

**T.C.  
SİİRT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ UYGULAMALARI İÇİN MEMS TEKNOLOJİSİ  
TABANLI DC/AC GÜÇ İNVERTÖRÜNÜN MODELLENMESİ VE TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Salih Rahmi TURAN  
(203111010)**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Melih KUNCAN**

**2. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR**

**Temmuz-2022 SİİRT**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Salih Rahmi TURAN tarafından hazırlanan “Yenilenebilir Enerji Uygulamaları için MEMS Teknolojisi Tabanlı DC/AC Güç İvertörünün Modellenmesi ve Tasarımı” adlı tez çalışması 05/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Doç. Dr. Mehmet Recep MİNAZ

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Melih KUNCAN

.....

#### Üye

Dr. Öğretim Üyesi Kaplan KAPLAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Fevzi HANSU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim sürecinde; bilgisini, deneyimini ve değerli vaktini esirgemeyen, her konuyu çekinmeden danışabildiğim, eğitimim ve çalışmalarım için sıkılmadan, yorulmadan destekte bulunan kıymetli danışman hocalarım; Doç. Dr. Melih KUNCAN'a ve Dr. Öğretim Üyesi Osman ÜLKİR'e minnetlerimi sunarım.

Ayrıca bu süreçte, her zaman yanımda olan; eşime, aileme ve arkadaşlarıma destekleri için çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan denemeler, Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İşaret İşleme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu vesileyle İşaret İşleme Laboratuvarı personellerine destekleri için ayrıca teşekkür ederim.

Salih Rahmi TURAN  
SİİRT-2022

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Amaç .....	7
1.2. Tez İçeriği .....	8
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>9</b>
<b>3. MATERYAL VE METOT</b> .....	<b>17</b>
3.1. Güç Çeviricinin Tasarımı .....	19
3.2. Matematiksel Model .....	21
3.3. Matlab/Simulink Tasarımı .....	26
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>31</b>
<b>5. SONUÇLAR</b> .....	<b>38</b>
<b>6. KAYNAKÇA</b> .....	<b>40</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>43</b>

## TABLolar LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1. 1.</b> Yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyet karşılaştırılması.....	3
<b>Tablo 3. 1.</b> Tasarım parametreleri .....	21
<b>Tablo 3. 2.</b> Mekaniksel büyüklüklerin elektriksel büyüklükteki karşılıkları .....	22
<b>Tablo 4. 1.</b> Yer değiştirmeye göre kapasitans analizi (1.model değerleri) .....	31
<b>Tablo 4. 2.</b> Yer değiştirmeye göre kapasitans analizi (2.model değerleri) .....	31
<b>Tablo 4. 3.</b> Elektriksel potansiyelin kapasitansa göre analizi (1.model değerleri) .....	32
<b>Tablo 4. 4.</b> Elektriksel potansiyelin kapasitansa göre analizi (2.model değerleri) .....	33
<b>Tablo 4. 5.</b> Referans AC giriş voltajına göre elektrostatik kuvvet değerleri.....	34
<b>Tablo 4. 6.</b> Referans gerilimi – dönüştürücü kapasitansa göre verim hesap tablosu .....	36
<b>Tablo 4. 7.</b> Farklı kapasitans değerlerine karşılık verim hesabı.....	37



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1. 1. 2021 Yılı ilk 10 ayı birincil kaynak bazında elektrik üretimi (GWh) .....	1
Şekil 1. 2. Örnek bir MEMS teknolojisi .....	3
Şekil 1. 3. MOEMS genel bir bakış .....	4
Şekil 1. 4. Geliştirilmiş LIGA tekniği .....	5
Şekil 1. 5. Yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılan DC/AC invertör .....	6
Şekil 1. 6. Modifiye kare dalga ve Kare dalga .....	7
Şekil 1. 7. Tam Sinüs Dalga .....	7
Şekil 2. 1. RF MEMS anahtar .....	9
Şekil 2. 2. Kapasitif tarak transdüksiyonlu CMOS MEMS rezonatör .....	10
Şekil 2. 3. Kondansatörün mekanik eş değer devresi .....	11
Şekil 2. 4. 3 fazlı geçiş anahtarı .....	12
Şekil 2. 5. Önerilen iç içe geçmiş kapasitör tasarımının küçük bir kesiti .....	14
Şekil 2. 6. Elektrotermal mikro-aktüatörün çalışma prensibi .....	15
Şekil 3. 1. Örnek bir fotovoltaik sistem .....	17
Şekil 3. 2. MEMS ünitesi yerleştirilmiş PV sistemi .....	18
Şekil 3. 3. İndiyum- antimonit .....	18
Şekil 3. 4. MEMS Güç Çeviricinin Sistem Tasarımının Şematik Gösterimi .....	19
Şekil 3. 5. MEMS güç çeviricinin sistem uygulaması ve eşdeğer elektrik devresi .....	20
Şekil 3. 6. Kütle-yay-sönümleyici sistemi .....	21
Şekil 3. 7. Seri RLC devresinin örnek gösterimi .....	23
Şekil 3. 8. MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel gösterimi .....	23
Şekil 3. 9. MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel eşdeğer devresi .....	25
Şekil 3. 10. Örnek bir fotovoltaik DC/AC invertör devresi .....	27
Şekil 3. 11. MEMS fotovoltaik DC/AC invertör .....	28
Şekil 3. 12. Matlab/Simulink modelinin sinyal akış diyagramı .....	29
Şekil 4. 1. Yer değiştirmeye göre kapasitans grafiği (1.model) .....	32
Şekil 4. 2. Yer değiştirmeye göre kapasitans grafiği (2.model) .....	32
Şekil 4. 3. Kapasitansa göre elektriksel potansiyel grafiği (1.model) .....	33
Şekil 4. 4. Kapasitansa göre elektriksel potansiyel grafiği (2.model) .....	33
Şekil 4. 5. Elektrostatik kuvvet- referans AC giriş voltajı değişim grafiği .....	34
Şekil 4. 6. 0 V referans giriş voltajına göre dönüştürülmüş voltaj grafiği .....	35
Şekil 4. 7. 120 V referans giriş voltajına göre dönüştürülmüş voltaj grafiği .....	36

## KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ

<b><u>Kısaltma</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>Au</b>	: Altın
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>CMOS</b>	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
<b>DC</b>	: Doğru Akım
<b>DLP</b>	: Dijital Işık İşleme
<b>EPDK</b>	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
<b>GES</b>	: Güneş Enerji Santrali
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>IC</b>	: Entegre Devre
<b>IPPC</b>	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
<b>LIGA</b>	: Litografi, Elektrokaplama ve Kalıplama
<b>MEMS</b>	: Mikro Elektrik Mekanik Sistemler
<b>MOEMS</b>	: Mikro Opto Elektro Mekanik Sistemler
<b>Ni</b>	: Nikel
<b>OE</b>	: Opto Elektronik
<b>OM</b>	: Opto Mekanik
<b>PMMA</b>	: Polimetil Metakrilat
<b>PV</b>	: Fotovoltaik Güneş Sistemleri
<b>PWM</b>	: Sinyal Genişlik Modülasyonu
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>SiC</b>	: Silisyum Karbür
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum Dioksit
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	: Silisyum Nitrür
<b>Su 8</b>	: Epoksi bazlı negatif fotorezist
<b>TEİAŞ</b>	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
<b>TWh</b>	: Terawatt saat
<b>V</b>	: Voltaj

## Simge

$b_m$	: Viskozite Sönümle Katsayısı
$c$	: Kondansatör
$E_0$	: Vakum Geçirgenliği
$E_r$	: Orta Dielektrik Sabiti
$F$	: Elektrostatik Kuvvet
$\vec{F}_{es}$	: Toplam Elektrostatik Kuvvet
$\vec{F}_{ms}$	: Mekanik Durdurucu Kuvvet
$F_{ex}$	: Harici Mekanik Uyarım
$g$	: Hareketli ve Sabit Elektronlar Arasındaki Boşluk
$i$	: Akım
$k_m$	: Mekanik Yay Sabiti
$k_s$	: Mekanik Durdurucu Sabiti
$L$	: İndüktans
$L_0$	: Elektrotun İlk Örtüşen Uzunluğu
$m_m$	: Toplam Kütle Miktarı
$N_e$	: Hareketli Kapasitörün Elektron Sayısı
$Q$	: Elektrostatik Yük
$R$	: Direnç
$t_e$	: Elektrotun Kalınlığı
$\ddot{x}$	: Sismik Kütlelerin İvmesi
$\dot{x}$	: Sismik Kütlelerin Hızı
$x$	: Sismik Kütlelerin Sapması

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# YENİLENEBİLİR ENERJİ UYGULAMALARI İÇİN MEMS TEKNOLOJİSİ TABANLI DC/AC GÜÇ İNVERTÖRÜNÜN MODELLENMESİ VE TASARIMI

**Salih Rahmi TURAN**

**Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Melih KUNCAN  
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR**

**2022, 43 + X Sayfa**

Mikro-elektromekanik sistemler (MEMS), büyük ölçekli elektronik cihazları küçük ölçekli elektronik cihazlara dönüştürmemizi sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılan DC/AC invertörlere MEMS teknolojisi uygulandı. Yenilenebilir enerji uygulamalarında MEMS teknolojisi kullanmamızın en temel nedeni düşük güç harcayarak yüksek verimlilikte DC gerilimi AC gerilime dönüştürmektir. Tez çalışmasında kapasitif MEMS DC/AC inverter tasarlanırken şehir şebekesinde kullanılan 50 Hz ve 220V AC gerilim uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda frekans 50 Hz sabit alınmıştır. Ayrıca klasik MEMS yerleşim alanı tercih edilmiştir. Deneysel çalışmalarda, MEMS tarak yapısı, kapasitans, elektrostatik kuvvet, elektriksel potansiyel ve yer değiştirme hızının invertöre etkileri incelendi. 0.5V ve 24V DC gerilimde analizleri yapıldı ve mükemmel yakın gerilim dönüşümü elde edildi.

Önerilen güç invertörü, kapasitif özelliği nedeni ile sıfır güç tüketimi sağlamaktadır. Bu tez çalışmasıyla düşük güç uygulamaları ile DC/AC dönüşümün mümkün olacağı görüldü. İleriki çalışmalarda, uygun yarı iletkenler, tarak sayısı, tarak uzunluğu, uygun giriş gerilimi ve kapasitansı seçilerek yüksek verimli DC/AC invertör veya MEMS teknolojisinin uygulanabileceği elektronik cihazlar tasarlanabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** DC/AC İnvörtör, Güç Dönüştürücüleri, Mikro Elektro-Mekanik Sistemler, Yenilenebilir Enerji Kaynakları.

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **MODELING AND DESIGN OF MEMS TECHNOLOGY BASED DC/AC POWER INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS**

**Salih Rahmi TURAN**

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Siirt University  
The Degree of Master of Science  
In Electrical-Electronics Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Melih KUNCAN  
Second Supervisor: Assist. Prof. Dr. Osman ÜLKİR**

**2022, 43 + X Pages**

Micro-electro-mechanical systems (MEMS) enable us to transform large-scale electronic devices into small-scale electronic devices. In this thesis, MEMS technology was applied to DC/AC inverters used in renewable energy applications. The main reason for using MEMS technology in renewable energy applications is to convert high efficiency DC voltage to AC voltage with low power consumption. While designing a capacitive MEMS DC/AC inverter in our thesis study, since the AC voltage used in the city grid is 50 Hz and 220V, the frequency is taken as 50 Hz in this study. In addition, the classical MEMS settlement area was preferred. The effects of MEMS comb structure, capacitance, electrostatic force, electrical potential and displacement on the inverter were investigated. Analyzes were made at 0.5V and 24V DC voltages and near-perfect voltage conversion was obtained.

With the proposed power inverter, zero power consumption was achieved due to its capacitive feature. With this thesis, it was seen that DC/AC conversion is possible with low power applications. In future studies, by selecting suitable semiconductors, number of combs, comb length, appropriate input voltage and capacitance, high efficiency DC/AC inverter or electronic devices can be designed to apply MEMS technology.

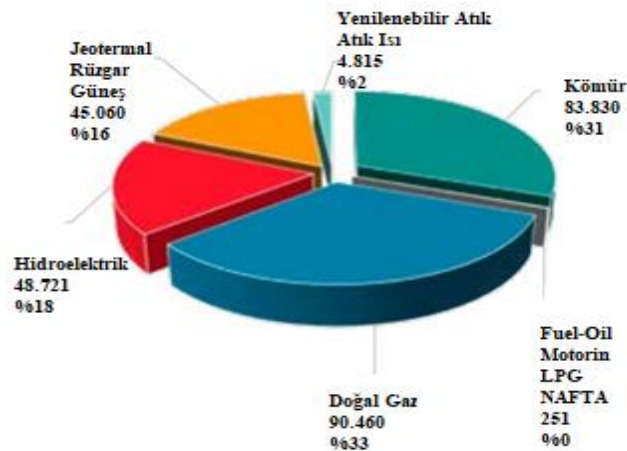
**Keywords:** DC/AC Inverter, Power Converters, Micro Electro-Mechanical Systems, Renewable Energy Sources.

## 1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji; doğal kaynaklardan elde edilen ve sürdürülebilirliği olan enerjiler olarak ifade edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisidir. Dünyada artan nüfus nedeni ile enerjiye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Geleneksel enerji kaynaklarının çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasını zorunlu hale gelmiştir. Fosil yakıtların kullanımını azalttığından çevre dostudur.

Yenilenebilir enerji kaynakları ülkelerin kalkınmasında önemli rol oynamaktadır. Yerli kaynakların gelişimine önemli katkı sağlamaktadır. Bu nedenle dışa bağımlılığı önemli ölçüde azaltmaktadır. Elektrik tesislerinin kurulmasının zor olduğu yerlerde rahatlıkla tercih edilebilmektedir. Ayrıca ülkelerin ekonomisine katkı sağladığı gibi istihdamı da arttırmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2002 tarihli raporunda, küresel enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %13.8 olarak belirtilmiş olup yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım alanının sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak önümüzdeki dönemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi giderek artacağı tahmin edilmektedir. Shell Uluslararası Petrol Şirketi, 2025 yılında, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretimine olan katkısının günümüzde fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin üçte ikisi kadar olacağını belirtmiştir. 1995 yılındaki "Hükümetler arası İklim Değişikliği Panelinde" (Intergovernmental Panel of Climate Change-IPCC), bu oranın önümüzdeki yıllarda beşte iki seviyelerinde olabileceğini tahmin etmektedir.



Şekil 1. 1. 2021 Yılı ilk 10 ayı birincil kaynak bazında elektrik üretimi (GWh).

Ülkemizde yenilenebilir enerji kullanan santrallerin kurulu güçleri her geçen gün artmaktadır. Şekil 1.1’de 2021 yılındaki birincil kaynak bazında elektrik üretimi görülmektedir (TEİAŞ, EPDK). TEİAŞ’ın raporuna göre 2022 yılı ilk dört ayında Türkiye’nin elektrik kurulu gücü 100 bin 341 megavata ulaşırken, yenilenebilir enerji kaynakları 54 bin 338 megavatla bu kapasitenin yüzde 54,15’ini oluşturmaktadır. Rüzgar enerjisinde İzmir, biyokütle İstanbul, jeotermal enerjide Konya ve hidroelektrik enerjisinde Şanlıurfa başı çekmektedir. Toplam kurulu güçlere bakıldığında ise doğalgaz kurulu gücü 25 bin 301 megavat, barajlı hidroelektrik santralleri kurulu gücü 23 bin 317 megavat, rüzgar santralleri kurulu gücü 10 bin 142 megavat, güneş santralleri kurulu gücü 8 bin 04 megavat, jeotermal kurulu gücü 1.686 megavat ve biyokütle kurulu gücü 1.745 megavattır. 2020-2040 dönemi için yapılan Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu çalışmasının sonuçlarına göre elektrik tüketiminin baz senaryoya göre, 2025 yılında 370 TWh, 2040 yılında ise 591 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir. Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli incelendiğinde hidrolik enerji, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve jeotermal enerji kaynaklarının ön planda olduğu yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır (Batmaz ve ark., 2019). Ayrıca ülkemizde dalga, gel-git, biyokütle kaynakları her geçen gün yaygınlaşarak enerji üretiminde artarak yerini alacaktır.

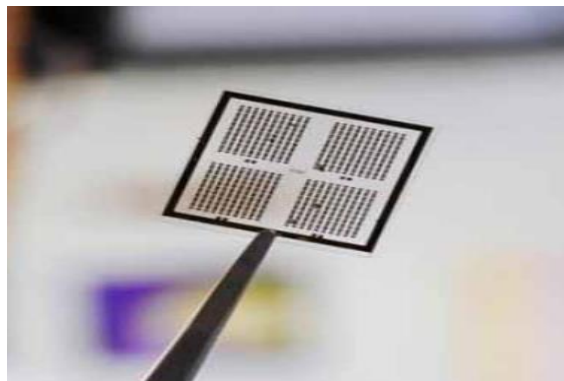
Dünyada güneş enerjisinde en fazla yararlanan ülkelerin başında Japonya, Almanya ve ABD gelirken ülkemiz dünya genelinde 19. sırada yer almaktadır. Rüzgar enerjisinde ise bu sıralama Çin, ABD ve Almanya şeklinde olup ülkemiz bu sıralamada 12. sırada yer almaktadır. Bu sıralamalardan anlaşılacağı üzere ülkemiz yenilenebilir enerji kaynaklarından verimli şekilde enerji üretme potansiyeline sahiptir (Kayıoğlu ve Diken, 2019).

Yenilenebilir enerji teknolojileri kullanılırken maliyet analizini de iyi yapmak gerekmektedir. Tablo 1.1’de yenilenebilir enerji uygulamalarının maliyet analizleri gösterilmektedir (Öztürk, 2013). Maliyet analizi yaparken dikkat edilecek birçok husus vardır. Bunlar; ilk yatırım maliyeti, kullanım maliyeti ve bakım maliyetinden oluşturmaktadır. Uygulama açısından değerlendirilecek olunursa; uygulama kolaylığı, kullanım kolaylığı ve bakım kolaylığı etkili olacaktır.

**Tablo 1. 1.** Yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyet karşılaştırılması.

Maliyet ve Uygulama Ölçütü	Güneş Enerjisi		Rüzgar Enerjisi	Hidrojen	Jeotermal	Hidroelektrik	Biyokütle
	Toplaç	PV					
İlk Yatırım Maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek
Kullanım Maliyeti	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Orta
Bakım Maliyeti	Düşük	Orta	Orta	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Atık Maliyeti	Orta	Yüksek	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Uygulama Kolaylığı	Orta	Orta	Düşük	Yüksek	Orta	Düşük	Yüksek
Kullanma Kolaylığı	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Orta	Düşük	Orta
Bakım Kolaylığı	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek

İlerleyen teknoloji ile yenilenebilir enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanma zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda mikro elektromekanik sistemler (MEMS) büyük mekanik sistemleri; küçük boyutlarda, dayanıklı, düşük maliyetli, düşük enerji ile yüksek verim elde etmemizi sağlayan teknolojik yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Büyük boyutlu sistemleri küçük boyutlu sistemlere çevirme fikri ilk olarak 1959 yılında Richard Feynman tarafından ileri sürülerek küçük boyutlu bilgisayarlardan bahsetmiştir (Özçakır, 2010; Aytaşkın, 2020). Feynman biyolojik sistemleri örnek gösterdiği konuşmasında; malzemeleri kimyasal sentezinin yapılp fiziksel olarak atomik boyutlarda bir araya getirilmek suretiyle küçük makineler üretilbileceğini söylemiştir. Şekil 1.2’de mikron seviyesine dönüştürülmüş elektronik devre gösterilmiştir.



**Şekil 1. 2.** Örnek bir MEMS teknolojisi.

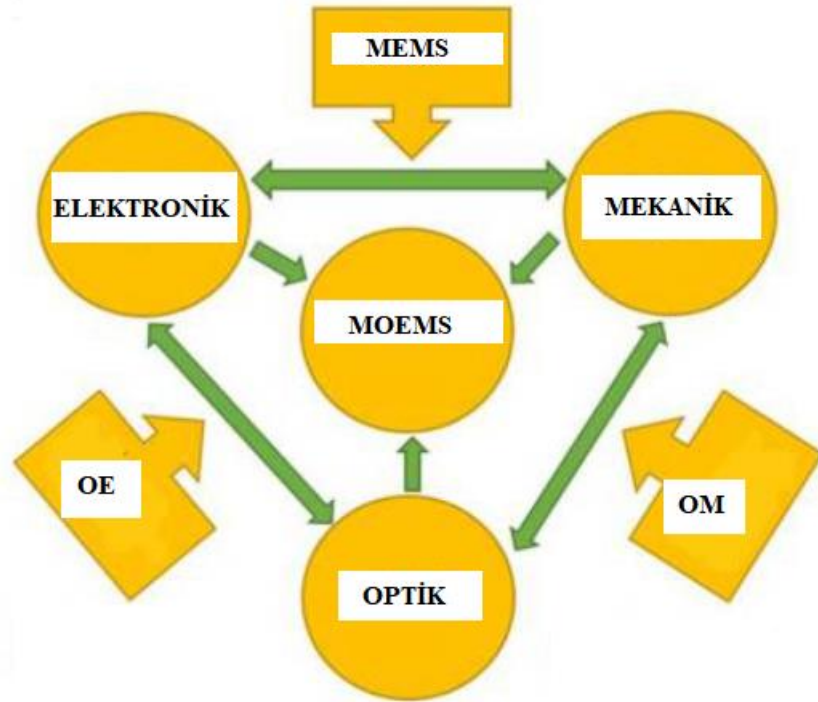
Yapılan çalışmalar neticesinde bütünleşmiş devreler (IC) küçültülmeye çalışılmıştır. 1960'ların sonunda Amerika' da Silisyum (Si) teknolojisi ile MEMS üretim yöntemlerine geçilmiştir (Bogue, 2007). Bu çalışmalar 1970 ve 1980 yıllarında geliştirilerek ticari alanda yerini almaya başlamıştır (Meng, 2003).

Günümüzde MEMS teknolojisi ile üretilen yapılar incelendiğinde;

- Si (Tek Kristal- Poli-Kristal)
- SiO<sub>2</sub> (Silisyum Dioksit)
- Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Silisyum Nitrür)
- Al, Au, Ni, Cu vb. metaller.
- Parilen, Plastik, Parafin vb. Polimerler
- Poli-Kristal Elmas ve Seramikler

Yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Aytaşkın, 2020). Bu malzemeler içinde en çok göze çarpan malzeme ise Si olarak karşımıza çıkmaktadır. Silisyumu öbür malzemelerden önemli kılan etken ise elektriksel ve mekanik olarak mükemmel bir yarı iletken olması, istenilen şekilde işlenebilmesidir.

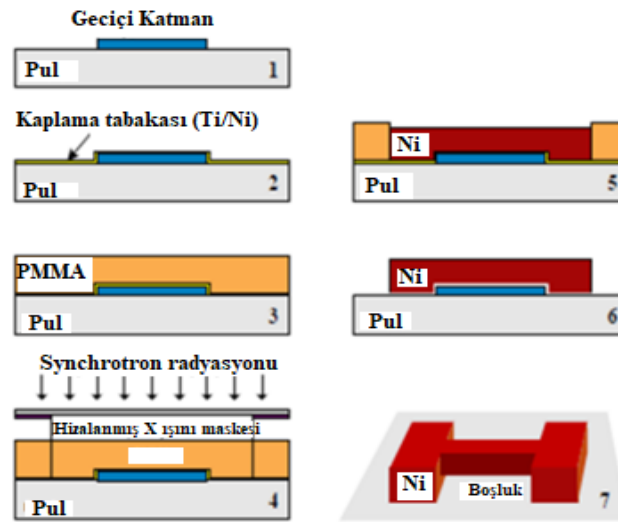
MEMS teknolojisi ortak bir silikon yüzey üzerinde mekanik elemanlar, sensörler, motorlar ve elektrik-elektronik cihazlardan oluştuklarından Şekil 1.3'te Mikrooptoelektromekanik sistemlere (MOEMS) genel bir bakış gösterilmiştir (Upadhyaya, 2021).



Şekil 1. 3. MOEMS genel bir bakış.

MEMS teknolojisi çok küçük boyutlarda olması, sistemlere uyum sağlaması, mikro fabrikasyon yöntemiyle üretilme tekniklerinin kolaylığı, toplu halde büyük dizinler şeklinde üretilebilmesi, geliştirilmiş termal genleşme toleranslarına sahip olması, çok az güç tüketmesi, titreşim, şok ve radyasyon gibi son derece alışılmışın dışındaki ortamlarda dayanıklı olmasından dolayı tercih edilmeye başlanmıştır. MEMS teknolojisi otomotiv, endüstriyel, askeri, biyoteknoloji, ticari ve uzay araştırmaları gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

MEMS çok sayıda mikro üretim tekniklerine sahiptirler. Bu teknikler sayesinde mikro cihazlar istenilen boyutlara dönüştürülebilmektedirler. Bu tekniklerden en önemlileri; yüzey mikro işleme, gövde mikro işleme, geliştirilmiş LIGA işlemi, elektro-erozyonla mikro işleme ve lazerle mikro işleme yöntemleridir. Şekil 1.4'te MEMS teknolojisinde kullanılan gelişmiş LIGA tekniğinin nasıl yapıldığı gösterilmiştir (Yücel ve ark., 2011). Bu teknikte silisyum pulunun üzerine geçici bir katman oluşturulduktan sonra ince bir titanyum katmanı ile kaplanır ardından üzerine PMMA dökülüp fırınladıktan sonra yeni oluşan foto polimer katmanı şekillendirilir. Elektro kaplama tekniği ile açıkta kalan taban üzerine nikel ile kaplanır. PMMA ve kaplama tabanı alınarak geçici katmana erişim kolaylaşır. Bu yöntem ile dişli çarklar, elektrikli motorlar, ivme ve basınçölçer mikro sistemler için üretilebilmektedir.



Şekil 1. 4. Geliştirilmiş LIGA tekniği.

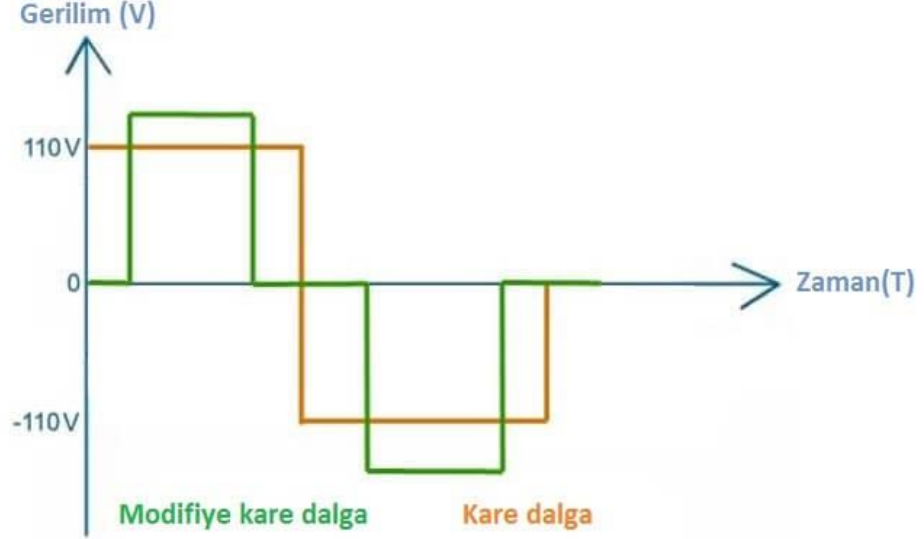
Yenilenebilir enerji kaynaklarını günlük hayatımızda kullanmamızı sağlayan bazı cihazlar vardır. Bu cihazlardan DC/AC invertörler önemli bir yere sahiptir.

İnvertörler; DC gerilimi AC gerilime dönüştürmek için kullanılırlar. İnvertörler ile sıfırdan elektrik üretimi elde edemeyiz. İnvertörün amacı gerilim dönüşümü sağlamaktır. İnvertörler akü grubundan gelen DC gerilimi AC gerilime dönüştürürler. 12V, 24V ve 48V doğru akımı 50 Hz 220V AC gerilime dönüştürürler. İnvertörler aynı zamanda tek bir kaynaktan gelen (Akü, Güneş Paneli vb.) DC gerilimi AC gerilime de dönüştürebilirler. İnvertörler kullanım alanları çok geniştir. İnvertörler en çok kesintisiz güç kaynaklarında, güneş enerji sistemlerinde, anahtarlama güç kaynaklarında, elektrikli araçlarda ve motor hız kontrol devrelerinde kullanılmaktadır. Şekil 1.5'te yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılan DC/AC invertör gösterilmiştir.

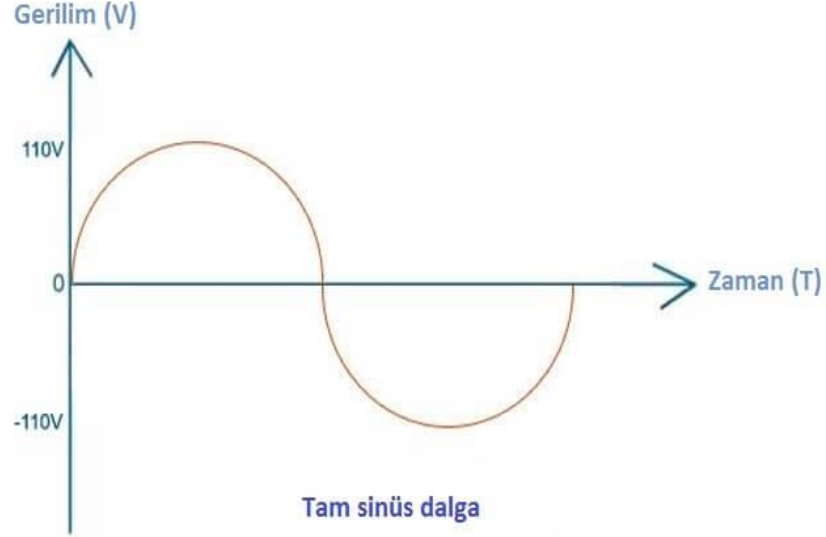


Şekil 1. 5. Yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılan DC/AC invertör.

İnvertörler çıkış dalga boyuna göre sınıflandırılırlar. Kare dalgalı, tam sinüs dalgalı ve Modifiye kare dalgalı olarak sınıflandırılmışlardır. En basit ve ucuz olan kare dalgadır ancak diğer invertörlere göre güç kalitesi düşüktür. İnvertörler içinde en çok tercih edileni tam sinüs invertörlerdir. Çünkü tam sinüs invertörler gelen dalgaları tam sinüs dalga olarak ayarlar ve %95 gibi yüksek verimlilik sağlar. Tam sinüs invertörün tercih edilmesinin başka bir nedeni de elektronik cihazlarda uzun ömürlü olmasıdır. İnvertörleri kullanım amacı sistemdeki kesintileri, dalgalanmaları, düzensizlik ve harmonikleri önleyerek verimli çalışmayı sağlamaktır. Şebekeden gelen gerilimleri filtre devreleri yardımı ile dalgalanmaları önler böylece cihazların tamir, bakım maliyetini azaltarak cihazın ömrünü artırır. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de invertörlerden elde edilen çıkış geriliminin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1. 6. Modifiye kare dalga ve Kare dalga.



Şekil 1. 7. Tam Sinüs Dalga.

### 1.1. Amaç

Bu çalışma ile MEMS invertörün voltaj zaman analizi yapılarak sisteme uyumunun mümkün olup olmayacağı hakkında bilgi edinilmiştir. Tez çalışmamızda güneş enerji sisteminden yararlanılarak DC gerilimi, pürüzsüz sinüzoidal dalga şeklinde AC gerilime dönüştürmek amaçlanmıştır. Tasarlanan MEMS sistemi kapasitif tabanlı olmasından dolayı dönüştürme işleminde güç tüketimine gerek kalmayacaktır. MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapısı ile elektronların hassasiyeti ve kütle algılaması sağlanmıştır. Düşük frekanslı, düşük güç tüketimi, düşük maliyet ve minimum güç kaybı hedeflenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar sayesinde farklı elektronik

uygulamalarda kullanılabileceği öngörülmektedir.

## **1.2. Tez İçeriği**

Tez çalışmasının birinci bölümünde yenilenebilir enerji kaynaklarından, bu kaynakların potansiyelinden, yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan invertörlerden ve MEMS teknolojilerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde yenilenebilir enerji kaynakları, DC/AC invertörler ve MEMS teknolojileri hakkında yapılan literatür çalışmalarından örneklere yer verilmiştir. Üçüncü bölümde yenilenebilir enerji kaynaklarından kullanılan DC/AC invertörlere yeni bir tasarım kazandırmak amacı ile MEMS tabanlı teknoloji DC/AC invertörlere entegre edilmeye çalışılmıştır. Bu tasarımı analiz etmek için birçok matematiksel denklem kullanılmış olup Matlab/Simulink programında analizleri elde edilmiştir. Ayrıca tasarımda fotovoltaik sistemlerden örnek verilerek MEMS teknolojisine entegrasyonu sağlanmıştır. Dördüncü bölümde Matlab/Simulink programında tasarlanan MEMS DC/AC invertörün simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Son bölümde tez kapsamında tasarlanan MEMS tabanlı DC/AC invertörün elde edilen sonuçları değerlendirilmiş olup ileriki çalışmalarda tasarım parametreleri ve modeli değiştirilerek yenilenebilir enerji uygulamalarında daha uyumlu hale getirilebileceğinden bahsedilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

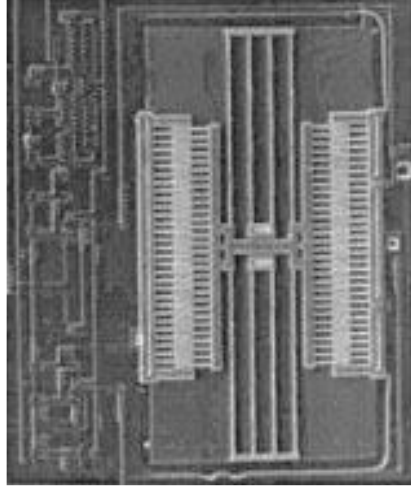
Son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde MEMS teknolojisi, DC/AC invertör ve yenilenebilir enerji kaynakları hakkında farklı yöntemler kullanılarak birçok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Özellikle son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesi ile nano ve mikro teknoloji uygulamaları popüler hal almış olup mikro-elektromekanik sistemlerin (MEMS) uygulamaları önemli bir sektör haline gelmiştir.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde tıbbi uygulamalarda işitme ve görme yardımcılarında yaygın olarak çalışılmıştır. Endüstriyel alanda Şekil 2.1 de gösterilen RF MEMS anahtarları tercih edilmeye başlamıştır. Bu bizlere ticari anlamda düşük maliyetli, küçük boyutlu, mükemmel izolasyonlu, enerji tüketimi düşük, kullanım yerine uyum sağlaması ve uzun ömürlü olmasıyla popüler bir hal almıştır.



Şekil 2. 1. RF MEMS anahtar.

Hoopensteadt (2001), çalışmasında MEMS rezonatörlerinin senkronizasyonu ve mekanik nörobilgisayar hakkında çalışmalarda bulunmuştur. MEMS osilatörlerinin genlik aktivitesinin ve matematiksel modelini türeterek faz kilitleme dinamiklerini açıklamıştır. MEMS osilatörlerinin teorik olarak kullanımını araştırmıştır. Şekil 2.2’de kapasitif tarak yapısına sahip CMOS MEMS rezonatörü göstermiştir.



Şekil 2. 2. Kapasitif tarak transdüksiyonlu CMOS MEMS rezonatör.

Dölen ve Kaplan (2002), MEMS teknolojileri üzerinde genel bir tanım yaparak MEMS tasarımında önemli rol oynayan ölçeklendirmelerin nasıl yapılacağı hakkında bilgi vermişlerdir.

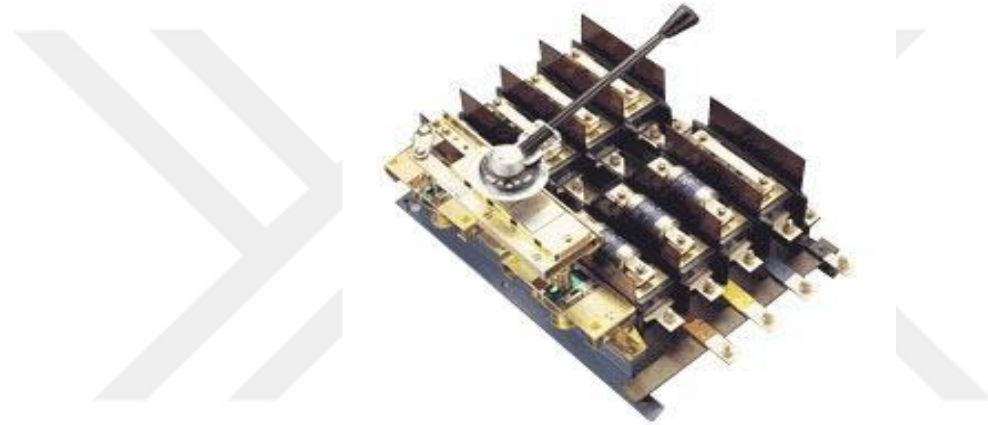
Çetin ve ark. (2004), fotovoltaiik sistemlerde kullanılan bir seri rezonans inverter devresi incelemişlerdir. Anahtarlama kayıplarını ortadan kaldırmakla sistem veriminin artacağından ve maliyetin düşürüleceğinden bahsetmişlerdir. Kayıpları azaltarak yüksek frekanslarda çalışma imkanı sağlamışlardır. Yüksek frekanslarda anahtarlama yapılarak reaktif elemanlarda depolanan enerji ihtiyacı azaltılacak ve küçük boyutta reaktif elemanlara ihtiyaç duyulacağından bahsetmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda sistemin verimliliği açısından aynı işlerde kullanılabilecek küçük boyutlu düşük güçte dönüştürücü ve panellerin kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir. Ayrıca sıfır akımda anahtarlama yapıldığında yüksek frekanslarda parazitlerinde önlenebileceğine değinmişlerdir.

Saucedo-Flores ve ark. (2004), MEMS paralel plakların dinamik davranışlarını modelleyerek analiz etmişlerdir. Paralel kondansatörlerin yer değiştirmelerini Matlab/Simulink programında tasarlamışlardır. Şekil 2.3'te kondansatörün mekanik eş değer devresinden yararlanarak tasarımın dinamik davranışları, sinüzoidal çıkışını yüksek frekanslar için sonuçlarını görmüşlerdir.



yakın performans elde etmiştir.

Panchal ve ark. (2012), verimli elektromekanik DC/AC invertörler hakkında bilgi vermişlerdir. Güç şebekesinde faz başına 120 derece toplamda 3 fazlı bir sinüs dalgası kullanmış olup tasarımında Şekil 2.4'te gösterilen 3 fazlı geçiş anahtarı kullanılmıştır. DC gücün minimum kayıp ile AC gücüne dönüştürmeyi amaçlamışlar. Bu şekilde yenilenebilir enerji kaynakları için konveksiyonel olmayan güç üretimlerinde kullanışlı olacağına değinmişlerdir. Elektronik invertörlerdeki sorunlara kalıcı bir çözüm bulmak amacı ile elektro-mekanik invertörler kullanılabileceğimizden bahsetmişlerdir. Elektro-mekanik invertörler ile yüksek verimli, uzun ömürlü, minimum kayıp ile şebekeye saf AC sinüs dalgası ile güç verileceğini ifade etmişlerdir.



Şekil 2. 4. 3 fazlı geçiş anahtarı.

Erdem ve ark. (2014), 5kW gücünde bir inverter tasarlamışlardır. Yüksek frekans trafolu inverterlarda arızaları ortadan kaldırmak amacı ile mikrodenetleyici ile sinüzoidal PWM metodu kullanmışlardır. Yaptıkları tasarımın alüminyum sargılı olması nedeni ile alternatif bir inverter özelliği amaçlanmıştır. İletim anındaki voltaj ve gerilimi gerçek zamanlı okumaları sayesinde kısa devre ve aşırı akım durumlarına karşı koruma elde edilmiştir.

Sandhu ve ark. (2014), invertörler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kontrol, uygulama ve şebekeye entegrasyonu hakkında çalışmışlardır. Yüksek seviyeli dönüştürücüler, düşük anahtarlama frekanslarıyla yüksek kaliteli çıkış dalga biçimleri üretme yeteneklerinden dolayı son zamanlarda ilgi görmeye başladığını belirtmiştir. Bu çalışmada yüksek seviyeli çeviricilerin kontrol teknikleri ve endüstriyel alanlarda kullanımını kolaylaştıracak uygulamalardan bahsetmiştir.

Asgarlı (2014), kapasitif MEMS ivmeölçer için sigma- delta modülasyon devresi

tasarlamıştır. Değişik algılayıcılara gerek kalmadan voltaj okuma yöntemi karakterizasyon devresi yapmıştır. Sistemin çizgiselliği, bant genişliği ve çalışma aralığını geliştirmiştir. Matlab programı ile simüle edilerek taban gürültüsü bulmuştur.

Kloub ve Hamad (2015), yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılmak üzere mikro ölçekli DC/AC güç çevirici modeli sunmuşlardır. MEMS tabanlı bir sistem kurmayı amaçlamışlar. Önerilen güç invertörünün boyutunu minyatürleştirilip saf ve pürüzsüz sinüs dalgası çıkışı elde etmeye çalışılmıştır. Önerilen MEMS güç çevirici klasik MEMS boyutlarında olup 50 Hz mekanik rezonans frekansına sahiptir. Tek bir güneş pilinden voltaj dönüşümü gerçekleştirmişlerdir. Dönüştürülen DC/AC sinyalinin frekans ve dalga biçiminden %6 verimlilik elde edilmiştir.

Toprak ve ark. (2016), 300 W inverter devresi ve tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar türbininden elde edilen DC gücü AC güce dönüştürmek için tek fazlı köprü tipi bir inverter tasarlamışlardır. Yaptıkları sistem kontrol devresi, MOSFET sürücü kartı ve köprü inverterden oluşmaktadır. Yaptıkları bu çalışma ile düşük güç gerektiren uygulamalarda kullanmak için inverter tasarımı yapmışlardır.

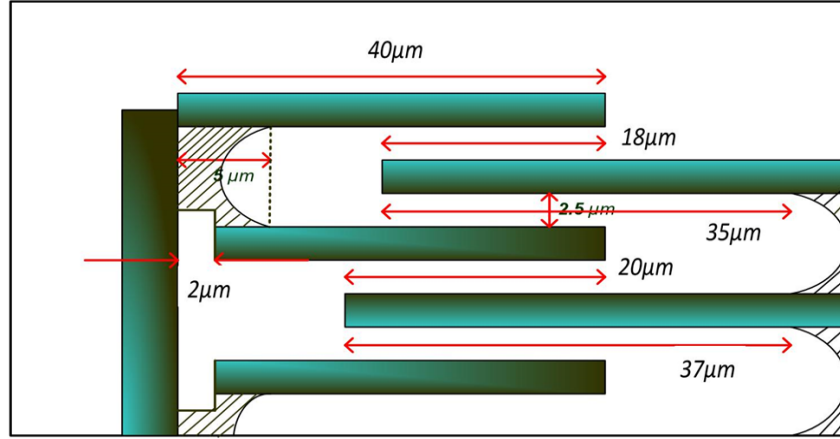
Sangno ve ark. (2018), MEMS tabanlı güç çeviricilerde kapasitif performanslarının nasıl iyileştireceği üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada farklı malzeme ve yapılarda MEMS tabanlı DC/AC kapasitif güç çeviricilerini test etmişlerdir. Performans testi için birbirine bağlı tarak tahrikli kapasitif DC/AC güç dönüştürücüsünün tarak sayısı, parmak kalınlığı ve aradaki boşluk parametrelerini değiştirmişlerdir. Önerilen malzeme olarak polisilikon ve indiyum antimonit kullanmışlardır. COMSOL Metaphysics 5.0 ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Azad ve ark. (2018), indüktör ve kapasitörlerin yerine güç dönüştürücü olarak kullanılabilecek yeni yapılardan bahsetmişlerdir. MEMS rezonatörlerinin bu güç dönüşümü için etkin kullanılabileceğinden belirtmişlerdir. MEMS rezonatörlerin en büyük avantajı olan indüktör benzeri özelliklere sahip manyetik olmayan enerji depolaması olduğundandır. MEMS rezonatörleri, anahtarlama frekansı değiştirilerek indüktör yada kapasitör olarak kullanılabilirler böylece güçlü manyetik veya elektrik alanlarından etkilenmeyeceğini belirtmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar neticesinde ileride biyomedikal uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Kenar (2019), güneş panellerinde üretilen enerjinin etkin kullanılması için DC/DC ve DC/AC dönüştürücülerden yararlandığından bahsetmiştir. Yaptığı tasarım ile bulanık mantık ve PI kontrol tekniklerinden faydalanmıştır.

Sangno ve ark. (2019), yenilenebilir enerji uygulamaları için MEMS tabanlı

düşük güçte çalışan kapasitif invertör tasarımı sunmuşlardır. Farklı iki MEMS yapısının sıfır harmonik değerlerinde güç kayıpları ihmal edilerek elektriksel ve mekaniksel performanslarını incelemişlerdir. Şekil 2.5'te iç içe geçmiş kapasitör tasarımının kesitinde, üst üste binme uzunluğunun maksimum yer değiştirmesinde daha az kararsızlık elde edilmiştir. Bu sayede yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılan DC/AC güç çeviricisinin performans analizi yapılmıştır.



Şekil 2. 5. Önerilen iç içe geçmiş kapasitör tasarımının küçük bir kesiti

Guo ve ark. (2019), güç elektroniğindeki önemli ilerlemeler sayesinde yüksek çalışma sıcaklığında MEMS ve güç dönüştürücülerde kullanılan Silisyum Karbür (SiC) bahsetmiştir. SiC güç elektroniği ve MEMS sistemlerinde yüksek sıcaklıklarda bile düşük kayıplara sahip olmasından dolayı çok cazip bir malzeme olduğundan bahsetmişlerdir.

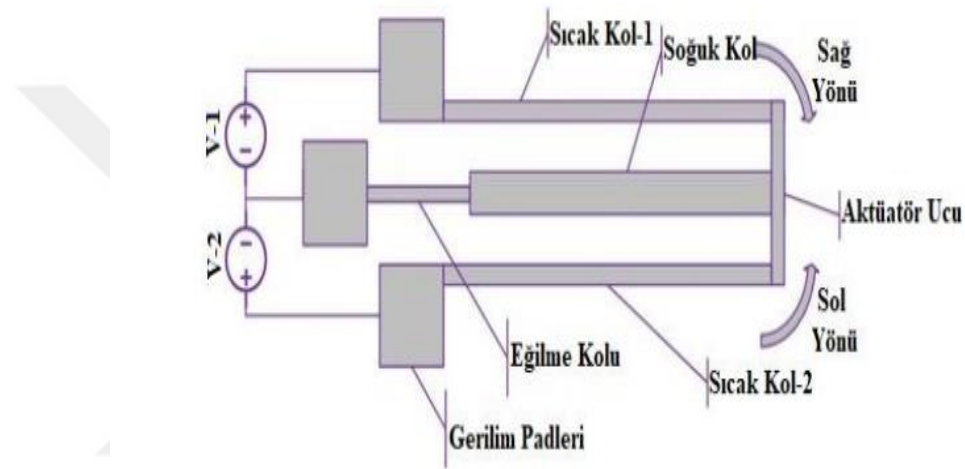
Ertuğrul ve ark. (2020), yıllardır sensör tasarımlarında büyük öneme sahip olan MEMS rezonatörlerin analizini yapmışlardır. 100V DC gerilimde modelledikleri mikro rezonatörün analizini gerçekleştirmişlerdir. COMSOL yazılımı kullanarak dikdörtgen bir giriş olarak rezonatör tasarlamışlardır. Bu rezonatöre çeşitli metalik malzemeler atayarak analizlerde bulunmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar neticesinde alüminyumun diğer metalik malzemelerden daha çok deformasyona uğradığını görmüşlerdir.

Ülker (2020), MEMS tabanlı mikro-akışkan çipin zamana bağlı analizini test etmiştir. Yaptığı çalışmada mikro akışkan çipi 3B tasarım programı kullanarak belirli zaman aralıklarında basınç analizi yapmıştır. Analiz sonucunda mikro-akışkan çipin maksimum dayanabileceği basıncı bulmuştur.

Aytaşkın (2020), MEMS tabanlı kapasitif rezonatör tasarımı ve üretiminden bahsederek kapasitif rezonatörün işlevsellik testlerini yapmıştır. Kapasitif rezonatör ile

literatürdeki benzer çalışmalar kıyaslanarak kütle algılama MEMS tabanlı teknolojinin kullanılabilirliğinden bahsetmiştir.

Ülker ve ark. (2020), Şekil 2.6'da gösterilen MEMS tabanlı elektrotermal mikro-aktüatör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. COMSOL yazılımı ile gerçekleştirdikleri tasarımda Elektrotermal aktüatörlerin elektrostatik aktüatörlere kıyasla daha çok yer değiştirdiklerinden bahsetmişlerdir. İki yönlü hareket edebilen mikro-aktüatörlere polycrystalline silikon malzeme ile deney sonuçları elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile gerilimi 1V'luk artışlar ile 5V'a kadar gerilim uygulamışlardır. Elektrotermal mikro-aktüatör tasarımındaki maksimum yer değiştirmeyi tespit etmişlerdir.



Şekil 2. 6. Elektrotermal mikro-aktüatörün çalışma prensibi.

Erez (2020), endüstriyel alandaki MEMS tabanlı sensörlerin tasarımında kullanılan en iyi yöntemin tespitini yapmayı hedeflemiştir. Yaptığı çalışmada MEMS tabanlı sensörlerde kullandığı seçimleri nano ölçekteki değerlere de uygun olup olmadığını araştırmıştır. Araştırmaları doğrultusunda endüstri 4.0 kavramının mikro ve nano teknolojileri için katkı sağlayacağını tespit etmiştir.

Kaya (2021), MEMS tarak parmak kapasitif rezonatör yapıları ve kütle uygulamalarından bahsetmiştir. Bu çalışmasında tasarlamış olduğu rezonatör yapısı ile literatürde bulunan kütle algılama uygulamalarındaki parmak kapasitif rezonatör yapılarının rezonans frekanslarını karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlarla kütle algılama uygulamalarında MEMS tarak parmak kapasitif rezonatörün kullanılabilirliğini belirtmiştir.

Elnozahy ve ark. (2021), üç fazlı DC/AC eviricilerdeki tip kontrol cihazların hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanmak üzere karşılaştırmışlardır. Bunu iki

yeni model ile geliştirerek analiz etmişlerdir. Yeni modelleri kayan mod ve yapay sinir ağları tekniklerine dayandırmaktadırlar. Geliştirmiş oldukları invertörler hem voltaj kontrolü hem de akım düzenlemesinde kullanılmaktadır. Yapılan tasarımlar Matlab / Simulink'te giriş gücü, çıkış gücü, akım ve voltaj açısından sonuçları değerlendirilmiştir.

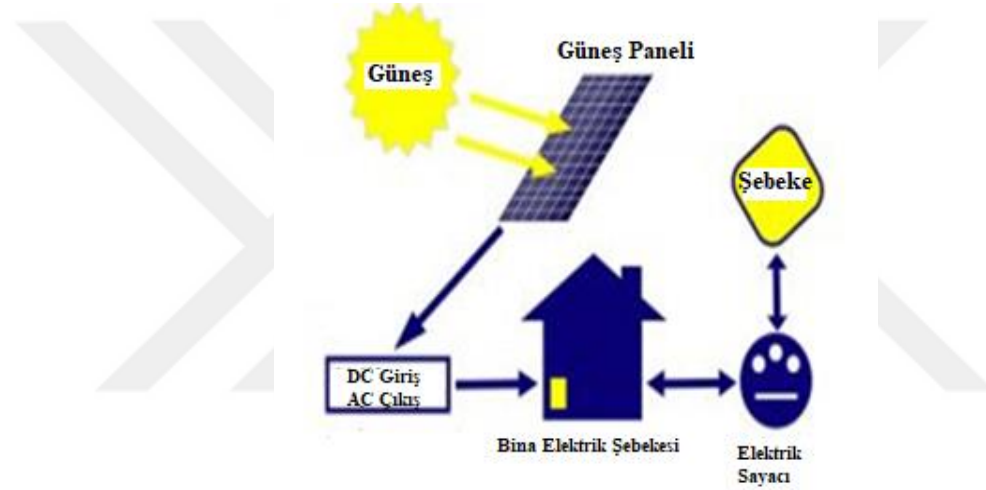
İnel (2021), MEMS sensörlü top mermileri için darbe dayanımlı navigasyonu sistemlerini modellemeye çalışmıştır. 3 boyutlu modellemesinde Matlab / Simulink, FlightGear ve Ansys Fluent yazılımları kullanmıştır. Top mermisine en yakın açık kaynak olan Raytheon firmasının durum uzay modeli simülasyon edilmiştir. Elektronik devre elemanlarının ateşleme koşulları göz önüne alınarak Hopkinson Bar test elemanları kullanarak mikro denetleyicilerin ve sensörlerin işlevsellikleri test edilmiştir.



### 3. MATERYAL VE METOT

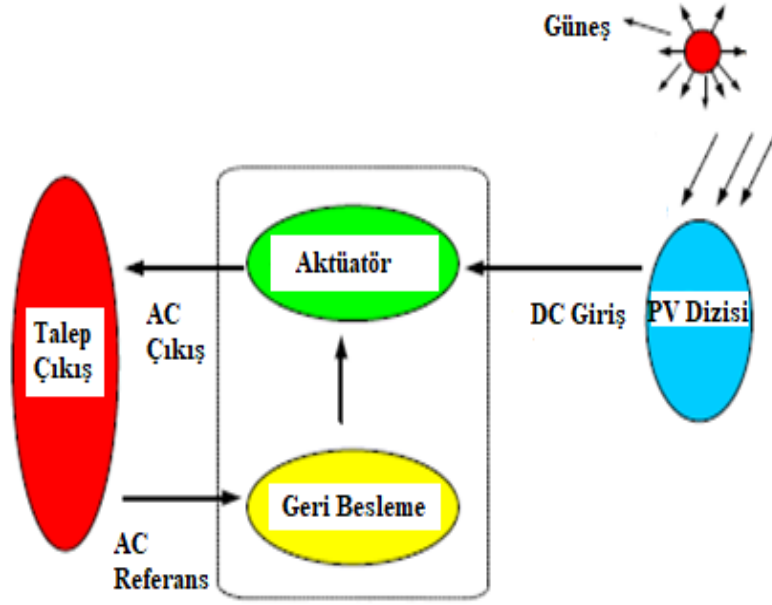
Bu tez çalışmasının amacı yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılabilecek MEMS tabanlı DC/AC güç çevirici konsepti oluşturmaktır. MEMS tabanlı DC/AC güç çeviricinin tasarımı, modellenmesi ve Matlab / Simulink programından simülasyon sonuçları değerlendirilecektir.

Fotovoltaik Güneş Enerji Sistemlerinde (PV) kullanılan DC / AC invertör ile analiz yapılacaktır. Klasik fotovoltaik sisteme MEMS teknolojisi uygulanarak verimli bir şekilde çalışması sağlanacaktır.



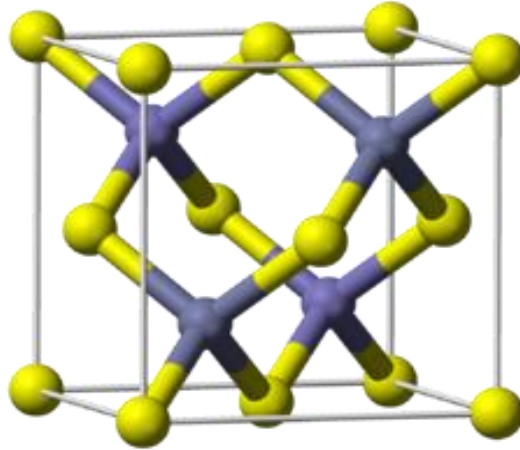
Şekil 3. 1. Örnek bir fotovoltaik sistem.

Fotovoltaik sistemlerin en çok bilinen çeşitleri şebekeden ayrı off grid ve şebekeye bağlı on grid fotovoltaik sistemlerdir. Şekil 3.1’de gösterilen şebekeye bağlı fotovoltaik sistemde güneş panellerinin ürettiği elektrik şebekeye bağlı invertörde düzenlenir ve elektrik şebekesine aktarılacak şekilde dönüşüm gerçekleştirilir. Bu sistemlerde akü kullanılmaz ise şebekede meydana gelebilecek bir elektrik kesintisinde fotovoltaik sistem devre dışı kalabilmektedir. Bu sebepten şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde batarya desteği gerekmektedir. Şebekeden ayrı fotovoltaik sistemlerde güneş panellerinin ürettiği elektrik şarj kontrol cihazı ile düzenlenerek akülerde depolanır ve aküler içerisinde DC olarak depolanan elektriği invertörler yardımı ile AC elektriğe dönüştürerek kullanılmaktadır. Her iki sistemden de anlaşılacağı üzere güneş panellerinin ürettiği doğru akım DC/AC invertörler yardımı ile alternatif akıma dönüştürülmelidir.



Şekil 3. 2. MEMS ünitesi yerleştirilmiş PV sistemi.

Şekil 3.2’de gösterilen devrede güneş fotovoltaik uygulamaları için kapasitif MEMS DC/AC güç invertörünün çalışma diyagramı gösterilmiştir. Mikro sistemlerde yapısal kullanımda en iyi sonuçlar veren malzemeler SU-8 ve Şekil 3.3’te yapısı gösterilen indiyum-antimonittir. Bu yapılar büyük deplasmanlı, düşük çalıştırma voltajlı, hafif, esnek, ısıya ve kimyasallara dayanaklı olmasından dolayı MEMS invertör için uygun malzemelerdir (Sangno ve ark., 2018). İndiyum-antimonit dar aralıklı enerji bandına sahip yarı iletkenlerdir. Ayrıca indiyum-antimonit fotodiyot dedektörleri fotovoltaik özelliğe sahip olup kızıl ötesi radyasyona maruz kaldığında elektrik akımı üretebilmektedir.



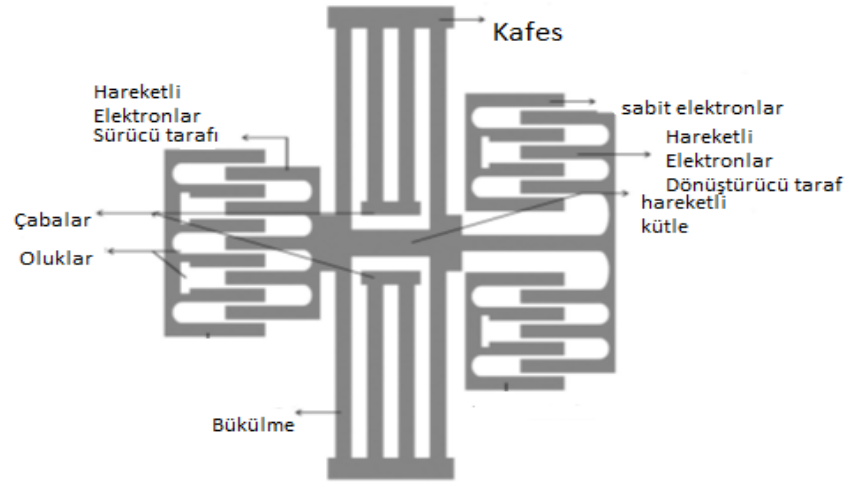
Şekil 3. 3. İndiyum- antimonit

### 3.1. Güç Çeviricinin Tasarımı

MEMS DC/AC güç çeviricisi yapısal olarak mekanik rezonatör ve değişken kapasitörlerden oluşan bir yapıya sahiptir.

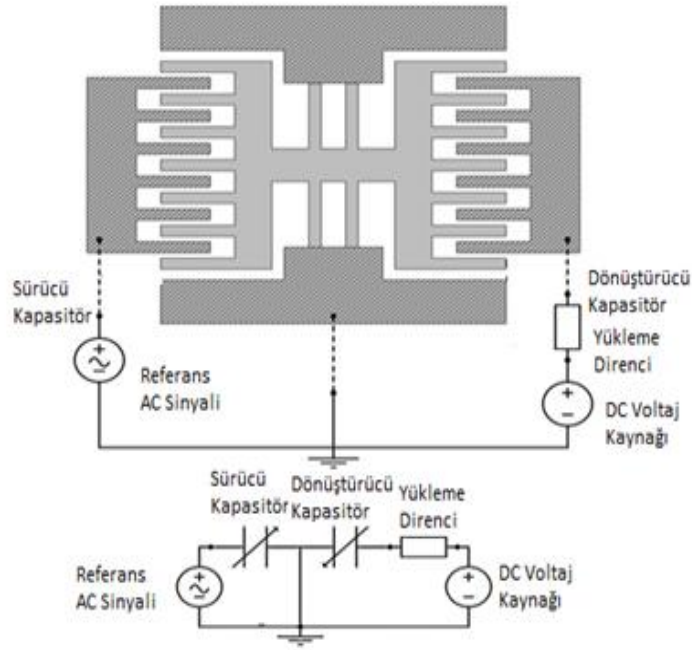
Mekanik rezonatör, kirişlere asılı sismik kütleden oluşmuştur. Uzun yıllardan beri sensör tasarımında kullanılmaktadır. MEMS rezonatörleri, kullanılan sisteme uyum sağlamasının yanı sıra kütle, kuvvet ve elektronik dönüşümlerin algılanmasında etkin rol oynamaktadır. (Zhao ve ark., 2016).

Değişken kapasitör, sismik kütlede yan yana elektrotlar ile iç içe geçmiş hareketli parçayı oluşturmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere sismik kütle mekanik titreşime duyarlı olacağından mekanik bir sapmaya neden olacaktır. (Kloub ve Hamad, 2017)



Şekil 3. 4. MEMS Güç Çeviricinin Sistem Tasarımının Şematik Gösterimi.

Şekil 3.4'te belirtilen tasarımda ankrajlara sabitlenmiş elektronlar, hareketli taraflardaki elektronlar ve kirişler tarafından askıda duran kütlede oluşmuştur (Sangno ve ark., 2018). Burada hareketli kısımlarda kapasitif bir etki oluşturduğundan sapmalar meydana gelmektedir. Bu da bir tarafta oluşan kapasitans artığında diğer tarafta oluşan kapasitans da artacaktır. Burada oluşan iki kapasitörden biri sürücü kapasitör görevi görürken diğeri dönüştürücü görevi görmektedir. Tarak yapısı incelendiğinde hareketli kısımdaki parmaklardan biri uzunken diğeri kısa olacak şekilde tasarlanmalıdır. Çünkü maruz kaldığı sapmaları azaltıp daha fazla kapasitans oluşumu elde etmemizi sağlar.



**Şekil 3. 5.** MEMS güç çeviricinin sistem uygulaması ve eşdeğer elektrik devresi

Kloub ve Hamad (2017), yaptıkları çalışmada MEMS teknolojisinde kapasitansın etkilerini gözlemlemek için Şekil 3.5'te ki devre tasarımını yapmışlardır. MEMS güç çevirici güneş pilinden gelen DC sinyali AC sinyale dönüştürmeye çalışmıştır. Toprak, sürücü ve dönüştürücü temel alınarak yapılmıştır. Güneş pili tarafından gelen DC sinyali MEMS güç çeviricisine toprak ve dönüştürücü devre elemanları ile bağlanır. Toprak burada sürücü ve dönüştürücü arasında izolasyonu sağlar. Referans AC sinyali sürücü kondansatörüne paralel bağlanarak alternatif bir elektrostatik kuvvet elde edilmiş olur. Elektriksel olarak DC ön gerilimli dönüştürücü kondansatöründeki kapasitans değişimi AC elektrik akımını indükleyerek dönüştürülmüş DC/AC akımı oluşturur. Sürücü ve dönüştürücü kondansatörler arasındaki elektriksel izolasyonu sağlayan toprak sayesinde AC akımın tersten akmasını engeller buda güç tüketimini teorik olarak sıfır kabul etmemizi sağlar.

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılabilen MEMS tabanlı DC/AC invertör tasarımı gerçekleştirmek amacı ile fotovoltaiik sistem kurularak MEMS tasarımı elde edilecektir. Burada tarak yapısının etkisi, kapasitansın etkisi simüle edilerek verimin ne kadar olacağı araştırılacaktır.

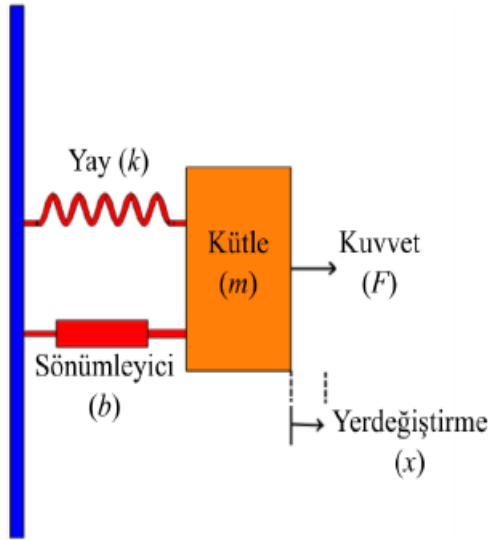
Ülkemizde şehir şebekesinde kullanılan AC gerilim 50 Hz ve 220V olduğundan bu çalışmamızda frekans 50 Hz sabit alınmıştır. Ayrıca klasik MEMS yerleşim alanı tercih edilmiştir.

**Tablo 3. 1.** Tasarım parametreleri

Aktif yerleşim alanı ( $mm^3$ )	$35 \times 35 \times 0.455$
Maksimum Mekanik sapma ( $\mu m$ )	10
Sürücü ilk kapasitansı (fF)	97
Referans AC voltajı (Vtepe)	120
Yük direnci ( $M\Omega$ )	100

### 3.2. Matematiksel Model

İnvertör tasarımının temel modellenmesi mekanik rezonatörlerde oluşan elektriksel ve mekaniksel elektrostatik alana dayanmaktadır. MEMS invertör mekanik rezonatör, değişken kapasitör ve elektriksel devreden oluşmaktadır. Mekaniksel rezonatör; sismik kütle, mekanik yay, viskozite sönümlenme ve mekanik durdurucudan oluşmaktadır. (MEMS teknolojilerinde kullanılan kütle-yay- damper prensibine dayanmaktadır.)



**Şekil 3. 6.** Kütle-yay-sönümleyici sistemi.

Mekaniksel büyüklükler elektriksel büyüklüklere dönüştürülerek matematiksel hesaplamalar yapılmaktadır. Şekil 3.6'da gösterilen Kütle-yay-sönümleyici sistemde genellikle dışardan harici bir kuvvet uygulanır (Kaya, 2021). Böylece sistem rezonans

durumuna geçer.

**Tablo 3. 2.** Mekaniksel büyüklüklerin elektriksel büyüklükteki karşılıkları

Mekaniksel	Elektriksel
Kütle (m)	İndüktans (L)
Sönümleme (b)	Direnç (R)
Katsayı (k)	1/c
Kuvvet (f)	Voltaj (v)
X (yer değiştirme)	Q (yük)
X' (hız)	i (akım)

$$m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m + k_m x_m = \vec{F}_{ex} + \vec{F}_{ms} + \vec{F}_{es} \quad (1)$$

Burada;

$m_m$ ; cihazın toplam kütle miktarı.

$k_m$ ; mekanik yayın (asma kirişleri) rijitlik sabiti.

$b_m$ ; viskozite sönüm katsayısı

$k_s$ ; mekanik durdurucunun rijitlik sabiti.

$\ddot{x}$ ; sismik kütleinin ivmesi.

$\dot{x}$ ; sismik kütleinin hızı.

$x$ ; sismik kütleinin sapması

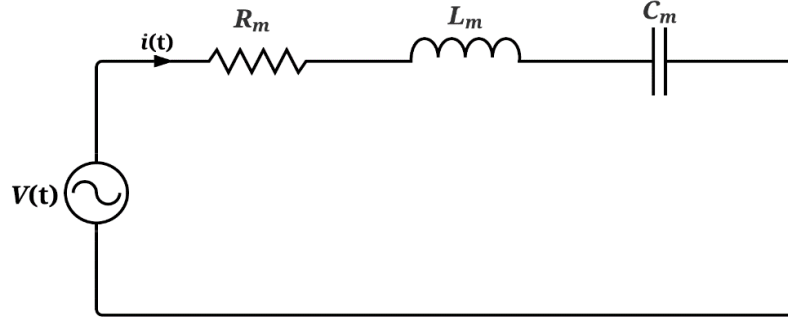
$\vec{F}_{ex}$ : ortamdan kaynaklanan mekanik titreşimin neden olduğu harici mekanik uyarmadır.

$\vec{F}_{ms}$ : mekanik durdurucu kuvvet vektörüdür.

$\vec{F}_{es}$ : toplam elektrostatik kuvvet.

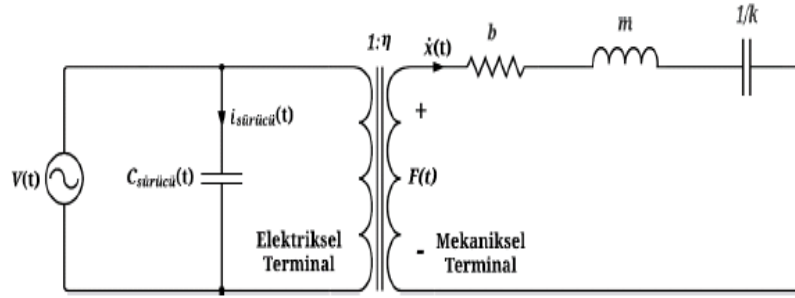
$\vec{F}_{ex}$ ; dış ortam titreşimleri ihmal edildiğinden sıfır olarak kabul edilmektedir.

Kütle-yay-sönümleyici sistemler ile tasarlanan MEMS kapasitif rezonatörler elektriksel karşılıkları belirlenerek seri RLC devresini oluşturur (Tilmans, 1996). Seri RLC devresi ile aralarındaki bağlantıyı kurmak için devreye ait akım gerilim ilişkisi değerlendirilir. Seri RLC devresinde akım yükün zamana göre değişimine eşittir.



Şekil 3. 7. Seri RLC devresinin örnek gösterimi.

Tablo 3.2’de belirtilen mekanik değerlerin elektriksel karşılıkları yazıldığında Şekil 3.7’de ki seri RLC devresi Şekil 3.8’de ki MEMS rezonatör yapısına dönüştürülmüş olacaktır.



Şekil 3. 8. MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel gösterimi.

$\vec{F}_{ms}$ : mekanik durdurucunun ( $x_s$ ) mekanik durdurucu sertlik katsayısı ( $k$ ) ile çarpılması ile elde edilen kuvvettir.

Hareketli kütlenin sapmasını engellemek için kullanılan mekaniksel bir kuvvet olarak tanımlayabiliriz.

$$F_{ms} = k_s x_s \quad (2)$$

Mekanik durdurucunun limit fonksiyonu

$$F_s = 0, \quad -x_s \leq x \leq x_s$$

$$F_s = k_s(x + x_s), \quad x < -x_s$$

$$F_s = k_s(x - x_s), \quad x > x_s$$

MEMS teknolojisi sayesinde giriş terminalinde elektrostatik kuvvet oluşmaktadır. Elektrostatik kuvvet uygulanan gerilimin karesiyle orantılıdır. Elektrostatik kuvvet üst üste binen uzunlukta yer değiştirmeye neden olacağından

burada bir kapasitans değişimi gözlemlenir. Kapasitans, voltaj ile ters orantılıdır. Bu nedenle tasarlanan MEMS sistemi düşük güç uygulamalarında uyumlu bir tasarımdır. Düşük maliyetli düşük güç uygulamalarına uygundur.

$\vec{F}_{es}$ ; rezonatör sapmasının (dC/dx) kapasitör gerilimine (Vc) göre türevi cinsinden hesaplanır.

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{dc}{2 dx} \cdot v_c^2 \quad (3)$$

Burada yük ya da potansiyel farkın değişmesi ile sığa değişmeyeceğinden sığanın değişmesi için Lo, g, E değişmesine bağlı olacaktır.

$$C = \frac{2E_0 E_r N_e (L_0 + \ddot{x}) + t_e}{g} = C_0 \left( 1 + \frac{\ddot{x}}{L_0} \right) \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{2E_0 E_r N_e L_0 t_e}{g}$$

$E_0$ , vakumun geğirgenliği ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m),

$E_r$  orta dielektrik sabitidir (vakum için 1),

$N_e$  hareketli kapasitörün elektrotlarının sayısıdır,

$L_0$  elektrotun ilk örtüşen uzunluğudur,

$t_e$  elektrotun kalınlığıdır,

g hareketli ve sabit elektrotlar arasındaki boşluktur.

Kondansatörler DC gerilimde dolup boşalma yöntemi ile çalışmaktadır. Tam dolduğunda açık devre gibi çalışacaktır bundan dolayı akım sıfır olacaktır. AC gerilim uygulandığında ise direnç gibi davranarak frekans ve kondansatörün sığasına bağlı olarak değişecektir.(Frekans artıka direnç azalacaktır.)

$$\frac{dC}{dx} = \frac{c_0}{L_0}; \ddot{x} = x \quad (5)$$

$$\frac{dC}{dx} = \frac{c_0}{L_0}; \ddot{x} = -x$$

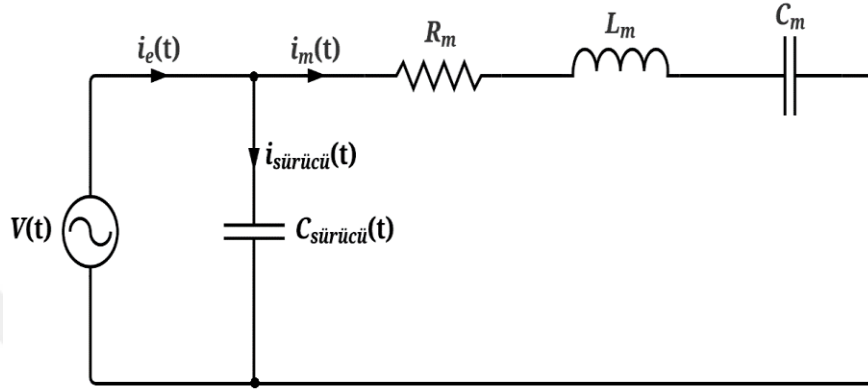
Toplam elektrostatik kuvvet sürücü ve dönüştürücü arasındaki fark ile elde edilmektedir.

$$F_{es-toplam} = \frac{1}{2} \left( \frac{dc_{sürücü}}{dx} V_{sürücü}^2 \mp \frac{dc_{dönüştürücü}}{dx} V_{dönüştürücü}^2 \right) \quad (6)$$

Kirşof gerilimler kanununa göre herhangi bir döngüdeki potansiyel farkların cebirsel toplamının sıfıra eşit olması gerektiğini belirtmiştir. Kapalı bir devreyi sabit bir noktadan dolaşıp tekrar aynı noktaya geldiğimizde tüm voltaj değerlerinin cebirsel

toplamı her zaman sıfır olmalıdır. Seri devrelerde voltaj bölücü olarak da adlandırılabilir.

Kirşof gerilimler kanununa göre herhangi bir döngüdeki potansiyel farkların cebirsel toplamının sıfıra eşit olması gerektiğini belirtmiştir. Kapalı bir devreyi sabit bir noktadan dolaşıp tekrar aynı noktaya geldiğimizde tüm voltaj değerlerinin cebirsel toplamı her zaman sıfır olmalıdır. Seri devrelerde voltaj bölücü olarak da adlandırılabilir.



Şekil 3. 9. MEMS rezonatör yapısının mekaniksel ve elektriksel eşdeğer devresi.

Kapalı devrede Kirşof Kanunu uygulandığında devre üzerinde düşen gerilimlerin toplamı gerilim kaynağının gerilimine eşit olacaktır.

$$v_{dönüştürücü} = v_{DC} - i(t)R \quad (7)$$

Dönüştürücü voltajı  $V_{dönüştürücü}$ , devrede indüklenen elektrik akımı  $i(t)$  ile orantılıdır. Ayrıca,  $V_{dönüştürücü}$  gerilimi,  $Q_{dönüştürücü}$  kapasitöründe depolanan elektrik yükü ve  $C_{dönüştürücü}$  kapasitansı cinsinden hesaplanabilir.

$$V_{dönüştürücü} = \frac{Q_{dönüştürücü}}{C_{dönüştürücü}} \quad (8)$$

### 3.3. Matlab/Simulink Tasarımı

GES invertör güneş panelinden elde edilen elektriğin kullanılabilir hale gelmesini sağlar. Güneş panelleri fotovoltaik pillere gelen ışıklardan doğru akım elde ederler. Gelen ışıklar panele vurduğunda bir voltaj oluşur ve bu voltaj doğru akım şeklinde ortaya çıkar. İnvörtör 0.5 Hz ile 2000 Hz arasında hız ayarlaması yapmaktadır. Ülkemizde şehir şebekesi 50 Hz ve 220 V AC gerilim olduğundan bu çalışmamızda frekansı 50 Hz de sabit tutulmuştur. Panellere gelen DC gerilim AC ye çevrilmektedir.

Şekil 3.10'da ki tasarım incelendiğinde normal fotovoltaik sistemlerde kullanılan DC/AC invertörü temsil etmektedir. Kayıpların az olması ve verimin yüksek olması için klasik invertör tasarımında MEMS teknolojisi uygulanarak Şekil 3.11'de ki tasarım elde edilmiştir.

Şekil 3.11'de ki tasarım 4 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalardan ilki mekanik rezonatör kısmı olup normal MEMS sistemlerinde kullanılan kütle-damper-yay modelini temsil etmektedir. MEMS rezonatörün mekanik olarak çalıştırılması yalnızca sistemin elektrostatik kuvvetinin değişmesine bağlı olarak değişir.

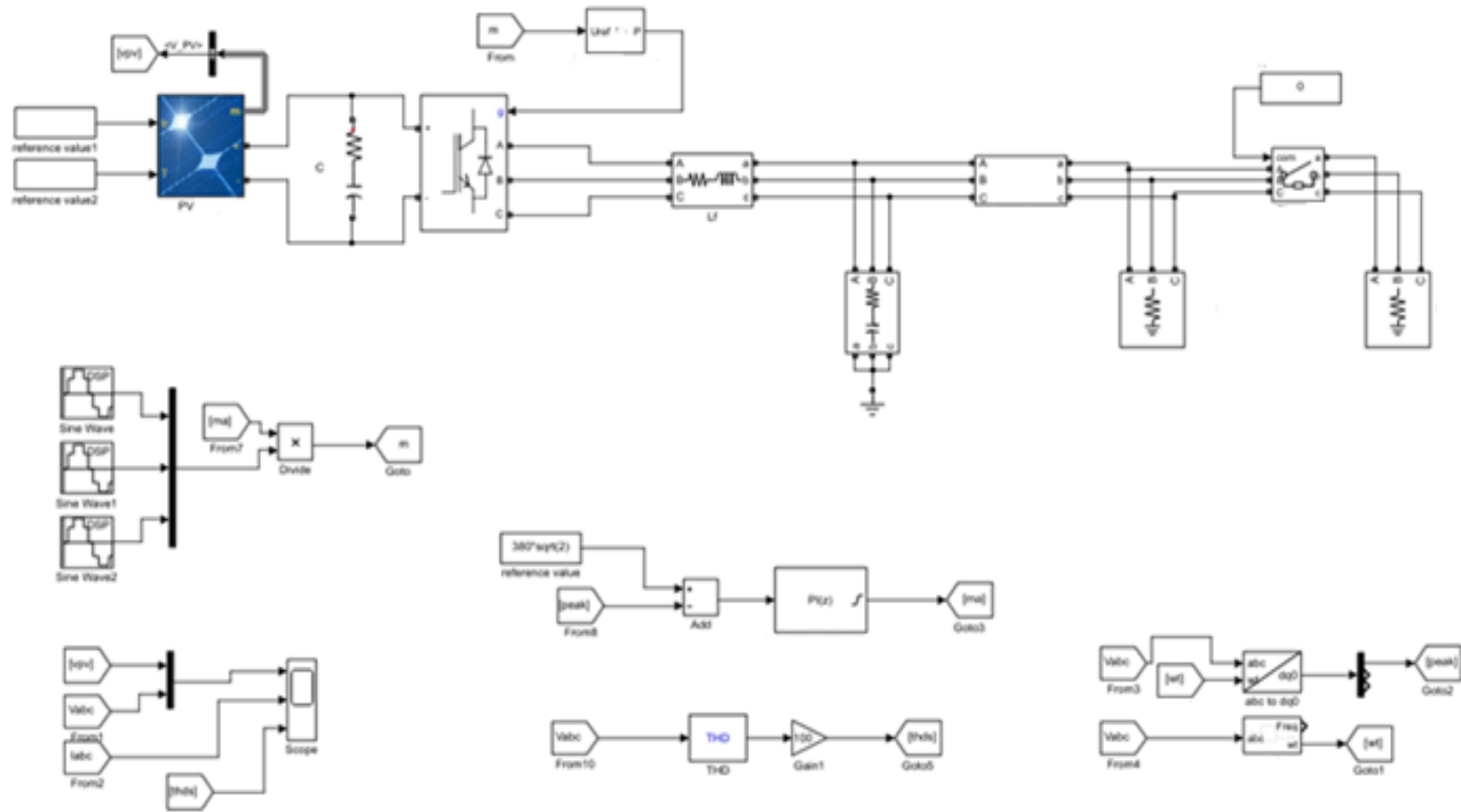
Rezonatörün ivmesine göre hız ve sapma değerleri inceleniler. Burada limit sapma fonksiyonu ile rezonatörün saptmaya uğrayıp uğramadığı tespit edilir.

İkinci kısım MEMS rezonatör çalışmaya başladığında sistemde elektrostatik bir kuvvet oluşmaktadır. MEMS rezonatörün yer değiştirmesi giriş terminalindeki sürücü ve dönüştürücü kapasitörlerin anlık değerlerini çıkarmak için kullanılmıştır.

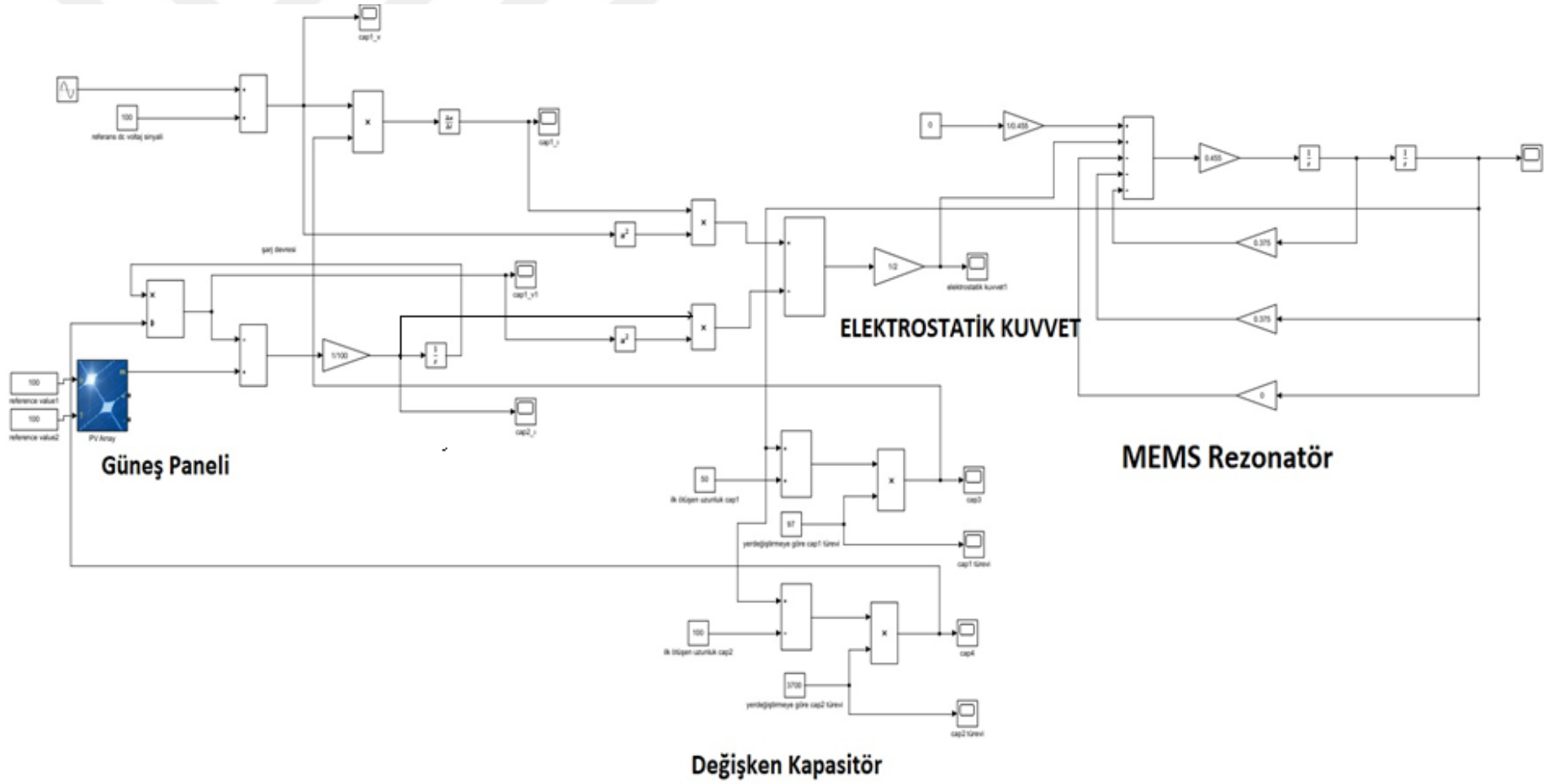
Üçüncü kısımda Elektrik devresindeki DC/AC invertör ile sürücü ve dönüştürücünün anlık kapasitans değerlerine göre her devre elemanın sürücü kapasitörü ve dönüştürücü kapasitörü hesaplamak için kullanılmıştır.

Dördüncü kısımda Devrenin geri beslemesi ve giriş terminali olan elektrostatik kuvvet hesaplanarak devre tamamlanmıştır.

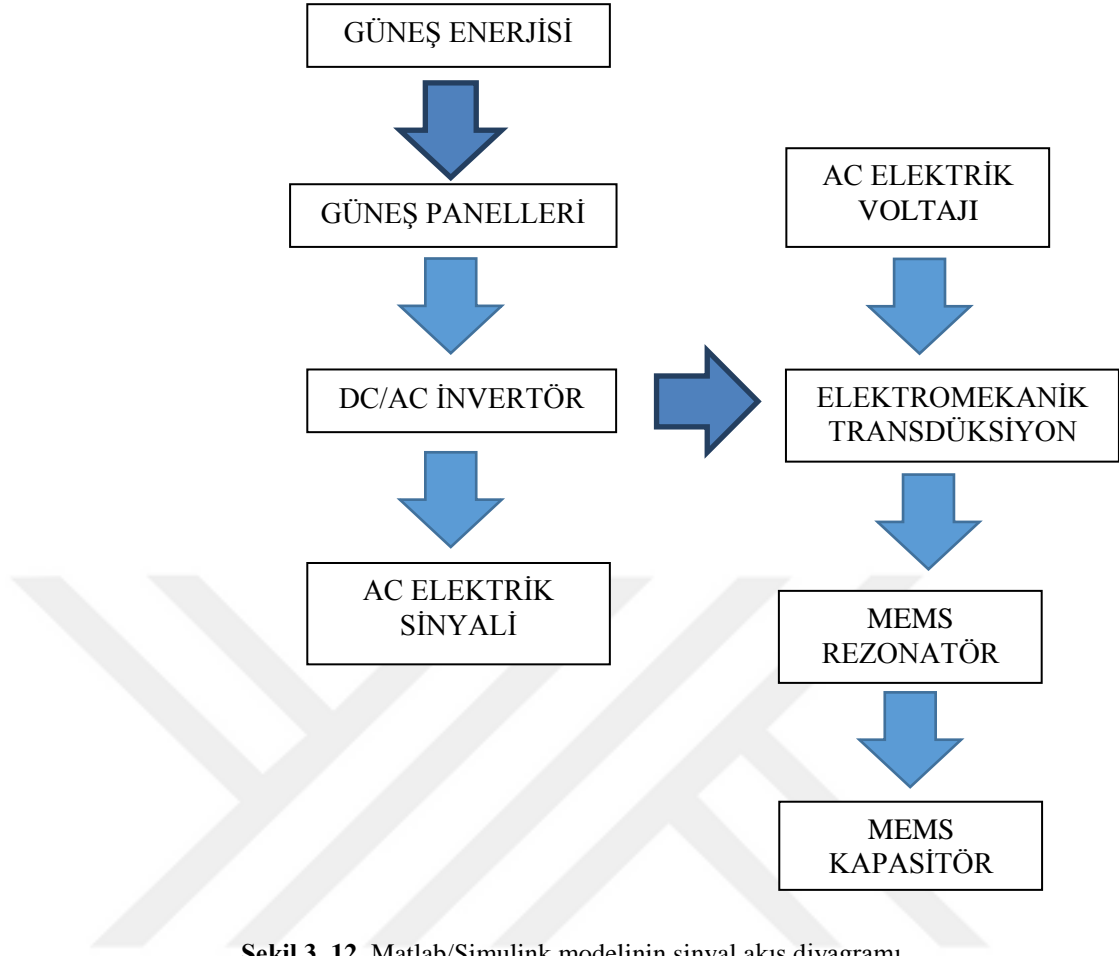
Şebeke frekansı ülkemizde 50Hz olduğu için rezonans frekansı ve devreye bağlanılan referans AC gerilimin frekansı 50 Hz alınmıştır. Klasik MEMS yerleşim alanı  $35 \times 35 \times 0,455 \text{ mm}^3$  seçilmiştir. Devrenin çalışması için devreye bağlanan şebeke gerilimi 120 V AC seçilmiş olup şebekeye seri olarak bağlanan sürücü kapasitansı 0.097 pF seçilmiştir. Güneş panelinden gelen DC voltajı 0.5V ile 48V arasında değer alabilmektedir. Biz bu simülasyonda 0.5V ve 24V DC geriliminde kapasitans değişimine göre dönüştürülen voltaj simüle edilmiştir.



Şekil 3. 10. Örnek bir fotovoltaik DC/AC invertör devresi



Şekil 3. 11. MEMS fotovoltaik DC/AC invertör



Şekil 3. 12. Matlab/Simulink modelinin sinyal akış diyagramı

Şekil 3.10’da gösterilen DC/AC invertör devresi şebekeye bağlı güneş paneli modelini göstermektedir. Güneş paneline gelen DC gerilim invertörde dönüşüm işlemi gerçekleştirilerek AC gerilim elde edilir burada elde edilen AC gerilim sinüzoidal bir yapıya sahiptir.

Şekil 3.11 ile tasarlanan MEMS invertör Şekil 3.12’de belirtilen akış diyagramı sırasına göre sisteme öncelikle referans bir AC gerilimi uygulanır. Uygulanan AC gerilimi elektromekanik transdüksiyona aktarılır. Burası MEMS rezonatöründen ve MEMS kondansatöründen gelen mekanik geri besleme bileşenlerini, elektriksel çalıştırma sinyalinden gelen elektriksel geri besleme bileşenlerini ve elektrikli DC/AC invertör devresini işleyen elektrik-mekanik bağlantılı alan birimidir. MEMS rezonatörüne aktarılan titreşim sistemin elektrostatik kuvvetini oluşturur.

MEMS rezonatörün çıkışı, yeni kapasitans değerlerinin hesaplanması için MEMS kondansatörüne aktarılan mekanik bir sapma sinyalini oluşturur. Daha sonra, MEMS kondansatörünün çıkışı, güneş pili sisteminden gelen elektrik DC akımın anlık

kapasitans değeri ile birlikte DC/AC invertör devresine aktarılır ve devrede ortaya çıkan çıkış voltajını hesaplamak için kullanılır. Ortaya yeni mekanik bir titreşim kuvveti oluşur ve yeniden hesaplanması için elektromekanik transdüksiyon ünitesine aktarılır. Sistem tekrar yeni bir AC referans gerilimine ihtiyaç duymadan tekrarlanır ve DC/AC invertör de dönüşüm gerçekleşmiş olur.

Simulink simülasyonu matematiksel denklemlerde belirtilen formüller yardımı ile sistemin yanıtı çıkarılmıştır. Denklem (1) ve (2) ile kütle yay damper özelliğindeki rezonatörün ivmesine göre hızı ve sapması bulunmuştur. Sapma sınırına ulaşmadığında bloğun çıktısı sıfırdır. Sapma sınırına geldiğinde ise çarpışma kuvvetine eşittir. Denklem (3), (4) ve (5) te MEMS kapasitörün yer değiştirmenin etkisi ile meydana gelen dönüştürülen kapasitör değerleri elde edilir. Elde edilen kapasitans değerleri ile Denklem (6) da sistemin elektrostatik kuvveti elde edilmiş olur. Denklem (7) ve (8) ile dönüştürülen voltaj, indüklenen akım ile orantılı olacak şekilde kapasitörde depolanan elektrik yükü hesaplanmıştır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji uygulamalarında kullanılacak DC/AC invertör tasarımı yapılmıştır. Tasarım fotovoltaiik sistemlerde analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda normal invertöre yakın MEMS DC/AC invertör sonuçları elde edilmiştir.

Kapasitansın etkisini gözlemek amacıyla ile matlab/simulink programından ve matematiksel denklemlerden yararlanarak farklı senaryolardaki sistemin analizi yapılmıştır. Bu analizler neticesinde kapasitansın yer değiştirmeye, elektriksel potansiyele göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca referans giriş gerilimi ve elektrostatik kuvvet ile dönüştürülen gerilimin çıkış sinyali ile verimi hesaplanmıştır.

Yer değiştirmeye göre kapasitans analizi için iki farklı model tasarlanmıştır. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de giriş gerilimi 24 V seçilerek kapasitans bağlı yer değişimi incelenmiştir.

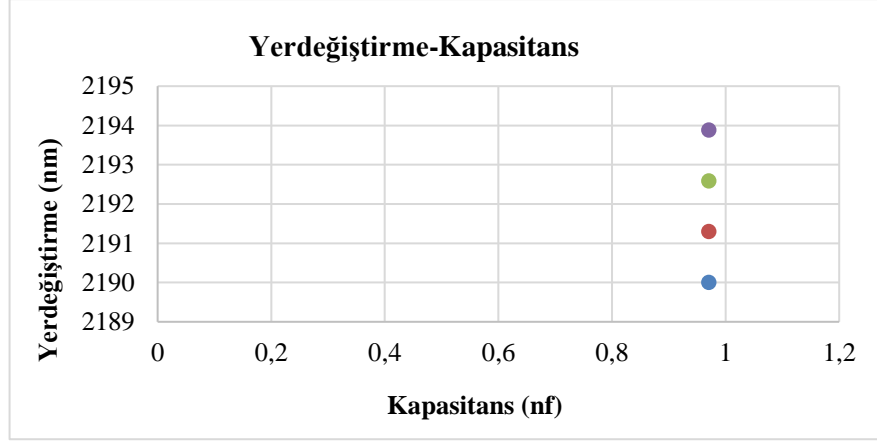
**Tablo 4. 1.** Yer değiştirmeye göre kapasitans analizi (1.model değerleri)

Giriş Voltajı(v)	Yer değiştirme (nm)	Kapasitans(nF)
24	2190	0.97
24	2191.295	0.97
24	2192.59	0.97
24	2193.885	0.97

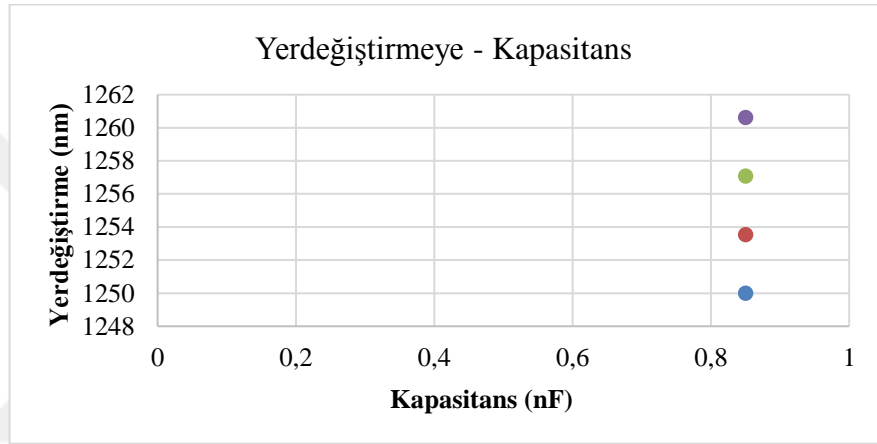
**Tablo 4. 2.** Yer değiştirmeye göre kapasitans analizi (2.model değerleri)

Giriş Voltajı(v)	Yer değiştirme (nm)	Kapasitans(nF)
24	1250	0.85
24	1253.54	0.85
24	1257.08	0.85
24	1260.62	0.85

Karşılaştırılan modellerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’deki grafiklerden anlaşılacağı üzere kapasitans değeri artıkça yer değişiminde artışı görülmüştür. MEMS tarak yapısında bulunan parmak sayısına bağlı olarak yer değiştirmede üst üste binen kapasitörlerin örtüşme uzunluğunun artması ile Y eksenine doğru kaymıştır.



Şekil 4. 1. Yer değiştirmeye göre kapasitans grafiği (1.model)



Şekil 4. 2. Yer değiştirmeye göre kapasitans grafiği (2.model)

Elektriksel potansiyele göre kapasitans analizi için iki farklı model tasarlanmıştır. Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'de giriş gerilimi 24 V seçilerek kapasitans bağlı yer değişimi incelenmiştir. MEMS tarak yapısında bulunan sabit ve hareketli elektronlar kapasitansın değişimine bağlı olarak yüzeydeki yer değiştirmeyi ve elektriksel potansiyelin artmasına sebep olmuştur. Elektriksel potansiyelin artması kapasitörlerin örtüşme alanındaki artışın olduğu anlamına geldiğinden dönüştürücü devrede boyunca kapasitansın artışını kolaylaştırmaktadır.

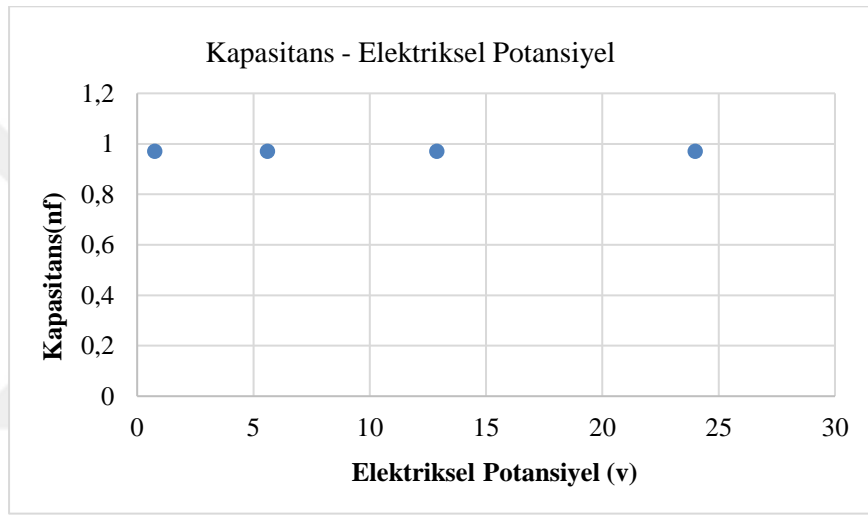
Tablo 4. 3. Elektriksel potansiyelin kapasitansa göre analizi (1.model değerleri)

Giriş Voltajı (v)	Elektriksel potansiyel (V)	Kapasitans (nF)
24	0.75	0.97
24	5.6	0.97
24	12.88	0.97
24	23.98	0.97

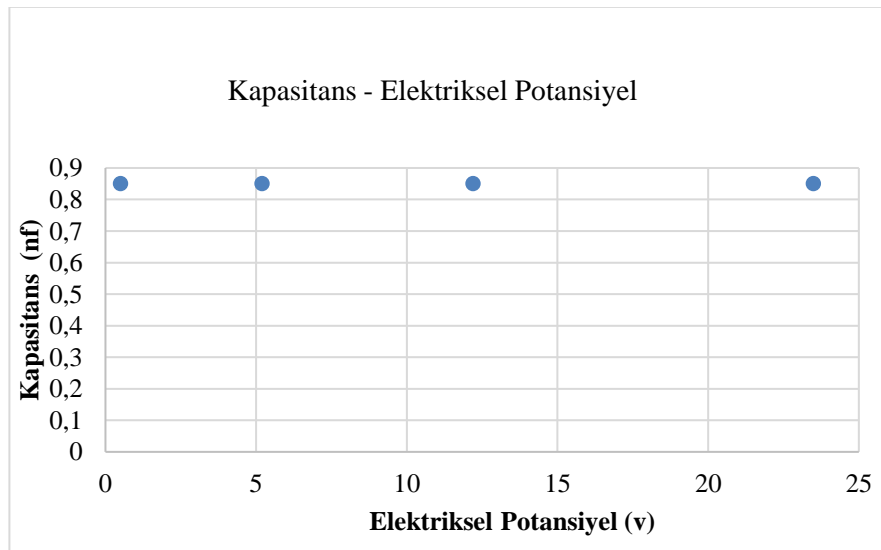
**Tablo 4. 4.** Elektriksel potansiyelin kapasitansa göre analizi (2.model değerleri)

Giriş Voltajı (v)	Elektriksel potansiyel (V)	Kapasitans (nF)
24	0.5	0.85
24	5.2	0.85
24	12.2	0.85
24	23.5	0.85

Karşılaştırılan modellerden elde edilen sonuçlar Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ deki grafiklerden anlaşılacağı üzere kapasitans değeri arttıkça elektriksel potansiyelin arttığı görülmüştür. Ayrıca elektriksel potansiyel yüzeyler arasındaki voltaj değişimlerine göre kapasitansı arttırdıktan elektrostatik kuvvet ve yer değişimi de artmıştır.



**Şekil 4. 3.** Kapasitansa göre elektriksel potansiyel grafiği (1.model)

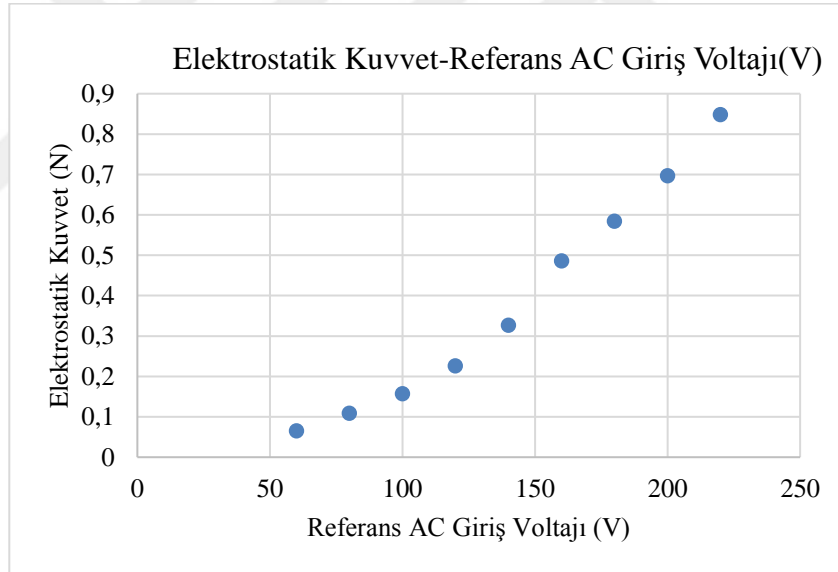


**Şekil 4. 4.** Kapasitansa göre elektriksel potansiyel grafiği (2.model)

Giriş gerilimine bağlı olarak elektrostatik kuvvetteki değişimi incelemek amacı ile Tablo 4.5'te belirtilen değerler incelenmiştir. Referans AC gerilimi sistemde titreşime neden olacağından elektrostatik kuvvete etki edecektir. Rezonatöre gelen titreşim arttığından elektrostatik kuvvet artacaktır.

**Tablo 4. 5.** Referans AC giriş voltajına göre elektrostatik kuvvet değerleri

Referans AC Giriş Voltajı (v)	Elektrostatik Kuvvet (N)
60	0.065
80	0.109
100	0.157
120	0.226
140	0.327
160	0.486
180	0.584
200	0.697
220	0.848



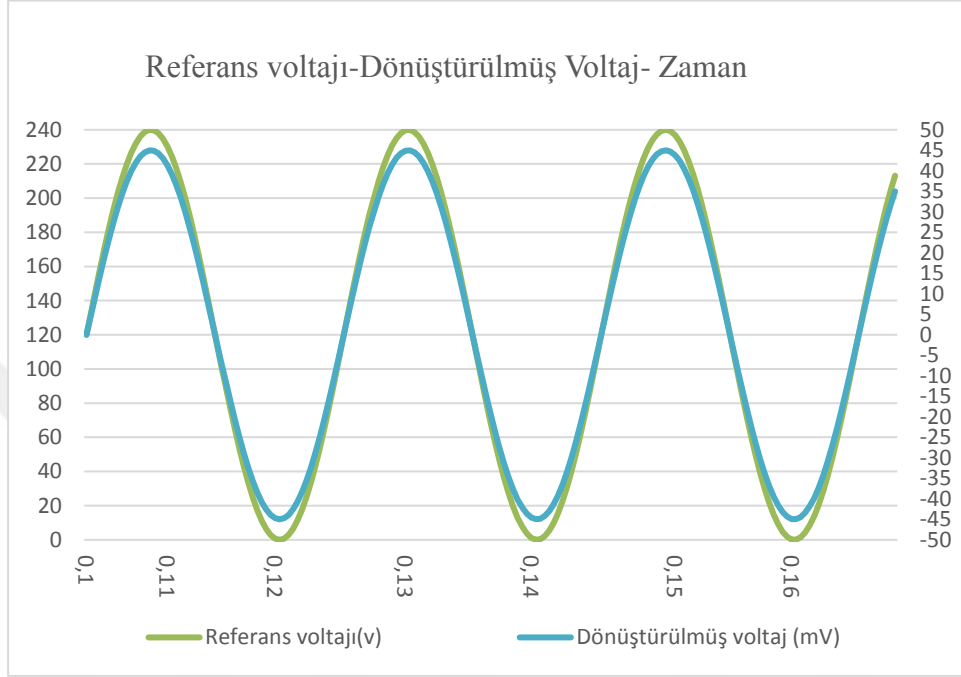
**Şekil 4. 5.** Elektrostatik kuvvet- referans AC giriş voltajı değişim grafiği

Elektrostatik kuvvet uygulanan gerilimin karesi ile orantılı olduğundan farklı gerilim seviyelerinde yer değiştirmeye neden olur. Yer değiştirme de kapasitansın değişmesine neden olacağından voltaj değişir. Şekil 4.5'te ki grafikte AC referans geriliminin değişimine göre elektrostatik kuvvetin değişimi gösterilmiştir.

Sangno ve ark. (2018), MEMS tabanlı güç çeviricilerde kapasitif performanslarının nasıl iyileştireceği üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada farklı malzeme ve yapılarda MEMS tabanlı DC/AC kapasitif güç çeviricilerini test



Daha sonra giriş gerilim uygulanarak kapasitans değeri artırılmıştır. Çıkışta yine sinüzoidal bir grafik elde edilmiştir. Giriş gerilim 120V uygulanıp 0.5V DC gerilimin 3900 fF te voltaj dönüşüm grafiği Şekil 4.7’de elde edilmiştir.



Şekil 4. 7. 120 V referans giriş voltajına göre dönüştürülmüş voltaj grafiği

0.5V DC voltaj gerilimdeki iki farklı tasarımın referans gerilimi ve dönüştürülen kapasitans değerleri değiştirilerek verim hesaplanmıştır.

Tablo 4. 6. Referans gerilimi – dönüştürücü kapasitansa göre verim hesap tablosu

Verim	VL(mV)	VDC(V)	Dönüştürücü Kapasitans (fF)	Referans Gerilimi (V)
0.002828	0.02	0.5	97	0
0.002121	0.015	0.5	97	0
0.001414	0.01	0.5	97	0
0.000707	0.005	0.5	97	0
6.161728	43.57	0.5	3900	120
5.436237	38.44	0.5	3900	120
2.938736	20.78	0.5	3900	120
1.467954	10.38	0.5	3900	120

Elde edilen değerler incelendiğinde giriş gerilimi uygulanan ve kapasitansı artırılan tasarımın veriminin daha iyi olduğu görülmüştür. Burada verim, güneş enerjisinden gelen DC giriş geriliminin elde edilen dönüştürülmüş DC/AC voltaj

geriliminin karekök gerilimine oranı ile elde edilmiştir.

Kloub ve Hamad (2017), yaptıkları çalışmada %6 kadar verim elde etmişlerdir.

0.5V ve 24V DC gerilimde kapasitans değişimlerinde verimlilik hesaplamışlar ve Tablo 4.7’de belirtilen yüksek kapasitans değerlerinde yüksek verim elde edilebileceğini göstermişlerdir.

**Tablo 4. 7.** Farklı kapasitans değerlerine karşılık verim hesabı.

Tasarım	VDC(V)	Dönüştürücü Kapasitans (fF)	VL (mV)	Verim (%)
1	0.5	97	0.024	0.0033
2	0.5	97	1.112	0.16
3	0.5	3900	44.48	6.29
4	0.5	3900	44.54	6.3
5	24	3900	1880	5.54

Tez çalışmamızda 0.5V DC gerilimde giriş gerilimi artırılarak ve kapasitans değerleri değiştirilerek yapılan sistemin verimi gözlemlendiğinde kapasitans değeri arttıkça verimin arttığı görülmüş olup Kloub ve Hamad (2017), yaptıkları çalışmaya benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Bu tez çalışması ile daha önceden yapılan çalışmalar karşılaştırılmış olup MEMS teknolojisinde kapasitansın ne kadar önemli olduğu anlaşılmıştır. Kapasitansa bağlı olarak MEMS cihazlarda elektrostatik kuvvet oluşumu görülmüştür. Yenilenebilir enerji sistemlerinde DC/AC invertörlerde dönüştürülen voltajın en az kayıpla maksimum dönüşüm elde etmek amacı ile MEMS teknolojisinden faydalanabileceği anlaşılmıştır.

Tasarlanan DC/AC invertöre etki eden elemanlar tespit edilmiş olup bunları en verimli şekilde kullanılmaya çalışılmıştır. Yapılan matematiksel denklemler ve simülasyon sonucu ile MEMS sisteminde kullanılacak, tarak sayısının ve uzunluğunun önemi anlaşılmıştır. Kapasitans ve elektrostatik kuvvet değişimine bağlı olarak dönüştürülen sinyalin kalitesinin arttığı görülmüştür.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde düşük güç uygulamaları ile DC/AC dönüşümün mümkün olacağı kanaatine varılmıştır. İleriki çalışmalarda uygun yarı iletkenler, tarak sayısı, tarak uzunluğu, uygun giriş gerilimi ve kapasitansı seçilerek yüksek verimli DC/AC invertör veya MEMS teknolojisinin uygulanabileceği elektronik cihazlar tasarlanabilecektir.

## 5. SONUÇLAR

Son zamanlarda teknolojinin ilerlemesi ile hayatımıza giren MEMS tabanlı yapılar birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu araştırmalar ve çalışmalar sayesinde birçok alanda kendisine yer bulmuştur. Günümüzde enerji ihtiyacının artmasından dolayı hayat standartlarının iyileştirilmesi, çevre ve doğaya zarar vermeden enerji ihtiyaçlarımızı karşılayabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarını en doğru şekilde kullanmamız gerekmektedir. Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanabilen MEMS tabanlı DC/AC invertör tasarımı ve analizi incelenmiştir.

Yapılan analizler incelendiğinde;

-Yer değiştirmeye bağlı olarak kapasitans değerlerindeki değişim gözlemlenmiştir.

-DC gerilimden kaynaklı dönüştürücü kondansatörün değişimi ile AC elektrik akımı indüklenmiştir.

-Kapasitans değerlerinde meydana gelen değişime bağlı olarak elektrostatik kuvvette değişimlerin olduğu görülmüştür.

-Tasarlanan MEMS invertörde üst üste binen tarak uzunluğu artırılarak kapasitansın artırılacağı anlaşılmış olup yer değiştirmenin etkisi ile elektrostatik kuvvet artmış olacaktır.

- Tarak sayısında değişime bağlı olarak elektrostatik kuvvet ve kapasitans değerleri değişmiştir. Böylece elektriksel potansiyel yüzeyler arasındaki voltaj değişimlerine göre kapasitansı değiştirmiştir.

-MEMS rezonatör yapısından dolayı rezonatörün ivmesine göre hızı ve sapması bulunmuştur.

- Başlangıçta denge halinde bulunan MEMS invertöre tetikleme AC sinyali gönderildiğinde sistemde DC gerilim AC gerilime dönüşmüştür ve geri besleme ile AC sinyali verilmeden sistemde voltaj dönüştürme gerilimi sağlanmıştır.

-Elde edilen sonuçlar neticesinde MEMS girişi elektrostatik kuvvet olarak bağlandığında sistemde DC gerilim AC gerilime dönüştüğü görülmüştür.

- Referans giriş gerilimine göre dönüştürülmüş gerilim analizi yapıldığında normal DC/AC invertör gibi sinüzoidal bir grafiğin çıktığı görülmüştür. Başlangıçta giriş gerilim 0V alınarak düşük kapasitans değerlerinde çıkış geriliminin dönüşümü sağlanmıştır. Referans giriş gerilimi değiştirildiğinde kapasitansın artışına bağlı olarak

voltaj geriliminin değiştiği görülmüştür.

Yapılan araştırmalar ve elde edilen sonuçlar neticesinde MEMS DC/AC invertörün normal DC/AC invertöre benzer karakteristik özellikler gösterdiği anlaşılmıştır. DC gerilimi mükemmele yakın bir şekilde sinüzoidal AC gerilimine dönüştürülebilmektedir. Ayrıca yapılan MEMS invertör kapasitif bir yapıya sahip olduğundan g tüketimini ortadan kaldırmak mümkün olacaktır.

Kapasitif MEMS DC/AC invertör zorlu ortam şartlarında yüksek verimlilik ile çalışabilmektedir. Tasarlanan MEMS DC/AC invertör kullanılan malzeme, tarak sayısı ve uzunluğu ile kayıplar en aza indirilerek elektrostatik kuvvet değiştirilip uygun giriş gerilimi ve uygun kondansatör seçimleri ile verimlilik daha da artırılabilir. MEMS teknolojisi ile mükemmele yakın sinüzoidal dalga ıkışlı DC/AC invertör yapılarak bakım kolaylığı sağlanacak ve daha uzun kullanım süreli invertörler elde edilerek daha az maliyetli elektronik cihazlar yapılabilir.

## 6. KAYNAKÇA

- Asgarlı, T., 2014. Kapasitif MEMS İvme Ölçer Karakterizasyonu için çok Yönlü 5 dereceli Sigma-Delta Modülasyon Devresi. Yüksek Lisans Tezi. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Aytaşkın, E., 2020. MEMS Teknolojisi Tabanlı Kapasitif Rezonatör Tasarımı ve Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- Azad, A.N.M.W., Roy, S., Imtiaz, A.S. and Khan, F., 2018. Microelectromechanical System (MEMS) Resonator: A New Element in Power Converter Circuits Featuring Reduced EMI. *The 2018 International Power Electronics Conference, (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia)*, 2416-2420.
- Batmaz, T., Bayraç, H.N., Güllü, M., 2019. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Büyüme ve Karbon Emisyonu İlişkisi. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi (ASEAD)*, 6(3), 645-658, ISSN:2148-9963.
- Bogue, R., 2007. MEMS sensors: past, present and future, *Sensor Review*, 27(1), 7-13.
- Çetin, E. ve Sazak, B.S., 2004. Fotovoltaik enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılabilir bir seri rezonans invertör devresinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(3), 339-346, Denizli.
- Dean, R.N., 2011. Electrical Noise in MEMS Capacitive Elements Resulting From Environmental Mechanical Vibrations in Harsh Environments. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 58(7), 2697-2705.
- Dölen, M. ve Kaplan, H., 2002. MikroElektroMekanik Sistemler (MEMS): *Genel bir tanıtım, Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*. 4(3), 173-185.
- Elmas, B., 2006. Yüksek Frekans anahtarlama Faz Kontrollü DC/AC İntertör Yüksek Lisans Tezi. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Elnozahy, A., Yousef, A.M., Abo-Elyousr, F.K., and Mohamed, M., 2021, Performance improvement of hybrid renewable energy sources connected to the grid using artificial neural network and sliding mode control. *Journal of Power Electronics. The Korean Institute of Power Electronics*. 21, 1166-1179.
- Erdem, E., Kıvrak, S., Keserler, S., 2014. 5kW Trafolu Tek Faz Kısa Devre Korumalı İnterter Tasarımı. *Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 27-29 Kasım 2014. Bursa.
- Erez, A.S., 2020. Endüstri 4.0 Kestirimci Bakım Süreçlerinde İsteme Özgü MEMS Tabanlı Sensörlerin Aksiyomatik Tasarımla Seçim Problemi. Yüksek Lisans Tezi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Ertuğrul, I. ve Ülkir, O., 2020. MEMS tabanlı mikro rezonatörün tasarımı ve analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 25-29.
- Hoopensteadt, F.C., 2001. Synchroniztaion of MEMS resonators and Mechanical Neurocomputing, *IEEE Transactions on circuit and system- I : Fundamental Theory and Application*, 48(2).
- İnel, S.C., 2021. Düşük Maliyetli MEMS Sensörlü Top Mermileri İçin Darbe Dayanımlı Navigasyon Sistemi Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, İzmir.

- Kaya, M., 2021. Hedef Analitlerin Tespiti için kullanılabilir MEMS Kapasitif Rezonatör Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- Kayıoğlu, B. ve Diken, B., 2019. Türkiye'de yenilenebilir enerji kullanımının mevcut durumu ve sorunları. *Tarım Makinaları Bilim Dergisi*, 15(2), 61-65.
- Kenar, M., 2019. Güneş Enerjisi Üretim Sistemleri için DC/DC e DC/AC Güç Dönüştürücülerin Tasarımı ve Fuzzy-PI ile Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.
- Kloub, H.A. and Hamad E.M., 2017. Electromechanical modeling and designing of capacitive MEMS DC/AC interactive power inverter for renewable energy applications. *Microsystem Technologies*, 23(4), 863-874.
- Kuehne, I., Frey, A., Marinkovic, D., Eckstein, G., Seidel, H., 2008. Power MEMS- A capacitive vibration to electrical energy converter with built-in voltage. *Sensors and Actuators A*, 142, 263–269.
- Meng, E., 2003. *MEMS Technology and Devices for a Micro Fluid Dosing System*. Dissertation (Ph.D.), *California Institute of Technology*, California.
- Öztürk, H., 2013. Yenilenebilir Enerji Kaynakları. *Birsen Yayınevi*, ISBN 978-975-511-589-4, İstanbul,
- Özçakır, E., 2010. RF MEMS Aygıtları için Dikey/Yatay Beslemeli Paket Yapısının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara.
- Özçiftci, C., 2012. Şebekeye Enerji Aktaran Geri Dönüştürücü İnverter Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul.
- Panchal, D., Tambe, M., Pannchal, H., 2012. Efficient electromechanical inverter DC-AC. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(8), 365-371.
- Sandhu, M. and Thakur, T., 2014. Multilevel inverters: literature survey – topologies, control techniques & applications of renewable energy sources - grid integration. *Journal of Engineering Research and Applications*, ISSN: 2248-9622, 4(3), 644-652.
- Sangno, R., Mehta, R.K., Maity, S., 2019. MEMS based low power efficient capacitive inverter for renewable energy applications. *VLSI Circuits and Systems Letter*, 5(2), 1-9.
- Sangno, R., Mehta, R.K., Maity, S., 2018. Improvement in capacitive performances of efficient micro electro mechanical system (MEMS) based power inverter *Cogent Engineering*, 5(1), 1455407.
- Saucedo-Flores, E., Rules, R., Flores, M., Chiao, J., 2004. Study of the pull-in voltage for MEMS parallel plate capacitor actuators, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 782, A5.86.1-7.
- Toprak, A., Toprak, A., 2016. 300 W inverter devresi tasarımı ve gerçekleştirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, 11, 57-66, Konya.
- Upadhyaya, A. M., Hasan, M. K., Abdel-Khalek, S., Hassan, R., Srivastava, M. C., Sharan, P., Islam, S., Saad, A.M.E., Vo, N., 2021. A Comprehensive Review on

the Optical Micro-Electromechanical Sensors for the Biomedical Application. *Frontiers in Public Health*, 9.

Ülker, O., 2020. Mikro-akışkan çipin zamana bağlı basınç analizi. *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 4(2), 116-123

Ülker, O., Ertuğrul, İ., Akkuş, N., 2020. MEMS tabanlı elektrotermal mikro-aktüatörün tasarımı ve sonlu elemanlar analizi. *EL-Cezeri*, 7(3), 1017-1024.

Yalçın, F., 2009. Bir Fazlı İnverter Tasarımı Yüksek Lisans Tezi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.

Yücel, E. ve Çiçek, A., 2011. İmalatlarda yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri. *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, 15(1), 46-59, Sakarya.

Zhao, C., Montaseri, M. H., Wood, G. S., Pu, S. H., Seshia, A. A., Kraft, M., 2016. A review on coupled MEMS resonators for sensing applications utilizing mode localization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 249, 93-111.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı:** Salih Rahmi TURAN

### EĞİTİM

<b>Derece</b>	<b>Adı</b>	<b>Bitirme Yılı</b>
<b>Lise Eğitimi</b>	Nevzat Ayaz Anadolu Lisesi	<b>2004</b>
<b>Lisans Eğitimi</b>	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	<b>2011</b>

### İŞ DENEYİMLERİ

<b>Yıl</b>	<b>Kurum</b>	<b>Görevi</b>
2012-2013	Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş. (İnegöl İşletme Müdürlüğü)	Elektrik-Elektronik Mühendisi
2013-2019	Muş Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü (Proje-Yapım Şube Müdürlüğü)	Elektrik-Elektronik Mühendisi
2019 - Halen	Diyarbakır Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü (Yapım Şube Müdürlüğü)	Elektrik-Elektronik Mühendisi