgesindeki statik elektrostatik kuvvet ifadesinin Denklem (2.10)'daki transfer fonksiyonunda yerine yazılmasıyla Denklem (2.52)'deki gibi elde edilir:

$$x_{statik}(\omega) = \frac{F_{statik}}{k} \quad (2.52)$$

Rezonatör yapısının frekans bölgesindeki dinamik yer değiştirmesine ait gösterimi ise, Denklem (2.51)'de verilen frekans bölgesindeki dinamik elektrostatik kuvvet ifadesinin Denklem (2.10)'daki transfer fonksiyonunda yerine yazılmasıyla Denklem (2.53)'teki gibi elde edilir:

$$x_{dinamik}(\omega) = \frac{F_{dinamik}}{k \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{Q\omega_0}\right)} \quad (2.53)$$

2.4 Elektrostatik Yay Yumuşaması Etkisi

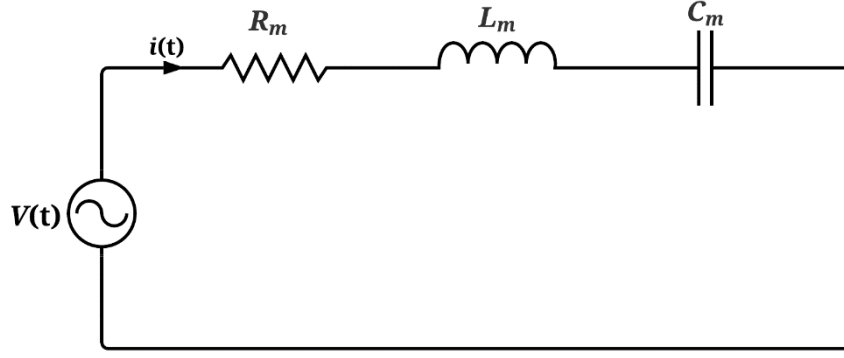
Elektrostatik yay yumuşaması etkisi, statik yer değiştirmeye sahip MEMS yapılarında yay sabitinin değişiminden ötürü rezonans frekansının kayması olarak tanımlanır (Bannon ve diğ. 2000). Kütle-yay-sönümleyici sistemiyle modellenen MEMS yapılarında; rezonans frekansı, kütle ve yay sabiti arasındaki ilişki Denklem (2.5)'te verilmiştir. Burada k ile nitelenen ifade, MEMS yapısına ait toplam yay sabiti olup normal koşullarda mekaniksel yay sabitine eşittir. Ancak statik yer değiştirmeye sahip MEMS yapılarında, mekaniksel yay sabitine ters yönde etkiyen bir elektriksel yay sabiti ortaya çıkar. Elektriksel yay sabiti, Denklem (2.54)'te gösterildiği gibi statik elektrostatik kuvvetin yer değiştirmeye göre birinci dereceden türevi alınarak elde edilir.

$$k_e = \frac{\partial F_{statik}}{\partial x} \quad (2.54)$$

Kapasitif alanın uzunluğunun değiştiği yönde hareket eden MEMS kapasitif rezonatör yapılarına ait statik elektrostatik kuvvet Denklem (2.48) ile hesaplanır. Buradaki kuvvet ifadesinin yer değiştirmeye göre birinci dereceden türevi sıfır olarak hesaplanır. Buna göre; kapasitif alana ait uzunluğu değiştiği yönde hareket eden MEMS kapasitif rezonatör yapıları için elektrostatik yay yumuşaması etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

2.5 MEMS Kapasitif Rezonatör Devre Modeli

Kütle-yay-sönümleyici sistemiyle modellenen MEMS kapasitif rezonatör yapılarının elektriksel karşılığı, seri RLC devresi ile belirtilir (Tilmans 1996). Örnek bir seri RLC devresi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5: Örnek bir seri RLC devresi.

Kütle-yay-sönümleyici sistemi ile seri RLC devresi arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için bu iki modele ait diferansiyel denklem ifadeleri kıyaslanabilir. Seri RLC devresine ait diferansiyel denklemi elde edebilmek için devreye ait akım-gerilim ilişkileri bulunmalıdır.

- Üzerinden $i(t)$ akımı akan L değerine sahip bir bobinin gerilim düşümü:

$$V_L(t) = L \times \frac{\partial i(t)}{\partial t} \quad (2.55)$$

- Üzerinde depolanan yük $q(t)$ olan C değerine sahip bir kapasitenin gerilim düşümü:

$$V_C(t) = \frac{q(t)}{C} \quad (2.56)$$

- Üzerinden $i(t)$ akımı akan R değerine sahip bir direncin gerilim düşümü:

$$V_R(t) = R \times i(t) \quad (2.57)$$

Bu bilgiler ışığında seri RLC devresine ait gerilim eşitliği Denklem (2.58)'deki gibi elde edilir.

$$V_s(t) = R \times i(t) + L \frac{\partial i(t)}{\partial t} + \frac{q(t)}{C} \quad (2.58)$$

Seri RLC devresinden akan $i(t)$ akım ifadesi yükün zamana göre değişimine eşittir. Buna göre $i(t)$ akımı ile $q(t)$ yükü arasındaki ilişki Denklem (2.59)'daki gibi tanımlanır:

$$i(t) = \frac{\partial q(t)}{\partial t} \quad (2.59)$$

Denklem (2.59)'da tanımlanan eşitlik kullanılarak Denklem (2.58)'de belirtilen ifade, Denklem (2.60) olarak yazılır.

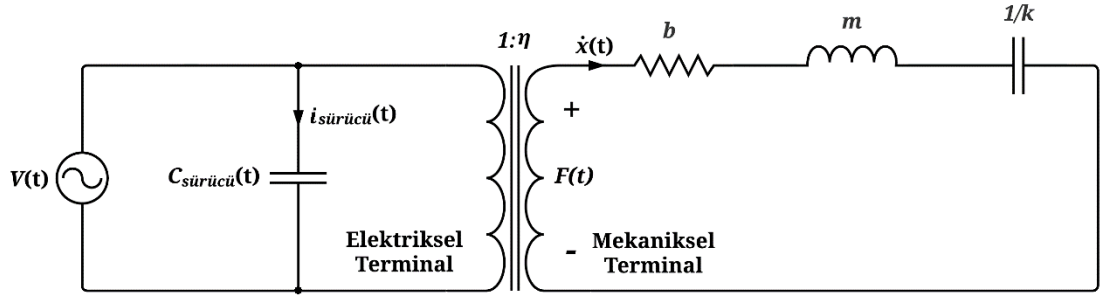
$$V_s(t) = L \frac{\partial^2 q(t)}{\partial t^2} + R \frac{\partial q(t)}{\partial t} + \frac{q(t)}{C} \quad (2.60)$$

Denklem (2.1)'de verilen kütle-yay-sönümleyici sistemine ait diferansiyel denklem ile Denklem (2.60)'ta verilen seri RLC devresine ait diferansiyel denklem arasında Tablo 2.1'de gösterildiği gibi bir ilişki kurulabilir.

Tablo 2.1: Mekaniksel ve elektriksel model parametreleri.

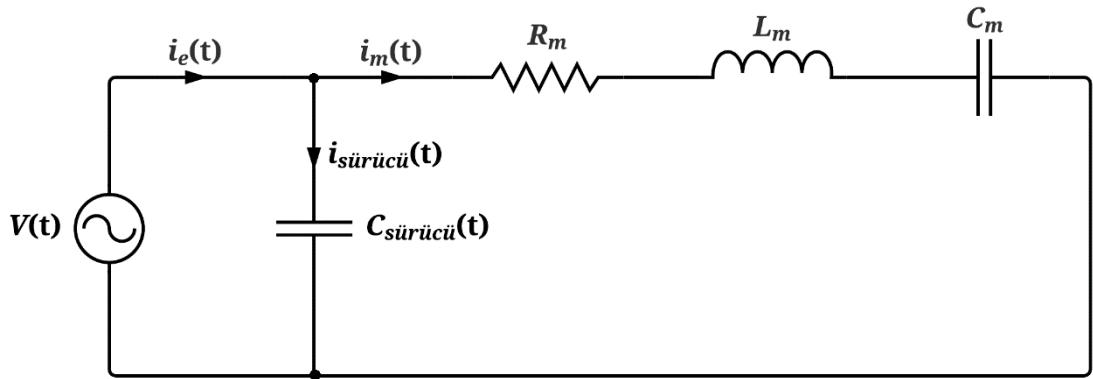
Mekaniksel Model (Kütle-Yay-Sönümleyici) Parametreleri		Elektriksel Model (Seri RLC Devresi) Parametreleri	
Kütle	m	Bobin	L
Sönümleme	b	Direnç	R
Yay sabiti	k	Kapasitansın Tersisi	$1/C$
Yer değiştirme	x	Yük	Q
Hız	v	Akım	I
Kuvvet	F	Gerilim	V

MEMS rezonatör yapısına ait mekaniksel ve elektriksel parametrelerin birbirlerine eşlenebilmesi için bir transformatör katsayısı kullanılır. Buna ait devre şeması Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6: MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel terminalleri.

Burada η mekaniksel parametreler ile elektriksel parametreleri eşlemek için kullanılan transformatör katsayısını, $i_{\text{sürücü}}(t)$ akımı sürücü parmaklar arasında oluşan akımı, $C_{\text{sürücü}}(t)$ sürücü ise parmaklar arasında oluşan kapasiteyi ifade eder. Şekil 2.6'da verilen devrenin eşdeğeri Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel terminallerinin birleştirilmiş eşdeğer devresi.

Burada $i_m(t)$ akımı rezonatör yapısının mekanik hareketi sonucu ortaya çıkan akımı, $i_e(t)$ elektriksel giriş akımını, L_m , C_m ve R_m ise sırasıyla kütle-yay-sönümleyici terimlerinin elektriksel karşılıklarını niteler. L_m , C_m ve R_m ifadeleri sırasıyla Denklem (2.61), Denklem (2.62) ve Denklem (2.63) ile hesaplanır (Tilmans 1996):

$$L_m = \frac{m}{\eta^2} \quad (2.61)$$

$$C_m = \frac{\eta^2}{k} \quad (2.62)$$

$$R_m = \frac{b}{\eta^2} \quad (2.63)$$

Mekaniksel parametreler ile elektriksel parametreleri eşlemek için kullanılan transformatör katsayısı η ise Denklem (2.64) ile hesaplanır (Tilmans 1996):

$$\eta = \frac{\partial C_{\text{sürücü}}(t)}{\partial x} \times V_{DC} \quad (2.64)$$

MEMS rezonatör yapısına ait rezonans frekansı ve kalite faktörü ifadeleri, elektriksel eşdeğer devre parametreleri kullanılarak elde edilebilir. Buna göre; Denklem (2.61) ve Denklem (2.62)'de verilen ifadelerin çarpmaya göre terslerinin alınıp birbirleriyle çarpılması durumunda Denklem (2.65) elde edilir:

$$\frac{1}{L_m} \times \frac{1}{C_m} = \frac{\eta^2}{m} \times \frac{k}{\eta^2} = \frac{k}{m} \quad (2.65)$$

Denklem (2.65)'te verilen eşitlik, Denklem (2.5)'te yerleştirilirse Denklem (2.66) elde edilir:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}} \quad (2.66)$$

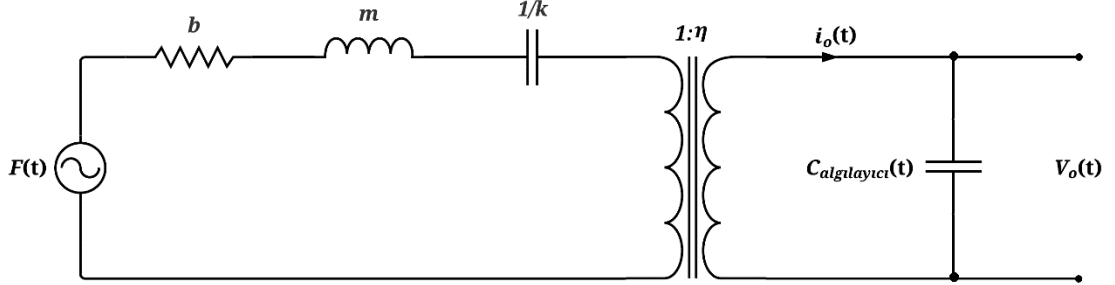
Benzer bir ilişkinin Denklem (2.8), Denklem (2.61), Denklem (2.62) ve Denklem (2.63)'te verilen ifadeler kullanılarak gerçekleştirilmesiyle de Denklem (2.67) elde edilir (Sabry ve diğ. 2012):

$$Q = \frac{L_m \omega_0}{R_m} \quad (2.67)$$

2.6 Elektrostatik Kapasitif Algılama

Elektrostatik kapasitif harekete geçirme yöntemi ile sürülen MEMS rezonatör yapılarında, yapının fiziksel hareketini anlamlı elektriksel sinyallere dönüştürmek

amacıyla elektrostatik kapasitif algılama metodu kullanılır (Trusov ve Shkel 2007). Bunun için kapasitif algılayıcı parmaklar kullanılarak yapının hareketi sonucunda yük değişimi, dolayısıyla da akım değişimi gözlemlenir. Bu metoda ait eşdeğer devre modeli Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8: MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel terminalleri ve algılayıcı kısmın elektriksel karşılığı.

Burada $C_{algılayıcı,o}(t)$, algılayıcı elektrotlara ait toplam kapasite ifadesi olup Denklem (2.68) ile hesaplanır.

$$C_{algılayıcı,o}(t) = \begin{cases} C, & \text{sabit kapasite} \\ C + C_{algılayıcı}(t), & \text{rezonans durumunda} \end{cases} \quad (2.68)$$

Rezonatör yapısının hareket etmediği durumlarda algılayıcı elektrotlardaki toplam kapasite Denklem (2.42)’deki ifadeye eşittir. Rezonatör yapısının hareket ettiği durumlarda ise toplam kapasite, sabit durumdaki kapasite ile hareket miktarına bağlı olarak elde edilen kapasitenin toplamına eşittir.

MEMS kapasitif rezonatör yapısına, Denklem (2.46)’da verildiği gibi potansiyel fark uygulandığında algılayıcı kapasitif parmaklar arasında depolanan toplam yük miktarı Denklem (2.69)’da gösterildiği gibi elde edilir:

$$q(t) = C_{algılayıcı}(t) \times V_o \quad (2.69)$$

Burada V_o , yapının fiziksel hareketi sonucu oluşan akımdan dolayı gözlemlenen, algılayıcı kapasitif parmaklar üzerindeki potansiyel farktır. Bu potansiyel fark, Denklem (2.70)’de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

$$V_o(t) = V_{DC,o} + V_{ac,o} \sin(\omega t) \quad (2.70)$$

Buna göre, algılayıcı kapasitif parmaklarda fiziksel hareket sebebiyle oluşan akım Denklem (2.71)'deki gibi ifade edilir:

$$i_o(t) = \frac{dq(t)}{dt} = V_o(t) \times \frac{\partial C_{algılayıcı,o}(t)}{\partial t} + C_{algılayıcı,o}(t) \times \frac{\partial V_o(t)}{\partial t} \quad (2.71)$$

Denklem (2.70)'te ifade edilen potansiyel ifadesinde $V_{DC,o} \gg V_{ac,o}$ olursa Denklem (2.71), Denklem (2.72)'de gösterildiği gibi sadeleşir:

$$i_o(t) = V_{DC,o} \times \frac{\partial C_{algılayıcı,o}(t)}{\partial t} \quad (2.72)$$

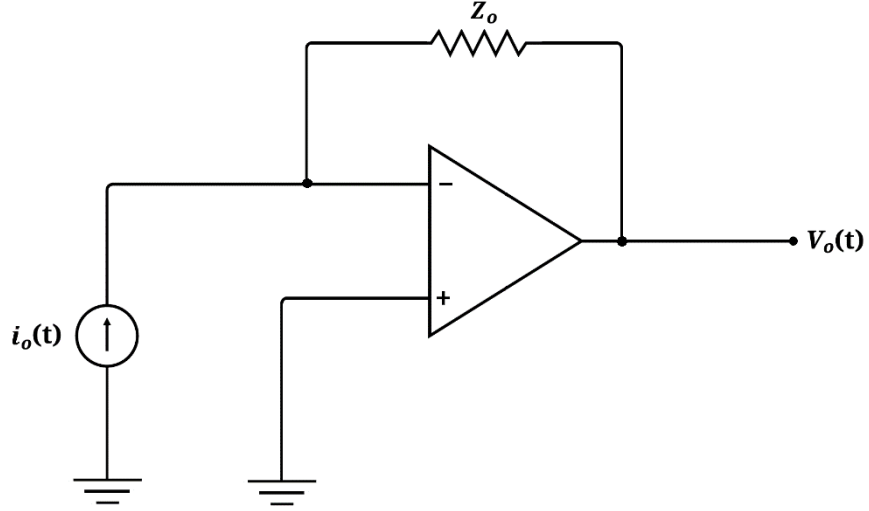
Ayrıca Denklem (2.72), Denklem (2.73)'te gösterildiği gibi yazılabilir:

$$i_o(t) = V_{DC,o} \times \frac{\partial C_{algılayıcı,o}(t)}{\partial x} \times \frac{\partial x(t)}{\partial t} \quad (2.73)$$

Elde edilen son ifadenin frekans bölgesindeki gösterimi Denklem (2.74)'te verilmiştir:

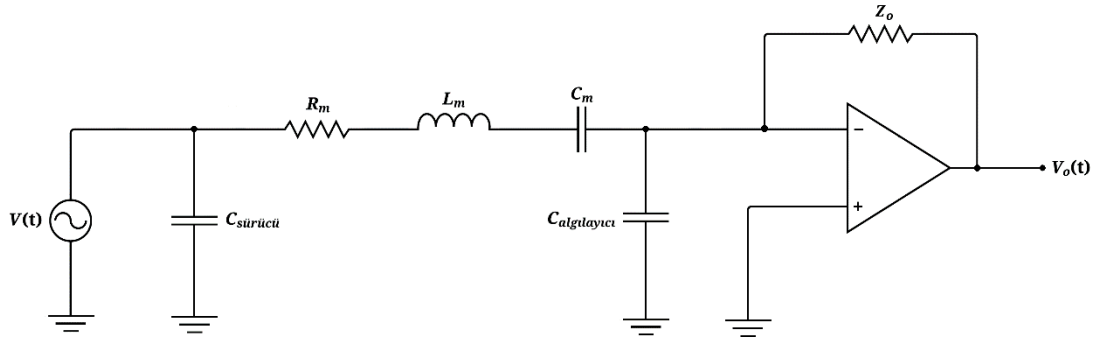
$$i_o(\omega) = V_{DC,o} \times \frac{\partial C_{algılayıcı,o}(t)}{\partial x} \times j\omega x(\omega) \quad (2.74)$$

Denklem (2.74) ile belirtilen algılayıcı kapasitif parmaklarda fiziksel hareket sebebiyle oluşan akımın harici bir elektronik devre aracılığı ile empedans üzerinden gerilime dönüştürülmesi mümkündür. Bunun için Transempedans Yükselticiler kullanılır. Transempedans Yükselticiler; düşük giriş empedansına sahiptir, parazitik kapasitanslara karşı duyarsızdır ve yüksek DC kazanç sayesinde sanal toprak gibi davranır. Şekil 2.9'da Transempedans Yükseltici devresine ait eşdeğer devre modeli gösterilmiştir:



Şekil 2.9: Transempedans yükseltici devresi.

Burada Z_o Transempedans Yükseltici devresinin empedansıdır. Şekil 2.9'da gösterilen Transempedans Yükseltici devresi, Şekil 2.8'de gösterilen eşdeğer devre modelinin çıkışına yerleştirildiğinde elde edilecek yeni eşdeğer devre Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Transempedans yükseltici devresi.

Şekil 2.10'da verilen devrenin çıkış geriliminin frekans bölgesindeki gösterimi Denklem (2.75)'te ifade edilmiştir:

$$V_o(\omega) = i_o(\omega) \left(\frac{1}{j\omega C_{algılayıcı}} // Z_o \right) \quad (2.75)$$

2.7 Kütle Artışı Sebebiyle Frekans Kayması

Hedef analitlerin tespiti için kullanılan MEMS rezonatör yapılarında analitlerin yapıya tutunmasıyla efektif kütlede artış meydana gelir (Bayraktar ve diğ. 2011). Denklem (2.5)'te verilen ilişki incelendiğinde, efektif kütle artmasıyla rezonans frekansında azalma görülür. Elde edilen yeni rezonans frekansı Denklem (2.76)'daki gibi ifade edilir:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_{rez} + m_{art}}} \quad (2.76)$$

Burada m_{rez} rezonatör yapısının ilk durumdaki efektif kütle, m_{art} ise kütle artışını ifade etmektedir. Denklem (2.76)'da verilen ifadenin her iki tarafının karesi alınarak Denklem (2.77) elde edilir:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m_{rez} + m_{art}} = \frac{k}{m_{rez}} \times \frac{m_{rez}}{m_{rez} + m_{art}} \quad (2.77)$$

Denklem (2.5)'in Denklem (2.77)'de yerleştirilmesi ile Denklem (2.78) elde edilir:

$$\frac{\omega^2}{\omega_0^2} = \frac{m_{rez}}{m_{rez} + m_{art}} \quad (2.78)$$

Denklem (2.75) için birinci dereceden Taylor serisi açılımı kullanılarak Denklem (2.79) elde edilir:

$$\omega^2 \approx \omega_0^2 + 2\omega_0(\omega - \omega_0) \quad (2.79)$$

Denklem (2.79)'da elde edilen ifadenin Denklem (2.78)'te yerine yazılmasıyla Denklem (2.80) elde edilir:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0 = -\frac{1}{2} \frac{m_{art}}{m_{rez} + m_{art}} \omega_0 \quad (2.80)$$

Burada $\Delta\omega$ kütle artışı nedeni ile gerçekleşen frekans değişimidir. Kütle artışı, rezonatör yapısının efektif kütle ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğu için Denklem (2.80)'de verilen ifade Denklem (2.81)'deki gibi sadeleştirilir:

$$\Delta\omega \approx -\frac{1}{2} \frac{m_{art}}{m_{res}} \omega_0 \quad (2.81)$$

Minimum algılanabilir rezonans frekansı kayması, frekans bölgesine yansıyan gürültü ile değişir. Frekans bölgesine yansıyan başlıca iki gürültü kaynağı vardır: Bunlardan ilki elektronik gürültü olup arayüz elektroniği veya test düzeneğinden kaynaklanmaktadır. İkinci gürültü kaynağı ise Brownian gürültüsüdür (Gabrielson 1993). Brownian gürültüsü, rezonatör yapısının bulunduğu ortamdaki gaz molekülleri ile etkileşmesinin sonucu oluşan, sıcaklığa bağlı rastgele hareket olarak tanımlanır. Brownian gürültüsü Denklem (2.82) ile tanımlanır:

$$\text{Brownian Gürültüsü} = \sqrt{\frac{4k_B T b}{m^2}} \quad (2.82)$$

Burada k_B Boltzman sabiti, T çalışma sıcaklığı, b sistemin sönümlenme katsayısı ve m ise rezonatör yapısının ataletsel kütesini tanımlamaktadır. Bu denkleme göre; ataletsel kütenin büyük ve Denklem (2.8)'deki ilişkiye göre kalite faktörünün yüksek olması Brownian gürültüsünün etkisini azaltır.

2.8 Parametre Çıkarımı

MEMS yapıları üretim yöntemlerinin kısıtlarından ötürü çoğunlukla hedeflenen karakteristik parametrelerde sapmalar meydana gelerek üretilirler. Üretim sonrası elde edilen yeni karakteristik parametrelerin hesaplanabilmesi için frekans testleri gerçekleştirilip deneysel veriler hesaplanır. Parametre çıkarımı, hesaplanan deneysel veriler üzerinden gerçekleştirilir.

2.8.1 Yay İncelmesi Hesabı

MEMS üretim işlemlerinden biri olan Derin Kuyu Aşındırması (DRIE) işleminde yüksek en-boy oranına sahip yapılar oluşturulurken hedeflenen ölçülerde sapmalar meydana gelir (Xie ve diğ. 2013). Özellikle yüksek-en boy oranına sahip

olacak şekilde tasarlanan yay yapıları, bu etkiden ötürü hedeflenen ölçülerden daha ince olacak şekilde üretilir. Bu sebeple MEMS yapısının yay sabiti de hedeflenenden farklı olur. Yay sabitinin değişmesi ile MEMS yapısının rezonans frekansında da değişim gözlemlenir.

Hedeflenen ölçülerde sapmalarla üretilen yay yapılarının genişlikleri, deneysel veriler üzerinden hesaplanan rezonans frekansı kullanılarak hesaplanabilir. Bu tez kapsamında tasarlanan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı, her biri birbirine paralel 3 kılavuzlu yaydan oluşan toplam 4 yay grubuna sahiptir. Buna göre tez kapsamında tasarlanan MEMS rezonatör yapısının yay sabiti Denklem (2.83) ile hesaplanır:

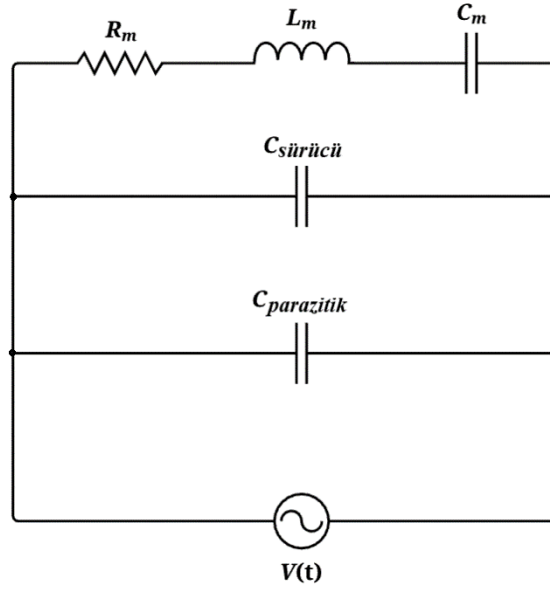
$$k = \frac{12Ehw^3}{l^3} \quad (2.83)$$

Deneysel veriler yardımıyla hesaplanan rezonans frekansının Denklem (2.5)'te yerleştirilmesi ile MEMS rezonatör yapısının yeni yay sabiti hesaplanabilir. Hesaplanan yeni yay sabiti k_{yeni} olarak nitelendirilirse üretim sonrası elde edilen yay genişliği Denklem (2.83) kullanılarak Denklem (2.84)'teki gibi hesaplanır:

$$w_{üretilen} = \left(\frac{k_{yeni} l^3}{Eh} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.84)$$

2.8.2 Elektriksel Eşdeğer Devre Parametreleri

MEMS yapılarının frekans testleri gerçekleştirilirken çeşitli parazitik etkiler deneysel verilere etki eder. Buna göre Şekil 2.7'de verilen elektriksel eşdeğer devre Şekil 2.11'deki gibi güncellenir (Sabry ve diğ. 2012):



Şekil 2.11: MEMS rezonatör yapısına ait elektriksel eşdeğer devre.

Burada $C_{parazitik}$ toplam parazitik kapasitedir. Şekil 2.11’de verilen elektriksel eşdeğer devrenin frekans düzlemindeki admitans ifadesi Denklem (2.85)’te tanımlanmıştır:

$$Y(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) \quad (2.85)$$

Burada $G(\omega)$ ve $B(\omega)$ sırasıyla elektriksel eşdeğer devrenin frekans bağımlı kondüktans ve süseptans ifadeleridir. Şekil 2.11’deki devrenin analizi yapıldığında kondüktans ifadesi Denklem (2.86), süseptans ifadesi ise Denklem (2.87)’de verildiği gibi elde edilir (Sabry ve diğ. 2012):

$$G(\omega) = \frac{R_m}{R_m^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right)^2} \quad (2.86)$$

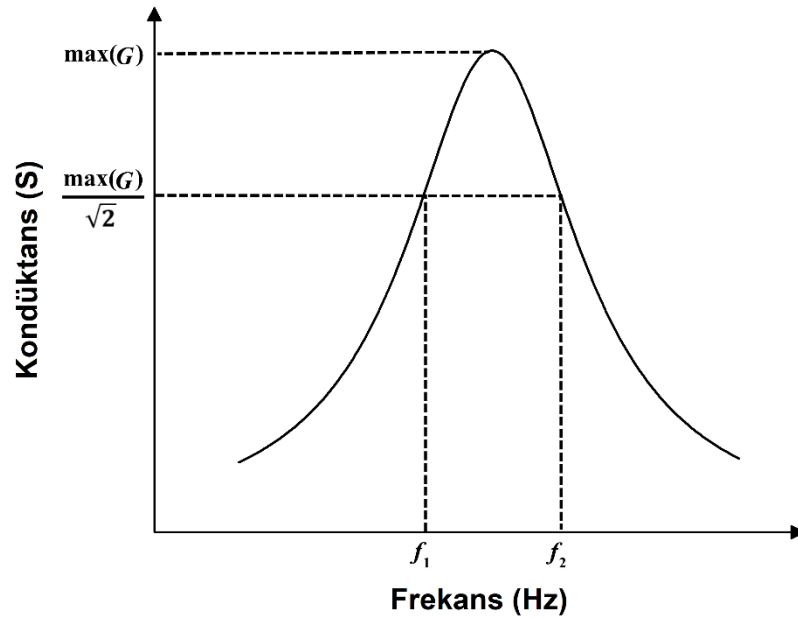
$$B(\omega) = \omega(C_{sürücü} + C_{parazitik}) - \frac{G(\omega)}{R_m} \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}\right) \quad (2.87)$$

Denklem (2.86) incelendiğinde, Denklem (2.66)’da verilen eşitliği yardımıyla maksimum kondüktansın rezonans frekansında elde edildiği görülür (Sabry ve diğ. 2012):

$$G(\omega_0) = \frac{1}{R_m} \quad (2.88)$$

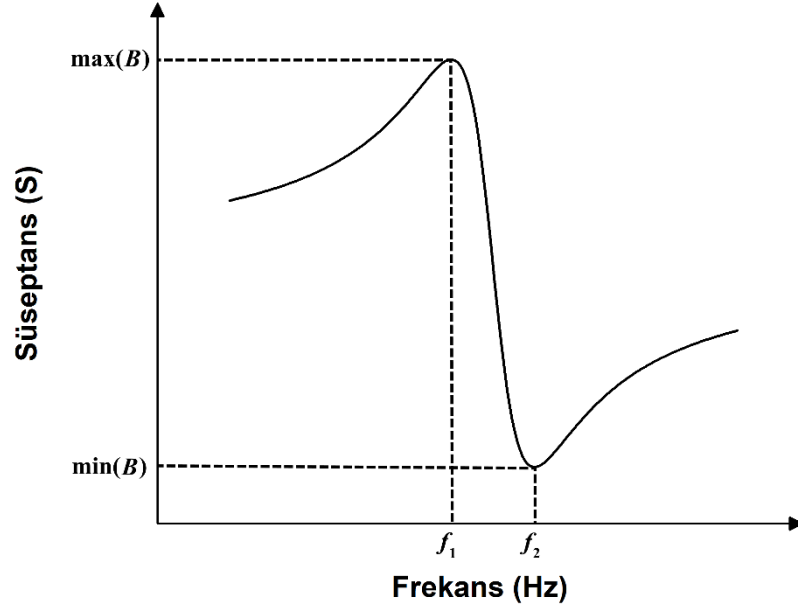
Buna göre; elektriksel eşdeğer devreye ait R_m parametresi, deneysel kondüktans verilerinin tepe noktasının çarpmaya göre tersine eşit olur.

MEMS rezonatör yapısını modelleyen elektriksel eşdeğer devreye ait diğer parametrelerin elde edilmesi için Denklem (2.66) ve Denklem (2.67)'deki eşitlikler kullanılır. Denklem (2.67)'de gösterilen rezonans frekansı parametresi, Denklem (2.88)'de verilen ilişkiye göre kondüktansın maksimum olduğu noktadaki frekansa karşılık gelir. Diğer bir parametre olan kalite faktörü ise, seri RLC devresine ait kondüktans ve süseptans grafiklerinin 3 dB kesim noktaları kullanılarak hesaplanır (Lee ve Seshia 2011). Seri RLC devresine ait örnek kondüktans grafiği ve bu grafik üzerindeki 3 dB kesim noktaları Şekil 2.12'de gösterilmiştir:



Şekil 2.12: Seri RLC devresine ait örnek bir kondüktans-frekans grafiği.

Benzer şekilde seri RLC devresine ait örnek süseptans grafiği ve bu grafik üzerindeki 3 dB kesim noktaları da Şekil 2.13'te gösterilmiştir:



Şekil 2.13: Seri RLC devresine ait örnek bir süseptans-frekans grafiği.

Burada f_0 Hertz birimindeki rezonans frekansı, f_1 ve f_2 ise 3 dB kesim noktalarıdır (Lee ve Seshia 2011). Bu bilgilere göre, deneysel veriler yardımıyla kalite faktörü hesabı Denklem (2.93)'te ifade edildiği gibi gerçekleştirilir:

$$Q = \frac{f_0}{\text{Bant Genişliği}} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (2.93)$$

Deneysel kondüktans ve süseptans verileri yardımıyla R_m , rezonans frekansı ve kalite faktörü parametreleri hesaplandıktan sonra L_m parametresi, Denklem (2.67) kullanılarak Denklem (2.94)'teki gibi hesaplanır:

$$L_m = \frac{QR_m}{2\pi f_0} \quad (2.94)$$

Bir diğer elektriksel eşdeğer devre parametresi olan C_m ise, rezonans frekansı ve L_m parametrelerinin değerlerinin hesaplanmasından sonra Denklem (2.66) kullanılarak Denklem (2.95)'teki gibi hesaplanır:

$$C_m = \frac{1}{L_m \omega_0^2} = \frac{1}{L_m (2\pi f_0)^2} \quad (2.95)$$

MEMS rezonatör yapısını modelleyen elektriksel eşdeğer devreye ait eşdeğer kapasite ifadesi de Denklem (2.96)'da verildiği gibi hesaplanır (Sabry ve diğ. 2012):

$$C_{eşdeğer}(\omega) = \frac{B(\omega)}{\omega} \quad (2.96)$$

3. MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR YAPISININ TASARIMI, TEORİK ANALİZİ VE FEM ANALİZLERİ

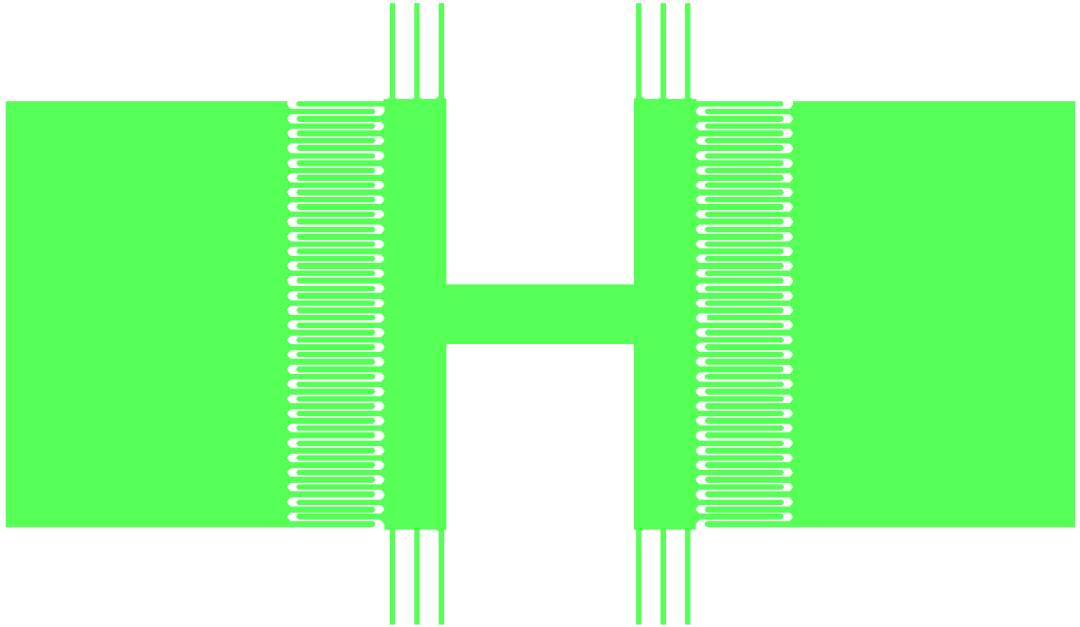
Bu tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı, Şekil 2.1’de gösterilen genel yapıda olduğu gibi ataletsel kütle, sürücü elektrot ve algılayıcı elektrottan oluşmaktadır. Ataletsel kütle, 4 yay grubu tarafından tutulmaktadır. Her bir yay grubu, birbirine paralel 3 tane kılavuzlu yay yapısından meydana gelmektedir. Ayrıca yay yapıları hem sıkışan hava film sönümlenme etkisini minimuma indirmek hem de örtüşen alanın uzunluğunun değişmesini sağlamak adına ataletsel kütleli yatay yönde hareket ettirecek şekilde tasarlanmıştır. MEMS rezonatör yapısını oluşturan tarak parmaklar ise, düşük gerilim

Tablo 3.1: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait tasarım parametreleri.

MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör tasarım parametreleri	
Yapısal Kalınlık (μm)	35
Yay Genişliği (μm)	4
Yay Uzunluğu (μm)	80
Yay Sayısı	4
Yay Sabiti (N/m)	8872.5
Tarak Parmak Genişliği (μm)	4
Tarak Parmak Uzunluğu (μm)	70
Örtüşen Alanın Uzunluğu (μm)	60
Kapasitif Açıklık (μm)	2
Kapasitif Parmak Sayısı (tek bir elektrot için)	29
Toplam Ataletsel Kütle (kg)	2.6637×10^{-9}
Rezonans Frekansı (Hz)	216.85×10^3
Durağan Toplam Kapasitans Değeri (F)	5.2967×10^{-13}
Efektif Hassasiyet ($\partial C/\partial x$) (F/m)	8.8279×10^{-9}
Tasarımda Kullanılan Kalite Faktörü	100
Kütle Hassasiyeti (pg/Hz)	44.083
Brownian Gürültüsü ($\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$)	8.6679×10^{-5}

değerlerinde yüksek elektrostatik kuvvet oluşturabilmek adına her bir elektrotta 29 adet olacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca ataletsel kütleye ait tarak parmaklar ile elektrotlara ait tarak parmaklar arasındaki mesafe $2 \mu\text{m}$, parmak uzunlukları da $70 \mu\text{m}$ olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Diğer bir önemli parametre olan yapısal kalınlık da $35 \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Tablo 3.1’de, MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait tasarım parametreleri ve bu parametrelere göre bazı teorik sonuçlar verilmiştir.

Tablo 3.1’de tasarım parametreleri verilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının 2-boyutlu görseli Şekil 3.1’de verilmiştir:



Şekil 3.1: Tasarlanan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının 2-boyutlu gösterimi.

3.1 MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Teorik Analizi

Bu bölümde, tasarım parametreleri kullanılarak MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının teorik analizi gerçekleştirilmiştir.

Teorik analizin ilk aşamasında, rezonatör yapısının DC kutuplama gerilimi varlığında statik bükülmesi incelenmiştir. Bunun için öncelikle farklı DC kutuplama gerilimlerine göre Denklem (2.37) kullanılarak rezonatör yapısına etkiyen statik

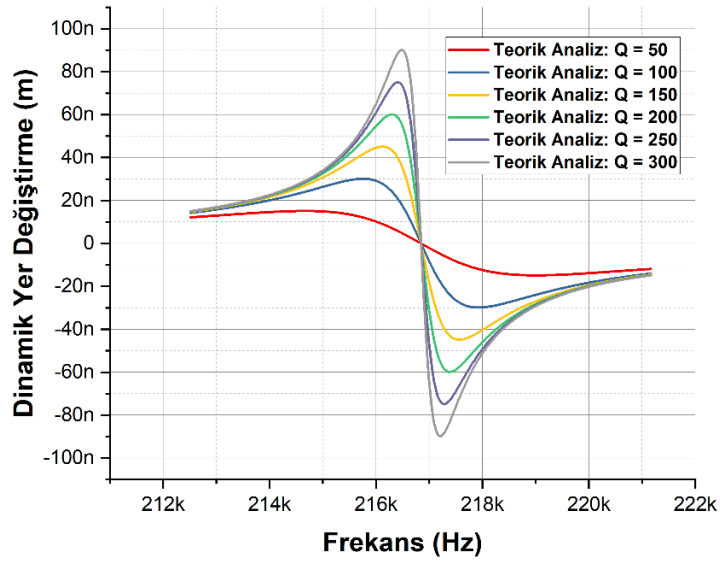
elektrostatik kuvvet hesaplanmıştır. Sonrasında ise Denklem (2.52) yardımıyla rezonatör yapısının statik yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Son olarak da Denklem (2.38) kullanılarak kapasite değerleri hesaplanmıştır. Bu analize ilişkin çıktılar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Tasarım parametrelerine göre farklı DC kutuplama gerilimleri varlığında teorik elektrostatik kuvvet, teorik statik yer değiştirme ve teorik kapasite cevabı.

DC Kutuplama Gerilimi	Statik Elektrostatik Kuvvet	Statik Yer Değiştirme	Kapasite
$V_{DC} = 5 V$	$0.1084 \mu N$	$12.219 pm$	$520.3801 fF$
$V_{DC} = 10 V$	$0.4336 \mu N$	$48.876 pm$	$520.3804 fF$
$V_{DC} = 15 V$	$0.9757 \mu N$	$0.1099 nm$	$520.3809 fF$
$V_{DC} = 20 V$	$1.7346 \mu N$	$0.1955 nm$	$520.3817 fF$
$V_{DC} = 25 V$	$2.7103 \mu N$	$0.3055 nm$	$520.3826 fF$
$V_{DC} = 30 V$	$3.9029 \mu N$	$0.4399 nm$	$520.3838 fF$
$V_{DC} = 35 V$	$5.3122 \mu N$	$0.5987 nm$	$520.3852 fF$
$V_{DC} = 40 V$	$6.9384 \mu N$	$0.7820 nm$	$520.3868 fF$
$V_{DC} = 45 V$	$8.7814 \mu N$	$0.9897 nm$	$520.3886 fF$
$V_{DC} = 50 V$	$10.841 \mu N$	$1.2219 nm$	$520.3906 fF$

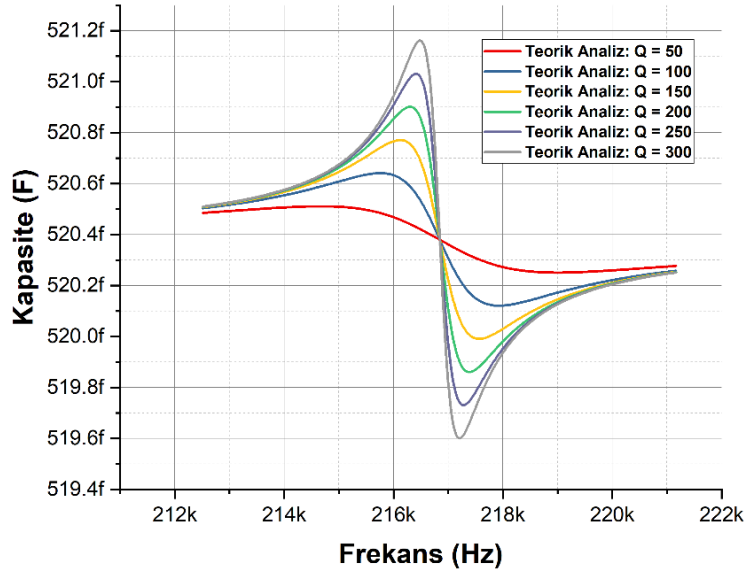
Teorik analizin ikinci aşamasında AC + DC biçimindeki potansiyel farkın varlığında yapının frekans cevabı incelenmiştir. AC + DC biçimindeki potansiyel farkın yapıya uygulanış biçimine bağlı olarak rezonatör yapısına iki farklı şekilde elektrostatik kuvvet etki eder. Bunlardan ilki, Denklem (2.51) ile ifade edilip AC ve DC gerilimlerin farklı portlar kullanılarak yapıya farklı noktalardan uygulanmasıyla elde edilir. İkinci ise, Denklem (2.50) ile ifade edilip AC + DC biçimindeki potansiyel farkın aynı port üzerinden yapıya uygulanmasıyla elde edilir. Bu tez çalışmasında, frekans testleri LCR metre ile gerçekleştirildiği için AC + DC biçimindeki potansiyel fark yapıya aynı port üzerinden sağlanmıştır. Buna göre, rezonatör yapısına etkileyen teorik elektrostatik kuvvet, tasarım parametrelerine göre Denklem (2.50) kullanılarak $V_{DC} = 35 V$ & $V_{ac} = 2 V$ varlığında $5.3209 \mu N$ olarak hesaplanmıştır. Bu elektrostatik kuvvet değerine göre rezonatör yapısının farklı kalite faktörü

değerlerindeki dinamik yer değiştirmesi, Denklem (2.53) yardımıyla Şekil 3.2’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.2: Tasarım parametrelerine göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının teorik dinamik yer değiştirme – frekans grafiği ($V_{DC} = 35 V$ & $V_{ac} = 2 V$).

Şekil 3.2’de elde edilen dinamik yer değiştirme sonuçlarına göre toplam kapasitenin frekansa göre değişimi, Tablo 3.1’de verilen parametrelere sahip yapı için Denklem (2.38) kullanılarak Şekil 3.3’te gösterildiği gibi elde edilir:



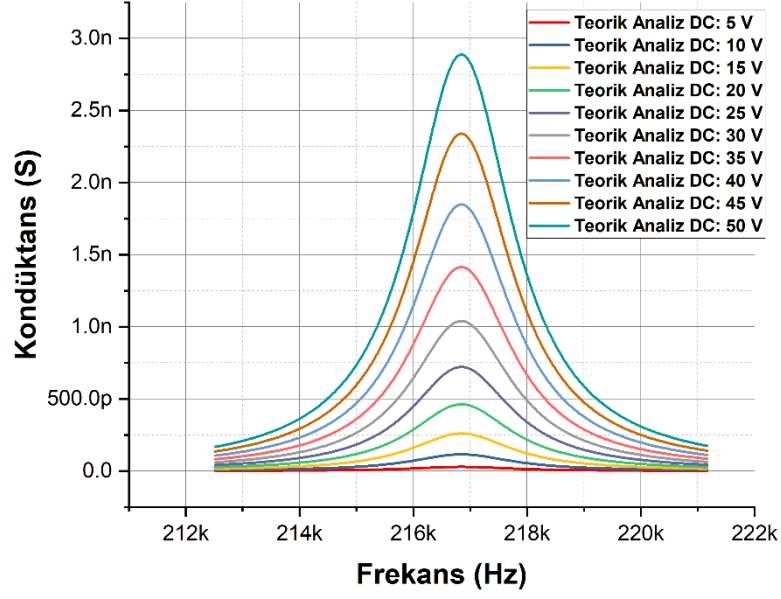
Şekil 3.3: Tasarım parametrelerine göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının teorik kapasite – frekans grafiği ($V_{DC} = 35 V$ & $V_{ac} = 2 V$).

Teorik analizin bir diğerk aşamasında, Şekil 2.7’de gösterilen elektriksel eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır. Farklı DC kutuplama gerilimlerine göre $Q = 100$ iken L_m , C_m ve R_m parametrelerinin değerleri, sırasıyla Denklem (2.61), Denklem (2.62) ve Denklem (2.63) kullanılarak Tablo 3.3’te gösterildiği gibi elde edilir:

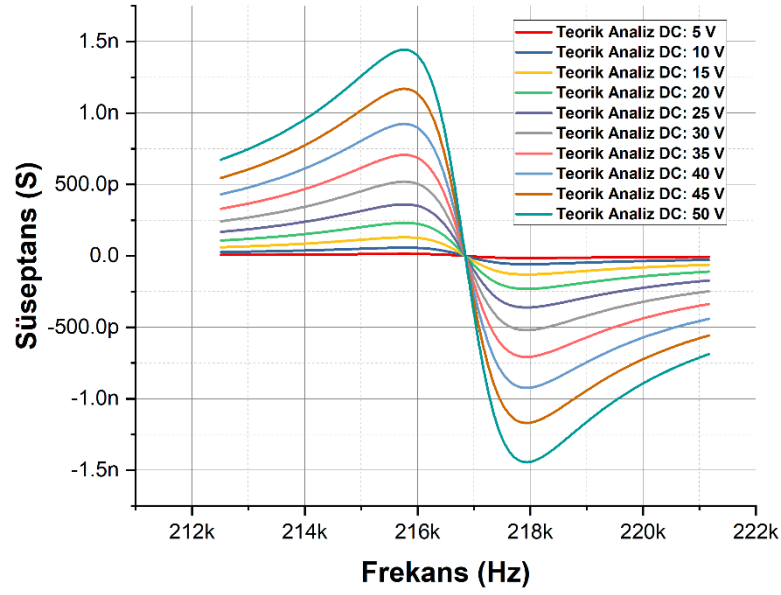
Tablo 3.3: Farklı DC kutuplama gerilimlerine göre teorik olarak hesaplanan elektriksel eşdeğer devre parametreleri ($Q = 100$).

V_{DC}	L_m	C_m	R_m
5 V	2.5416 MH	0.2119 aF	34.629 G Ω
10 V	0.6354 MH	0.8478 aF	8.6572 G Ω
15 V	0.2824 MH	1.9075 aF	3.8476 G Ω
20 V	0.1588 MH	3.3912 aF	2.1643 G Ω
25 V	0.1017 MH	5.2987 aF	1.3851 G Ω
30 V	70.599 kH	7.6302 aF	0.9619 G Ω
35 V	51.869 kH	10.386 aF	0.7067 G Ω
40 V	39.712 kH	13.565 aF	0.5411 G Ω
45 V	31.378 kH	17.168 aF	0.4275 G Ω
50 V	25.416 kH	21.195 aF	0.3463 G Ω

Tablo 3.3’e göre, Şekil 2.7’de gösterilen elektriksel eşdeğer devreye ait kondüktans ve süseptans ifadelerinin frekansa göre değişimi, Denklem (2.90) ve Denklem (2.91) kullanılarak sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te gösterildiği gibi elde edilir:

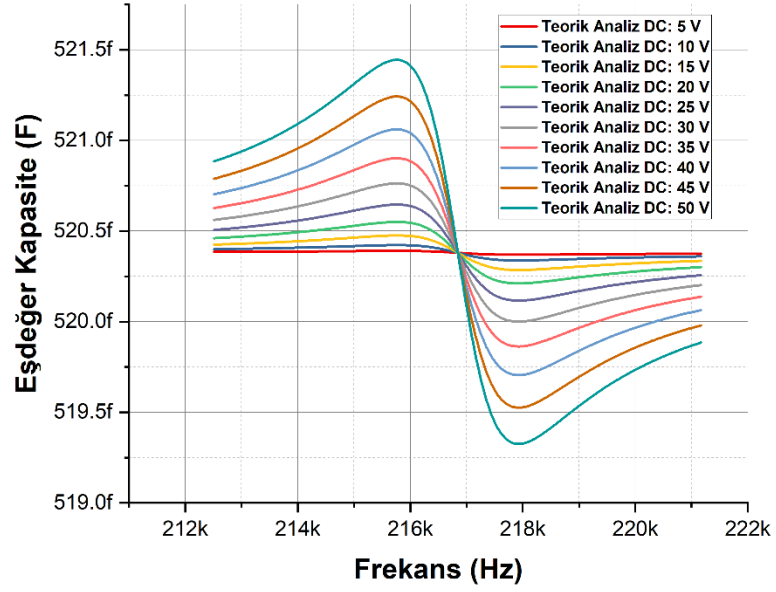


Şekil 3.4: Teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kondüktans – frekans grafiği ($Q = 100$).



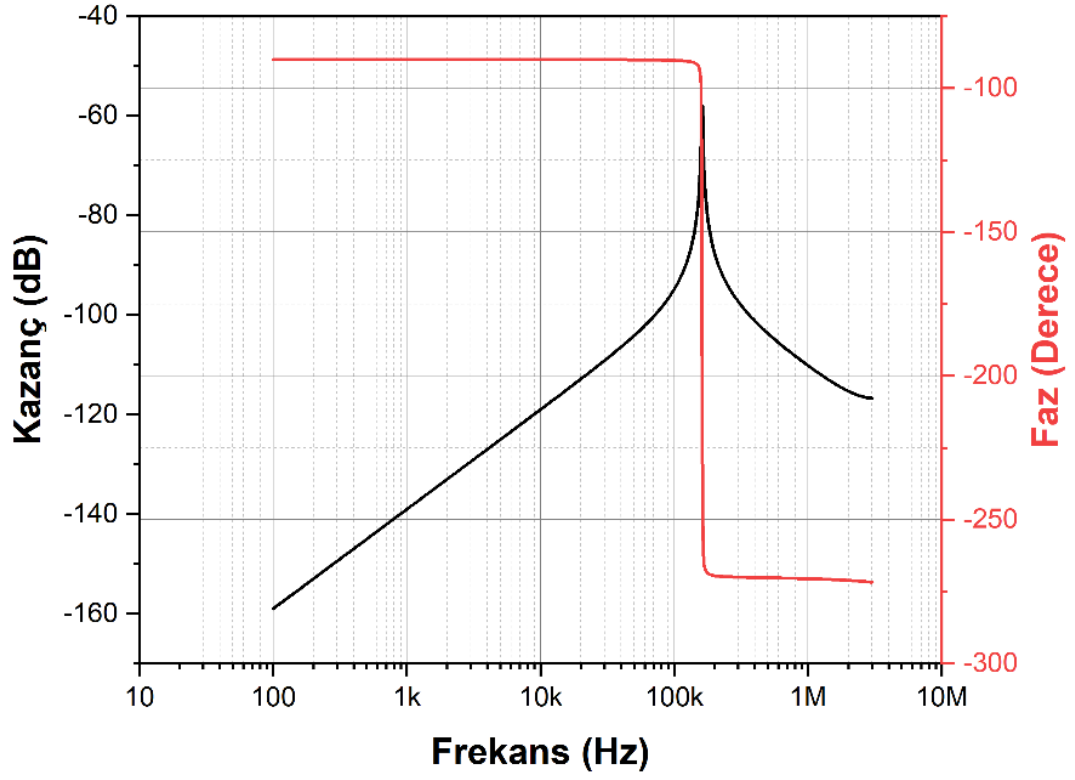
Şekil 3.5: Teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde süseptans – frekans grafiği ($Q = 100$).

Şekil 2.7'de gösterilen elektriksel eşdeğer devreye ait eşdeğer kapasitenin frekansa göre değişimi de Tablo 3.3'te verilen parametrelere göre Denklem (2.96) kullanılarak Şekil 3.6'da gösterildiği gibi elde edilir:

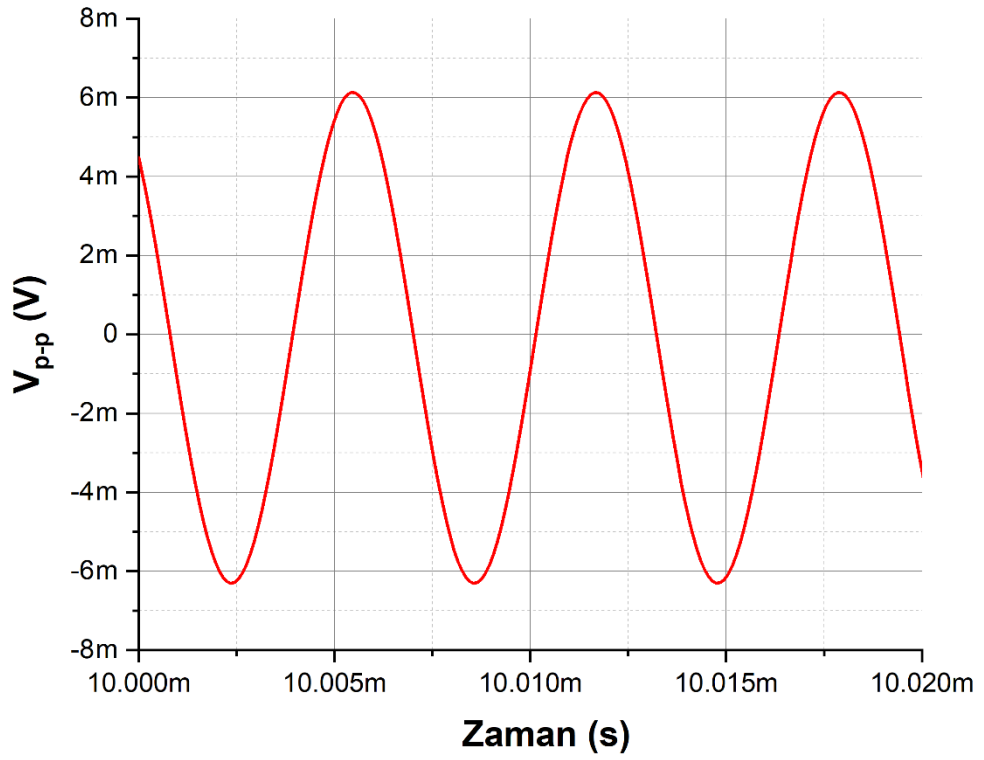


Şekil 3.6: Teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde elektriksel eşdeğer devreye ait eşdeğer kapasite – frekans grafiği ($Q = 100$).

Teorik analizin son aşamasında, Tablo 3.3'te verilen elektriksel eşdeğer devre parametrelerine göre Şekil 2.10'da verilen devrenin benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada Transempedans yükseltici devresine ait işlemsel yükseltici, Texas Instrument firmasına ait OPA 656 olarak seçilmiştir (Texas Instrument 2015). Bu yükseltici, düşük akım gürültüsü ve yüksek bant genişliğine sahiptir. Transempedans yükseltici devresinin empedansı ise $1 \text{ M}\Omega$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Benzetim çalışması sonucunda Şekil 2.10'da verilen eşdeğer devrenin kazanç ve fazının frekansa göre değişimi Şekil 3.7'de, çıkış geriliminin geçiş (transient) analizi sonucu ise Şekil 3.8'de gösterildiği gibi elde edilmiştir:



Şekil 3.7: Şekil 2.10'da verilen eşdeğer devrenin kazanç ve fazının frekansa göre değişimi.



Şekil 3.8: Şekil 2.10'da verilen eşdeğer devrenin çıkış geriliminin geçiş (transient) analizi sonucu.

3.2 Tasarım Parametrelerine Göre MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının FEM Analizleri

MEMS yapılarının karakteristiklerini inceleyebilmek adına teorik çıkarımların yanında FEM analizleri de gerçekleştirilir. FEM (Sonlu Elemanlar Metodu), karmaşık mühendislik problemlerinin basite indirgenerek kontrol edilebilir parçalarla çözümünü sağlayan bir yöntemdir. Bu metod; yapısal mekanik problemleri, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanlar gibi birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılmaktadır.

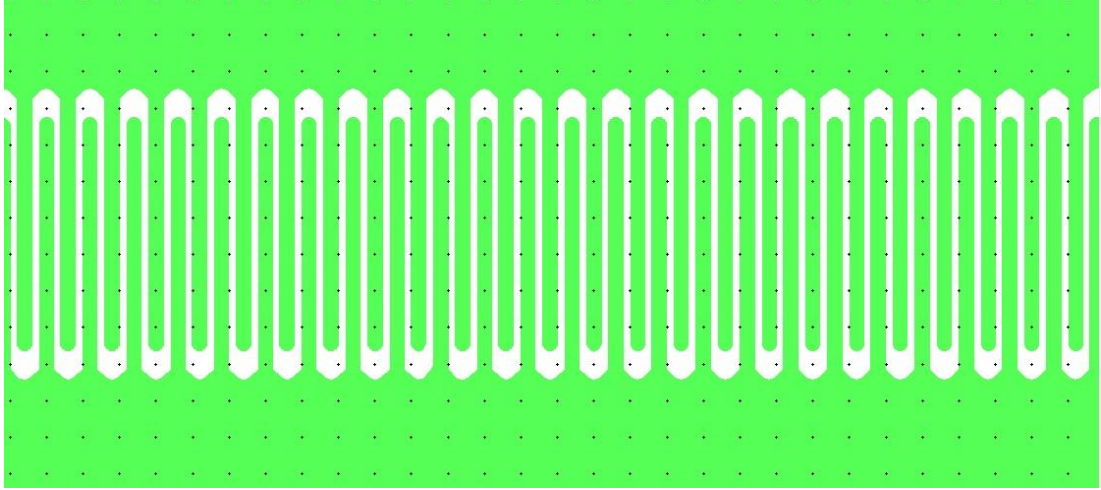
Literatürde yaygın olarak kullanılan FEM yazılımlarının çoğu oldukça yüksek maliyetlere sahiptir. Bu sebeple, Şekil 3.1’de 2-boyutlu gösterimi ve Tablo 3.1’de tasarım parametreleri verilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının FEM analizleri için ücretsiz ve açık kaynak kodlu Elmer FEM yazılımı (Raback ve diğ. 2019) tercih edilmiştir. İlk aşamada Elmer FEM yazılımı kullanılarak yapının modal analizi gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda yapının ilk üç mod rezonans frekansları belirlenmiştir. İkinci aşamada yine Elmer FEM yazılımı kullanılarak yapının statik analizi gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda da yapının statik bükülme karakteristiği incelenmiştir. Yapılan literatür taramalarında, MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapıları için herhangi bir FEM yazılımı ile frekans analizi yapılmadığı görülmüştür. Bu kapsamda, son aşamada Elmer FEM yazılımının kaynak kodlarında güncellemeler yapılarak literatürde ilk defa MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için FEM yazılımı ile frekans analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2.1 MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının CAD Çizimi

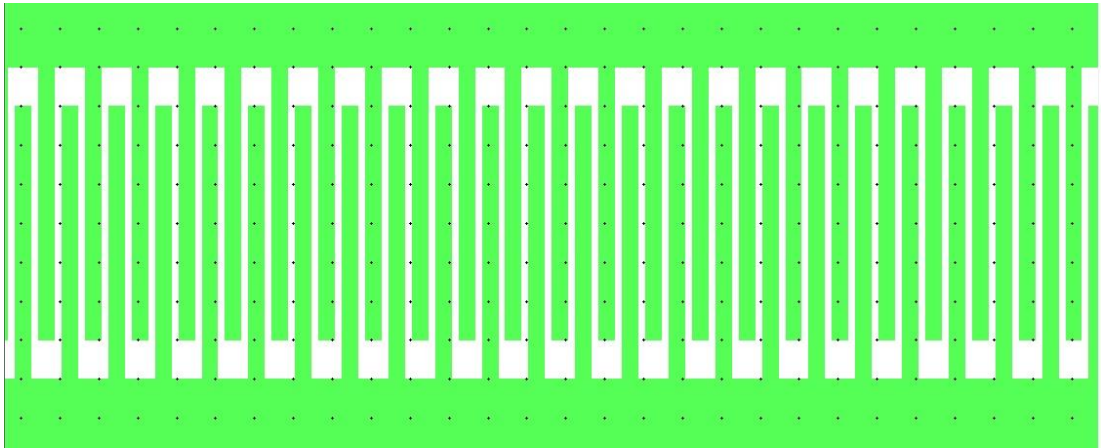
Herhangi bir yapının FEM analizinin gerçekleştirilebilmesi için yapılması gereken ilk adım, yapının CAD çiziminin hazırlanmasıdır. Bu kapsamda, Tablo 3.1’de tasarım parametreleri verilen maske seti kullanılmıştır.

FEM yazılımlarında MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı gibi karmaşık yapıların analizlerinin gerçekleştirilmesi oldukça güçtür. Yapının karmaşıklığından dolayı, analizi gerçekleştirecek donanım ve yazılımın oldukça gelişmiş olması gerekmektedir. Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerin

gereksinimlerini azaltmak adına CAD çizimi yapılırken birtakım detaylar sadeleştirilmiştir. Buna örnek olarak; üretim için hazırlanan maske setinde tarak parmakları Şekil 3.9’da gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analizde ise, Şekil 3.9’da görülen kıvrımsal detayların olmadığı, Şekil 3.10’daki gibi sadeleştirilmiş geometri ele alınmıştır.

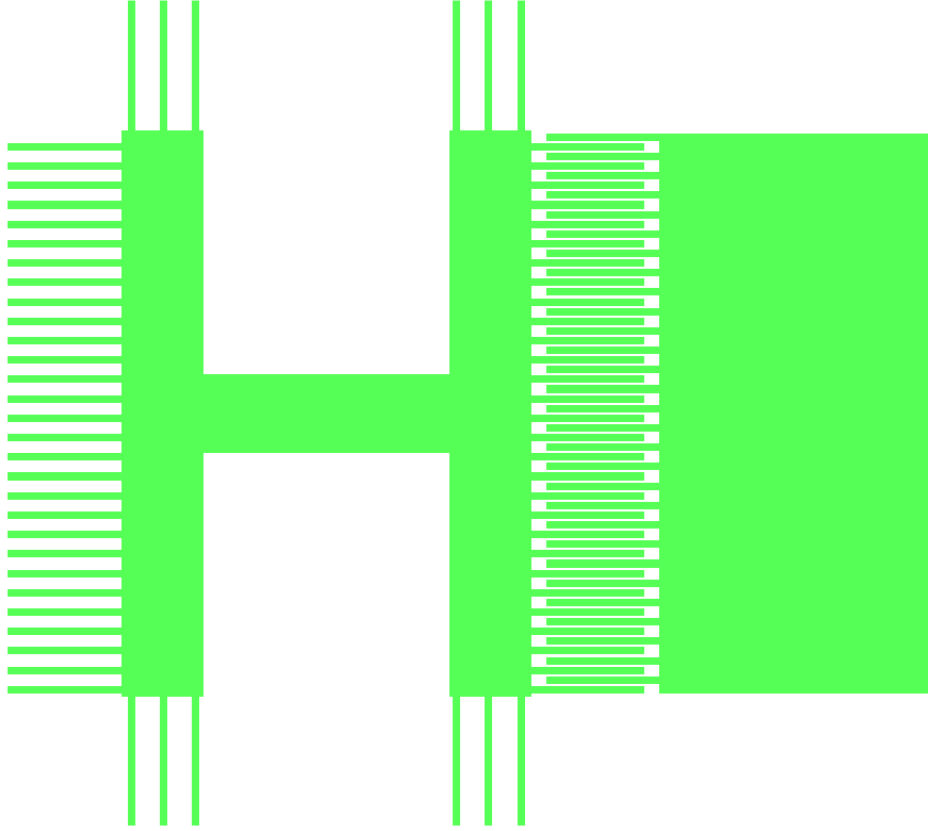


Şekil 3.9: Üretim için hazırlanan maske setindeki tarak parmak tasarımı.



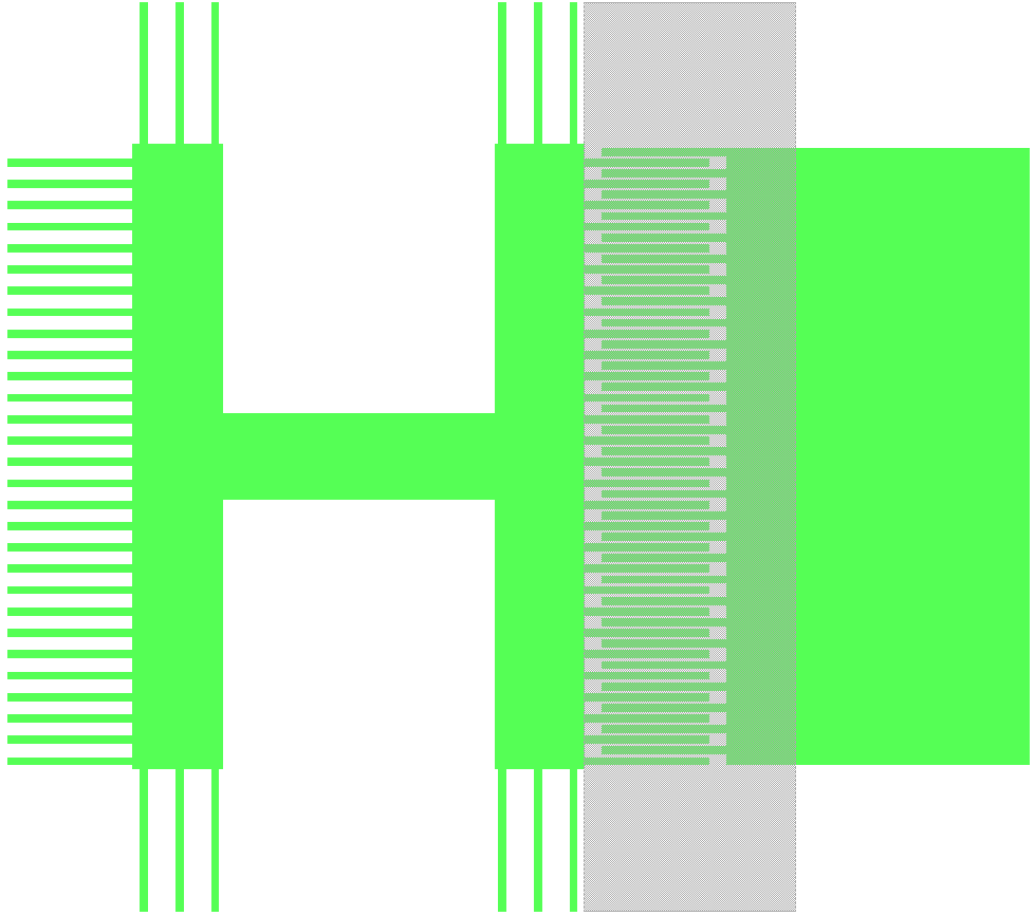
Şekil 3.10: Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen analiz için sadeleştirilmiş tarak parmak tasarımı.

Bu aşamaya kadar ki 2-boyutlu CAD çizimine ilişkin görsel, Şekil 3.11’de verilmiştir. FEM analizlerinde, sürme ve algılama işlemi aynı elektrot üzerinden yapılabildiği için elektrotlardan biri silinmiştir.



Şekil 3.11: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait 2-boyutlu CAD çizimi.

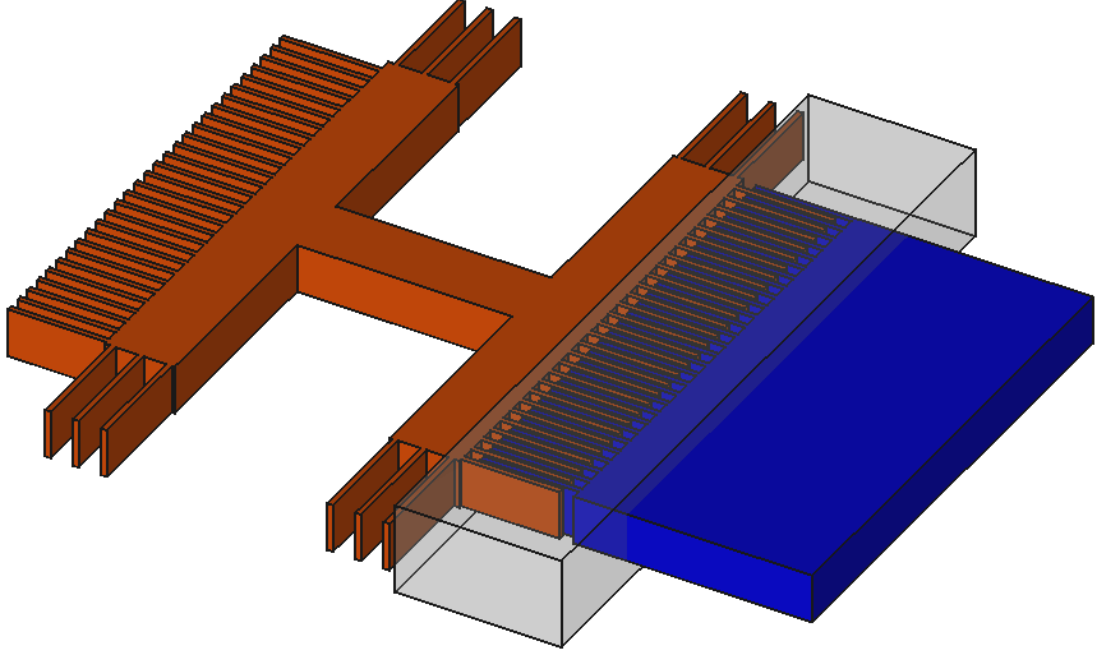
Gerçek uygulamalarda MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı hava ortamı içinde bulunmaktadır. Buna göre, FEM analizlerinde yapıya etkiyen elektrostatik kuvvetin hesaplanabilmesi için yapının hava katmanı içerisinde tanımlanması gerekmektedir. Şekil 3.11’de gösterilen yapının tümünün hava katmanı içerisinde tanımlanması olası bir seçenektir. Ancak FEM analizlerinin donanım gereksinimlerini azaltmak adına hava aralığı, Şekil 3.12’de gösterildiği gibi belirli bölgeleri kapsayacak şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 3.12: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı ve hava katmanına ait 2-boyutlu CAD çizimi.

Şekil 3.12’de yeşil renkli alan MEMS yapısını, gri renkli alan ise hava katmanını belirtmektedir.

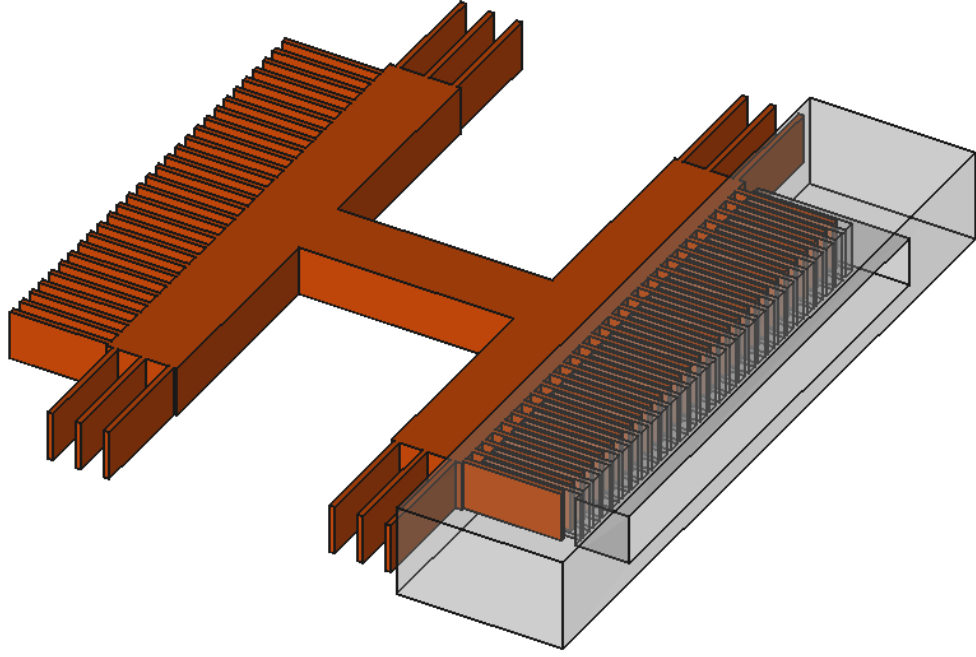
MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının FEM analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için yapının 3-boyutlu CAD tasarımına ihtiyaç vardır. Bunun için, Şekil 3.12’de gösterilen 2-boyutlu CAD çizimi, ücretsiz ve açık kaynak kodlu FreeCAD yazılımı (Riegel ve diğ. 2019) kullanılarak 3-boyutlu yapılmıştır. Elde edilen 3-boyutlu tasarım, Şekil 3.13’te gösterilmiştir.



Şekil 3.13: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait 3-boyutlu CAD çizimi.

Şekil 3.13'te görülen turuncu renkli yapı ataletsel kütle, mavi renkli yapı elektrodu, transparan yapı ise hava katmanını belirtmektedir. Burada ataletsel kütle ve elektrodun yapısal kalınlığı 35 μm , hava katmanının yapısal kalınlığı ise 65 μm olarak ayarlanmıştır. Burada hava katmanının kalınlığının ataletsel kütle ve elektrodun yapısal kalınlığından fazla olmasının sebebi, saçaklanma etkilerinin dahil olmasını sağlamaktır.

Şekil 3.13'te görülen 3-boyutlu MEMS yapının FEM analizlerini gerçekleştirmek için elektrot yapısının varlığına ihtiyaç yoktur. Bunun yerine elektrot yapısının hava katmanına değdiği yüzeyler kullanılabilir. Bu sebeple elektrot yapısı kaldırılıp Şekil 3.14'te görülen sadeleştirilmiş yapı elde edilir.



Şekil 3.14: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait sadeleştirilmiş 3-boyutlu CAD modeli.

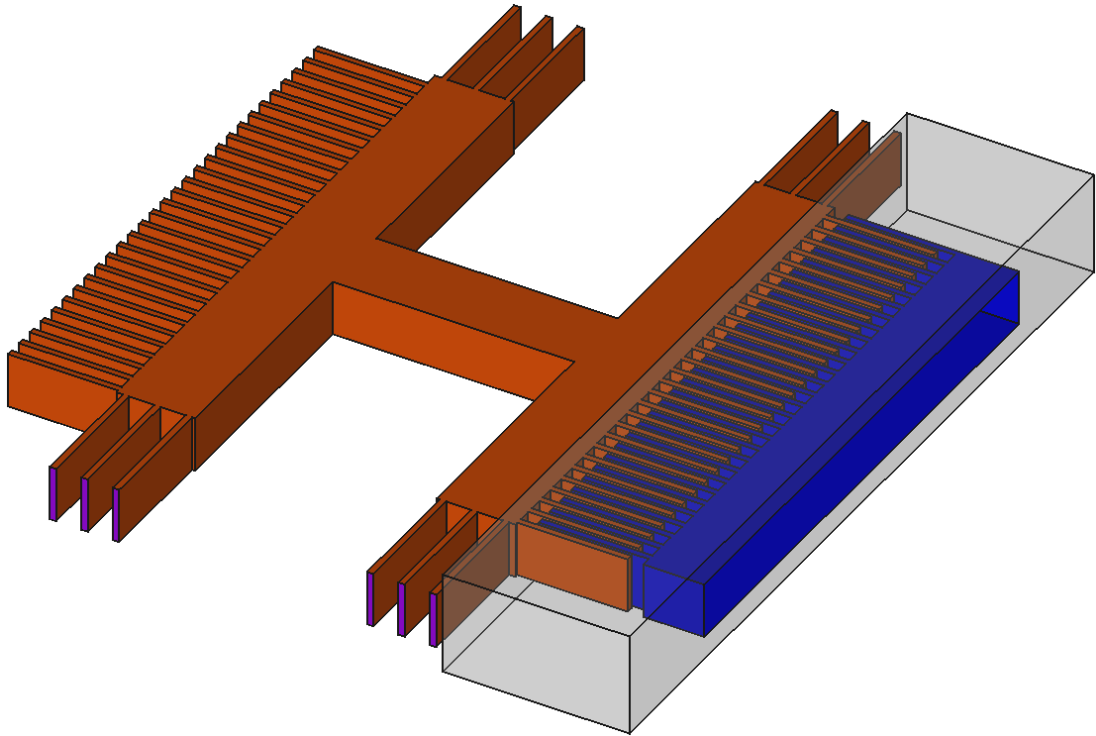
3.2.2 MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısına Ait 3-Boyutlu Modelin Ağ Yapısı Formuna Dönüştürülmesi

FEM analizlerinde geometrik modeller sonlu sayıda elemana bölünür. Bu elemanlar, düğüm adı verilen belirli noktalardan birbirlerine bağlanır. Geometrik modellerin bu şekilde daha küçük tanım aralıklarına bölünmesiyle ağ yapısı elde edilir. Ağ yapısının amacı, karmaşık bir geometrik modeli daha küçük parçalara ayırarak modele ait analizlerin daha kolay ve daha doğru yapılmasını sağlamaktır. Bu amaçtan ötürü, FEM analizinden elde edilen sonuçların doğruluğu ağ yapısının özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler arasında ağ yapısı tipi, ağ yapısı derecesi, ağ yapısı parametreleri gibi özellikler mevcuttur.

Ağ yapısının özelliklerinden biri olan ağ yapısı tipi, modeli oluşturan küçük elemanların geometrik şeklini tanımlar. Ağ yapısına ait bir diğer özellik de ağ yapısı derecesidir. Ağ yapısı derecesi, düğümleri birbirine bağlayan hatların ifade edildiği fonksiyonun derecesini belirtir. Düğümler, ağ yapısı derecesi bir olduğunda doğrusal fonksiyonla, iki olduğunda ise parabol ile ifade edilen hatlarla birbirlerine bağlanırlar. Bu sebepten ötürü, yapısal bükülmenin mevcut olduğu FEM analizlerinde ağ yapısı

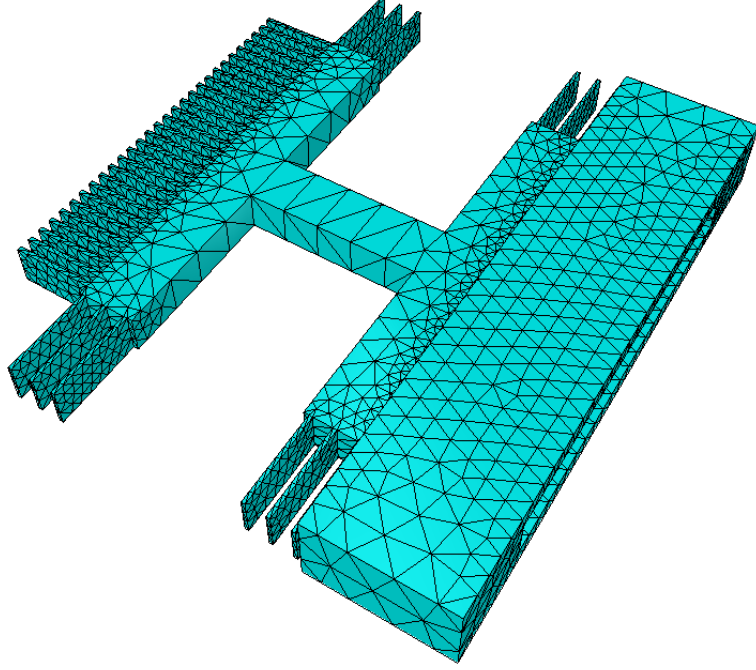
derecesi iki iken daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. D g mleri birbirine bağlayan hatların ayrıca boyutları da ağ yapısının özelliklerindedir. Buna göre, ağ yapısına oluşturulacak hatların minimum ve maksimum boyutları ayarlanabilmektedir.

FEM analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli bir diğer aşama, aynı sınır koşullarına sahip yüzeylerin gruplandırılmasıdır. Sınır koşulları, fiziksel niceliklerin geometrik modelde ilgili bölgelerde tanımlanmasıdır. Şekil 3.14’te verilen geometrik modelde aynı sınır koşullarına sahip 4 adet grup mevcuttur. Bunlar; yapının sabitlendiği “sabit yüzeyler”, toprak terminalinin uygulandığı ve hareket edebilen “rezonatör yüzeyleri”, elektrot yapısının hava katmanına değdiği ve terminal geriliminin uygulandığı “elektrot yüzeyleri” ve elektrostatik hesaplamalar için gerekli olan “hava katmanı yüzeyleri”dir. Bu gruplar, Şekil 3.15’te sırasıyla mor, turuncu, mavi ve transparan gri renklerle gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Aynı sınır koşullarına sahip grupların sadeleştirilmiş 3-boyutlu modelde gösterimi.

Bu tez çalışmasında, ağ yapısı oluşturma işlemine ait tüm adımlar ücretsiz ve açık kaynak kodlu Salome-Meca yazılımında (Code-Aster 2011) gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'te gösterilen 3-boyutlu modelin ağ yapısı çıktısı, Şekil 3.16'da gösterildiği gibi elde edilmiştir:

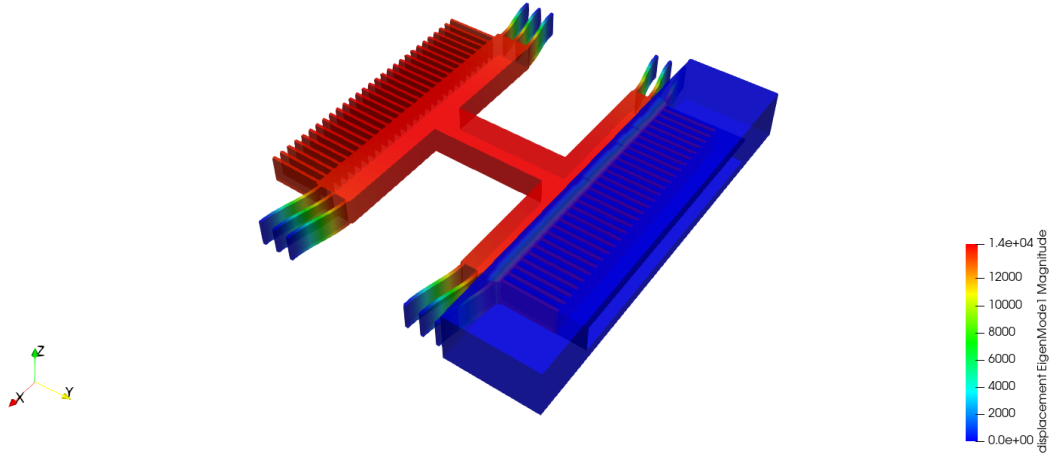


Şekil 3.16: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının sadeleştirilmiş 3-boyutlu modeline ait ağ yapısı çıktısı.

3.2.3 Elmer FEM Yazılımı ile MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Modal Analizi

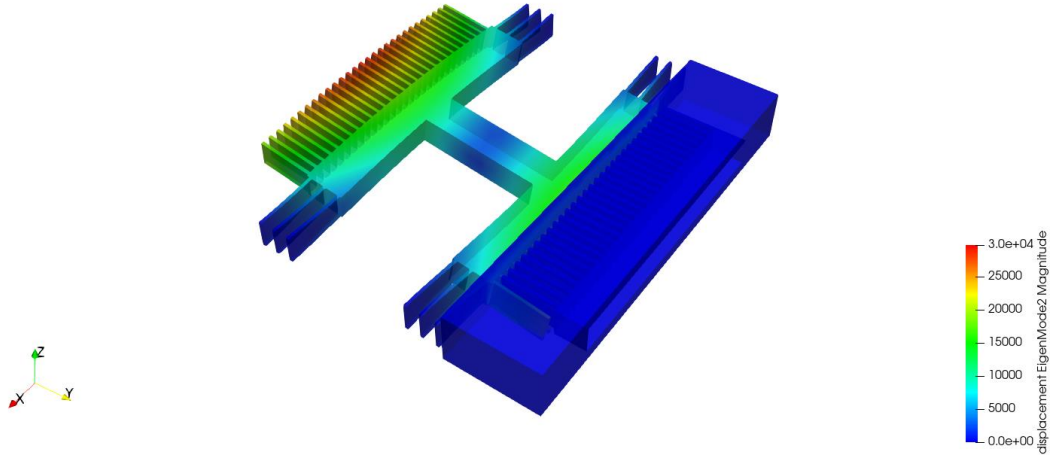
Modal analiz, bir yapının rezonans frekansı değerlerini ve bu frekans değerlerinde yapının bükülmelerini belirleyen bir analiz türüdür. Tablo 3.1'deki tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının, Elmer FEM yazılımıyla gerçekleştirilen modal analizine ait birinci, ikinci ve üçüncü mod rezonans frekansı cevapları sırasıyla Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da verilmiştir.

Rezonans Frekansı = 211813 Hz



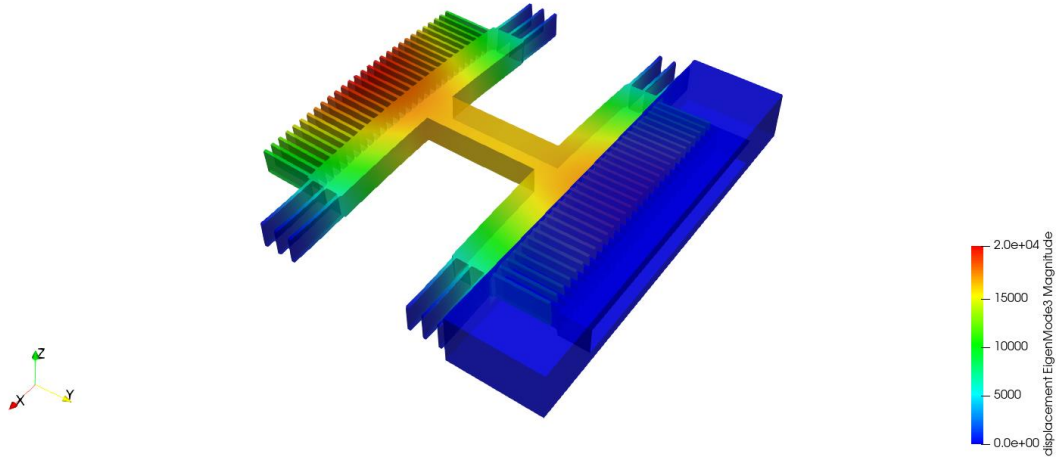
Şekil 3.17: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin birinci mod rezonans frekansı çıktısı.

Rezonans Frekansı = 557874 Hz



Şekil 3.18: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin ikinci mod rezonans frekansı çıktısı.

Rezonans Frekansı = 606759 Hz



Şekil 3.19: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin üçüncü mod rezonans frekansı çıktısı.

Bu tez çalışmasında, MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının birinci mod rezonans frekansı incelenmiştir. Teorik olarak elde edilen rezonans frekansı ile Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin birinci mod rezonans frekansı çıktısı birbirlerine yakın hesaplanmıştır. Burada elde edilen ufak hata, teorik çıkarım esnasında yapılan yaklaşımlardan ve FEM analizi için oluşturulan ağ yapısından ötürü gözlemlenmektedir. Daha iyi bir ağ yapısıyla hata daha da azaltılabilir.

3.2.4 Elmer FEM Yazılımı ile MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Statik Analizi

Statik analiz, mekanik yapıların statik bükülmelerini inceleyebilmek için gerçekleştirilir. Statik analizin ilk aşamasında, yapıya etkiyen elektrostatik kuvvet hesaplanmalıdır. Elmer FEM yazılımında, dielektrik malzeme içerisinde V potansiyel farkı oluşturulduğunda Denklem (2.37) ile ifade edilen elektrostatik kuvvet hesabı yapılmaktadır. Bu denkleme göre Elmer FEM yazılımı tarafından hesaplanan elektrostatik kuvvet, birim alan veya birim hacim başına olacak şekilde yapıya uygulanmalıdır. Rezonatör yapısına birim alan başına kuvvet uygulayabilmek için,

hesaplanan kuvvet değerinin rezonatör yzeylerinin toplam alanına bölünmesi gerekmektedir. Benzer şekilde birim hacim başına kuvvet uygulayabilmek için de hesaplanan kuvvet değerinin rezonatörün hacmine bölünmesi gerekmektedir. Bu tür normalizasyon işlemleri, Elmer FEM yazılımı tarafından hesaplanan elektrostatik kuvvetin değişken olarak çağrılmasıyla mümkün olur. Ancak Elmer FEM yazılımının orijinal kaynak kodları, hesaplanan elektrostatik kuvvetin değişken olarak çağrılması özelliğini barındırmamaktadır. Bu sebeple yazılımın kaynak kodlarına, hesaplanan elektrostatik kuvveti normalize edip bir metin dosyasına kaydedecek eklemeler yapılmıştır. Elmer FEM yazılımında statik analiz gerçekleştirilirken, her bir DC kutuplama gerilimi için hesaplanan ve normalize edilip kaydedilen elektrostatik kuvvet değeri, metin dosyasından çağrılıp rezonatör yapısına uygulanır.

Elmer FEM yazılımında farklı DC kutuplama gerilimlerinde statik analiz gerçekleştirebilmek için taranacak DC kutuplama gerilimi değerlerinin belirlenmesi gerekir. Buna göre, Elmer FEM yazılımında sürücü elektrot için atanan “potansiyel” seçeneği Denklem (3.1)’de belirtildiği gibi ayarlanmıştır:

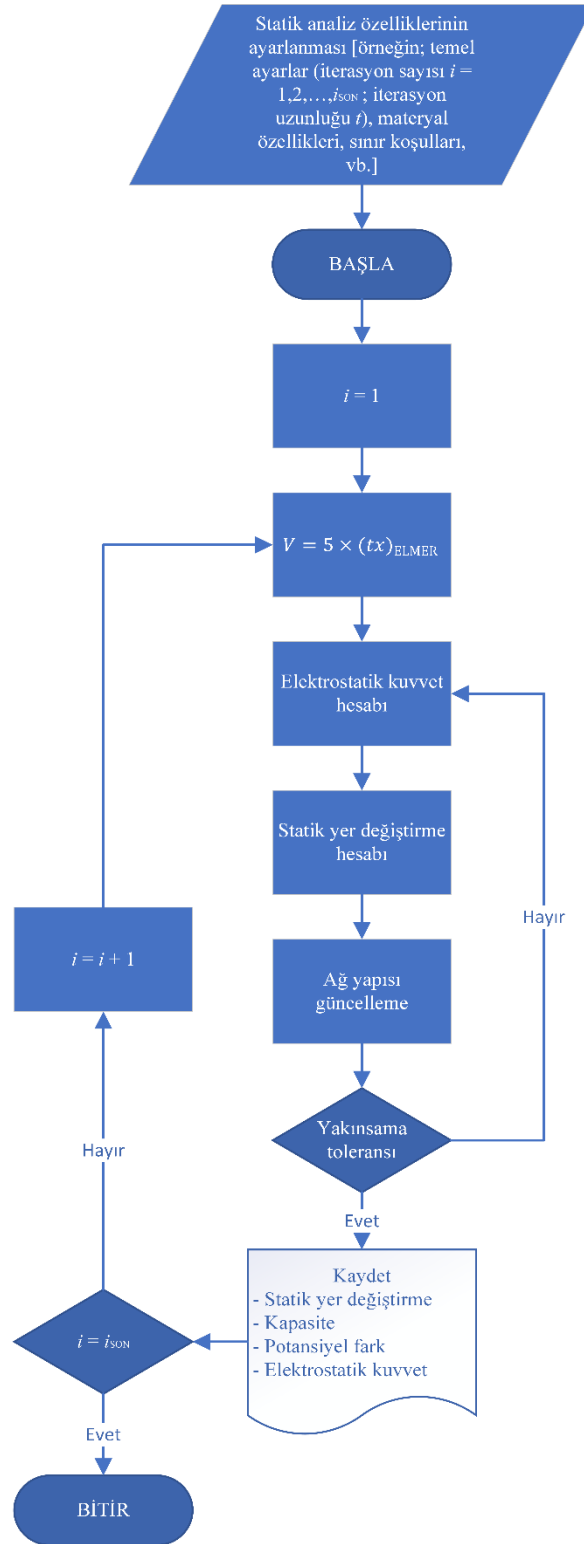
$$potansiyel = 5 \times (tx)_{ELMER} \quad (3.1)$$

Burada $(tx)_{ELMER}$ parametresi, her yeni iterasyonda sürücü elektrot üzerindeki kutuplama gerilimi değerini güncellemek için kullanılan bir değişkendir ve Denklem (3.2) ile ifade edilir:

$$(tx)_{ELMER} = i \times t \quad (3.2)$$

Burada i FEM analizinin mevcut iterasyon değerini, t ise her bir iterasyonun uzunluk değerini belirtir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen statik analizde, son iterasyon değerini belirten i_{SON} ifadesi 10 olarak ayarlanmıştır. Böylece statik analizde toplamda 10 tane DC kutuplama gerilimi değerinin incelenmesi sağlanmıştır. Her bir itereasyonun uzunluk değerini belirten t ifadesi ise 1 olarak seçilmiştir. Böylece her iterasyon artışında $(tx)_{ELMER}$ değişkeninin değeri 1 artmaktadır. Seçilen bu değerlere göre statik analizde sürücü elektrot yapısına uygulanan ilk DC kutuplama gerilimi 5, son DC kutuplama gerilimi ise 50 olur.

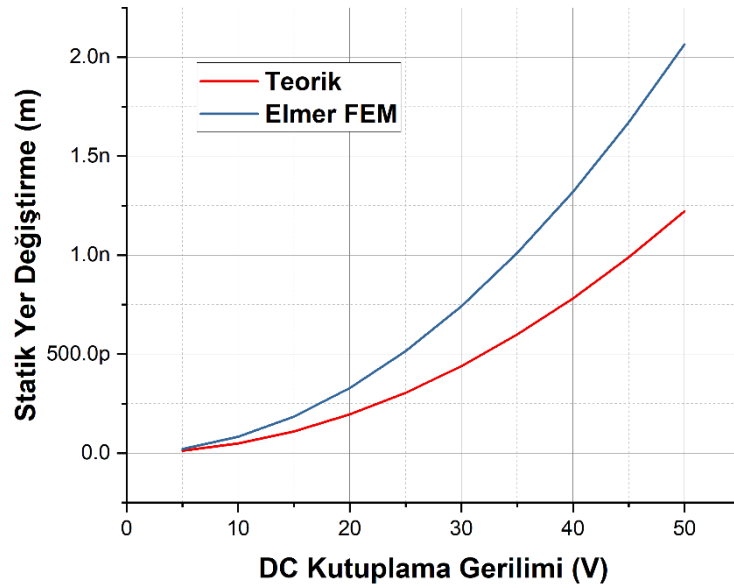
Yukarıda ifade edilen detaylara göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analiz algoritması Şekil 3.20’de verilmiştir:



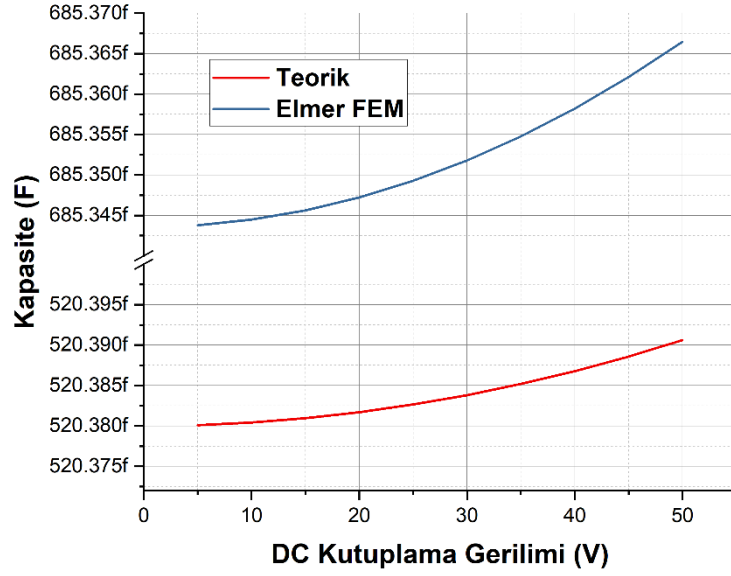
Şekil 3.20: Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analiz algoritması.

Bu algoritmada görüldüğü üzere analize başlamadan önce analiz ile ilgili ayarlamalar yapılır. Ayarlamalar yapıp analiz başlatıldıktan sonra ilk aşamada yapıya mevcut iterasyon değerine göre Denklem (3.1) ile belirtilen potansiyel fark uygulanır. Bu işlemin ardından yapıya etkiyen elektrostatik kuvvet, uygulanan potansiyel farka göre hesaplanır. Sonrasında ise hesaplanan elektrostatik kuvvet normalize edilip kaydedilir ve metin belgesinden çağrılarak yapının statik yer değiştirmesi hesaplanır. Ardından, hesaplanan statik yer değiştirme değerine göre ağ yapısı güncellenir. Ağ yapısı güncellendikten sonra eğer varsa bir önceki analiz sonuçlarına göre yakınsama toleransı kontrol edilir. Yakınsama toleransı sağlanırsa, elde edilen değerler kaydedilir ve iterasyon numarası bir arttırılır. Eğer yakınsama toleransı sağlanmazsa, yapının yeni konumuna göre önce elektrostatik kuvvet değeri, daha sonra da statik yer değiştirme hesabı yapılır. Bu işlem adımları, son iterasyona kadar tekrarlanır.

Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen statik analizine ilişkin yer değiştirme – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik yer değiştirme – DC kutuplama gerilimi sonuçları Şekil 3.21’de, Elmer FEM kapasite – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik kapasite – DC kutuplama gerilimi sonuçları ise Şekil 3.22’de kıyaslanmıştır:



Şekil 3.21: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analizine ilişkin statik yer değiştirme – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması.



Şekil 3.22: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analizine ilişkin kapasite – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması.

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de verilen sonuçlar incelendiğinde Elmer FEM yazılımı kullanılarak edilen sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında farklılıklar olduğu görülür. Bu farklılıkların sebebi, teorik analizde saçaklanma etkisinin ele alınmamasıdır. FEM analizi için oluşturulan CAD modelinde ise hava katmanı, saçaklanma etkisinin hesaba katılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Saçaklanma etkisinden ötürü Elmer FEM yazılımı, elektrostatik kuvveti ve kapasiteyi teorik hesaplamalarla elde edilen sonuçlardan daha yüksek olacak şekilde hesaplamaktadır.

3.2.5 Elmer FEM Yazılımı ile MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör Yapısının Frekans Analizi

Frekans analizi, mekanik yapıların belirli frekans noktalarındaki dinamik yer değiştirme cevabının belirlenmesi için gerçekleştirilir. Frekans analizinin ilk aşamasında, aynı statik analizde olduğu gibi yapıya etkiyen kuvvet hesaplanmalıdır. Elmer FEM yazılımında, dielektrik malzeme içerisinde V potansiyel fark oluşturulduğunda, Denklem (2.37) ile ifade edilen elektrostatik kuvvet hesabı yapılmaktadır. Bu tez kapsamında ele alınan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör

yapısına Denklem (2.50)'de ifade edilen elektrostatik kuvvet etki ettiği için (Bao 2005) Elmer FEM yazılımında V değeri Denklem (3.3)'te ifade edildiği gibi ayarlanır.

$$V = \sqrt{V_{DC}^2 + \frac{V_{ac}^2}{2}} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'e göre Elmer FEM yazılımı tarafından hesaplanan elektrostatik kuvvet, statik analizde de olduğu gibi birim alan veya birim hacim başına olacak şekilde yapıya uygulanmalıdır. Bu sebeple yazılımın kaynak kodlarına, aynı statik analizde olduğu gibi, hesaplanan elektrostatik kuvveti normalize edip bir metin dosyasına kaydedecek eklemeler yapılmıştır. Elmer FEM yazılımında frekans analizi gerçekleştirilirken her bir frekans adımında hesaplanan ve normalize edilip kaydedilen elektrostatik kuvvet değeri, metin dosyasından çağrılıp rezonatör yapısına uygulanır.

Elmer FEM yazılımında frekans analizi gerçekleştirilmesi için taranacak frekans noktalarının belirlenmesi gerekir. Elmer FEM yazılımıyla modal analiz gerçekleştirilerek hesaplanan birinci mod rezonans frekansı, taranacak noktaların seçiminde referans olarak alınmıştır. Buna göre, Elmer FEM yazılımında bulunan frekans seçeneği Denklem (3.4)'te belirtildiği gibi ayarlanmıştır:

$$frekans = 2.10 \times 10^5 + (tx)_{ELMER} \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'te verilen 2.10×10^5 ifadesi başlangıç frekansı olup ilk iterasyonda ele alınacak frekans noktasıdır. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen frekans analizinde, son iterasyon değerini belirten i_{SON} ifadesi 400 olarak ayarlanmıştır. Böylece frekans analizinde toplamda 400 tane frekans noktasının incelenmesi sağlanmıştır. Her bir iterasyonun uzunluk değerini belirten t ifadesi ise 10 olarak seçilmiştir. Böylece her iterasyon artışında $(tx)_{ELMER}$ değişkeninin değeri 10 artmaktadır. Seçilen bu değerlere göre frekans analizinde taranan son frekans değeri de 2.14×10^5 olur.

MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının frekans analizinin gerçekleştirilebilmesi için ele alınması gereken bir diğer konu sönümlemedir. Gerçek uygulamalarda hava ortamında çalışan MEMS yapısı titreşim hareketi sergilerken hava molekülleri tarafından sönümlemeye uğrar. Bu sönümleme mekanizmasının

frekans analizinde modellenmesi, daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlar. Sönümlenme mekanizmasının frekans analizinde modellenmesi için Elmer FEM yazılımında da mevcut olan Rayleigh sönümlenme modeli kullanılabilir. Rayleigh sönümlenme modeli, $n \times n$ 'lik sönümlenme matrisi $[C]$ ile ifade edilir. $[C]$ matrisi, Denklem (3.5)'te ifade edildiği gibi kütle $[M]$ ve sertlik $[K]$ matrislerinin doğrusal bir kombinasyonudur (Liu ve Gorman 1995):

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3.5)$$

Burada α ve β parametreleri Rayleigh katsayıları olup sırasıyla Denklem (3.6) ve Denklem (3.7) ile hesaplanır (Liu ve Gorman 1995):

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.6)$$

$$\beta = \zeta \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3.7)$$

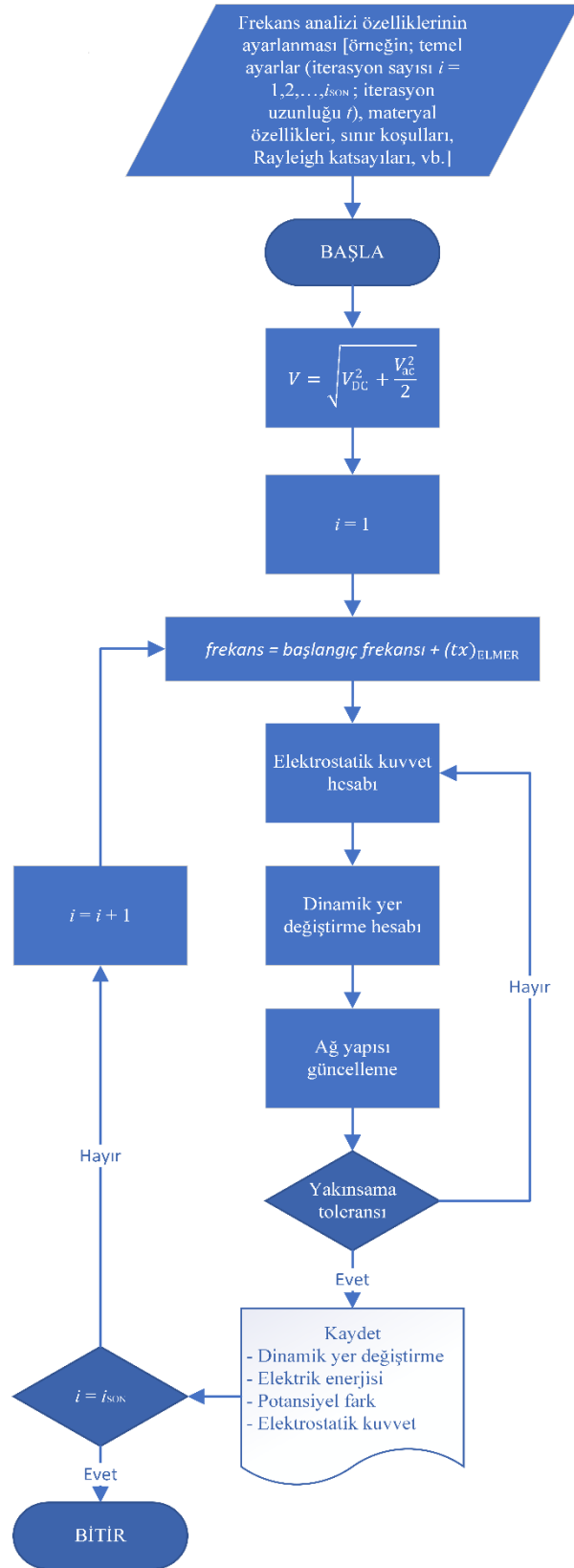
Burada ζ sönümlenme oranı, ω_1 sönümlenmenin modellendiği başlangıç frekansı, ω_2 ise bitiş frekansıdır.

Tablo 3.4: Frekans analizi için hesaplanan Rayleigh katsayıları.

Kalite Faktörü	Rayleigh Katsayıları	Hesaplanan Değer
$Q = 50$	α	1.3308×10^4
	β	7.5139×10^{-9}
$Q = 100$	α	6.6543×10^3
	β	3.7569×10^{-9}
$Q = 150$	α	4.4362×10^3
	β	2.5046×10^{-9}
$Q = 200$	α	3.3271×10^3
	β	1.8785×10^{-9}
$Q = 250$	α	2.6617×10^3
	β	1.5028×10^{-9}
$Q = 300$	α	2.2181×10^3
	β	1.2523×10^{-9}

Bu tez kapsamında, tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için farklı kalite faktörü değerlerinde, $V_{DC} = 35 V$ & $V_{ac} = 2 V$ değerleri için frekans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kalite faktörü değerlerine göre Rayleigh katsayıları Tablo 3.4'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

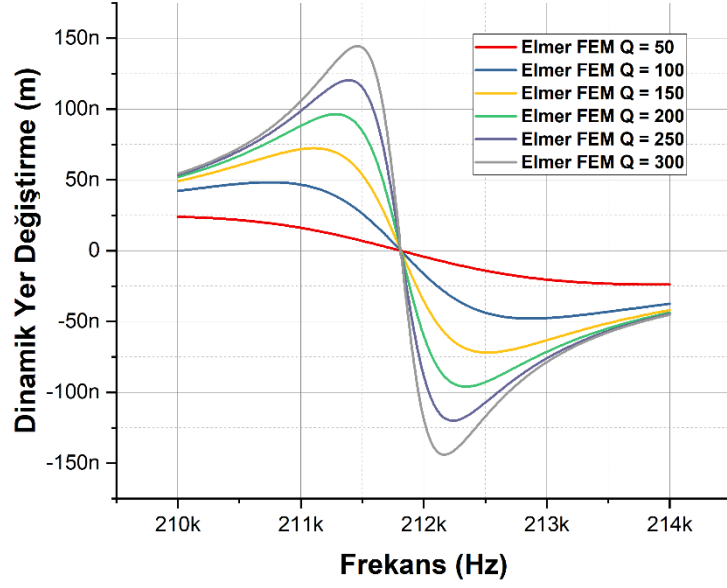
Yukarıda ifade edilen detaylara göre Elmer FEM yazılımı için geliştirilen frekans analizi algoritması Şekil 3.23'te verilmiştir. Bu algorithmada görüldüğü üzere analize başlamadan önce analiz ile ilgili ayarlamalar yapılır. Ayarlamalar yapıp analiz başlatıldıktan sonra ilk aşamada yapıya Denklem (3.3) ile belirtilen potansiyel fark uygulanır. Daha sonra mevcut iterasyon noktasına göre frekans değeri hesaplanır. Bu işlemin ardından yapıya etkiyen elektrostatik kuvvet, uygulanan potansiyel farka göre hesaplanır. Sonrasında ise hesaplanan elektrostatik kuvvet normalize edilip kaydedilir ve metin belgesinden çağrılarak yapının dinamik yer değiştirmesi hesaplanır. Ardından, hesaplanan dinamik yer değiştirme değerine göre ağ yapısı güncellenir. Ağ yapısı güncellendikten sonra eğer varsa bir önceki analiz sonuçlarına göre yakınsama toleransı kontrol edilir. Yakınsama toleransı sağlanırsa, elde edilen değerler kaydedilir ve iterasyon numarası bir arttırılır. Eğer yakınsama toleransı sağlanmazsa, aynı normalize edilmiş elektrostatik kuvvet değerine göre güncellenen ağ yapısı üzerinden tekrar dinamik yer değiştirme hesabı yapılır. Bu işlem adımları, son iterasyona kadar tekrarlanır.



Şekil 3.23: Elmer FEM yazılımı için geliştirilen frekans analizi algoritması.

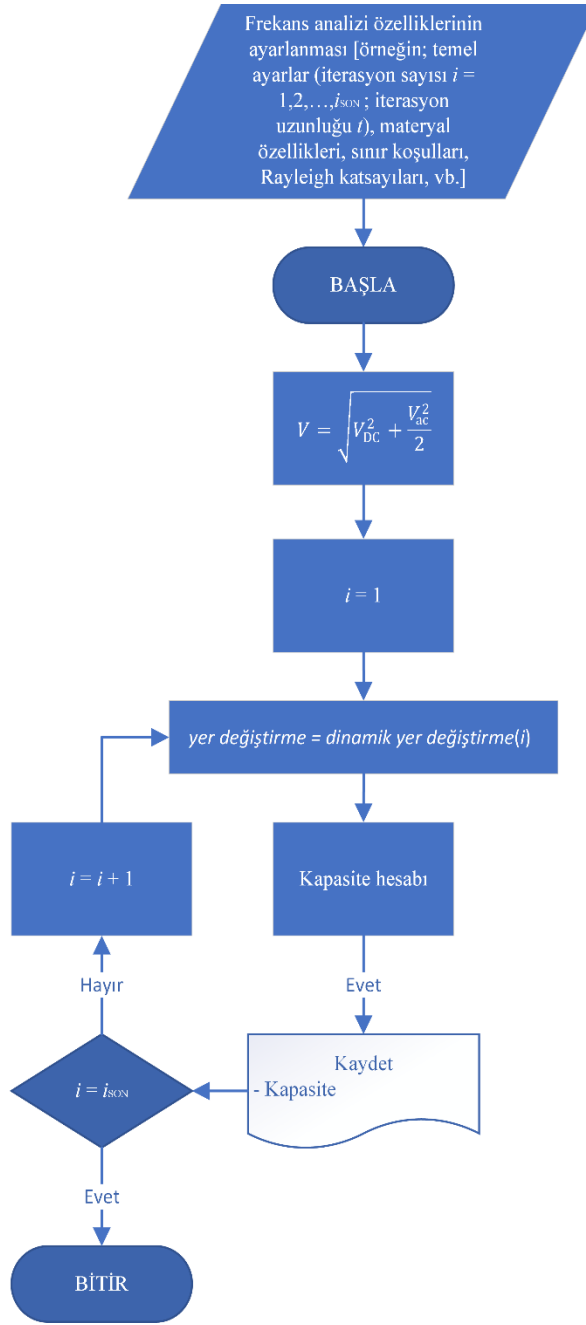
Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen frekans analizinde ağ yapısı güncellenirken yapısal sınırların dışına çıktığı için ağ yapısı güncelleme adımı

kapatılmıştır. Bu analize ilişkin farklı kalite faktörü değerlerinde dinamik yer değiştirmenin frekansa göre değişimi Şekil 3.24'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



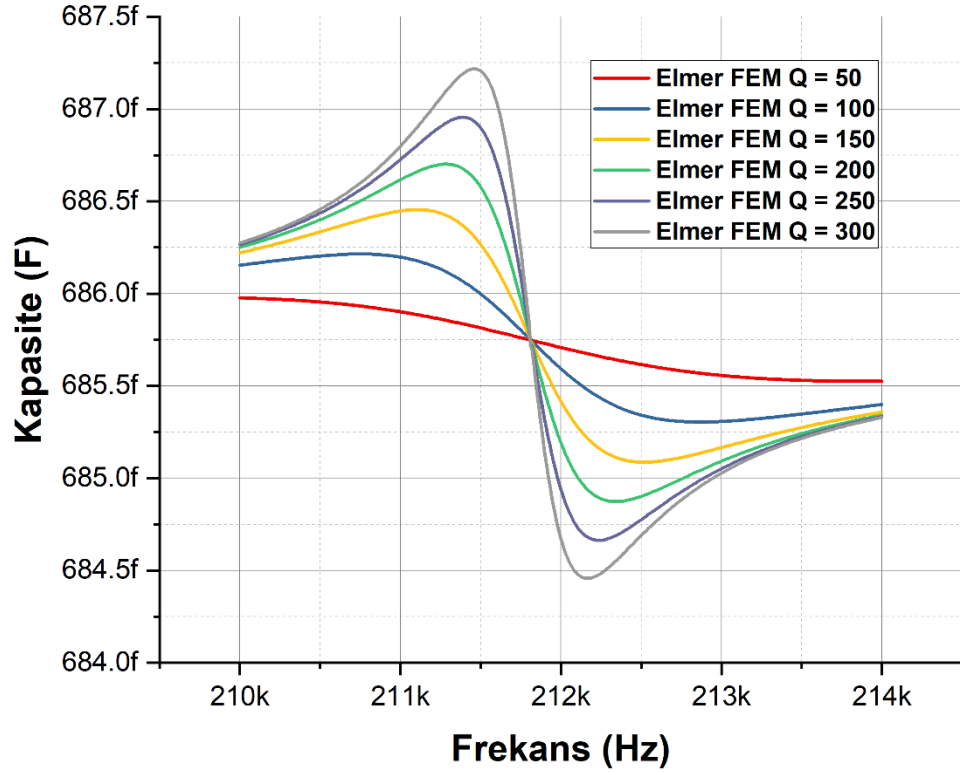
Şekil 3.24: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme – frekans grafiği ($V_{DC} = 35 V$ & $V_{ac} = 2 V$).

Şekil 3.23'te verilen algoritmaya göre Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizinde kapasite değeri ağ yapısı güncelleme adımından sonra hesaplanmaktadır. Ancak gerçekleştirilen frekans analizinde ağ yapısı güncelleme adımı kapatıldığı için kapasite hesabı harici bir analiz ile yapılmıştır. Bu analize ilişkin algoritma Şekil 3.25'te verilmiştir. Bu algoritmada görüldüğü üzere yine analize başlamadan önce analiz ile ilgili ayarlamalar yapılır. Ayarlamalar yapıp analiz başlatıldıktan sonra ilk aşamada yapıya Denklem (3.3) ile belirtilen potansiyel fark uygulanır. Daha sonra mevcut iterasyon noktasına göre frekans analizinde elde edilen ilgili dinamik yer değiştirme cevabı yapıya tanımlanır. Burada i_{SON} değeri, frekans analizinde elde edilen her bir dinamik yer değiştirme noktasını ele alabilmek için 400 olarak ayarlanmıştır. Her bir nokta için dinamik yer değiştirme cevabı yapıya tanımlandıktan sonra kapasite değeri hesaplanır ve kaydedilir. Bu işlem son iterasyona kadar tekrarlanır.



Şekil 3.25: Elmer FEM yazılımı için frekans analizi sonuçlarına göre kapasite hesabı algoritması.

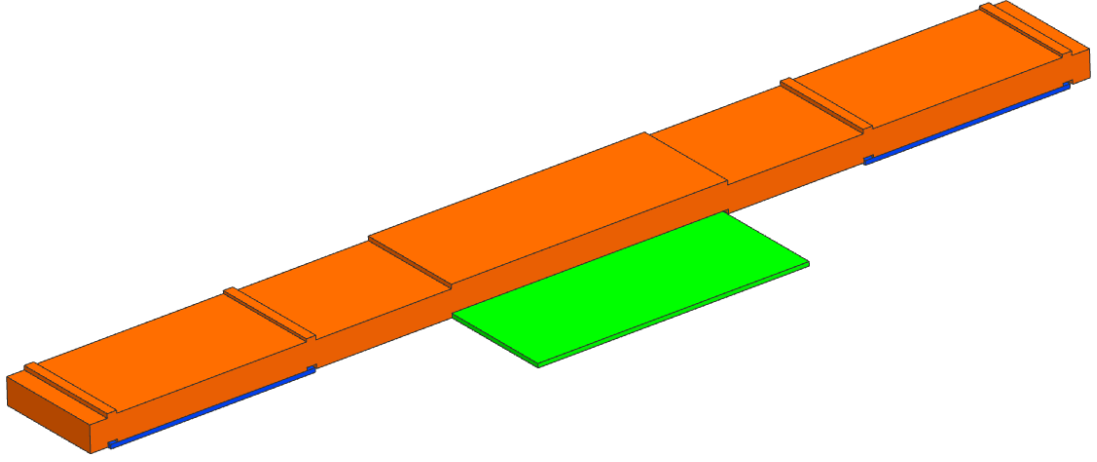
Bu analize ilişkin olarak, farklı kalite faktörü değerlerinde kapasitenin frekansa göre değişimi Şekil 3.26’da gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.26: Tasarım parametrelerine göre oluşturulan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen kapasite hesabı analizine ilişkin kapasite – frekans grafiği.

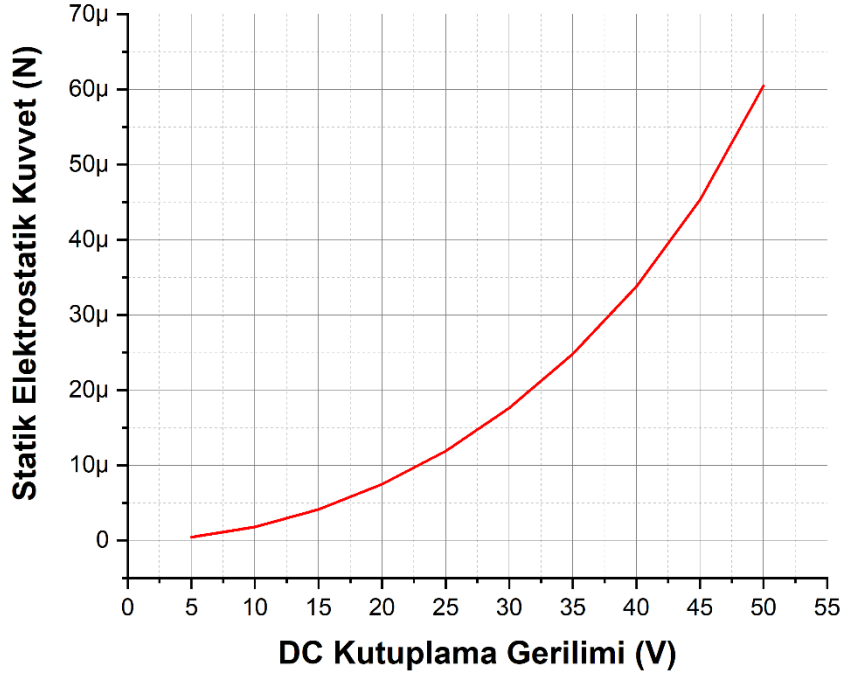
3.2.6 Elmer FEM Yazılımı İçin Kullanılan Algoritmaların Doğruluk Çalışmaları

Elmer FEM yazılımında statik analiz gerçekleştirebilmek için Şekil 3.20’de, frekans analizi gerçekleştirebilmek için de Şekil 3.23’te verilen algoritmalar kullanılır. Bu algoritmaların doğruluklarını test edebilmek için, tasarım detayları ve deneysel verileri paylaşılan (Bannon ve diğ. 2000) Şekil 3.27’deki kiriş rezonatör yapısı ele alınmıştır. Burada, turuncu renkli yapı kiriş rezonatör yapısını, mavi renkli yapılar rezonatörün sabitlendiği çapa yapılarını, yeşil renkli yapı ise elektrot yapısını belirtmektedir.

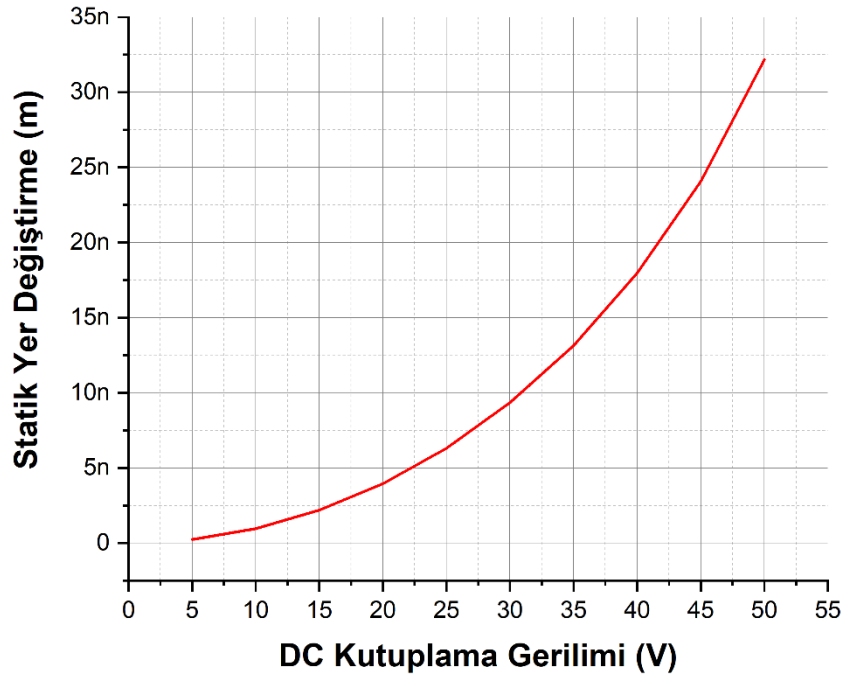


Şekil 3.27: Elmer FEM yazılımı için geliştirilen algoritmaların doğruluk çalışmaları için kullanılan kiriş rezonatör yapısı (Bannon ve diğ. 2000).

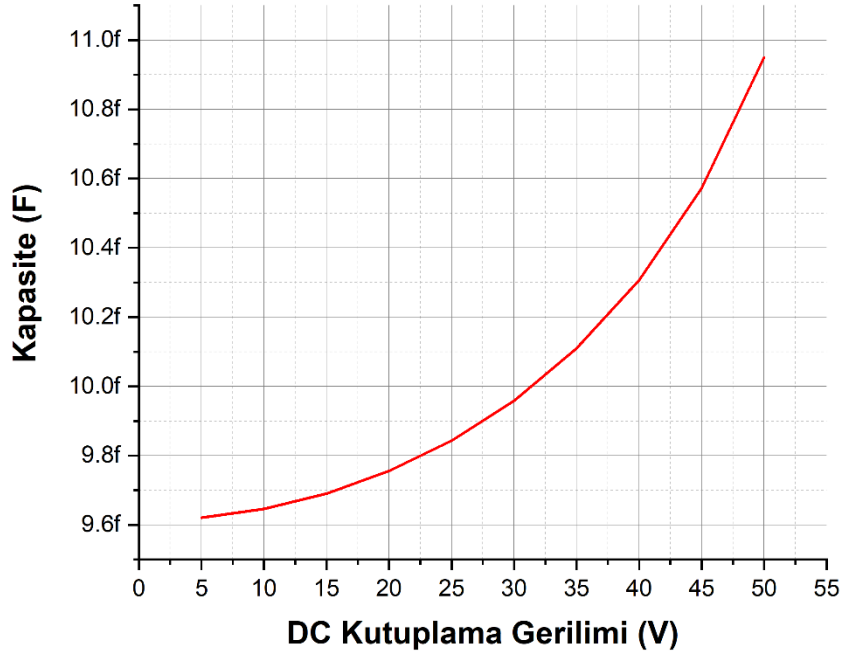
Şekil 3.27’de verilen yapı için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda rezonatör yapısına çapa bölgelerinden DC kutuplama gerilimi, elektrottan ise AC gerilim uygulanmıştır. Bu iki gerilim türünün yapıya farklı noktalardan uygulanması sebebiyle rezonatör yapısına Denklem (2.50) ile ifade edilen statik elektrostatik kuvvet ve Denklem (2.51) ile ifade edilen dinamik elektrostatik kuvvet etki eder (Bannon ve diğ. 2000). Bu bilgiler ışığında Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında, Şekil 3.20’deki algoritma ile öncelikle statik analiz, sonrasında da Şekil 3.23’teki algoritma ile frekans analizi gerçekleştirilmiştir. Statik analize ait farklı DC kutuplama gerilimlerindeki statik elektrostatik kuvvet, statik yer değiştirme ve kapasite çıktıları sırasıyla Şekil 3.28, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da verilmiştir.



Şekil 3.28: Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde statik elektrostatik kuvvet çıktısı.



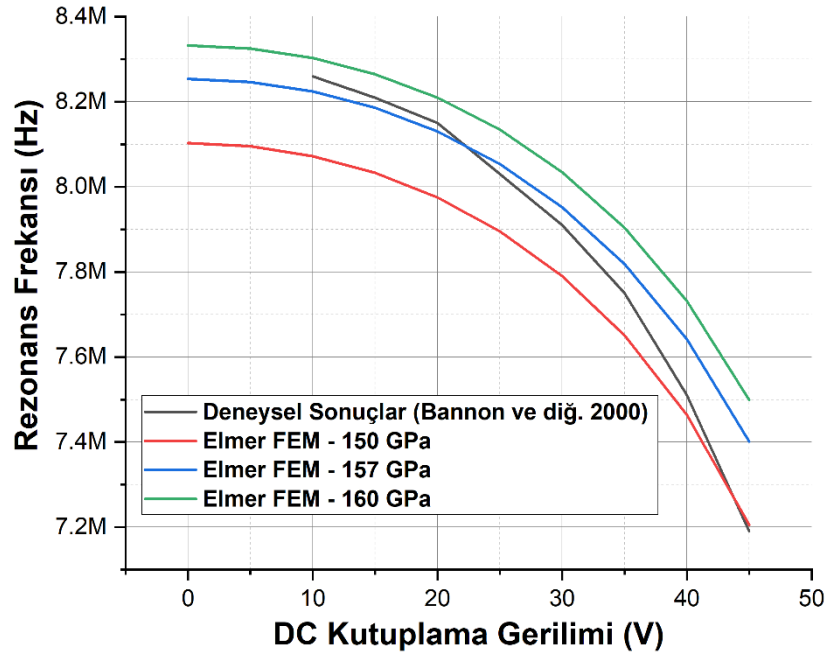
Şekil 3.29: Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde statik yer değiştirme çıktısı.



Şekil 3.30: Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kapasite çıktısı.

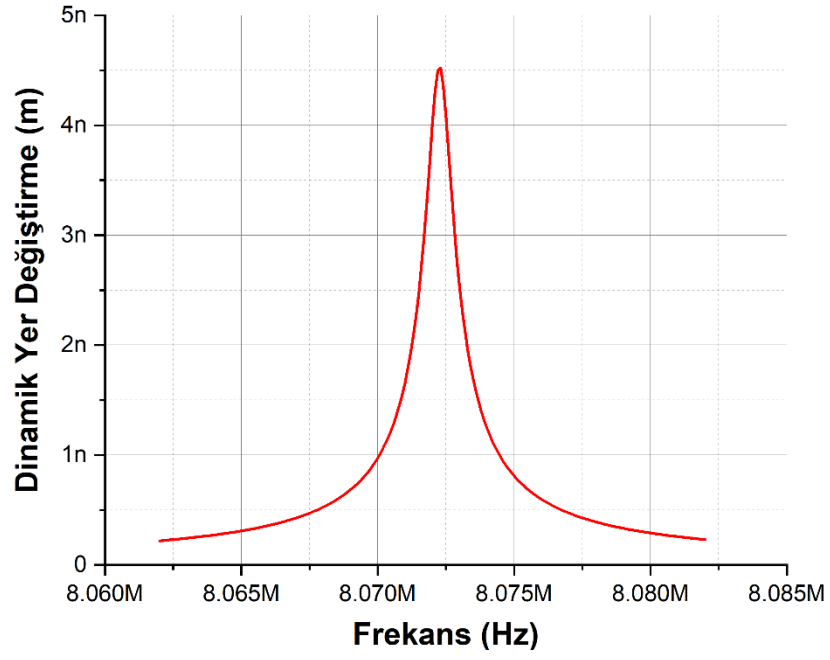
Kiriş rezonatör yapılarında, DC kutuplama geriliminin seviyesine göre rezonatörün rezonans frekansında kayma meydana gelir (Bannon ve diğ. 2000). Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için, Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen statik analizde bu durum dikkate alınarak gerekli sonuçlar modal analize aktarılmıştır (Tez ve Kaya 2021). Buna ilişkin olarak farklı DC kutuplama gerilimlerindeki rezonans frekansı değerleri Şekil 3.31’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Burada, rezonatör yapısı için üç farklı Young modülü değerinde elde edilen rezonans frekansı sonuçları kıyaslanmıştır. Şekil 3.27’de verilen rezonatör yapısı için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda Young modülü değeri 150 GPa olarak belirlenmiştir (Bannon ve diğ. 2000). Literatürde, COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak da aynı kiriş rezonatör yapısı için statik, modal ve frekans analizleri gerçekleştirilmiştir (COMSOL Multiphysics – MEMS Module 2021). COMSOL Multiphysics yazılımında gerçekleştirilen analizlerde ise Young modülü değeri 160 GPa olarak alınmıştır. Deneysel veriler için kullanılan Young modülü değeri ile COMSOL Multiphysics yazılımında kullanılan Young modülü değerinin farklı olmasının sebebi, rezonatör yapısını oluşturan malzemenin Young modülü değerinin belirli bir aralıkta değişebiliyor olmasıdır (Oh ve diğ. (2005), Sharpe ve diğ. (1999)). Elmer FEM

yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde Young modülü değeri 150 GPa ile 160 GPa arasında, farklı değerlere sahip olacak şekilde ele alınmıştır. Buna göre deneysel verilere en uygun sonuçlar 157 GPa Young modülü değerinde elde edilmiştir.

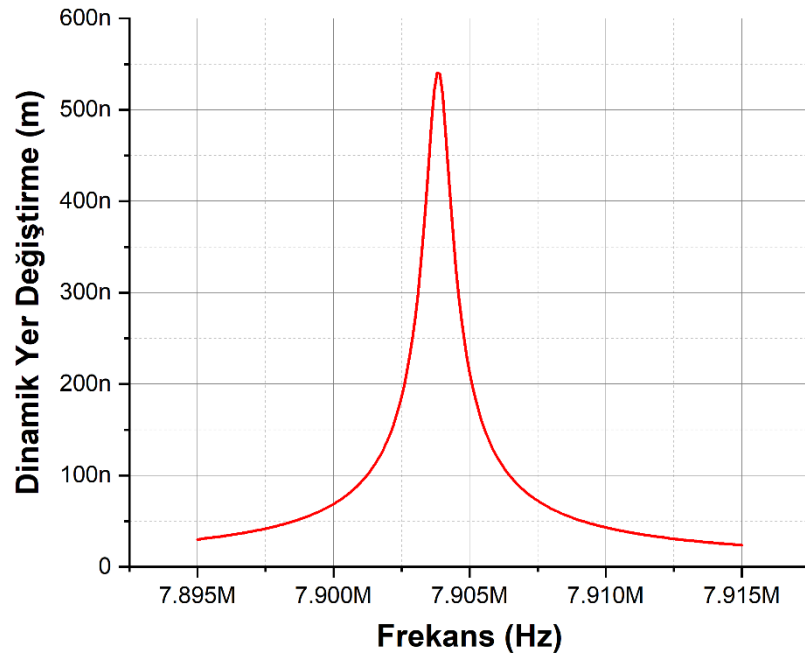


Şekil 3.31: Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen modal analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde rezonans frekansı çıktısı.

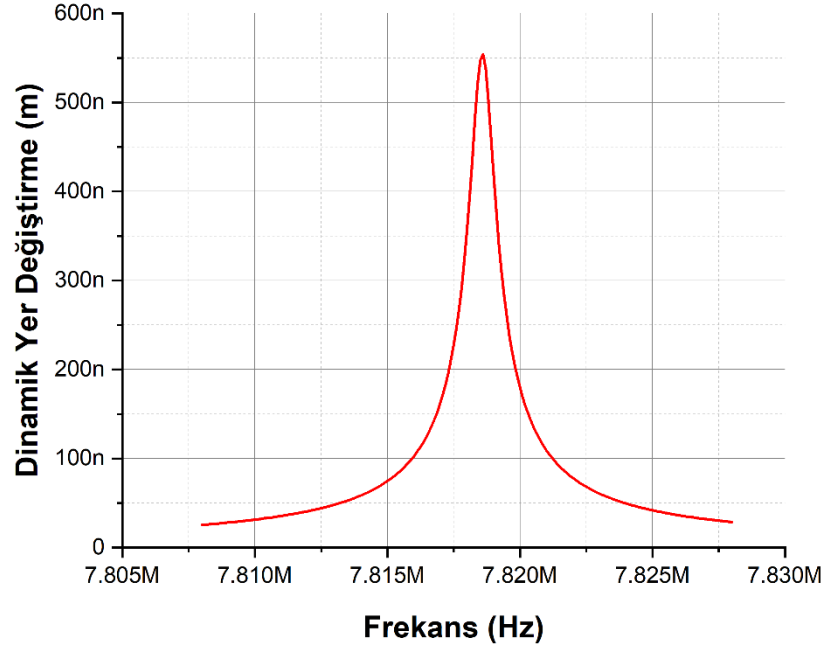
Şekil 3.27’deki kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında Şekil 3.23’te verilen algoritma kullanılarak gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimleri, AC gerilimler ve Young modülü değerlerindeki çıktılar Şekil 3.32, Şekil 3.33 ve Şekil 3.34’te verilmiştir.



Şekil 3.32: Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme çıktısı ($V_{DC} = 10 V, V_{ac} = 3 mV, E = 150 GPa$).



Şekil 3.33: Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme çıktısı ($V_{DC} = 35 V, V_{ac} = 100 mV, E = 160 GPa$).



Şekil 3.34: Şekil 3.27’de verilen kiriş rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme çıktısı ($V_{DC} = 35 V, V_{ac} = 100 mV, E = 157 GPa$).

Elmer FEM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen statik analiz ve frekans analizi sonuçlarının doğruluklarını belirleyebilmek adına, paylaşılan deneysel sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000) ve COMSOL Multiphysics sonuçları (COMSOL Multiphysics – MEMS Module 2021) ile kıyaslamalar yapılmıştır. Kiriş rezonatör yapısına ait FEM analizi sonuçları ile deneysel sonuçlar Tablo 3.5’te kıyaslanmıştır.

Tablo 3.5: Elmer FEM yazılımında elde edilen simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000) ve COMSOL Multiphysics simülasyon sonuçlarıyla (COMSOL Multiphysics – MEMS Module 2021) kıyaslanması.

E = 150 GPa için elde edilen Elmer FEM simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000) ile kıyaslanması			
Deneysel Sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000)		COMSOL Multiphysics	
$V_{DC} = 10$ V	Rezonans Frekansı (MHz)	$V_{DC} = 10$ V	Rezonans Frekansı (MHz)
$V_{ac} = 3$ mV	Yer Değiştirme (nm)	$V_{ac} = 3$ mV	Yer Değiştirme (nm)
$E = 150$ GPa	NA	$E = 150$ GPa	NA
	4.9		4.5
E = 157 GPa için elde edilen Elmer FEM simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000) ile kıyaslanması			
Deneysel Sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000)		COMSOL Multiphysics	
$V_{DC} = 35$ V	Rezonans Frekansı (MHz)	$V_{DC} = 35$ V	Rezonans Frekansı (MHz)
$V_{ac} = NA$	7.81	$V_{ac} = 0.1$ V	NA
	NA	$E = 157$ GPa	NA
	NA		0.55
E = 160 GPa için elde edilen Elmer FEM simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000) ve COMSOL Multiphysics sonuçlarıyla kıyaslanması			
Deneysel Sonuçlar (Bannon ve diğ. 2000)		COMSOL Multiphysics	
$V_{DC} = 35$ V	Rezonans Frekansı (MHz)	$V_{DC} = 35$ V	Rezonans Frekansı (MHz)
$V_{ac} = NA$	7.81	$V_{ac} = 0.1$ V	7.717
	NA	$E = 160$ GPa	0.6
	NA		0.55

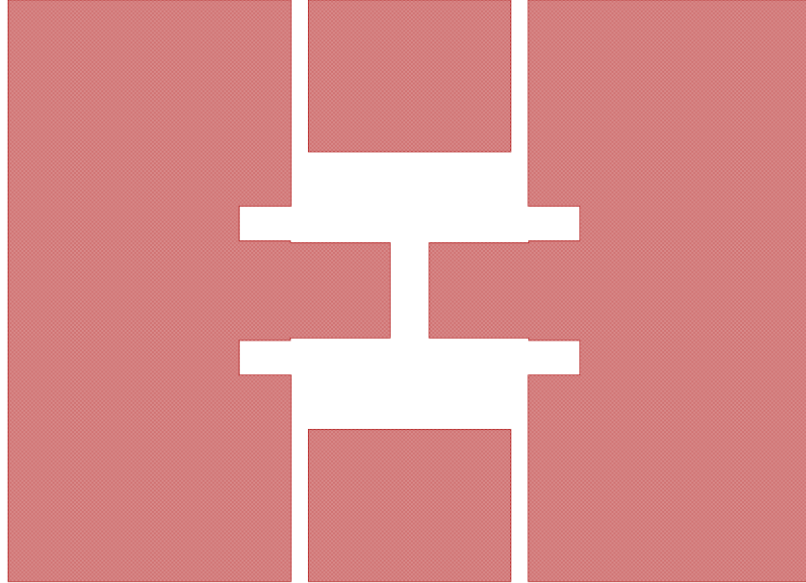
Tablo 3.5 incelendiğinde, Elmer FEM yazılımı kullanılarak elde edilen statik analiz ve frekans analizi sonuçlarının hem deneysel sonuçlara hem de COMSOL Multiphysics yazılımı ile elde edilen sonuçlara yakın hesaplandıkları görülür (Tez ve Kaya 2021).

Elmer FEM yazılımında statik ve frekans analizleri gerçekleştirebilmek için kullanılan algoritmaların doğruluğu test edildikten sonra, fotonik kristal çalışmasında kullanılmak üzere bir MEMS tarak parmak aktüatör yapısı geliştirilip Elmer FEM yazılımında Şekil 3.20’de verilen algoritma kullanılarak statik analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır (Karakılınç ve diğ. 2021).

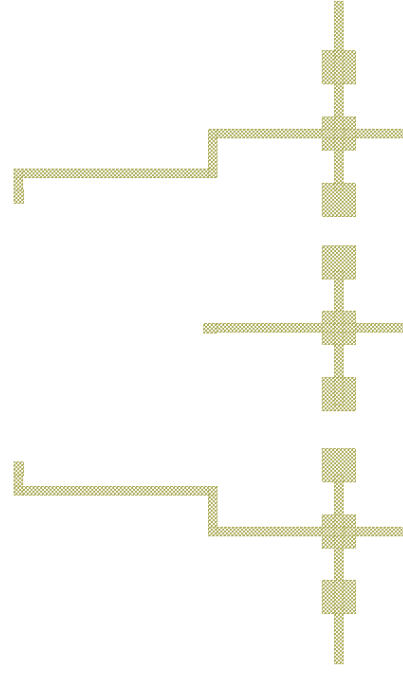
4. MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR YAPISININ ÜRETİMİ

Bu tez kapsamında ele alınan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı, modifiye edilmiş cam üzerine Silisyum (MSOG) yöntemi kullanılarak ODTÜ MEMS Merkezi'nde üretilmiştir. MSOG yöntemi temel olarak, işlenmiş bir cam pul ile Silisyum pulun anodik olarak yapıştırılması işlemidir. MSOG yöntemi, klasik SOG yöntemine göre daha yüksek verime sahiptir (Torunbalcı ve diğ. 2011). Literatürde bu üretim yöntemi ile çeşitli MEMS yapıları üretilmiştir (Torunbalcı ve diğ. (2011), Tez ve Akın (2012), Tez ve diğ. (2015)).

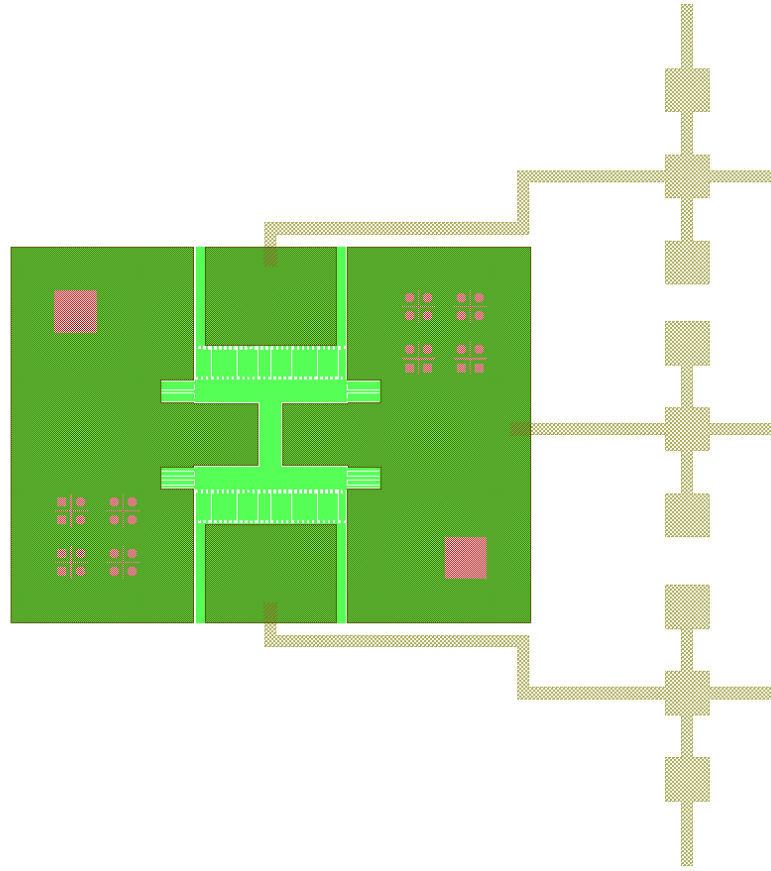
MSOG üretim yönteminin uygulanmasından önce MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait maske seti oluşturulmalıdır. Bu tez kapsamında oluşturulan maske seti, Şekil 4.1'de gösterilen çapa yapıları, Şekil 4.2'de gösterilen metal yollar ve Şekil 4.3'te gösterilen yapısal maskeden meydana gelmektedir.



Şekil 4.1: Maske setine ait çapa yapıları.

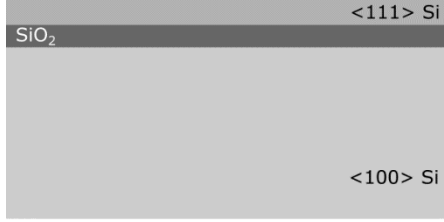


Şekil 4.2: Maske setine ait metal yollar.



Şekil 4.3: Tasarlanan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının maske seti.

MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının, Şekil 4.3'te verilen maske setine göre MSOG üretim yöntemiyle üretilmesine dair işlem adımları aşağıda verilmiştir:



Şekil 4.4: SOI pul piranha çözeltisi ile temizlenir.



Şekil 4.5: SOI pul üzerine fotodirenç kaplanır.



Şekil 4.6: Fotodirenç şekillendirilir.



Şekil 4.7: SOI pul DRIE yöntemi ile aşındırılır.



Şekil 4.8: Cam pul piranha çözeltisi ile temizlenir.



Şekil 4.9: Cam pul üzerine Au (altın) kaplanır.



Şekil 4.10: Au üzerine fotodirenç kaplanır.



Şekil 4.11: Au üzerindeki fotodirenç şekillendirilir.



Şekil 4.12: Au aşındırılır.



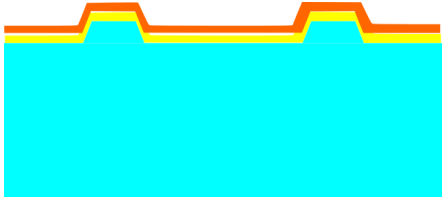
Şekil 4.13: Cam aşındırılır.



Şekil 4.14: Fotodirenç ve Au aşındırılır.



Şekil 4.15: Aşındırılan cam pul üzerine tekrar Au kaplanır.



Şekil 4.16: Aşındırılmış cam pul üzerindeki Au fotodirenç ile kaplanır.



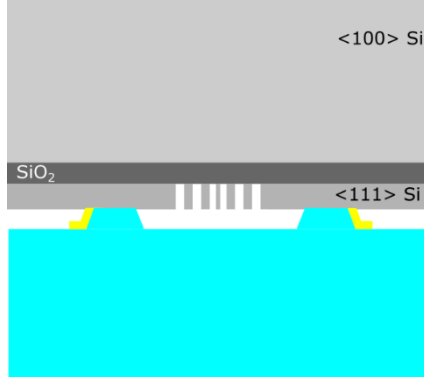
Şekil 4.17: Aşındırılmış cam pul üzerindeki fotodirenç şekillendirilir.



Şekil 4.18: Aşındırılmış cam pul üzerindeki Au aşındırılır.



Şekil 4.19: Aşındırılmış cam pul üzerindeki fotodirenç aşındırılarak metal yollar oluşturulur.



Şekil 4.20: SOI ve cam pul anodik olarak yapıştırılır.



Şekil 4.21: SOI pulun alt yüzeyi DRIE yöntemi ile aşındırılır.

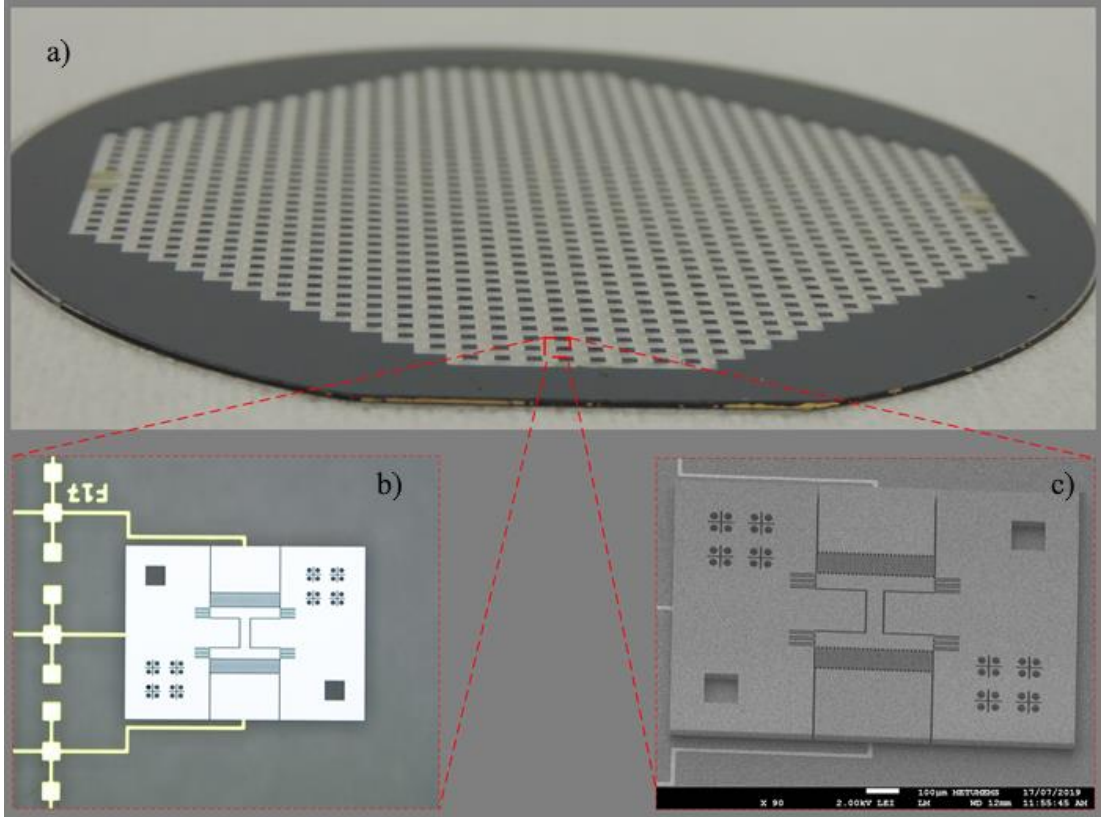


Şekil 4.22: SiO2 tabakası aşındırılır.

MSOG yöntemiyle üretimin ilk aşaması olan SOI pulun temizlenmesi için, H₂SO₄ ve H₂O₂ karışımı olan piranha çözeltisi kullanılmıştır. Bu aşamada SOI pul, piranha çözeltisi içerisinde 30 dakika bekletilmiştir. Daha sonra fotodirenç, <111> kristal oryantasyonu ile belirlenen 35 µm kalınlıktaki yapısal tabaka üzerine spin kaplama metodu ile kaplanmıştır. Pulun üzerine kaplanan fotodirenç, litografi işlemi ile şekillendirilmiştir. Fotodirenç şekillendirme işleminin ardından SOI pul, DRIE aşındırma işlemi ile şekillendirilmiş ve SOI pulun üretimi tamamlanmıştır. MSOG yöntemi için gerekli cam pul için de ilk aşamada piranha çözeltisi kullanılarak temizleme işlemi yapılmıştır. Temizlenen cam pul üzerine evaporasyon yöntemi ile Au kaplanmıştır. Ardından Au üzerine spin kaplama metodu kullanılarak fotodirenç kaplanmıştır. Kaplanan fotodirenç, fotolitografi kullanılarak şekillendirilmiştir. Daha sonraki adımda da Au aşındırılmıştır. Bir sonraki aşamada, HF kullanılarak cam aşındırılmıştır. Cam aşındırma işleminden sonra, fotodirenç ve ardından Au, cam pul üzerinden çıkarılmıştır. Sonraki adımda metal yolların oluşturulabilmesi için cam pul üzerine tekrar evaporasyon yöntemi ile Au ve ardından spin kaplama ile fotodirenç kaplanmıştır. Pulun üzerindeki fotodirenç litografi işlemi aracılığıyla şekillendirilip

Au katman aşındırılmıştır. Cam pulun üretimi için son olarak fotodirenç çıkarılmıştır. SOI ve cam pulları üretildikten sonra anodik yapıştırma işlemi ile pullar birbirlerine yapıştırılmıştır. Anodik yapıştırma, SOI pul ile cam pul arasında kimyasal bağ oluşturularak gerçekleştirilir. Burada belirli bir sıcaklık değerinde SOI pul ile cam pul arasına DC gerilim uygulanarak sodyum iyonlarının camın negatif kontağına çekilmesi sağlanır. Böylece cam pulun diğer yüzeyinde oksijen atomları kalır. Yüzeyde bulunan oksijen atomları silisyum atomlarına bağlanır ve çok güçlü SiO₂ bağı oluşur. Anodik yapıştırma işleminin ardından SOI pulun <100> kristal oryantasyonuna sahip alt kısmı DRIE ile gömülü oksit tabakaya kadar aşındırılmıştır. Son olarak gömülü oksit tabaka, BHF kullanılarak aşındırılıp üretim işlemi tamamlanmıştır.

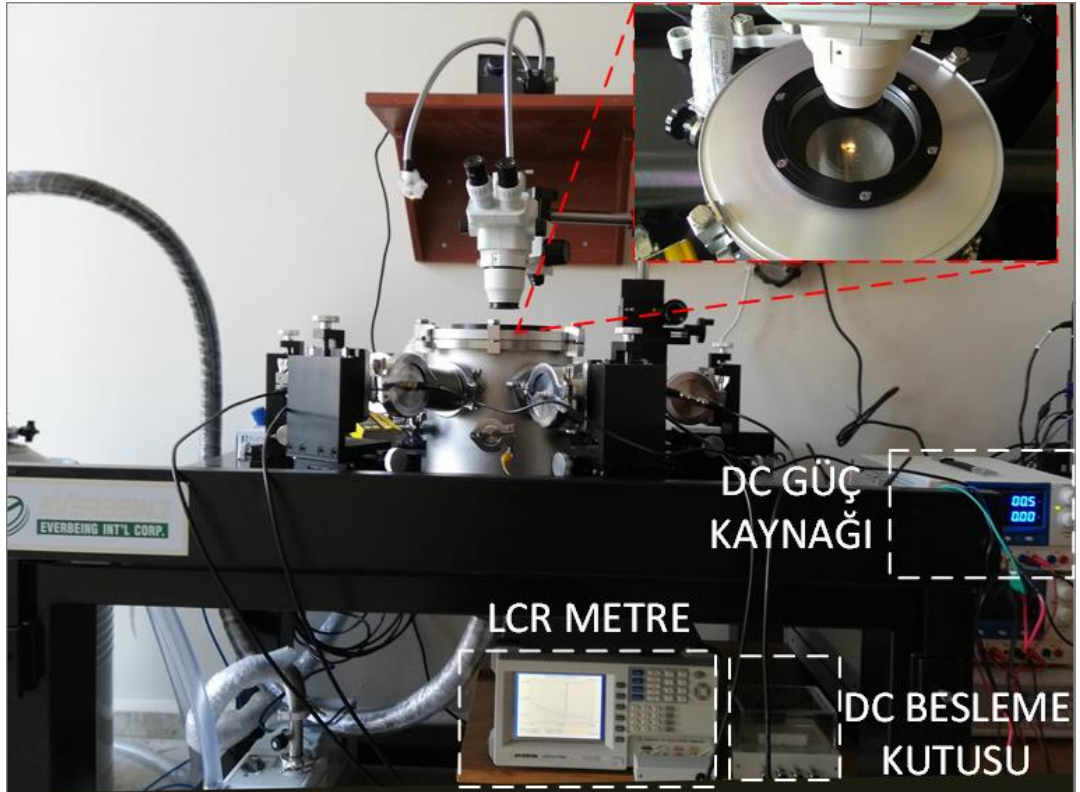
Yukarıda ifade edilen üretim adımlarına göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı, ODTÜ MEMS merkezinde üretilmiştir. MSOG yöntemi ile üretilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı ve yapının bulunduğu pul, Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23: a) MSOG yöntemi ile üretilen pul. (b) MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının optik görüntüsü. (c) MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının SEM görüntüsü.

5. FREKANS TESTİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

MSOG yöntemi ile ODTÜ MEMS merkezinde ürettirilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının frekans testleri, Pamukkale Üniversitesi MEMS laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Testlerin gerçekleştirilebilmesi için GW Instek 8110G LCR metre, Everbeing CG196, DC besleme kutusu ve DC güç kaynağından oluşan test düzeneği kullanılmıştır. Bu test düzeneğinin kurulu hali Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının frekans testleri için oluşturulan test düzeneği.

Test ölçümü sırasında MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının elektrotlarından birisi LCR metrenin yüksek portuna bağlanırken, ataletsel kütlelerin bağlı olduğu çapa bölgesi LCR metrenin düşük portuna bağlanır. Yapının diğer elektrodu ise toprağa çekilir. LCR metrenin yüksek portuna $V_{DC} + V_{ac}$ biçiminde gerilim uygulanıp rezonatör yapısının harekete geçirilmesi sağlanır. Bu esnada

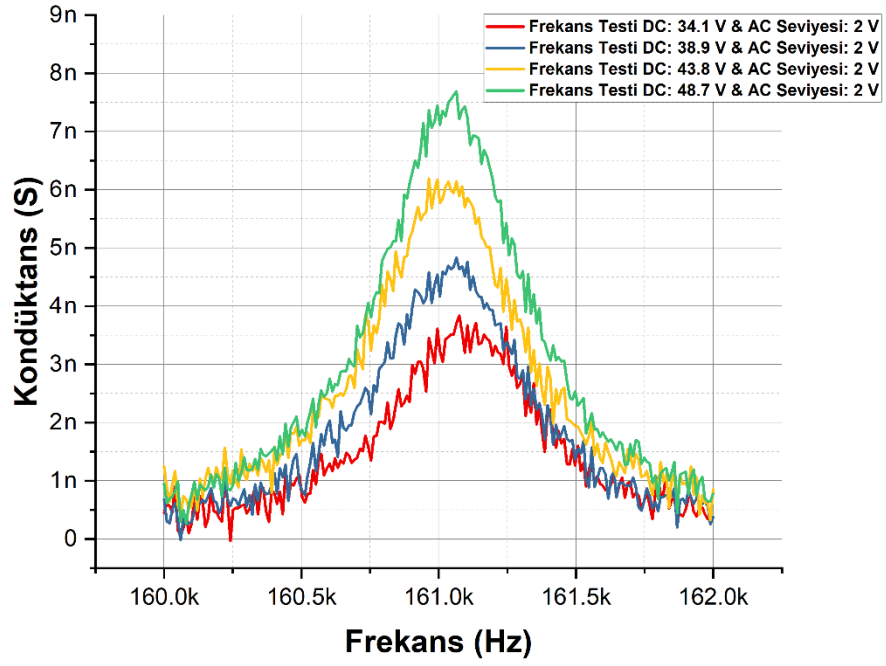
rezonatör tarafından oluşturulan hareketli akım, LCR metrenin düşük portu tarafından algılanır (Yamane ve diğ. (2016), Naik ve Hikihara (2011)).

Yukarıda ifade edilen test konfigürasyonuna göre, üretilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına $V_{ac} = 2 V$ olmak üzere farklı DC kutuplama gerilimleri uygulanmıştır. Test altındaki yapıya uygulanan DC gerilim seviyesi, DC besleme kutusundaki seri kapasitörlerden etkilenir. Bu sebeple çoğu durumda, uygulanan DC gerilim seviyesi ile DC güç kaynağında ayarlanan değer birbirinden farklı olur. Yapıya uygulanan gerçek DC kutuplama gerilimi seviyelerini elde edebilmek için DC besleme kutusunun çıkışından ölçümler yapılmıştır. Buna ilişkin ölçüm değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

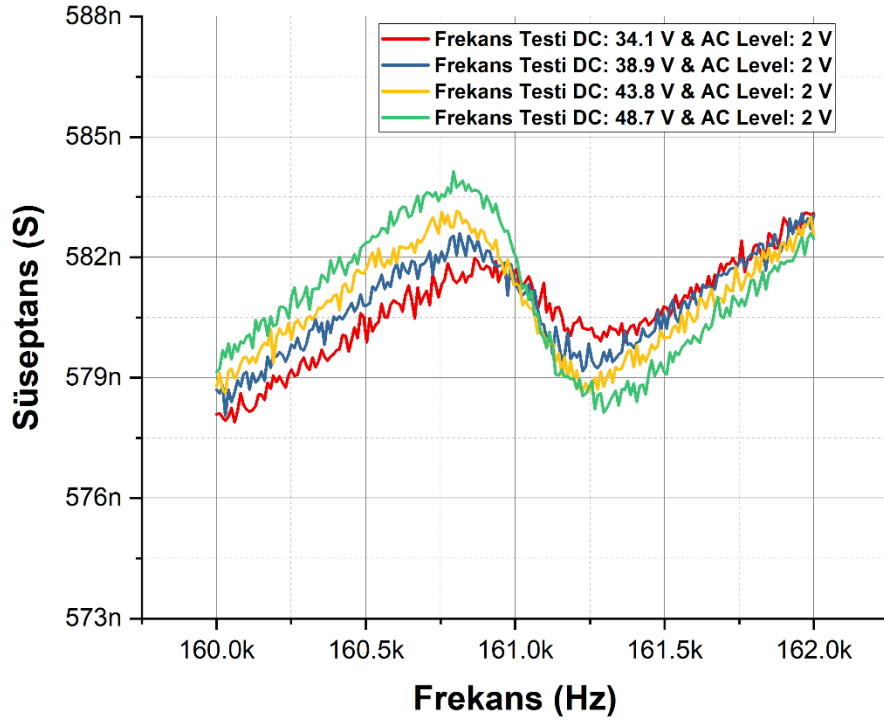
Tablo 5.1: DC güç kaynağından ayarlanan DC kutuplama gerilimi değerleri ile yapıya uygulanan gerçek DC kutuplama gerilimi değerlerinin kıyaslanması.

Ayarlanan DC Kutuplama Gerilimi (V)	DC Besleme Kutusunun Çıkışında Ölçülen DC Kutuplama Gerilim Değeri (V)
35	34.1
40	38.9
45	43.8
50	48.7

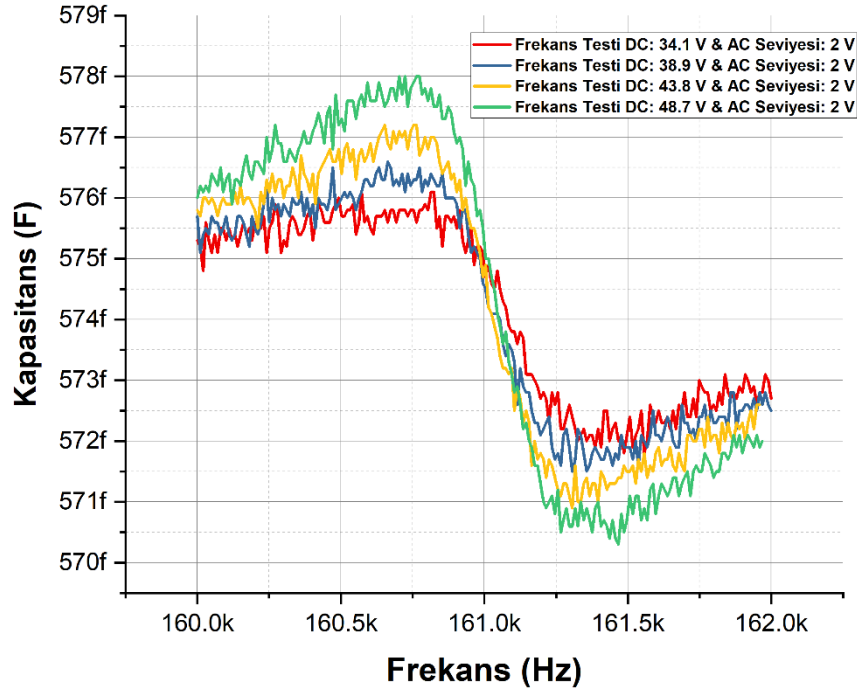
Tablo 5.1’de belirtilen değerlere göre gerçekleştirilen frekans testleri sonucunda, MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait kondüktans, süseptans ve kapasite ifadelerinin frekansa göre değişimleri sırasıyla Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te gösterildiği gibi elde edilmiştir:



Şekil 5.2: Frekans testlerine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kondüktans – frekans grafiği.



Şekil 5.3: Frekans testlerine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde süseptans – frekans grafiği.



Şekil 5.4: Frekans testlerine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kapasite – frekans grafiği.

Frekans testleri ile elde edilen deneysel veriler üzerinden Bölüm 2.8’de ifade edilen parametre çıkarımı yöntemi kullanılarak MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait parametreler Tablo 5.2’de belirtildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 5.2: Deneysel veriler üzerinden gerçekleştirilen parametre çıkarımı sonuçları.

V_{DC} (V)	f_0 (kHz)	Q	L_m (kH)	C_m (aF)	R_m (GΩ)
34.1	161.09	200	52.707	0.1852	0.2602
38.9	161.04	200	41.907	0.2331	0.2068
43.8	161.03	200	32.702	0.2987	0.1614
48.7	161.05	200	26.346	0.3707	0.1301

Tablo 5.2’ye göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının rezonans frekansı yaklaşık 161.05 kHz, kalite faktörü ise 200 olarak ölçülmüştür. Buradan, üretilen MEMS rezonatör yapısının rezonans frekansının Tablo 3.1’de verilen tasarım değerinden farklı olduğu görülür. Bu durumun sebebi Bölüm 2.8.1’de ifade edilmiştir. Üretim sonrası elde edilen yay genişliği Denklem (2.96) kullanılarak 3.28 μm civarında hesaplanmıştır.

6. PARAMETRE ÇIKARIMI SONUÇLARINA GÖRE GÜNCELLENEN MEMS TARAK PARMAK KAPASİTİF REZONATÖR YAPISININ TEORİK ANALİZİ VE FEM ANALİZLERİ

Bu bölümde, ilk aşamada deneysel veriler yardımıyla güncellenen tasarım parametreleri kullanılarak MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının teorik analizi tekrar gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise güncellenen tasarım parametrelerine göre Elmer FEM yazılımı kullanılarak tekrar FEM analizleri yapılmıştır.

Güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için gerçekleştirilen teorik analizin ilk aşamasında, farklı DC kutuplama gerilimlerine göre rezonatör yapısına etkileyen statik elektrostatik kuvvet Denklem (2.37) ile, statik yer değiştirme Denklem (2.52) ile, kapasite ise Denklem (2.38) ile hesaplanmıştır. Buna ait sonuçlar Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1: Güncellenen tasarım parametreleri kullanılarak teorik olarak hesaplanan statik elektrostatik kuvvet ve statik yer değiştirme değerleri.

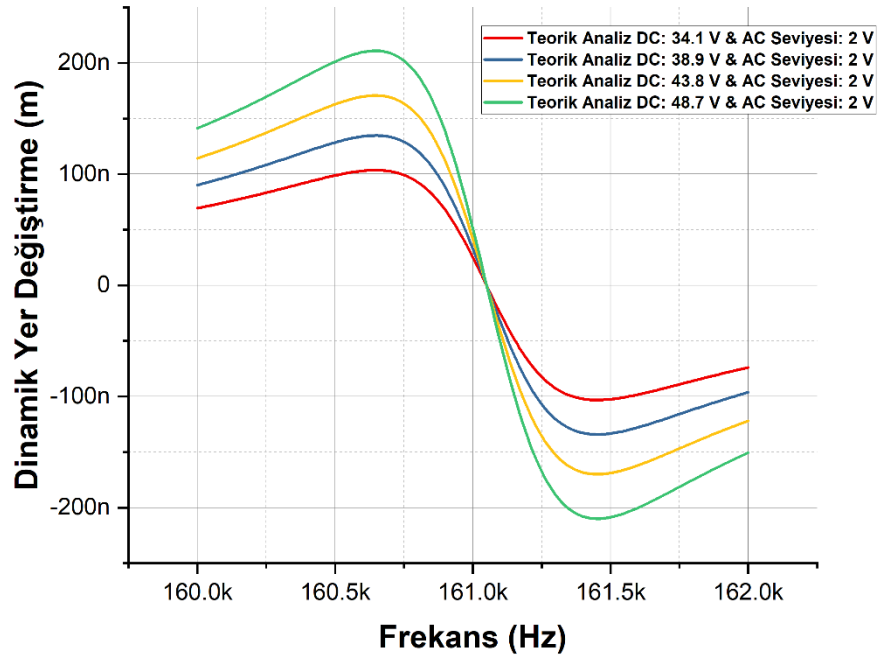
DC Kutuplama Gerilimi	Statik Elektrostatik Kuvvet	Statik Yer Değiştirme	Kapasite
$V_{DC} = 5 V$	$0.1084 \mu N$	$22.152 pm$	$520.3802 fF$
$V_{DC} = 10 V$	$0.4336 \mu N$	$88.609 pm$	$520.3808 fF$
$V_{DC} = 15 V$	$0.9757 \mu N$	$0.1994 nm$	$520.3817 fF$
$V_{DC} = 20 V$	$1.7346 \mu N$	$0.3543 nm$	$520.3831 fF$
$V_{DC} = 25 V$	$2.7103 \mu N$	$0.5538 nm$	$520.3848 fF$
$V_{DC} = 30 V$	$3.9029 \mu N$	$0.7975 nm$	$520.3869 fF$
$V_{DC} = 35 V$	$5.3122 \mu N$	$1.0855 nm$	$520.3894 fF$
$V_{DC} = 40 V$	$6.9384 \mu N$	$1.4177 nm$	$520.3923 fF$
$V_{DC} = 45 V$	$8.7814 \mu N$	$1.7943 nm$	$520.3956 fF$
$V_{DC} = 50 V$	$10.841 \mu N$	$2.2152 nm$	$520.3992 fF$

Teorik analizin ikinci aşamasında, frekans testlerinde kullanılan AC + DC biçimindeki potansiyel farka göre, rezonatör yapısına etkiyen teorik dinamik elektrostatik kuvvet, güncellenen tasarım parametrelerine göre Denklem (2.50) kullanılarak hesaplanmıştır. Buna ait sonuçlar Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2: Güncellenen tasarım parametreleri kullanılarak teorik olarak hesaplanan dinamik elektrostatik kuvvet.

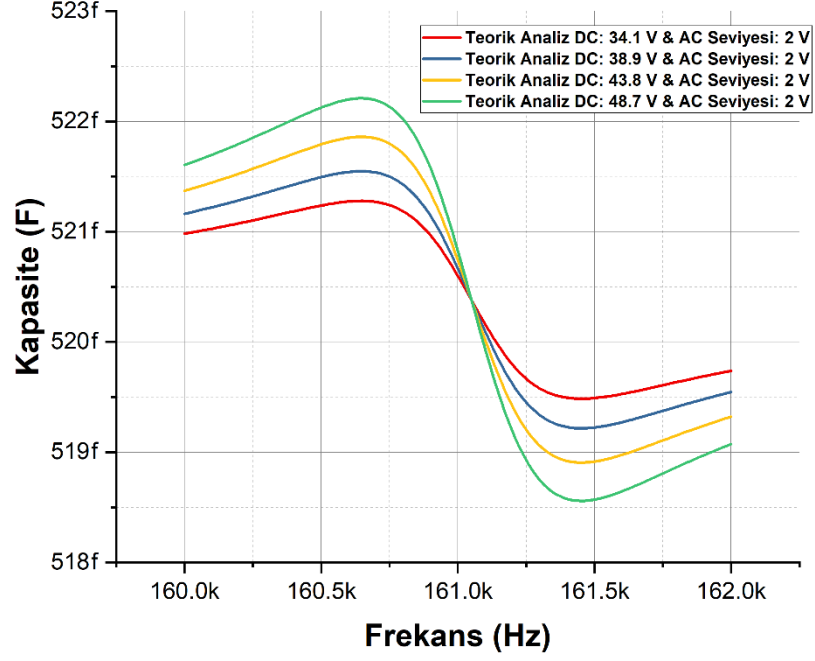
Potansiyel Fark	Elektrostatik Kuvvet
$V_{DC} = 34.1 V$ & $V_{ac,RMS} = 2 V$	$5.0599 \mu N$
$V_{DC} = 38.9 V$ & $V_{ac,RMS} = 2 V$	$6.5794 \mu N$
$V_{DC} = 43.8 V$ & $V_{ac,RMS} = 2 V$	$8.3367 \mu N$
$V_{DC} = 48.7 V$ & $V_{ac,RMS} = 2 V$	$10.302 \mu N$

Hesaplanan elektrostatik kuvvet değerlerine göre rezonatör yapısının dinamik yer değiştirmesinin frekansa göre değişimi, Denklem (2.10) kullanılarak Şekil 6.1’de gösterildiği gibi elde edilir:



Şekil 6.1: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde dinamik yer değiştirme – frekans grafiği.

Şekil 6.1’de elde edilen dinamik yer değıştirme sonuçlarına göre toplam kapasitenin frekansa göre değışimi, N adet hava aralığına sahip yapı için Denklem (2.38) kullanılarak Şekil 6.2’de gösterildiği gibi elde edilir:



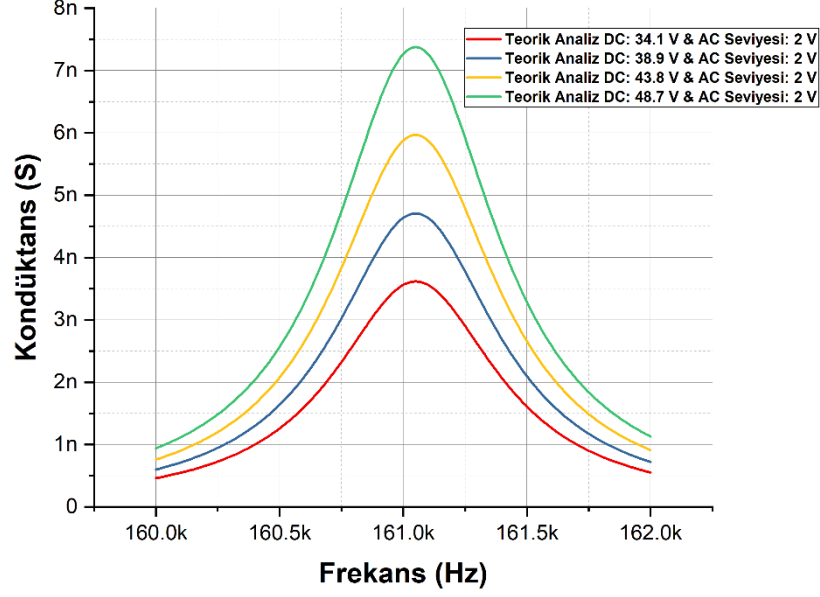
Şekil 6.2: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kapasite – frekans grafiği.

Teorik analizin bir diğer aşamasında, Şekil 2.7’de gösterilen elektriksel eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır. Farklı DC kutuplama gerilimlerine göre L_m , C_m ve R_m parametrelerinin değeri, sırasıyla Denklem (2.61), Denklem (2.62) ve Denklem (2.63) kullanılarak Tablo 6.3’te gösterildiği gibi elde edilir:

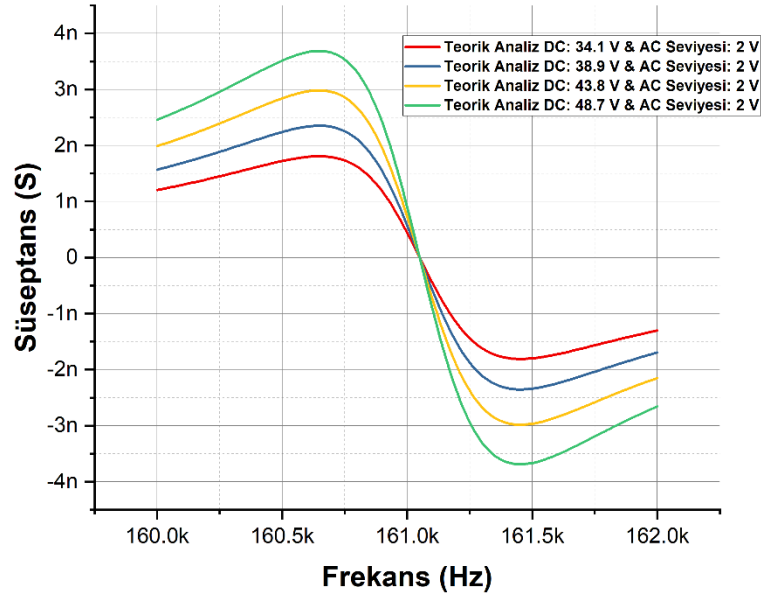
Tablo 6.3: Güncellenen tasarım parametrelerine göre farklı DC kutuplama gerilimlerinde teorik olarak hesaplanan elektriksel eşdeğer devre parametreleri.

V_{DC} (V)	L_m (kH)	C_m (aF)	R_m (G Ω)
34.1	54.643	0.1787	0.2765
38.9	41.990	0.2326	0.2125
43.8	33.120	0.2949	0.1676
48.7	26.791	0.3645	0.1356

Tablo 6.3'e göre, Şekil 2.7'de gösterilen elektriksel eşdeğer devreye ait kondüktans ve süseptans ifadelerinin frekansa göre değişimi, Denklem (2.88) ve Denklem (2.89) kullanılarak sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterildiği gibi elde edilir:

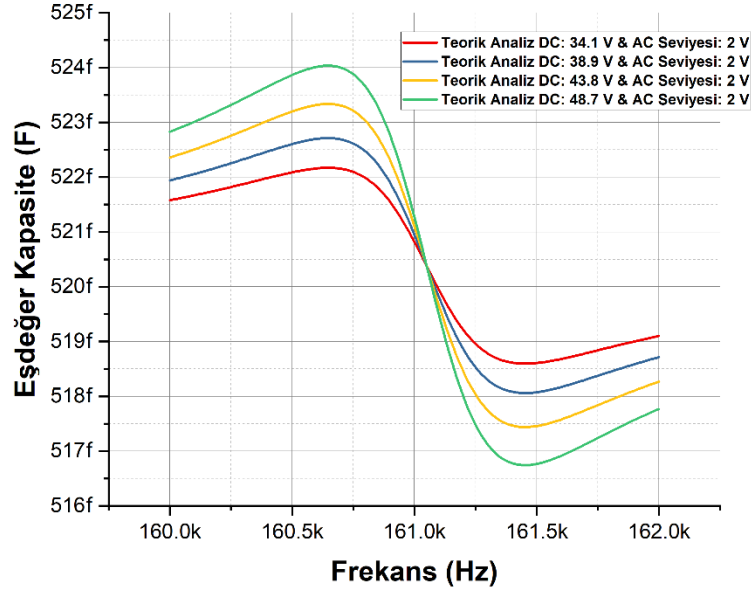


Şekil 6.3: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde kondüktans – frekans grafiği.



Şekil 6.4: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde süseptans – frekans grafiği.

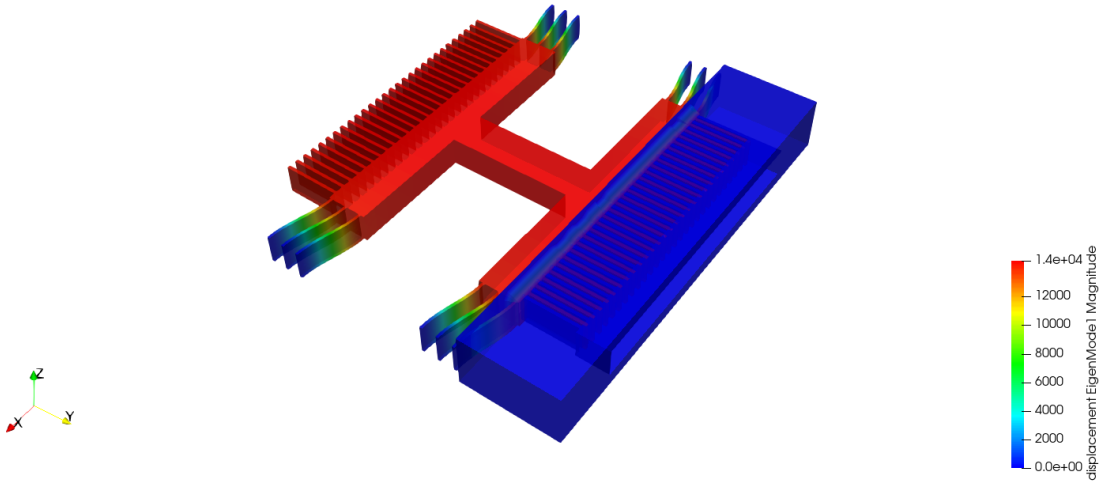
Şekil 2.7’de gösterilen elektriksel eşdeğer devreye ait eşdeğer kapasitenin frekansa göre değişimi de Tablo 6.3’te verilen parametrelere göre Denklem (2.94) kullanılarak Şekil 6.5’te gösterildiği gibi elde edilir:



Şekil 6.5: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analize ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde elektriksel eşdeğer devreye ait eşdeğer kapasite – frekans grafiği.

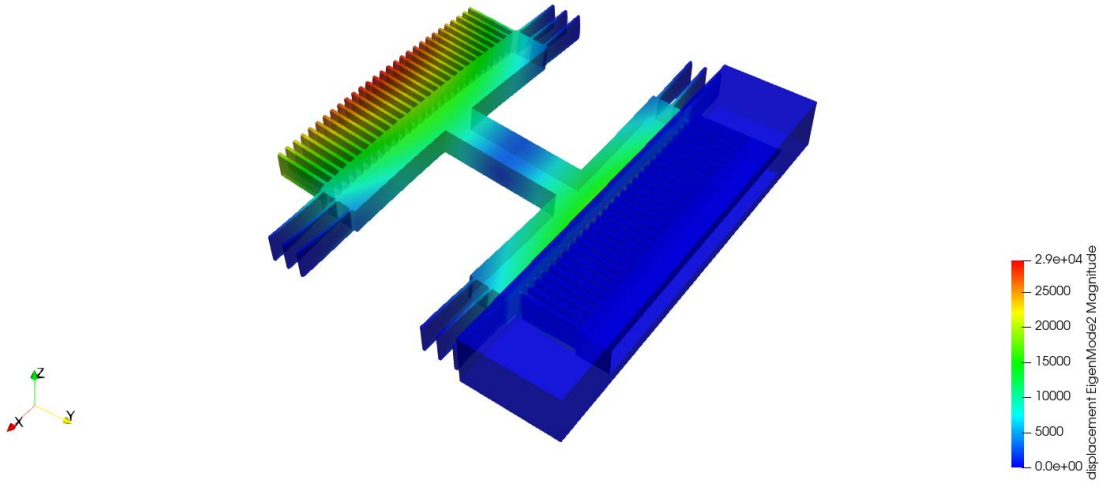
Parametre çıkarımının ardından ikinci aşamada, Tablo 3.1’de verilen tasarım parametreleri güncellenerek yapının FEM analizleri yapılmıştır. Burada MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının CAD çizimi hazırlanırken, üretim için tasarlanan maske setindeki yay genişliği parametresi, frekans testleri ile elde edilen deneysel verilere göre güncellenmiştir. Buna göre, maske setinde 4 μm olarak tasarlanan yay genişliği, Denklem (2.88) ile elde edilen sonuca göre 3.28 μm olarak güncellenmiştir. Güncellenen CAD çizimine göre Bölüm 3.2.1 ve Bölüm 3.2.2’de anlatılan işlem adımları aynen tekrarlanmıştır. Bu işlemlerin ardından öncelikle, elde edilen ağ yapısı kullanılarak modal analiz gerçekleştirilmiştir. Buna ilişkin birinci, ikinci ve üçüncü mod rezonans frekansı cevapları sırasıyla Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmiştir.

Rezonans Frekansı = 160677 Hz



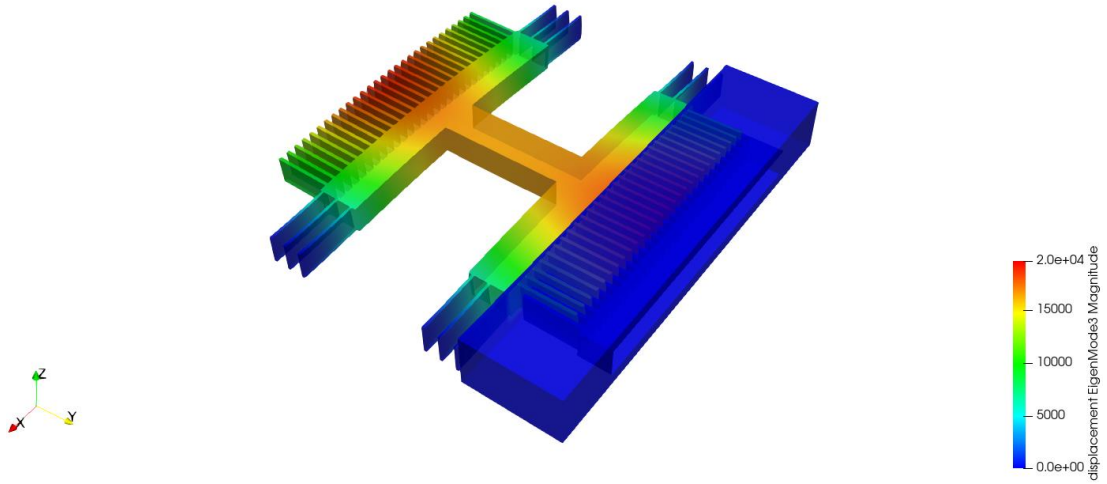
Şekil 6.6: Güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin birinci mod rezonans frekansı çıktısı.

Rezonans Frekansı = 542184 Hz



Şekil 6.7: Güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin ikinci mod rezonans frekansı çıktısı.

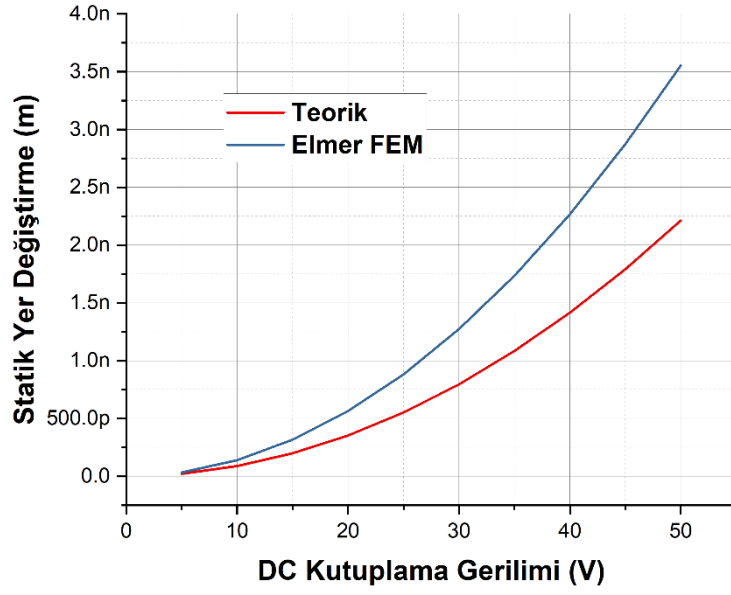
Rezonans Frekansı = 585332 Hz



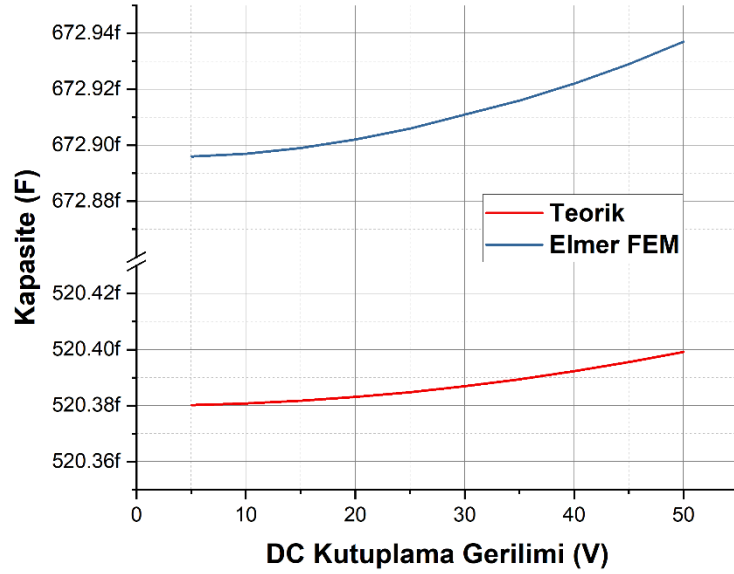
Şekil 6.8: Güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin üçüncü mod rezonans frekansı çıktısı.

Bu tez çalışmasında, MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının birinci mod rezonans frekansı incelenmiştir. Deneysel veriler üzerinden elde edilen rezonans frekansı ile Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen modal analize ilişkin birinci mod rezonans frekansı çıktısı oldukça yakın hesaplanmıştır. Ayrıca yapının birinci moddaki rezonans frekansında sağlıklı çalışabilmesi için birinci mod rezonans frekansı ile diğer modlardaki rezonans frekansları arasında önemli ölçüde fark oluşturulduğu görülmüştür.

Modal analizin ardından, güncellenen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı için Şekil 3.20’de verilen algoritma kullanılarak Elmer FEM yazılımında statik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analize ilişkin sonuçlar ile güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analiz sonuçları yer değiştirme – DC kutuplama gerilimi için Şekil 6.9’da, kapasite – DC kutuplama gerilimi için de Şekil 6.10’da kıyaslanmıştır.



Şekil 6.9: Güncellenen tasarım parametrelerine göre Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analizine ilişkin statik yer değiştirme – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması.



Şekil 6.10: Güncellenen tasarım parametrelerine göre Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen statik analizine ilişkin kapasite – DC kutuplama gerilimi sonuçları ile teorik sonuçların kıyaslanması.

Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da verilen sonuçlar incelendiğinde Elmer FEM yazılımı kullanılarak edilen sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında farklılıklar olduğu görülür. Bu farklılıkların sebebi, teorik analizde saçaklanma etkisinin ele alınmamasıdır. FEM analizi için oluşturulan CAD modelinde ise hava katmanı, saçaklanma etkisinin hesaba

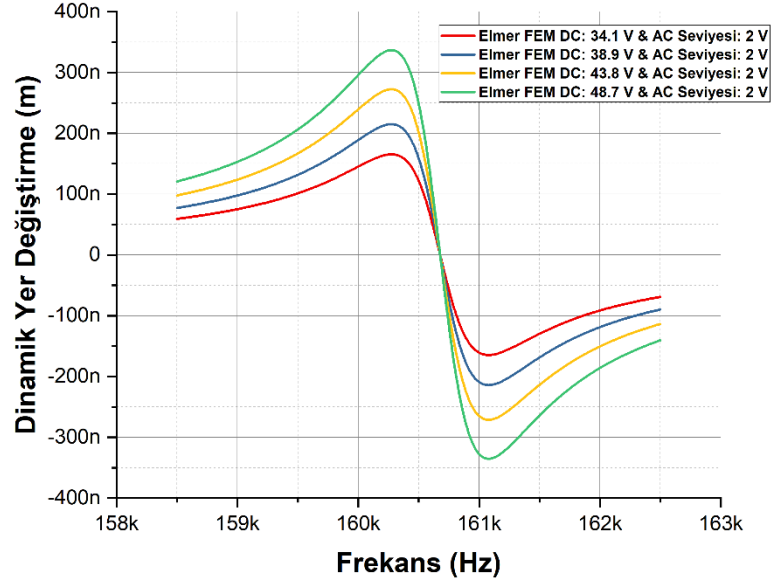
katılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Saçaklanma etkisinden ötürü Elmer FEM yazılımı, elektrostatik kuvveti ve kapasiteyi teorik hesaplamalarla elde edilen sonuçlardan daha yüksek olacak şekilde hesaplamaktadır. Ayrıca Şekil 3.22’de görülen Elmer FEM sonuçları ile Şekil 6.10’da görülen Elmer FEM sonuçları arasında fark, tasarımın güncellenmesiyle oluşturulan yeni ağ yapısından kaynaklanmaktadır. Tasarımda gerçekleştirilen ufak farklılıklar ağ yapısını etkileyebilmektedir.

Parametre çıkarımının ardından güncellenen yapı için son aşamada Şekil 3.23 ve Şekil 3.25’te verilen algoritmalar kullanılarak Elmer FEM yazılımında frekans analizi gerçekleştirilmiştir. Parametre çıkarımı ile deneysel sonuçlardan elde edilen kalite faktörü değeri $Q = 200$ ’e ve rezonans frekansı $f_0 = 161.05 \text{ kHz}$ ’e göre Rayleigh katsayıları Tablo 6.4’te görüldüğü gibi hesaplanmıştır:

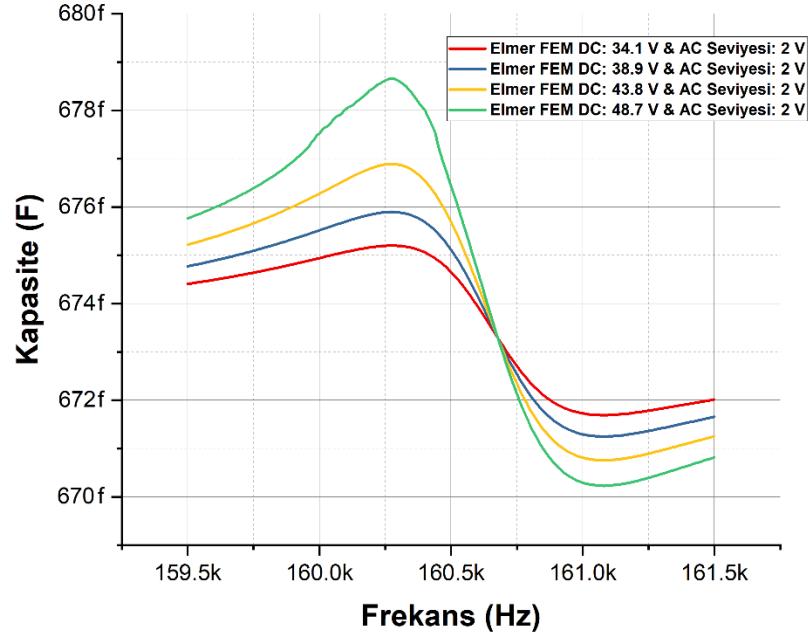
Tablo 6.4: Parametre çıkarımı sonucunda elde edilen parametrelere göre hesaplanan Rayleigh katsayıları.

Rayleigh Katsayıları	Hesaplanan Değer
α	2.5239×10^3
β	2.4763×10^{-9}

Elmer FEM yazılımında gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin farklı DC kutuplama gerilimlerinde dinamik yer değiştirimin frekansa göre değişimi Şekil 6.11’de, kapasitenin frekansa göre değişimi ise Şekil 6.12’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 6.11: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme – frekans grafiği.



Şekil 6.12: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile gerçekleştirilen kapasite hesabı analizine ilişkin kapasite – frekans grafiği.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde MEMS teknolojisinin tanımı yapılmış ve tarihsel gelişim sürecinden bahsedilmiştir. Ayrıca MEMS teknolojisine ait yapılar, materyaller ve üretim metotları da bu bölümde incelenmiştir. İkinci bölümde ise MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının teorisi gösterilmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının tasarımına ilişkin parametreler üçüncü bölümde verilmiştir. Yine üçüncü bölümde, tasarım parametrelerine göre önce teorik analiz gerçekleştirilmiş, sonrasında Elmer FEM yazılımı kullanılarak sırasıyla modal analiz, statik analiz ve literatürdeki ilk frekans analizi yapılmıştır.

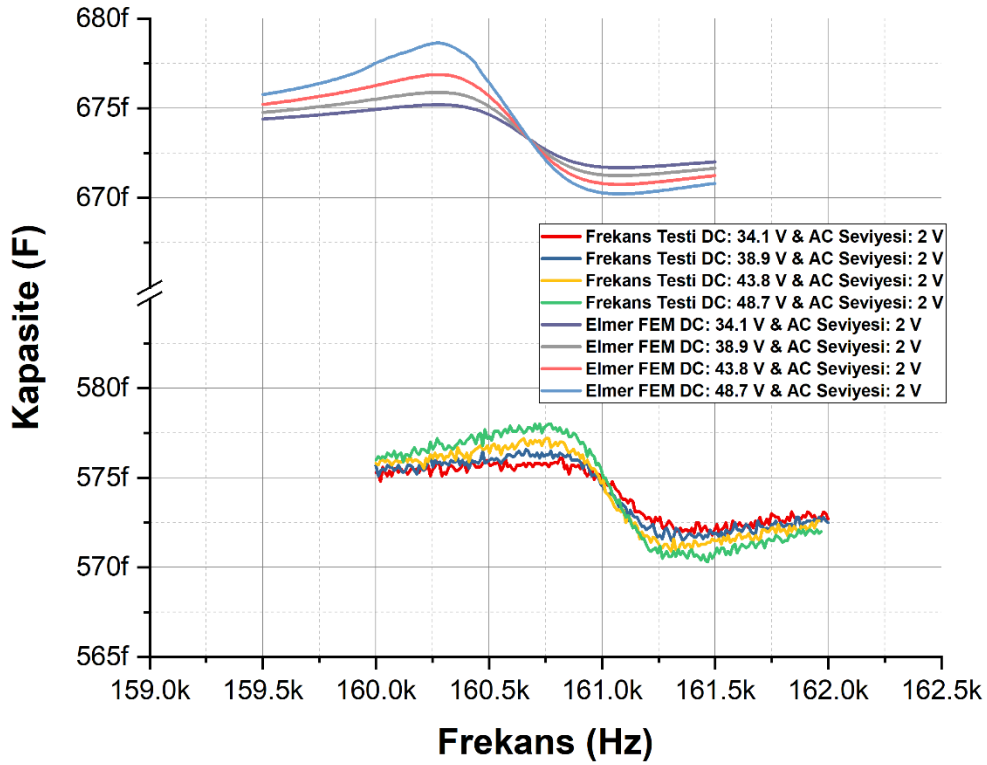
Tasarlanan MEMS kapasitif rezonatör yapısı ODTÜ MEMS Merkezinde üretilmiştir. Dördüncü bölümde üretim adımları ve maske setine yer verilmiştir. Üretilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısına ait frekans testleri ise Pamukkale Üniversitesi MEMS laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Beşinci bölümde frekans testinin detayları ve elde edilen deneysel sonuçlar paylaşılmıştır. Ayrıca bu bölümde, elde edilen deneysel veriler üzerinden parametre çıkarımları yapılmıştır. Buna göre, üretilen MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının rezonans frekansı yaklaşık 161050 Hz, kalite faktörü ise 200 olarak belirlenmiştir. Parametre çıkarımları sonucunda elde edilen elektriksel eşdeğer devre parametreleri ise farklı DC kutuplama gerilimlerine göre Tablo 5.2’de paylaşılmıştır.

Altıncı bölümde, deneysel sonuçlar üzerinden elde edilen karakteristik parametrelere göre tasarım parametreleri güncellenmiştir. Sonrasında, güncellenen yapı için teorik analiz gerçekleştirilmiştir.

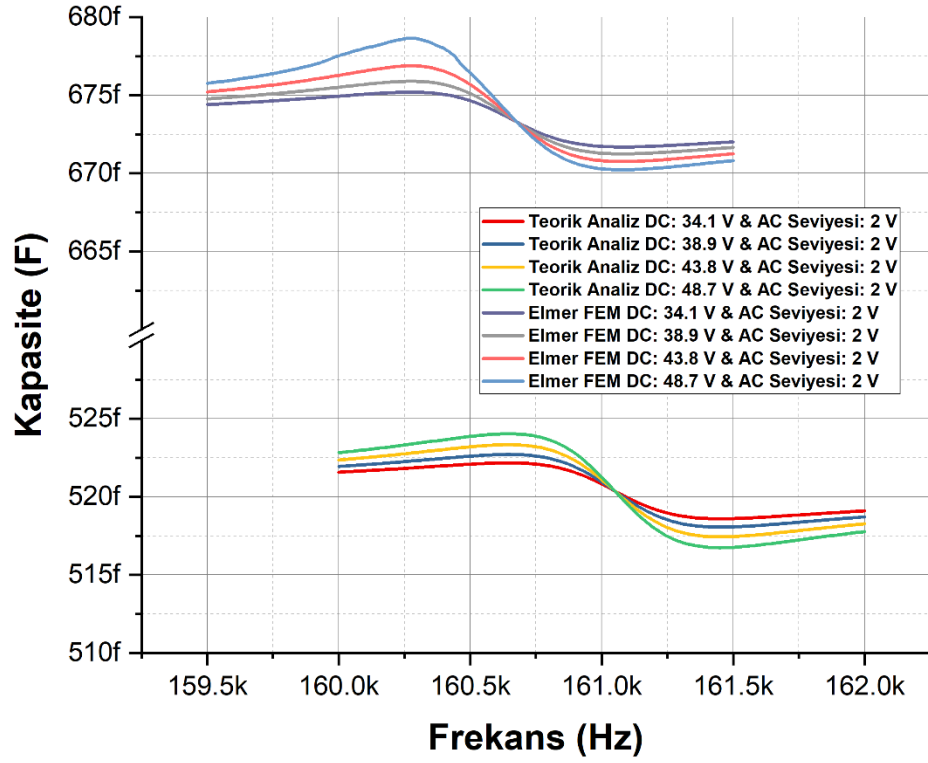
Altıncı bölümün devamında, güncellenen tasarım parametrelerine göre MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının CAD çizimi de güncellenip tekrar Elmer FEM yazılımı kullanılarak sırasıyla modal, statik ve frekans analizleri yapılmıştır. Modal analiz ile elde edilen birinci mod rezonans frekansı, deneysel veriler yardımıyla hesaplanan rezonans frekansına oldukça yakın hesaplanmıştır. Burada görülen ufak farklılığın sebebi, FEM analizi için kullanılan CAD modelinin çizim aşamasında karşılaşılan boyut sınırlarıdır. Bu sınırlamalar sebebiyle, parametre çıkarımı sonucu elde edilen yeni yay genişliği CAD modeline tam olarak aktarılamamıştır.

Elmer FEM yazılımıyla gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin dinamik yer değiştirme – frekans grafiği Şekil 6.11’de verilmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 6.1’de ifade edilen teorik dinamik yer değiştirme sonuçları ile kıyaslandığında farklılıkların olduğu görülür. Bu farklılıkların sebebi, teorik analizde saçaklanma etkisinin ele alınmamasıdır. FEM analizi için oluşturulan CAD modelinde ise hava katmanı, saçaklanma etkisinin hesaba katılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Elmer FEM yazılımıyla gerçekleştirilen frekans analizine ilişkin kapasite – frekans grafiği Şekil 6.12’de verilmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 5.4’te verilen deneysel kapasite – frekans ve Şekil 6.5’te verilen teorik eşdeğer kapasite – frekans sonuçlarıyla kıyaslandığında, kapasite değişimlerinin tutarlı hesaplandığı görülür. Bu kıyaslamalara ilişkin grafikler sırasıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile elde edilen kapasite sonuçları ile deneysel kapasite sonuçlarının kıyaslanması.



Şekil 7.2: Güncellenen yapı için Elmer FEM yazılımı ile elde edilen kapasite sonuçları ile teorik eşdeğer kapasite sonuçlarının kıyaslanması.

Parametre çıkarımı sonrası güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analiz ve FEM analizi sonuçları ile deneysel sonuçlar Tablo 7.1’de kıyaslanmıştır. Burada; teorik analiz için direkt olarak deneysel sonuçlardan elde edilen rezonans frekansı ve kalite faktörü değerleri kullanılmıştır. Teorik analize ait L_m , C_m , R_m ve ΔC_{teorik} değerleri ise sırasıyla Denklem (2.61), Denklem (2.62), Denklem (2.63) ve Denklem (2.96) kullanılarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlardaki rezonans frekansı, kondüktans verilerininin maksimum oldukları frekans noktalarıdır. Ayrıca deneysel kalite faktörü değerleri Denklem (2.93), L_m değerleri Denklem (2.92), R_m değerleri Denklem (2.94), C_m değerleri Denklem (2.95), $\Delta C_{parametre\ çıkarımı}$ değerleri ise Denklem (2.96) kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 7.1’deki sonuçlar incelendiğinde elde edilen değerlerin birbirlerine yakın hesaplandıkları görülür.

Tablo 7.1: Güncellenen tasarım parametrelerine göre gerçekleştirilen teorik analiz ve FEM analizi sonuçları ile deneysel sonuçların kıyaslanması.

Teorik Analiz Sonuçları							
V_{DC} (V)	Freq. (kHz)	Q	L_m (kH)	C_m (aF)	R_m (G Ω)	ΔC_{teorik} (fF)	
34.1	≈ 161.05	200	54.643	0.1787	0.2765	3.57	
38.9	≈ 161.05	200	41.990	0.2326	0.2125	4.65	
43.8	≈ 161.05	200	33.120	0.2949	0.1676	5.90	
48.7	≈ 161.05	200	26.791	0.3645	0.1356	7.29	
Elmer FEM Sonuçları							
V_{DC} (V)	Freq. (kHz)	Q	L_m (kH)	C_m (aF)	R_m (G Ω)	$\Delta C_{simulation.}$ (fF)	
34.1	≈ 160.68	200	NA	NA	NA	3.51	
38.9	≈ 160.68	200	NA	NA	NA	4.65	
43.8	≈ 160.68	200	NA	NA	NA	6.13	
48.7	≈ 160.68	200	NA	NA	NA	8.42	
Deneysel Sonuçlar							
V_{DC} (V)	Freq. (kHz)	Q	L_m (kH)	C_m (aF)	R_m (G Ω)	$\Delta C_{deneysel}$ (fF)	$\Delta C_{paramet}$ re çıkarımı (fF)
34.1	≈ 161.09	200	52.707	0.1852	0.2602	3.91	3.79
38.9	≈ 161.04	200	41.907	0.2331	0.2068	4.65	4.77
43.8	≈ 161.03	200	32.702	0.2987	0.1614	5.98	6.12
48.7	≈ 161.05	200	26.346	0.3707	0.1301	8.01	7.60

Tablo 7.2’de, bu tez kapsamında tasarlanıp üretilen rezonatör yapısı ile literatürde kütle algılama uygulamaları için kullanılan bazı MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapılarının rezonans frekansları karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.2: Bu tez kapsamında tasarımı ve üretimi yapılan rezonatör yapısıyla literatürde kütle uygulamaları için kullanılan bazı MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapılarının rezonans frekanslarının karşılaştırılması.

Referans	Sensör Tipi	Algılama Yöntemi	Rezonans Frekansı	Kalite Faktörü	DC Kutuplama Gerilimi
(Bayraktar 2010)	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör (Sensör Kodu: 4015A2F40B)	Elektrostatik harekete geçirme / Kapasitif algılama	560 kHz	350	50 V
(Töral 2014)	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör (Sensör Kodu: RES #7)	Elektrostatik harekete geçirme / Kapasitif algılama	572.8 kHz	660	100 V
(Bayraktar ve diğ. 2011)	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör	Elektrostatik harekete geçirme / Kapasitif algılama	1.98 MHz 558 kHz	470 330	50 V
(Eroğlu ve diğ. 2011)	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör	Elektrostatik harekete geçirme / Kapasitif algılama	245 kHz	-	50 V
(Aytaşkın 2020)	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör	Elektrostatik harekete geçirme / Kapasitif algılama	36.3 kHz	101	30 V
Bu Tez Kapsamında Tasarlanıp Üretilen Yapı	MEMS Tarak Parmak Kapasitif Rezonatör	Elektrostatik harekete geçirme / Kapasitif algılama	161.05 kHz	200	34.1 V 38.9 V 43.8 V 48.7 V

Tasarımı ve üretimi yapılan MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısının kütle algılama uygulamaları için kullanılabileceği düşünülmektedir.

8. KAYNAKLAR

Dölen, M., Kaplan, H., “MikroElektroMekanik Sistemler (MEMS): Genel bir Tanıtım”, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 4 (3), 173-185, (2002).

Prime Faraday Technology Watch, “An introduction to MEMS [online]”, (01 Ağustos 2021), https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/an-introduction-to-mems.pdf, (2002).

Kilby, J. S., “Invention of the Integrated Circuit”, *IEEE Trans. Electron Devices*, 23 (7), 648-654, (1976).

Bogue, R., “MEMS sensors: past, present and future”, *Sens. Rev.*, 27, 7-13, (2007).

Fujita, H., Toshiyoshi, H., “Micro actuators and their applications”, *Microelectron. J.*, 29, 637-640, (1998).

Liu, X. Y., O'Brien, M., Mwangi, M., Li, X. J., Whitesides, G. M., “Paper-based piezoresistive MEMS force sensors”, *IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, (2011).

Pramanik, C., Saha, H., Gangopadhyay, U., “Design optimization of a high performance silicon MEMS piezoresistive pressure sensor for biomedical applications”, *J. Micromech. Microeng.*, 16, (2006).

Doelle, M., Mager, D., Ruther, P., Paul, O., “Geometry optimization for planar piezoresistive stress sensors based on the pseudo-Hall effect”, *Sens. Actuators, A*, 127 (2), 261-269, (2006).

Sheplak, M., Seiner, J., Breuer, K., Schmidt, M., “A MEMS microphone for aeroacoustics measurements”, *J. Mater. Sci.*, (1999).

Khair, M., Qu, P., Qu, H., “A low-cost CMOS-MEMS piezoresistive accelerometer with large proof mass”, *Sensors*, 11, 7892-7907, (2011).

Cai, C., Tan, J., Hua, D., Qin, M., Zhu, N., “Piezoresistive temperature sensors fabricated by a surface micromachining CMOS MEMS process”, *Sci. Rep.*, 8, (2018).

Rahim, R. A., Bais, B., Majlis, B. Y., “Design and analysis of MEMS piezoresistive SiO₂ cantilever-based sensor with stress concentration region for biosensing applications”, *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*, (2008).

Tsai, M. H., Sun, C. M., Liu, Y. C., Wang, C., Fang, W., “Design and application of a metal wet-etching post-process for the improvement of CMOS-MEMS capacitive sensors”, *J. Micromech. Microeng.*, 19 (10), (2009).

Lazarus, N., Bedair, S. S., Lo, C. C., Fedder, G. K., “CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor”, *J. Microelectromech. Syst.*, 19 (1), 183-191, (2010).

Zhang, Y., Howver, R., Gogoi, B., Yazdi, N., “A high-sensitive ultra-thin MEMS capacitive pressure sensor”, *16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, (2011).

Caruntu, D. I., Knecht M. W., “Microelectromechanical systems cantilever resonators under soft alternating current voltage of frequency near natural frequency”, *J. Dyn. Syst. Meas.*, 137 (4), (2015).

Jmai, B., Rajhi, A., Gharsallah, A., “Controllable bridge of the RF-MEMS: Static analysis”, *International Conference on Green Energy Conversion Systems*, (2017).

Han, J., Li, L., Jin, G., Feng, J., Li, B., Jia, H., Ma, W., “Vibration identification of folded-MEMS comb drive resonators”, *Micromachines*, 9 (8), (2018).

Zou, X., Seshia, A. A., “A high-resolution resonant MEMS accelerometer”, *18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, (2015).

Tez, S., Aytaşkın, E., “Design of MEMS-based capacitive resonator for target analyte detection”, *Electrica*, 20 (1), 41-51, (2020).

Brand, O., Dufour, I., Heinrich, S. M., Josse, F., *Resonant MEMS: Fundamentals, Implementation, and Application*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, (2015).

Algamili, A. S., Khir, M. H., Dennis, J. O., Ahmed, A. Y., Alabsi, S. S., Hashwan, S. S., Junaid, M. M., “A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensors devices”, *Nanoscale Res. Lett.*, 16 (1), (2021).

Kon, S., Horowitz, R., “A high-resolution MEMS piezoelectric strain sensor for structural vibration detection”, *IEEE Sens. J.*, 8 (12), 2027-2035, (2008).

Conway, N. J., Traina, Z. J., Kim, S. G., “A strain amplifying piezoelectric MEMS actuator”, *J. Micromech. Microeng.*, 17 (4), (2007).

Katzir, S., *The Discovery of the Piezoelectric Effect*, Dordrecht: Springer, 246, (2006).

Getpreecharsawas, J., Puchades, I., Hournbuckle, B., Fuller, L., Pearson, R., Lyshevski, S., “An electromagnetic MEMS actuator for micropumps”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, (2006).

Hosaka, H., Kuwano, H., Yanagisawa, K., “Electromagnetic microrelays: concepts and fundamental characteristics”, *Sens. Actuators, A*, 40 (1), 41-47, (1994).

Potekhina, A., Wang, C., “Review of electrothermal actuators and applications”, *Actuators*, 8 (4), (2019).

Legtenberg, R., Groeneveld, A. W., Elwenspoek, M., “Comb-drive actuators for large displacements”, *J. Micromech. Microeng.*, 6, 320-329, (1996).

Kavitha, S., Daniel, R. J., Sumangala, K., “Design and analysis of MEMS comb drive capacitive accelerometer for SHM and seismic applications”, *Measurement*, 93, 327-339, (2016).

- Xie, H., Fedder, G. K., “A CMOS-MEMS lateral-axis gyroscope”, *14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, (2001).
- Liu, Y., Xu, J., Zhong, S., Wu, Y., “Large size MEMS scanning mirror with vertical comb drive for tunable optical filter”, *Opt. Lasers Eng.*, 51 (1), 54-60, (2013).
- Li, Z., Gao, S., Brand, U., Hiller, K., Wolff, H., “A MEMS nanoindenter with an integrated AFM cantilever gripper for nanomechanical characterization of compliant materials”, *Nanotechnology*, 31, (2020).
- Stefanini, R., Chatras, M., Blondy, P., Rebeiz, G. M., “Miniature MEMS Switches for RF Applications”, *J. Microelectromech. Syst.*, 20 (6), (2011).
- Khoshnoud, F., Silva, C. W., “Recent advantages in MEMS sensor technology-biomedical applications”, *IEEE Instru. Meas. Mag.*, 15 (1), 8-14, (2012).
- Suter, M., Ergeneman, O., Zürcher, J., Schmid, S., Camenzind, A., Nelson, B. J., Hierold, C., “Superparamagnetic photocurable nanocomposite for the fabrication of microcantilever”, *J. Micromech. Microeng.*, 21, (2011).
- Rochus, V., Gutschmidt, S., Golinval, J. C., Saint-Mard, M., Heusdens, B., Haudry, F., Destine, J., “High vibration sensors: modelling, design and integration”, *10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, (2009).
- Gupta, R. K., “Electronically probed measurements of MEMS geometries”, *J. Microelectromech. Syst.*, 9 (3), (2000).
- Kovacs, G. T. A, Maluf, N. I., Petersen, K. E., “Bulk micromachining of silicon”, *Proc. IEEE*, 86 (8), 1536-1551, 1998.
- Burns, D. W., *MEMS Materials and Processes Handbook*, vol. 1, San Jose: Springer, (2011).

Efil, C., “Dual axis drive yöntemiyle VRG için sistem hassasiyeti artırma”, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa, (2020).

Bustillo, J., Howe, R. T., Muller, R. S., “Surface micromachining for microelectromechanical systems”, *Proc. IEEE*, 86 (8), 1552-1574, (1998).

French, P. J., Sarro, P. M., “Surface versus bulk micromachining: the contest for suitable applications”, *J. Micromech. Microeng.*, 8, 45-53, (1998).

Mestrom, R. M. C., Fey, R. H. B., van Beek, J. T. M., Phan, K. L., Nijmeijer, H., “Modelling the dynamics of a MEMS resonator: Simulation and experiments”, *Sens. Actuators, A*, 142, 306-315, (2008).

Thompson, M., *Intuitive Analog Circuit Design*, Newnes, (2013).

Brand, O., Dufour, I., Heinrich, S. M., Josse, F., *Resonant MEMS: Fundamentals, Implementation, and Application (Advanced Micro and Nanosystems)*, Weinheim, Germany: Wiley, (2015).

Ocak, I. E., “A Tactical grade MEMS accelerometer”, Ph. D. Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, (2010).

Ying, Z. C., Reitsma, M. G., Gates, R. S., “Direct measurement of cantilever spring constants and correction for cantilever irregularities using an instrumented indenter”, *Rev. Sci. Instrum.*, 78, (2007).

Bao, M., Yang, H., “Squeeze film air damping in MEMS”, *Sens. Actuators, A*, 136, 3-27, (2007).

Alper, S. E., “MEMS gyroscope for tactical-grade inertial measurement applications”, Ph. D. Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, (2005).

Bao, M., *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*, Oxford, United Kingdom: Elsevier Science & Technology, (2005).

Bannon, F. D., Clark, J. R., Nguyen, C. T. C., “High-Q HF microelectromechanical filters”, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 35 (4), 512-526, (2000).

Tilmans, H. A. C., “Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. Lumper-parameter systems”, *J. Micromech. Microeng.*, 6, 157-176, (1996).

Sabry, Y., Medhat, M., Bourouina, T. and Khalil, D., “Parameter extraction of MEMS comb-drive near-resonance equivalent circuit: physically-based technique for a unique solution”, *J. Micro/Nanolith. MEMS, and MOEMS*, 11 (2), (2012).

Trusov, A. A., Shkel, A. M., “Capacitive detection in resonant MEMS with arbitrary amplitude of motion”, *J. Micromech. Microeng.*, 17, 1583-1592, (2007).

Bayraktar, E., Eroglu, D., Ciftlik, A. T., Kulah, H., “A MEMS based gravimetric resonator for mass sensing applications”, *2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, (2011).

Gabrielson, T. B., “Mechanical-Thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors”, *IEEE Trans. Electron Devices*, 40, 903-909, (1993).

Xie, J., Hao, Y., Shen, Q., Chang, H., Yuan, W., “A dicing-free SOI process for MEMS devices based on the lag effect”, *J. Micromech. Microeng.*, 23, (2013).

Lee, J. E.-Y., Seshia, A. A., “Direct parameter extraction in feedthrough-embedded capacitive MEMS resonators”, *Sens. Actuator A Phys.*, 167, 237-244, (2011).

Texas Instruments, “OPA656 Wideband, Unity-Gain Stable, FET-Input Operational Amplifier”, (2015).

Raback, P., Malinen, M., Ruokolainen, J., Pursula, A., Zwinger, T., “Elmer Models Manual”, CSC-IT Center for Science, (2019).

Riegel, J., Mayer, W. and Van Havre, Y., “A FreeCAD manual [online]”, (01 Ağustos 2021), <https://www.freecadweb.org/>, (2019).

Code-Aster, “Analysis of structures and thermomechanics for studies & research [online]”, (01 Ağustos 2021), <https://www.code-aster.org/>, (2011).

Liu, M., Gorman, D. G., “Formulation of Rayleigh damping and its extension”, *Comput. Struct.*, 57 (2), 277-285, (1995).

Tez, S., Kaya, M., “Development of algorithms in open-source Elmer FEM for frequency response and biased modal analysis of MEMS cantilever”, *J. Comput. Electron.*, 26 (1), 1-12, (2021).

COMSOL Mulphysics – MEMS Module, “A 3D Biased Resonator: Stationary, Eigenfrequency, Frequency Domain, and Pull-In Analyses [Online]”, (02 November 2021), <https://www.comsol.com/model/a-3d-biased-resonator-stationary-eigenfrequency-frequency-domain-and-pull-in-ana-11748>, (2021).

Oh, C. S., Lee, H. J., Ko, S. G., Kim, S. W., Ahn, H. G., “Comparison of the Young’s modulus of polysilicon film by tensile testing and nanoindentation”, *Sensor Actuat. A Phys.*, 117 (1), 151-158, (2005).

Sharpe, W. N., Turner, K. T., Edwards, R. L., “Tensile testing of polysilicon”, *Exp. Mech.*, 39, 162-170, (1999).

Karakılınc, Ö. Ö., Tez, S., Kaya, M., “Photonic crystal bandpass filter exploiting the degenerate modes tunable with MEMS actuator for terahertz application”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, (2021).

Torunbalcı, M. M., Tatar, E., Alper, S. E. and Akın, T., “Comparison of two alternative silicon-on-glass microfabrication processes for MEMS inertial sensors”, *Procedia Eng.*, 25, 900–903, (2011).

Tez, S. and Akın, T., “Comparison of two alternative fabrication processes for a three-axis capacitive accelerometer”, *Procedia Eng.*, 47, 342-345, (2012).

Tez, S., Aykutlu, U., Torunbalci, M. M., Akin, T., “A bulk-micromachined three-axis capacitive MEMS accelerometer on a single die”, *J. Microelectromech. Syst.*, 24 (5), 1264-1274, (2015).

Yamane, D., Matsushima, T., Konishi, T., Toshiyoshi, H., Masu, K. and Machida, K., “A dual-axis MEMS capacitive inertial sensor with high-density proof mass,” *Microsystem Technologies*, 22 (3), 459–464, (2016).

Naik, S. and Hikihara, T., “Characterization of a MEMS resonator with extended hysteresis,” *IEICE Electronics Express*, 8 (5), 291-298, (2011).

Bayraktar, E., “Design and Implementation of A MEMS Based Gravimetric Detector for Cytometry Applications”, MSc. Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, (2010).

Töral, T. B., “Development of A High Yield Fabrication Process for MEMS Based Resonant Mass Sensors for Cell Detection Applications”, MSc. Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, (2014).

Eroğlu, D., Bayraktar, E. and Kulah H., “A laterally resonating gravimetric sensor with uniform mass sensitivity and high linearity”, *16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2255-2258, (2011).

Aytaşkın, E., “MEMS Teknolojisi Tabanlı Kapasitif Rezonatör Tasarımı ve Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2020).