

**PIEZOELEKTRİK TAHRİKLİ DOĞRUSAL HAREKET
MEKANİZMA TASARIMI**

**DESING OF LINEAR MOVEMENT MECHANISMS WITH
PIEZOELECTRIC ACTUATOR**

SEZGİN KOCAER

Yrd. Doç. Dr. ÖZGÜR ÜNVER

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2015

SEZGİN KOCAER in hazırladığı '**Piezoelektrik Tahrikli Doğrusal Hareket Mekanizma Tasarımı**' adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Benat KOÇKAR

BAŞKAN

.....

Yrd. Doç. Dr. ÖZGÜR ÜNVER

DANIŞMAN

.....

Prof. Dr. HÜSEYİN ZAFER DURUSOY

ÜYE

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylamıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm belge ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

22.06.2015

Sezgin KOCAER

ÖZET

PIEZOELEKTRİK TAHRIKLİ DOĞRUSAL HAREKET MEKANİZMA TASARIMI

SEZGİN KOCAER

Yüksek Lisans, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. ÖZGÜR ÜNVER

HAZİRAN 2015, 83 sayfa

Tezde nanometre mertebesinde hareket edebilen doğrusal motor geliştirilmesi hedeflenmiştir. Piezoelektrik malzemeler kullanılarak yapılan doğrusal motor kaydır taşı prensibi ile çalışmaktadır. Tez çalışmasında geliştirilen piezoelektrik motorların besleme voltajı, sıcaklık ve yüke karşı performansları incelenmiştir. Tezde iki farklı mekanik kaydır-taşı motoru çalışılmıştır.

Çalışmalar neticesinde imal edilen tek eksenli hareket kabiliyetindeki motorun atmosfer koşullarında, farklı şiddette besleme sinyalleri ile iki yönlü hareketi dijital optik kamera ile resimlendirilmiştir. Bu işlemler genliği 150V, 200V, 250V ve 300V olan sinyaller için motorun 25, 50, 75,100 ve 250 adımlık ilerleme miktarlarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ağırlığı 10g, 20g, 30g, 40g, 50g ve 100g olan yükler altında 300V'luk besleme sinyali ile 100 adımlık ilerlemeler uygulanarak ölçümler yapılmıştır. Resimlendirilmiş olan bu hareketlerin ardışık hareketler sonucu yer değiştirme miktarları ölçülüp mekanizmanın atma başına ortalama hareket miktarı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda atmosfer koşullarında gerçekleştirilen bu çalışmada tek eksenli kaydır taşı piezoelektrik motorun 400nm ile 1350nm arasında adım büyüklükleri ile ilerlediği görülmüştür.

Gerçekleştirilen ortogonal iki eksenli hareket kabiliyetindeki piezoelektrik motor çalışmasında kriyojenik sıcaklık koşulunda piezoelektrik motor performansının incelenmesi hedeflenmiştir. İmal edilen motorun hareketi öncelikle atmosfer koşullarında dijital optik kamera yardımı ile gözlenmiştir. Sonrasında hedeflenen ölçümler için motor düşük sıcaklık taramalı uc mikroskobuna monte edilerek 77

kelvin sıcaklığına soğutulmuştur. Ölçümler; motorun hareketli tablası üzerine yerleştirilen kare örgü desenli galyum arsenit örnek üzerinden görüntü alınarak yapılmıştır. Motor belirli sayılarda ilerlemeler gerçekleştirdikten sonra örnek yüzeyi taranarak görüntü alınmıştır. Sonrasında alınan görüntüler üzerinde belirgin olan noktalar referans alınarak örneğin ne kadar yer değiştirdiği görüntüler üzerinden hesaplanmıştır. Motorun 77 kelvinde hareket edebilirliği test edildikten sonra motor sıcaklığı 4 kelvine indirilerek görüntüleme ve analiz işlemleri tekrarlanmıştır. Kriyojenik sıcaklık ortamında yapılan bu çalışmada piezoelektrik motorun 77 kelvin sıcaklığında adım büyüklüğü 1500-2000 nm civarlarında ölçülmüştür. 4 kelvin sıcaklığında ise adım büyüklüğü 160 ile 450 nanometre civarında ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: Piezoelektrik, nanometre, kaydır-taşı, kriyojenik sıcaklık, adım büyüklüğü

ABSTRACT

DESING OF LINEAR MOVEMENT MECHANISMS WITH PIEZOELECTRIC ACTUATOR

SEZGİN KOCAER

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. ÖZGÜR ÜNVER

JUNE 2015, 83 pages

This thesis aims to design a linear motor which can move at nanometer range. The linear motor that is made up of piezoelectrical materials works according to the principal of slip-stick. This thesis examines performance of motors against supply voltage of the piezoelectrics, temperature and mechanical load. In this research two different mechanical slip-stick motors are studied.

The motor that has been made as an outcome of this research has the ability of moving on a single axis. The supply signals of the motor at different intensity levels under atmospheric conditions and its movement to both sides have been recorded by a digital optic camera. During the process, for the 25, 50, 75,100 and 250 steps of the motor moving forwards and backwards, the intensity of the signals are 150V, 200V, 250V and 300V. The measurement is repeated under the loads of 10g, 20g, 30g, 40g, 50g and 100g at the 300V signal intensity with 100 steps moving forwards and backwards. The distance between sequential movements that have been drawn is measured and the average step size is calculated. This research is studied under atmospheric conditions and observes that the step size of the piezo-electrical motor, which has a slip-stick system and a single axis, is measured between 400nm and 1350nm.

The second research that focuses on a piezo-electrical motor which has the ability of moving on an two orthogonal axes aims to examine the performance of piezo-electrical motors at cryogenic temperature. The movement of the motor is first observed at atmospheric conditions by a digital optic camera. Afterwards, the motor

is mounted on a low temperature probe microscope and the temperature of the atmosphere is decreased to 77 Kelvin for the experiment. The experiment is done by scanning the square patterned gallium arsenide that is put on the moveable table of the motor. After the motor practices a certain amount of movements, its surface is scanned. Then, with reference to the points which can be observed clearly, the distance between movements is measured based on these images. After the ability of the motor whether it can move at 77 Kelvin is tested, its temperature is decreased to 4 Kelvin and the same tests and scanning procedure are repeated. This research is studied at cryogenic temperature and the step size of the piezo-electrical motor at 77 Kelvin is measured around 1500-2000 nm, whereas it is measured around 160-450 nm at 4 Kelvin.

Keywords: Piezoelectric, nanometer, slip-stick, cryogenic temperature, step size

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam süresince emeği geen herkese minnet ve teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 PROBLEM TANIMI	2
1.2 MOTİVASYON	2
1.3 TEZ ÇALIŞMASININ AMACI	3
2 LİTERATÜR.....	4
2.1 PIEZOELEKTRİKLER	4
2.1.1 <i>Direk ve Ters Piezoelektrik Etki</i>	4
2.1.2 <i>Tarihte Piezoelektrik Kavramı?</i>	5
2.1.3 <i>Piezoelektrik Malzemeler ve Atomik Yapıları</i>	6
2.1.4 <i>Mikroskobik Düzeyde Piezoelektriklik</i>	7
2.1.5 <i>Kutup ve Kutuplama</i>	8
2.1.6 <i>Ferroelektrik-Ferroelastik Dönüşümler</i>	9
2.1.7 <i>Piezoelektriklerde Histerisis ve Doğrusalsızlık</i>	10
2.1.8 <i>Doğrusal Piezoelektrik model</i>	11
2.2 DOĞRUSAL HAREKET TAHRİK MEKANİZMALARİ	14
2.2.1 <i>Pnömatik ve Hidrolik Tahrik Mekanizmaları</i>	14
2.2.2 <i>Vidalı Mil ve Somun Tahrik Mekanizmaları</i>	15
2.2.3 <i>Piezoelektrik Tabanlı Tahrik Mekanizmaları</i>	16
2.3 KAYDIR-TAŞI (SLİP - STICK) TİPİ PIEZOELEKTRİK SÜRÜCÜLER	23
2.4 KAYDIR-TAŞI TİPİ MOTORLARDA SÜRTÜNME KATSAYISI VE BESLEME GERİLİMİ ETKİSİ.....	30
2.5 FİZİKSEL SINIR KOŞULLARI.....	32
2.5.1 <i>Sıcaklık ve Isı</i>	32
2.5.2 <i>Düşük sıcaklık</i>	36
2.5.3 <i>Vakum</i>	37
2.5.4 <i>Manyetiklik ve Manyetik Alan</i>	38
2.5.5 <i>Düşük Sıcaklık ve Vakumun Malzeme Özelliklerine Etkisi</i>	40
3 TASARIM.....	42
3.1 TEK EKSEN KAYDIR-TAŞI KIZAK TASARIMI	42

3.2	DÜŞÜK SICAKLIK UYUMLU (4K-300K) İki EKSENLI KAYDIR-TAŞI MEKANİZMASI .	46
3.3	TASARIMDA MALZEME SEÇİMİ	53
4	PROTATİP İMALATI VE MONTAJ.....	55
5	TEST , SONUÇLAR VE YORUM.....	57
5.1	TEST ELEKTRONİĞİ.....	57
5.2	TEK EKSEN KAYDIR-TAŞI KIZAK	59
5.3	DÜŞÜK SICAKLIK UYUMLU (4K-300K) İki EKSENLI KAYDIR-TAŞI KIZAĞI.....	67
5.3.1	<i>Oda Sıcaklığı Testi</i>	<i>67</i>
5.3.2	<i>Düşük Sıcaklık Testleri</i>	<i>67</i>
6	GELECEK ÇALIŞMALAR	73
7	KAYNAKLAR	76
8	ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE 1-ODA SICAKLIĞINDAKİ BAZI KATI MALZEMELER İÇİN TERMAL İLETKENLİK KATSAYISI	33
ÇİZELGE 2-BAZI SIVI VE GAZLAR İÇİN TERMAL İLETKENLİK KATSAYILARI.....	33
ÇİZELGE 3-SIVI VE GAZLAR İÇİN TERMAL YAYINIM KATSAYI DEĞERLERİ	34
ÇİZELGE 4-BAZI YÜZEYLER İÇİN TERMAL İŞİNİM İLE YAYILIM KATSAYILARI	35
ÇİZELGE 5- ATMOSFER GAZLARININ SIVILAŞMA VE KATILAŞMA SICAKLIKLARI	36
ÇİZELGE 6- VAKUM SINIFLARI VE BASINÇ DEĞERLERİ (VAKUM TEKNIĞİ; PROF. DR. TARIMCI, DR. SARI).....	37
ÇİZELGE 7- FARKLI BESLEME SİNYALLERİ İÇİN MAKSİMUM ŞİDDETEN MİNİMUM ŞİDETE DÜŞME SÜRELERİ VE GERİLİM FARKI	57
ÇİZELGE 8- BESLEME GERİLİMİ VE ADIM SAYISINA BAĞLI KONUM VERİLERİ	61
ÇİZELGE 9- BESLEME GERİLİMİ VE ADIM SAYISINA BAĞLI YER DEĞİŞTİRME MİKTARI	62
ÇİZELGE 10-300 VOLT SABİT BESLEME GERİLİMİ VE 100 ADIMLIK İLERLEMELER İLE YÜKE BAĞLI KONUM VERİLERİ.....	63
ÇİZELGE 11-300 VOLT SABİT BESLEME GERİLİMİ VE 100 ADIMLIK İLERLEMELER İLE YÜKE BAĞLI YER DEĞİŞTİRME MİKTARI	63
ÇİZELGE 12-77 KELVİN SICAKLIKTA X-Y MOTORU ADIM BAŞINA ORTALAMA YER DEĞİŞTİRME MİKTARI.....	69
ÇİZELGE 13- 4 KELVİN SICAKLIKTA X-Y MOTORU ADIM BAŞINA ORTALAMA YER DEĞİŞTİRME MİKTARI.....	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL 1-(A)NANOMANYETİK BİLİMSEL CİHAZLAR FİRMASI DÜŞÜK SICAKLIK ATOMİK KUVVET MİKROSKOBU,(B)MİKROSKOBUN ÖRNEK TUTUCUSUNUN YAKINDAN GÖRÜNÜŞÜ, (C) TARAMA UCUNUN BİR SEFERDE YÜZEYDE TARAYABİLDİĞİ ALAN (KIRMIZI İLE GÖSTERİLMİŞTİR)	2
ŞEKİL 2-DİREK PİEZOELEKTRİK ETKİ.....	4
ŞEKİL 3-STATİK VE ZAMANA BAĞLI DEĞİŞKEN TERS PİEZOELEKTRİK ETKİ	5
ŞEKİL 4-PIEZOELEKTRİK KRİSTAL ÖRGÜSÜ (WAANDERS 1991)	7
ŞEKİL 5-(A)DOMAİN SINIRLARI İÇİNDE ATOMİK YERLEŞİM (B)FERROELEKTRİK MALZEMEDEKİ DOMAİNLER	8
ŞEKİL 6-SEM MİKROSKOBU İLE ALINMIŞ PZT SERAMİK DOMAİN YAPI GÖRÜNTÜSÜ (J. BRÜNAHL, 2003)	8
ŞEKİL 7- PİEZOELEKTRİK ETKİ OLUŞTURMAK İÇİN SERAMİK MALZEMEYE YAPILAN KUTUPLAMA İŞLEMİ.....	8
ŞEKİL 8-PIEZOSERAMİKLERİN KUTUPLANMA İŞLEMİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ (J.BRÜNAHL 2003).....	9
ŞEKİL 9-(A)PbTiO ₃ İÇİN DOĞAL P ₀ KUTUP DURUMU (B) E>E _c ELEKTRİK ALANI ALTINDA 180° DERECE DÖNMÜŞ FERROELEKTRİK DÖNÜŞÜM (C)Σ>Σ _c GERİLİMİ ALTINDA 90° DERECE DÖNMÜŞ FERROELASTİK DÖNÜŞÜM(D) TETRAGONAL YAPILARDA MERKEZ ATOM İÇİN MEVCUT ALTI MİNİMUM ENERJİ KONUMU (R.C.SMİTH 2004).....	10
ŞEKİL 10-(A)ARTIK KUTUPLANMA P _R 'NİN MEYDANA GELDİĞİ B NOKTASINDA HİSTERİSTİK ELEKTRİK ALAN-KUTUPLANMA İLİŞKİSİ VE DOĞRUSAL YAKLAŞIM (B)ARTIK GERİNİM ε _R 'NİN MEYDANA GELDİĞİ B NOKTASINDA HİSTERİSTİK ELEKTRİK ALAN-KUTUPLANMA İLİŞKİSİ VE DOĞRUSAL YAKLAŞIM (R.C.SMİTH 2004)	10
ŞEKİL 11- 3. EKSEN DOĞRULTUSUNDA KUTUPLANMIŞ PİEZOELEKTRİK SERAMİK İÇİN ORTAGONAL UZAY ŞEMASI. (J.BRÜNAHL 2003).....	12
ŞEKİL 12- TEK KATLI VE ÇOK KATLI (YIĞIN) PİEZOELEKTRİK YAPISAL FARKLILIKLARI (NOLİAC 2014).....	17
ŞEKİL 13- TEK PARÇA İÇ İÇE GEÇMİŞ ESNEK X-Y TABLA TASARIMI (PI).....	17
ŞEKİL 14-TÜP PİEZOELEKTRİK BÜKÜCÜ SÜRÜCÜSÜ	18
ŞEKİL 15- TİRTİL TİPİ MOTORUN ÇALIŞMASININ ŞEMATİK GÖSTERİMİ	20
ŞEKİL 16- EYLEMSİZLİK KIZAK MEKANİZMASI: KIZAK SAHİP OLDUĞU EYLEMSİZLİK SEBEBİ İLE KAYAY PİEZONUN HIZLI HAREKETİNİ TAKİP EDEMEZ. BÖYLECE HAREKETİ SINIRLI OLAN KAYAR PİEZO İLE SINIRSIZ HAREKET SAĞLANMIŞ OLUR. (H.S.KİM, E. KRATSCHMER VE T.H.P. CHANG)	21
ŞEKİL 17-SHİNSEİ USR60 YÜRÜYEN DALGA TİP ULTRASONİK MOTORUN KESİT GÖRÜNÜŞÜ.....	22
ŞEKİL 18-YÜRÜYEN DALGA TİP ULTRASONİK MOTORUN ÇALIŞMA PRENSİBİ	22
ŞEKİL 19-DAİRESEL PİEZOELEKTRİK SES SENSÖRÜ	23
ŞEKİL 20-KENARLARINDAN TUTTURULAN DAİRESEL BİR ZARIN KİPLERİNİN GÖSTERİMİ. SALINIM FREKANSLARI HARMONİK BİR SERİ OLUŞTURMAZ. (M.L WARREN, FİZİĞE GİRİŞ, NEW YORK, W.H. FREEMAN. ŞİRKETİ YAYINCILARININ İZİNİYLE) (SERWAY- BEICHNER FİZİK 1)	23

ŞEKİL 21- (A) YAN VE (B) ÜST GÖRÜNÜM LABORATUVARDA KULLANILAN İKİ PİEZOELEKTRİK MOTOR. A'DA X EKSENİ VE SAYFA DÜZLEMİNDEN DIŞARIYA DOĞRU OLAN Y EKSENİNDE HAREKET EDEN XY MOTORUN ŞEMATİK GÖSTERİMİ YER ALMAKTADIR. B'DE TEPEŞİ KESİLMİŞ OLAN ÜÇGENSEL HAREKETLİ ŞAFTI Z EKSENİNDE HAREKET ETTİREN PAN TİPİ MOTORUN ŞEMATİK GÖSTERİMİ YER ALMAKTADIR.	24
ŞEKİL 22- (A) ADIMIN ANATOMİSİ (i) ŞAFT PİEZOELEKTRİK YİĞİN TARAFINDA SIKIŞTIRILMIŞ DURUMDADIR, (ii) PİEZOELEKTRİKLERE UYGULANAN VOLTAJ YAVAŞÇA ARTTIRILIR BU SIRADA PİEZOELEKTRİKLERLE TEMAS HALİNDE OLAN ŞAFT YUKARI YÖNDE TAŞINIR, (iii) VOLTAJ HIZLI BİR ŞEKİLDE SIFIRA ÇEKİLİR BU SEBEPLE PİEZOELEKTRİK ŞAFT YÜZEYİNDE KAYMA HAREKETİ YAPAR VE ŞAFTA BİR ADIM ATTIRILMIŞ OLUR. (B) YATAY HAREKETTE ŞAFT ÜZERİNE DÜŞEN KUVVETLER GÖRÜLMEKTEDİR. (C) PİEZOMOTORUN DİK YÖNELİMDEKİ KUVVET DAĞILIMI GÖRÜLMEKTEDİR.	25
ŞEKİL 23- YAPRAK YAY BASINCINA BAĞLI OLARAK ÖLÇÜLEN KABA KONUMLANDIRMA SÜRÜCÜ HIZI. SİYAH ÇİZGİ YUKARI YÖNDE (YERÇEKİMİNE KARŞI) HAREKETİ VE KIRMIZI ÇİZGİ AŞAĞI YÖNDE HAREKETİ GÖSTERİYOR. SIFIR NOKTASI PRİZMA ŞAFTIN SERBEST HALDE KAYMADIĞI NOKTA OLARAK SEÇİLMİŞTİR. HATA ÇİZGİLERİ TEKRARLANAN ÖLÇÜM VERİLERİNİN ORTALAMASIDIR. ÖLÇÜM ATMOSFER KOŞULLARINDA 60V GENLİKTE 1kHz FREKANSTA TESTERE DİŞLİ VOLTAJ SİNYALİ İLE ALINMIŞTIR. (T. MASHOFF 2010).....	27
ŞEKİL 24-PAN TİPİ STM KAFASI TASARIMININ ŞEMATİK GÖSTERİMİ. (A) ÜSTTEN GÖRÜNÜM, (B) YANDAN GÖRÜNÜM. (1) MACOR GÖVDE, (2)TARAMA UCU, (3)MACOR GÖVDE ÜZERİNE MONTE EDİLMİŞ KAYAR PİEZO YİĞİNİ, (4) PİEZO TÜP TARAYICI 4K' DE 3µm TARAMA ALANI, (5)TARAYICI VE UCU TUTAN SAFİR PRİZMA, (6)PİEZO YİĞİNLARI İLE PRİZMA ARASINDAKİ BASKI KUVVETİNİ AYARLAMAK İÇİN KULLANILAN PASLANMAZ ÇELİK PLAKA YAY, (7)SAFİR TOP, (8)MACOR PLAKA, (9)ÖRNEK VE ÖRNEK TUTUCU (SHENGYONG QIN 2008).....	28
ŞEKİL 25- YAYA TASARIMININ ÇALIŞMA PRENSİBİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ. ÜSTTE BİRBİRİ ARDINA GELEN PİEZOELEKTRİK YİĞİNLARIN HAREKETLERİ İLE BİR ADIM ATAN PRİZMANIN HAREKETİ. ALTTA HERBİR ARDIŞIK HAREKETE KARŞILIK GELEN PİEZOELEKTRİK YİĞİNLARA UYGULANAN BESLEME VOLTAJİ (SHENGYONG QIN 2008).....	29
ŞEKİL 26-XY STM ŞEMATİK GÖSTERİMİ (C. DUBOİS, P.E. BISSON, A.A.MANUEL, FISHER, S.REYMOND 2006).....	30
ŞEKİL 27- YATAY KAYDIRICININ ŞEMATİK GÖSTERİMİ (C. DUBOİS, P.E. BISSON, A.A.MANUEL, FISHER, S.REYMOND 2006)	30
ŞEKİL 28-FARKLI ÖLÇÜM DURUMLARI ALTINDA ORTALAMA ADIM BÜYÜKLÜKLERİ (42 GRAM KÜTLE İLE). ÇELİK YÜZEY İLE ÇELİK KÜRELER KURU VE YAĞLAYICI İLE (VAKUM GRES VE 2T YAĞ) , ALÜMİNA PLAKA VE SAFİR KÜRELER İLE DE FARKLI TEMAS YÜZEYLERİ KULLANILARAK ÇALIŞILMIŞTIR. SÜRTÜNME KATSAYISI SÜTUNLARIN ÜSTÜNDE BELİRTİLMİŞTİR. (K. ANANTHESHWARA, N.S. MURALI VE M.S. BOBJI- HAZİRAN 2008).....	31
ŞEKİL 29- (A) PİEZOSERAMİĞE UYGULANAN FARKLI BESLEME SİNYAL ŞEKİLLERİ; A:EKSPONANSİYEL, B:KÜBİK, C:KUADRATİK, D:DOĞRUSAL ARTIŞ SONRASI ANİ DÜŞÜŞ (B) FARKLI BESLEME SİNYALLERİ İÇİN ORTALAMA ADIM BÜYÜKLÜKLERİ E:1 MİLİSANİYE	

GEÇİKMELİ EKSPONANSİYEL SİNYAL (42 GRAM KÜTLE İLE) ALÜMİNA PLAKA VE SAFİR KÜRE ARASINDAKİ TEMAS YÜZEYLERİ. ((K. ANANTHESHWARA, N.S. MURALİ E M.S. BOBİ- HAZİRAN 2008))	32
ŞEKİL 30-NANAMANYETİK BİLİMSEL CİHAZLAR FİRMASI DÜŞÜK SICAKLIK MİKROSKOP PARÇALARI.....	47
ŞEKİL 31- MORİ SİEKİ DURAVERTİCAL 5080.....	55
ŞEKİL 32- MICRO CUT CHALLENGER MCV 2412	55
ŞEKİL 33-MAZAK QT8 CNC TORNA.....	55
ŞEKİL 34- ÜRETİLEN X-Y SLİDER PARÇALARI VE BASKI DEVRE KARTLARI	56
ŞEKİL 35-NANOMANYETİK BİLİMSEL CİHAZLAR MİKROSKOP ELEKTRONİĞİ	57
ŞEKİL 36-TESTLERDE KULLANILAN ELEKTRİKSEL BESLEME SİNYALLERİ A-) MAKSİMUM GERİLİM 150 VOLT, B-) MAKSİMUM GERİLİM 250 VOLT, C-) MAKSİMUM GERİLİM 250 VOLT, D-) MAKSİMUM GERİLİM 300 VOLT	58
ŞEKİL 37-ÖLÇÜM DÜZENEGİ VE KULLANILAN AĞIRLIKLAR	59
ŞEKİL 38-200V BESLEME SİNYALİ 50 ADIMLIK İLERLEMELER İÇİN YAPILAN ÖLÇÜM ÖRNEĞİ A-) BAŞLANGIÇ POZİSYONUNDA ALINAN İLK GÖRÜNTÜ, B-) ARDIŞIK HAREKETLER SONRASI ALINAN GÖRÜNTÜLERİN BİRLEŞTİRİLMİŞ HALİ, C-)BİRLEŞTİRİLMİŞ GÖRÜNTÜDEN ALINAN BİR BÖLGENİN BÜYÜTÜLEREK ÜZERİNDEN ÖLÇÜM GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.	60
ŞEKİL 39- FARKLI ADIM SAYISI VE YÜK ALTINDA SİNYAL ŞİDDETİNE BAĞLI ORTALAMA ADIM BÜYÜKLÜKLERİ.....	64
ŞEKİL 40-SABİT BESLEME SİNYALLERİNDE ADIM SAYISINA BAĞLI ORTALAMA ADIM BÜYÜKLÜĞÜ HISTOGRAMLARI	65
ŞEKİL 41-X-Y MOTOR ODA SICAKLIĞI TEST DÜZENEGİ.....	67
ŞEKİL 42- DÜŞÜK SICAKLIK TEST CİHAZI	68
ŞEKİL 43- İLERLEYEN ÇALIŞMALARDA KULLANILMASI DÜŞÜNÜLEN BESLEME SİNYALİ ŞEKLİ	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

T_C	: Curie Sıcaklığı (Kelvin)
E_c	:Zorlayıcı elektrik alan (Coercive electrical field) (Volt/ metre)
σ	: Gerilim (Newton/m ²)
σ_c	: Zorlayıcı gerilim(Coercive stress) (N/ m ²)
ε	: Gerinim
ε_R	: Artık gerinim
P	: Kutuplanma
P_R	: Artık kutuplanma
d	: Piezoelektrik sabiti (nanometre / volt)
S^E	:Sabit elektrik alan altındaki elastisite sabiti
X^σ	: Sabit basınç altındaki dielektrik duyunluk sabiti
V	:Elektrik potansiyeli (Volt)
f_1	:Birinci titreşim kipi (Rezonans) frekansı
μ_s	:Statik sürtünme katsayısı
μ_k	:Dinamik sürtünme katsayısı
f_{yay}	:Yay baskı kuvveti (Newton)
g	: Yer çekimi ivmesi (metre/ saniye ²)

Kısaltmalar

Min	: Minimum
Mak	: Maksimum
DS	: Düşük sıcaklık
TUM	: Taramalı uc mikroskobu
TTM	:Taramalı tünelleme mikroskobu

1 GİRİŞ

Geçmiş yarım asırlık sürede bilinenden farklı malzemelerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi çalışmaları fizik, kimya gibi anabilim dallarında çalışan belli grupların yaptığı araştırmaların konusu olmuştur. Günümüzde malzeme konularındaki araştırmaların sonuçlarının teknolojiye kattığı gelişim göz ardı edilemez boyuttadır. Dünya üzerinde malzeme biliminin ilerlemesi ve üstün özellikli malzemelerin ortaya çıkarılması ile daha verimli, daha hafif, daha sağlam ve daha küçük hacimde yer alan üstün özellikli mekanizmaların oluşturulması mümkün hale gelmiştir.

Bahsedilen durumun bir örneği piezoelektrik malzemelerdir. Bu malzemeler gösterdikleri çift yönlü elektromekanik özelliklerden dolayı son dönemlerde birçok sistemde mekanik tahrik elemanı ya da mekanik algılayıcı vb. olarak kullanılan üstün özellikli malzemelerdendir.

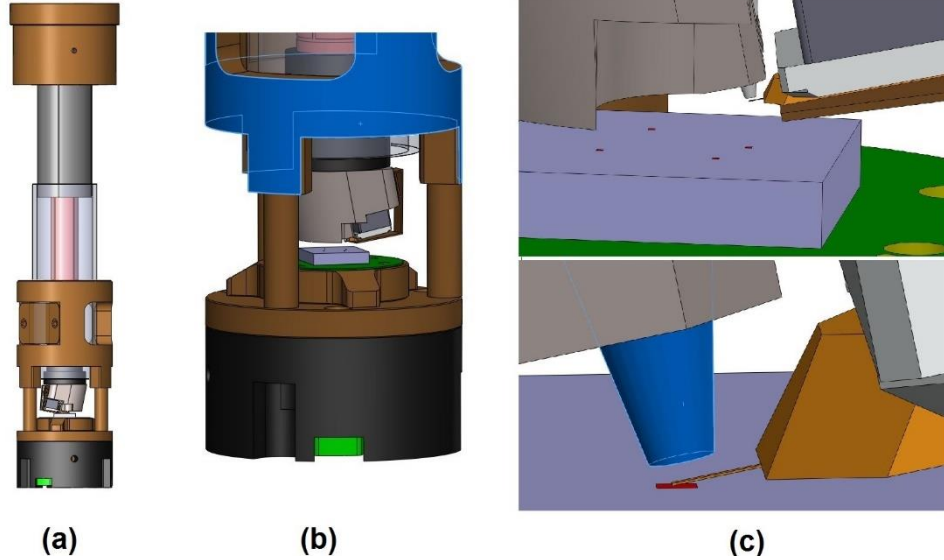
Son otuz yıllık süre ele alındığında çalışma mekanizmaları, bileşenleri ya da sonuçları gözle algılanabilir boyutların altında bulunan çalışmaların çok popüler olduğu görülür. Bu çalışmalar 'nanoteknoloji' ifadesi altında da ele alınır. Bu tarz çalışmalar nanometre mertebesinde algılama yapabilen ve hareket kabiliyetinde olan cihazlar ile yapılmaktadırlar. Bu kabiliyete sahip cihazlardan biri olan taramalı uç mikroskopları (TUM) malzemelerin atomik boyutlarda fiziksel özelliklerinin görüntülenmesinde kullanılır.

Taramalı tünelleme mikroskobu (TTM), taramalı uç mikroskopları ailesinin geliştirilen ilk temsilcisidir. 1981' de geliştirilen ilk TUM, sahiplerine 1986 Nobel ödülünü kazandırmıştır [1]. TUM'da ucunun büyüklüğü birkaç atom olacak kadar sivri bir metal kullanılır. İletken metal uç örnek yüzeyine piezoelektrik motorlar kullanılarak bir kaç atom çapı mesafeye kadar yaklaştırılır. Örnek ile uç arasında uygulanan elektrik alan; elektrik alanın yönüne bağlı olarak değişen bir tünelleme akımı yaratır. Akımı sabit tutacak şekilde uç yüzeyde gezdirilerek yüzeyin atomik boyutta topografik görüntüsü elde edilebilir. Ayrıca bu yöntemle malzeme yüzeyindeki elektronların enerjisi ve yoğunlukları ölçülebilir.

Atomik kuvvet mikroskobu (AKM) taramalı uç mikroskoplarının diğer bir üyesidir. AKM'ler örnek ile tarama ucu arasındaki kuvvet etkileşimlerinin ölçülmesi prensibi ile çalışır ve 1985 yılında geliştirilmiştir [2]. Bir yayın üzerine mikrofabrikasyon teknikleri ile imal edilmiş uç ile örnek arasındaki kuvvet etkileşimleri, malzemelerin yüzeylerinin fiziksel özelliğinin atomik boyutlarda görüntülenmesinde kullanılır. Uç manyetik bir malzeme ile kaplandığında, örnek yüzeyinin manyetik haritası çıkarılabildiği gibi, metal bir malzeme ile kaplandığında yüzeyin elektrikselsel haritası çıkarılabilir.

TUM'lar atmosfer koşullarında çalışabildiği gibi, vakum, ultra-yüksek vakum, düşük sıcaklık ve manyetik alan altında da çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1'de NanoManyetik Bilimsel Cihazlar Ltd.'nin geliştirdiği bir DS-TUM'nun katı modeli görülmektedir. Bu AKM, 1.5 kelvin ile 300 kelvin sıcaklık aralığında ve 15 Tesla gibi

yüksek manyetik alan altında çalışan ticari bir üründür. DS-TUM ile ölçülen tipik örneklerin eni ve boyu 10mm, yüksekliği 5mm olan bir hacim içindedir. Bu hacim içinde farklı kalınlık ve genişlikteki örneklerin bilgi edinilecek bölgesine tarama ucunun hassas şekilde yaklaşabilmesi ve o konumda tutulması tarama işleminin en temel operasyonudur. DS-TUM sistemindeki bu hareket işlemlerinin tamamı piezoelektrik motorlar ile yapılır.



Şekil 1-(a)Nanomanyetik Bilimsel Cihazlar firması düşük sıcaklık atomik kuvvet mikroskobu,(b)Mikroskobun örnek tutucusunun yakından görünüşü, (c) Tarama ucunun bir seferde yüzeyde tarayabildiği alan (kırmızı ile gösterilmiştir)

Firmanın ürettiği DS-TUM'lar için oda sıcaklığındaki tipik tarama alanı $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ve 4 Kelvin sıcaklığında tipik tarama alanı $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 'dir. Bu sebeple örnek yüzeyinde bir başka bölge hakkında bilgi edinmek istenildiğinde örneğin yatay düzlemde hareket etme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

1.1 Problem Tanımı

Nanometre mertebesinde hassasiyetlerde yapılmak istenilen çalışmalarda belirtilen hassasiyetlerde çalışan mekanik hareket sistemlerinin gerekliliği açıktır. Tez konusu olarak seçilen bu çalışmada öncelikle atmosfer koşulları altında çalışacak ve nanometre mertebesinde hareketi sağlayacak tek eksenli bir piezoelektrik motor uygulaması ele alınacaktır. Yapılan piezoelektrik motorların besleme voltaj genliği ve mekanik yüke karşı performansları değerlendirilecektir.

Yapılan ikinci çalışma aynı prensiplerle çalışılan ortogonal iki eksenli piezoelektrik motor mekanizmasıdır. Bu mekanizma düşük sıcaklık taramalı uç mikroskobuna (DS-TUM) uygun olarak geliştirilecektir. Yapılacak çalışmada sıcaklığın geliştirilmeye çalışılan piezoelektrik motor üzerindeki etkileri incelenecektir.

1.2 Motivasyon

Tezin problem konusu olarak belirtilen mekanik cihazlar; dünya üzerinde daha önceden çalışma konusu olarak seçilmiştir. Bu cihazların ürün olarak kullanıcıya

sunulmuş örnekleri mevcuttur. Hedeflenen özelliklerde çalışan mekanizmaların yapılabilir olduğu görülmektedir. Bu nedenle çalışmalar sırasında ilham alınabilecek farklı kaynaklar mevcuttur.

Tez konusu için başka bir motivasyon sebebi; ülkemizde bu konu hakkında yapılmış olan çalışmaların yaygın olmaması ve ülkemizde bu tarz mekanizmalar ile çalışan ticari ürünlerin çok az olmasıdır. Çalışmaların başarılı olması durumunda ülkemiz için yeni sayılabilecek bir ürünün ortaya çıkarılabilecek olması ve mevcut bir sistemin geliştirilmesi diğer bir başka motivasyon sebebidir.

1.3 Tez Çalışmasının Amacı

Tez çalışmasında amaçlanan; nanometre mertebesinde tek eksen ve ortogonal iki eksen hareket serbestliğinde iki farklı piezoelektrik motor oluşturmaktır. Laboratuvar örneklerini rahatça taşıyabilme kapasitene sahip olması hedeflenen motorların imalatının yapılarak oda koşullarında gerekli testlerin yapılması ve çalışabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. İstenilen sonuca ulaşıldıktan sonraki aşamada iki eksenli motor için hedeflenen; kriyojenik sıcaklık altında testlerin yapılarak mekanizmanın çalışabilirliğini test etmek ve gerekli düzenlemelerin tespit edip bu ortamlarda da çalışabilirliğini sağlamaktır.

Yapılacak olan motorların başarılı olması halinde tek eksenli motorun atmosfer koşullarında çalışan herhangi bir sistemde hassas konumlandırma motoru olarak kullanılabilmesi, ortogonal iki eksenli hareket eden motorun ise tarama mikroskoplarında numune tutucu olarak kullanılması amaçlanmaktadır. Bu sayede kullanıcı numune yüzeyi üzerinde rastgele bir bölgede tarama yapmak istediğinde dışarıdan mekanik bir müdahalede bulunmadan numunesini hassas bir şekilde hareket ettirebilecektir. Bu işlevsellik kriyojenik sıcaklık ortamlarında yapılan çalışmalarda zamandan kazanç sağlayacaktır. Kriyojenik sıcaklık sistemleri kapalı ve dışardan mekanik müdahaleye olanak vermeyen sistemlerdir. Sistemde böyle bir işlevsellik mevcut olduğunda gerekli ölçüm koşulları oluşturulduktan sonra örnek üzerinde farklı bölgelerde ölçüm alma işlemi için ortam sıcaklığı değiştirilmediğinden zamandan ve enerjiden tasarruf sağlanacaktır.

2 LİTERATÜR

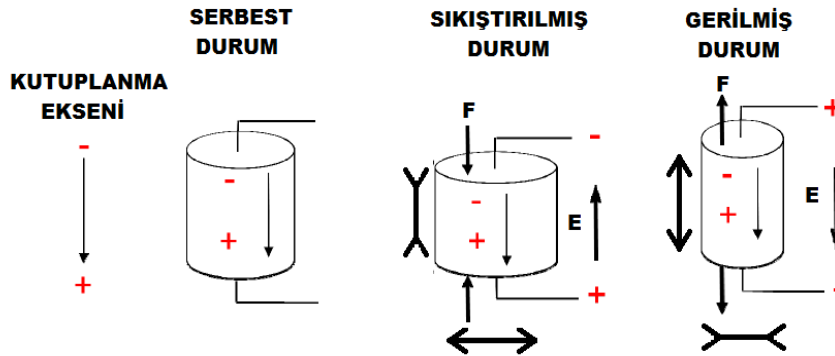
2.1 Piezoelektrikler

Günümüzde doğal yapıları sebebiyle bazı ayrıcalıklı fiziksel özelliklere sahip olduğu bilinen malzemeler ile aynı özellikleri gösterdiği bilinen bazı sentez malzemeler mevcuttur. Üzerine mekanik bir etki uygulandığında etkiye elektriksel tepki gösteren piezoelektrik malzemeler bunlardan bir tanesidir. Piezoelektrik malzemelerin bu durumu tersinirdir. Piezoelektrikler; üzerine elektriksel bir etki verildiğinde ise etkiye mekanik tepki vermektedirler. Bu bölümde piezoelektrik malzemelerin geçmişi, fiziksel yapıları, mekanik ve elektriksel özellikleri hakkında bilgiler verilmeye çalışılacaktır.

2.1.1 Direk ve Ters Piezoelektrik Etki

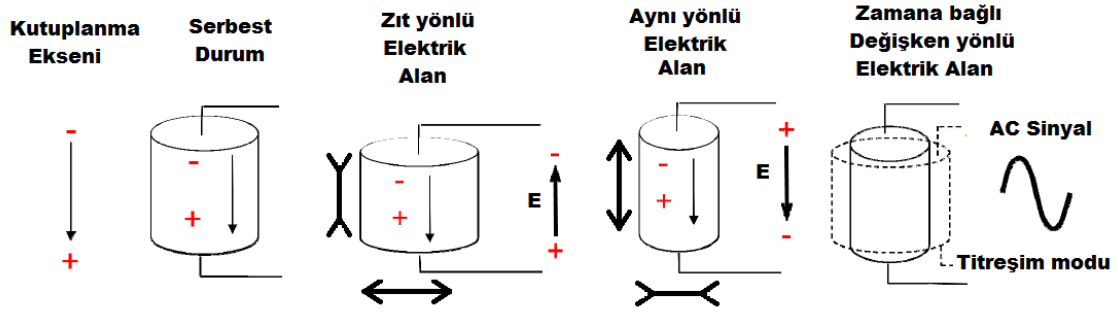
Malzemeler üzerine belli mekanik bir kuvvet uygulandığında malzeme üzerinde gerilim oluşturulmuş olunur. Oluşan bu gerilim sonucunda malzeme mekanik etkiye geometrik olarak şekil değiştirerek cevap verir. Bu şekil değişikliği 'gerinim' olarak adlandırılır.

Direk piezoelektrik etki; malzeme üzerinde bir sebeple oluşturulan gerinim sebebiyle malzemenin karşılıklı iki yüzeyi arasında elektrik yükü dolayısıyla elektrik alan oluşması durumudur. Bu elektrik alanın yönü ve büyüklüğü malzemede oluşturulan gerinimin yönü ve büyüklüğü ile ilişkilidir (Şekil 2).



Şekil 2-Direk Piezoelektrik Etki

Ters piezoelektrik etki; malzemenin karşılıklı iki yüzeyi arasında bir elektrik alan uygulandığında malzemenin geometrik olarak şekil değiştirmesi yani malzeme üzerinde gerinim oluşması durumudur. Oluşacak gerinimin yönü ve büyüklüğü malzemeye uygulanan elektrik alanın yönü ve büyüklüğü ile ilişkilidir. Piezoelektrik malzeme üzerine zamana bağlı yönü ve şiddeti değişken bir elektrik alan uygulandığında ise malzeme üzerinde elektrik alan frekansı ile aynı frekansta mekanik titreşim oluşur (Şekil 3).



Şekil 3-Statik ve zamana bağlı değişken ters piezoelektrik etki

2.1.2 Tarihte Piezoelektrik Kavramı?

Piezoelektrik kelimesi Yunanca 'piezin' yani baskı kelimesinden gelen ve muhtemelen o dönemde direk piezoelektrik etkiyi açıklamak için ortaya atılan bir ifade olarak bilim dünyasına giriş yapmıştır.

1815 yılında Coulomb'un malzemelere uygulanacak basıncın elektriksel oluşumuna yol açacağı konusunda bir teoriyi ortaya atması ile bu kavram ilk olarak gündeme gelmiştir.

1820 yılında Hauy ve Becquerel'in deneyleri malzemenin sıkıştırılması ile yüklerin oluşacağını önermiş ve bunun nedeninin sürtünme ile elektriklenme olacağını söylemiştir. Kristal minerallerde de gerilmiş kauçuk malzemelerdekine benzer şekilde yük üretiminin olacağını öngörmüştür.

1880 yılında Pierre ve Jacques Cruie piezoelektrik olayı keşfetmişlerdir.

1917 yılında Langevin ve onun çalışma arkadaşları ilk ciddi uygulamaları I. Dünya savaşı sırasında geliştirmişlerdir. Tasarladıkları bir piezoelektrik dönüştürücü ile denizaltıların yerlerini ve buldukları derinlikleri tespit etmeyi başarmışlardır.

1920 ve 1940 yılları arasında tek kristal kullanarak uygulamalar geliştirilmiştir. Kuartz rezonatörler, katı ve sıvılar için malzemeye zarar vermeyen sonar test yöntemleri ve geçici basınç ölçme işlemleri üzerinde uygulamalar yapılmıştır.

1940 ve 1965 yılları arasında Amerika, Japonya ve Sovyetler Birliğinin önderliğinde II. Dünya savaşı sırasında piezoelektriklerin üretecekleri gücün ve hassasiyetlerinin artırılması üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu malzemeler elektronik dalga üreteçleri ve filtrelerde kullanılmıştır. Bunlara ek olarak daha iyi piezoelektrik malzemelerin üretilmesi için araştırmalar yapılmış ve yeni piezoelektrik alaşımlar ortaya çıkarılmıştır. Malzemelere metalik safsızlıklar eklenerek malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Birçok devre elemanı, mikروفon ve güçlü sonar sistemlerde bu malzemeler kullanılmıştır.

1965 ve 1980 yılları arasında Japonyanın ticari bir başarısı olarak polimer malzemeden bir piezoelektrik malzeme üretimi yapılarak seramik piezoelektriklerin sahip olduğu doğal limitler aşılmaya çalışılmıştır [3].

1980 den sonraki süreçte ise 1970'lerde geliştirilen birçok piezoelektrik malzeme günümüzde bile yüksek güvenilirlik, düşük güç tüketimi ve hızlı tepki gerektiren; şok emici, ivmeölçer, kamera objektifleri ve nanopozisyonlayıcı gibi cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.1.3 Piezoelektrik Malzemeler ve Atomik Yapıları

Piezoelektrik malzemeleri iki grupta sınıflandırmak mümkündür. Bunlardan birincisi doğal yani doğada bulunan ve kendiliğinden bu özelliğe sahip olanlar diğeri ise ticari amaçlar ve teknoloji amaçlı imal edilerek oluşturulan yapay piezoelektrik malzemelerdir. İkinci grubu da tekrar türlerine göre seramik ve polimer malzemeler olmak üzere iki sınıfa ayırmak mümkündür.

- Doğada bulunan doğal piezoelektrikler;
Kuartz, turmalin, sodyum potasyum tartarat ve roşel tuzlarıdır.
- Seramik piezoelektrikler;
PZT ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) , PT (PbTiO_3), PLZT ($\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ve oksijen-octahedral tip ferroelektrik tozların sinterlenmiş karışımlarıdır.
- Polimer piezoelektrikler,
PVDF (polyvinylidene flouride)' lerdir.[3]

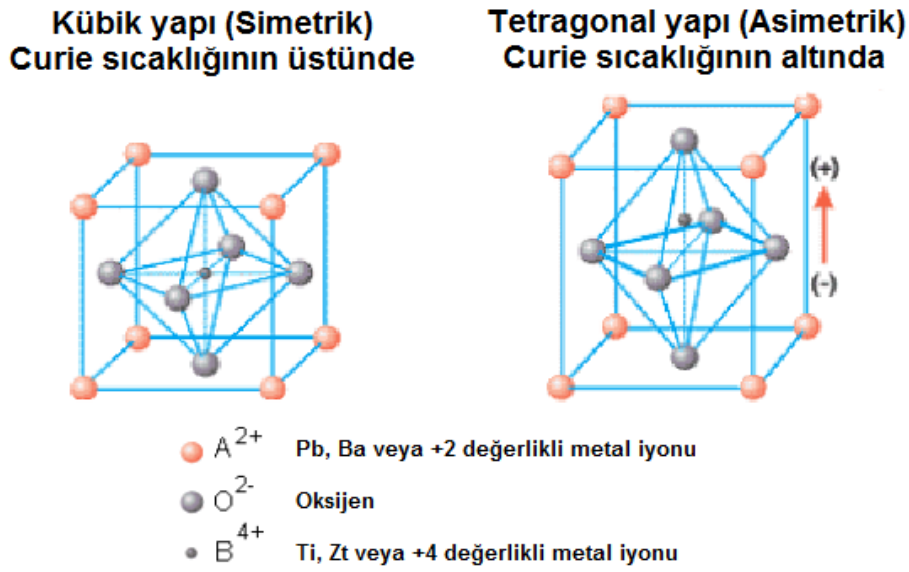
Piezoelektrik malzemelerin geneli kristal yapıları katılar sınıfında yer almaktadır. Kristal yapı, yapıyı oluşturan atomların sabit bir dizilim ile oluşturdukları birim hücrelerin kendini malzeme boyunca tekrar etmesi ile meydana gelir; bu nedenle bu yapılar çok düzenli yapılardır. Yığın kristal malzemelerin fiziksel özelliklerini anlayabilmek için öncelikle birim hücrenin yapısal özelliklerini anlaşılmalıdır. Piezoelektrik malzemelerin tipik birim hücreleri asimetric perovskite yapısındadır. Bu yapı içindeki asimetricin sebebi yapı içerisinde yer alan pozitif ve negatif yüklü elemanların birbirleri ile etkileşimidir. Malzemenin sahip olduğu farklı yüklerdeki atomların dağılımı ile elektrik dipoller meydana gelir.

Kristal yapılar mekanik bir etki ile basınca maruz bırakıldığında bu etki yapı içerisindeki atomların pozisyonlarında ve birbirleri ile olan mesafelerde değişikliğe sebep olur. Bu pozisyon değişikliği sebebi ile kristal içindeki dipolleri oluşturan yüklerin mesafelerinde de değişim meydana gelir. Birim hücre içerisindeki elektrik dipol dağılımının değişikliği kristal yüzeyleri arasındaki net polarizasyonun değişmesine sebep olur. Bu değişim sebebi ile yapı üzerinde net bir elektriksel potansiyel gözlenir. Bu olay direk piezoelektrik etki olarak bilinir.

Piezoelektrik malzeme içerisindeki elektrik dipoller bir elektrik alana maruz kaldığında malzeme içerisindeki dipolü oluşturan elektriksel yükler elektrik alanın

sebepe olduğu elektrostatik kuvvetler sebebiyle birbirinden uzaklaşacak ya da yakınlaşacaklardır. Dipollerin bu hareketi malzeme geometrisinde şekil değişikliğine sebep olur. Bu olay ters piezoelektrik etki olarak bilinir.

Piezoelektrik etkinin kristal yapıdaki asimetri sonucunda olduğunu belirtilmişti. Ancak piezoelektrik malzemelerin sahip olduğu atomik kristal yapı sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterir. Belli bir 'Curie sıcaklığı' (T_c) olarak isimlendirilen sıcaklığın üzerinde kristal yapıdaki atomların enerjileri belli bir seviyeye ulaştığı için atomik dizilimleri değişir ve atomik kristal yapı simetrik bir yapıya dönüşür (Şekil 4). Mevcut asimetrinin yok olması sebebiyle elektrik dipoller ortadan kalkar ve malzemenin piezoelektrik özelliği kaybolur.

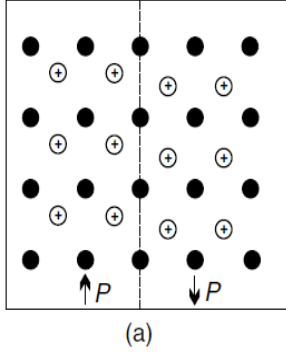


Şekil 4-Piezoelektrik kristal örgüsü (Waanders 1991)

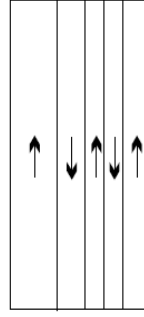
2.1.4 Mikroskobik Düzeyde Piezoelektriklik

Piezoelektrik malzemelerin kendini tekrar eden birim hücreler tarafından meydana gelen düzenli kristal yapıları olduğu belirtilmişti. Birim hücrelerin düzenli dizilimi kristal içerisinde belli bölgelerde görülürken kristal içindeki diğer bölgeler zıt yönlü elektrik dipol dizilimine sahip olabilir. Bu şekilde dizilime sahip bölgelere ferroelektrik domain denir.

Şekil 5.a 'da ferroelektrik domain sınırında iki komşu domain için atomik dizilim şematik olarak gösterilmektedir. Şekil 5.b 'de komşu domainlerin polarizasyon şematiki görülmektedir. Şekil 6' da taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile alınmış PZT seramiğinin domain yapısı görülmektedir. [4]

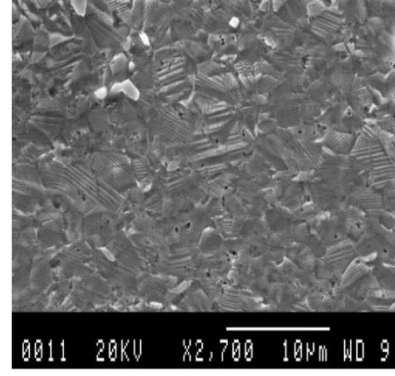


(a)



(b)

Şekil 5-(a)Domain sınırları içinde atomik yerleşim (b)Ferroelektrik malzemedeki domainler

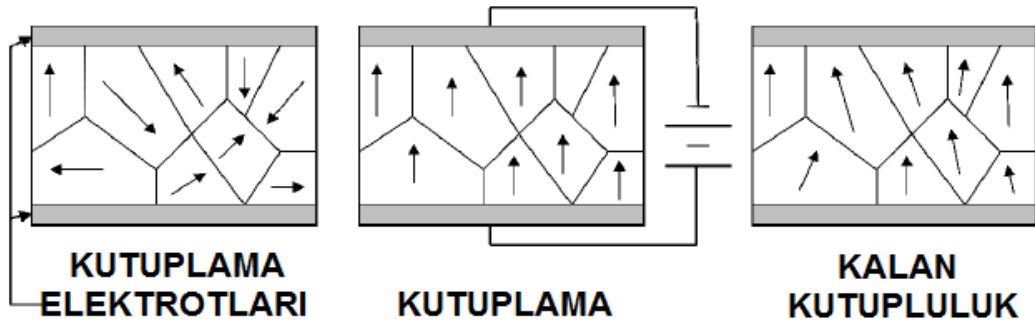


Şekil 6-SEM mikroskobu ile alınmış PZT seramik domain yapı görüntüsü (J. Brünahl, 2003)

2.1.5 Kutup ve Kutuplama

Ferroelektrik seramikler çoklu kristal yapıda oldukları için birçok farklı yönelimde domain ve grainler içerirler. Bu farklı yönelimdeki domainler sebebiyle ferroelektrik seramikler üretildiklerinde piezoelektrik özellik göstermezler çünkü malzeme içerisindeki net polarizasyon sıfırdır. Malzemenin piezoelektrik özellik gösterebilmesi için kutuplanması gerekmektedir.

Ferroelektrik seramik malzemeler sahip oldukları karakteristik Curie sıcaklıklarının (T_c) üstünde bir sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında atomik yapılarının değiştiğini belirtildi. Kutuplanma işleminde öncelikle ferroelektrik malzeme kritik sıcaklık değerinin üzerinde bir sıcaklığa getirilerek kristal yapı diziliminin simetrik dizilime geçmesi sağlanır. Bu koşullar altında malzeme üzerine kutuplanması istenilen ekseninde yüksek değerinde sabit elektrik alan uygulanır. Bu aşamada bir süre bekletilen ferroelektrik malzeme sonrasında mevcut elektrik alan sabit tutularak kritik Curie sıcaklığının altında bir sıcaklığa kadar soğutulur. Soğuma işlemi sırasında malzemenin kristal yapısı tekrar asimetric dizilime geçerken mevcut elektrostatik kuvvet sebebi ile yapı asimetrisinin zorla yönlendirilmesi sağlanır. Bu işlem sırasında domainlerden bazıları tamamen, bazıları ise kısmen bir hizaya gelir. Tamamen hizaya geçen domain dipollerinin sayısı uygulanan elektrik alanın şiddetine, sıcaklığa ve malzemenin ne kadar süre elektrik alan altında beklediğine bağlıdır (Şekil 7).



Şekil 7- Piezoelektrik etki oluşturmak için seramik malzemeye yapılan kutuplama işlemi

Kutuplama işlemi için örnek olarak 130°C ile 220°C sıcaklıkları arasında bir yağ banyosu altında 2kV/mm ile 4kV/mm elektrik alan değeri altında olduğu söylenebilir.[3]

Kutuplama işlemi sırasında malzeme içerisindeki dipollerin tek yönlü diziliminin sağlanması sebebiyle kutuplama elektrotları arasında kalan eksende malzeme üzerinde kalıcı olarak boyca artış gözlenir (Şekil 8).



Şekil 8-Piezoseramiklerin kutuplanma işleminin şematik gösterimi (J.Brünahl 2003)

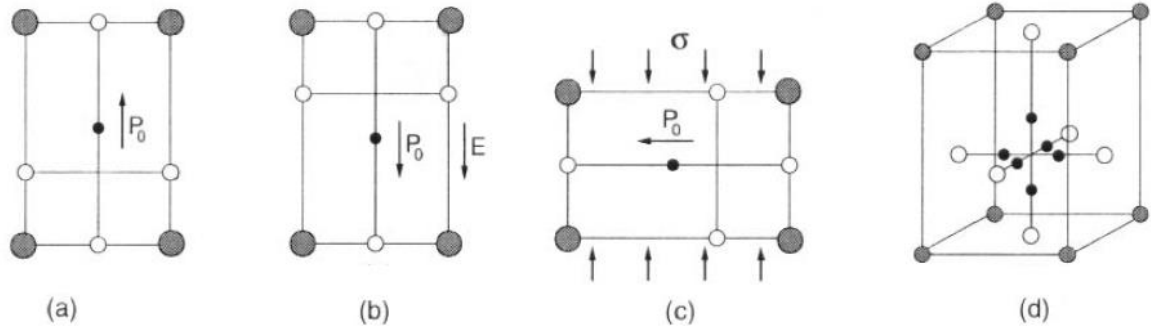
2.1.6 Ferroelektrik-Ferroelastik Dönüşümler

Kutuplanmış olan ferroelektrik malzemelerin kutuplanma doğrultusu ve yönü bazı durumlar altında değişebilir. Bu durum için malzemenin kristal yapısında merkezde bulunan ve kutuplanma yönü ile doğrultusunu belirleyen atomu, enerji aktararak bulunduğu kararlı enerji düzeyinden çıkarmak yeterlidir. Malzemeye enerji aktarımı iki şekilde gerçekleşir;

- Malzemeye polarizasyon yönüne ters yönde şiddetli bir elektrik alan uygulanarak,
- Malzeme üzerine mekanik kuvvet uygulayıp malzemeyi gerilim altına alarak.

İlk durum için aşılması gereken minimum elektrik alan değeri ' E_c ' zorlayıcı alan değeri olarak ifade edilirken ikinci durum için aşılması gereken minimum gerilim değeri ' σ_c ' zorlayıcı gerilim değeri olarak ifade edilir. $E=E_c$ ve $\sigma=\sigma_c$ durumları net kutupluluk değerinin sıfır olduğu durumlardır. Şekil 9.a'da belli bir P_0 kutupluluğuna sahip $PbTiO_3$ molekülü görülmektedir. Şekil 9.b'de yapı üzerine $E>E_c$ alanı uygulandığında merkez atom elektrik alan etkisi ile yer değiştirerek malzeme kutupluluğunun 180° derece döndüğü görülmektedir. Şekil 9.c'de kutupluluk ekseninde sıkıştırılarak malzeme üzerinde oluşan $\sigma>\sigma_c$ gerinimi sonucu kutupluluğun 90° derece döndüğü durum görülmektedir.

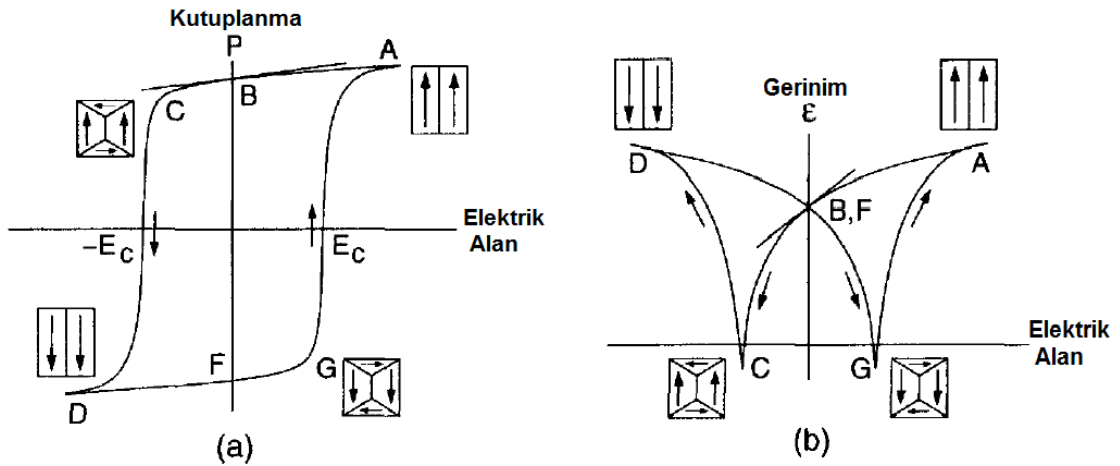
Şekil 9.d'de tetragonal yapı içerisinde kutupluluğa sebep olan merkez atomun bulunabileceği altı farklı minimum enerji durum görülmektedir.[5] Buna göre malzemenin kartezyen uzayda altı farklı kutupluluk durumunun mevcut olduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 9-(a)PbTiO₃ için doğal P₀ kutup durumu (b) $E > E_c$ elektrik alanı altında 180° derece dönmüş Ferroelektrik dönüşüm (c) $\sigma > \sigma_c$ gerilimi altında 90° derece dönmüş Ferroelastik dönüşüm(d) Tetragonal yapılarda merkez atom için mevcut altı minimum enerji konumu (R.C.Smith 2004)

2.1.7 Piezoelektriklerde Histerisis ve Doğrusalsızlık

Ferroelektrik malzemelerin sahip olduğu önemli bir özellik; malzemeye uygulanan elektrik alan ve gerilim ile malzemenin tepki olarak gösterdiği kutuplanma ve gerinim arasındaki ilişkide gözlenen histerisis ve doğrusalsızlık davranışdır(Şekil 10). Histerisis direk olarak ferroelektrik yapıdaki merkezciil asimetriklik ile ilişkilidir.



Şekil 10-(a)Artık kutuplanma P_R 'nin meydana geldiği B noktasında histeristik elektrik alan-kutuplanma ilişkisi ve doğrusal yaklaşım (b)Artık gerinim ϵ_R 'nin meydana geldiği B noktasında histeristik elektrik alan-kutuplanma ilişkisi ve doğrusal yaklaşım (R.C.Smith 2004)

Şekil 10' da görülen şemada ferroelektrik malzemenin gösterdiği davranışın adım adım fiziksel ifadesi şöyledir;

A noktası: Yeterince yüksek şiddette pozitif alan altında bütün dipoller alan ile birlikte bir dizilime geçerler. Malzeme sanki tek domainden oluşuyormuş gibi davranır. Alan şiddetinin bu noktanın ötesinde artırılması ile oluşan iyon hareketi birim hücrede doğrusal bir davranışla tersinebilir esnemeye neden olur.

B noktası (Pozitif artık etki): Uygulanan elektrik alan sıfırdır. Malzeme bu noktada pozitif artık kutupluluk (P_R) ve artık gerinim (ϵ_R) gösterir. Bu noktada malzemeye uygulanacak küçük şiddetli alan P ve ϵ üzerinde neredeyse doğrusal ve tersinir değişikliklere sebep olur. Bu bölgede bir sonraki kısımda anlatılan doğrusal direk ve ters piezoelektrik etki eşitlikleri uygulanır.

C noktası: Uygulanan elektrik alan negatif zorlayıcı alan değerine ($-E_c$) yaklaştığında kutupluluk yönü dönmeye başlar. Eğrinin hızlı değiştiği noktada dipoller 180° derecelik dönüşlerini gerçekleştirirler. 180 derecelik dönüşünü gerçekleştiren dipoler mekanik gerinim üzerinde etkili değildirler. Negatif gerinim durumu dipollerin 90° derecelik dönüşleri sırasında görülür.

D noktası: Bu noktada malzemedeki bütün dipoller uygulanan negatif alan yönünde dizildikleri için malzeme tek domain gibi davranır. Kutuplanma yönü A noktasındaki ile ters yönlü olmasına rağmen gerinim miktarı A noktasındaki ile aynı değerdedir. A noktasında görülen mekanik esnemenin aynısı negatif alan şiddetinin artırılması ile bu noktada görülür

F noktası (Negatif artık etki): Elektrik alanın artırılarak sıfır değerine gelmesiyle birlikte malzeme üzerinde negatif artık polarizasyon ($-P_R$) görülür. Küçük elektrik alan değişikliklerinde B noktasındaki P ve ϵ mekanizma burada da geçerlidir.

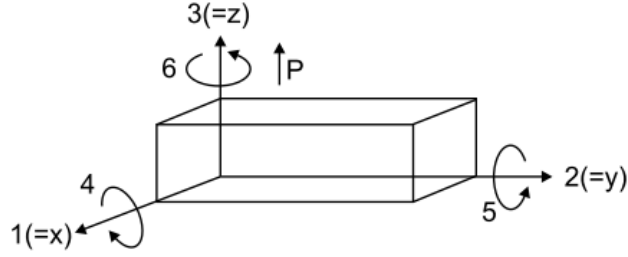
G noktası: 180° derecelik domain dönüşleri sebebiyle E-P arasındaki hızlı geçiş burada da vardır. E- ϵ eğrisinde görülen negatif gerinim 90° lik dipol dönüşleri etkisinden kaynaklanmaktadır. Elektrik alan değerinin E_c zorlayıcı alan değerinden doyum noktasına kadar artırılması ile tekrar A noktasına dönüş yapılır ve malzeme tekrar tek domain davranışı sergiler.[5]

2.1.8 Doğrusal Piezoelektrik model

Kutuplanmış ferroelektrik malzemelerin piezoelektrik davranış gösterdikleri daha önceki kısımlarda belirtildi. Piezoelektrik malzemelere uygulanacak elektrik alan ve gerilimlerin E_c ve σ_c eşik değerlerine ulaşmadıkça doğrusal davranış gösteriyormuş gibi kabul edilebilir.

Bu kısımda ilk olarak matematiksel eşitliklerinden bahsedilecek olan seramik piezoelektrik malzemelerin ifade edileceği uzay tanımlanacaktır. Matematiksel olarak çalışılan uzay sırasıyla x , y , z ya da 1, 2, 3 olarak isimlendirilen üç ortogonal eksenden meydana gelir. Malzemeyi 3. Eksen olan z eksen doğrultusunda kutuplu olarak tanımlayalım. 1, 2 ve 3 eksenleri doğrultusu dışında gerçekleşecek olan kesme hareketlerini 4, 5, 6 indisleri ile ifade edelim. Tanımladığımız uzay içerisinde elektrik ve mekanik parametreler çift alt indis (d_{ij}) ile tanımlanır. Bu indislerden

birincisi malzemenin uyarılma yönünü, ikincisi ise malzemenin tepki gösterdiği yönü ifade eder (Şekil 11).



Şekil 11- 3. Eksen doğrultusunda kutuplanmış piezoelektrik seramik için ortogonal uzay şeması. (J.Brünahl 2003)

Kutuplanma ile ilgili bölümde malzeme üzerinde oluşturulan gerilimin şiddeti ile orantılı olarak kutuplanmada değişikliğe sebep olduğu belirtildi. Eşitlik 2.1 malzeme üzerinde bir elektrik alan yok iken gerilime bağlı olarak kutuplanmanın değişimini ifade eder.

$$P = d \sigma \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1 de görülen 'd' piezoelektrik sabitidir. Kartezyen uzayda P vektörel bir parametredir ve gerilim matrisinin (σ_{ij}) her bileşeni ile ilişkilidir. Bu sebeple eşitlik şu şekilde düzenlenir.

$$P_n = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 d_{nij} \sigma_{ij} = d_{nij} \sigma_{ij} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2 'nin çözümü Einstein toplama kuralı ile bulunur. Tekrar eden indisler otomatik olarak toplanır. Sonuç olarak 27 sabit katsayı ile 3. Dereceden bir tensör meydana gelir.

Kutuplanma için ikinci durum ise elektrik alana bağlı durumdur. Doğrusal çalışma bölgesinde kutuplanma eşitlik 2.3 ile ifade edilir.

$$P_n = X_{nm}^{\sigma} E_m \quad (2.3)$$

X_{nm}^{σ} malzemenin sabit basınç altındaki dielektrik duygunluğudur. Eşitlik 2.2 ve 2.3 bir araya geldiğinde doğrusal çalışma bölgesinde kutuplanma eşitlik 2.4'deki gibi düzenlenir.

$$P_n = d_{nij} \sigma_{ij} + X_{nm}^{\sigma} E_m \quad (2.4)$$

Bu eşitlik polarizasyon için geçerli doğrusal modeldir.

Gerinim değişimi ise Hooke yasası ile malzemenin E- ϵ ilişkisi birleştirilerek elde edilir ve eşitlik 2.5 'deki gibidir.

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl}^E \sigma_{kl} + d_{nij} E_n \quad (2.5)$$

S_{ijkl}^E dördüncü dereceden bir tensördür ve sabit elektrik alan altında malzemenin elastisite sabitidir. 'd' parametresi bu eşitlikte de piezoelektrik sabitidir.

2.4 ve 2.5 eşitlikleri birbirleri ile ilişkilendirilerek sistem içerisindeki simetritler de dikkate alınarak gerekli düzenlemeler yapıldığından piezoelektrik malzemeler için direk ve ters piezoelektrik etki sebebiyle malzemede görülecek değişimleri ifade eden matris eşitliğine ulaşılır (Eşitlik 2.6).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ - \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & d_{31} \\ S_{12}^E & S_{22}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & d_{31} \\ S_{13}^E & S_{13}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 & | & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & | & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}^E & | & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & + & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & | & X_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & | & 0 & X_{11}^\sigma & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & X_{33}^\sigma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \\ - \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Ters ve direk piezoelektrik etki için eşitliklerin denklem olarak ifadesi 2.7 da görülmektedir.

$$\varepsilon = S^E \sigma + d^* E \quad ; \quad P = d \sigma + X^\sigma E \quad (2.7)$$

d^* ifadesi d 'nin tranpoz matrisidir [5].

Tezin çalışma konusu olan doğrusal hareket mekanizmalarında elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren yani elektrik motoru gibi çalışan bileşen piezoelektrik malzemelerdir. Literatürde piezoelektriklerin kutuplanma eksenine doğrultusunda gerçekleşen gerinim değişimini kullanan mekanizmalar[6] mevcut olduğu gibi kutuplanma yönüne dik yöndeki gerinim değişimini kullanarak çalışan mekanizmalar da mevcuttur. Bu mekanizmalarda piezoelektrik kesme (shear) kipi gerinim hareketi yapar.

Bir piezoelektrik malzemenin kesme gerinim gerçekleştirilmesi için kutuplanma doğrultusuna dik yönde elektrik alan uygulanmasına ihtiyaç vardır. Örneğin kutuplanma eksenine 3. eksen yani z eksenine olan bir piezoelektrik malzeme üzerine 2. eksen doğrultusunda elektrik alan uygulanması durumunda kesme hareketi gözlenir.

Böyle bir durum için eşitlik 2.6 ile verilen matris; malzeme üzerinde herhangi bir gerilim olmadığı ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$) durumda ve yalnızca tek ekseninde elektrik alan uygulandığında ($E_1 = E_3 = 0$) sadeleşerek eşitlik 2.8 'daki duruma indirgenir.[4]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix} \gggg \varepsilon_4 = d_{15} \cdot E_2 \quad (2.8)$$

Tez çalışmaları sırasında yapılacak olan sabit mekanik gerilim altında kesme kipinde tek eksende elektrik alan beslemesi ile gerçekleştirilecek olan uygulamalar da gerilim değişimi eşitlik 2.8' deki ifade ile hesaplanabilir.

2.2 Doğrusal Hareket Tahrik Mekanizmaları

Ele alınacak olan bu başlık altında piezoelektrik doğrusal hareket mekanizmalarının diğer doğrusal hareket mekanizmalarına göre olan avantajlarından bahsedilecektir.

2.2.1 Pnömatik ve Hidrolik Tahrik Mekanizmaları

Pnömatik ve hidrolik sistemler günümüzde birçok mekanik yapı içerisinde hareket tahrik sistemleri olarak kullanılmaktadır. İki sistemde de kontrol edilen unsurun basınç olması sebebi ile basınçlandırılan hacimlerin kesit alanları üzerinde değişiklik yaparak çok küçük kuvvetler ile yüksek ağırlıktaki sistemleri hareketlendirmek mümkün hale gelmektedir.

Pnömatik ve hidrolik sistemlerdeki en belirgin farklılık pnömatik sistemlerde mekanik enerjinin ve kuvvetin aktarılmasında basınçlandırılmış gaz kullanılırken hidrolik sistemlerde ise gaz yerine basınçlandırılmış sıvıların kullanılıyor olmasıdır.

Pnömatik sistemlerin hidrolik sistemlere göre avantajlı olduğu durumlardan biri daha düşük basınçlar ile çalışabiliyor olmaları ve kuvveti aktarmak için ortamdaki havayı kullanabiliyor olmalarıdır. Pnömatik sistemlerin kullanışsız olduğu durumlarda vardır. Özellikle hız ve mesafe kontrolünün gerekli olduğu sistemlerde pnömatik mekanizmalar kullanışlı değildir.

Pnömatik sistemlerde basınçlandırılacak gaz bir kompresör yardımı ile bir tank içinde biriktirilerek belli bir basınçta depolanır. Tank çıkışlarında bulunan regülatörler vasıtasıyla basınçlandırılmış gaz sabit bir basınç değerinde tanktan dış ortama aktarılır. Sisteme hareket verilmek istendiğinde regülatör çıkışından hortum ya da borular vasıtasıyla pistonlara taşınan basınçlı gaz pnömatik piston veya motorlara ulaşarak hareket sağlanır. Hareket yönü pnömatik valfler kullanılarak kontrol edilir.

Hidrolik sistemlerde kullanılan ekipmanlar pnömatik sistemdeki ekipmanlara yakındır. Bir tank içerisinde bulunan hidrolik sıvısı pompalar yardımı ile akış hattı içerisine aktararak piston içerisine basılıp piston kolunun hareketi sağlanmaktadır. Hareket yönü ise hidrolik valfler kullanılarak değiştirilebilmektedir.

Hidrolik ve pnömatik sistemler sahip oldukları birçok avantaja rağmen tez kapsamında kullanılacak doğrusal taşıyıcı için hedeflenen amaçta uygun

sistemler değillerdir. Çalışma mekanizmaları dolayısıyla birçok büyük hacimli elemana ve mekanik aksama ihtiyaç duymaktadırlar.

Hidrolik ve pnömatik sistemlerin en büyük zaafı ise sıcaklığa bağımlılıklarının yüksek olmasıdır. Pnömatik sistemlerde güç aktarmak için kullanılan gazın düşük sıcaklıklarda basıncının düşmesi sebebi ile sistemin çalışma performansının etkileneceği açıktır. Gazın yoğunlaşarak sıvılaşması ve hatta katılaşması durumunda sistem tamamen çalışmaz hale gelecektir. Böyle bir sistemin oluşturulmasında ısrarcı olunduğu takdirde kullanılacak tek gaz yoğunlaşma sıcaklığının düşük olması sebebi ile Helyum gazı olmalıdır. Ancak bu tarz sistemler hem yüksek maliyet hem de kaliteli mekanik imalat gerektiren sistemlerdir.

Aynı durum hidrolik sistemler içerisinde de geçerlidir. Kullanılan hidrolik sıvısının sıcaklığın azalmasına bağlı olarak viskozitesinin artması sistem performansını etkilerken, hidrolik sıvısının katılaşması ise sistemi tamamen çalışmaz hale getirecektir.

Hem pnömatik hem hidrolik sistemler ele alındığında bu iki sistemde sıcaklık çalışma aralığı istenilen değerlerden çok dar, mekanik elemanlar olarak çok hacimli ve yüksek hassasiyette hareket için uygun olmayan sistemlerdir.

2.2.2 Vidalı Mil ve Somun Tahrik Mekanizmaları

Günümüzde vidalı mil ve somun ile tahrik mekanizmaları özellikle CNC kontrollü imalat tezgahları başta olmak üzere hassas konumlandırmanın önemli olduğu ölçüm ve deney sistemleri gibi birçok sistem ve mekanizmanın içerisinde yer almaktadır. Bu mekanizmalar hedeflenen hız ve yük taşıma kapasitelerine göre değişik boyutlarda ve malzemelerden imal edilen ve piyasada kolaylıkla bulunabilecek olan hareket sistemleridir. Bu sistemler vidalı bir milin iki ucundan rulman ile yataklanarak iki nokta arasında hareketinin kısıtlanması sonucunda sadece tek eksende dn serbestliğine sahip iken döndürülerek üzerinde takılı olan somunun mil boyunca hareketini gerçekleştirmesi prensibi ile çalışır. Hareket ettirmek istenilen esas parça mekanik yollarla somuna tutturularak milin dönüş yönüne bağlı olarak iki yönlü hareket eder. Bu tarz sistemlerde yükün ağırlığı ve mekanik boyutlarına bağlı olarak mil üzerine düşen merkezciil yükü azaltmak için ilaveten yüzey hassasiyeti yüksek kızak veya mil ile doğrusal rulman içeren mekanik parçalara ihtiyaç vardır. Ancak böyle sistemlerde hareket toleranslarının kullanılan vidalı milin ve somununun imalat toleransı kadar olacaktır. 100 mikrometre diş adımına sahip mil ve somun takımı imal eden ve satan firmalar bilinmektedir.[7]

100 mikrometre diş adımına sahip bu vidalı miller ile 1:100 ya da 1:1000 redüksiyona sahip dairesel konum okuyucu içeren motorlar kullanarak düşük hızlarda çalışan mesafe kontrollü doğrusal hareket mekanizmaları yapılabilmektedir. Ancak yapılan bu mekanizmalar içerdikleri vidalı mil, somun, yataklama rulmanları ve destekleyici ray vb. parçalar sebebi yüzünden hem toplam hacim olarak hem ağırlık olarak fiziksel ölçüm sistemlerinde kullanmak için çok

fazladır. Ayrıca kriyojenik sıcaklık sistemlerinde hedef minimum ısı yükü olan mekanizmalarla çalışmak olduğu için bu tarz mekanizmalar kullanışlı değildir.

Bu hareket sistemlerinin bizim çalışmalarımıza uygun olmamasının diğer bir sebebi de yağlama gerektiren mekanik yapılar olmasıdır. Yağlama düşük sıcaklıklarda donarak viskozitenin artması sebebi ile problem yaratmaktadır ayrıca kullanılacak yağlayıcı madde vakum altında düşük basınç sebebi ile ortama gaz fazda partikül bırakacağı için vakum ortamını bozacak ve ortamda herhangi bir yüzeye yapışarak kirlilik oluşturacaktır. Ayrıca ölçüm yapılacak numuneyi de kirletecektir. Bu sorun piyasada bulunan MoS₂ katkılı kuru yağlayıcılar ile ortadan kaldırılabilsede de yüzeye tutunma diğer yağlayıcılar kadar sağlıklı olmadığı için mekanizmada sürekli yağlama ihtiyacı doğurmaktadır.

2.2.3 Piezoelektrik Tabanlı Tahrik Mekanizmaları

Piezoelektrik motor mekanizmaları, ters piezoelektrik etki ile piezoelektrik malzemelerin elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek mekanik hareketlilik sağlaması prensibine dayanan sistemlerdir.

Literatürde araştırmacılar tarafından geliştirilen farklı tip tahrik ve motor mekanizmaları mevcuttur. Piezoelektrik mekanizmaların basit mekanik yapılar olmasına ek olarak kısa tepki süreleri, yüksek kuvvet açığa çıkarabilme özellikleri, yüksek verimlilikleri ve yüksek mekanik dayanım gibi avantajları da mevcuttur. Ancak piezoelektriklerin %0.1-%0.2 gibi düşük gerinime sahip olmaları, 60 ile 600 volt gibi yüksek besleme voltajına gereksinim duyulması ve piezoelektriklerin gösterdikleri gerinim histerisisi bu sistemlerin dezavantajlarından biridir.[8]

Tez çalışmada doğrusal hareket mekanizması olarak piezoelektrik mekanizmalar seçilmiştir. Bunun sebebi bu mekanizmaların diğer mekanizmalara göre çok daha küçük boyutlarda ve düşük ağırlıklarda imal edilebiliyor olması ve bu sistemlerin daha hassas çalışıyor olmasıdır.

Üç farklı tip piezoelektrik sürücülerden bahsedebiliriz, bunlar istif (stacks) tipi, bükücü (bender) tipi ve doğrusal motor tipi olarak adlandırılır. Bu üç farklı sürücü tipin mekanik yapıları ve hareket kabiliyetleri ve çalışma mekanizmaları alt başlıklarda açıklanmıştır.

a. Piezoelektrik İstif (Stack) Tipi Sürücüler

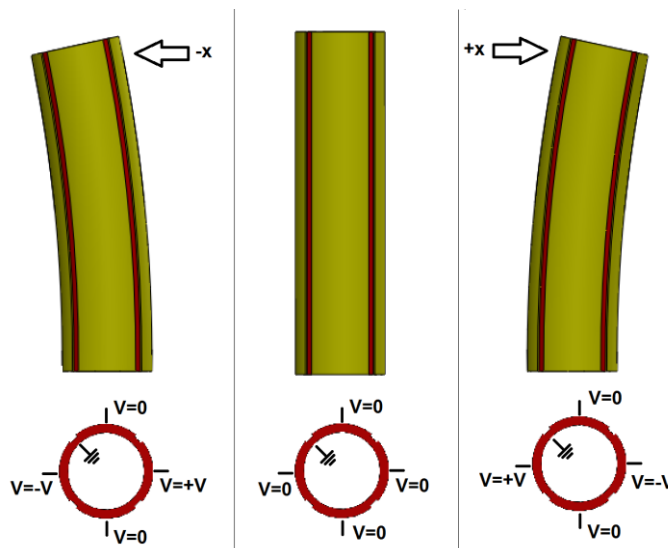
Piezoelektrik etkiyi kullanarak doğrusal hareket yaratmanın bilinen en kolay yolu çok katlı yapılardan oluşan yığın sürücülerini kullanmaktır. Her bir yığın çok sayıda ince plaka halindeki piezoelektriklerin üstüste dizilmesinden meydana gelir. Bu sayede farklı kalınlıklarda temin etmek mümkündür. Yapısındaki bu çok katlılık sebebi ile yığın yüksekliği gerek duyulan gerinim ya da kuvvet miktarına göre ayarlanabilir. Şekil 12'de tek katlı ve çok katlı piezoelektriklerin yapısal şeması görülmektedir[9].

b. Piezoelektrik Bükücü (bender) Tipi Sürücüler

Piezoelektrik bükücü sürücüler iki metalden yapılmış olan (bimetallik) bükücüler ile benzerlik gösterirler. Bir ucu mekanik olarak sabitlemiş olan ve üstüste iki kat tabakadan oluşan bükücüye elektrik alan uygulanıldığında bir tabaka boyca genişirken diğeri daralma gösterir. Sonuç olarak ortaya çıkan bükülme sonucunda serbest uçta görülen yer değiştirme her bir piezoelektriğin gösterdiği mekanik deformasyon değerinden fazla olacaktır.

Bükücü tip sürücüler unimorph ve bimorph olarak gruplandırılır. Unimorph tek kat piezoelektrik üzerinde metal elektrot tabakadan oluşurken bimorph iki kat piezoelektrikten oluşmaktadır. Bu sayede tek katlı olan bükücü ile kıyaslandığında toplam yer değiştirmenin iki katına çıktığı söylenebilir. Eğer bükücü sürücü ikiden fazla kata sahip ise bu 'çok katlı' olarak isimlendirilir. Bu sayede yığın tip sürücülerde olduğu gibi piezoelektrik üzerinde eş elektrik alan yaratmak için çok daha küçük elektrik voltajları kullanılır dolayısıyla çok katlı bükücüler düşük çalışma voltajlarına sahiptirler.

Bükücü tip piezoelektrik sürücü için başka bir geometri ise TUM'lerin tarama ucuna ya da X-Y tablasına hareket veren tüp piezoelektrik sürücülerdir[11]. Tüp piezoelektrikler yapı olarak ince cidarlı seramik borunun dış yüzeyinde 90° lik öteleme ile birbirinden ayrı dört elektrotlu bölge ve bütün iç yüzeyi örten tek elektrotlu bölgeden oluşur. Tüpün iç yüzeyi toprağa bağlanırken dış yüzeyde bulunan dört farklı elektrota aynı anda ayrı şiddette voltaj uygulayarak tüpün bükülmesi sağlanmış olur. Bu sayede tüpün ucunda bulunan tarama ucunun piezoelektrik tüpün hareket ile yer değiştirmesi sağlanır. Bu yöntem ile tarama ucunun hareketinin hem X eksenini doğrultusunda hem de Y eksenini doğrultusunda eş zamanlı olarak kontrolünü sağlamak mümkündür. Bu sürücülerde elde edilebilecek maksimum yer değiştirme kullanılan piezoelektrik malzemenin türüne, maksimum çalışma voltajına ve tüpün boyuna bağlı olarak değişiklik gösterir (Şekil 14).



Şekil 14-Tüp piezoelektrik bükücü sürücüsü

c. Piezoelektrik Doğrusal Motor Tipi Sürücüler

Piezoelektrik seramiklerin gerinim oranlarının çok küçük olmaları sebebiyle toplam yer değiştirmeyi arttıracak şekilde mekanik yapılara ihtiyaç duyulmuştur. Piezoelektrik motor mekanizmalarında ardışık gelen küçük adımlama yöntemleri ile toplam yer değiştirme kapasitesi piezoelektrik malzemenin gerinim değerinden bağımsız hale getirilir.

Doğrusal piezoelektrik motorların birkaç farklı tipi mevcuttur. Bunlar iki ana grupta ele alınabilir. Bunlar doğrusal adımlama motoru ve ultrasonik motordur. Adımlama motorları da tırtıl (inchworm) tipi ve kaydır ve taşı (slip and stick) tipi motorlar olarak gruplandırılabilir. Ultrasonik motorlar ise duran dalga ve yürüyen dalga ultrasonik motorlar olarak ayrılır. Tezin bu kısmında bu dört farklı doğrusal motor tiplerinden bahsedilecektir.

Tırtıl tipi motor en az iki ayrı piezoelektrik eleman kullanılarak doğrusal hareket sağlar. Şekil 15 'de tırtıl tipi motorun bir adım atması için gerçekleşen mekanik değişim şematik olarak gösterilmiştir[12]. Şekilde merkezde görülen parça, piezoelektriklerin hareketi ile bir yönde ötelenmektedir. Mekanizmada a, b ve c gibi üç farklı piezoelektrik grup görülmektedir. a ve b piezoları merkez parçayı sıkıştırmak için ortada yer alan b piezosu ise öteleme hareketi yaratmak için kullanılmaktadır. Bu nedenle bir birim hareketteki maksimum ötelemenin miktarı b piezosunun türüne ve büyüklüğüne bağlıdır. Ayrıca bir birim hareketin öteleme miktarı b piezosuna uygulanan voltaj değeri ile kontrol edilebilir.

Üç adet piezoelektrikten oluşan tırtıl motor bir birim öteleme hareketini sekiz adımda tamamlar.

1. durum; a, b ve c piezoları serbest halde olduğu durumdur. Bunu başlangıç durumu olarak kabul edebiliriz.

2. durum; a piezosu üzerine voltaj uygulanarak merkezdeki parçayı sıkıştırmak suretiyle yakalaması sağlanır.

3. durum; a piezosu sıkıştırma konumunda iken b piezosuna voltaj uygulayarak merkez parçanın b piezosunun yer değiştirme miktarı kadar ötelenmesi sağlanır.

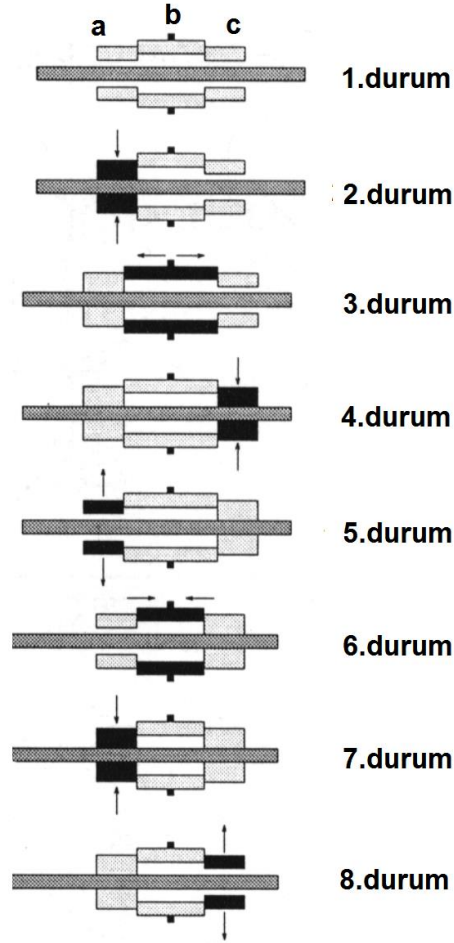
4. durum; a ve b piezoları voltaj altında iken c piezosuna da voltaj verilerek c piezosunun merkez parçayı sıkıştırarak yakalaması sağlanır.

5. durum; sadece a piezosu üzerindeki voltaj kaldırılarak a piezosunun merkez parça ile teması kesilir.

6. durum; b piezosu üzerindeki voltaj da kaldırılarak merkez parçanın tekrar b piezosunun yer değiştirmesi kadar ötelenmesi sağlanır.

7. durum; a piezosuna tekrar voltaj verilerek merkez parçayı sıkıştırarak yakalaması sağlanır.

8.durum; c piezosu üzerindeki voltaj kaldırılarak sistem tekrar ötelenmeye hazır hale gelir. Bu durumdan sonra kesintisiz olarak 3. duruma geçiş yaptığınızda ardışık olarak hareket elde edilmiş olur.



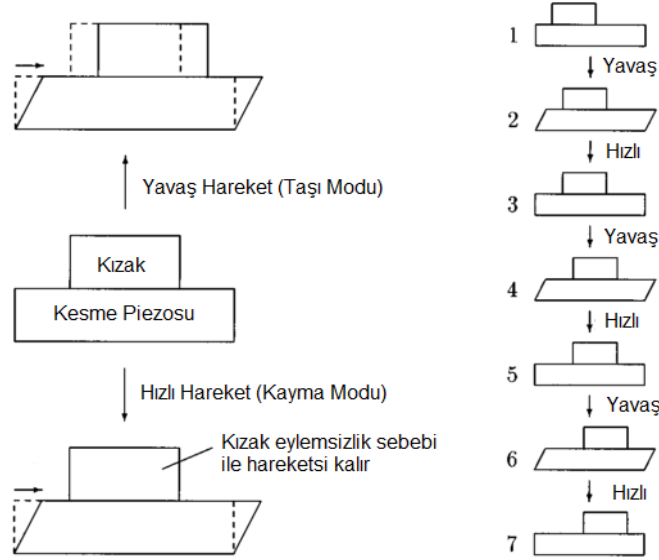
Şekil 15- Tırtıl tipi motorun çalışmasının şematik gösterimi

Tırtıl tipi motor olarak sınıflandırabileceğimiz kaynaklarda Koala sürücü olarak ifade edilen bir başka farklı motor tasarımını da bu tip motorlara örnek verebiliriz [13].

Kaydır- taşı tipi motorlar bir çeşit eylemsizlik mekanizmalarıdır. Bu mekanizmalarda kayar tip piezoelektrikler kullanılır. Mekanizma hareket verilmek istenen kızığın eylemsizliğinden faydalanılarak çalışır. Bu tip motorlar hareketli piezoelektrik ayaklar ve kızaktan oluşur. Her bir adımda ayakların yavaşça mekanik deformasyona uğraması ve çok hızlı bir şekilde geri gelmesi sağlanır. Ayakların yavaşça deformasyona uğraması sırasında ayaklar ile temas halinde bulunan kızak statik sürtünme sebebi ile ötelenir. Hareketin bu kısmı 'taşı' kısmıdır. Bundan sonraki kısımda piezoelektrik malzemenin ters yönlü olacak şekilde ani ve hızlı olarak deformasyona uğraması sağlanır. Bu sayede kızak ile piezoelektrik ayaklar arasındaki statik sürtünme kuvveti aşılarak kütle kazandığı momentum sebebi ile ayaklar üzerinde kayması sağlanır. Bu kısım ise hareketin 'kaydır' kısmıdır. Şekil 16'

da bu hareketin çalışma mekanizması görülmektedir[14]. Bu mekanizma ile hareketi sınırlı olan piezoelektrik malzeme kullanılarak sınırsız miktarda hareket etme olanağı sağlanmış olur.

Tezde yapılması hedeflenen doğrusal motor mekanizması kaydır- taşı mekanizmasıdır. Bu nedenle bu mekanizma sonraki kısımlarda daha detaylı olarak ele alınacaktır.



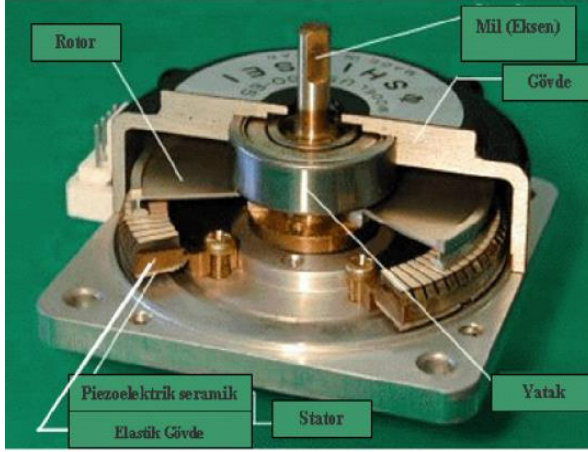
Şekil 16- Eylemsizlik kızak mekanizması: Kızak sahip olduğu eylemsizlik sebebi ile kayar piezonun hızlı hareketini takip edemez. Böylece hareketi sınırlı olan kayar piezo ile sınırsız hareket sağlanmış olur. (H.S.Kim, E. Kratschmer ve T.H.P. Chang)

Ultrasonik dalga motorları tırtıl ve kaydır-taşı tipi motorlardan farklı olarak özel bir durum olan rezonans durumunda çalışırlar. Rezonans durumu bir sisteme maksimum enerjinin aktarılabilirdiği özel bir durumdur. Bu durum, sisteme kendi doğal frekansı ya da bu frekansın harmonik katlarındaki frekanslarda enerji aktarımı yapıldığında görülür. Ultrasonik dalga motorlarının duran ve yürüyen dalga motorları olarak iki farklı türde ele alındığından bahsetmiştik.

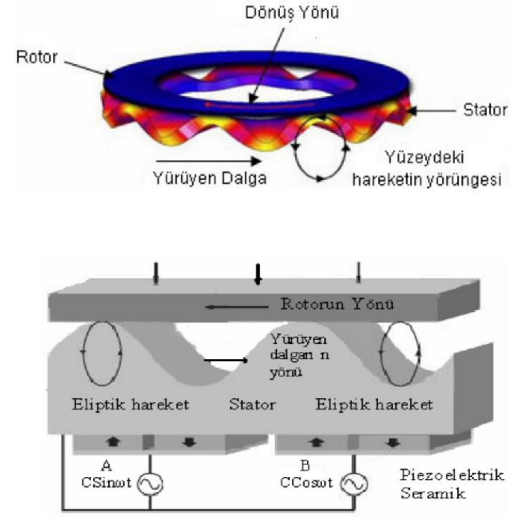
Yürüyen dalga ultrasonik motor için örnek olarak Shinsei firmasının ürettiği USR60 motoru şekil 17' de görülmektedir. Şekilde görülen motor geometrisi sebebiyle çizgisel hareketi dairesel harekete dönüştüren bir motordur. Motor, sabit olan stator ve hareketli olan rotor olarak adlandırılan iki ana parçadan oluşur. Stator, elastik özellik gösteren paslanmaz çelik ya da fosfor-fronz malzemedir yapılmaktadır. Titreşim genliğini arttırmak amacıyla statorun rotor ile temas ettiği yüzeyde tarak şeklinde dişler mevcuttur.

Mekanik hareketi oluşturacak titreşimi üretmek için stator yüzeyinde ince bir piezoelektrik seramik tabaka mevcuttur. Seramik, mekanik dalga hareketini üretebilmek için ardışık olarak + ve - uçlar ile kutuplanacak parçalara bölünmüştür. Bu ardışık kutup kümeleri aralarında 90° faz farkı bulunan ve sistemin rezonans frekansında olan iki dalga ile beslenir. Bu sayede bu kutuplar uzayıp kısalarak stator

yüzeyinde ilerleyen mekanik dalga meydana getirir. Stator gövdesinde üretilen bu yürüyen dalganın tepe noktalarında eliptiksel hareket meydana gelmektedir. Stator üzerine bir baskı kuvveti ile oturtulmuş olan rotor mevcut teğetsel hareket tarafından yürüyen dalganın tersi yönde hareket eder. Motorun hareket yönünü değiştirmek için yapılması gereken besleme fazlarının sırası yani yürüyen dalganın yönünün değiştirilmesidir (Şekil 18)[15, 16]. Besleme sinyallerinin frekans değerleri ve genliği değiştirilerek motor hareketinin hızı kontrol edilir.



Şekil 17-Shinsei USR60 yürüyen dalga tip ultrasonik motorun kesit görünüşü



Şekil 18-Yürüyen dalga tip ultrasonik motorun çalışma prensibi

Duran dalga tipi ultrasonik motorlar için öncelikle duran dalgayı açıklayalım. Bir mekanik sistemde duran dalga oluşabilmesi için sistemde ters yönde ilerleyen aynı frekanslı ve genlikli iki mekanik dalga gerekmektedir. Bu iki mekanik dalganın üst üste binerek oluşturduğu süperpozisyon sonucunda sistemde gözlenecek net mekanik hareket düğüm ve karın noktaları konum uzayında sabit olan bir titreşim hareketi olacaktır. Bu hareketin özel ismi duran dalga'dır.

Mekanik bir sistem üzerinde ilerleyen bir dalga, sistemin sabit ya da hareketli olan nokta, kenar ya da düzlem gibi geometrik sınırına geldiğinde geri yansiyarak eş frekansta ve genlikte ancak ters yönlü olarak yoluna devam eder. Buna ek olarak mekanik bir sistemde sistemin rezonans frekansında bir mekanik dalga oluşturulduğunda oluşan dalganın boyu ile sistemin mekanik büyüklüğü arasında bir oran mevcuttur. Bu sebeple sistem üzerinde oluşturulan mekanik dalga ile geometrik sınırlardan yansıyan dalga üst üste bindiğinde sistemde duran dalgalar gözlenebilmektedir.

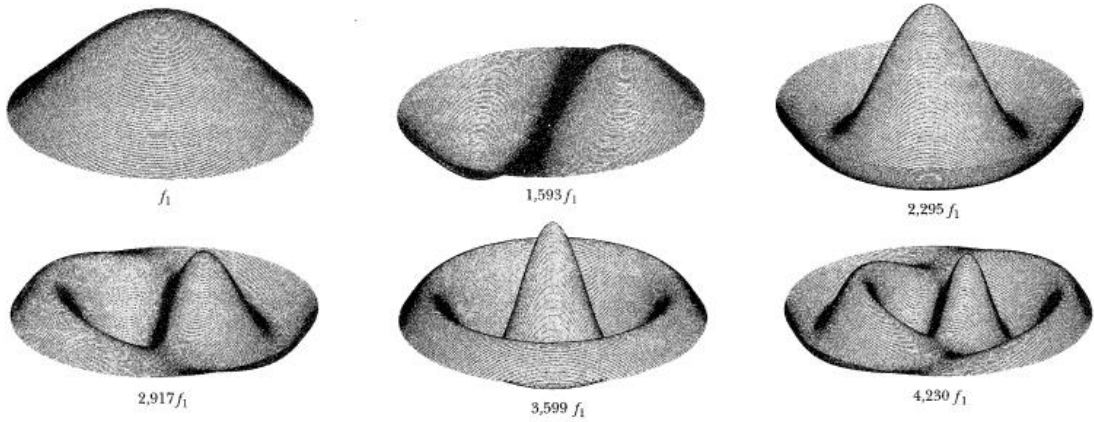
Bahsettiğimiz durumu Şekil 19'da görülen ve genelde titreşim sensörü olarak ya da mikrofonlarda kullanılan bakır plaka üzerine oturtulmuş dairesel piezoelektrik yapı için ele alalım. Bu sistem basitçe iki boyutlu dairesel bir zarın titreşimi olarak ele alınır. Bu durumda mümkün olan bazı titreşim kiplerine ait salınımlar Şekil 20'de görülmektedir. f_1 frekanslı en düşük titreşim kipi zarın çevresini oluşturan bir düğüm

eğrisi olan kiptir. Diğer mümkün olan titreşim kipleri, dairesel olan ek düğüm eğrileri gösterir ve çap doğrultusunda çizgiler oluşturur.[17]



Şekil 19-Dairesel piezoelektrik ses sensörü

Dairesel bir mekanizmanın birinci yani f_1 frekansındaki titreşim kipinde bir frekans ile uyarılması halinde sistemde maksimum gerinim ile hareket gözlenir. Böyle bir sürücü kullanılarak sürücünün titreşim doğrultusunda çalışan doğrusal hareket sistemi yapmak mümkündür. Böyle sürücüler ile çalışan mekanik sistemler duran dalga ultrasonik sistemler olarak adlandırılmaktadırlar.



Şekil 20-Kenarlarından tutturulan dairesel bir zarın kiplerinin gösterimi. Salınım frekansları harmonik bir seri oluşturmaz. (M.L Warren, Fiziğe Giriş, New York, W.H. Freeman. Şirketi yayıncılarının izniyle) (Serway- Beichner Fizik 1)

2.3 Kaydır-Taşı (slip - stick) Tip Piezoelektrik Sürücüler

Piezoelektrik kaydır-taşı tipi motorlar bir yüzeydeki statik sürtünme katsayısı ile dinamik sürtünme katsayısının farklılığından ve kütle eylemsizliğinden istifade ederek çalışırlar. Sürtünme kat sayısı olan ' μ ' iki yüzey birbirine göre hareketsiz iken statik sürtünme katsayısı (μ_s), iki yüzey birbirine göre hareketli iken kinetik sürtünme katsayısı (μ_k) olarak tanımlanır. İki yüzey arasındaki statik sürtünme katsayısı dinamik sürtünme katsayısından büyüktür.

$$\mu_s > \mu_k \quad (2.9)$$

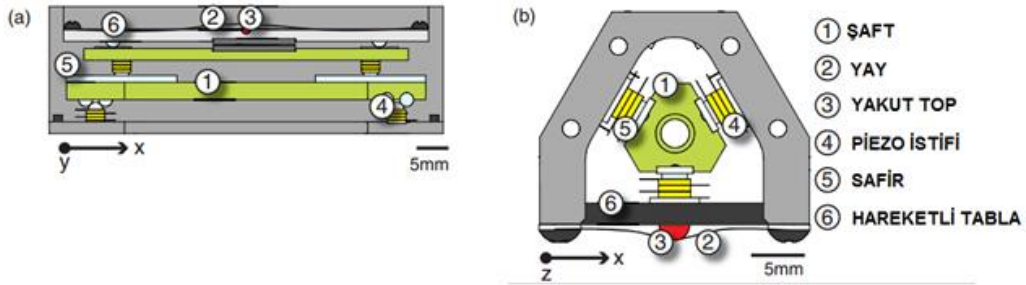
Bu sebeple statik sürtünme kuvveti de dinamik sürtünme kuvvetinden büyük olacaktır. Sürtünme kuvveti iki cismin birbiri ile temas eden yüzeylerinin birbirleri üzerinde oluşturdukları normal kuvvet ile bu iki yüzey arasındaki sürtünme katsayısının çarpımına eşittir. Sürtünme kuvveti yüzeye paralel yönlü bir kuvettir.

$$f_{\text{sürtünme}} = f_{\text{normal}} \times \mu \quad (2.10)$$

Sürtünme katsayısı birbiri ile etkileşen malzemelerin türüne ve bu malzemelerin yüzey pürüzlülüklerine göre değişim göstermektedir.

Piezoelektrik malzemenin temas halinde bulunduğu kütle ile arasındaki sürtünme kuvveti, piezoelektriğin oluşturduğu ivme sebebiyle ortaya çıkan kuvvetten büyük olduğu sürece kütle de piezoelektriğin temas yüzeyi ile birlikte hareket eder (taşı modu). Ancak piezoelektrik yüzey hareketinin ivmesi kritik değeri aştığında oluşan kuvvet statik sürtünme kuvvetini aşar ve parçalar arasında kayma gerçekleşir (kaydır modu). Bu kayma süresinde taşınan kütle mevcut hareketini koruma yönünde hareket eder. Bu hareket mevcut hareket enerjisinin dinamik sürtünme kuvveti tarafından tamamen sönmümlenmesi ile son bulur. Bu durum taşıyıcının bir birimlik hareketidir. Bu durumun tekrarlanması ile sürekli bir hareket sağlamış olur.

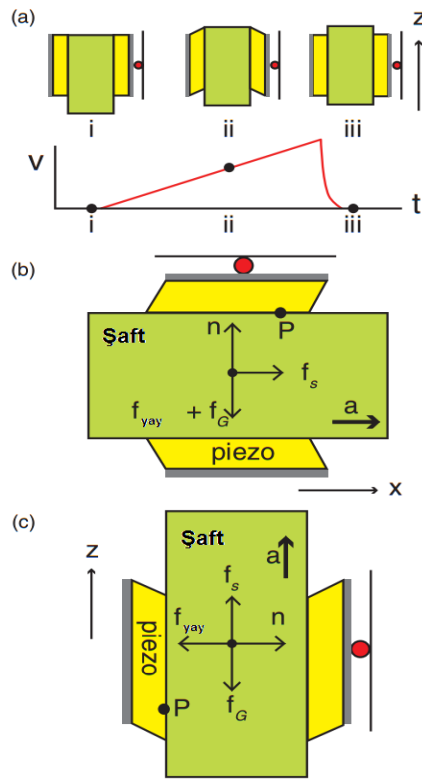
Yukarıda bahsedilen kritik durum hareket doğrultusuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Dünyamızda mevcut olan kütle çekim kuvveti sebebi ile mekanik hareketin z ekseninde (yeryüzüne dik eksen) gerçekleşmesi ile x ve y eksenlerindeki (yeryüzüne paralel eksen) hareketi için durum farklıdır. Şekil 21' de Pan tipi kayar mekanizma olarak da bilinen bir kaydır taşı mekanizması görülmektedir[18].



Şekil 21- (a) yan ve (b) üst görünüm laboratuvarında kullanılan iki piezoelektrik motor. a'da x eksenini ve sayfa düzleminde dışarıya doğru olan y ekseninde hareket eden XY motorun şematik gösterimi yer almaktadır. b'de tepesi kesilmiş olan üçgenel hareketli şaftı z ekseninde hareket ettiren Pan tipi motorun şematik gösterimi yer almaktadır.

Şekil 21-b' de Z ekseninde hareket eden Pan tipi motor görülmektedir. Bu motorda hareketli bir şaft ve şafta üç yönden basan kayma yönünde kutuplanmış piezoelektrik tabaka yığınları mevcuttur. Şaftın bir tarafındaki piezoelektrik yığına sürtünme kuvvetini için bir yay ile ayarlanabilir f_{yay} kuvveti uygulanmaktadır.

Kaydır- taşı hareketi için kayma koşulunun böyle bir mekanizmada yatay ve dik pozisyonda gerçekleşmesi durumunu irdeleyelim. Şekil 22-a' da zamana bağlı voltaj değişimi ile i, ii ve iii durumlarında motorun bir adım atması durumu gösterilmektedir. Bir adım için geçen süreç başladığında 'i' durumunda şaft sıkı bir şekilde piezoelektrikler ile arasında olan sürtünme sebebiyle hareketsiz durumdadır. Testere dişi bir elektrik sinyali kayar piezoelektrikler üzerine uygulanması ile şaft temas halinde olduğu piezoelektrik yüzeyi ile beraber yavaşça yukarı yönde hareket eder. Daha sonrasında voltaj değerinin hızlı bir şekilde sıfıra çekilmesi sebebiyle kayma durumu gerçekleşir. Bir adım işlemi gerçekleştiğinde piezoelektrik yığın ilk pozisyonuna dönmüş ve şaft bir adım yani piezoelektriğin yavaş hareketi sırasında yaptığı yer değiştirme kadar yer değiştirmiş olur.



Şekil 22- (a) Adımın anatomisi (i) şaft piezoelektrik yığın tarafında sıkıştırılmış durumdadır, (ii) piezoelektriklere uygulanan voltaj yavaşça artırılır bu sırada piezoelektriklerle temas halinde olan şaft yukarı yönde taşınır, (iii) voltaj hızlı bir şekilde sıfıra çekilir bu sebeple piezoelektrik şaft yüzeyinde kayma hareketi yapar ve şaftta bir adım atılmış olur. (b) Yatay harekette şaft üzerine düşen kuvvetler görülmektedir. (c) Piezomotorun dik yönelimdeki kuvvet dağılımı görülmektedir.

Piezoelektriğin üzerinde oluşan defosmasyon büyüklüğünün nasıl elde edileceğinin eşitlik 2.8 ile vermiştik. Eşitlikte parametreler gerinim ve elektrik alan olarak belirtilmiştir. Bu eşitlik besleme voltajı ve yer değiştirme olarak verildiğinde eşitlik 2.11 elde edilir.

$$\Delta x = d \cdot \Delta V \quad (2.11)$$

Fiziksel olarak kayma hareketinde kritik durumun piezeelektrik hareketindeki ivmeden kaynaklanan kuvvet ile sürtünme kuvveti arasındaki ilişki olduğunu belirtmiştik. Taşıma modunda şaftın sahip olduğu hız ve ivme piezeelektriğin temas yüzeyinin sahip olduğu hız ve ivme ile aynıdır. Bu sebeple şaftın anlık hızı ve ivmesi yer değiştirmenin zamana bağlı birinci ve ikinci türevlerinden elde edilebilir. Eşitlik 2.11' den yer değiştirmenin besleme voltajına sabit bir katsayı ile doğrusal olarak bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle besleme voltajının birinci türevi bize anlık hızı ikinci türevi ise hareketteki anlık ivmeyi verecektir(Eşitlik 2.12).

$$v = \frac{dx}{dt} = d \cdot \frac{dV}{dt} = d \cdot \dot{V} , \quad a = \frac{dv}{dt} = d \cdot \frac{d\dot{V}}{dt} = d \cdot \ddot{V} \quad (2.12)$$

Şekil 22-b' de yatay eksen de hareket eden Pan tipi motorda şaft üzerine binen kuvvetler için kuvvet diyagramı görülmektedir. Diyagramda yer alan ifadelerden;

n = yüzeyin tepki kuvveti , f_{yay} =yayın sıkıştırma kuvveti, f_G = yer çekimi kuvveti, f_s =sürtünme kuvveti, a = şaftın ivmesi' dir.

'm' kütleli şaftın yatay eksen deki hareketinde kayma durumu $f_s \geq f_s^{maks}$ anında gerçekleşir. Bu andaki kritik durum eşitlik 2.13 ile ifade edilir.

$$d \cdot \ddot{V} = \pm \mu s \cdot \left(\frac{f_{yay}}{m} + g \right) \quad (2.13)$$

Eşitlikte yer alan + ve – işaretleri hareketin yönüne bağlıdır.

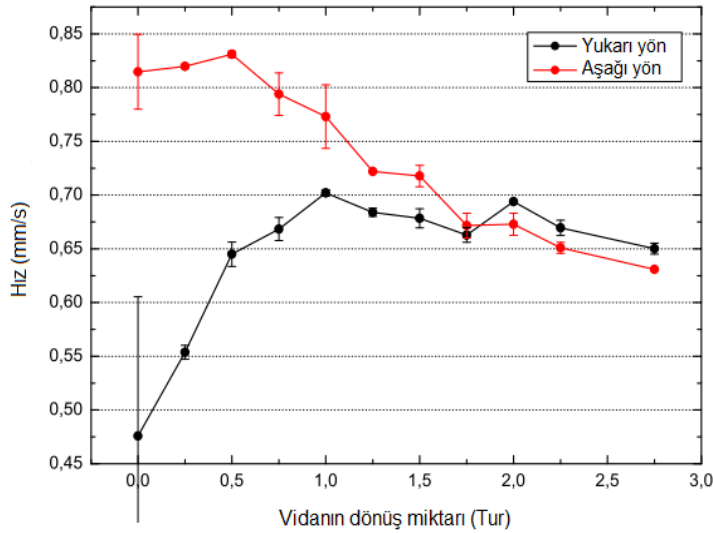
Şekil 21-c'de dik eksen de hareket eden Pan tipi motor için kuvvet diyagramları görülmektedir. Kayma koşulunun gerçekleşmesi için yine yatay eksen hareketinde geçerli olan sürtünme kuvveti koşulu burada da geçerlidir. Ancak dik eksen hareketinde yer çekimi kuvvetinin doğrultusu hareket doğrultusu ile aynı olduğu için harekete etkisi daha farklı olacaktır. Dik eksen de hareket için eşitlik 2.14 geçerli olacaktır.

$$d \cdot \ddot{V} = \pm \mu s \cdot \frac{f_{yay}}{m} - g \quad (2.14)$$

Bu ifade de piezeelektrik +z yönünde hareket ederken işaret pozitifdir , -z yönünde hareket ederken işaret negatif 'dir. Sistemde şaft hareketini tamamlayıp sabit duruma geldikten sonra yer çekimine karşı olarak sabit tutulmalıdır. Bu durumu sağlamak statik sürtünme kuvvetinin kontrolü ile gerçekleşir. Bu sebeple yüzeyin tepki kuvvetini yani yayın sıkıştırma kuvveti değiştirilerek bu durum elde edilir. Bu durum için gerekli olan minimum yay sıkıştırma kuvveti eşitlik 2.15 ' de verilmiştir.

$$\min f_{yay} = \frac{mg}{\mu s} \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.13, 2.14 ve 2.15 'den anlaşılacağı gibi yer çekimi kuvveti yatay ekseninde sürtünme kuvvetini değiştirdiğinden ileri ve ters yönlü harekette eşit etki gösterir. Bu sebeple aynı besleme voltajı büyüklüğünde sisteme negatif ya da pozitif sinyal uygulandığında sistemin hareketinin sadece yönünün değişmesi ve her iki yönde adım büyüklüğünün eşit olması beklenir. Z eksen hareketinde ise yerçekimi kuvveti hareket doğrultusunda olduğu için eş büyüklükte voltaj beslemelerinde +z ve -z yönündeki yer değiştirmeler aynı olamaz. Eş büyüklükteki voltaj altında +z yönündeki yer değiştirmenin - z yönündekinden daha az olması beklenir. Ancak beklenen bu fark yayın sıkıştırma kuvveti ve besleme voltajının büyüklüğü ile ivmesine bağlı olarak azaltılabilir. Eşitlik 2.14' de görülen yayın baskı kuvvetinin yer aldığı grup, yer çekimi ivmesi göre çok büyük bir değere ulaştığında +z ve -z yönlerinde yer değiştirme farkının azalacağı söylenebilir. Ancak yayın baskı kuvveti piezoelektriğin ivmeli hareketi sonucu ortaya çıkan kuvvetten büyük olması durumunda motor kayma moduna geçemeyecek dolayısıyla net hareket sıfır olacaktır.



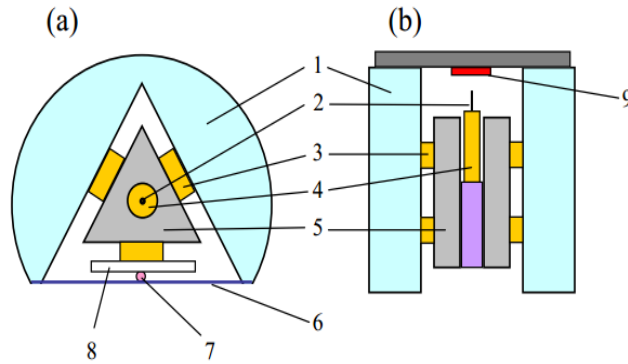
Şekil 23- Yaprak yay basıncına bağlı olarak ölçülen kaba konumlandırma sürücü hızı. Siyah çizgi yukarı yönde (yerçekimine karşı) hareketi ve kırmızı çizgi aşağı yönde hareketi gösteriyor. Sıfır noktası prizma şaftın serbest halde kaymadığı nokta olarak seçilmiştir. Hata çizgileri tekrarlanan ölçüm verilerinin ortalamasıdır. Ölçüm atmosfer koşullarında 60V genlikte 1kHz frekansta testere dişli voltaj sinyali ile alınmıştır. (T. Mashoff 2010)

Bu durumda irdelenmesi gereken nokta yayın uyguladığı baskı kuvveti ile motor hızının değiştiğidir. Yay baskı kuvveti düşük olduğu durumda motor yerçekimi yönünde daha hızlı hareket ederken yer çekimine ters yönde daha yavaş hareket edecektir. Kaynaklarda düşük sıcaklıkta çalışacak bir STM için yapılmış benzer prensiplerle çalışan piezoelektrik motorun yay kuvvetine karşı hız ölçümü mevcuttur[19]. Ölçümler atmosfer koşullarında alınmıştır. Ölçümünde baskı kuvveti için sıfır noktası sistemin yerçekime karşı hareketsiz kaldığı yay baskı kuvvetindeki bir durum olarak seçilmiştir. Şekil 23' de yay kuvveti yayı sıkıyan vidaların sıfır noktasından itibaren döndürülme miktarları cinsinden verirken buna bağımlı olan motor hızının değişimi görülmektedir. Yay çok sıkı değilken aşağı yönlü hızın yukarı yöne göre fazla olduğu görülmektedir. Yayın baskı kuvveti arttıkça zıt yönlerdeki kuvvet dağılımı arasındaki farkda azalmakta ve sistem daha kararlı bir hale gelmektedir. Yayın sıkılığının artırılması ile beraber zıt yönlü hareketlerde hızların

önce eşitlendiği daha sonra iki yön içinde azalmaya başladığı görülmektedir. Bu azalmanın sebebi ise sürtünme kuvvetinin artarak piezoelektriğin oluşturduğu kuvvet değerine yaklaşmasıdır. Baskı kuvveti daha da arttırıldığında hızın gittikçe düşerek daha önce de belirtildiği gibi sistemin hareket etmeyecek hale gelmesi öngörülebilir.

Matematiksel bağıntıları açıklamak için verilen pan tipi motor örneğinde kaydır- taşı modlarından bahsederken hareket sırasında ilk mod taşı modu ikinci mod ise kaydır modu olarak ifade edilmiştir. Ancak hareketin gerçekleşmesi için bu sıralamanın böyle olması zorunlu değildir. Sistem ilk önce kaydır modunda daha sonra ise taşı modunda da çalışabilir. Bu durumda değişen tek şey motorun hareket yönü olacaktır. Böyle bir durumda piezoelektrik üzerine kısa bir sürede hızlı bir voltaj yüklemesi yaparak piezoelektriklerin kaydır modunda hareketinin ardında voltajın yavaşça düşürülecek taşı modu ile hareketi gerçekleştirmesi sağlanır.

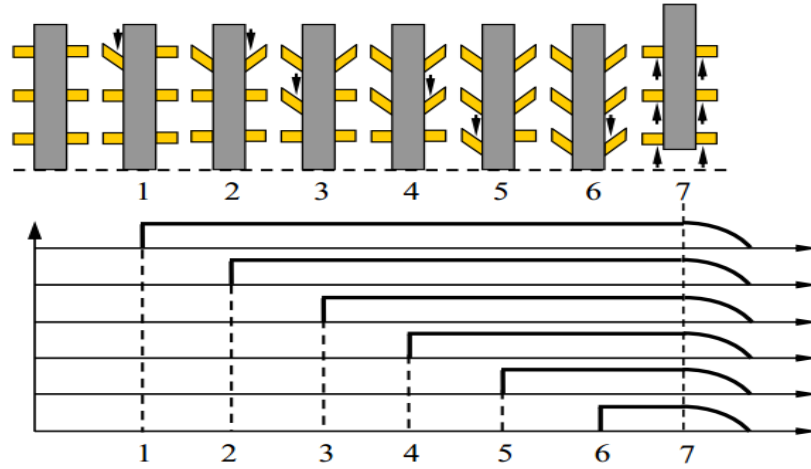
Örnek olarak gösterilen Pan tipi motorların bu şekilde besleme ile kullanımı yabancı kaynaklarda görülmektedir. Şekil 24’de bir başka düşük sıcaklık mikroskobunda kullanılan Pan tipi motorun üstten ve yandan gösterimi görülmektedir[20]. Şekil 24’de görülen piezoelektrik motorda altı grup piezoelektrik yığın bulunmaktadır. Ancak bu yığınlar birbirinden farklı zamanlarda hareketlerini gerçekleştirdikleri için motor dikey ekseninde hareketini daha kararlı yapmaktadır. Şekil 24’ de piezoelektrik yığınlara uygulanan elektrik sinyalleri şematik olarak görülmektedir. Buradaki sinyaller önce kaydır modu sırasında taşı modunda çalışmaktadır.



Şekil 24-Pan tipi STM kafası tasarımının şematik gösterimi. (a) Üstten görünüm, (b) yandan görünüm. (1) Macor gövde, (2)Tarama ucu, (3)macor gövde üzerine monte edilmiş kayar piezo yığını, (4) Piezo tüp tarayıcı 4K' de 3µm tarama alanı, (5)Tarayıcı ve ucu tutan safir prizma, (6)Piezo yığınları ile prizma arasındaki baskı kuvvetini ayarlamak için kullanılan paslanmaz çelik plaka yay, (7)Safir top, (8)Macor plaka, (9)Örnek ve örnek tutucu (Shengyong Qin 2008).

Şekil 25’deki şema incelendiğinde her piezoelektrik yığınının sırayla kaydır mod ile adım attığı ve sonrasında hepsinin beraber taşı modu ile prizmayı yukarı yönde sürükledikleri görülmektedir. Bu besleme şekli ile sistemin daha kararlı ve hareketin boşluksuz gerçekleşmesini sağlar. Her bir yığına ayrı ayrı kayma gerilimi verildiğinde diğer beş yığın statik halde durduğu için prizma hareketsiz durur. Taşıma hareketi aynı anda altı piezoelektrik yığın tarafından gerçekleştirildiği için sistemden maksimum kuvvet elde edilmiş olur. Bu tasarım ve besleme şekli

mekanik olarak yer sıkıntısı olmayan sistemler için düşük sıcaklık ve yüksek manyetik alan uygulamalarında da kullanışlıdır.

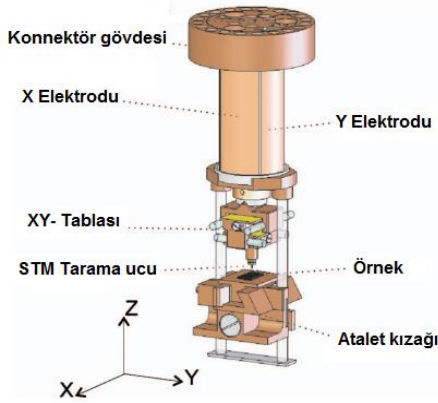


Şekil 25- Yaya tasarımının çalışma prensibinin şematik gösterimi. Üstte birbiri ardına gelen piezoelektrik yığınların hareketleri ile bir adım atan prizmanın hareketi. Altta herbir ardışık harekete karşılık gelen piezoelektrik yığına uygulanan besleme voltajı (Shengyong Qin 2008).

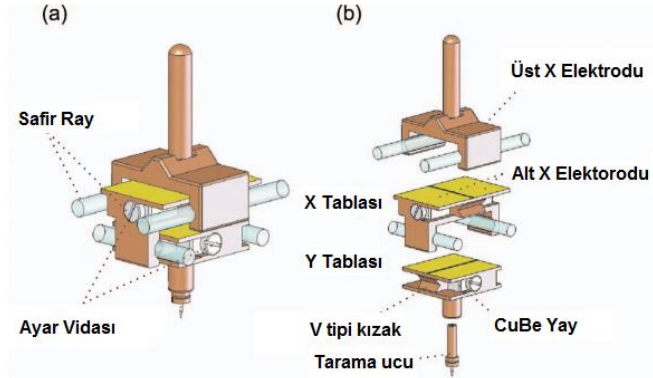
Mekanik hacim olarak daha az yer kaplayan benzer çalışma prensiplerine sahip başka kaydır taşı mekanizmaları da bilinmektedir. Bu tasarımlardan bir tanesi şekil 26'de görülmektedir[21]. Düşük sıcaklık TUM sistemi olarak tasarlanan bu sistemde hareket tahrik elemanı olarak iki adet iç içe konumlanmış eş merkezli tüp piezoelektrik kullanılmıştır. Tüp piezoelektriklerde dış yüzeyde dört, iç yüzeyde bir adet olmak üzere beş elektrot bulunur. Dışarıda yer alan tüp piezoelektrik ile z ekseninde hareket kontrol edilirken içeride yer alan tüp piezoelektrik ile X-Y kızağının hareketi kontrol edilir. Her eksen iki adet birbirine paralel konumlu dairesel çubuk geometride safir ray ile V şeklindeki yataklar üstüne yerleştirilerek oluşturulmuştur.

Tasarımda örnek tablası dışta yer alan piezo kullanılarak z ekseninde hareket etmektedir. Bu sayede örnek tarama ucuna hassas bir şekilde yaklaştırılabilmektedir. Bu uygulamada iç yüzeydeki elektrot ile dış yüzeydeki elektrotlar arasında voltaj uygulanarak tüp piezonun uzayıp kışalması sonucu örnek tablasının raylar üzerinde kaydır- taşı hareketi yapması sağlanır. Yatay eksenindeki hareket mekanizması da benzerdir. Yatay eksenindeki mekanizmanın şematik gösterimi şekil 27'de görülmektedir. Yatay eksen hareketi ile tarama ucunun hareketi kontrol edilmektedir. Bu hareket, tarama piezosu olarak isimlendirilen ve dışta yer alan tüp piezo ile eşmerkezli ve içte yer alır. Tarama piezosu dıştaki piezodan bağımsız olarak konnektör gövdesine bağlı şekilde X-Y hareketini sağlamaktadır. Bu piezo da iç elektrot toprak ve diğer dört dış elektrot karşılıklı ikişer gruplar halinde ikisi X eksenini doğrultusunda diğer ikisi Y eksenini doğrultusunda salınım yaratacak şekilde konumlandırılmıştır. Bağımsız eksen hareketi sırasında sadece ilgili eksenindeki elektrotlara voltaj uygulanarak daha önceki bölümlerde anlatılan tüp piezo hareketi ile yatay eksen hareketi yaptırılır.

Bu sistemde öncekilere ek olarak konum okuma yeteneği de mevcuttur. Şekil 26' da görülen şemada x eksenini için gösterilen alt ve üst elektrotlar arasındaki kapasitans değeri değişimi sürekli olarak okunarak motorun yer değiştirme bilgisi de anlık olarak okunabilmektedir. İki parça halinde olan alt elektrotun üst elektrot ile ayrı ayrı kapasitans değişiminin ortalama değer bilgisi alınarak $-X$ ve $+X$ yönündeki değişim bilgisi okunabilmektedir. Aynı kapasitif konum sensörü yapısı Y ekseninde mevcuttur.



Şekil 26-XY STM şematik gösterimi
(C. Dubois, P.E. Bisson,
A.A.Manuel, Fisher, S.Reymond



Şekil 27- Yatay kaydırıcının şematik gösterimi
(C. Dubois, P.E. Bisson, A.A.Manuel, Fisher,
S.Reymond 2006)

Tezin bu bölümünde anlatılan taşı- kaydır tipi piezoelektrik motorların daha farklı tasarımları ve uygulamalardaki örnekleri yabancı kaynaklarda yer almaktadır. Bunlara örnek olarak çok yüksek vakum değeri altında çalışan ve baskı yayı yerine mıknatıs kullanılan motor tasarımı[22], baskı yayına ek olarak aksenal yığın piezoelektrik kullanılan ve hareketin yine kayar piezoelektrikler ile sağlandığı yaya tipi motor tasarımı[23], örnek tablasının X-Y ekseninde hareketi kayar piezoelektrikler kullanılarak gerçekleştirilen adımlama motor tasarımı [24] gösterilebilir.

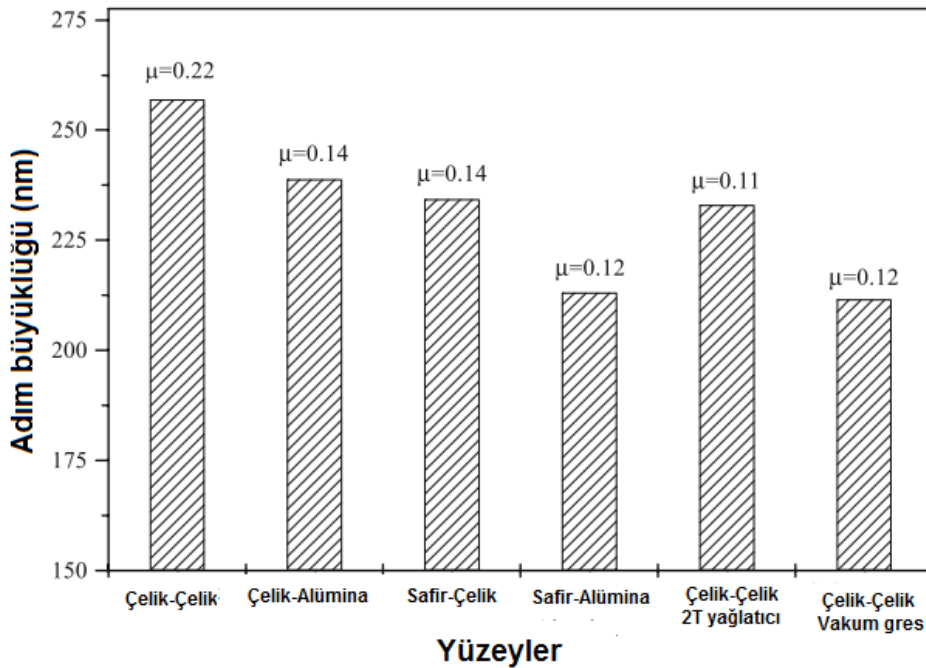
2.4 Kaydır-Taşı Tipi Motorlarda Sürtünme Katsayısı ve Besleme Gerilimi etkisi

Kaydır-taşı tipi motorlar için buraya kadar anlatılan mekanik yapı, çalışma prensipleri ve matematiksel bağıntılar ele alındığında motor performansında sürtünme kuvvetinin ve besleme voltajının belirleyici parametreler olduğu söylenebilir. K. Anantheshwara, N.S. Murali e M.S. Bobji isimli bilim adamlarının bu konu üzerinde yaptıkları testler ve sonuçlar yayınlarda yer almaktadır. Tezin bu bölümde yabancı kaynaklı çalışmaların sonuçları doğrultusunda sürtünmenin ve besleme geriliminin sinyal formunun motor performansını nasıl değiştirdiğini ele alınacaktır.

Besleme sinyalinin şekli ele alındığında, sinyali iki parça olarak incelemek doğru olacaktır. Bunlar voltajın yavaşça artırıldığı ilk kısım ve voltajın aniden sıfır değerine çekildiği ikinci kısımdır. Sinyalin ilk kısmı sürtünme kuvveti sebebiyle kızacağın hareket

ettirildiği taşı kısmı iken, ikinci kısmı ise ani bir hareketle piezoelektriğin başlangıç konumuna çekilirken kızağın ataleti sebebiyle hareketine devam ettiği kaydır kısımdır. Sürtünme kuvveti, yüzeylerin karakteristik özelliği olarak adım büyüklüklerini etkileyen bir parametre olduğu için önemli bir faktördür.

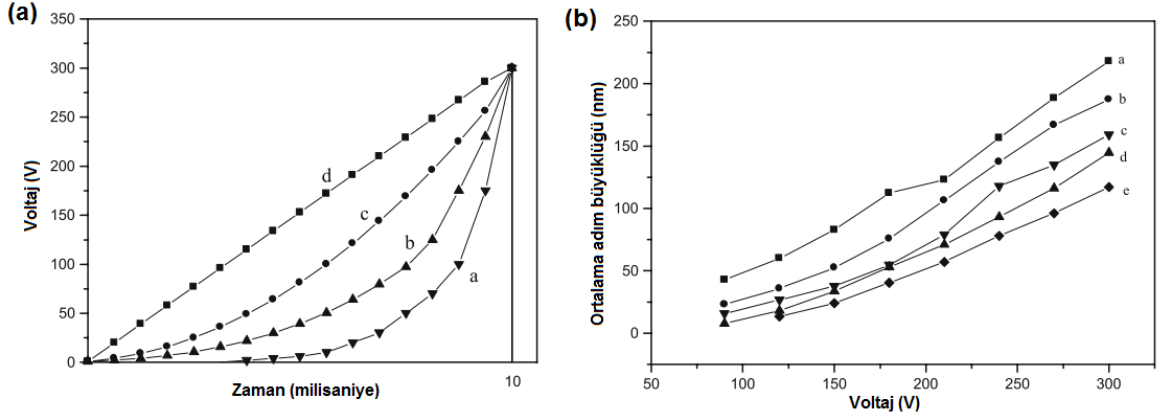
Bilim adamları oluşturdukları test düzeneklerinde piezoelektrik malzeme üzerine küreler yerleştirerek hareket ettirilecek kütleyi bu küreler üzerine oturtmuşlardır. Test düzeneğinde çelik ve safir malzemeden küreler ile kürelerle temas yüzeyi çelik ve alüminadan olan küreleri eşleştirmişler ayrıca çelik kütle ile çelik kürelerinin temas yüzeyleri arasında vakum gresi ve Shell 2T yağlayıcı var iken eşit besleme voltajları altında adım büyüklüğü ölçümlerine tabi tutmuşlardır. Ölçüm sonucu olarak birbirine göre hareketli malzemeler arasında sürtünme kuvveti arttıkça motor performansı ve adım büyüklüklerinin arttığı görülmüştür (Şekil 28) [25].



Şekil 28-Farklı ölçüm durumları altında ortalama adım büyüklükleri (42 gram kütle ile). Çelik yüzey ile çelik küreler kuru ve yağlayıcı ile (vakum gres ve 2T yağ) , alümina plaka ve safir küreler ile de farklı temas yüzeyleri kullanılarak çalışılmıştır. Sürtünme katsayısı sütunların üstünde belirtilmiştir. (K. Anantheshwara, N.S. Murali ve M.S. Bobji- Haziran 2008)

Diğer bir parametre olan besleme sinyalinin değişiminin adım büyüklüğü üzerindeki etkisine bakalım. Yapılan çalışmalar da maksimum voltaj değeri 75 V ile 300 V arasındaki değerlerde eş şiddetli ve sinyal genişlikleri aynı olan ancak zamana bağlı değişimleri farklı olan dört ayrı sinyal için adım büyüklüğü ölçümleri yapılmıştır. Şekil 29-a'da test düzeneğine uygulanan doğrusal, kuadratik, kübik ve eksponansiyel artış gösteren besleme sinyallerini göstermektedir. Sinyaller voltaj artışını takiben çok hızlı bir voltaj düşüşü ile sonlanır. Şekil 29-b'de ardışık olarak piezoelektrik malzemeye uygulanan besleme sinyallerine karşılık ölçülen ortalama adım büyüklüklerini gösterir. Sonuçlar incelendiğinde besleme sinyalinin artış bölgesinde doğrusallıktan uzaklaştıkça ortalama adım büyüklüğünün arttığı ve motor

performansının iyileştiği görülüyor. Ölçülen ortalama adım büyüklüğü değerlerinde en yüksek değerin eksponansiyel formda olan sinyalde olduğu görülüyor.



Şekil 29- (a) Piezoseramiğe uygulanan farklı besleme sinyal şekilleri; a:eksponansiyel, b:kübik, c:kuadratik, d:doğrusal artış sonrası ani düşüş (b) Farklı besleme sinyalleri için ortalama adım büyüklükleri (c)1 milisaniye gecikmeli eksponansiyel sinyal (42 gram kütle ile) alümina plaka ve safir küre arasındaki temas yüzeyleri. ((K. Anantheshwara, N.S. Murali e M.S. Bobji- Haziran 2008))

Sonuçların bu şekilde olması besleme sinyalinin zamana bağlı değişiminin eksponansiyel sinyalde en yüksek hızda olmasındandır. Bu harekette ivmenin yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu taşınan kütlenin aynı süre içinde daha yüksek hızlara çıkması demektir. Sinyalin ikinci kısmına geçildiğinde kızığın sahip olduğu hızın daha yüksek olması yani sahip olduğu momentin daha büyük olması kızığın ataletini kaybedip durana kadar daha fazla yol almasına neden olur. Elde edilen verilerden adım büyüklüğünün kızığın bir adımda ulaşabileceği hız ile direk ilişkili olduğu göstermektedir. Ancak bu durumda uygulanan sinyalden maksimum performans alabilmek için dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır. Besleme sinyalinin eğiminin, sinyal maksimum değerine ulaşmadan kızığın kayma moduna geçmeyecek formda ayarlanması gerekmektedir. Aksi halde piezoelektriğin maksimum geriniminden faydalanılamamış olunur. Bu tasarımcı açısından istenmeyecek bir durumdur.

2.5 Fiziksel Sınır Koşulları

2.5.1 Sıcaklık ve Isı

Sıcaklık ve ısı birbiri ile ilişkili olan iki fiziksel kavramdır. Isı ortamda bulunan moleküllerin sahip oldukları toplam enerjidir. Sıcaklık ise ortamda bulunan moleküllerin kinetik enerjilerinin ortalamasıdır. Enerji kavramı fiziksel olarak skaler bir parametre olduğu için ısı ve sıcaklık kavramları da fiziksel olarak skaler parametrelerdir.

Bir ortamdaki moleküllerin enerjilerinin fazla olması durumu yüksek sıcaklık durumu olarak ifade edilirken, ortamda bulunan moleküllerin enerjilerinin az olması durumu ise düşük sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık farkının mevcut olduğu durumlarda enerji akışı sıcaktan soğuğa doğru gerçekleşir. Isı aktarımı doğada

iletim (kondüksüyon), yayılım (konveksiyon) ve ışınım (radyasyon) olarak bilinen üç farklı yöntem ile gerçekleşir.

a. İletim (Kondüksüyon)

Katı ya da akışkan ortam içerisinde sıcaklık gradyenti mevcut iken ortamdaki molekülerin birbirlerini ile etkileşmesi sonucu gerçekleşir. İletim metoduyla ısı aktarımı mevcut ortam içerisinde bulunan sıcaklık gradyenti doğrultusunda gerçekleşir.

L kalınlığında iki yüzünün sıcaklıkları T_1 ve T_2 olan malzeme içinde birim zamanda taşınan ısı miktarını Q olarak tanımlayalım. Isı alışverişine neden olan sıcaklık gradiyenti tek boyutta dT/dx ' dir. Birim zamandaki ısı aktarım miktarı 1822 yıllarında Fourier Yasası olarak ifade edilen eşitlik 2.16'da görülen bağıntı ile ifade edilir.

$$Q = k A (T_1 - T_2)/L \quad (2.16)$$

Eşitlik 2.16'da tanımlanan parametrelere ek olarak malzemeye özgü bir parametre olan ve basınç, sıcaklık gibi bazı fiziksel parametrelere göre değeri değişen termal iletkenlik sabiti olarak bilinen ' k (W/m K)' sabiti de yer almaktadır.

Bazı maddeler için termal iletkenlik sabiti çizelge 1'deki gibidir. Değerlerden de anlaşılacağı gibi yoğunluğu yüksek olan metal malzemelerin ısıl iletkenliği yüksek iken, daha az yoğunluklu polimer ve ahşap malzemelerin ısıl iletkenlikleri çok daha düşüktür.

Çizelge 1-Oda sıcaklığındaki bazı katı malzemeler için termal iletkenlik katsayısı

Malzeme	k (W/m K)	Malzeme	k (W/m K)
Bakır	350	Paslanmaz çelik	14
Alüminyum	236	Yumuşak çelik	50
Cam	0.9	Tahta, kontraplak	0,15
Yüksek yoğunluklu beton blok	1.4	Orta yoğunluklu beton blok	0.5
Fosfor bronz	48	Naylon, kauçuk	0.25
Polietilen	0.5	Genleşmiş polistren	0.035

Bazı sıvı ve gazlar için termal iletkenlik katsayıları çizelge 2'deki gibidir[26].

Çizelge 2-Bazı sıvı ve gazlar için termal iletkenlik katsayıları

Sıvı	k (W/m K)	Gaz	K (W/m K)
Motor yağı (20 °C)	0.145	Argon (300°K, 1 bar)	0.018
Motor yağı (80 °C)	0.138	Hava (300°K, 1 bar)	0.026
Su (20 °C)	0.603	Hava (400°K, 1 bar)	0.034
Su (80 °C)	0.670	Hidrojen (300°K, 1 bar)	0.180
Civa (27 °C)	8.540	Freon 12 (300°K, 1 bar)	0.070

b. Yayınım (Konveksiyon)

Akışkanın mevcut olduğu ortamlarda görülen bir ısı aktarım yöntemidir. Akışkan moleküllerinin sahip olduğu hareket sebebiyle ortam içerisinde kısmi difüzyon ile ya da kitle halindeki akışkan hareketi ile ısının bir bölgeden diğerine aktarılmasıdır. Yayınım ile ısı transferi doğal yayınım ve zorlanmış yayınım olarak iki kategoride incelenir. Doğal yayınım ısıtma veya soğutmaya bağlı olarak akışkan içerisinde meydana gelen yoğunluk farklılıklarından ötürü görülen akışkan hareketinden kaynaklanır. Zorlanmış yayınım ise fan, rüzgar ya da devir-daim pompaları gibi dış etkiler kullanılarak akışkanın hareketlendirilmesi sonucu meydana gelen ısı taşınım şeklidir. Yayınım ile ısı aktarımı Newton'un yasasına göre eşitlik 2.17 ile ifade edilmektedir.

$$Q = hc \times A \times (T_1 - T_2) \quad (2.17)$$

Eşitlikte yer alan ' hc ' yayınım ile ısı transfer sabiti olup birimi W/m^2K 'dir. Bu sabit akışkanın türüne ve bunun ile birlikte akışkanın termal iletkenliğine, yoğunluğuna, öz ısı değerine ve viskozitesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Bu sabitin bağımlı olduğu diğer bir parametre de akışın türüdür. Akışın türbülens (girdap) ya da laminer (tabakalı) olması ısı geçişinde farklılık yaratmaktadır. Genel olarak bilinen akışkanın akış hızı arttıkça ' hc ' sabitinin de arttığıdır. Yani aynı tür iki akışkanın ' hc ' sabiti bulunduğu fiziksel koşullara göre farklılık gösterebilmektedir. Bazı akışkanların farklı koşullarda sahip oldukları ' hc ' değerleri çizelge 3' de görülmektedir [26].

Çizelge 3-Sıvı ve gazlar için termal yayınım katsayı değerleri

Akışın şekli	Akışkan Türü	h_c ($W/m^2 K$)
Bina iç yüzeyde	Hava	1-5
Bina dış yüzeyde	Hava	5-150
Boru dış yüzeyde	Gaz	10-60
	Sıvı	60-600
Boru iç yüzeyde	Gaz	60-600
	Organik sıvı	300-3000
	Su	600-6000
	Sıvı fazda metal	6000-30000
Doğal yayınım	Gaz	0.6-600
	Sıvı	60-3000
Yoğunlaşma durumunda	Sıvı ince tabaka	1000-30000
	Sıvı damlalar	30000-300000
Kaynama durumunda	Sıvı / Buhar	1000-10000

c. Işınım (Radyasyon)

İletim ve yayınım ile enerji akışı gerçekleşebilmesi için katı ya da akışkan bir ortama ihtiyaç vardır ancak ışınım ile ısı enerjisi transferi için herhangi bir maddesel ortam gerekmemektedir. Elektromanyetik ışınımın en hızlı yayıldığı ortam vakum

ortamıdır. Elektromanyetik ışınımın vakumdaki hızı 'c' harfi ile ifade edilir ve yaklaşık değeri $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 'dir. Buna ek olarak elektromanyetik dalga birçok gaz ve sıvı ortam ile kısmen ince cam ve saydam plastik gibi bazı katı ortamlarda da ilerleyebilmekte ve ısı aktarımı yapabilmektedir.

Termal ışınım ile ilgili bilinmesi gereken en temel bilgi; sıcaklığı mutlak sıfırdan farklı olan her maddenin uzayda termal ışınım yaydığı ve maddenin üzerine gelen termal ışınımı soğurduğudur. Oda sıcaklığındaki malzemelerin kuvvetli olarak yaydığı kızılötesi ve görünür ışınım, yansıtılma, kırılarak geçme ve emilme gibi fiziksel davranışları sergilemektedir. Termal ısı aktarımının sebebi de ortam içerisinde geçiş sırasında meydana gelen emilim olayıdır.

1884 yılında Boltzman ideal bir cisim üzerindeki termal yayınımdan kaynaklı net ısı aktarımının eşitlik 2.18 ifadesine uygun davrandığını öne sürmüştür.

$$Q = \epsilon_T \sigma_s A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.18)$$

Eşitlikteki 'A' sıcaklık değişimi hakkında bilgi edinmek istediğimiz cismin etkin yüzey alanı, 'T₁' cismin mutlak sıcaklığı, 'T₂' cismin etrafını saran çevrenin mutlak sıcaklığı, 'σ_s' ifadesi ise Stefan-Boltzmann sabitidir. Bu sabit $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 'dir. Yukarıda verilen bağıntı, üzerine düşen bütün dalga boylarındaki ışığı soğuran ve yine her dalga boyunda yayınım yaptığı kabul edilen bir cisim için geçerlidir. Eşitlikte görülen diğer bir parametre olan 'ε_T' ise söz konusu cismin termal yayınım ve emilim katsayısıdır ve 0 ile 1 arasında birimsiz bir değerdir. Bu değer cisim rengine, yüzeyinin parlaklığına ve pürüzlülüğüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çizelge 4'de bazı yüzeyler için termal yayınım katsayı değerleri görülmektedir [26, 27]. Çizelge 4'den anlaşılacağı gibi malzemelerin yüzey parlaklığı arttıkça termal yayınım katsayıları azalmaktadır. Yani dış ortamlardan gelen termal yayınım etkisi azalmaktadır.

Çizelge 4-Bazı yüzeyler için termal ışınım ile yayılım katsayıları

Malzeme	ε	Malzeme	ε
İdeal kara cisim	1	Alüminyum boya	0.27-0.67
Beyaz boya	0.97	Galvanize çelik	0.3
Plastik	0.91	Paslanmaz çelik	0.15
Siyah epoksi boya	0.89	Parlatılmış Paslanmaz Çelik	0.075
Paslı çelik	0.8	Altın	0.47
Parlatılmış titanyum	0.19	Parlatılmış altın	0.025
Parlatılmış pirinç	0.03	Teflon	0.92
Parlatılmış bakır	0.023-0.03	Mükemmel ayna	0

Şu ana kadar anlatılan ısı aktarım metodlarını bir örnekte birleştirerek açıklayalım. Bunun için en elverişli ve anlaşılır örnek Güneş ve Dünya arasındaki termal ilişkidir. Dünyamızın yaşam kaynağı olan güneşten gelen ışıkların toprağımızı ısıtması ışınım ile ısı aktarımına örnektir. Yeryüzü ile temas halinde bulunan atmosferdeki

havanın topraktan aldığı ısı sonucu ısınması iletim ile ısı aktarımına örnek iken ısınan havanın yer değiştirerek yükselmesi sonucu bütün atmosferi ısıtması ise yayılım ile ısı aktarımına örnek olarak gösterilebilir.

2.5.2 Düşük sıcaklık

Atmosfer koşullarındaki sıcaklık değerinin altına inilmesi durumunda ortam koşulları düşük sıcaklık ortamı olarak değerlendirilir. Fransız fizikçi ve kimyacı J.A.C. Charles (1746-1823), suyun donma noktası olan 0°C 'de sabit basınç altında gazın hacminin sıcaklığın her 1°C'lik düşüşünde 1/273.15'lik oranda azaldığını keşfetmiş bu sebeple -273.15 °C bütün gazların kaybolacağını ve bu sıcaklıkta hiçbir parametrenin algılanamayacağını öngörmüştür.

1848 yılında, Lord Kelvin bir görüş öne sürerek -273.15 °C sıcaklık değerinde hacmin sıfıra ulaşmasına ek olarak maddeleri oluşturan moleküllerin hareketlerinin de ortadan kaybolacağını ve moleküllerin durgun hale geleceklerini ön görmüştür. Bu sıcaklık değerinde hiçbir fiziksel hareketin gerçekleşmeyeceği, bu noktadan daha düşük sıcaklıklara gidilemeyeceği görüşlerinden ötürü bu sıcaklık değeri bilimde 'mutlak sıfır sıcaklığı' olarak kabul edilmiştir[28]. Lord Kelvin'in bu ön görüşüne dayanarak da yeni bir sıcaklık cetveli olarak Kelvin cetvelini oluşturmuştur. Bu cetvel bilimsel olarak kabul görmüş ve doğada da termal ışıyım bağıntısı gibi fiziksel bağıntıların bu cetvele göre verilen değerler ile ilintili olarak çalışmaları görülmüştür. Doğadaki ön görülen mutlak sıfır sıcaklık değeri de Kelvin cetvelinin başlangıcı olarak kabul edilmiş ve mutlak sıfır sıcaklığı sıfır Kelvin olarak kabul edilmiştir.

Düşük sıcaklık bölgesinde bilinmesi gereken ve akademik terminoloji de kullanılan bir kavram da 'kriyojenik sıcaklık' kavramıdır. Keyfi olarak seçilmiş bir değer olmasına rağmen 150 kelvinden mutlak sıfır sıcaklığına kadar olan sıcaklık bandı kriyojenik sıcaklık olarak tanımlanır. Bu sıcaklık değerlerinde atmosferdeki gazların çoğu ya sıvı ya da katı fazda bulunurlar. Atmosferde bulunan gazların sıvılaştırma ve katılaştırma sıcaklık değerleri çizelge 5'deki gibidir.

Çizelge 5- Atmosfer gazlarının sıvılaştırma ve katılaştırma sıcaklıkları

	Sıvılaştırma sıcaklığı(K)	Katılaştırma sıcaklığı(K)
Azot (N ₂)	77.355	63.15
Oksijen(O ₂)	90.118	54.36
Argon(Ar)	87.302	83.81
Karbondioksit(CO ₂)	216.6	194.7
Neon(Ne)	27.104	24.56
Helyum(He)	4.22	0.95
Metan(CH ₄)	109-113	90.7

Ulaşıldığı bilinen en düşük sıcaklık Helsinki Teknik Üniversitesi'nde mutlak sıfır sıcaklığından 10⁻¹⁰ °C derece daha yüksek sıcaklıktaki sıcaklık değeridir. Bu değer

uzayın ortalama sıcaklık değeri olan 2.73 Kelvin sıcaklığından daha düşük bir değerdir.

Evrensel çalışma alanlarından bir diğeri mevcut kaynakları sınırlı olan dünyamızın dışında yani uzayda kullanılabilecek cihaz ve malzemelerin geliştirilmesi ve uzay araştırmalarının yapılmasıdır. Bu sebeple düşük sıcaklık çalışılması ve araştırılması gereken güncel ve önemli çalışma alanlarından bir tanesidir. Hedeflenen piezoelektrik motorun kriyojenik sıcaklıklarda çalışmaya uyumlu olması yapılan araştırmaların daha geniş kapsamlı olması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır ve bu sebeple malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken fiziksel parametreler mevcuttur.

2.5.3 Vakum

Amerikan Vakum Topluluğu(AVS)'nin 1958 yılında yapmış olduğu tanıma göre vakum, basıncı atmosferik basınç değerinin altında olan gazların doldurduğu kapalı hacim olarak tanımlanmaktadır. Moleküler düzeyde bir tanım yapılırsa vakum, kapalı bir hacmin içerisindeki moleküllerin belli cihazlar kullanarak başka bir ortama taşınımı ile mevcut hacmin atomlardan arındırılmasıdır.

Vakum değerleri ilgili hacmin içindeki gazların basıncı ya da birim hacimdeki molekül sayısına göre sınıflandırılarak adlandırılmıştır. Bu vakum sınıfları için belirtilen fiziksel parametreler çizelge 6'daki gibidir. Vakum teknolojisinin günümüzde ulaştığı limit yeryüzünde 10^{-13} mbar mertebesinde vakum değerine ulaşılabilecek düzeydedir. Bu değer galaksiler arasında var olan 10^{-18} mbar mertebesindeki vakumdan hala çok uzak olmasına rağmen, atmosferimizin hemen dışındaki vakum seviyesi ile karşılaştırılabilir mertebededir.

Çizelge 6- Vakum sınıfları ve basınç değerleri (Vakum Tekniği; Prof. Dr. Tarımcı, Dr. Sarı)

Vakum sınıfları	Basınç (Pa)	Basınç (mbar)	Gaz molekül yoğunluğu (molekül/m ³)
Alçak Vakum (LV)	$10^5-3,3 \times 10^3$	1013-1	$2,5 \times 10^{25}-10^{22}$
Orta Vakum (MV)	$3,3 \times 10^3-10^{-1}$	$1-10^{-3}$	$10^{22}-10^{19}$
Yüksek Vakum (HV)	$10^{-1}-10^{-4}$	$10^{-3}-10^{-6}$	$10^{19}-10^{16}$
Çok Yüksek Vakum (VHV)	$10^{-4}-10^{-7}$	$10^{-6}-10^{-9}$	$10^{16}-10^{13}$
İleri Yüksek Vakum (UHV)	$10^{-7}-10^{-10}$	$10^{-9}-10^{-12}$	$10^{13}-10^{10}$
Aşırı Yüksek Vakum (XHV)	$<10^{-10}$	$<10^{-12}$	$<10^{10}$

Atmosferde bulunan ve yaşamamız için gerekli olan gazlardan bir kısmı bazı fiziksel ve kimyasal işlemlerin gerçekleştirildiği ortamlarda sorun yaratabilir. Örneğin, safsızlığın önemli olduğu bazı yarıiletken malzemelerin üretimi sırasında ortamda istenmeyen türden atomların bulunması malzemenin safsızlığını dolayısıyla

elektronik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebepten bu tür malzemelerin üretiminin yapıldığı ortamda vakum seviyesi artırılıp malzeme içerisine girebilecek istenmeyen atomların sayısını en aza indirerek malzemenin en saf biçimde elde edilmesi sağlanır.

Düşük sıcaklıklarda bilimsel deneylerin yapılabilmesi için de vakum ortamına ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde 10 milikelvin gibi kriyojenik sıcaklıklarda bilimsel deneylerin yapıldığı düşünülürse, atmosfer altında yapılacak bir deneyde örnekler üzerinde oluşacak olan domuş nem katmanının ne kadar büyük bir problem oluşturacağı kolaylıkla tahmin edilebilir. Vakum ortamı oluşturulmadan düşük sıcaklıklarda yapılacak deneylerde ölçülecek örnek üzerinde oluşan bu katman, malzemenin incelenmesini oldukça zorlaştırır ve ölçümün hatalı sonuçlar vermesine sebep olabilirken bazı durumlarda ise (yüzey görüntüleme sistemleri vb.) ölçme işlemini olanaksız hale getirmektedir. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda yapılacak deneylerde ölçülecek örneğin mutlaka vakum altına alınarak, ortamda yoğunlaşabilecek gaz moleküllerinden arındırılması gerekmektedir.

Vakum ortamı özellikle değişik sıcaklıklarda yapılacak çalışmalarda önemli rol oynamaktadır. Düşük sıcaklığa inilmek istenildiğinde ısı transferinin önlenmesi amacıyla özellikle iletim ve yayılım yoluyla ısı aktarımının engellenmesinde kullanılan en avantajlı yöntemdir. Vakum ortamı malzeme üretilen hacmin atomlardan arındırılması ve ortamın saflaştırılması açısından önemli bir parametredir. Bahsettiğim nedenlerden ötürü vakum hem iyi bir termal yalıtkan iken hem de ortamı yabancı bileşenlerden temizlemek için kullanılan iyi bir çözümdür.

2.5.4 Manyetiklik ve Manyetik Alan

Bilindiği üzere maddenin en küçük yapı taşı olan atomlar merkezinde pozitif elektrik yüklü proton ve yüksüz nötronlar barındıran çekirdek; çekirdek etrafında belli bir yörünge(orbital) üzerinde dönen negatif yüklü elektronlardan oluşmaktadır. Periyodik cetvelde bulunan her atom farklı sayılarda elektron ve proton içererek kendilerine has fiziksel özellikler gösterirler. Ancak atomların sahip oldukları elektron sayıları farklı olsa bile bu elektronların çekirdek etrafındaki hareketleri ve izledikleri yörüngeler rastgele değildirler. Kuantum fiziğine göre bu elektronlar çekirdek etrafında yer alan belli kuantum kabuklarında yer alan belli yörüngeler üzerinde belli sayıda olacak şekilde dizilim gösterirler. Elektronlar bu yörüngelere yerleşirken de rastgele değil belli kurallar çerçevesinde ve sıralama ile bu yörüngelerde bulunurlar. Atomların sahip olduğu bu kuantum yörüngelerinin elektronlar tarafından tamamen dolu olması ya da bu yörüngelerde eşlenmemiş elektronlar olması malzemenin farklı fiziksel özelliklere sahip olmasına sebep olur. Malzemelerin manyetik özellikleri de malzemelerin sahip olduğu eşlenmemiş elektronların sayı ve pozisyonlarının bir sonucudur.

Bilindiği gibi atomların alt parçası olan negatif elektrik yüklü elektronlar sahip olduğu yörünge dönü hareketi ve kendi eksenleri etrafında yaptıkları spin dönü hareketleri sonucu bir manyetik dipol oluştururlar. Malzeme içerisindeki elektronların neden

oldukları bu manyetik dipoller malzeme içerisinde belli bir dizilimde yer alabilmekte ya da rastgele olacak şekilde bulunabilmektedir. Diğer bir yandan dipollerin dizilimi çevresel ortamda bulunan manyetik alandan etkilenmektedir. Malzemelerin sahip olduğu dipollerin dış alan etkisi altında ve alan yok iken varolan dizilimi malzemelerin manyetik karakteristiğini belirlemektedir.

Malzemeler karakterlerine göre; paramanyetik, ferromanyetik, antiferromanyetik, ferrimanyetik, diamanyetik gibi sıfatlarla adlandırılan davranışlar sergilemektedirler. Malzemelerin manyetik davranışları şu şekildedir;

Paramanyetizm; herhangi bir manyetik alan etkisi olmadığı durumda manyetik dipoller termal salınım sebebiyle rastgele pozisyonda bulunduğu durumdur. Bu malzemelere bir dış manyetik alan uygulandığında dipollerin sahip olduğu manyetik momentler uygulanan alana paralel doğrultuda ve aynı yönde olacak şekilde dizilim gösterirler. Dış manyetik alan ortadan kalktığında dipoller belli bir süre içinde önceki rastgele durumlarına geri dönerler[29].

Ferromanyetizm; malzemenin sahip olduğu manyetik dipol momentler manyetik alan altında alan doğrultusuna paralel ve aynı yönde konumlanma eğilimindedirler ancak dış manyetik alan ortadan kalktığında malzeme içerisindeki bu dizilim bozulmadan kalır[29].

Antiferromanyetizm; manyetik alan olmadığı durumda malzeme içerisindeki manyetik dipoller komşu dipol ile aynı doğrultuda ve büyüklükte ancak ters yönde dipol momentlerine sahip olacak şekilde dizilirler. Bu sebeple toplamda bir manyetik etki göstermezler[29].

Ferrimagnetizm; malzeme içerisindeki farklı büyüklükte manyetik momentlere sahip dipollerin zıt yönlerde dizilim gösterdiği fiziksel durumdur. Bu dizilim sonucunda toplamda bir manyetizasyon etkisi görülmektedir[29].

Diamanyetizm; malzeme üzerine bir dış manyetik alan uygulandığında malzeme içerisinde manyetik dipol momentleri mevcut alanla aynı doğrultuda ancak alan yönüne zıt yönde dizilirler ve dış alan etkisini azaltacak mıknatıslanma oluştururlar. Bu özellik birçok malzemede varolmasına rağmen bu malzemelerin manyetik geçirgenlikleri serbest uzayın geçirgenliğinden çok küçük olduğu için bu malzemeler manyetik olmayan malzemeler olarak bilinirler. Ancak bu etkinin çok yüksek olduğu ve üstün özellikli olarak adlandırılan süper iletken malzemeler diamanyetik etkinin kuvvetli olarak görüldüğü malzemelerdir. Bu tarz malzemeler bir alan altında iken malzemenin manyetik dipolleri manyetik akıyı sıfıra indirecek şekilde yönlendirilerek kuvvetli bir zıt alan oluştururlar.

Uzayda manyetik alanlar manyetik malzemeler dışında farklı şekiller ile de oluşmaktadır. Manyetik alan kaynaklarını kalıcı alan kaynakları ve geçici alan kaynakları olarak iki grupta inceleyebiliriz.

Kalıcı manyetik alan kaynakları, geçmişte belli fiziksel işlemlerden geçerek malzeme içindeki manyetik dipolleri aynı doğrultu ve yönde dizili olarak korunan malzemelerdir. Buldukları ortamda hiçbir dış beslemeye ihtiyaç duymadan bir manyetik alan oluştururlar. Günümüzde mıknatıs olarak bilinen malzemeler bunlara örnektir.

Elektromanyetik teoremin sonucu olan ve matematiksel ifadelerle dayanan Maxwell denklemlerine bakıldığında bir uzayda elektrik alanının zamana bağlı değişimi bir manyetik alan yaratırken, manyetik alanın zamana bağlı değişimi de net bir elektrik alan yaratmaktadır. Uzaydaki elektrik yüklü parçacıklarının hareketlerinin manyetik alan oluşturdukları bilinmektedir. Geçici manyetik alan kaynakları, Maxwell yasasında da belirttiği gibi iki noktası arasında elektrik potansiyeli mevcut olan malzemelerin üzerinden geçen elektrik akımı sonucunda buldukları uzayda zamana bağlı değişen elektrik alan etkisine sebep olan yüklerin hareketinin sonucu ortaya çıkan manyetik alan etkisidir. Bu manyetik alan; malzeme üzerindeki elektriksel potansiyel kaldırıldığında elektrik akımı da sonlanacağı için yok olacaktır. Dolayısıyla bu tarz kaynakların alan üretebilmesi için sürekli bir elektrik akımı ile beslenme ihtiyaçları vardır. Genellikle laboratuvarlarda ve ölçüm sistemlerinde kullanılan Hemholtz bobin çifti ve selenoid bobinler ve süper iletken mıknatıslar bu tarz manyetik alan kaynaklarına örnektir.

2.5.5 Düşük Sıcaklık ve Vakumun Malzeme Özelliklerine Etkisi

Kaydır-taşı tipi piezoelektrik motorlarda hareketin bağımlı olduğu parametreler önceki kısımlarda anlatılmıştır. Motora hareketi veren piezoelektrik malzemenin piezoelektrik sabiti ve hareketli yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısında gerçekleşecek değişimler motor performansını da değiştirecektir.

Tezin araştırma konularından biri olan düşük sıcaklık durumu ile ilgili olarak yapılan kaynak araştırmalarında piezoelektrik malzemelerin sıcaklığın düşmesi ile birlikte hem eksen yönünde hemde kayma yönündeki piezoelektrik sabiti (d) değerlerinin ciddi oranlarda düştüğü bilgisine ulaşılmıştır. Bu oran piezoelektrik malzemelerin türüne göre farklılık göstermekle beraber 293°K oda sıcaklığındaki değer ile 4°K sıcaklığındaki değerler arasında dört ile yedi kat kadar değişmektedir[30]. Piezoelektrik motorların adım büyüklüğü ve hız değerlerinin kriyojenik sıcaklıklarda yedi kata kadar azalabileceği yorumuna varılabilir.

Yapılan bir başka çalışma ise iki farklı şirketten alınan piezoelektrik malzemeler için yapılmış olan ölçümler sonucunda piezoelektrik malzemelerin elektriksel dirençlerinin yükseldiği ve kapasitans değerlerinin yaklaşık yedi kat azaldığı şeklindedir. Aynı çalışmada bizim çalışmamız için asıl önem arz eden maksimum yer değiştirme miktarının kapasitans-sıcaklık verileri ile benzer şekilde azaldığı yönündedir[31].

Düşük sıcaklığın değişime neden olduğu diğer parametre malzemelerin termal iletkenlik katsayısıdır. Bu katsayı on kata kadar azalmaktadır. Dolayısıyla sıcaklık

azaldıkça sistem sıcaklığını düşürmek daha da zor bir durum olmakta ve zaman almaktadır. Düşük sıcaklık sistemlerinde farklı amaçlar için kullanılan teflon, naylon, kapton, G10, alüminyum, paslanmaz çelik, inconel, alaşımlı titanyum, pirinç, fosfor bronz ve başka malzemeler için termal iletkenlik sabitinin sıcaklığa bağlı değişim değerleri çeşitli kaynaklarda yer almaktadır [30, 32-34].

Düşük sıcaklık piezoelektrik motor uygulamalarında üzerinde durulması gereken bir başka parametrede kullanılacak malzemelerin elastik modulüdür. Sıcaklık azaldıkça malzemelerin elastik modül değeri artış göstermektedir. Bu parametre özellikle baskı yayı olarak kullanılacak parça için önemlidir. Yapılan bir çalışmada paslanmaz çelik malzemenin imal edilmiş olan ve baskı yayı olarak kullanılan yaprak yayın baskı kuvvetinin 293°K sıcaklıkta 1.1N iken 4°K sıcaklıkta 1.5N değerine çıktığı belirtilmiştir [18]. Düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılan bazı malzemeler için sıcaklığa bağlı elastik sabiti verileri kaynaklarda mevcuttur [34, 35].

Tezin diğer bir araştırma konusu vakum ortamıdır. Vakum ortamının yüzey sürtünme katsayısına olan etkisi ile ilgili farklı malzemeler için yapılmış çalışmalar bilinmektedir. Kuartz malzeme yüzeyi üzerinde yapılan çalışmalarda vakum yüzey sürtünme katsayısında belirgin bir değişikliğe sebep vermediği bilgisi ile sonuçlanmıştır. Ancak sürtünme katsayısının yüzeyin geçirdiği temizlik operasyonlarına bağlı olarak iki katına kadar değişiklik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Asit vb. maddelerle yüzeyi temizlenen malzemenin sabun ve saf su ile temizlenip fırınlanarak kurutulan ya da aseton ile temizlenen malzemelere göre iki kat kadar daha büyük sürtünme katsayısına sahip oldukları ölçülmüştür[36].

Vakum altında yapılmış bir başka çalışmada paslanmaz çelik, safir ve teflon kaplı çelik yüzeyler arasında 10^{-6} torr basınçta 400 K ile 4 K sıcaklıkları arasında yüzey sürtünme katsayısı ölçümleridir. Bu çalışmada ölçüm numuneleri birkaç kez soğutulup ısıtılarak ölçüme tabi tutulmuşlardır. Çalışmalar göstermiştir ki ardışık ısıtma ve soğutma operasyonları sırasında alınan ölçümlerde eş sıcaklık bölgelerinde ölçülen yüzey sürtünme katsayıları birbirinden farklıdır ve her defasında artış göstermiştir. Bunun durumun yüzeylerde meydana gelen aşınmadan kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Yani sıcaklığın sürtünme katsayısı üzerine özellikle düşük sıcaklık bölgesi içerisinde belirgin bir etki göstermediği sonucuna ulaşılmıştır. [37].

Tezin bundan sonraki kısmında kaynak taraması sonucu ulaşılan bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilecek olan mekanik tasarım aşamaları ele alınacaktır

3 TASARIM

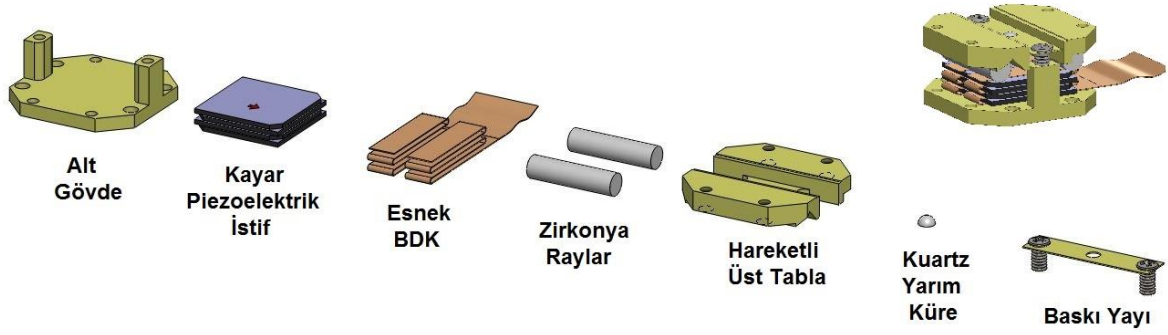
Tez çalışmasında iki farklı kaydır-taşı tipi piezoelektrik motor uygulaması çalışılmıştır. Bunlardan biri DS-TUM mikroskobuna adapte edilen tüp piezoelektrik tahrikli X-Y motor tasarımı diğeri ise kayar piezoelektrik tahrikli tek eksen motor tasarımıdır. Tasarlanan motorlar için ilk sınırlayıcı ölçü test için kullanılacak kriyostatin ölçüm haznesinin boyutudur. Bu hazne iç çapı 29 mm olan bir borudur ve tasarlanan motorlar hareket limitlerinde dahi bu geometrik limitleri aşmamalıdır.

Mekanik tasarımda oluşturulan her parça ve adapte edileceği sistem Solidwork programı kullanılarak bilgisayar ortamında üç boyutlu modellenmiş ve sonrasında programın montaj ünitesi kullanılarak mekanik montaj aslına uygun sınırlandırmalar ile yapılmıştır. Bu sayede parçalar arasında istenilen kapasitelerde hareket altında yapı içinde çarpışmalar olup olmadığı bilgisayar ortamında kontrol edilmiştir. Bu durum imalat öncesi tasarımdan kaynaklı mekanik hataları görmemizi sağlamıştır.

3.1 Tek Eksen Kaydır-Taşı Kızak Tasarımı

Tez çalışmasının bu bölümü kayar tip piezoelektrik malzemeler ile tahrik edilen, 3 mm hareket kapasitesinde tek eksende hareket eden bir kaydır-taşı tipi motor üzerinde yapılan çalışmaları ele almaktadır.

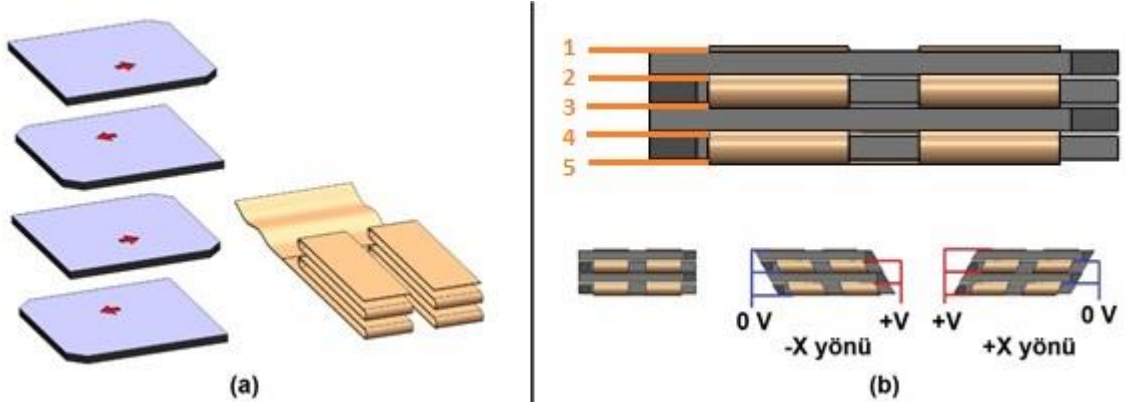
Oluşturulan mekanizmada bütün parçalar 15mm x 15mm genişliğinde kare bir alanda yer kaplayan alt gövde isimli parça üzerinde yer almaktadır. Alt gövde parçasının orta bölgesinde 10mmx10mm kare alanda dört adet kayar piezoelektrikten oluşan istif grubu yer almaktadır. Piezoelektrik istif grubunun üzerinde hareket eksenine paralel olarak konumlandırılmış iki adet 2.5mm çapında zirkonya ray piezoelektrik istife yapıştırılarak tuturulmuştur. Mekanik yapının buraya kadar anlatılan kısmı montaj sonrasında tek parça bir grup olarak ele alınabilir. Zirkonya raylar üzerinde hareket verilecek olan üst tabla bulunmaktadır. Üst tablanın raylar ile temas eden alt yüzeyinde hareket eksenine paralel 90 derecelik bir V yatak ve bu yatağa paralel uzanan düzlemsel bir kademe bulunur. Raylardan biri V yatak içine oturacak şekilde üst tabla konumlandırılır. Bu sayede mekanizmanın tek eksende doğrusal hareket yapması sağlanmaktadır. Diğer rayın düzlemsel bir kademeye basmasının sebebi ise termal daralmalardan kaynaklanacak kasıntı etkisini ortadan kaldırmaktır. Hareketli tablanın üst yüzeyinde baskı yayının yerleştirileceği bir kanal bulunmaktadır. Bu kanal içerisinde kanalın yüzeyine basan çapı 1.8 mm olan kuartz malzemedeki yarım küre bulunmaktadır. Baskı yayının tam merkezinde 1.5mm çapında delik mevcuttur ve baskı yayı kuartz yarım kürenin dairesel yüzeyine basacak şekilde yerleştirilmiştir. Baskı yayı alt gövde üzerine iki ucundan M1.6 standardında vidalar ile sabitlenir ve baskı yayının hareketli üst tablaya uyguladığı baskı kuvveti bu vidalar ile kontrol edilmektedir. Anlatılan tasarımda yer alan parçaların demonte şeması şekil 37'de görülmektedir.



Şekil 37- Tek eksen piezoelektrik kızak tasarımı mekannik parçaları

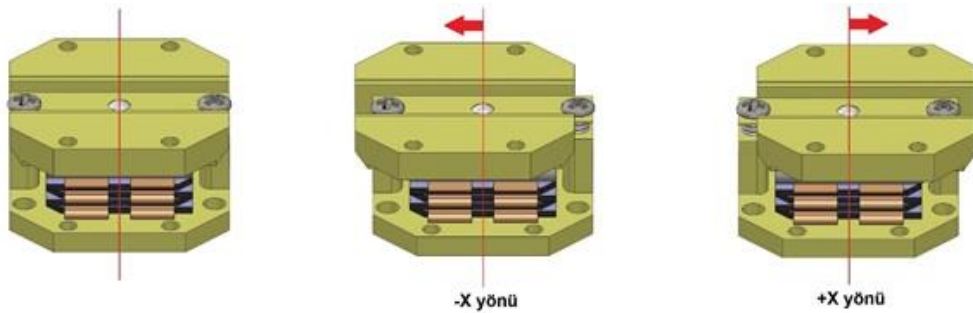
Tasarımda kullanılan yaprak baskı yayı, alt gövde ile hareketli üst tabla parçaları fosfor bronz malzemeden imal edilmiştir. Kullanılan baskı yayı 3 mm x 15 mm dikdörtgen şeklinde 0.125 mm kalınlığında malzemeden yapılmıştır. İmalata giren malzemelerin fosfor bronz seçilmesinin sebepleri tasarım bölümünün malzeme seçimi ile ilgili bölümünde yer almaktadır.

Tasarımla ilgili bahsedilmesi gereken diğer bir konu seçilen piezoelektrik malzemenin türü ve bunun istif haline getirilmesi işlemidir. Tasarımda Noliac firmasına ait CSAP03 kodlu NCE51 sınıfı kayar piezoelektrik malzemeler kullanılmıştır. Bu piezoelektriğin seçilmesinde en önemli parametre diğer ürünlere göre daha büyük piezoelektrik sabite ve yüksek çalışma voltajına sahip olmasıdır. Katalog değerlerinde 10mm x 10mm kare geometride 0.5 mm kalınlıkta olan bu ürün için ± 320 volt çalışma geriliminde 1.5 μ m yer değiştirme ifade edilmektedir. Bu sayede atmosfer koşullarında dört adet kayar piezoelektrik malzemenin istiflenmesi ile maksimum 6 μ m kadarlık kayma gerçekleşeceği kabul edilebilir. Piezoelektriklerin istif halindeki dizilimi şekil 38-a yer almaktadır. Kayar piezoelektriklerin kutuplanma yönü pah kırılmış kenar yönündedir. Piezoelektrik istif yapılırken ardışık gelen piezoelektrikler kutuplanma yönleri zıt olacak şekilde yerleştirilir. Bunun sebebi birbiri ile karşılıklı gelen yüzeyler eş elektriksel potansiyel değerinde olacağı için piezoelektriklerin kayma yönlerinin aynı olmasını sağlamaktır. Eğer piezoelektriklerin tamamı aynı yöne bakacak şekilde istiflenirse ardışık gelen piezoelektrikler zıt yönlerde kayma hareketi yapacak ve toplam yer değiştirme üst yüzeyde sıfır olacaktır. Ardışık piezoelektrikler arasında 0.1mm kalınlığında esnek baskı devre kartı kullanılarak elektrik beslemesi yapılmaktadır. Piezoelektrikler ve esnek baskı devre kartı hava tabancası kullanılarak lehimleme methoduyla istif hale getirilmiştir.



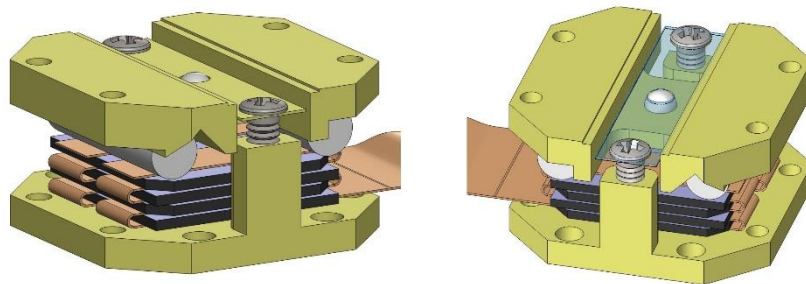
Şekil 38- (a)Kayar tip piezoelektrik istif montaj şekli,(b)Piezoelektrik istif elektriksel besleme ve hareket yönü şeması

Pizeoelektrik istifin elektriksel besleme şeması şekil 38-b' de görülmektedir. İstifte yer 1,3 ve 5 elektrot grubu ile 2 ve 4 grupları kendi içlerinde eş voltaj değerindedir. Bu elektrot gruplarından biri sıfır volt değerinde tutulurken iken diğere besleme voltajı uygulanır. Besleme voltajı ters uygulandığında piezoelektriklerinde kayma yönü değişir dolayısıyla hareketli tablanın da hareket yönü değişir (Şekil 39).



Şekil 39- Tek eksen kızak tasarımı hareket yönü

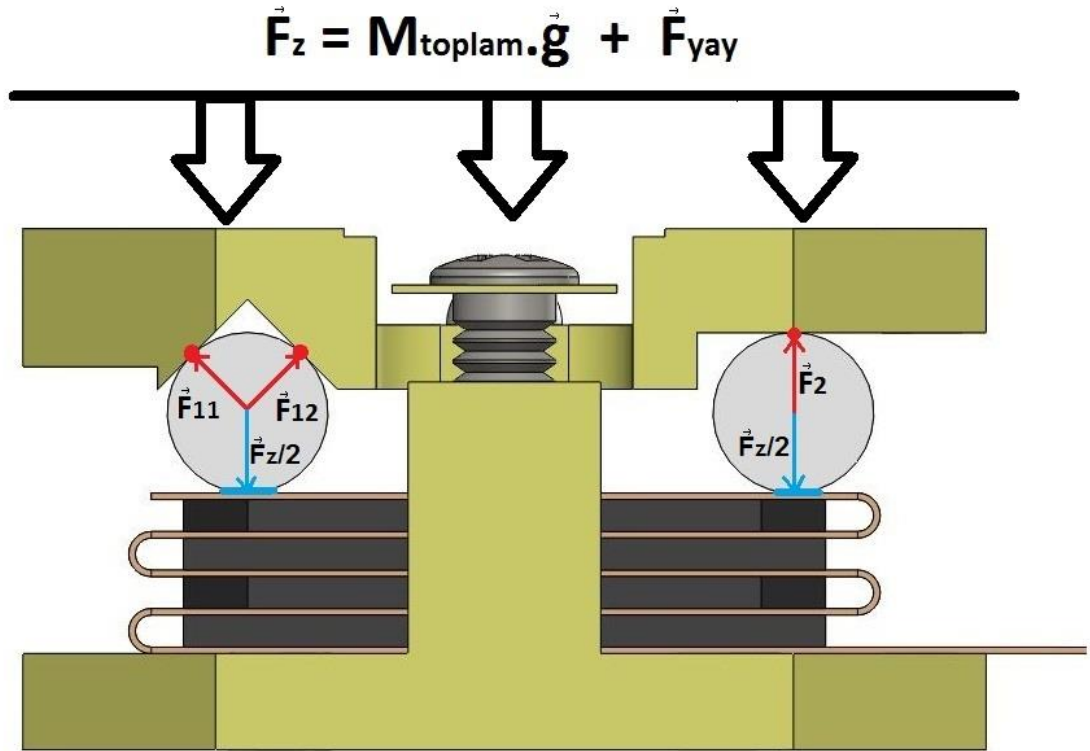
Ayrıntıları verilen tek eksen kaydır- taşı kızak tasarımının montajlı hali ve baskı yayının şefafatılmış görüntüsü ile beraber hareketli üst tablanın geometrisi ve kuartz yarım kürenin yerleşimi şekil 40'da yer almaktadır.



Şekil 40-Tek esken kayar piezoelektrik tahrikli kızak tasarımı

Tek eksen kaydır-taşı mekanizma tasarımı için hareketli kontak noktalarında oluşan kuvvet diyagramı şekil 41'i görülmektedir. Hareket tablası statik durumda iken raylar

üzerine binen toplam F_z kuvveti üst tabla ve taşınan numunenin toplam ağırlığı ile yay baskı kuvvetinin toplamına eşittir. Net kuvvet; geometrinin simetrisi göz önüne alındığında mekanizmayı tam ortadan bölen bir eksen ile çakışık tek bir kuvvet olarak ele alınabilir. Bu durumda net kuvvetin raylara uzaklığı eşit olduğu için ray tabanındaki kuvvet dağılımı F_z kuvvetinin yarısı büyüklüğünde olan iki eş kuvvet kadar olacaktır. Bu kuvvetler şekil 41’de mavi vektör olarak verilmiştir. Üst tablanın raylar ile kontak halinde olduğu noktaların ray merkezine göre yönelimi göz önüne alındığında statik durumda F_z kuvvetinin sonucu olarak V yatağa basan ray üzerinde F_{11} ve F_{12} kuvvetleri, düzleme basan ray üzerinde ise F_2 tepki kuvveti oluşur. Bu kuvvetler kırmızı ile gösterilen vektörlerdir.



Şekil 41- Tek eksen kızak, hareketli yüzeyler kırmızı kontak noktaları, sabit yüzeyler mavi kontak noktaları, dik eksende gelen F_z toplam kuvvetinin raylar üzerine dağılımı

Statik durumda mekanizma üzerindeki kuvvet eşitlikleri şöyledir;

$$\vec{F}_z = M_{\text{toplam}} \cdot \vec{g} + \vec{F}_{\text{yay}} \quad (3.1)$$

$$\vec{F}_z/2 = \vec{F}_{11} + \vec{F}_{12} = \vec{F}_2 \quad , \quad \vec{F}_{11} = \vec{F}_{12} \quad (3.2)$$

$$(|\vec{F}_{11}| + |\vec{F}_{12}|) = |\vec{F}_z/2| / \cos 45 \quad (3.3)$$

$$|\vec{F}_z / 2| = |\vec{F}_2| \quad (3.4)$$

Kaydır-taşı mekanizmasında hareket için kritik olan statik sürtünme kuvvetinin büyüklüğü verilen kuvvet eşitlikleri sonucunda aşağıdaki gibi olacaktır.

V yatağa basan ray üzerindeki sürtünme kuvveti,

$$|\vec{F}_{sür1}| = (|\vec{F}_{11}| + |\vec{F}_{12}|) \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} = (|\vec{F}_Z/2| / \cos 45) \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} \quad (3.5)$$

Düzleme basan ray üzerindeki sürtünme kuvveti,

$$|\vec{F}_{sür2}| = \vec{F}_2 \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} = |\vec{F}_Z/2| \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} \quad (3.6)$$

Toplam sürtünme kuvveti,

$$|\vec{F}_{sür}| = |\vec{F}_{sür1}| + |\vec{F}_{sür2}| = |\vec{F}_Z/2| \cdot (1 + (1/\cos 45)) \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.5 ve 3.6 karşılaştırıldığında mekanizmada iki ray arasında toplam sürtünme kuvvetlerinin farklı olduğu görülür. Bu durum hareketli tabla hareketinde eksenden kayma yaratabilir ancak bu etki baskı yayı kuvvetinin artırılması ile ihmal edilebilir hale getirilebilir.

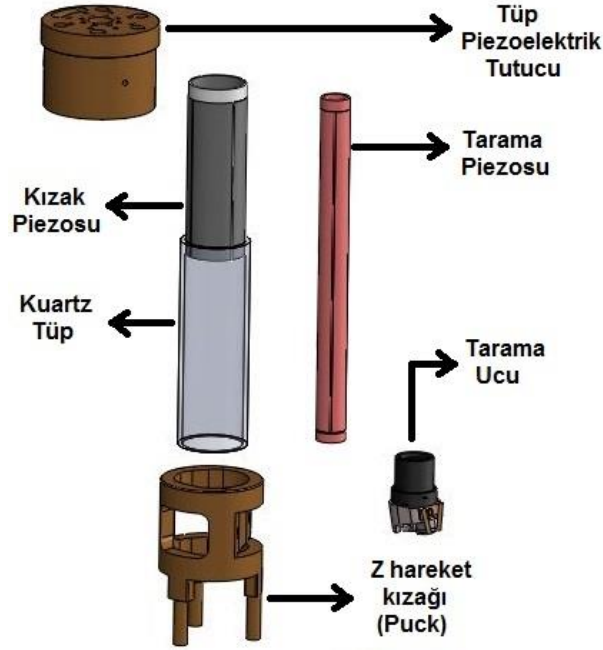
3.2 Düşük Sıcaklık Uyumlu (4K-300K) İki Eksenli Kaydır-Taşı Mekanizması

İki eksenli kaydır-taşı mekanizması Nanomanyetik Bilimsel Cihazlar firması DS-TUM' leri için esas alınarak tasarlanmıştır. Tasarımda ilk başlangıç noktası olarak mekanik limitler belirlenmiştir. TUM' lar çalışırken hiçbir şekilde mekanik titreşim ve sarsıntıya maruz kalmamalıdır ve dolayısıyla hiçbir şekilde örnek borusu içinde bir noktaya temas etmemelidirler. Bu sebeple tasarlanacak taşıyıcı mekanik çalışırılığı bilinen mevcut z kıcağı olan 22.2 mm çapındaki dairesel kesitli alan içinde hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Mekanizmada numune tutucu X ve Y eksenlerinde birbirinden bağımsız olarak 3 mm' lik (merkezden ± 1.5 mm) hareket kabiliyetindedir. Bu değer mevcut bağlantı kolları arasında kalan alanın maksimum şekilde kullanılması fikri sonucunda oluşmuştur. Kaydır-taşı tipi piezoelektrik motorlarda hareket kapasitesi piezoelektrik malzemenin gerinim değerinden bağımsız olduğu için tasarımda hareket sınırlandırma mekanik olarak sağlanmıştır.

Mikroskopta iç içe bulunan iki adet piezoelektrik tüp tutucu parça üzerinde düşük sıcaklık epoksisi kullanılarak mekanik olarak sabitlenmiştir. İçteki piezoelektriğin diğer tarafında tarama ucu yer alır. İçte yer alan piezoelektriğe kontrollü olarak voltaj uygulanarak örnek yüzeyinde konuma bağlı tarama yapması sağlanır. Tasarımda bizim için önemli olan dışta yer alan piezoelektrik tüptür. Bu piezoelektrik tüp EBL firmasının EBL#2 kodlu PZT-5A' ya denk gelen üründür. Firmanın farklı tarama kapasitelerindeki mikroskopları için kullanılan piezoelektrikler 1.5 inç ve 1 inç uzunluğundaki boylarda kullanılmaktadır. Bu ürün için katalogta yer alan piezoelektrik sabitler 293 kelvin sıcaklığında $d_{31} = 0.173$ nm/V ve 4 kelvin sıcaklığında $d_{31} = 0.031$ nm/V olarak ifade edilir. Tüp geometrideki bu ürün için boyca uzama eşitlik 3.8 ile ifade edilir. Eşitlikte yer alan 'V' uygulanan gerilim, 'L' tüpün boyu ve 't' duvar kalınlığıdır.

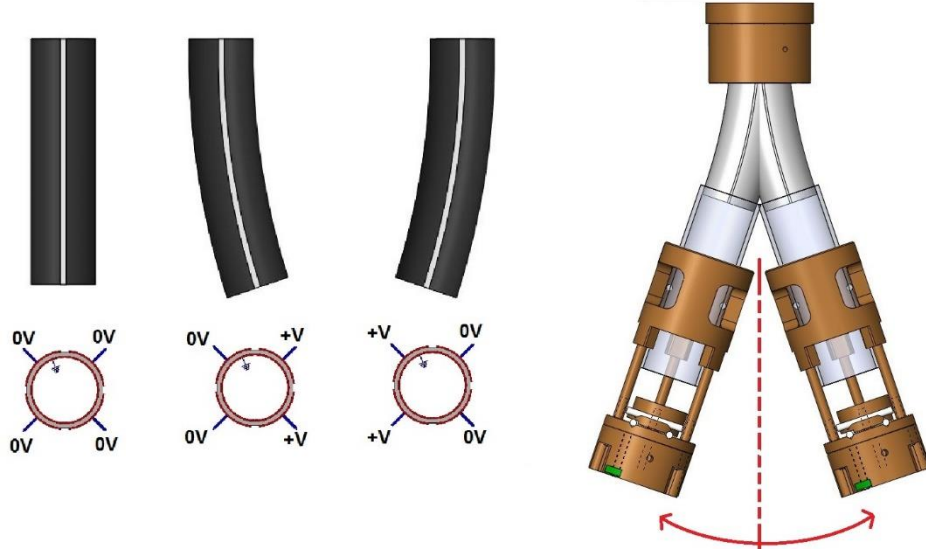
$$\Delta L = \frac{d_{31}VL}{t} \quad (3.8)$$

Tasarıma başlanırken ilk olarak tasarlanacak motor mevcut bir sisteme adapte edileceği için mevcut olan sistemin 3D modellerinin bilgisayar ortamına geçirilmiştir. Yapılan bu modelleme sonucu olarak mevcut TUM sisteminin şeması şekil 30'da görülmektedir.



Şekil 30-Nanamanyetik Bilimsel Cihazlar firması düşük sıcaklık mikroskop parçaları

Numune 'puck' adı verilen Z kızığının ucunda vidalar ile sabitlenmiş bulunan bir numune tutucuya yerleştirilir. Z kızak hareketini üzerinde bulunduğu ve bir ucu dışta yer alan piezoelektriğin serbest ucuna yapıştırılmış olan kvartz tüpten alır. Dışarıda yer alan piezoelektriğin kutupları üzerine anlık elektriksel sinyaller uygulayarak Z kızığın kvartz tüp üzerinde kaydır-taşı hareketi yapması sağlanır. Tasarlanan X-Y kızığı da hareketini dışarıda bulunan tüp piezodan alacaktır. X ve Y eksenlerinde hareket eden kızak tasarımının hareket şekli ve piezo tüpün besleme yöntemi şekil 31'de görülmektedir. Puck, kvartz tüp üzerine piezoelektriğin dış yüzeyinde bulunan ve yüzeyi dört eşit alana bölen kutuplar motor eksenleri ile çakışacak şekilde yerleştirilir. Numunenin taşınması istenilen doğrultu ve yönlerde yer alan iki dış elektroda gerilim uygulanarak piezo tüpün o yönde eğilmesi ve tekrar eski konumuna gelmesi sağlanır. Bu sayede uçta yer alan X-Y kızığın ilgili ekseninde kaydır-taşı hareketi gerçekleşir.



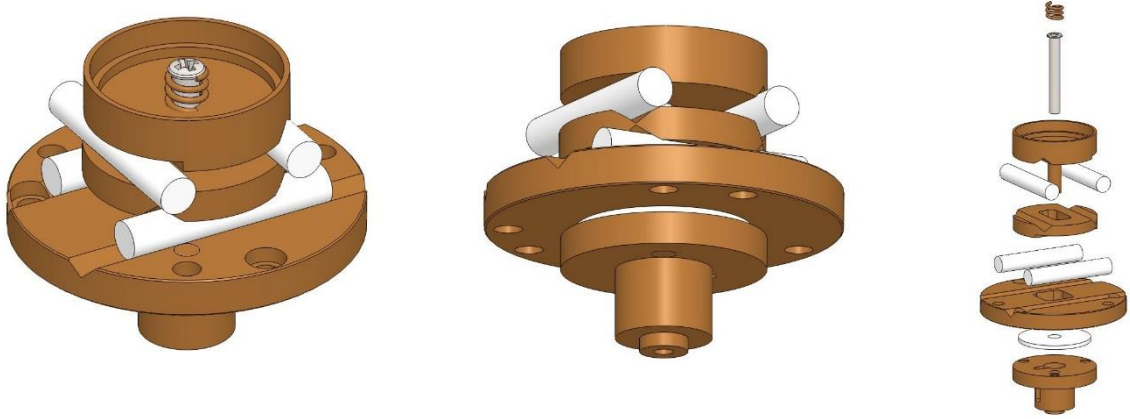
Şekil 31-Piezoelektrik tüp kullanılarak X-Y kızak hareketi için elektrik besleme ve hareket şeması

Tasarlanan X-Y motorun mekanik parçalarının ayrılmış görünümü şekil 32’de görülmektedir. X-Y motor, sabit tabla üzerine monte edilen parçalardan meydana gelmektedir. Bu sabit tabla Z kızağına takılarak mikroskop üzerine yerleştirilecektir. Tasarımda dorusal hareketi sağlamak amacıyla zirkonya malzemeden raylar; sabit tabla üzerinde yer alan 90° lik açı ile açılmış olan V kanallar üzerinde düşük sıcaklık epoksisi ile yapıştırılmıştır. Bu raylar üzerinde bir tarafı V kanal diğer tarafı düzlemsel kademe olan bir tabla X eksen hareketi için yerleştirilmiştir. Raylar üzerine basan yüzeylerden bir tanesinin düzlemsel olmasının sebebi termal daralmalardan kaynaklı sıkışmaları önlemektir. Raylardan birinin üzerinde basan V yatak, hareketin tek eksende olması için klavuzluk etmektedir. X eksen tablasının üst yüzünde de sabit tablanın yüzeyi ile benzer geometride kanallar bulunmaktadır. Bu kanallar alt yüzdeki kanallara dik olarak konumlanmıştır. Burada da yine V kanallar üzerine yapıştırılmış olan iki adet zirkoniya ray yer almaktadır. Bu raylar üzerinde de Y eksen kızağı yer almaktadır. Baskı kuvvetinin ayarlanması için y eksen kızağının üst yüzeyinden bir baskı yayı bir vida ile sıkıştırılabilir şekilde sabit tablanın alt yüzeyinde yer alan kızak tutucu parçaya vidalanmaktadır. Dolayısıyla iki eksen de tek yay ile sıkıştırılarak baskı kuvvetinin her iki eksen de aynı olması sağlamıştır. Sabit tabla ile kızak tutucu arasında sürtünmenin ve aşınmanın az olması hedeflendiği için safir disk bulunmaktadır. Raylarda ve alt bölgede hareketli yüzeylerin temas ettiği malzemelerin zirkonya ve safir seçilmesinin nedeni bu malzemelerin elastik sabitlerinin çok büyük olması sebebiyle aşınma miktarlarının az olmasının beklenmesidir. Bu durum imalat sonrasında motorun çalışma performansında uzun sürelerde kararlılık sağlayacaktır.



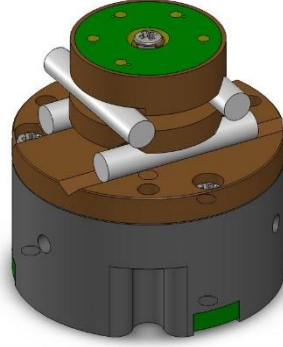
Şekil 32-Tasarlanan x-y eksen kızak parçaları

Şekil 33'de X-Y motorun birleştirilmiş hallerinin katı modelleri görülmektedir. Bu tasarım sonucunda birbirinden bağımsız olarak dik eksenlerde 3'er mm hareket kapasitesine sahip, mikrometre ya da nanometre büyüklüğünde adımlar ile ilerleyebilen, ticari bir ürüne adapte edilmiş X-Y kaydırak mekanizmasının ortaya çıkması hedeflenmiştir.



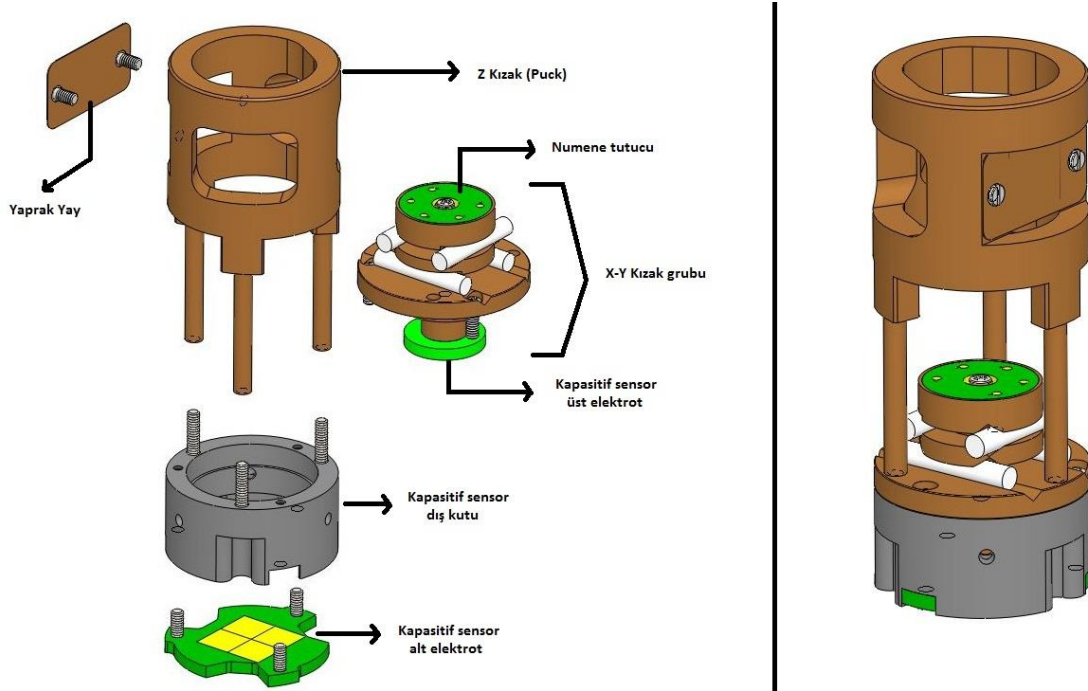
Şekil 33- X-Y kaydırak montaj şeması

Şekil 34'de X-Y kaydırakın Z kızağına takılmaya hazır montajlı hali görülmektedir. X-Y kaydırakının kızak tutucu alt parçasının alt kısmında bir adet baskı devre kartı yer almaktadır. Bu kart numune hangi yönde hareket ederse aynı yönde ve miktarda hareket etmektedir. Dolayısıyla kart yüzeyi bir kapasitör elektrotu olarak kullanılarak numunenin X-Y de ne kadar hareket ettiği anlamlandırılabilir hale gelmektedir. Çalışmanın bu kısmı elektronik ve yazılım ile ilgili çalışmalar gerektirdiği için tez içinde anlatılmayacaktır. Bu konu ile ilgili aktarılacak tek bilgi sistemin kapasitif konum ölçer ile hareketinin takip edilmesinin hedeflendiği ve mekanik tasarımın buna uygun hazırlanmış olduğudur.



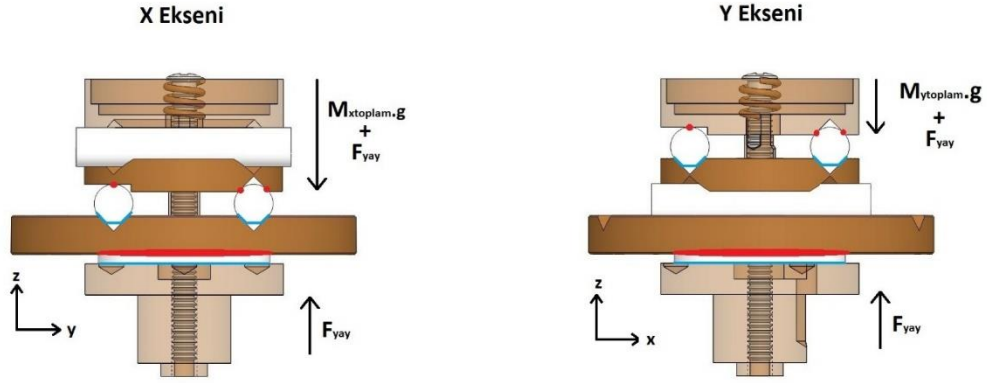
Şekil 34- Düşük sıcaklık Z kızakına uyumlu X-Y kızak tasarımı, kapasitif sensör bloğu ile birlikte

Şekil 35’de DS-TUM’una uyumlu olarak tasarlanan X-Y-Z kaydıracağının bütün bir haldeki tasarımı ve parçalarının mekanik dağılımı şematik olarak görülmektedir.



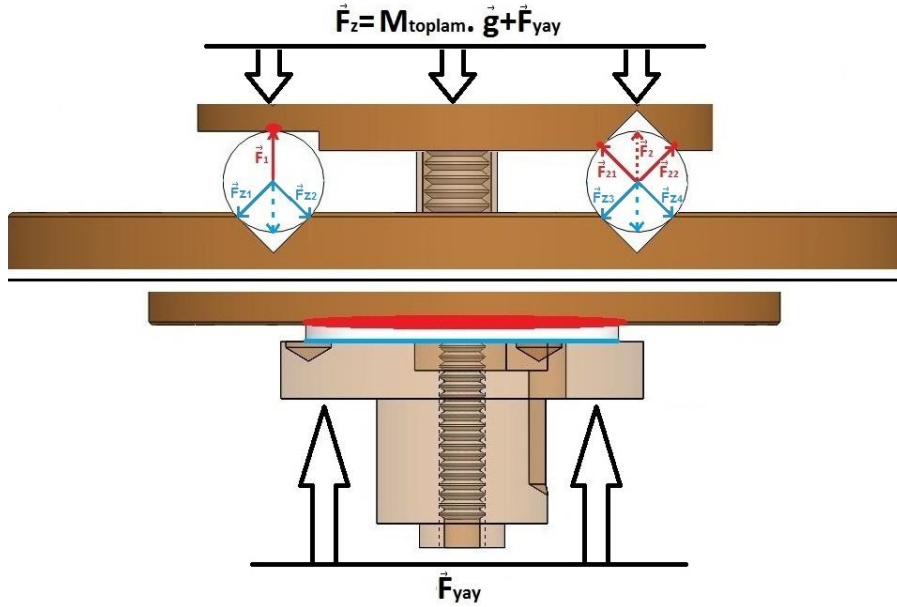
Şekil 35-Düşük sıcaklık mikroskobu X-Y-Z yönlü hareket ve kapasitif konum algılama kabiliyetli örnek tutucu kızak tasarımı

Şekil 36’da kaydırak mekanizmasında birbirine göre hareketli kontak noktaları kırmızı nokta ve çizgiler ile sabit olan kontak noktaları ise mavi çizgiler ile belirtilmiştir. Yapı üzerinde yer alan ve X eksen yönünde beraber hareket eden Y eksen kızıağı, iki adet zirconiya ray, X eksen kızıağı ve kızak tutucu alt parça, baskı yayı, sıkıştırma vidası ve safir diskin toplam kütlelerini $M_{xtoplam}$ olarak ele alınır. Aynı şekilde Y eksen yönünde beraber hareket eden bütün hareketli parçaların kütlelerini de $M_{ytoplam}$ olarak tanımlanır. $M_{xtoplam}$ ile $M_{ytoplam}$ kütleleri arasındaki fark X eksen kızıağı ve Y eksen rayların kütleleri kadar olacaktır.



Şekil 36- X-Y kızak, kırmızı temas yüzeyleri hareketli, mavi temas yüzeyleri sabit.

Şekil 37'de Tasarlanan kaydırak mekanizmasında hareketli yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvvetinin büyüklüğü belirleyen normal kuvvetler kırmızı vektörler ile ve sabit yüzeylerde görülen normal kuvvetler de mavi vektörler ile belirtilmiştir.



Şekil 37- X-Y kızak kuvvet şeması ve sürtünme kuvveti hesabı

Sistem statik durumda iken şekilde görülen kuvvet dağılımlarına göre kuvvetler arası eşitlikler şu şekildedir.

$$\vec{F}_Z = M_{toplam} \cdot \vec{g} + \vec{F}_{yay} \quad (3.9)$$

$$\vec{F}_Z = \vec{F}_{Z1} + \vec{F}_{Z2} + \vec{F}_{Z3} + \vec{F}_{Z4} = -(\vec{F}_1 + \vec{F}_2) , \vec{F}_1 = \vec{F}_2 \quad (3.10)$$

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{22} , \vec{F}_{21} = \vec{F}_{22} \quad (3.11)$$

$$(|\vec{F}_{21}| + |\vec{F}_{22}|) = |\vec{F}_2| / \cos 45 = |\vec{F}_Z / 2| / \cos 45 \quad (3.12)$$

$$|\vec{F}_Z / 2| = |\vec{F}_1| \quad (3.13)$$

Kaydır-taşı mekanizmasında hareket için kritik olan statik sürtünme kuvvetinin büyüklüğü verilen kuvvet eşitlikleri sonucunda aşağıdaki gibi olacaktır.

Düzleme basan ray üzerindeki sürtünme kuvveti,

$$|\vec{F}_{sür1}| = |\vec{F}_1| \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} = |\vec{F}_Z/2| \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} \quad (3.14)$$

V yatağa basan ray üzerindeki sürtünme kuvveti,

$$|\vec{F}_{sür2}| = (|\vec{F}_{21}| + |\vec{F}_{22}|) \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} = (|\vec{F}_Z/2| / \cos 45) \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} \quad (3.15)$$

Düzleme basan safir disk üzerindeki sürtünme kuvveti,

$$|\vec{F}_{sür3}| = |\vec{F}_{yay}| \cdot \mu_{safir-fosfor\ bronz} \quad (3.16)$$

Toplam sürtünme kuvveti,

$$\begin{aligned} |\vec{F}_{sür}| &= |\vec{F}_{sür1}| + |\vec{F}_{sür2}| + |\vec{F}_{sür3}| \\ &= |\vec{F}_Z/2| \cdot (1 + (1/\cos 45)) \cdot \mu_{zirkonya-fosfor\ bronz} + |\vec{F}_{yay}| \cdot \mu_{safir-fosfor\ bronz} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Hareketli olan eksen tablaları ve rayların temas noktalarına düşen kuvvetler incelendiğinde düzleme basan ray ve V yatağa basan ray üzerine düşen Z yönlü toplam kuvvetler eşit olmasına ($\vec{F}_1 = \vec{F}_2$) rağmen raylar üzerinde görülen sürtünme kuvveti büyüklükleri eşit değildir ($|\vec{F}_{sür1}| + |\vec{F}_{sür2}| > |\vec{F}_{sür3}|$). Toplam sürtünme kuvvetleri ele alındığında V yatağa basan ray üzerinde daha fazla sürtünme kuvveti oluşmaktadır. Sürtünme kuvvetinin mevcut olduğu diğer bir yüzeyde kızak tutucu alt parça ile safir disk arasındaki yüzeydir. Bu yüzeye ait normal kuvvet sadece yayın baskı kuvveti kadardır.

Eşitlikte yer alan F_Z bileşeni her eksenin taşıdığı yüke bağlı olarak değişir. Numune tablasının yer değiştirebilmesi için piezoelektriğe uygulanacak voltajın zamana bağlı ani değişimi sırasında ortaya çıkacak ivmenin $F_{sür}/M_{toplam}$ değerinden daha büyük olması gerekir. Eğer eşitlikte yer alan fiziksel parametrelerin tamamı biliniyorsa besleme voltajının hangi noktasında kayma hareketinin başlayacağı ön görülebilir.

3.3 Tasarımda Malzeme Seçimi

Mekanik tasarımın ikinci aşaması imalata girecek parçaların malzeme seçimidir. Tasarlanan sistemin çalışma koşullarının bilinmesi özellikle malzeme seçimi konusunda çok büyük önem gerektirir. Çalışma ortamının sıcaklığı, basıncı, ortamın kimyasal etkileri, mekanizmanın elektriksel ve termal iletkenliği, ortamın manyetik etkileri ve mekanik mukavemetin gerekliliği gibi konular tasarım sonrasında imal edilecek parçaların malzemesinin belirlenmesi için önemlidir. Tasarlanan hareket mekanizması 4 kelvin sıcaklığında ve 9 tesla manyetik alan altında, fiziksel özellik ölçümleri için kullanılan kryostat olarak bilinen bir sistem içerisinde kullanılacaktır.

Tasarım aşamasında ortam koşulları hakkındaki bilgiler doğrultusunda öncelikle manyetik alan etkisini değerlendirelim. Manyetiklik ve manyetik alan bölümünde aktarılan bilgiler doğrultusunda manyetik alan altında hareket edecek mekanizmanın manyetik alandan etkilenmeyecek malzemeden olması gerekmektedir. Aksi türde malzemeler kullanılması durumunda hareketli parçalar manyetik kuvvetlerin etkisiyle kilitlenebilir. Konu ile ilgili bir başka yaklaşım ise sistem içinde kullanılacak mıknatıslanma değeri yüksek ferromanyetik ve paramanyetik malzemeler sistemin oluşturduğu homojen alan çizgilerini dağıtacak ve manyetik alan ölçümü ile ilgili kalibrasyonun bozulmasına ve alan değerinin hatalı okunmasına sebep olacaktır. Bu sebeple kullanılacak malzeme mıknatıslanma değeri çok küçük olan malzemelerden olmalıdır. Gövde malzemesi olarak polimer yapılı ya da 316 serisi paslanmaz çelik, bakır, pirinç, fosfor bronz, alüminyum vb. metal malzemeler tercih edilir. Ancak mekanik mukavemet ve montaj kabiliyetinin sağlıklı olması için metal malzemeler tasarım için daha uygun olacaktır.

İrdelenecek ikinci durum düşük sıcaklık durumudur. Laboratuvarlarda kullanılan düşük sıcaklık kriyostat sistemlerinin soğutma kapasiteleri genellikle 0.5 watt ve 1.5 watt mertebelerindedir. Dolayısıyla sistem içine yerleştiren ölçüm aparatının 4 Kelvin sıcaklığına ulaştığında çevreden aldığı ısı miktarı bu değer altında tutulmalıdır. Özellikle kriyojenik sıcaklıklara inildiğinde termal iletim etkisi ile ısı transferi azaltılsa da radyasyon sebebi ile ısı transferi devam edecektir. Belirtilen sebeplerden ötürü bu tarz sistemlerde ölçüm yapılacak örnek tutucunun ısı iletkenliği yüksek ve ısı kapasitesi düşük malzemelerden tercih edilmesi gerekmektedir. Belirtilen özelliklerden en iyi değerlere sahip olan malzemeler öncelikle bakır, fosfor bronz, pirinç ve alüminyumdur. Paslanmaz çelik bu malzemelere göre termal iletkenlik açısından daha düşük ve ısı kapasitesi açısından daha büyük değere sahiptir. Gövdenin metal seçilmesi imalat açısından başka avantajlar da getirir. İmal edilen parçalara polisaj ve altın kaplama işlemi yaptırılarak yüzeyin oksitlenme ve parçanın termal radyasyon ile ısı aktarım miktarının azaltılması mümkün hale gelmektedir.

Termal açıdan dikkat edilmesi gereken başka bir nokta da termal daralmadan kaynaklı olarak birbiri ile temas halinde olan parçaların tekrar eden ısıtma soğutma operasyonları sonucu zarar görmesi durumudur. Bu durumu önlemek için oluşturulan sistemin olabildiğince aynı malzemeden yapılması ideal olacaktır.

Nanomanyetik bilimsel cihazlar firması kendi mikroskop imalatında standart olarak fosfor bronz malzeme kullanmaktadır. Bahsedilen özelliklere göre en uygun malzeme bakır olsa da fosfor bronz yine bir bakır alaşımı olmakla beraber bakırdan daha sert ve daha gevrek bir malzeme olduğu için talaşlı imalat açısından daha uygun bir malzemedir. Dolayısıyla özellikle küçük boyutlardaki ve girinti çıkıntılı malzemelerin talaşlı imalat ile işlenmesi daha kolaydır. Firmanın mikroskoplarında böyle bir malzemeyi tercih etmesinin diğer bir sebebi ise RS vb. ticari firmalarda bu tarz malzemelerin farklı imalat yöntemleri uygulanarak sonucu oksijenden arındırılmış (oxygen free) yani içerisinde oksijen atomları içermeyen saf alaşımların bulunmasıdır. Bilindiği üzere metaller içerisindeki safsızlıklar zamanla termal taşınım sebebi ile malzeme içinde hareket edebilmektedirler. Oksijene duyarlı malzemelerin ölçümlerinde çok temiz ortam koşulları gerektiğinden kullanılan ölçüm sistemlerinde imalat malzemelerinin seçimi önem arz etmektedir.

4 PROTATİP İMALATI ve MONTAJ

Katı modelleri solidworks programı kullanılarak oluşturulan parçalar Cnc tezgahlar kullanılarak torna operasyonları ve çeşitli freze dik işleme operasyonları ile mekanik olarak şekillendirilmişlerdir. Mekanik üretim Nanomanyetik bilimsel cihazlar firmasının mekanik atölyesinde yer alan Cnc tezgahlar kullanılarak yapılmıştır. İşleme sırasında kullanılan kesici takımlar, takım ilerleme hızı, devir ve dalma derinliği gibi işleme parametreleri CNC operatörleri tarafından belirlenmiştir. İmalatta kullanılan CNC tezgahlar şekil 31,32 ve 33'de görülmektedir.



Şekil 31- Mori Siki Duravertikal 5080



Şekil 32- Microcut Challenger MCV 2412



Şekil 33-Mazak QT8 CNC Torna

Parçalar üzerinde yer alan M1.6 klavuz delikleri derinliklerine bağlı olarak Cnc tezgah ile ağızlatılarak sonrasında el klavuzu kullanılarak ilerletilmiştir. Cnc tezgah operasyonları biten parçaların keskin kenarlarında oluşan çapaklar tesviye edildikten sonra hareketli parçaların diğer parçalar ile temas edeceği kontak Küzeyleri sırasıyla 1200 kum, 2000 kum ve sonrasında 4000 kum zımpara ile zımparalanarak yüzey pürüzlülüğü homojen hale getirilmeye çalışılmış ve yüzeylere parlaklık kazandırılmıştır. Bu işlem hareketli yüzeylerde hareketin sabit bir sürtünme etkisi altında olması açısından gereklidir.



Şekil 34- Üretilen X-Y slider parçaları ve baskı devre kartları

Prototip için parça imalatı sonrasında montaj aşamasına geçilmiştir. Montajda kullanılan vidalar manyetik özelliği düşük olan paslanmaz malzemedendir. Paslanmaz malzeme yerine manyetik özelliği daha zayıf olan titanyum alaşım vidalar da kullanılabilir ancak bu tarz vidaları piyasada bulmak kolay değildir. İhtiyaç halinde yüksek adetlerde imalat yapan firmalar mevcut olsa da başlangıçta maliyet göz önüne alındığında test için paslanmaz vidalar tercih edilmiştir. Montajda birbirinden ayrılması istenmeyen ve mekanik olarak tezgahda işleyemediğimiz kuartz, alümina, safir gibi sert ve gevrek malzemeler parçalar üzerine düşük sıcaklıkta çatlamayan, kırılmayan ve yüzeyden ayrılmayan düşük sıcaklık epoksisi ile yapıştırılarak sabitlenmiştir. Mekanizmada baskı kuvvetini ayarlamak için kullanılan yay yine fosfor bronz malzemedен yaptırılmıştır. Fosfor bronz malzeme yay için çok uygun bir malzeme olmasa da manyetik özellikleri açısından tercih edilen bir malzeme olmuştur. Bu malzemeye alternatif olarak bakır berilyum malzemedен imal edilmiş yaylarda bu tarz bir sistem için kullanışlıdır.

5 TEST , SONUÇLAR ve YORUM

5.1 Test Elektronikği

Testler sırasında piezoelektrik malzemelere verilen besleme voltajı Nanomanyetik bilimsel cihazlar firmasının mikroskopları için geliştirdiği elektronikde yer alan slider kartının çıkışından sağlanmıştır (Şekil 35). Slider kartının çıkışından elde edilen besleme voltajının sinyal şekli, genliği ve ardışık sinyaller arası bekleme süresi ve her komutta gönderilecek ardışık atma sayısı yine firmanın kendi mikroskopları için geliştirdiği bir yazılım tarafından ayarlanabilmektedir. Yazılımın içerdiği bir sayaç ile piezoelektriğe gönderilen sinyal sayısı sayılarak başlangıç noktasından toplamda hangi yönde ve kaç adım yer değiştirdiği bilgisi de ekrandan takip edilebilmektedir.



Şekil 35-Nanomanyetik Bilimsel Cihazlar Mikroskop Elektronikği

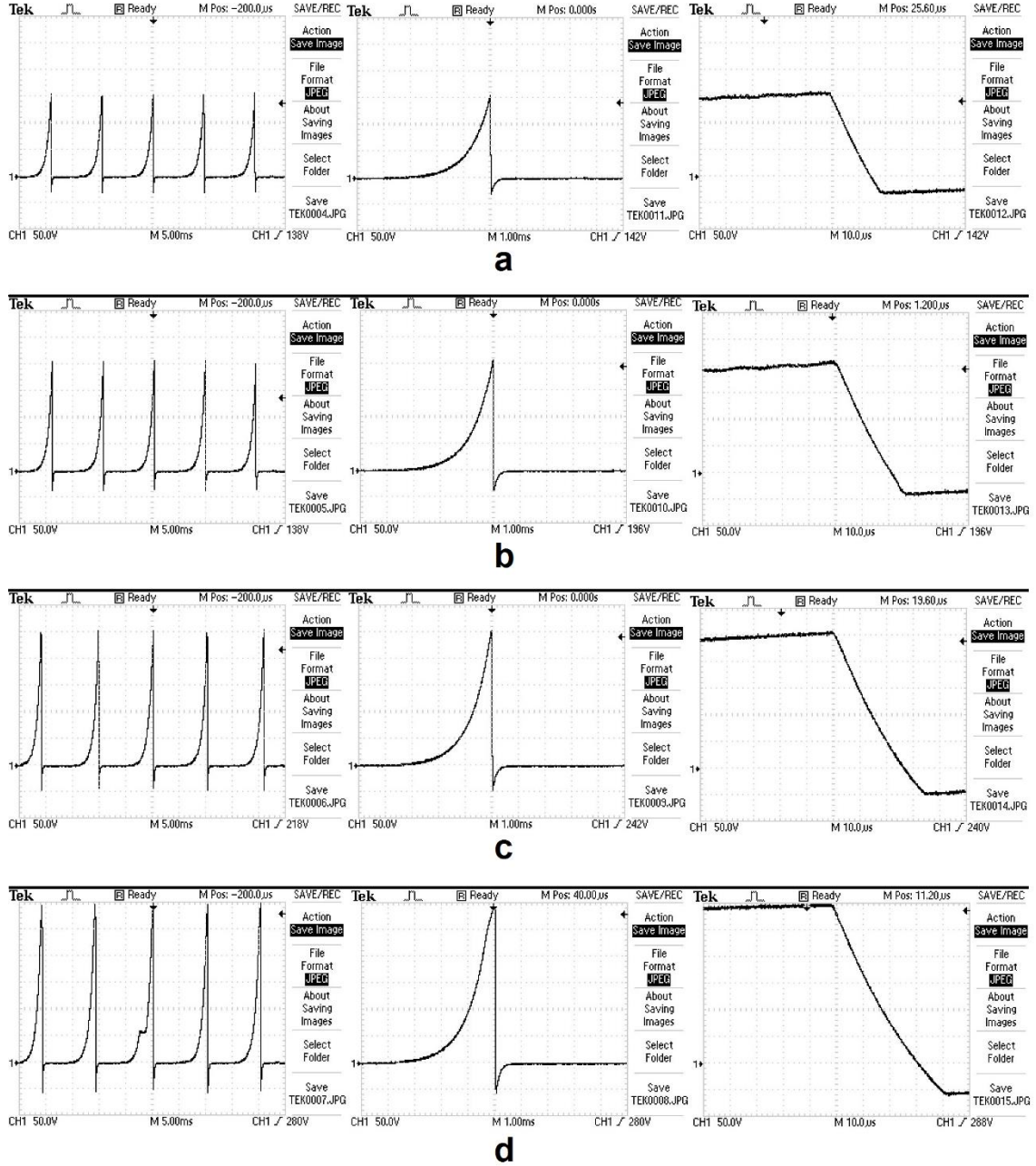
Şekil 36'da testler sırasında uygulanan besleme sinyalinin osiloskop ile kaydedilen görüntüsü verilmiştir. Piezoelektrik malzemelere uygulanan atmanın maksimum şiddeti volt olarak görülmektedir. Her bir atma ile bir adımlık hareket yapılmaktadır. Görüntülenen besleme sinyallerinde elektronikten kaynaklanan ve değeri kontrol edilemeyen bir negatif voltaj değerine düşüş kaydedilmiştir. Bu etki her voltaj değerinde yaklaşık olarak aynı olduğu için ihmal edilmiştir. Uygulanan elektriksel sinyallerde sinyal şiddeti farklılık göstermesine rağmen sinyal frekansları aynı tutulmuştur. Osiloskop ile ölçülen sinyalin periyodu 10ms'dir. Frekans cinsinden bu değer 100 Hz'dir.

Sinyal üzerinde dikkat edilmesi gereken ikinci bir nokta uygulanan atmanın maksimum değerinden minimum değerine düşüş süresidir. Bu süre ne kadar kısa olursa hareketin kaydır kısmı o kadar etkin hale gelecek ve hareket performansı iyi olacaktır. Sinyalin minimum şiddet değerine düşüşü yaklaşık olarak doğrusal bir davranış göstermektedir. Dolayısıyla kaydır hareketi sabit ivme ile ve giderek artan bir hız ile gerçekleşmektedir. Osiloskop ile ölçülen hareketin kaydır kısmını oluşturan sinyal bölgesi için toplam gerilim değişimi ve değişimin gerçekleştiği süre çizelge 7'deki gibidir.

Çizelge 7- Farklı besleme sinyalleri için maksimum şiddetten minimum şidete düşme süreleri ve gerilim farkı

Maksimum pozitif sinyal şiddeti (Volt)	150	200	250	300
Anlık şiddet değişimi (Volt)	180	250	300	360
Değişimin süresi (μ s)	18	26	34	42

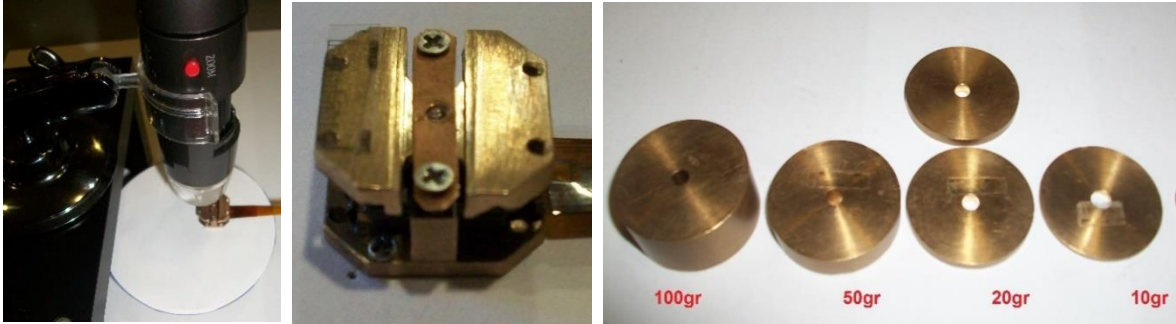
Sinyallerde dikkat edilen parametre sinyal şiddetinin maksimum değerine ulaşma süresinin sinyal şiddetinden bağımsız olarak aynı olmasıdır. Bu durum farklı şiddeteki sinyallerin farklı ivmelerde hareket oluşturması sebebiyle adım büyüklüğünün şiddet ile aynı oranda artmaması sonucunu yaratır.



Şekil 36-Testlerde kullanılan elektriksel besleme sinyalleri a-) Maksimum gerilim 150 Volt, b-) Maksimum gerilim 250 Volt, c-) Maksimum gerilim 250 Volt, d-) Maksimum gerilim 300 Volt

5.2 Tek Eksen Kaydır-Taşı Kızak

İmalat sonrası montajı gerçekleştirilen tek eksen mekanizması atmosfer koşullarında çalışma testlerine tabi tutulmuştur. Oluşturulan test düzeneği ve testler sırasında kullanılan araçlar şekil 37'de görülmektedir. Yapılan testlerde mekanizma 150V, 200V, 250V ve 300V olmak üzere dört farklı atma şiddeti ile beslenmiştir. Ayrıca her elektriksel atma şiddetinde mekanizmada ardışık 25 adım, 50 adım, 75 adım, 100 adım ve 250 adımlık ilerlemeler hem ileri hem de geri yönlerde beşer kez gerçekleştirilerek görüntülenmiştir. Bu testler ile mekanizmanın ortalama adım büyüklüğünün besleme voltajı ve ardışık adım sayısı ile olan ilişkisinin incelenmesi hedeflenirken aynı zamanda ileri ve geri yönlü hareketler arasında karşılaştırmaya gidilerek mekanizmanın homojenliği hakkında bilgi alınması hedeflenmiştir. Mekanizma üzerinde yapılan başka bir test adım büyüklüğünün ağırlığa gösterdiği tepkiyi anlamak için gerçekleştirilmiştir. Hareketli tabla üzerine sırasıyla 10, 20, 30, 40, 50 ve 100 gramlık ağırlıklar yerleştirilerek her ağırlıkta 300 voltluk atmalar kullanılarak yüzer adımlık ilerlemeler sonrası görüntüler kaydedilmiştir.



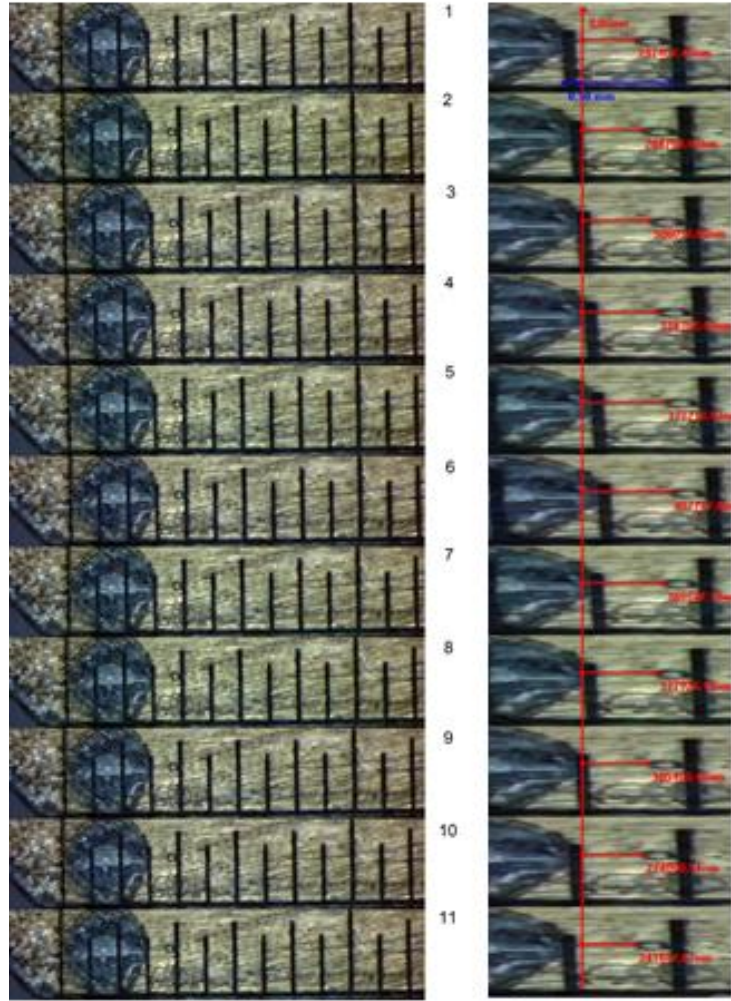
Şekil 37-Ölçüm düzeneği ve kullanılan ağırlıklar

Her besleme voltajındaki her eşit adım grubu için ve her ağırlıktaki ilk görüntü referans görüntüsü olmak üzere ardışık beş adet ileri yönlü hareket sonrası görüntü kaydedilmiştir. Ardından ileri yönlü hareketin son görüntüsü başlangıç kabul edilerek beş adet geri yönlü hareket olmak üzere toplam 11'er adet görüntü kaydedilmiştir. Kaydedilen görüntüler alt alta yerleştirilerek tek bir resim haline getirildikten sonra üzerinden ölçüm yapılmak istenen bir bölge resim boyutu değiştirilmeden alınmış sonrasında yalnızca hareket yönünde iki kat büyütülerek hareketin daha ölçülebilir olması hedeflenmiştir. Açıklanan işlemlerden geçen resim grubu daha sonra görüntü işleme programı ile resim üzerinde ölçek çizisi oluşturularak mesafe ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Resim üzerine konan ölçek çizgi görüntüsü kaydedilen alana yerleştirilmiş ve her çizgi arası 0.5 mm olan bir cetvel referans alınarak oluşturulmuştur(Şekil 38).

Ölçüm işlemi düzenlenmiş olan görüntü üzerinde karakteristik bir nokta ya da iz üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu noktanın hareket yönüne dik yönde çizilmiş olan referans bir çizgiye uzaklığı her hareket sonrasında ölçülerek veriler tablolanmıştır. Sonrasında bu konum bilgileri arasında ki farklar hesaplanarak her ilerlemede yer değiştirmenin ne kadar olduğu hesaplanmıştır.



a



b

c

Şekil 38-200V besleme sinyali 50 adımlık ilerlemeler için yapılan ölçüm örneği a-) Başlangıç pozisyonunda alınan ilk görüntü, b-) ardışık hareketler sonrası alınan görüntülerin birleştirilmiş hali, c-)Birleştirilmiş görüntüden alınan bir bölgenin büyütülerek üzerinden ölçüm gerçekleştirilmesi.

Alınan ölçüm verileri ve hesaplanan yer değiştirme sonuçları çizelge 8, çizelge 9, çizelge 10 ve çizelge 11 'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 8- Besleme gerilimi ve adım sayısına bağlı konum verileri

Bes. Voltajı	Adım Sayısı	1.konum Ref. noktası	2.konum	3.konum	4.konum	5.konum	6.konum	7.konum	8.konum	9.konum	10.konum	11.konum
150V	25	53006	75453	80932	90867	96357	110409	98860	91818	79438	72599	69771
	50	50273	76090	97830	124401	140773	162140	146637	120492	105167	82550	66719
	75	157029	167797	215747	247871	283231	309588	279666	244608	220636	188664	163977
	100	196108	226683	281264	311123	351182	382069	341058	308265	266409	231177	190349
	250	92177	172833	259250	341391	420724	499637	419301	327964	260670	193663	112607
200V	25	178383	198750	220164	238909	257901	276113	252918	240703	231496	227784	204844
	50	237401	268768	306033	338365	373213	402742	369647	337926	305403	274000	241642
	75	165475	220875	271726	323601	396760	413451	365027	313125	264120	221677	178380
	100	163897	231924	295163	359164	417176	477802	412444	351886	284343	225048	168580
	250	131909	289158	437388	579168	717089	876262	732288	597907	458692	325600	203219
250V	25	393812	424079	450864	482125	506824	530065	507834	490216	472578	448683	426903
	50	234873	289844	341756	397995	447193	497494	451830	408569	370116	332357	295879
	75	150938	231277	296127	363442	432016	497572	456333	387435	331198	265972	203922
	100	255240	357903	457830	549786	633224	718968	652249	574343	493924	414695	327162
	250	187781	436088	687015	924688	1178306	1409318	1217131	1001071	792937	587760	406957
300V	25	300306	337448	369413	404767	438491	468733	446173	418272	393989	370311	347342
	50	119523	190243	258637	331806	389703	446273	400128	346341	304553	259047	210931
	75	305082	398251	487521	589412	691830	780661	708302	642657	566288	501802	430459
	100	370813	503181	632576	756241	885887	1022992	923942	839202	750760	665531	579841
	250	258809	548625	823489	1094926	1360990	1650430	1415481	1203672	1001848	815516	637892

Çizelge 9- Besleme gerilimi ve adım sayısına bağlı yer değiştirme miktarı

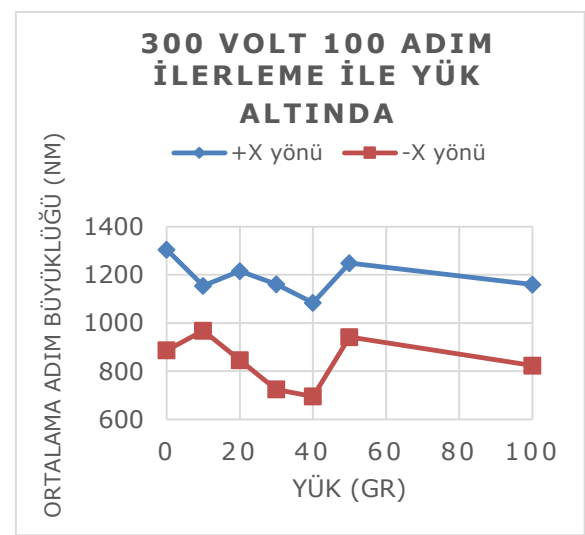
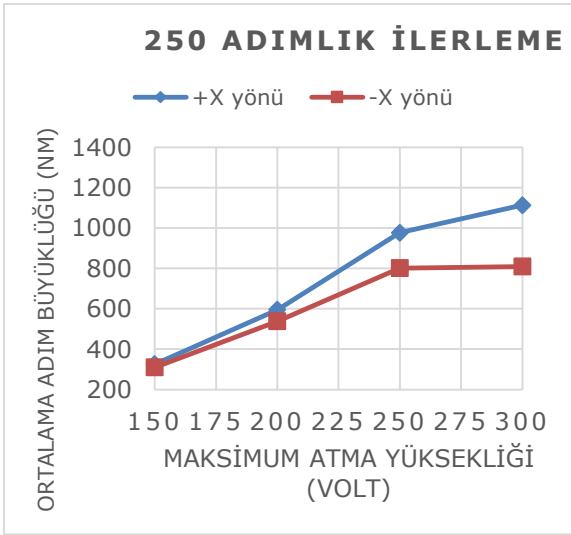
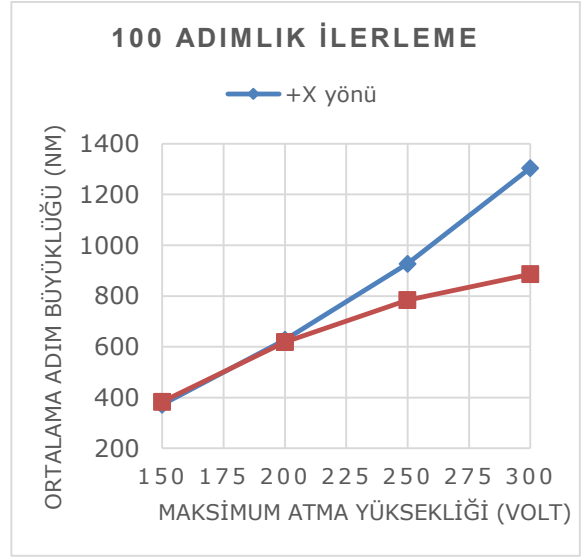
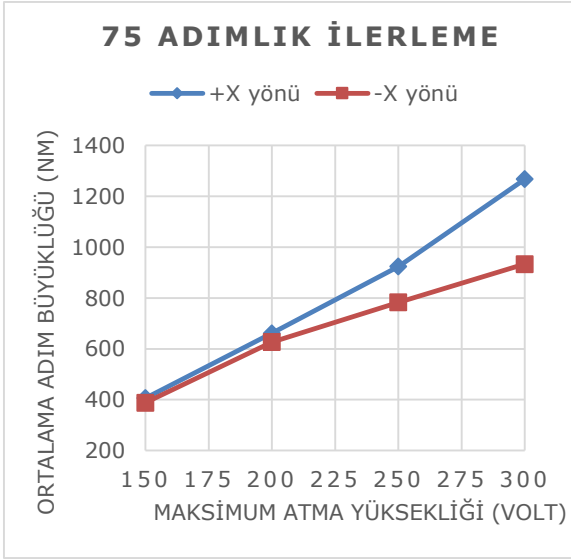
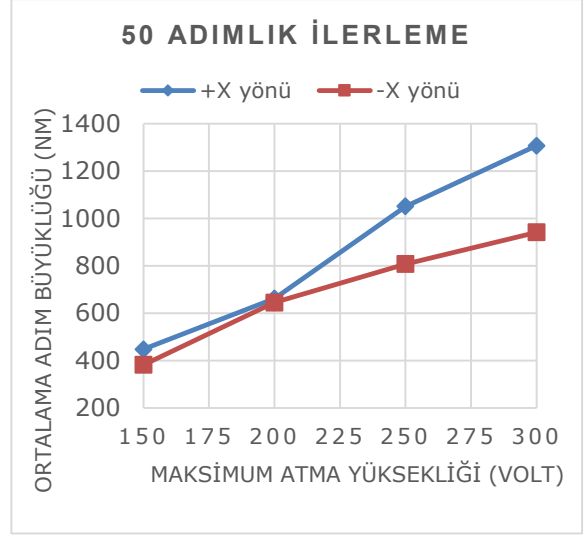
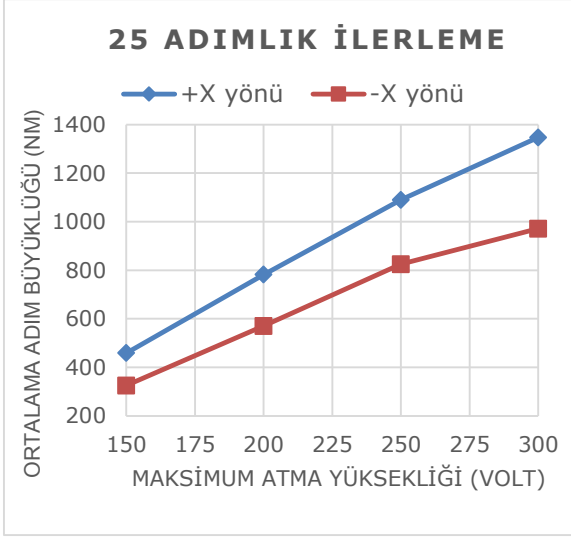
Besleme Voltajı	Adım Sayısı	+X Yönlü yer değiştirme(nm)					-X Yönlü yer değiştirme(nm)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
150V	25	22447	5479	9935	5490	14052	11549	7042	12380	6839	2828
	50	25817	21740	26571	16372	21367	15503	26145	15325	22617	15831
	75	10768	47950	32124	35360	26357	29922	35058	23972	31972	24687
	100	30575	54581	29859	40059	30887	41011	32793	41856	35232	40828
	250	80656	86417	82141	79333	78913	80336	91337	67294	67007	81056
200V	25	20367	21414	18745	18992	18212	23195	12215	9207	3712	22940
	50	31367	37265	32332	34848	29529	33095	31721	32523	31403	32358
	75	55400	50851	51875	73159	16691	48424	51902	49005	42443	43297
	100	68027	63239	64001	58012	60626	65358	60558	67543	59295	56468
	250	157249	148230	141780	137921	159173	143974	134381	139215	133092	122381
250V	25	30267	26785	31261	24699	23241	22231	17618	17638	23895	21780
	50	54971	51912	56239	49198	50301	45664	43261	38453	37759	36478
	75	80339	64850	67315	68574	65556	41239	68898	56237	65226	62050
	100	102663	99927	91956	83438	85744	66719	77906	80419	79229	87533
	250	248307	250927	237673	253618	231012	192187	216060	208134	205177	180803
300V	25	37142	31965	35354	33724	30242	22560	27901	24283	23678	22969
	50	70720	68394	73169	57897	56570	46145	53787	41788	45506	48116
	75	93169	89270	101891	102418	88831	72359	65645	76369	64486	71343
	100	132368	129395	123665	129646	137105	99050	84740	88442	85229	85690
	250	289816	274864	271437	266064	289440	234949	211809	201824	186332	177624

Çizelge 10-300 Volt sabit besleme gerilimi ve 100 adımlık ilerlemeler ile yüke bağlı konum verileri

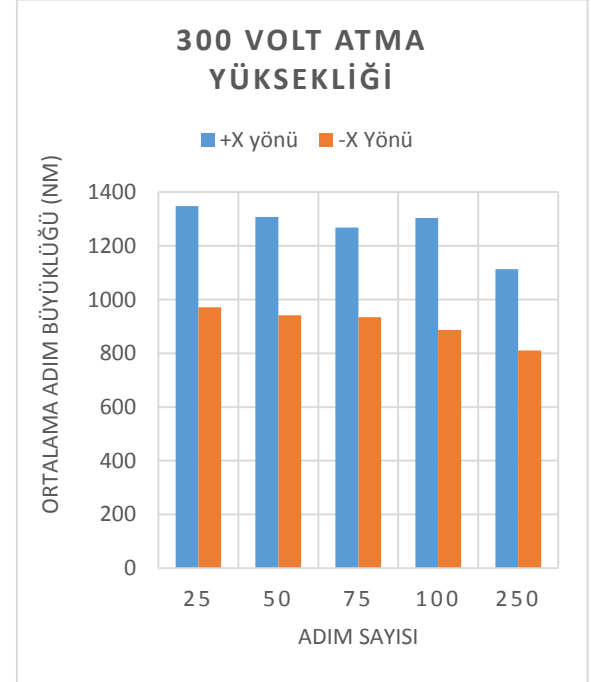
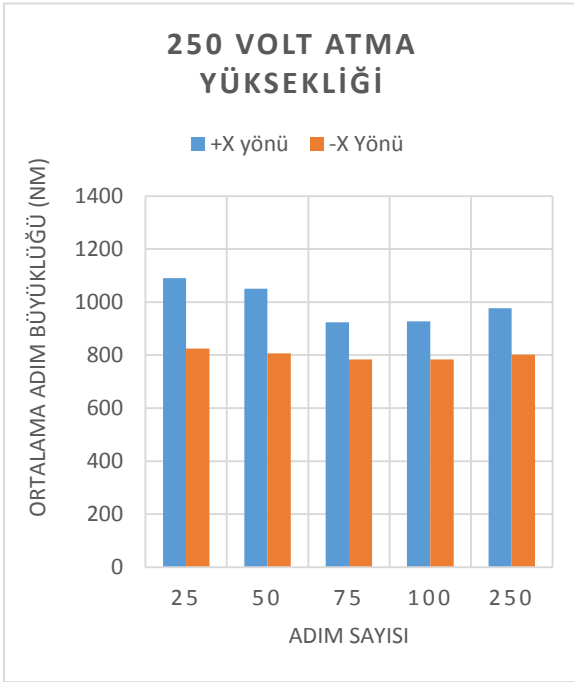
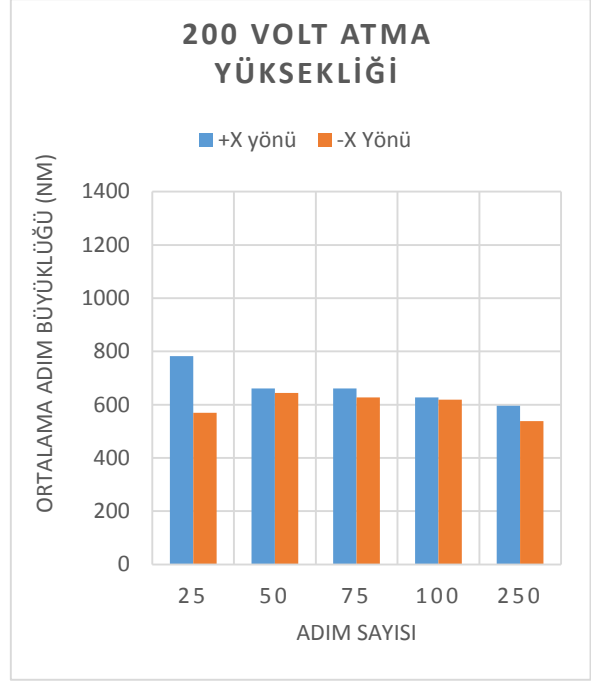
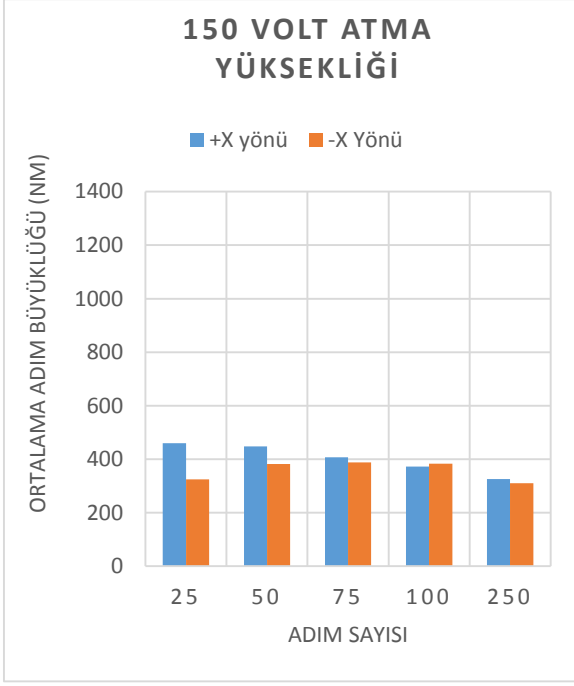
Bes. Ger. (Volt)	Yük (Gr)	1.konum Ref. noktası	2.konum	3.konum	4.konum	5.konum	6.konum	7.konum	8.konum	9.konum	10.konum	11.konum
300V	0	370813	503181	632576	756241	885887	1022992	923942	839202	750760	665531	579841
	10	439284	554081	670402	784914	902475	1016492	922022	824445	725038	629742	532464
	20	224940	344892	452120	581747	705413	832653	739451	656689	575758	484147	409752
	30	145616	264722	367166	481909	601519	726008	663677	580140	501665	432505	363689
	40	121193	228128	338387	448793	557699	663209	589911	519168	453435	379632	315649
	50	112762	243380	366955	487079	612580	737304	639349	538462	447006	363885	266305
	100	99713	209694	328241	443010	559582	679677	592949	516008	429651	345501	268108

Çizelge 11-300 Volt sabit besleme gerilimi ve 100 adımlık ilerlemeler ile yüke bağlı yer değiştirme miktarı

Bslm. Voltaj	Adım Sayısı	Yük (Gr)	+X Yönlü yer değiştirme(nm)					-X Yönlü yer değiştirme(nm)				
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
300V	100	0	132368	129395	123665	129646	137105	99050	84740	88442	85229	85690
		10	114797	116321	114512	117561	114017	94470	97577	99407	95296	97278
		20	119952	107228	129627	123666	127240	93202	82762	80931	91611	74395
		30	119106	102444	114743	119610	124489	62331	83537	78475	69160	68816
		40	106935	110259	110406	108906	105510	73298	70743	65733	73803	63983
		50	130618	123575	120124	125501	124724	97955	100887	91456	83121	97580
		100	109981	118547	114769	116572	120095	86728	76941	86357	84150	77393



Şekil 39- Farklı adım sayısı ve yük altında sinyal şiddetine bağlı ortalama adım büyüklükleri



Şekil 40-Sabit besleme sinyallerinde adım sayısına bağlı ortalama adım büyüklüğü histogramları

Şekil 39'da sabit adım ilerlemelerinde ölçülen farklı şiddetlerdeki besleme sinyallerine karşılık ortalama adım büyüklüğü grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde artan şiddetle beraber ortalama adım büyüklüğünün arttığı açıktır. Ancak piezoelektriklerin besleme voltajına karşılık boyca uzama miktarları doğrusal olmasına rağmen bu artış doğrusal değildir. Örneğin ileri yönde 150V besleme ile hareket için ölçülen ortalama adım büyüklüğü 400 nm civarlarında iken ileri yönde

300V besleme ile ölçülen değer 1350nm civarlarındadır. Oysaki doğrusal oran ile bu değer 800 nm civarlarında olması beklenir. Bu durumun açıklaması besleme sinyallerinin anlatıldığı test elektroniği bölümünde açıklanmıştır. Sinyal şiddeti değiştirildiğinde sinyalin maksimum şiddete vardığı süre aynı olduğu için mekanizmadaki piezoelektrik yüksek şiddetli sinyallerde hem daha fazla boyca uzarken hem daha yüksek ivmeli hareket yapar. Bu nedenle adım büyüklüklerindeki artış doğrusal değildir.

Şekil 39 ve şekil 40'daki grafik ve histogramlar incelendiğinde mekanizma ile ilgili başka bilgiler de elde edilir. Sabit adım sayılarındaki ileri ve geri yönlü hareketler arasındaki ortalama adım büyüklükleri karşılaştırıldığında artan sinyal şiddeti ile beraber büyük farklılıklar gözlenmiştir. Piezoelektriğin ileri ve ters yönde boyca değişim miktarı eş şiddetli sinyallerde aynı büyüklükte olmasına rağmen mekanik yapı üzerinde bulunan baskı yayını sıkıyan iki vidanın özdeş bir şekilde eşit miktarda sıkılmamasının bu sonucu doğurduğu düşünülmektedir. Bu durumun diğer bir nedeni kullanılan yaprak yayın geometrik olarak çok düzgün imal edilememiş olması ile mekanizmada hareketin farklı bölgelerinde farklı etkiler gösteriyor olabileceğidir. Ayrıca bir başka öngörü şudur; yüksek şiddetli sinyaller ile alınan veriler mekanizmanın hareket kapasitesinin daha geniş bir bölgesi hakkında bilgi vermektedir. Kısa mesafede alınan veriler ise yüzey etkisinin birbirine yakın olduğu, kendi içinde daha homojen sayılabilecek mesafeler hakkında bilgi verir. Kısaca hareket mesafesi arttıkça katedilen mesafedeki yüzey homojenliği değiştiği için ölçülen adım büyüklükleri arasında farklılıklar artmıştır.

Şekil 39 ve şekil 40 incelendiğinde bir seferde ilerlenen adım sayısının ortalama adım büyüklüğü üzerinde belirgin bir değişime sebep olmadığı söylenir. Matematiksel bağıntılar incelendiğinde de zaten beklenen durum budur.

Şekil 39'da yer alan 300 volt besleme sinyali ile 100 adımlık ilerlemelerde farklı ağırlıktaki yükler altında ölçülen ortalama adım büyüklüklerine bakıldığında sistemin yüke karşı belirsiz tepki gösterdiği görülmüştür. Ölçümlerde ağırlığın 40 grama kadar arttırılması ile adım büyüklüğünün küçülmesi görülmüştür. Bu durum sürtünme kuvvetinin artması sebebiyle hareketin çabuk sönümlenmesi olarak yorumlanabilir. Ancak ağırlığın 60 grama çıkarılması ile adım büyüklüğünde beklenen azalan etki bir anda artış göstermiştir. Bu durum hareketli yüzeylerin homojen olarak imal edilememesi sebebi ile yüzeyin farklı yüklerde farklı tepkiler vermesinin bir sonucu olarak yorumlanmıştır.

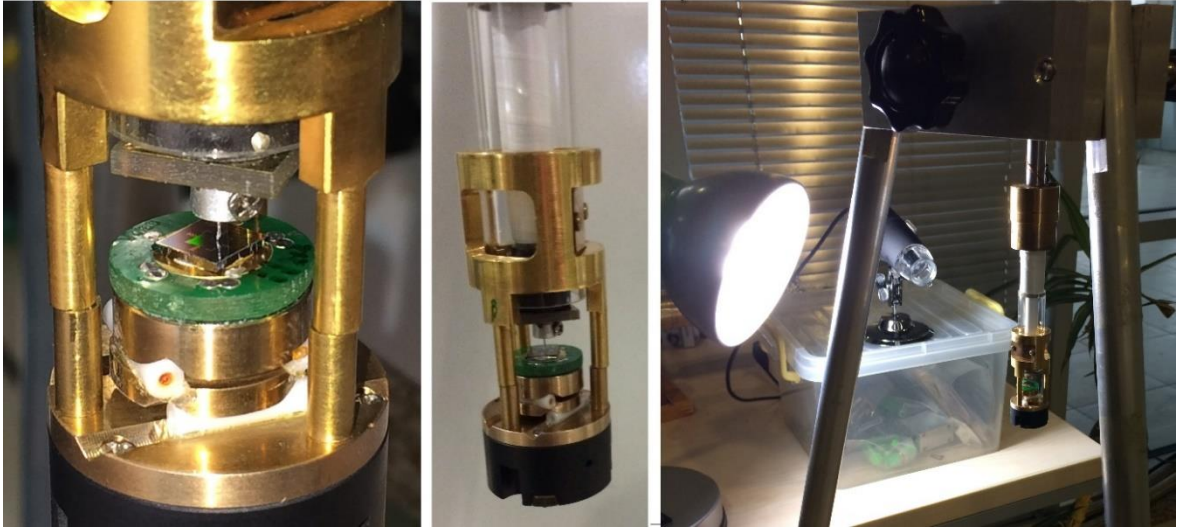
Yapılan tek eksen kaydır taşı hareket mekanizmasında minimum ortalama 400 nm ve maksimum ortalama 1350 nm mertebesinde hareket ölçülmüştür. Ayrıca mekanizma ile 100 gramlık yük nanometre mertebesinde taşınabilmiştir. Bu sistem için yapılması düşünülen değişiklikler gelecek çalışmalar bölümünde verilmiştir.

5.3 Düşük Sıcaklık Uyumlu (4K-300K) İki Eksenli Kaydır-Taşı Kızağı

Tasarım sonrası prototip üretimi gerçekleştirilen iki eksen kaydır-taşı tipi piezoelektrik motor üç farklı ortam koşulu altında testlere tabi tutulmuştur. Bu testler ortam koşulları hareketin kolay gerçekleşeceği koşuldan zorlu olana doğru sıralanmaktadır. Montajı yapılan iki eksen motor oda koşullarında hareket edebilirliği gözlemlendikten sonra soğutma gazı olarak helyum kullanan kapalı devre cryostatı ile önce 77 kelvin sonrasında 4 kelvin sıcaklığında test edilmiştir.

5.3.1 Oda Sıcaklığı Testi

Bu mekanizma için hedeflenen düşük sıcaklık testleri olduğu için atmosfer koşullarında hareket usb mikroskop kamera ile izlenerek görüntülenmiştir. Bu test sırasında iki eksen de hareketi gözlenen mekanizma daha sonra düşük sıcaklık testlerine alınmıştır. Oda sıcaklığı testlerinde kullanılan test istasyonu şekil 41'de görülmektedir.



Şekil 41-X-Y motor oda sıcaklığı test düzeneği

5.3.2 Düşük Sıcaklık Testleri

77 Kelvin ve 4 Kelvin test düzeneği olarak kullanılan sistem Cryogenic Limited isimli firmaya ait bir üründür. Sistem içerdiği süper iletken mıknatıslar sayesinde 9 Teslalık bir manyetik alan oluşturmaktadır. Sistem soğutma kafası olarak 0.5 watt soğutma gücündeki Sumitamo marka Pulse tube mekanizmasına sahiptir. Soğutma gazı olan helyum minimum çalışma basıncı 15-16 bar civarında olan yine sumitamo marka kompresör ile döndürülür. Dışarıdan kapalı devre su soğutma sistemi yardımı ile kompresör içinde oluşan ısı atmosfere atılır (Şekil 42).



Şekil 42- Düşük sıcaklık test cihazı

Düşük sıcaklık testi ve veri analizi işlemleri şu şekildedir. Mikroskopun numune pcb'sinin üzerine düzenli geometrilerde üretilmiş olan galyum arsenit numune yerleştirilerek numune üzerinden topografi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tek eksende belirli adımlarda hareketler gerçekleştirdikten sonra yüzey tarama işlemleri tekrarlanmıştır. Kaydedilen görüntülerde yüzey üzerindeki belirgin kusurlar ve farklılıklar içeren görüntülerden yer değiştirme miktarları ölçülerek adım başına hareket miktarları hesaplanmıştır. Alınan görüntüler içinden yer değiştirme görüntülerinden biri şekil 43'de görülmektedir. Şekilde alınan ardışık iki görüntüde üstte yer alan görüntüde bulunan parlak noktanın alttaki görüntüde yukarı yönde kaydığı görülmektedir. Yapılan ölçümler sonucu elde edilen test sonuçları şu şekildedir.

77 Kelvin Sıcaklığı Test Sonuçları:

X eksenini 4 adım ilerleme;

$X_1 = 5.67 \mu\text{m}$, $X_2 = 13.45 \mu\text{m}$, $\Delta X = 7.78 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü = $1.95 \mu\text{m}$

$Y_1 = 7.18 \mu\text{m}$, $Y_2 = 7.66 \mu\text{m}$, $\Delta Y = 0.48 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü = $0.12 \mu\text{m}$

X eksenini 4 adım

$X_1 = 8.9 \mu\text{m}$, $X_2 = 17.26 \mu\text{m}$, $\Delta X = 8.36 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü = $2.09 \mu\text{m}$

$Y_1 = 10.29 \mu\text{m}$, $Y_2 = 9.00 \mu\text{m}$, $\Delta Y = 1.29 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü = $0.32 \mu\text{m}$

X eksenini 6 adım

$X_1 = 17.77 \mu\text{m}$, $X_2 = 2.07 \mu\text{m}$, $\Delta X = 15.7 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü = $2.6 \mu\text{m}$

Y1=6.37 μm , Y2=5.51 μm , $\Delta Y = 0.86 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.14 μm

Y eksen 5 adım

X1=8.04 μm , X2=9.09 μm , $\Delta X = 1.05 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.21 μm

Y1=11.21 μm , Y2=2.71 μm , $\Delta Y = 8.5 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=1.7 μm

Y eksen 5 adım

X1=11.20 μm , X2=14.52 μm , $\Delta X = 3.32 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.66 μm

Y1=9.94 μm , Y2=3.71 μm , $\Delta Y = 6.23 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=1.25 μm

Y eksen 6 adım

X1=11.16 μm , X2=10.27 μm , $\Delta X = 0.89 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.15 μm

Y1=2.01 μm , Y2=11.24 μm , $\Delta Y = 9.23 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=1.54 μm

X eksen 9 step histerisis

X1=15.59 μm , X2=6.40 μm , $\Delta X = 9.19 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=1.02 μm

Y1=15.46 μm , Y2=16.91 μm , $\Delta Y = 1.45 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.16 μm

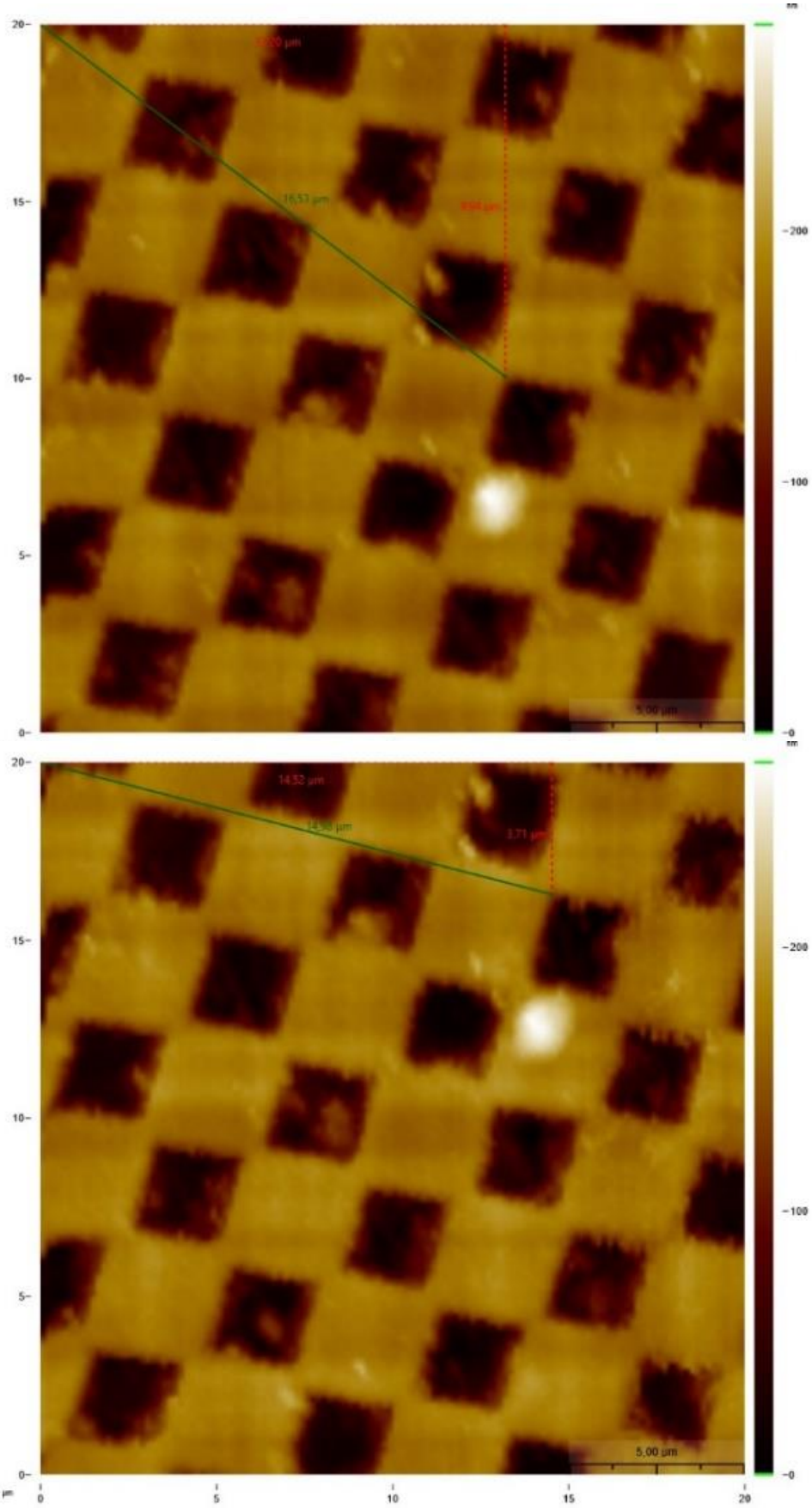
Y eksen 10 adım histerisis

X1=14.19 μm , X2=15.35 μm , $\Delta X = 1.16 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.116 μm

Y1=9.43 μm , Y2=13.39 μm , $\Delta Y = 3.96 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.396 μm

Çizelge 12-77 Kelvin sıcaklıkta X-Y motoru adım başına ortalama yer değiştime miktarı

Besleme voltajı maksimum değer (Atma şiddeti): 200V		
Haraket yönü ve adım sayısı	X eksen adım başına ortalama yer değiştime (μm)	Y eksen adım başına yer ortalama değiştime (μm)
X eksen 4 adım	1.95	0.12
X eksen 4 adım	2.09	0.32
X eksen 6 adım	2.6	0.14
Y eksen 5 adım	0.21	1.7
Y eksen 5 adım	0.66	1.25
Y eksen 6 adım	0.15	1.54
X eksen 9 adım histerisis	1.02	0.16
Y eksen 10 adım histerisis	0.116	0.396



Şekil 43- Kriyojenik sıcaklık altında yapılan ölçüm sonucu Y eksenindeki değiştirme hareketinin görüntüsü. Referans olarak alınan parlak noktanın +Y yönünde kaydığı görülüyor.

4 Kelvin Sıcaklığı Test Sonuçları:

X eksen 6 adım

X1=13.5 μm , X2=10.84 μm , $\Delta X = 2.66 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.443 μm

Y1=7.3 μm , Y2=5.78 μm , $\Delta Y = 1.52 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.253 μm

Y eksen 4 adım

X1=10.84 μm , X2=10.50 μm , $\Delta X = 0.34 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.085 μm

Y1=5.78 μm , Y2=6.41 μm , $\Delta Y = 0.63 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.158 μm

Y eksen 8 adım

X1=10.50 μm , X2=10.40 μm , $\Delta X = 0.100 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.012 μm

Y1=6.41 μm , Y2=7.74 μm , $\Delta Y = 1.33 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.166 μm

X eksen histerisis 40 adım

X1=6.77 μm , X2=10.14 μm , $\Delta X = 3.37 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.084 μm

Y1=14.64 μm , Y2=11.44 μm , $\Delta Y = 3.2 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.080 μm

Y eksen histerisis 40 adım

X1=10.14 μm , X2=12.61 μm , $\Delta X = 2.47$, Ortalama adım büyüklüğü=0.061 μm

Y1=11.44 μm , Y2=9.7 μm , $\Delta Y = 1.74 \mu\text{m}$, Ortalama adım büyüklüğü=0.043 μm

Çizelge 13- 4 Kelvin sıcaklıkta X-Y motoru adım başına ortalama yer değiştime miktarı

Haraket yönü ve adım sayısı	X eksen adım başına yer değiştime (μm)	Y eksen adım başına yer değiştime (μm)
X eksen 6 adım	0.443	0.253
Y eksen 4 adım	0.085	0.158
Y eksen 8 adım	0.012	0.168
X eksen 40 adım histerisis	0.084	0.080
Y eksen 40 adım histerisis	0.061	0.043

Öncelikle 77 kelvin sıcaklığında ve sonrasında 4 kelvin sıcaklığında yapılan testlerde oluşturulan mekanizmanın bu sıcaklık koşullarında her iki eksen ve her iki yönde de hareket edebildiği görülmüştür. 200 volt besleme voltajı ile gerçekleştirilen 77 kelvinde yapılan ölçümlere göre X eksenindeki ortalama adım büyüklüğü yaklaşık 2 μm civarındadır. Aynı şekilde Y ekseninde ölçülen ortalama

adım büyüklüğü ise $1.5\mu\text{m}$ civarındadır. Sonrasında yine 200 volt besleme voltajı ile 4 kelvin sıcaklıkta x eksenindeki ortalama adım büyüklüğü 450 nm civarında iken y ekseninde bu değer 150 nm civarında ölçülmüştür.

Her iki sıcaklıkta da X eksenindeki adım büyüklüğünün Y eksenindeki değerden büyük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi mekanik yapıda X ekseninin tüp piezoelektriğin sabit kenarından Y eksenine göre daha uzakta yer almasıdır. Mesafedeki bu fark X ekseninin daha büyük genlikte salınım yapmasına dolayısıyla yer değiştirmenin daha fazla olmasına sebep olmaktadır.

Elde edilen sonuçlardan görülen bir başka durum mekanik yapının ortogonal tasarlanmış olmasına rağmen X ekseninde harekette Y ekseninde ve aynı şekilde Y eksenindeki harekette de X ekseninde yer değiştirme olduğudur. Bu durumun XY kızağının yerleştirildiği Z eksen kızağının dönme serbestliğinin kısıtlanmamış olmamasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Mikroskobun Z kızağı sadece Z ekseninde hareket için tasarlandığından puck parçasının Z ekseninde dönme hareketi göz ardı edilmiştir. Bu durum ileri bir versiyon olarak imal edilecek mikroskoplarda düzeltilecektir.

Elde edilen sonuçlardan görülen bir başka sonuç ise ileri ve geri yönlü hareketlerde ortalama adım büyüklüklerinin eşit olmamasıdır. Yapılan histerisis ölçümlerinde başlangıç noktasından belli bir ilerlemede adım atılarak sonrasında aynı miktarda adım sayısında geri yönde ilerlenmiştir. Ancak başlangıç ve bitiş noktaları arasında mesafe farklılıkları ölçülmüştür. Bu durum 77 kelvin sıcaklığında adım büyüklüğünün daha fazla olması sebebi ile daha belirgin olarak görülmektedir. 4 kelvin sıcaklığında ise adım büyüklükleri daha küçük olduğundan bu değer daha azdır.

Yapılan ölçümler sırasında alınan görüntünün tekrarlanan ardışık görüntüleme işlemleri sırasında kötüleştiği gözlenmiştir. Bunun sebebi kullanılan tarama ucunun aşınarak zamanla performansının kötüleşmesidir. Bu sebeple ölçümler durdurularak elde edilen veriler analiz edilmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda yeni ölçümler tekrarlanmadan hareketin daha düzgün hale getirilmesi için bazı değişiklikler hedeflenmiştir. Hedeflenen bu değişiklikler gelecek çalışmalar bölümünde ele alınmıştır.

6 GELECEK ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde ortaya çıkan piezoelektrik motorlar ile ticari ürün olarak piyasada bulunan ürünler karşılaştırıldığında performans olarak arada büyük farklar bulunmaktadır. Ticari ürünler için ilerleme hassasiyeti 10 nm ve altında iken çalışmalar sonucunda ulaşılan en küçük değer oda sıcaklığında 400nm, düşük sıcaklıkta bu değer 150 nm mertebelerinde kalmıştır. Ancak çalışmalar sırasında elde edilen tecrübe ile gözlemlenen problemlerin düzeltilmesi ve bazı değişiklikler ile motor hareketinin daha düzgün ve performanslı hale gelmesi için çalışmaların tez sonrası çalışmalar ile sürdürülmesi planlanmaktadır. Yapılması hedeflenen çalışmaları şu şekilde sıralanabilir;

Öncelikle oda sıcaklığı ve düşük sıcaklık motorlarında görülen histerisisin azaltılması için daha kaliteli ve düzgün yüzeyler imal edilmesi ve gerekiyorsa bu yüzeylere sert kaplamalar yaptırarak aşınmaya bağlı hareket bozukluklarının azaltılması hedeflenmektedir. Bunun için mekanik imalat metodları ile sert kaplama çeşitlerinin araştırılması, kullanılan malzeme çeşitine uyumlu yüzey kaplama malzemeleri ve kaplama metodları araştırılması ve imalat denemeleri gerçekleştirilmelidir.

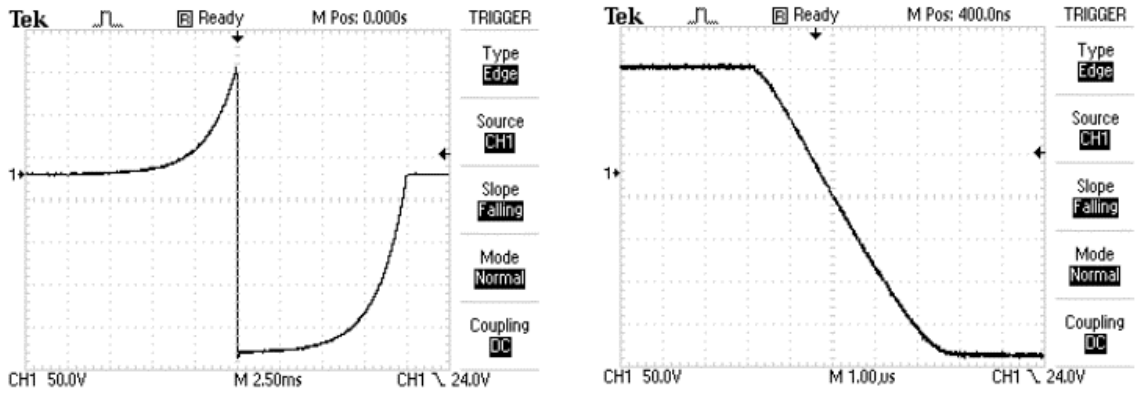
Çalışmada kullanılan fosforbronz malzeme yerine kızak malzemesi olarak başka malzemeler ile imalatlar gerçekleştirerek, diğer malzemelerde hareketin nasıl değiştiği incelenmelidir. Örneğin paslanmaz çelik ya da polimer bazlı malzemeler ile zirconia rayların sürtünme açısından nasıl performans sergileyeceği incelenmelidir. Bu esnada dikkat edilecek bir husus da bu malzemelerin talaşlı imalat ile ne kadar düzgün yüzeylere sahip bir şekilde oluşturulacağıdır. Çünkü her malzeme aynı imalat sürecinde aynı kalitede çıkarılamamaktadır.

Mekanik yapı üzerinde geliştirilmek istenen parçalardan bir tanesi baskı yayı mekanizmasıdır. Baskı yayının tüm hareket bölgesinde homojen kuvvet verecek şekilde ayarlanamaması ileri ve geri yönlü hareketlerde adım büyüklüklerinde farklılık yaratmıştır. Bir sonraki tasarımda bu sorunu giderecek bir geometri oluşturulmalıdır.

Tüp piezoelektrik ile yapılan XY kızakta görülen pasif eksenindeki hareketin engellenmesi için Z eksen kızağının bağlı bulunduğu kuartz tüpün yüzeyinde düz yüzeyler bulunduran silindirik şekilde bir parça ile değiştirilerek Puck'ın Z ekseninde dönme serbestliği sınırlandırılmalıdır. Bu sayede ortogonal diğer eksenindeki hareket engellenebilir. Bunun için kuartz malzemeyi hasas şekillendirme yöntemleri ya da kuartz malzemeye alternatif şekillendirilebilir malzemeler araştırılmalıdır.

Yukarıda belirtilen araştırma konuları mevcut sistemlerde görülen eksiklikleri gidermek için yapılması ön görülen çalışmalardır. Ayrıca geliştirilecek piezoelektrik motorun performansını arttıracak bazı yeni çalışmalar yapılması düşünülmektedir.

Elektronik ve besleme sinyalleri bu çalışmalardan biridir. Yapılan açıklamalarda besleme sinyalindeki düşme süresinin hareketin kaydır bölümünde önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Testlerde kullanılan sinyallerde düşme süresi maksimum şiddette bağlı olarak 18 μ s ile 42 μ s arasında değişmektedir. Yapılacak elektronik devre çalışmaları ile bu değerlerin birkaç mikrosaniye ve hatta nanosaniye mertebelerine çekilerek hareketin kaydır kısmının çok daha iyi ve hızlı gerçekleşmesi hedeflenmektedir. Bu sayede daha düşük şiddetli sinyallerde dahi hareketin görülmesi hedeflenmektedir. Ayrıca testlerde kullanılan sinyallerde atmalar sadece pozitif ya da negatif voltaj bölgesinde çalışmaktadır. Ancak piezoelektriklerin boyca uzama ve daralma işlemi tek atma içerisinde gerçekleştirilerek bir atmadaki maksimum hareketin artırılması ya da aynı ilerlemelerin daha düşük genlikli besleme voltajları ile gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir (Şekil 43).



Şekil 44- İlerleyen çalışmalarda kullanılması düşünülen besleme sinyali şekli

Besleme sinyallerindeki bu değişikliklerin küçük genlikli sinyaller ile mekanik yapıların daha küçük adımlar atabilmesini sağlaması beklenmektedir. Bu sayede ortalama adım büyüklüklerinin 400nm mertebelerinden daha düşük seviyelere çekilmesi hedeflenmektedir.

Hedeflenen adım büyüklüklerine ulaşıldığı durumda ortaya çıkan diğer bir gereksinim bu adım büyüklüklerini görüntüleyebilecek ya da ölçebilecek bir sensörün sistemde çalışabilir hale getirilmesi ve kalibre edilmesi işlemidir. Bunun için ön hazırlık x-y motorunda düşünülen kapasitif sensör ile yapılmıştır. Ancak bu çalışmanın bir benzeri tek eksen motoruna adapte edilmeli ve kapasitif sensör uygulaması çalışır hale getirilmelidir. Bundan sonra yapılması gereken eylem ise çalıştırılan kapasitif sensörden gelen mesafe bilgisinin kalibre edilebilmesi için bir kalibrasyon düzeneği geliştirilmesi olacaktır.

Gelecek çalışmalar kapsamında planlanan diğer bir çalışma geliştirilen bu sistemlerin manyetik alan ve çok yüksek vakum ortamı altında performans testlerinin ayrıntılı bir şekilde yapılması ve mekanizmaların bu ortamlardaki çalışabilirliğinin

arttırılmasıdır. Tez çalışmasının içerisinde geliştirilen piezoelektrik motorlar bu ortamlar altında çalışmaya müsait olarak tasarlanmış olsa da istenilen hareket yeterliliğine ulaşamadıkları için manyetik alan ve yüksek vakum ortamı tesleri gerçekleştirilmemiştir.

7 KAYNAKLAR

1. *Taramalı uc mikroskopları tarihi.*
http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_force_microscopy.(Kasım, **2014**)
2. Binnig, G.K., *Atomic force microscope and method for imaging surfaces with atomic resolution.* **1988**.
3. ÖZGEN, D.G.O., *Piezoelectric materials.* ME 493 Introduction to Smart Structures and Materials, METU, **2011**.
4. Brünahl, J., *Physics of piezoelectric shear mode inkjet actuators.* Doctoral Dissertation Royal Institute of Technology Condensed Matter Physics, **2003**: p. 32.
5. Smith, R.C., *Smart material Systems.* Society for Industrial and Applied Mathematics, **2005**.
6. Spanner, K. and S. Vorndran, *Advances in Piezo-Nanopositioning Technology.* International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, **2003**.
7. *Kozak micro adjusters.* <http://www.kozakmicro.com/index.html>. (Kasım, **2014**)
8. Novotny, M. and P. Ronkanen, *Piezoelectric Actuators.*
9. Noliac. *Çok katlı piezoelektrik yığın yapısı.*
http://www.noliac.com/Bulk_and_multilayer_-6588.aspx. (Kasım, **2014**)
10. *Pl. Tek parça iç içe geçmiş X-Y Tabla tasarımı.* <http://www.piezostage.net/>. (Kasım, **2014**)
11. S.Kleindiek and K.H. Herrmann, *Aminiaturized scanning tunneling microscope with large operation range.* Rev Sci Instrum, **1993**. **64**(3): p. 693.
12. Lind, M., P. Kallio, and H.N. Koivo, *Linear motion miniature actuators.pdf*, in *2nd tampere International Conference on Machine Automation.* **1998**.
13. Cherepanov, V., P. Coenen, and B. Voigtlander, *A nanopositioner for scanning probe microscopy: the KoalaDrive.* Rev Sci Instrum, **2012**. **83**(2): p. 023703.
14. S.Kleindiek, et al., *Miniature three-axis micropositioner for scanning proximal probe and other applications.* J.Vac.Sci.Technol., **1995**. **13**(6).

15. Demirtaş, M., et al., *Yürüyen Dalga Tip Ultrasonik Motor Hız Denetimi Benzetimi*, in *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*. **2009**: Karabük, Türkiye.
16. Hüner, E. and Ş.N. Engin, *Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorum Modellenmesi*.
17. Serway, R.A. and R.J. Beichner, *Fen ve Mühendislik için Fizik 1*, in *Physics for Scientist and Engineers with Modern Physics* P. Yayıncılık, Editor. **2000**, Saunders College Publishing. p. 563-564.
18. Drevniok, B., et al., *Methods and instrumentation for piezoelectric motors*. Rev Sci Instrum, **2012**. **83**(3): p. 033706.
19. Mashoff, T., *Design of a low temperature scanning tunneling microscope system used to examine graphene nanomembranes*. PHD thesis, **2010**.
20. Qin, S., *Low temperature scanning tunneling microscope study of metallic thin films and nanostructures on the semiconductor substrates*. PHD thesis at The university of Texas at Austin, **2008**.
21. C.Dubois, P.E.B.A.A.M., Fischer and S. Reymond, *Compact design of a low temperature XY stage scanning tunneling microscope*. Rev Sci Instrum, **2006**. **77**.
22. Curtis, R., et al., *A compact micropositioner for use in ultrahigh vacuum*. Rev Sci Instrum, **1993**. **64**(9): p. 2687.
23. Müller, K.-D., et al., *Piezo-based, Long travel actuators for special environmental conditions*. Physik Instrumente(PI), **2006**.
24. Meyer, C., et al., *Slip-stick step scanner for scanning probe microscopy*. Rev Sci Instrum, **2005**. **76**.
25. Anantheshwara, K., N.S.Murali, and M.S. Bobji, *Effect of friction on the performance of inertial slider*. Sadhana, **2008**. **33**: p. 221-226.
26. Long, C. and N. Sayma, *Heat-transfer*. Ventus Publishing, **2009**.
27. *Thermal emissivity coefficient of some common material*. http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html. (Kasım, **2014**)
28. *Kelvinscale*. <http://www.answers.com/topic/temperature-and-heat#ixzz2tr4Jjuor>. (Kasım, **2014**)
29. Cambridge, U.o. *Teaching and learning packages*. <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ferromagnetic/types.php>. (Kasım, **2014**)
30. Roseman, M.A., *Design and Characteristics of a low temperature atomic force microscope*. MSC Thesis at Department of physics McGill University **1997**.

31. G.Martinet, et al., *Low temperature properties of piezoelectric actuators used in srf cavities cold tuning systems*. Mopch144, **2006**.
32. E.D.Marquardt, J.P.Le, and R. Radebaugh, *Cryogenic Material Properties Database*, in *11th International Cryocooler Conference*. **2000**: Keystone.
33. Polinski, J., *Materials in cryogenics*. European Course in Cryogenics, Cern, Geneva, **2010**.
34. Laboratory, N.M.M. *Material properties at cryogenic temperature*. <http://www.cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/material%20properties.htm>. (Kasim, **2014**)
35. Sciver, S.W.V., *Chapter 2-Low Temperature Materials Properties*. International Cryogenics Monograph Series, **2012**.
36. Bromwell, L.G., *The friction of quartz in high vacuum*. Research in Earth Physics Phase Report, **1966**.
37. Burton, J.C., P.taborek, and J.E. Rutledge, *Temperature dependence of friction under cryogenic conditions in vacuum*. Tribology Letters, **2006**. **23**(2).

8 ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı :Sezgin Kocaer
Doğum Yeri :Balıkesir
Medeni Hali :Bekar
E posta : sezginkocaer@gmail.com
Adres : 92 sok. Şelale evleri sitesi 1-C blok daire 10
Eryaman/Etimesgut/Ankara

Eğitim

Lise : 2001-2005 Bandırma Anadolu Lisesi
Lisans : 2005-2010 Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü
Bilimsel Hazırlık: 2010-2011 Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce :ÜDS – 65

İş Deneyimi

Kasım 2012 – Devam ediyor; Nanomanyetik Bilimsel Cihazlar LTD. ŞTİ.

Deneyim Alanları

Fiziksel özellik ölçüm sistemleri mekanik tasarımı, düşük sıcaklık ve vakum sistemleri mekanik tasarım, imalat ve testi.

Tezden Üretilen Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Çıkarılan Yayınlar

-

Tezden Üretilen Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Projeler

-