

**TARAMALI TÜNELLEME MİKROSKOBU (TTM) CİHAZI  
TASARIM İMALATI VE BİYOLOJİK UYGULAMALARI**

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF A  
SCANNING TUNNELING MICROSCOPE (STM)  
AND BIOLOGICAL APPLICATIONS**

**ONUR KOÇAK**

Başkent Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
BİYOMEDİKAL Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

2008

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından **BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....  
(Doç. Dr. Osman EROĞUL)

Üye (Danışman) :.....  
(Yrd. Doç. Dr. İ.Cengiz KOÇUM)

Üye :.....  
(Yrd. Doç. Dr. Bülent YILMAZ)

ONAY

Bu tez ...../...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../.....

Prof. Dr. Emin AKATA

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın tüm aşamalarında danışmanlığını, yol göstericiliğini esirgemeyen, edindiği engin bilgi ve tecrübeyi bizlerle paylaşmaktan çekinmeyen ve tez çalışmamın başından sonuna kadar benimle birlikte aynı heyecanı yaşayan, danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. İsmail Cengiz KOÇUM'a en derin saygılarımla teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca; TTM görüntülerinin elde edilmesindeki yardımlarından dolayı Sayın Arş. Gör. Ahmet Sertaç SUNAY'a,

tezim süresince bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sevgili hocam Sayın Öğr. Gör. Arif KOÇOĞLU'na,

yol göstericiliği ile bilgimize bilgi katan kıymetli büyüğüm, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Turhan ÇİFTÇİBAŞI'na,

tez sürecinde karşılaştığımız her türlü altyapı problemlerinin aşılmasında yardımlarını bizden esirgemeyen

Sayın Prof. Dr. Hüseyin AKÇAY'a ve Sayın Prof. Dr. İmdat KARA'ya,

mekanik sistemin hazırlanması sırasındaki katkılarından dolayı, Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Teknikeri Sayın İsmail KARABACAK'a,

elektronik bölümlerin montajındaki katkılarından dolayı, Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Teknikerleri Sayın Ertuğrul Ş. ÜSTÜN ve Sayın İlyas GÜLER'a,

her zaman yanımda olan ve kısıtlı zamanlarına rağmen desteklerini esirgemeyen aileme ve yakın dostlarıma,

en derin saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

## ÖZ

### TARAMALI TÜNELLEME MİKROSKOBU (TTM) TASARIM İMALATI VE BİYOLOJİK UYGULAMALARI

Onur KOÇAK

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Taramalı Tünelleme Mikroskobu (TTM) yüzey topografisini angström (Å) mertebesinde mikron ( $\mu$ ) seviyelerine kadar görüntüleyebilen prop mikroskopi ailesine ait yeni kuşak bir mikroskoptur. TTM, bir ön hazırlama aşaması olmadığı ve yüksek enerjili ışınlar kullanılmadığı için biyolojik moleküllerin üç boyutlu yapısını bozmadan, buldukları ortamda görüntülenmesini sağlamaktadır.

Sunulan bu tezin ana amacı bir TTM cihazı imal edilerek çeşitli biyolojik moleküllerin yüzey özelliklerinin incelenmesi çalışmalarına katkı sağlamaktır. Tasarlanan bu cihaz mekanik, elektronik, veri toplama ve bilgisayar yazılımı ana bölümlerinden oluşmaktadır.

Tarama işlemi genel olarak yüzey ile TTM iğnesi arasında oluşan tünel akımının yüzey özelliklerine göre değişimi ve bu değişimin algılanması şeklinde çalışmaktadır. Tarama işlemini gerçekleştirecek piezoelektrik tüp için, bipolar güç kaynağı ile akım/voltaj çeviricisi tasarlanıp imal edilip elektronik performans açısından incelenmiştir. Tarama işleminin gerçekleştirileceği mekanik kısım ile algılanan akımın kontrolünü sağlayan bir PI kontrol devresi tasarlanıp imal edilmiştir. Alınan akım bilgisi, bilgisayar ve yazılım yardımıyla görüntü haline getirilmiştir. Elde edilen görüntüler ticari cihazlardan alınan görüntülerle karşılaştırılıp üretilen cihazın yetkinliği gözlemlenmiştir.

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Piezoelektrik tüp, akım/voltaj çevirici, tarama iğnesi, bipolar güç kaynağı, PI kontrol.

**Danışman:** Yrd. Doç.Dr. İ.Cengiz KOÇUM, Başkent Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SCANNING TUNNELING MICROSCOPE (STM) AND BIOLOGICAL APPLICATIONS**

Onur KOCAK

Baskent University Institute of Science

Department of Biomedical Engineering

Scanning tunneling microscope (STM) is a new generation microscope which can image topography of surface from angstrom ( $\text{\AA}$ ) level to micron ( $\mu$ ) level. STM could image the biological molecules in their native environment without deform their 3D conformation. This is the main advantage against to other techniques, because of the reason, no high power radiations is used. Another advantage is no complicated sample preparation steps are required.

The aim of this thesis is contributing to the investigation of the surface properties of various biological molecules by fabricating a STM. It has four main parts, which are mechanical, electronic, data acquisition and computer software.

Scanning process in STM is based on sensing of the tunneling current between a metallic tip and a conducting substrate, which are in very close proximity but not actually in physical contact. For the piezoelectric tube that performs the scanning process, a bipolar power supply and a current/voltage converter were designed, constructed and both are tested for their electronic performance. A PI control unit is designed and constructed to accumulate the control of the current, detected by the mechanical unit which operates the scanning process. Detected current data were displayed as an image by computer software. Captured image was compared with the images from other devices those commercially used and perfection of the system was observed.

**KEYWORDS:** Piezoelectric tube, current/voltage converter, scanning tip, bipolar power supply, PI control unit.

**Advisor:** Assist. Prof. Dr. I. Cengiz KOCUM, Baskent University, Department of Biomedical Engineering.

# İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	i
ÖZ.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Kapsam ve Tarihsel Gelişim.....	1
1.2 Amaç.....	6
1.3 Yöntem.....	8
<b>2. GENEL BİLGİLER.....</b>	<b>9</b>
2.1 TTM Elektron Tünellemesi.....	10
2.2 TTM'nin Temel Bölümleri.....	15
2.2.1 Mekanik bölümler.....	15
2.2.1.1 İnce yaklaştırma mekanizması.....	15
2.2.1.2 Tarama kafası.....	16
2.2.1.3 Kaba yaklaştırma mekanizması.....	18
2.2.1.4 Vibrasyon izolasyonu.....	18
2.2.1.5 Tarama iğnesi.....	19
2.2.2 Elektronik bölümler.....	20
2.2.2.1 Kontrol bölümü.....	21
2.2.2.2 Akım(I)/Gerilim(V) çevirici.....	32
2.2.2.3 Yüksek gerilim kaynağı.....	35
2.2.3 Veri toplama ve görüntü oluşturma bölümü.....	39
2.3 TTM Cihazı Biyolojik Uygulamaları.....	40
<b>3. MATERYAL VE METOD.....</b>	<b>42</b>
3.1 Mekanik Tasarım.....	42
3.1.1 Kaba yaklaştırma mekanizması.....	42
3.1.2 İnce yaklaştırma mekanizması.....	42
3.1.3 Piezo tüp ve tarama iğnesi konumlandırma mekanizması.....	43
3.1.4 Titreşim önleyici sistem.....	44

3.2 Elektronik Tasarım .....	44
3.2.1 Bilgisayar kontrollü 200V bipolar güç kaynağı bölümü.....	44
3.2.2 Akım/Voltaj çevirici bölümü .....	48
3.2.3 Kontrol bölümü.....	50
3.3 Veri Toplama, Yazılım ve Bilgisayar Bölümü.....	51
3.4 Görüntüleme Prosedürü .....	53
<b>4. SONUÇ ve TARTIŞMA.....</b>	<b>54</b>
4.1 Mekanik Tasarım.....	54
4.1.1 Kaba yaklaştırma mekanizması .....	54
4.1.2 İnce yaklaştırma mekanizması.....	58
4.1.3 Piezo tüp ve tarama iğnesi konumlandırma mekanizması .....	60
4.1.4 Titreşim önleyici sistem.....	64
4.1.5 Tarayıcı piezoelektrik tüp .....	64
4.1.6 Tarama iğnesi .....	66
4.1.7 Tarayıcı tüp ile tarama iğnesinin bir araya getirilmesi .....	67
4.1.8 Tarama kafası ile mekanik aksamın bir araya getirilmesi .....	69
4.2 Elektronik Tasarım .....	71
4.2.1 200V bipolar bilgisayar kontrollü güç kaynağı bölümü .....	71
4.2.1.1 Voltaj regülasyonu ve X – Y – Z kazançları .....	71
4.2.1.2 Frekans Bantları.....	75
4.2.1.3 Tırmanma zamanı.....	76
4.2.1.4 Gürültü değerleri .....	76
4.2.1.5 Toprak döngüsü (Ground Loop).....	76
4.2.1.6 X – Y ve Z amplifikatörleri çıkış empedansı ve kapasitif yükleme...77	
4.2.2 I/V çevirici için sabit gerilim kaynağı .....	78
4.2.3 X – Y ve Z güç amplifikatörleri için ayarlanabilir ofset voltajı üretici.....	79
4.2.4 I/V çevirici devre .....	80
4.2.4.1 Devrenin çalışma aralığı .....	83
4.2.4.2 Giriş ofset akımı .....	83
4.2.4.3 Sızıntı akımı .....	84
4.2.4.4 Isıl kayma.....	85
4.2.4.5 Gürültü koruması .....	85
4.2.4.6 Zaman sabiti .....	87
4.2.5 Kontrol Bölümü .....	88

4.3 Veri Toplama ve Bilgisayar Bölümü .....	90
4.3.1 Veri toplama işlemi .....	90
4.3.2 Bilgisayar yazılımı (Labview kontrol programı) .....	90
4.3.2.1 Bias'ın (öngerilim) oluşturulması .....	91
4.3.2.2 Tarama iğnesinin X-düzlemindeki hareketinin kontrol edilmesi.....	92
4.3.2.3 Tarama iğnesinin Y-düzlemindeki hareketinin kontrol edilmesi.....	93
4.3.2.4 Z yönündeki bilgilerin analog kontrol devresinden alınması.....	95
4.4 Alınan Görüntüler .....	97
4.5 Çalışmadaki Sınırlayıcı Etkenler .....	107
4.6 Gelecekteki Çalışmalar .....	109
KAYNAKLAR LİSTESİ .....	110
EKLER .....	117



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 TTM'nin çalışma prensibi.....	2
Şekil 2.1 Elektron tünellemesine ait potansiyel enerji diyagramı .....	12
Şekil 2.2 Örnek ile tarama iğnesi arasındaki tünel akımı oluşumunun canlandırmasıdır .....	13
Şekil 2.3 Tünel akımının oluşumu .....	15
Şekil 2.4 Piezo kristallerden oluşan tripot biçiminde ortasına tarama iğnesi konumlandırılmış ince yaklaştırma mekanizması .....	16
Şekil 2.5 Piezo tarayıcı tüpün ve tarama iğnesinin şematik görünümü.....	17
Şekil 2.6 Tarama iğnesi geometrisinin görüntüleme üzerine etkisi .....	19
Şekil 2.7 TTM cihazına ait blok şema.....	21
Şekil 2.8 TTM kontrol devresinin blok şeması .....	22
Şekil 2.9 Oransal kontrol transfer şeması.....	23
Şekil 2.10 Oransal kontrol yapısının birim basamak giriş tepkisi.....	24
Şekil 2.11 Oransal kontrol blok şeması .....	24
Şekil 2.12 İntegral kontrol transfer şeması .....	25
Şekil 2.13 İntegral kontrol yapısının birim basamak giriş tepkisi.....	25
Şekil 2.14 Oransal + integral kontrol blok şeması .....	25
Şekil 2.15 Türev kontrol transfer şeması .....	26
Şekil 2.16 Türev kontrol yapısının(oransal+türev) birim basamak giriş tepkisi ....	26
Şekil 2.17 Oransal +Türevsel kontrol blok şeması .....	27
Şekil 2.18 PID kontrol birim basamak tepkisi.....	27
Şekil 2.19 Oransal+türevsel+integral kontrol blok şeması.....	28
Şekil 2.20 Sistemin açık çevrim birim basamak tepkisi .....	31
Şekil 2.21 Akım-Gerilim çeviricisi temel devresi .....	32
Şekil 2.22 Sızıntı akımlarından kaynaklanan potansiyel farkını eşitlemek amacıyla I/V çevirici için önerilen yerleştirme planı .....	33
Şekil 2.23 Ofset akımının etkisi .....	35
Şekil 2.24 Güç kaynağı bağlantı kablolarının yarattığı parazitik osilasyonlar .....	37
Şekil 2.25 Yüksek frekanslarda parazitik osilasyonların önlenmesi.....	38
Şekil 3.1 Mekanik bölümün konumlandırılacağı darbe – titreşim emici plaka.....	44
Şekil 3.2 Güç kartı bölümünün baskı devre şeması .....	47

Şekil 3.3 Piezo tüpü X – Y ve Z yönünde hareket ettirmek için kullanılan güç devreleri .....	48
Şekil 3.4 Kullanılan teflon baskı devre plakası .....	49
Şekil 3.5 I/V çeviricisinin yerleştirme planı.....	50
Şekil 3.6 Kontrol bölümü baskılı devre şekli .....	51
Şekil 3.7 NI USB 6009 B.A.K.'ın genel görünümü .....	52
Şekil 4.1 Kaba yaklaştırma mekanizmasında kullanılan parçanın ölçülü şematik çizimi.....	55
Şekil 4.2 Kaba yaklaştırma mekanizması .....	57
Şekil 4.3 İnce yaklaştırma mekanizması ve örnek konumlama tablası.....	59
Şekil 4.4 Piezo tüp taşıyıcı alüminyum parçanın ön yüzünün ölçülü şematik resmi .....	61
Şekil 4.5 Piezo tüp taşıyıcı alüminyum parçanın arka yüzünün ölçülü şematik resmi .....	62
Şekil 4.6 Üretilen alüminyum tablanın ön ve arka yüzeyleri .....	62
Şekil 4.7 Piezo tüp tarama ve konumlandırma mekanizması .....	63
Şekil 4.8 Piezoelektrik tüp ve gerilim telleri.....	65
Şekil 4.9 Pt/Ir TTM iğnesinin TEM resmi .....	66
Şekil 4.10 Tarayıcı (piezo) tüp ile Pt/Ir tarama iğnesinin bir araya getirilip sisteme monte edilmesi.....	68
Şekil 4.11 Mekanik sistemin önden görünümü .....	69
Şekil 4.12 Mekanik sistemin tamamlanmış hali .....	70
Şekil 4.13 Güç kaynağı blok şeması .....	72
Şekil 4.14 X ve Y güç amplifikatörü devre şeması.....	73
Şekil 4.15 Z güç amplifikatörü devre şeması .....	74
Şekil 4.16 Doğrultma ve regülasyon devresi .....	74
Şekil 4.17 $\pm 200V$ bipolar güç kaynağının elektronik bölümlerinin kutu içerisindeki yerleşimi .....	77
Şekil 4.18 $\pm 200V$ bipolar güç kaynağının kutulanmış şekli.....	78
Şekil 4.19 I/V çevirici için sabit gerilim kaynağı .....	79
Şekil 4.20 Ayarlanabilir ofset gerilim üretici.....	80
Şekil 4.21 I/V çevirici devre blok şeması .....	81
Şekil 4.22 Yüzey montaj OPA129 için sızıntı akımı engelleme tekniği .....	84
Şekil 4.23 Koruma halkası simülasyonu.....	85

Şekil 4.24 Koruma halkası baskı devre şekli .....	85
Şekil 4.25 I/V çeviricinin mekanik kısım üzerine monte edilmiş hali (yan görünüm) .....	87
Şekil 4.26 I/V çeviricinin bakır kafes (kutu) içine alınmış ve mekanik kısım üzerine monte edilmiş hali .....	87
Şekil 4.27 Mekanik tasarım ile elektronik devrenin biraraya getirilmesi.....	88
Şekil 4.28 PI kontrol devresi .....	89
Şekil 4.29 Tasarlanan tüm sistemlerin bir araya getirilmesi.....	89
Şekil 4.30 Bias üretimi.....	91
Şekil 4.31 X yönündeki hareketin Labview programı ile kontrolü.....	92
Şekil 4.32 Y yönündeki hareketin Labview programı ile kontrolü.....	94
Şekil 4.33 Tasarlanan ve gerçekleştirilen Labview sisteminin ara yüzü .....	96
Şekil 4.34 PI kontrol çalışma bloğu üzerinden toplanan akım bilgileri .....	97
Şekil 4.35 75x75 10nm NanoGRID görüntüsü.....	98
Şekil 4.36 NanoGRID sertifika görüntüsü .....	99
Şekil 4.37 Burleigh Instruments, Inc.'den alınan piezo tüpün gerilim altındaki karakteristiğini içeren katalog bilgisi .....	99
Şekil 4.38 Elde edilen NanoGRID görüntüleri.....	100
Şekil 4.39 TTM cihazından elde edilen nanoGRID görüntüsü 75x75 10nm .....	101
Şekil 4.40 İlk satır hataları silinmiş nanoGRID görüntüsü 75x75 10nm .....	101
Şekil 4.41 İlk satır hataları kesilmiş nanoGRID görüntüsündeki tepelerin yok edilmesinden sonra oluşan görüntü 75x75 10nm .....	102
Şekil 4.42 NanoGRID'in mesh contour çizimi .....	102
Şekil 4.43 Resize komutu kullanılarak görüntünün piksel değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilen 256x256'lık görüntü.....	103
Şekil 4.44 NanoGRID görüntüsünün korelasyonu alınarak elde edilmiş görüntü 75x75 10nm.....	104
Şekil 4.45 Unsharp maskeleme ile elde edilen görüntü 75x75 10nm .....	104
Şekil 4.46 Averaj filtreleme işleminden sonra elde edilen görüntü 75x75 10nm .....	105
Şekil 4.47 Medyan filtreleme sonucu elde edilen nanoGRID görüntüsü 75x75 10nm.....	106
Şekil 4.48 Tasarlanan TTM sisteminin konumlandırılması .....	108

## ÇİZELGELER LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Ziegler-Nichols kuralları(Frekans cevabı yöntemi).....	29
Çizelge 2.2 Ziegler-Nichols kuralları(Zaman düzlemi yöntemi).....	31
Çizelge 4.1 Güç devreleri için kazanç ve frekans tablosu .....	75
Çizelge 4.2 Seçilen işlemsel yükselteçlerin teorik verileri .....	82
Çizelge 4.3 Seçilen işlemsel yükselteçlerin simulasyon sonucu elde edilen değerleri.....	82
Çizelge 4.4 Giriş akımı çıkış voltajı değerleri.....	83

## SİMGELER VE KISALTMALAR

ai	analog giriş (analog input)
AKM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
ao	analog çıkış (analog output)
A.S.Ç.	Analog – Sayısal Çevirici
Au	Altın
B.A.K.	Bilgi Aktarım Kartı
BJT	Bipolar Junction Transistor - İki Kutuplu Jonksiyon Transistör
DAC	Data Acquisition Card
FET	Field Effect Transistör - Alan Etkili Transistör
Ir	İridyum
I/V	Akım/Voltaj
JFET	Junction Field Effect Transistor - Eklem Alan Etkili Transistör
Mo	Molib
P	Oransal
PD	Oransal – Türev
PI	Oransal – İntegral
PID	Oransal – İntegral – türev
Pt	Platin
Pt/C	Platin/Karbon
Pt/Ir	Platin/İridyum
Pt/Ir/C	Platin/İridyum/Karbon
QCM	Kuartz Kristal Mikrodenge
S.A.Ç.	Sayısal – Analog Çevirici
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
STM	Scanning Tunneling Microscope
TEM	Transmisyonlu Elektron Mikroskobu
TPM	Taramalı Prob Mikroskopi
TTM	Taramalı Tünelleme Mikroskobu

$\text{\AA}$	angström
$e$	elektron yükü
$e(t)$	hata miktarı
$E_{\mu}$	iğne enerji seviyesi
$E_v$	yüzey enerji seviyesi
$f$	iş fonksiyonu
$f(E_{\mu})$	fermi fonksiyonu
Hz	frekans birimi
$h$	planck sabiti
$J$	tünel akımı yoğunluğu
$k$	bariyer içindeki elektrona ait dalga vektörünün azalma sabiti
$K_p$	oransal kazanç
kS/s	kiloÖrnek/saniye
$L$	yük gecikme zamanı
$m$	elektron kütlesi
$M_{\mu\nu}$	tünel matris elementi
nm	nanometre
$s$	bariyer kalınlığı
$T_d$	türev zamanı
$T_i$	integral zamanı
$u(t)$	denetleyici çıkışı
$\mu$	mikron
$\Omega$	direnç birimi (ohm)
$\$$	Amerikan doları

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Kapsam ve Tarihsel Gelişim

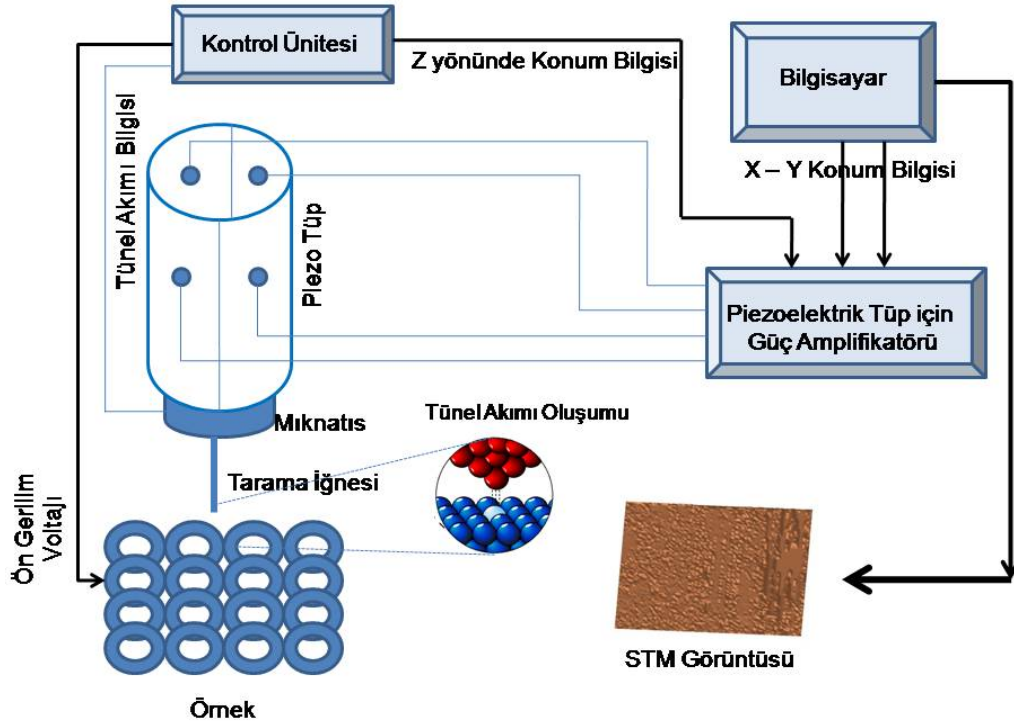
Taramalı Tünelleme Mikroskobu, (TTM, Scanning Tunnelling Microscope, (STM)) yüzey topografisini angström Å ( $10^{-10}$  m) seviyesinden mikron seviyelerine kadar ( $10^{-6}$  m) ölçebilen bir prob mikroskopi tekniğidir. TTM ilk olarak Binning ve Rohrer [1] tarafından 1982 yılında üç boyutlu gerçek konumda ve atom boyutunda görüntüleme olanağı sağlamıştır. Bu başarı onlara Nobel fizik ödülünü getirmiştir. Zaman içerisinde TTM çalışmaları farklı gruplar tarafından çalışılarak günümüzdeki seviyeye gelmiştir.

Öngerilim (bias) uygulanmış, atom seviyelerinde boyuta sahip metal bir iğne tarayıcı bölüm üzerine yerleştirilmiştir. Tarayıcı bölüm üzerine monte edilmiş olan dört bölmeli piezoelektrik tüp, metal tarama iğnesinin X – Y ve Z düzlemlerinde atomik hassasiyetle hareketini sağlar.

Tasarlanan sistemde tarama iğnesi ile örnek arasındaki yaklaşım kaba ve ince yaklaştırma olmak üzere iki ana mekanizmadan oluşmaktadır. Kaba yaklaştırma mekanizması üzerine yerleştirilen örnek, tünel akımı algılanmaya başlanana kadar tarama iğnesine yaklaştırılmaktadır. Tünel akımı, iğne-örnek arası uzaklık ile üstel olarak orantılıdır. Bu nedenle de tünel akımının değeri, iğne-örnek arası uzaklık değişimlerine karşı çok hassastır.

Güç kaynağı piezo tüpün kasılıp gevşemesi, sağ ve sol yönlerde hareketi için gerekli beslemeyi yapar. PI (oransal - integral) kontrol şeklinde analog olarak tasarlanan kontrol bölümü, algılanan tünel akımını üretilen kontrol sinyali seviyesinde tutmaya çalışmaktadır. Örnekten toplanacak akım bilgisinin elde edilebilmesi için gerekli ön gerilim (bias) voltajı ise bilgisayardan gönderilebildiği gibi kontrol devresi üzerindeki ön gerilim çıkışından da sağlanabilmektedir. Kontrol devresi ise tünel akımını ölçerek ve piezo tarayıcısının düşey yöndeki Z konumunu temin ederek iğne-örnek arası uzaklığı sabit tutar.

X ve Y yönündeki tarama sinyalleri bilgisayar aracılığı ile piezo tüpe aktarılmaktadır. Böylelikle kontrol devresi, X ve Y yönünde girilen satır tarama bilgisini referans alarak "Z" boyutundaki değişimleri, bir matris bloğuna kayıt eder. Bu matrisin çizdirilmesiyle elde edilen şekil örnek yüzeyinin, atomik boyutta topografik görüntüsüdür. TTM'nin çalışma prensibi Şekil 1.1'de açıklanmıştır.



Şekil 1.1 TTM'nin çalışma prensibi.

İcadından günümüze yaklaşık 25 yıl geçmiş olmasına rağmen literatürde TTM ile ilgili oldukça çeşitli çalışmalar dikkati çekmektedir. Teknolojinin sürekli gelişimiyle birlikte TTM imalatlarına yenilikler gelmiş, üretilen cihazlar küçülmüş ve çok çeşitli yüzey taramaları gerçekleştirilir olmuştur. Binnig ve Rohrer'in Nobel Ödülü almış olan "Taramalı Tünelleme Mikroskobu-Doğumdan Gelişime" isimli çalışmalarında TTM'nin temel teknikleri anlatılmaktadır [2]; [3]. Yapılan bu başlangıç çalışmadan günümüze, TTM'nin birçok firma tarafından ticari ürün olarak sunulduğu noktaya kadar gelinmiştir.



Güntherodt ve Wiesendanger TTM'in temel tasarımı, genel prensipleri ve temel teorisini açıklayan iki ciltlik kitap ile iki makale yayınlamışlardır [4]; [5]; [6]. Hazırlanan bu kitaplar, TTM üretiminin genel tekniklerini ve çeşitli maddelerin yüzeylerinin hazırlanarak görüntülenmesi ile ilgili yaklaşımları içermektedir.

TTM bir bütün olarak düşünüldüğünde birçok parçadan ve sistemden oluşmaktadır. Neredeyse yüzlerce elektronik ve mekanik parçanın hatta yazılımın tek bir sistem içine entegrasyonudur. Kullanılan bu parçaların kimi zaman temin edilememesi ya da pahalı oluşları tasarımdan sapmalara neden olabilmektedir. Bu gibi durumlar cihazı üretecek veya ticari olarak elde ederek kullanacak laboratuvarların önüne ciddi maddi yatırım problemleri getirmektedir. TTM'nin ilk üretiminden sonraki gelişimi hep kolay bulunabilir ve ucuz parçalarla cihazı imal etmeye yöneliktir. İlk üretiminden sonraki yıllarda pahalı olmayan TTM'lerin tasarımı ve imalatı için birçok çalışma yürütülmüştür [7; 8; 9; 10; 11; 12].

TTM'in tasarım alanı ile ilgili yapılan ilk çalışmalardan biri Park'ın çalışmasıdır [13]. Cihaz tasarımları ucuz olmayan parçaları içermektedir. Fakat günümüzde ticari olarak kullanılan cihazlara benzer olmakla birlikte, devre tasarımında araştırmacılara mükemmel bir kaynak sağlamaktadır.

Park'ın çalışmasını izleyen Kleindiek (et al.) çalışmasında tipik TTM'in boyutlarının küçülmesini sağlayan minyatür bir tarayıcı geliştirmiştir [14]. Çalışmalarının sonucunda diğer TTM tasarımları ile birlikte kullanılabilir ve kolaylıkla sisteme entegre olabilen tarayıcı bölümü ortaya çıkmıştır. Kleindiek'in (et al.) çalışması, uygun donanımlarla masa üstünde kullanılabilir büyüklükte bir sistemi oluşturmak fikriyle diğer çalışmalar yanında öne çıkmaktadır. Fakat tasarımda kullanılan parçaların son derece maliyetli oluşu çalışmayı ekonomik açıdan takibi zor bir duruma sokmuştur.

Jayadevaiah (et al.) atomik çözünürlüğe sahip oldukça kompakt bir TTM geliştirmiştir[15]. Grubun geliştirdiği TTM, Kleindiek'in çalışmasının sonucu olan

masa üstü donanım kategorisine de girmektedir. Bu tasarımda piyasadan kolaylıkla bulunabilen temel devre elemanları kullanılmıştır.

Jayadevaiah'ın çalışmasında Pohl'un [16]'da açıkladığı gibi bir atalet kaydırıcı konsepti kullanılarak kaba ayarlar kullanılmaktadır. Jayadevaiah'ın tasarımı her ne kadar üretim maliyetini düşürüyor ve cihazın kararlılığını artırıyor olsa da bütün cihazın karmaşık tasarımı günlük kullanılacak bir TTM'den oldukça uzaktır.

Alexander çalışmasında 100\$'ın altında bir maliyetle TTM tasarlamaya odaklanmıştır. Ölçüm ve bilgi aktarım faaliyetlerinin yürütecek olan osiloskop, bilgisayar ve bilgi aktarma kartlarının maliyeti hariç tutulduğunda bu rakama ulaşmaktadır [17]. Alexander'ın TTM'si yaygın elektronik bileşenleri ve aslında Koops'un önerdiği bir konsept olan piezoelektrik tarayıcıyı tipini içermektedir [18].

Piezo tüp kuadranlı bir yapıya sahiptir ve tarama yapabilmesi için bu bölümlere gerilim uygulanmaktadır. Piezo tüpün ucuna yerleştirilen metal iğne ise kasılma ve gevşeme hareketlerini algılayarak örnek üzerinde alçalır ya da yükselir. Bu sistem son derece hassas olduğu için tekrarlanabilirliği konusunda sıkıntılar yaşamışlardır ve çoğaltılmasının çok zor olduğu gözlemlenmiştir. Ancak sistem oldukça düşük maliyetlidir.

Müller'in TTM projesi kendi TTM tasarımı ile ilgilenen tasarımcılar için mükemmel bir kaynaktır [19]. Ev yapımı TTM'lerin tasarımına yardımcı olacak geniş bir bilgi kaynağı sağlanmaktadır. Bu tasarım sonucunda maliyeti düşük ve piyasadan rahatlıkla bulunabilen parçalarla TTM'nin daha kullanıcı dostu bir seviyeye gelmesi sağlanmıştır. Müller'in tasarımı nanosurf tarafından üretilen, 13.000\$ maliyetindeki ticari EasyScan TTM ile paralel birçok özelliğe sahiptir. Ayrıca görüntü oluşturabilmek için yazılım programlarından yararlanılmıştır.

İcadından günümüze kadar olan süreçte neredeyse bütün TTM'lerin tasarımında ortak olarak kullanılan tarayıcı tüpü ve bölümü, tarama iğnesi, kontrol

stratejisi ve diğerk kritik elemanların performanslarına dair birçok tartışma literatürde göz önüne çıkmaktadır.

Bu değerli çalışmalardan bazıları Rogers'ın (et al.) [20] ve Gupta'nın (et al.) [21] çalışmalarıdır. TTM tasarımlarında temel değişikliklere dikkati çekmişlerdir. Rogers TTM iğne uçlarını düşük maliyetle üretilebilmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Metodu, ticari olarak bulunabilen Pt/Ir (Platin/İridyum) kablolarının uçlarının kesilmesinden ve kimyasal olarak dağlanmasından oluşmaktadır. Ayrıca ticari olarak bulunabilen tungsten tellerin maliyetinin ucuz olması (yaklaşık 25\$) bu uçların TTM'de kullanımını gündeme getirmiştir. Rogers ve ekibide tungsten uçları kullanarak farklı performans deneyleri gerçekleştirmiştir. Gupta ve arkadaşları ise TTM'de kullanılacak tarama iğnelerinin örnek üzerine kaba yaklaşımları çalışmalarına odaklanmıştır. Bu çalışmalar Pohl [16]'un çalışmalarıyla aynı hedeftedir. Kaba ve ince yaklaşım mekanizmalarının birbirlerini destekler şekilde tasarlanması ve yeterli örtüşmeye sahip olması oldukça önemlidir. Gupta örnek ile iğne çakışmasını ve dolayısıyla tünel akımı algılamayı piezoelektrik özelliğe sahip tüplerle gerçekleştirmeye çalışırken Pohl ise tüp içerisine yerleştirilecek atalet kaydırıcıya odaklanmıştır. Bu çalışmalar TTM'nin radikal olarak değişiminden çok mevcut sistemi modifiye etmeye yönelik tasarımlardır.

Tünel akımının kontrolü ya da tarama iğnesi - örnek arası uzaklığı ve tarama işleminin harekete geçirilmesi bir TTM tasarımının en kritik bölümüdür. Bu işlem elde edilecek son ürün olan görüntünün kalitesini etkilemektedir. Literatürde incelenen ve kaynaklar bölümünde [22; 23; 24; 25] refere edilen araştırmalar kontrol sisteminin TTM tasarımı üzerindeki bakış açılarını tartışmaktadır.

Kuk (et al.) [22] TTM'de kullanılacak bir elektronik kontrol sistemi için bir taslak önermiş ve geliştirdiği TTM enstrümantasyonu ile ilişkili fiziksel ve elektronik tasarımların tartışmalarını yayımlamıştır.

Maps (et al.) [23] çalışmasında piezoelektrik tüp ile birlikte tarama bölgesini incelemek amacıyla kullanılan bir kafes jeneratörünün geliştirilmesine odaklanmıştır.

Strom (et al.) [24]'de piezoelektrik tüpün sürülüşü için pahalı olmayan, yüksek voltajlı, düşük akımlı yükselteçlerin tasarlanması üzerine odaklanmıştır.

Son olarak, Chen (et al.) [25]'nin çalışmaları piezoelektrik tüpler için ön yükselteçlerin seçimi üzerindedir. Bu çalışmalar basit değişimleri içermektedir ve tasarımlarda maliyeti düşürmeyi ve hızlı ve net görüntü almayı amaçlamaktadır.

## 1.2 Amaç

Yapılan kaynak taramasının tarihsel sıralaması göz önüne alındığında TTM'nin birçok farklı grup tarafından sadece kendi ihtiyaçlarına cevap verebilecek şekilde imal edildiği görülmektedir. Üretilen bu TTM'ler sadece grupların özel çalışmaları için kullanıldıklarından dolayı genel kullanım özelliği taşıyacak şekilde tasarlanmamışlardır. Ayrıca bu cihazları kullanmak için mutlaka bir operatörün yardımı gerekmektedir. TTM'lerin gelişim süreci dikkate alındığında akademik araştırma gruplarının imalatlarının yanında ticari örnekleri de görülmektedir. Günümüzde bile piyasaya sürülen TTM'ler de, görüntü elde etmede kullanılan birçok parametrenin kullanıcı kontrolüne göre değişimi bulunmamaktadır.

Tez kapsamında bir TTM cihazının grubumuz tarafından üretilme hedefi, kullanıcı dostu ve açık mimari (open architecture) gibi yenilikleri taşıyan bir ürün oluşturma isteğidir. Bu cihazın farklı disiplinlerin çalışmalarında kullanılması da hedeflendiğinden kullanıcı kontrolüne bırakılacak bölümler bu amaca göre tasarlanmıştır. Sonuç olarak cihazın mümkün olduğu kadar bir operatör yardımı olmadan kullanımı amaçlanmaktadır.

Yukarıda belirtilen hedeflerden yola çıkarak bu tezin ana amacı; bir Taramalı Tünel Mikroskobu (TTM) imal edilerek çeşitli biyolojik moleküllerin yüzey özelliklerinin incelenmesi çalışmalarında hizmete sunmaktır.

Elektronik, mekanik, veri toplama ve bilgisayar yazılımı kısımlarından oluşan bu sistemi oluşturmak ve sorunsuz çalışır hale getirmek istenmektedir.

Bu amaçla ilk olarak 200V bipolar güç kaynağının tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak bir akım(I) / gerilim(V) çevirici tasarlanmış ve pA seviyelerinde ölçüm yapabilecek hassasiyete getirilmiştir.

Mekanik bölümde ise, tarama iğnesinin, piezo tarayıcının ortasına yerleştirilebilmesi için konumlama mekanizmasının tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiş, düşey yönde hareketi için örnek konumlama tablası ile piezo tüpün konumlandığı tablaların imalatı yapılmıştır. Sistemin X ve Y yönlerinde hareket etmeden düşey yönde konumlama yaparak tünel akımının yakalanması için mekanik sisteme kaba ve ince yaklaştırma mekanizması olarak tanımlanan yaklaştırma mekanizmaları tasarlanıp monte edilmiştir.

Piezo tüpün tünel akımı seviyesinde kontrolü için bir PI (oransal integral) mantığı ile çalışan analog kontrol devresi tasarlanıp imal edilmiştir. X ve Y konumlama sinyalleri için bilgisayar yazılımından yararlanılmış olup sinyal aktarımı için B.A.K. (Bilgi Aktarma Kartları – DAC(Data acquisition Card)) kullanılmıştır. Tasarım ve imalatı yapılan birimlerin daha kolay kontrolü ve elde edilen görüntülerin daha iyi işlenebilmesi için de çoklu işletim ortamında çalışabilecek bir program yazılmıştır.

TTM sisteminin istenilen büyüklükte alanları görüntüleyebilmesi için işletme parametrelerinin (iğne çeşidi, iğne öngerilimi ve çalışma akımı) optimizasyonu yapılmıştır. Daha sonra ve NanoGRID numunesi üzerinde çalışılmıştır. Mozaik yapısı, atomik düzeyde homojen olması ve sahip olduğu karakteristik dizilişinden dolayı NanoGRID seçilmiştir. Ayrıca bu numunenin sertifikalı görüntüsü mevcut olduğu için üretilen TTM cihazının ne denli başarılı sonuç verdiği hakkında yorum yapılabilir. Bu işlem esnasında görüntünün net bir şekilde elde edilebilmesi için gerekli ayarlamalar yapılmış daha sonra NanoGRID üzerinde görüntü alınması işlemi imal edilen TTM ile gerçekleştirilmiştir.

### 1.3. Yöntem

Şu ana kadar, tez konusu ile ilgili ön bilgiler, tarihsel gelişim süreci ve bu tezde yapılması hedeflenen temel amaçlar hakkında bilgi verilmiştir. Tezin kalan kısmında, bu amaçlara ulaşmada etkili rol oynayan çalışmalara değinilmiştir.

İkinci bölüm'de yüzey taramasının gerçekleştirilmesi için elde edilecek tünel akımı hakkında bilgi verilmesi, elektronik, mekanik, veri toplama bilgisayar yazılımı ile görüntü toplama ve oluşturma ile ilgili araştırılan temel kurallar, literatür bilgileri ve kriterler "GENEL BİLGİLER" başlığı altında sunulmaktadır.

Üçüncü bölüm'de ise sistemde kullanılan eleman ve parçaların karakteristikleri sunulup bunlar hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca mekanik ve elektronik kısımlar için yapılan tasarımlardan bahsedilerek çeşitli ölçülü şematik gösterim ve yerleşim planlarının analizi bu bölümde yapılmıştır. Temin edilen piezoelektrik tüp ve tarama iğnesi ile ilgili teknik bilgiler ile yukarıda bahsedilen çalışmalar "MATERYAL METOD" ana başlığı altında anlatılmaktadır.

Dördüncü bölüm'de ise "SONUÇ ve TARTIŞMA" adı altında tasarlanan devreler ile mekanik parçaların imal edilmesinden, işlevsel testlerinden, elde edilen test sonuçlarından, yapılan iyileştirmelerden ve tüm parçaların bir araya getirilerek TTM cihazının oluşturulmasından bahsedilmiştir. Ayrıca tasarım sonucunda ortaya çıkan uygunsuzluklardan, eksikliklerden, elde edilen sonuçların tartışmalarından ve gelecek için hedeflenen çalışmalardan da bahsedilmiştir. Yapılan tasarım ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak şekillerle desteklenmiştir.

Beşinci bölümde ise literatürden elde edilen bilgiler refere edilmiştir. Bu bilgiler çeşitli uluslar arası ve ulusal dergilerde yayımlanmış makaleler, tezler, kitaplar ve kişisel çalışmalardan oluşmaktadır ve "KAYNAKLAR" başlığı altında sunulmaktadır.

## 2. GENEL BİLGİLER

Atom görüntüleme yöntemlerinin temel görevi çıplak gözle algılanamayacak büyüklüklerdeki yapıların görünür duruma getirilmesidir. Bilinen görüntüleme yöntemleri iki ana çalışma prensibi altında toplanabilir. Bunlardan birincisi kullanıcıya doğrudan hitap eden ışık mikroskobudur. Işık mikroskobunun çalışması oldukça basittir. Çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük cisimlerin birkaç mercek yardımıyla büyütülerek görüntüsünün incelenmesi tekniğine dayanmaktadır. Diğer görüntüleme sistemlerinin hemen hepsi mercek yerine birer algılayıcı uç veya sinyal kullanarak sürekli bir görüntü oluşturacak veriyi toplama yolu ile çalışmaktadır. Bu tip mikroskoplara örnek Taramalı Tünel Mikroskobu (TTM), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Transmisyonlu Elektron Mikroskobu (TEM) örnek verilebilir [26].

TTM yüzey topografisini angström (Å) mertebesinde 100 mikrona ( $\mu$ ) kadar görüntüleyebilen prop mikroskopi ailesine ait olup bir yeni kuşak mikroskoptur [27]. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) ise TTM'den daha sonra fakat benzer bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Bu ailenin diğer üyeleri gibi her iki teknikte de ucu atom sivriliğinde olan bir iğne kullanılmaktadır. Aralarındaki yegâne fark ise; örnek üzerinde dolaştırılan bu iğneden gelen verilerin algılanması noktasındadır. TTM örneğin elektriksel bir iletkenliğe sahip olması gerekirken AKM'de iletkenlik aranmaz.

Nanoteknolojinin en önemli elemanları arasında yer alan TTM ve AKM, bir ön hazırlama aşaması olmadığı ve yüksek enerjili ışınlar kullanılmadığı için biyolojik moleküllerin üç boyutlu yapısını bozmadan, buldukları ortamda görüntülenmesini sağlamaktadır. Bu özelliği alternatifleri olan SEM ve TEM gibi mikroskopik tekniklere önemli bir üstünlük elde etmesini sağlamıştır [28].

Temel olarak TTM cihazı, mekanik, elektronik, veri toplama ve görüntü oluşturma bölümlerinden oluşur. Tarama işlemi genel olarak yüzey ile TTM iğnesi

arasında oluşan tünel akımının yüzey özelliklerine göre değişimi ve bu değişimin algılanması şeklinde çalışmaktadır.

Bu bölümde, gerçekleştirilen TTM cihazı tasarımı ile ilgili yapılan literatür çalışması ve uygulanan kriterlerden bahsedilecektir. Birinci bölümde TTM'nin prensiplerinden söz edilerek dayandığı temel fiziksel kurallar anlatılacaktır. İkinci bölümde ise TTM'nin temel bölümlerinin tasarım ve imalatı için yapılan araştırmalardan bahsedilecektir. Üçüncü bölümde ise TTM'nin biyolojik uygulamalardaki kullanımı hakkında bilgi verilecektir.

## 2.1 TTM Elektron Tünellemesi

Kuantum mekaniksel tünelleme üzerinde yarım yüzyıldır çalışılan bir konudur [29]. Tek boyutlu model temel alınarak elektron tünellemesinin çeşitli noktaları üzerinde çalışmalar yapılmıştır [30]. Bu modeller temel elektronik elemanlarda tünel jonksiyonlarının imalatında da uygulanmaya başlamıştır.

Kuantum tünelleme teorisine göre, bir elektronun potansiyel enerjisi kendi toplam enerjisini aştığı zaman klasik fiziğe göre imkânsız olan bölgeleri delip (tünelleme) geçebilir [4]. Bu kavrama dayanan görüntüleme amaçlı ilk TTM sistemi 1980li yılların başında IBM Zürih laboratuvarlarında geliştirilmiştir ve bu başarı, geliştiren araştırmacılara Nobel Ödülünü getirmiştir[2]. Başka bir deyişle, dörtgen potansiyel bariyeri (Şekil 2.1a) şeklinde bir sistemde, birbirine yeterince yakın ( $\approx 10\text{\AA}$ ) iki elektrot arasında belli bir potansiyel farkı varsa elektronların bu iki elektrot arasındaki bariyerden tünelleme yapma olasılığı var demektir. Eğer iki iletken elektrot aynı dalga düzlemi üzerindeyse, bir elektronun bu düzlemde eksponansiyel parametrelere bağlı tünelleme (Denklem 2.1) olasılığı vardır.

$$J \propto \exp(-2ks) \quad (2.1)$$



Burada

$J$ ; tünel akımı yoğunluğunu,

$s$ ; bariyer kalınlığını (Å) (elektrot ile iğne arası mesafe),

$k$ ; bariyer içindeki elektrona ait dalga vektörünün azalma sabitini ( $1/\text{Å}$ ) belirtmektedir.

Vakum ortamında tünelleme yerel iş fonksiyonu ile orantılıdır ve Denklem 2.2'de ki gibi ifade edilir.

$$k = \frac{\sqrt{2mf}}{h} = 0.501\sqrt{f(eV)} \quad (2.2)$$

Burada

$h$ ; Planck sabitini,  $h=6.626 \times 10^{-34}$  J.s,

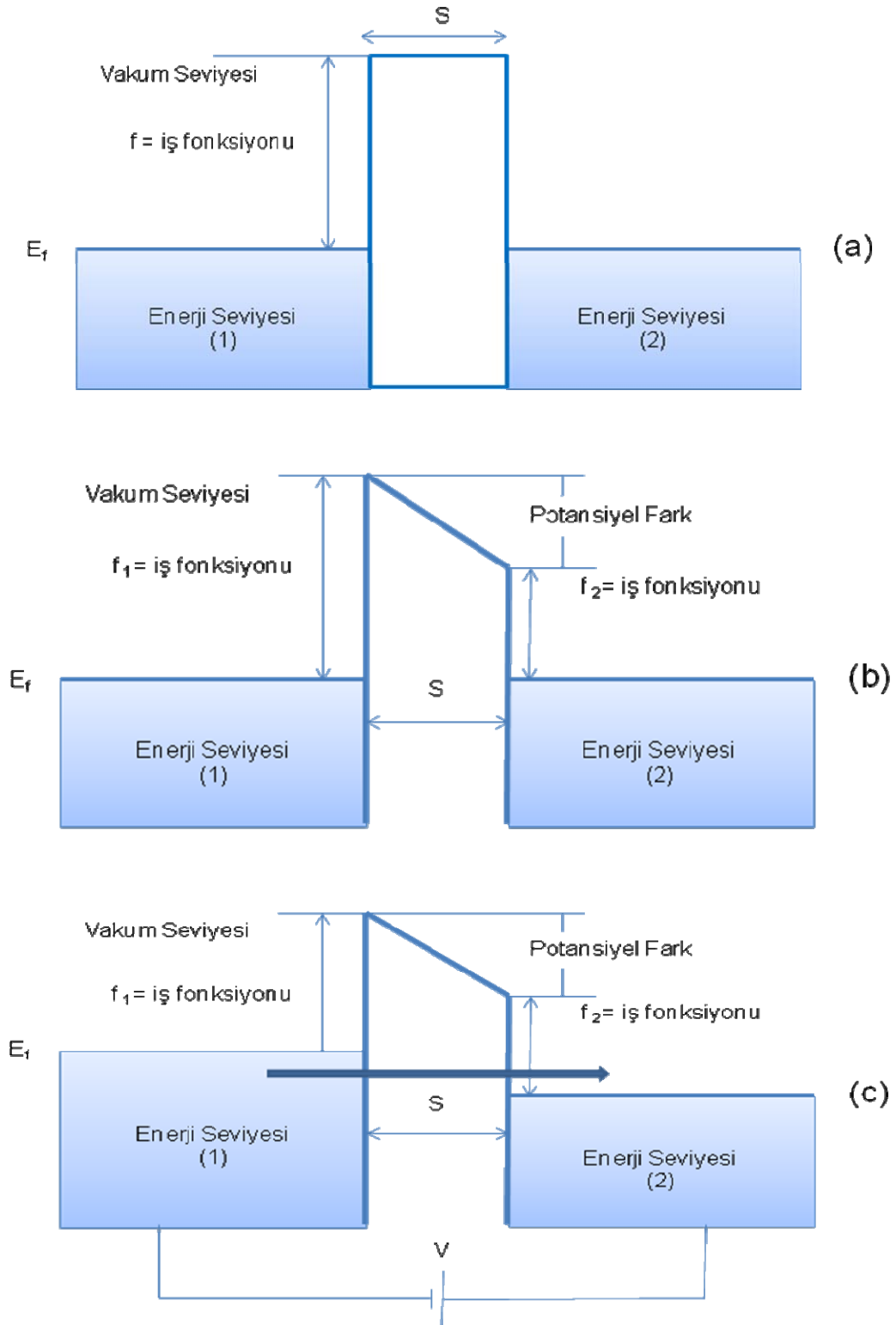
$m$ ; elektron kütleini (g),

$f$ ; iş fonksiyonunu belirtmektedir (eV).

Denklem 2.1 ve 2.2'den anlaşılacağı gibi tipik olarak 4 eV'luk iş fonksiyonu için her 1 Å aralıkta geçen akım şiddeti 10'nun katları olarak azalır.

Elektrotlar benzer özelliklere sahip değillerse bariyerde bir iç elektrik alanın varlığı söz konusudur. Bu elektrik alan, farklı iş fonksiyonlarına sahip elektrotlar arasında kontak potansiyel farkı meydana getirir. Bu durumda  $f$ , iki iş-fonksiyonunun ortalaması olarak alınır. Elektrotlara bir öngerilim uygulanmadığı takdirde iki yönde de tünelleme olasılığı aynı olduğundan net bir akım yoktur (Şekil 2.1b).

Sisteme küçük bir öngerilim uygulandığında (Şekil 2.1c) bariyer özellikleri fazla değişmemektedir. Fakat hala Denklem 2.1'de verilen tünelleme olasılığı mevcuttur ve tek yöne doğru elektron tünellemesi başlar. Bu da net bir akımın ortaya çıkmasına neden olur. TTM'in temel prensibi de bu tünel efektinin algılanmasına dayanmaktadır.



**Şekil 2.1** Elektron tünellemesine ait potansiyel enerji diyagramı: **(a)** Potansiyel enerji bariyeri. **(b)** Farklı metallerden oluşan elektrotlar. **(c)** Farklı metallerden oluşan sisteme öngerilim uygulanması halii.

Atomik boyutta sivri bir iğne, örnekten yaklaşık 10nm uzaklığa yerleştirilip örneğe V gerilimi uygulandığında, iğneden örneğe doğru T akımı akar (Şekil 2.2). Oda sıcaklığında geçen elektron sayısı uygulanan gerilim ile orantılı olduğundan tünellemenin olduğu jonksiyonun omik olduğu söylenir. Bu orantı da Denklem 2.3 ile ifade edilir.

$$J \propto V \exp(-A f^{1/2} s) \quad (2.3)$$

Burada

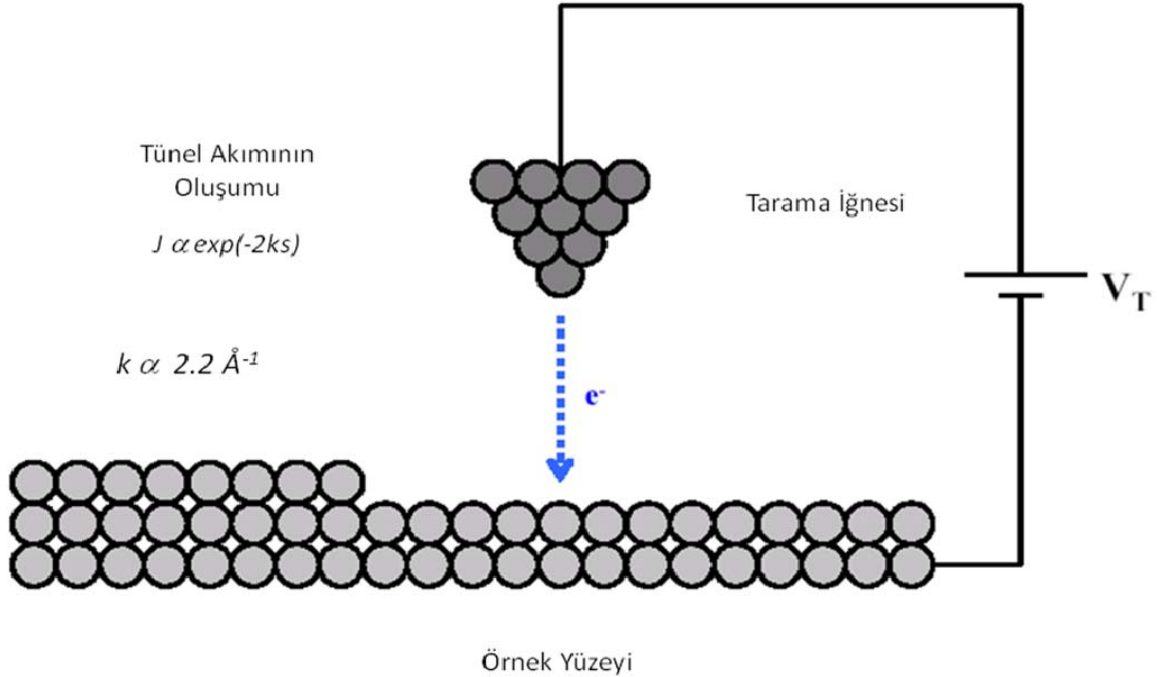
$J$ ; tünel akım yoğunluğu ( $\text{nA}/\text{\AA}^2$ ),

$V$ ; iğne ve örnek arasına uygulanan gerilimi (volt),

$A$ ; değeri  $1.025(\text{eV})^{-1/2}\text{\AA}^{-1}$  olan bir sabiti,

$f$ ; iş fonksiyonu (eV),

$s$ ; iğne-örnek uzaklığıdır (bariyer kalınlığı) ( $\text{\AA}$ ).



**Şekil 2.2** Örnek ile tarama iğnesi arasındaki tünel akımı oluşumunun canlandırmasıdır. <http://www.physics.berkeley.edu/research/crommie/figures> adresinden alınıp değiştirilmiştir.

Üst üste gelen sabit dalga fonksiyonlarının X, Y, Z yönlerinde kontur çizgileri halinde bir araya getirilmesi ile örneğe ait yüzey topografyası elde edilir.

Tek boyutlu bir bariyerde çok küçük bir potansiyel fark ( $V \ll \phi$ ) uygulandığında tünelleme yapan elektronlar için tünel akım yoğunluğu Denklem 2.4'de şu şekilde ifade edilir:

$$J = (e^2/h) \cdot (k/4\pi^2s) \cdot V \cdot \exp(-2ks) \quad (2.4)$$

Burada

$e$ ; elektron yüküdür (coulomb).

Yukarıda anlatılanlar temel prensipleri açıklamakla birlikte TTM'de kullanılan elektrotlardan bazıları son derece sivri, ucu atom seviyesinde, yapıya sahip iğnelerdir, bu nedenle düzlemsel tünel jonksiyonu modeli TTM ile toplanan verileri açıklamaya yeterli değildir.

Bu nedenle örnek ile iğne arasındaki elektronik etkileşimi başlı başına bir TTM verisi olarak gözönüne almak gerekir. Bu amaçla Bardeen [31] tarafından alternatif bir metot önerilmiştir. Bu metot daha sonra Tersoff (et al.) tarafından geliştirilerek aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir [32]; [33]. Bu ifadeye göre iki elektro arasına bir  $V$  öngerilimi uygulandığında geçen toplam tünel akımı Denklem 2.5'de aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$J = \frac{2 \cdot \pi \cdot e}{h} * \sum_{\mu, \nu} f(E_{\mu}) [1 - f(E_{\nu} + eV)] * |M_{\mu\nu}|^2 * \delta(E_{\mu} - E_{\nu}) \quad (2.5)$$

Burada

$f(E_{\mu})$ ; fermi fonksiyonunu (eV),

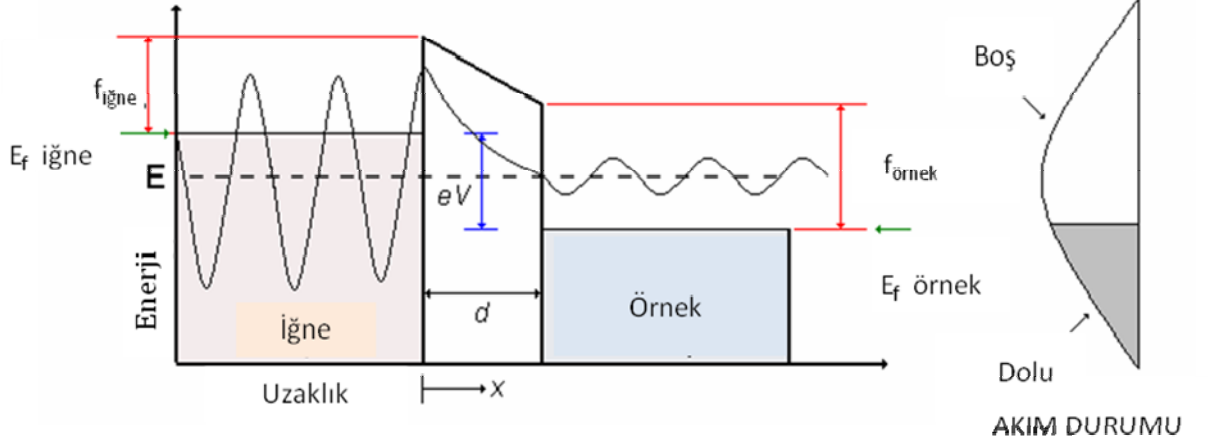
$V$ ; uygulanan gerilimi (volt),

$e$ ; elektron yükü (coulomb),

$M_{\mu\nu}$ ; iğne ile örnek arasındaki enerji seviyelerine ait tünel matris elementini,

$E_{\mu}$  ve  $E_{\nu}$ ; tünellemenin olmadığı durumda iğne ve yüzeyin sahip olduğu enerji seviyeleridir (eV).

Şekil 2.3'de tünel akımının oluşumu şematize edilmiştir. Örneğe bir ön gerilim uygulandığında iğne ile örnek belli bir mesafeye ( $d$ ) kadar yaklaştırıldığında aralarındaki uzaklığın exponansiyeli oranında bir tünel akımı algılanmaktadır.



**Şekil 2.3** Tünel akımının oluşumu. [34]'den alınarak Türkçeleştirilmiştir.

## 2.2 TTM'nin Temel Bölümleri

TTM cihazını mekanik, elektronik, kontrol ve yazılım (veri toplama ve görüntü oluşturma) olarak dört ana grup altında incelemek mümkündür. Bu bölümlerle ilgili literatür bilgisi sırayla aşağıda açıklanmıştır.

### 2.2.1 Mekanik bölümler

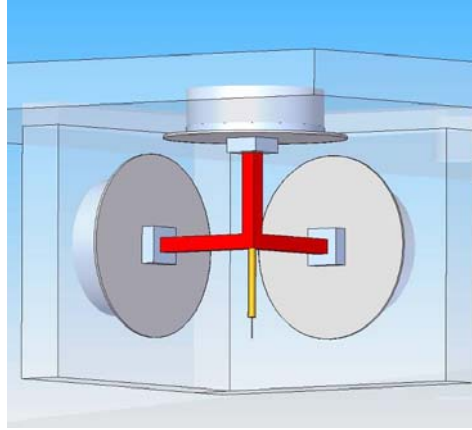
TTM'nin mekanik bölümlerini ince yaklaşırma mekanizması, kaba yaklaşırma mekanizması, tarama bloğu (tarama kafası) ve vibrasyon izolatörü olarak bölümlendirmek mümkündür.

#### 2.2.1.1 İnce yaklaşırma mekanizması

Bu mekanizma TTM iğnesini mümkün olduğunca geniş bir alanda, üç ekseninde (X,Y,Z) ve angström (Å) altı çözünürlükte hareket ettirme yeteneğine sahiptir.

Ayrıca yüksek band-genişliği, hızlılık ve kararlık, düşük Q faktörü ve mekanik titreşimleri sisteme yansıtma özelliklerine sahip olmalıdır.

İlk TTM cihazlarında bu özellikler üç ayaklı (tripot) piezoelektrik özelliğe sahip kristallerden üretilmiş mekanizmalar ile sağlanmaktaydı (Şekil 2.4).



**Şekil 2.4** Piezo kristallerden oluşan tripot biçiminde ortasına tarama iğnesi konumlandırılmış ince yaklaştırma mekanizması. [5]'den alınmıştır.

Fakat günümüzde ise daha çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Bu yollar mekanik çözümleri beraberinde getirmektedir. İnce yaklaşım mekanizmaları tarama iğnesi ile örneği birbirlerine göre belli bir mesafede konumlamak için kullanılmaktadır. Günümüzde kadar yapılan birçok çalışmada ince yaklaşım için farklı metotlar denenmiştir. Fakat kullanım kolaylığı ve daha çok örnek üzerinde çalışma açısından Pohl (et al.)[16] ve Strom (et al.)[24]'un yaptığı çalışmalar günümüzdeki tasarımlara ışık tutmuştur. Belli bir noktaya kadar yaklaştırılan iğneyi örnek üzerinde doğrusal olarak ve eşit sürelerde konumlayabilmek için piezoelektrik tüplerden yararlanmışlardır.

### **2.2.1.2 Tarama kafası**

Günümüzde tüp şeklinde dört bölgeye ayrılmış ve her üç ekseninde hareket kabiliyeti olan piezoelektrik kristaller tarama iğnesini örnek yüzeyinde konumlamak için kullanılmaktadır.



### **2.2.1.3 Kaba yaklaştırma mekanizması**

Piezo tarayıcının hareket sahası son derece kısıtlıdır (1-2 $\mu$ m). Bu nedenle örnek ile tarama iğnesi tünel akımının başladığı noktaya kadar mekanik bir sistem ile yaklaştırılır. Bu uzaklık yaklaşık 1-10 $\text{Å}$  civarındadır. Tünel akımının başlaması ise bir osiloskop yardımıyla gözlenir. Ulaşılması gereken uzaklık hassaslığı, mekanik titreşime karşı izolasyon ve sistem kararlılığı göz önüne alındığında bu bölümün önemi ortaya çıkmaktadır.

İlk TTM tasarımlarında vidalı ayar mekanizmaları Demuth (et al.) [35], daha sonra manyetik çalışan yatay yürüyüşlü motorlar Park ve Quate, [36]; [37]; [38]; [39]; [40], mikrometrelili döner manipulatörler, adım motorlu mekanizmalar kullanılmıştır. Daha sonra Burleigh [41] firması tarafından geliştirilen solucan yürüyüşlü doğrusal motorlar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

### **2.2.1.4 Vibrasyon izolatörü**

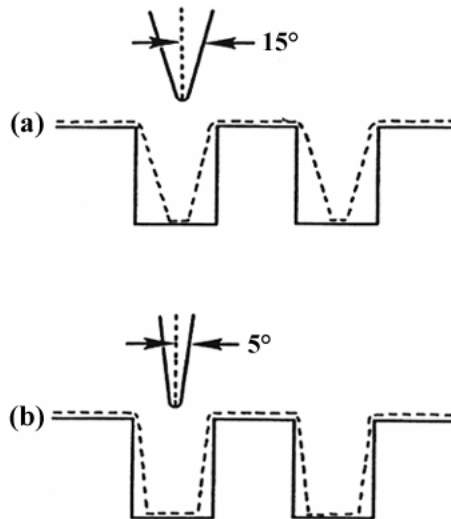
Tünel akımı oluşumu sırasında örnek ile iğne arasındaki uzaklık yaklaşık olarak 1 nm civarındadır ayrıca tünel akımı üstel olarak bu uzaklığa bağımlıdır (Şekil 2.2 ve Denklem 2.1). TTM'nin diğer mikroskopik görüntüleme cihazlarına göre üstün bir cihaz olmasını sağlayan, tünel akımının uzaklıkla bu kadar hassas değişmesidir. Bu durum göz önüne alındığında çevreden gelen titreşimlerin genliği 0.1 $\text{Å}$  den daha küçük olmalıdır. Temel gürültü kaynakları çevreden gelen akustik titreşimler, elektrik şebekesinden kaynaklanan gürültüler, elektromanyetik gürültüler, bina içindeki trafo, elektrik motoru vb. cihazlardan kaynaklanan titreşimlerdir. Akustik gürültüler genellikle yüksek frekanslıdır (>100Hz), ve akustik izolasyon teknikleri ile oldukça iyi bir şekilde bastırılabilir. Fakat bina içindeki diğer gürültülerin frekansları düşük (5-100 Hz), genlikleri yüksektir. TTM'nin keşfinden bu güne kadar tarama iğnesinin bulunduğu kafa mekanizmasını yaylarla asmak, hava yastıkları üzerine koymak, hava masası kullanmak, zemin ile teması minimuma, indiren ince ayaklı son derece ağır masalar kullanmak gibi yöntemler geliştirilmiştir.



### 2.2.1.5 Tarama iğnesi

Tarama iğnesi seçimi görüntü çözünürlüğünü doğrudan etkileyen önemli bölümlerden biridir. Tarama iğnesi olarak genellikle tungsten, altın, platin, platin/iridyum gibi inert metaller kullanılmaktadır. Daha önceki çalışmalarda grafit kullanıldığı da belgelenmiştir[36]; [42]. Atomik seviyede görüntüler yakalayabilmek için, görüntülenecek örnek yüzeyinin homojen olması ve iğne ucunun tek atom seviyesinde olması gereklidir. Bu tür yüzeylerde iğne ucu son derece önemlidir ancak iğnenin makroskopik yapısı fazla önemli değildir. İğne ucu birden fazla atom içeriyorsa çift veya daha fazla iğne etkisi gözlenir (double tip artifact). Park (et al.) [36]; [37]; [39], Albrecht (et al.) [40] ve Mizes (et al.) [39]; [43] tarafından bu yaklaşımlar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Daha pürüzlü yüzeylerde ise iğnenin makroskopik yapısı da önem kazanmaktadır. Konik yapıya sahip tarama iğneleri, yapısının büyük açılı olmasından dolayı derin çukurlukların dip noktalarına ulaşamamaktadır. Bundan dolayı görüntüde yumuşamaya neden olmaktadır. Gimzewski (et al.) [44], Reiss (et al.) [45], ve Musselman [46] bu konudaki görüşlerini literatürde yayımlamışlardır. Tarama iğnesi geometrisinin etkisi Şekil 2.6'de basit olarak gösterilmiştir. Ayrıca iğnenin hazırlanması sırasında uç tarafta oluşacak mini iğneler özellikle pürüzlü yüzeylerde bozucu etki yaratacaktır [47].



**Şekil 2.6** Tarama iğnesi geometrisinin görüntüleme üzerine etkisi. (a) Ucu 50 nm, koni yarım açısı  $15^\circ$  olan iğnenin etkisi. (b) Ucu 50 nm, koni yarım açısı  $5^\circ$  olan iğnenin etkisi. [4]'den alınmıştır.

İğnenin kimyasal kompozisyonu da oldukça önemlidir. İğne üzerindeki oksit tabakası özellikle vakum ortamında çalışmayı engellemektedir. Bu koşullarda sıyrılan oksit iğne ile örnek arasında mekanik kontak oluşturmakta, elektron akımı bu kontak üzerinden gerçekleşmektedir.

İğne hazırlama işlemleri aşağıdaki gibidir.

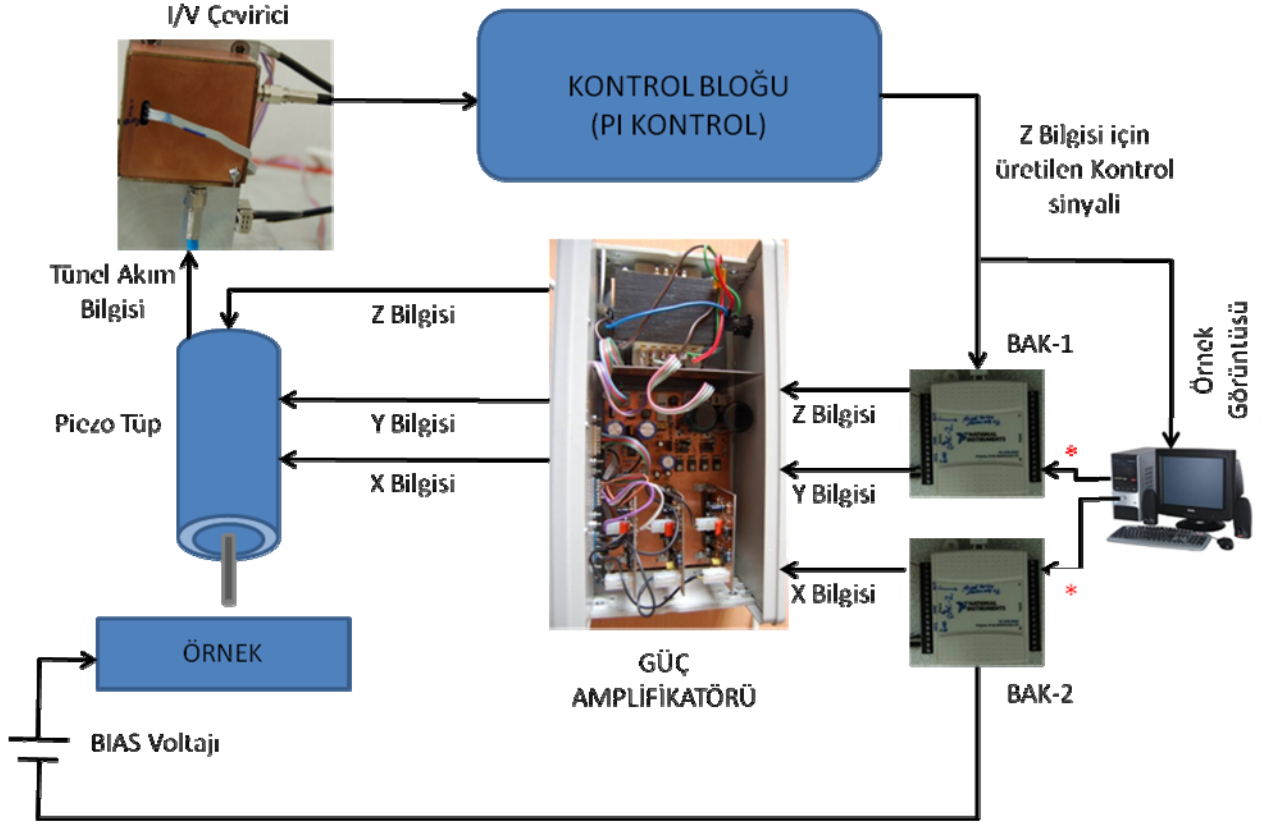
- Elektrolitik parlatma ve aşındırma,
- Kimyasal parlatma ve aşındırma,
- İyon öğütme,
- Yağ ve zımpara taşı ile parlatma,
- Yan keski ile kesme,
- Döverek şekillendirme,
- Elektron ışınması ile biriktirme gibi metotlar kullanılmaktadır.

Ancak bu yöntemlerin hiçbirisi genel kullanıma uygun değildir. Bu nedenle kullanılacak metale göre yukarıdaki yöntemlerden uygun olanı seçilerek kullanılır. Biyolojik uygulamalar için çoğunlukla kullanılan tarama iğneleri genellikle tungsten, altın, platin/iridyum dur. Elektrokimyasal aşındırma veya yan keski yardımıyla uygun açıyla kesilerek hazırlanır. Eğer sıvı ortamında çalışılacak ise iğne, cam, cila, parafin gibi uç noktasına kadar kaplanarak kullanılabilir. Fakat tekrarlanabilir sonuçlar almak pek mümkün değildir.

### **2.2.2 Elektronik bölümler**

Tasarlanan cihazın elektronik bölümleri kontrol ünitesi, akım voltaj çevirici devre, yüksek gerilim güç kaynağı (amplifikatörü) olmak üzere üç ana bölümde incelenebilir. X ve Y konum sinyalleri bilgisayar yardımıyla üretilip güç kaynağı bölümünde istenilen seviyeye yükseltilerek piezo tüpe verilir. İğne-örnek arasına gerekli öngerilim voltajı da bilgisayar ortamından sağlanmaktadır. İğne üzerinden geçen akım, sunulan tezdeki önemli modifikasyonlardan birisini oluşturan ve temel prensipleri bu bölümün alt bölümlerinde anlatılan akım/gerilim (I/V) çeviricisi ile algılanır. Algılanan bu akım kapalı sistem PI kontrol bloğuna gelerek bir kontrol sinyali üretilmesini sağlar. Böylelikle tarama esnasında z konum bilgisi tutulmuş

olur. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi Z konum bilgisi güç amplifikatöründen istenilen oranda yükseltilerek piezo tüpe gönderilir. Şekil 2.7 ideal bir TTM cihazının elektronik bölümleri blok halinde gösterilmiştir.

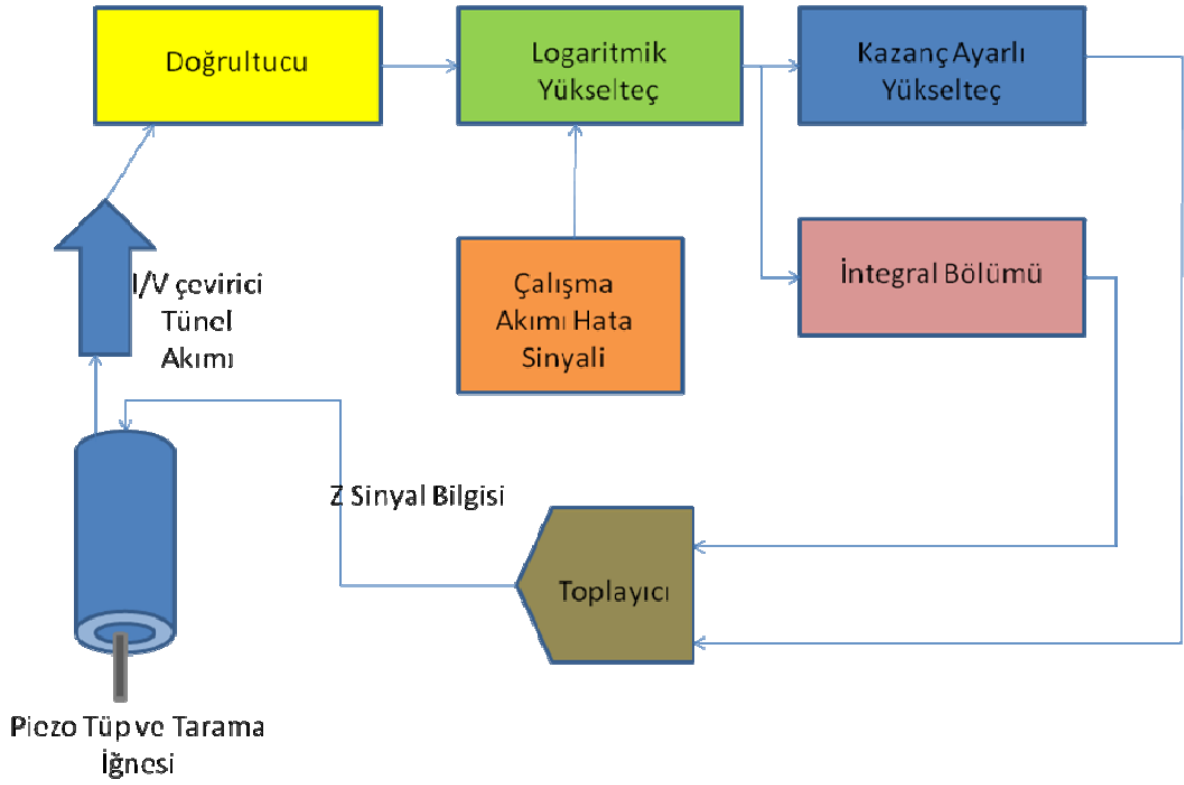


\* Lab View programı aracılığıyla X ve Y sinyalleri BAK kartlara aktarılır.

Şekil 2.7 TTM cihazına ait blok şema.

### 2.2.2.1 Kontrol bölümü

Tasarlanan TTM cihazının kontrol bölümü PID kontrol mantığı PI ile tasarlanmıştır. PID (Proportional-Integral-Derivative) günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemidir. Şekil 2.8’de tasarlanan PI kontrol ünitesinin blok şeması görülmektedir.



**Şekil 2.8** TTM kontrol devresinin blok şeması.

Burada P(proportional) oransal anlamındadır ve çıkışa hatayla orantılı olarak katkı sağlar. I(integral) ise integral anlamındadır. Sadece oransal etkinin kullanıldığı durumlarda çıkış ile set değeri(referans değer) arasında kalıcı bir hata mevcut olacaktır. Bu kalıcı hatayı yok etmek için ise integral kullanılmaktadır. Sürekli, gelen hataların toplamını çıkışa yansıtır. D(derivative) ise türevi temsil eder. Set değeri ve işlem değişkeni arasındaki meydana gelebilecek ani değişikliklerde yani hatanın değişimi durumunda etkili olur. Ayrıca hatayı bir an önce azaltmak yönünde katkısı olmaktadır. Sonuç olarak PID bu üç etkenin çıkışta toplanmasıyla elde edilmektedir [48; 49].

PID uygulamaları için standart bir tanımlama yoktur. Astrom [50]'e göre PID algoritması Denklem 2.6'da ki gibidir:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t).dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.6)$$

Burada

$u(t)$ ; denetleyici çıkışı,

$e(t)$ ; kontrol edilecek değişkendeki hata miktarı,

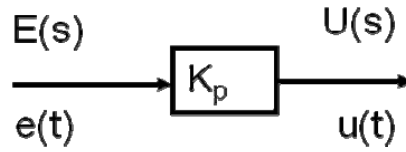
$K_p$ ; oransal kazanç,

$T_i$ ; integral zamanı,

$T_d$ ; türev zamanı olmak üzere denklem parametreleridir.

Görüldüğü üzere denetleyici çıkışı, hatanın kendisi, integrali ve türevinden oluşan üç terimin toplamıdır.

Oransal kontrol (Proportional control): Çıkışa hatayla orantılı olarak katkı sağlayan kontrol organıdır. Hata sabit bir sayı ile çarpılarak çıkış elde edilir. Şekil 2.9'da oransal kontrol transfer şeması görülmektedir.



**Şekil 2.9** Oransal kontrol transfer şeması.

Burada

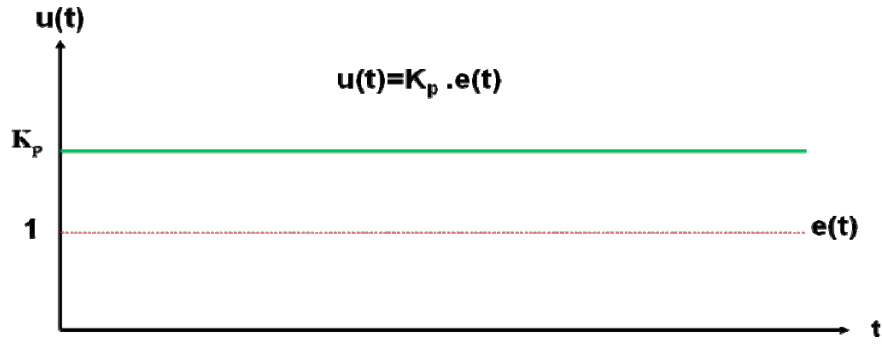
$e(t)$ ; Hata işareti,

$u(t)$ ; Denetim işaretidir.

Oransal etkinin transfer fonksiyonu ise Denklem 2.7'de belirtilmiştir.

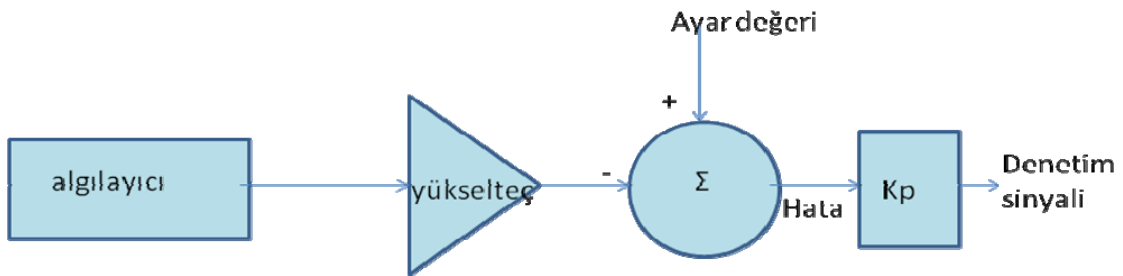
$$U(s) / E(s) = K_p \quad (2.7)$$

Denklem 2.7'de ki  $K_p$  değeri kazanç olarak adlandırılır. Bu kontrol yapısının birim basamak giriş tepkisi Şekil 2.10'da ki grafikte gösterilmiştir.



**Şekil 2.10** Oransal kontrol yapısının birim basamak girişe tepkisi.

Oransal etki kullanılarak denetlenen süreç çıkışında bir kalıcı durum hatası oluşacaktır. Kalıcı durum hatasını gidermek için denetleyici çıkışına bir sıfırlama devresi eklenmelidir. Bu da integral etki olarak adlandırılır. Oransal yani P kontrole ait blok şema Şekil 2.11’de verilmiştir.



**Şekil 2.11** Oransal kontrol blok şeması.

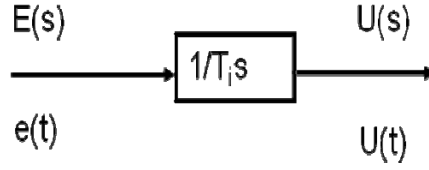
İntegral kontrol (Integral control): Giriş değerinin başka bir deyişle hatanın integrali alınarak oransal kontrolde oluşan kalıcı hata ortadan kaldırılması işlemidir. İntegral kontrolün transfer fonsiyonu Denklem 2.8 ve 2.9’da verilmiştir.

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

veya

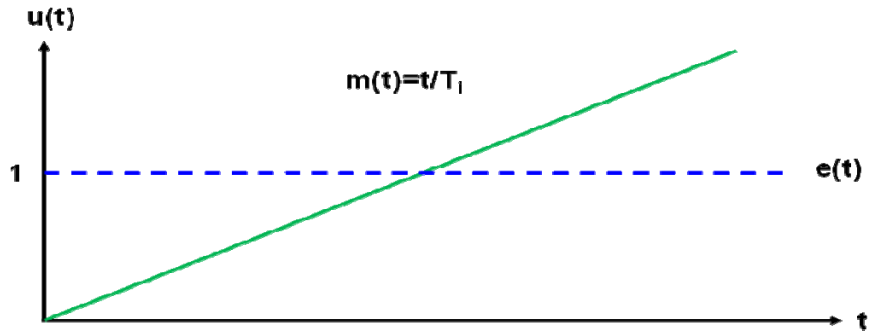
$$U(s) = \frac{E(s)}{T_i s} \quad (2.9)$$

İntegral kontrolün transfer şeması Şekil 2.12’de belirtilmiştir.



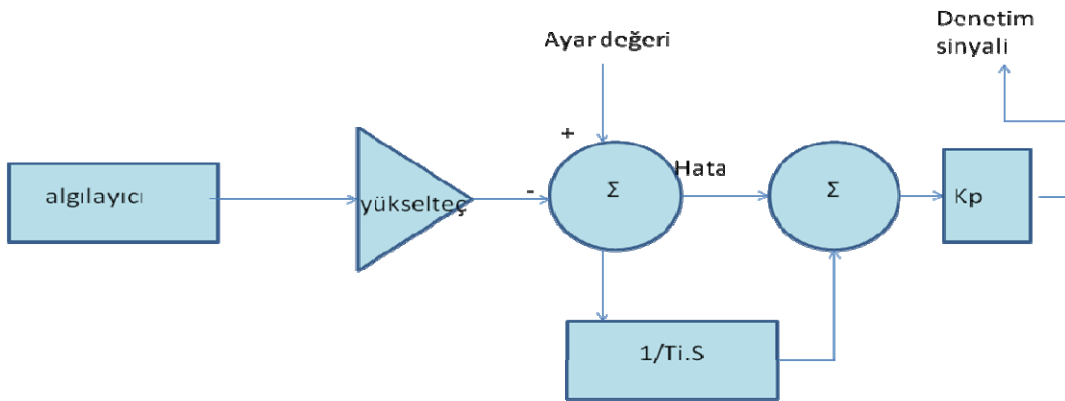
**Şekil 2.12** İntegral kontrol transfer şeması.

Oransal + integral kontrol yapısının birim basamak girişe tepkisi aşağıdaki Şekil 2.13'de belirtilmiştir.



**Şekil 2.13** İntegral kontrol yapısının birim basamak girişe tepkisi.

İntegral kontrol kalıcı hatayı yok eder ama yavaş bir kontrol sağlar. Bunun nedeni sisteme 90 derece faz gecikmesi getirmesidir. Oransal + integral yani PI kontrole ait blok şema Şekil 2.14'de sunulmuştur.



**Şekil 2.14** Oransal + integral kontrol blok şeması.

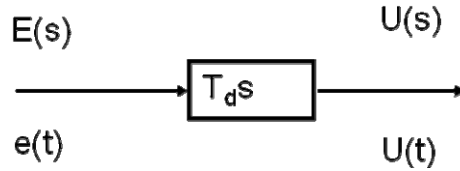
Türev kontrol (Derivative control): Ayar değeri ile ölçüm değeri arasında ani değişikliklerin meydana gelmesi yani hatanın değişimi durumunda etkili olan denetim organıdır. Türev kontrolün transfer fonksiyonu Denklem 2.10 ve 2.11’de transfer şeması Şekil 2.15’de belirtilmiştir.

$$u(t) = T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (2.10)$$

veya

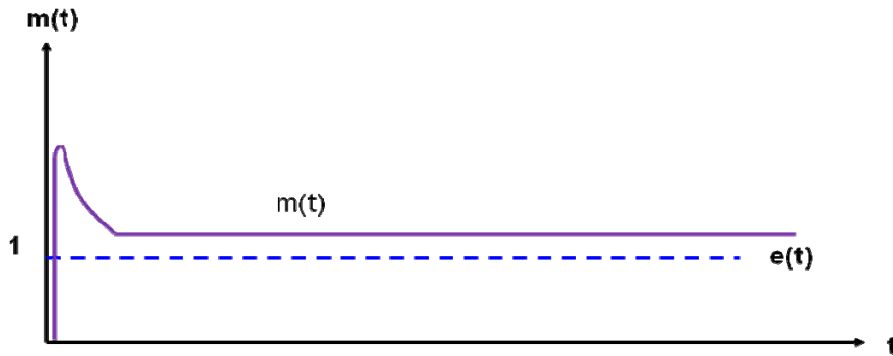
$$U(s) = T_d s E(s) \quad (2.11)$$

olarak elde edilir.



**Şekil 2.15** Türev kontrol transfer şeması.

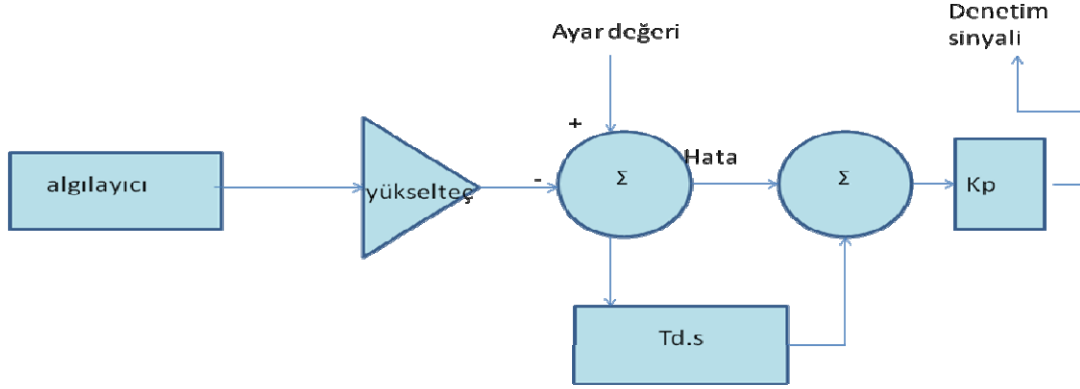
Türev kontrol yapısının(oransal+türev) birim basamak giriş tepkisi Şekil 2.16’da verilmiştir.



**Şekil 2.16** Türev kontrol yapısının(oransal+türev) birim basamak giriş tepkisi.



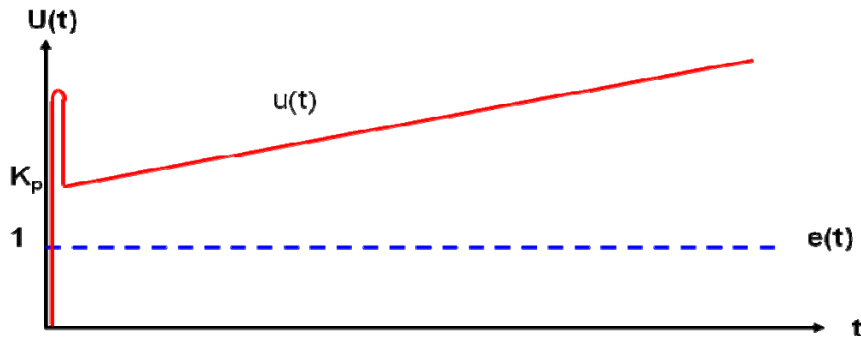
Şekil 2.17’de ise oransal + türevsel PD kontrol sisteminin blok şeması görülmektedir.



**Şekil 2.17** Oransal + türevsel kontrol blok şeması.

Diferansiyel etki kontrol edilen sisteme etkiyen bozucuya karşı hızlı cevap verir ve sisteme 90 derece faz avantajı getirir.

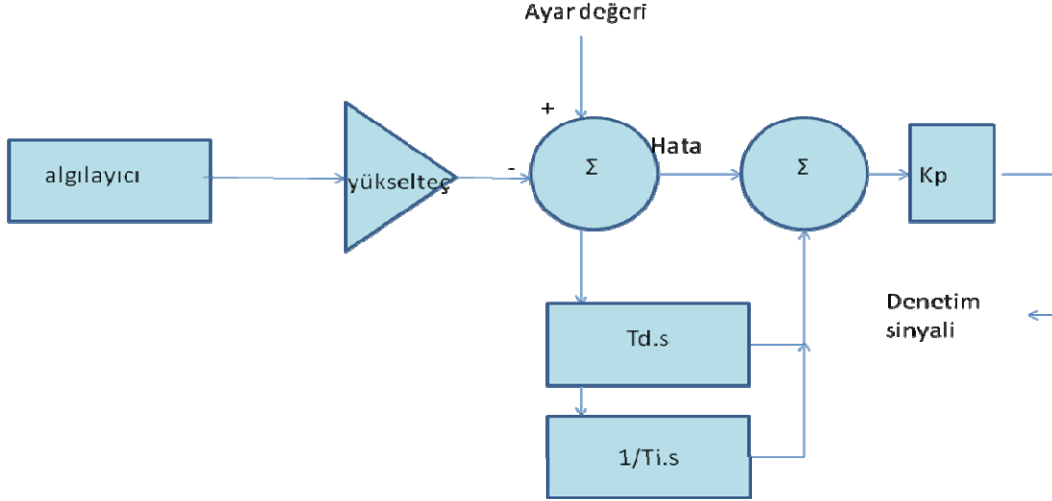
Sonuç olarak PID bu üç etkenin çıkışta toplanmasıyla elde edilir. PID kontrol yapısının birim basamak girişi Şekil 2.18’de ki gibidir.



**Şekil 2.18** PID kontrol birim basamak tepkisi.

Denetimi güç, karmaşık sistemlerde oransal kontrol, oransal+türevsel kontrol yada oransal+integral kontrolün yeterli olmadığı süreçlerde oransal+integral+türevsel kontrol tercih edilmelidir. Kısaca bu kontrolü tanımlayacak olursak; oransal

kontrolde oluşan kalıcı hal hatası oransal+integral kontrolle giderilebilir. Ancak, hata işaretinde meydana gelen anlık değişimler bu kontrole türevsel etkinin de eklenmesi ile minimum seviye indirilir veya tamamen kaldırılır. Şekil 2.19'da PID kontrol blok şeması görülmektedir



**Şekil 2.19** Oransal+türevsel+integral kontrol blok şeması.

PID denetimde süreç değişkenlerinin en kısa sürede ve en az kalıcı hatayla ayar değerine ulaşması için  $K_p$ ,  $T_i$  ve  $T_d$  değerlerinin optimum seviyeye getirilmesi gerekir. Bu ayarlamalar için Ziegler-Nichols kurallarından faydalanılır [50; 51].

Ziegler-Nichols Kuralları frekans düzleminde (i) ve zaman düzleminde(ii) olmak üzere ikiye ayrılırlar:

(i) Frekans düzlemi için Ziegler-Nicholas hesaplamaları:

İdeal süreli PID kontrol Denklemi 2.6'da verilmiştir. Bu transfer fonksiyonunda  $u$  çıkış,  $K_p$  oransal ( $p$ ) kazanç,  $T_i$  integral zamanı,  $T_d$  türev zamanı ve  $e$  ise referans ve çıkış arasındaki hatadır. Dijital sinyaller için, kısa örnekleme periyodu  $T_s$  olarak denklemin düzenlenmiş hali Denklem 2.12'de verilmiştir.

$$u_n = K_p \left( \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^n e_j T_s + T_d \frac{e_n - e_{n-1}}{T_s} \right) \quad (2.12)$$

Denklem 2.12'deki  $n$  değeri zamanı gösterir. Bu ayarlama işlemlerinden öne çıkarılan kasit denklemdeki  $K_p, T_i, T_d$  değişkenlerini değiştirmektir. Parametreleri ayarlamak için çeşitli yöntemler vardır. Oransal katsayıyı ayarlamak için ( $T_d=0$  ve  $1/T_i=0$ ) iken kontrol katsayısı normal bir PID döngüsündeki geri beslemeye bakılarak  $K_p$  kazancının ne zaman durağan ne zaman maksimumda olacağı çıkartılabilir.

Başka bir deyişle sadece oransal kontrol kullanılarak oransal kazanç en düşük değerden başlatılır, sistem sönümsüz salınım yapana kadar artırılır. İstenen koşulların sağlandığı kazanç ve salınımın periyodu kullanılarak ayar değişkenleri elde edilir. Çizelge 2.1'de Zieger – Nichols kuralları görülmektedir.

**Çizelge 2.1** Ziegler-Nichols kuralları(Frekans cevabı yöntemi).

<b>Kontrol E.</b>	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>T_i</math></b>	<b><math>T_d</math></b>
<b>P</b>	<b><math>K_u/2</math></b>	<b><math>\infty</math></b>	<b>0</b>
<b>PI</b>	<b><math>0.5K_u</math></b>	<b><math>0.75T_u</math></b>	<b>0</b>
<b>PID</b>	<b><math>0.6K_u</math></b>	<b><math>0.5T_u</math></b>	<b><math>0.25T_u</math></b>

$n$  ve  $l$  sıfır kabul edildiğinde  $x$  çıkış değerinin referans sinyaline yakın olabilmesi için  $K_p$ 'nin alabildiği en yüksek değere çekilmesi uygundur. Eğer yük gecikme zamanı ( $L$ ) sıfır değilse,  $L$  ye bağlı olarak hesaplanan kontrol katsayısının çok büyük seçilmesi, sistemin anlık olarak yüke aşırı bağımlı değişmesine neden olur. Ama eğer  $n$  sıfır değilse  $K_p$  gözden geçirilmelidir, aksi halde sistemin hassasiyetini kaybetmesine neden olur.  $K_p$  değeri yüksek seçildiği takdirde kapalı çevrim kontrol sistemlerinde karasızlığa neden olmaktadır.  $K_p$ 'nin ayarı kontrol edilen obje ( $l$ ), gürültü hassaslığı ve yük dağılımı gibi parametreler dikkate alınarak

hesaplanmalıdır. Bu tarz PID kontrollerin katsayıları ayarlanırken Ziegler-Nichols frekans cevap metodu [52; 53] başarılı şekilde uygulanabilir.

Ziegler – Nichols metodu uygulanırken;

- oransal kazancı sistem osilasyona girene kadar artırılır; bu en yüksek kazanç olan  $K_u$  dur.
- $T_u$  zamanını bulmak için tepe yapılan bu süre ölçülür.
- çizelge 2.1'de değerler yerine koyularak yaklaşık kontrol kazançları bulunur.

Bu örnek periyot integral kazancı  $T_d$  ile de ilişkilidir. Aström ve Wittenmark [78], bu sürenin  $T_d$  nin  $1/2$  ile  $1/10$  arasında bir sürede olması gerektiğini önermektedirler. Bu yaklaşıma göre Ziegler-Nichols kuramıyla bağlantı kurulduğunda  $T_s$ , tepe süre olan  $T_u$ 'nun yüzde 1-5'i ne denk gelmelidir. Başka bir öngörüye göre ise bu süre hesaplanırken süreçteki en uzun değer olan  $1/5 - 1/10$ 'u arası seçilmelidir.

Ziegler ve Nichols ayrıca etkiye tepkili ve adım cevabı gibi başka yöntemleride vardır [54]; [55]. Bu yöntemde kazancı bulmak için açık çevrim adım cevabı kullanılır ve bu kapalı sistemlerin osilasyona girdiği anda kapalı sistemin tolere edemeyeceği sınırlara çıkmasını sağlamaktadır [56].

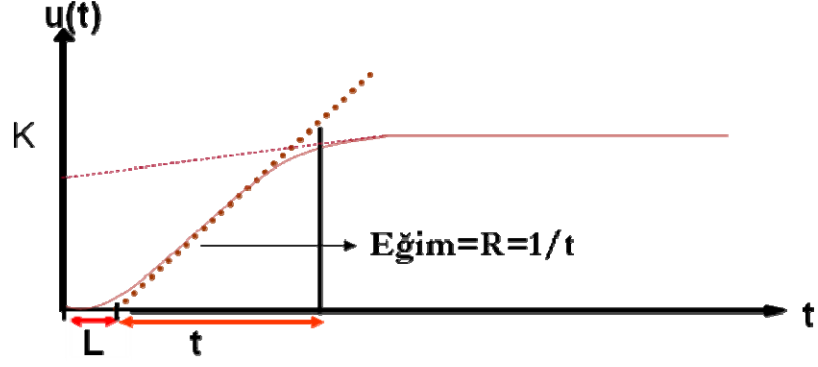
#### (ii) Zaman düzlemi için Ziegler-Nicholas hesaplamaları:

Sistemin açık çevrim birim basamak cevabında (Şekil 2.20) ayar değişkenleri değerleri hesaplanır.

Burada

L; gecikme zamanı,

T; zaman sabitidir.



**Şekil 2.20** Sistemin açık çevrim birim basamak tepkisi.

Hesaplanan değerler aşağıda verilen formüllere yerleştirilerek P, I ve D parametrelerinin değerleri hesaplanır. Hesaplanan bu değerler çizelge 2.2'de tablo haline getirilmiştir.

**Çizelge 2.2** Ziegler-Nichols kuralları(Zaman düzlemi yöntemi).

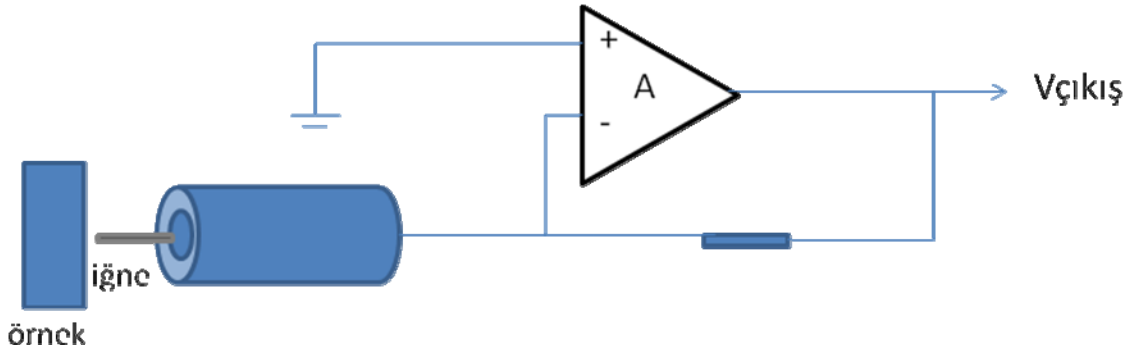
<b>Kontrol E.</b>	<b>K<sub>p</sub></b>	<b>T<sub>i</sub></b>	<b>T<sub>d</sub></b>
<b>P</b>	<b>1/R*L</b>	<b>∞</b>	<b>0</b>
<b>PI</b>	<b>0.9/R*L</b>	<b>10/3*L</b>	<b>0</b>
<b>PID</b>	<b>1.2/R*L</b>	<b>2*L</b>	<b>0.5*L</b>

Eğer zaman ortalamasına dayalı bir integrasyon uygulanırsa, tekrarlayan bir sinyalin yapısı kuvvetlenirken, birbiriyle ilişkisi bulunmayan gürültü seviyeleri zayıflayacaktır.

PID kontrol mantığının temeli yukarıda özetlenmeye çalışılmıştır. Bu kontrol mantığının bir TTM sistemine uyarlanarak tünel akımını kontrol etmede kullanılması verimli sonuçlar doğurabilir. TTM sistemlerinde kontrol edilecek olan tünel akımı istenilen şartlara göre P, PI veya PID olarak seçilebilir.

### 2.2.2.2 Akım (I) / Gerilim (V) çevirici

Sistemin çalışma akımı, tünel akımı algılanmaya başladığı an iğne ile örnek arasındaki uzaklığı belirleyen parametredir. Bu nedenle I/V çeviricisi TTM'nin en önemli bölümlerinden birini oluşturur. Tipik bir I/V çeviricisi Şekil 2.21'de sunulmuştur.



Şekil 2.21 I/V çevirici temel devresi.

TTM'nin kontrol devresi bir PI kontrolü (Bölüm 2.2.2.1) olup I/V çeviricisinden aldığı sinyale göre örnek-iğne arasındaki uzaklığı sabit tutmaya çalışır. Buradan gelen sinyalin kararlılığı sistemin de kararlılığını doğrudan etkileyeceğinden, I/V çeviricinin bir takım elektronik devre tasarım özelliklerini yerine getirebiliyor olması gerekmektedir.

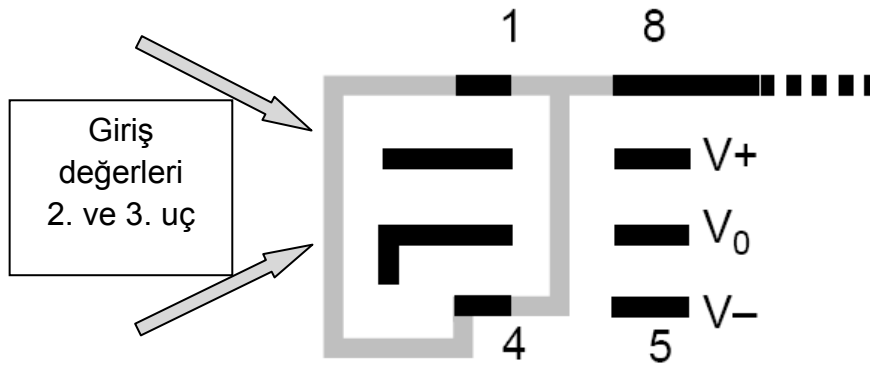
Buna göre;

- I/V çeviricisinin gürültüden arındırılmış olması,
- Çok düşük çalışma akımları gerektiğinden yüksek empedanslı bir girişe sahip olması,
- Giriş ofset-voltajı ve ofset-akımlarının olabildiğince düşük olması,
- Zaman sabitlerinin uygun seçilmiş olması gereklidir [57].

Giriş koruması; piko amper seviyesindeki çalışmalarda devre üstündeki sızıntı akımları performansı önemli derecede etkiler. Sızıntı akımları, kullanılan işlemci kuvvetlendiricinin kılıfından başlayarak montajın yapıldığı baskılı devre plakası,

yerleştirme şekli, montaj sonrası temizlik, çevre koşulları: sıcaklık ve nem, gibi birçok etkenden kaynaklanabilir.

Baskılı devreden kaynaklanan sızıntı akımları, giriş uçlarının etrafı çevrilerek giderilebilmektedir. Koruma halkası olarak da adlandırılan bu yöntemle birbirine bağlanan bu uçlar aynı potansiyele getirildiğinde gürültü önemli ölçüde azaltılabilir. Burr Brown firmasına ait entegrelerin önerilen bir baskılı devre örneği Şekil 2.22’de verilmiştir.



**Şekil 2.22** Sızıntı akımlarından kaynaklanan potansiyel farkını eşitlemek amacıyla I/V çevirici için önerilen yerleştirme planı.

Koruma halkası giriş uçlarıyla aynı potansiyele sahip olan düşük empedanslı bir noktaya bağlanmalıdır (Şekil 2.22’de görüldüğü gibi 8 numaralı bacak).

Giriş koruması olarak gerçekleştirilecek uygulamalardan biride baskılı devrenin bir yüzü tamamen toprak olarak kullanılarak, toprak noktasına bağlanacak bütün malzemelerin ayakları bu yüze bağlanabilir. Böylece hem girişler kafes içine alınmış, hem de kafes düşük empedansa sahip toprak noktasına bağlanarak girişler ile eşit potansiyelde olması sağlanmış olur.

Gürültü korumasının temel alınacağı birkaç kural bulunmaktadır. Devrenin giriş empedansı, kullanılan işlemsel kuvvetlendiricinin giriş empedansına ( $10^{11}\Omega$ ) ve geri-besleme devresinde kullanılan direnç değerlerine (genellikle imal edilen

devrelerde  $10^7 \Omega$  ve  $10^9 \Omega$  arasında) bağlıdır. Giriş empedansının bu kadar yüksek olması devrenin çevre etkilerine (manyetik ve elektrik alanlar vb.) karşı da son derece hassas olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle I/V çeviricisi kafes içine alınır, tarama kafası üzerine monte edilerek oldukça kısa kablolar ile tarama iğnesine bağlantı yapılır.

Isıl kayma "thermal drift"; karşılaşılan önemli problemlerden biridir. Bir örneğin görüntülenebilmesi için gereken tarama süresi yazılan program ile ayarlanabilmektedir. Fakat bu sürenin minimum değeri, görüntülenmek istenen örneğin yüzeyinin homojen olup olmadığına veya başka bir deyişle ne kadar birbirinden farklı yükseltilere sahip olduğuna bağlıdır. Genellikle TTM sistemlerinde kullanılan PI kontrol devreleri homojen yüzeylerde hızla set değerine gelirken aksi durumda bu süre uzamakta ve tarama hızı da buna bağımlı kalmaktadır. Görüntülemenin temeli göreceli olarak toplanan akım bilgilerine bağlıdır. Bu nedenle görüntüleme sırasında I/V çeviricisinde kayma olmamalıdır. Isıl kaymanın önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır ve bu sorun devrede kullanılan elemanlarının tümünün karakteristiğine bağımlıdır. Bu nedenle devrenin ölçme kısmında metal-film dirençler ve seramik kondansatörler kullanılmalıdır. Ayrıca bu problemin temel önlemlerinden biri de kullanılacak elemanların yüzey montaj tipinde seçilmesidir.

Giriş ofset akımı; ofset akımı düşük çalışma akımlarının kullanıldığı durumlarda önem kazanmaktadır. Ölçme devresinin çalışması için gerekli olan ofset akımının yüksek olması halinde, ofset akımının değeri ölçülmek istenen değere ilave edilecektir. Bu durumda ölçülen değer hata payı da yükselmektedir. Bu nedenle kullanılan işlemsel kuvvetlendiricilerin giriş ofset akımları olabildiğince küçük olmalıdır.

Zaman sabitleri; geri besleme dirençlerine paralel bağlanan kondansatörler kontrol devresinin kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılır [32; 4]. Burası sistemin algılama noktasıdır ve genellikle algılamanın son derece hızlı olması istenir ancak çevre gürültüleri ve akımdaki çok küçük dalgalanmalara karşı



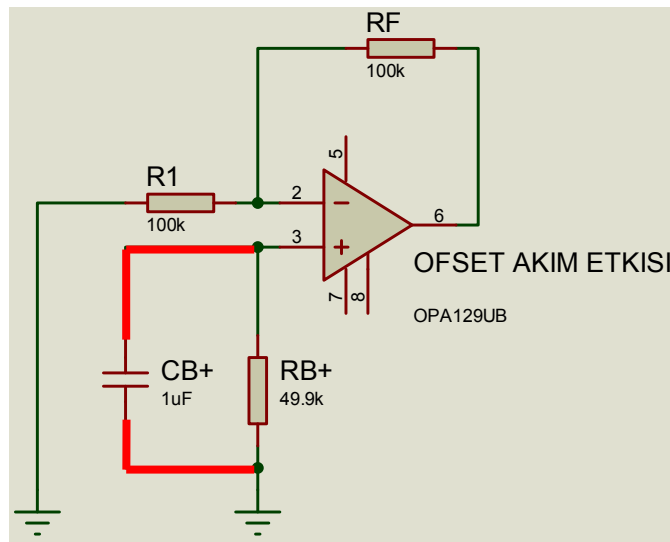
gösterilen ani reaksiyonlar da kararsızlık yaratabilmektedir. Bu nedenle küçük bir zaman gecikmesi sistemi daha kararlı hale getirmektedir.

### 2.2.2.3 Yüksek gerilim kaynağı

Daha önce açıklandığı gibi tarayıcı tüpün adım hassasiyeti çok yüksek fakat hareket alanı oldukça sınırlıdır. Hareket alanı tarayıcı tüpün izin verdiği sınırlar ölçüsünde (maksimum burulma sınırı, maksimum gerilim sınırı, kapasitansı vb.) genişletilebilir. Bu amaçla kullanılacak güç kaynağının;

- Bilgisayar kontrollü,
- Bipolar beslemeli,
- Gürültü seviyesi düşük,
- Frekans bandı tarama hızına göre yeterince yüksek,
- Kapasitif yükleri sürmeye elverişli olması gerekir.

Şekil 2.23'de standart bir eviren amplifikatör gösterilmiştir. Evirmeyen bacağındaki direnç, eviren (giren sinyalin fazını 180° çeviren) ve evirmeyen girişlerin gösterdiği empedansa bağlı olarak giriş ön gerilim akımının oluşturduğu ofset voltajına ait hatayı düzeltmek için kullanılmıştır.



Şekil 2.23 Ofset akımının etkisi.

Şekil 2.23'de görülen  $R_B$  (evirmeyen (pozitif) uç) noktası çok yüksek empedansa sahip olduğu için direncin yalnız başına kullanımı ortamda bulunan, istenmeyen gürültülerin algılanmasına neden olacaktır. Toprağa direkt bağlanması ise yukarıda anlatılan hataya neden olacağı için evirmeyen uç ile toprak bağlantısı uygun bir dirençle yapılmalıdır.

İşlemsel kuvvetlendiriciler aynı tip hatayı yok etmek amacıyla bazı devreler içermektedir, bazıları da son derece küçük akımlarla çalıştıkları için oluşan ofset voltajı ihmal edilecek kadar küçüktür. Kazancın küçük olduğu durumlarda (100'ün altında), kullanılan işlemsel kuvvetlendiricinin giriş özellikleri ihmal edilebilecek kadar önemsiz olacaktır.

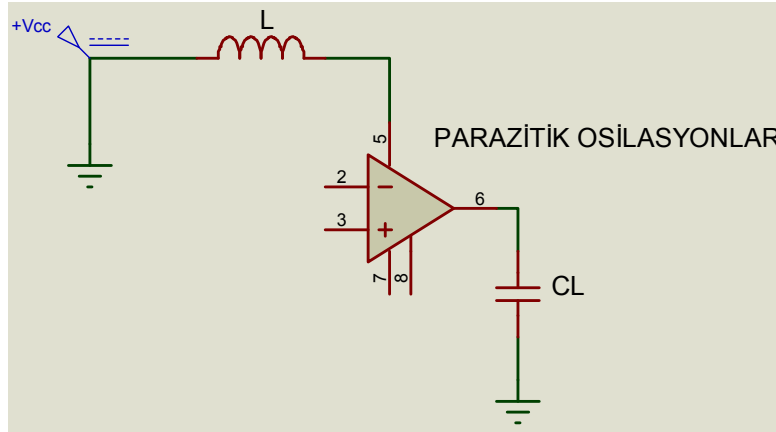
Toprak döngüsü "Ground loop": baskılı devre üzerindeki yolların direncine bağlı olarak kart üzerindeki düğüm noktaları üzerinden akan yük akımı osilasyonlara neden olmaktadır. Çıkış noktasındaki sinyal ile baskılı devre üzerindeki yolların düğüm noktalarındaki sinyal aynı fazda ise pozitif geri-besleme ve bunun sonucunda osilasyon meydana gelmektedir. Toprak hattı üzerindeki bu parazitik dirençler normal topraklama metotları ile engellenememektedir. Fakat bütün toprak noktaları bir noktada toplanarak, bu nokta bütün sisteme referans noktası olarak gösterilebilirse, osilasyonu engellemek mümkün olabilmektedir. Kullanılan baskılı devrenin bir yüzü tamamen toprak olarak kullanılabilir ve toprak noktasına bağlanacak bütün malzemelerin ayakları bu yüze bağlanarak sorunun bağlantı noktalarından kaynaklanan kısmı bu yöntemle çözülebilir.

Ayrıca giriş ve çıkış noktalarının birbirine çok yakın olduğu durumlarda bu noktalar arasındaki kapasitif etkiler de pozitif geri-besleme yaratabilir. Bu amaçla giriş ve çıkış noktaları birbirinden mümkün olduğu kadar uzak noktalara konumlanmalıdır.

Bir güç amplifikatöründe geri-besleme, baypas, giriş ve akım algılama elemanları birbirine mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Baskılı devre tasarımı aşamasında bu parametreler de mutlaka göz önüne alınmalıdır.

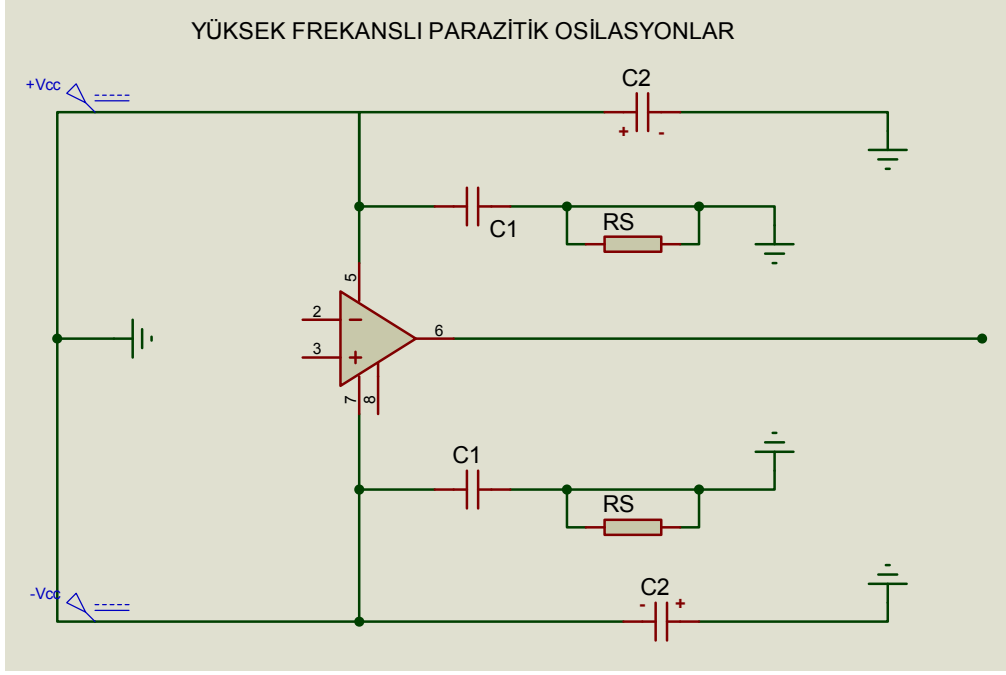
Güç kaynağının modülasyonu “power supply bypassing”; güç kaynağı döngüleri istenmeyen osilasyonların oluşumuna bir diğer etkindir. Devredeki akım, güç kaynağının iç direnci, parasitik kablaj ve geçiş dirençleri üzerinden akmaktadır. Bu da amplifikatörün beslendiği noktada güç kaynağı geriliminin modüle edilmesine neden olmaktadır. Modüle edilmiş bu sinyal bir kompanzasyon kondansatörü ile kazanç bölümüne iletilerek AC toprak noktası oluşturulur.

Diğer bir güç kaynağı problemi de Şekil 2.24’de verilmiştir. Güç kaynağının bağlantı kabloları da birer endüktans gibi davranmaktadır. Eğer yük kapasitif bir yük ise bağlantı kablolarının endüktansı ile yük LC tank devresi meydana getirerek osilasyona neden olabilir. Anlatılan bu problemler uygun baypas teknikleri kullanılarak önlenabilir. Amplifikatörün her iki besleme noktası da yüksek frekanslı seramik kondansatörler ile (genellikle 0.1 - 0.22 $\mu$ f) ortak toprak noktasına doğru baypas edilmelidir. Böylelikle problem çözülmüş olacaktır.



**Şekil 2.24** Güç kaynağı bağlantı kablolarının yarattığı parazitik osilasyonlar.

Bu kondansatörler işlemsel kuvvetlendiricilerin doğrudan besleme ayaklarına bağlanmalıdır. MHz seviyesinde, yüksek tarama frekanslarına sahip TTM cihazlarının güç amplifikatörlerinde, oluşan tank devresinin Q değerini düşürmek için de baypas kondansatörlerine seri dirençler bağlanmalıdır. Bu problemin çözümüne ilişkin bir uygulama Şekil 2.25’de verilmiştir.



**Şekil 2.25** Yüksek frekanslarda parazitik osilasyonların önlenmesi.

Sızıntı akımları çok küçük olan tantal kondansatörlerin, ısıl karakteristikleri de son derece iyidir. Bu nedenle yukarıda anlatılan amaçlar için rahatlıkla kullanılabilirler. Düşük ortam sıcaklıklarında alüminyum elektrolitik kondansatörlerin kullanımı da uygundur. Düşük frekans seviyesinin (kHz) altındaki frekans aralığında çalışmak üzere tasarlanan sistemlerde seri *RS* dirençleri hiç kullanılmayabilir. TTM cihazlarındaki tarama hızları genellikle bu seviyelerde olduğu için güç kaynağı tasarımı oldukça kritiktir.

Güç amplifikatörü çıkış empedansı ve kapasitif yükleme; genellikle bu tip uygulamalarda güç amplifikatörlerinin çıkış empedanslarının özel değerlerde olması istenmektedir. Bu durum maksimum güç eldesi ve frekansa bağımlı olarak performansın belirlenebilmesi için gereklidir. Endüktif ve kapasitif yükler de sistemin performansını frekansa bağımlı olarak değiştirmektedirler.

Bir işlemsel kuvvetlendiricinin çıkış empedansı geri besleme devresi ile ayarlanabilmektedir. Fakat voltaj kaynağı olarak kullanılacak olan bir amplifikatörde geri besleme devresi daha çok açık çevrim kazancından, istenen kapalı çevrim kazancına inebilmek için kullanılır.

Güç amplifikatörlerinde 1KHz'in altında çıkış empedansı miliohm ( $m\Omega$ ) seviyelerindedir. Hâlbuki bağlantı kabloları ve ara bağlantılar çok daha yüksek empedanslara sahiptirler. Bu nedenle düşük frekanslarda çıkış empedansının fazla bir önemi yoktur. Yüksek frekanslarda reaktif ve kapasitif yükler nedeniyle çıkış empedansı önem kazanmaktadır. TTM'lerin tarama frekansları genellikle son derece yavaş olduğu için faz kompanzasyonu ve kararlılık açısından fazla bir sorun beklenmez.

Çıkış noktasının osilasyonu / R-C fitresi; yükselteçlerin çıkış noktalarındaki geri besleme döngüleri özellikle kazancın yüksek olduğu durumlarda istenmeyen osilasyonlara neden olabilmektedir.

Bu tür emiter takipçi devrelerin çıkışında bulunan transistörlerin emiterleri bobin etkisi gösterirler. Eğer devre kapasitif bir yükü sürüyorsa, bir araya gelen bobin ve kapasitör etkisi osilasyona neden olabilir. Bu problem çıkış noktasına konulacak basit bir direnç ve kondansatör devresi ile "snubber" önlenir. Kullanılacak bu devre, amplifikatörün yüksek frekans kazancını düşürerek istenmeyen yüksek frekanslı osilasyonları önlemektedir.

### **2.2.3 Veri toplama ve görüntü oluşturma bölümü**

İlk nesil TTM cihazlarında tarama sinyali fonksiyon jeneratörleri ile üretilerek topografik çıktı laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılan klasik X-Y çizicilere gönderilmiştir [58]. Son yıllarda hem veri toplamak için hem de tarama sinyalini üretmek için kişisel bilgisayarlar kullanılmaktadır. Sayısallaştırılmış veriler interaktif olarak kullanabileceğimiz bir bilgisayar ekranına gönderilerek daha verimli ve kolay kullanım elde edilir. TTM cihazı için kullanılacak olan bir veri toplama sistemi şu gereksinimlere cevap verebilmelidir [59].

- a. Tarama iğnesinin X ve Y yönündeki hareketlerini sağlayacak olan tarama sinyallerini üretebilmelidir. Üretilen bu sinyaller zaman gecikmesi olmadan sisteme aktarılmalıdır.

- b. Sayısallaştırılmış parametreleri işleyebilmek, ekranda görüntüleyebilmek ve daha sonra kullanmak amacıyla depolayabilmelidir. Ayrıca sistemden elde edilecek tünel akım değerleri çeşitli görüntü işleme teknikleri kullanılarak istenilen duruma getirilebilmelidir. Sistem donanım ve yazılımla uyum içinde çalışmalıdır.
- c. Özellikle tünelleme spektroskopisi amacıyla kullanılacak olan cihazlarda, gerekli öngerilimi üretebilmelidir (analog veya dijital).
- d. Kullanım şekline bağlı olarak dışarıdaki diğer devrelere komuta edebilme özelliğine sahip olmalıdır.

### **2.3 TTM Cihazı Biyolojik Uygulamaları**

TTM ve diğer Taramalı Prob Mikroskopi (TPM) tekniklerinin doğal ve yapay makromoleküllerin görüntülenmesinde kullanılabileceğinin anlaşılması ile bu konuda çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. TTM'nin sağladığı birçok avantaj sayesinde bu tekniklere olan ilgi halen aynı heyecanla devam etmektedir.

TPM teknikleri su içeren örnekleri oda koşullarında fazla sorun çıkartmadan görüntülemeye olanak sağlamaktadır. Bu da özellikle biyolojik moleküllerin kendi doğal ortamlarında görüntülenebilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu sistemlerin alternatifi olan yüksek çözünürlüklü TEM'e benzer bir görüntüleme, yüksek vakum altında ve dondurulmuş örnekler ile mümkündür. Bu durum prob mikroskopi tekniklerine önemli bir avantaj sağlamaktadır.

TPM teknikleri kullanılarak biyolojik makromoleküllere ait yapı ve fonksiyon ilişkisini açıklamaya yönelik çalışmalar umut verici görünmektedir. Biyolojik moleküllerin TPM teknikleri kullanılarak görüntülenmesi, örneği yüksek enerjili elektronlarla bombardıman yapan TEM'e göre çok daha zararsızdır.

TEM iki boyutlu izdüşüm "projection" şeklinde bir görüntü verirken, TPM teknikleri üç boyutlu topografik bir görüntü sağlamaktadır. Bununla beraber TPM tekniklerinin de genellikle örnek hazırlamaya dayalı bazı dezavantajları vardır.

Bir diğer konu da bŸyŸk biyomolekŸllerin gŸrŸntŸlenmesine ait bazı noktaların teorik olarak açıklanamamış olmasındır [60].

Birçok biyomolekŸl elektriksel olarak iletken değildir. Bu nedenle ilk zamanlarda TTM'in bu molekŸllerin gŸrŸntŸlenmesinde kullanımının sınırlı olduğu kanaatine varılmıştır. İlk uygulamalarda rnekler Pt/C (Platin/Karbon) veya Pt/Ir/C (Platin/İridyum/Karbon) filmler ile kaplanarak gŸrŸntŸleme yapılmıştır. Bu da TEM'de olduğu gibi biyolojik molekŸllerin kendi doğal ortamlarında gŸrŸntŸlenme şartlarını ortadan kaldırmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda pA seviyesinde çalışma akımları ve 5-10 V ngerilim değerleri kullanılarak, kaplama yapılmaksızın gŸrŸntŸleme yapılabileceği rapor edilmiştir [61]; [62; 63; 64].

TPM tekniklerinde belki de en ciddi problem, biyomolekŸlŸn Ÿ boyutlu yapısının iğne etkilerine karşı önemli derecede hassas olmasındır. BŸtŸn bu olumsuzluklara rağmen biyolojik molekŸllerin TPM teknikleri ile gŸrŸntŸlemeye karşı ilgi oldukça yŸksektir.

### **3. MATERYAL ve METOD**

Tasarlanan TTM cihazı mekanik, elektronik ve veri toplama bilgisayar yazılımı olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlere ait yapılan tasarım çalışmaları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

#### **3.1 Mekanik Tasarım**

Sistemin mekanik bölümleri; kaba yaklaştırma mekanizması, ince yaklaştırma mekanizması, piezo tüp ve tarama iğnesi konumlandırma mekanizması ve titreşim önleyici sistem olarak dört ana bölümden oluşmaktadır.

##### **3.1.1 Kaba yaklaştırma mekanizması**

Mekanik sistem, örnek ile tarama iğnesi arasında bir tünel akımının oluşmaya başlayacağı noktaya kadar yaklaştırılmaktadır. Ulaşılması gereken mesafenin hassaslığı, mekanik vibrasyona karşı izolasyon ve sistem kararlılığı göz önüne alındığında imal edilecek mekanizmanın önemi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle yaklaştırma mekanizması iki ayrı yaklaştırma düzeneğini ihtiva eder. Bunlardan bir tanesi hareket sistemi, 0.01mm hassasiyetli mikrometre kullanılarak imal edilen kaba yaklaştırma mekanizmasıdır. Bu kısmın imali için piyasadan 0.01mm hassasiyetli mikrometre alınarak ölçme amacıyla kullanılan bölümü sökümü, hassas vida olarak çalışan kısmından faydalanılmıştır. Bu vida yine piyasadan temin edilen bir rulman aracılığı ile bir alüminyum tablaya sabitlenmiştir.

##### **3.1.2 İnce yaklaştırma mekanizması**

Diğer yaklaştırma mekanizması ise 0.001 mm hassasiyetli iki sonsuz turlu çark sisteminden oluşan ve yüzeyi incelenecek numunenin yerleştirileceği tabla kısmını ihtiva eden ince yaklaştırma mekanizmasıdır. Bir sonsuz turlu vida, diğer bir dişli ve vida mekanizmasını hareket ettirerek aynı raylar üzerinde örnek tablasını düşey



yönde hareket ettirir. İmal edilen sistemde hareketler düşey yönde olmakta, örnek tablası yatay durmaktadır. Bu bölümde bulunan sonsuz turlu vida ve dişli mekanizması pirinçten yapılmıştır.

### **3.1.3 Piezo tüp ve tarama iğnesi konumlandırma mekanizması**

Piezo tarayıcıyı taşıyacak olan alüminyum bölüm ise yine rulman yardımıyla mikrometre vidasının ucuna tutturulmuş olan ana tablanın üzerine metrik 2 vidalar yardımıyla eklenmiştir.

Ana tabla aşağı ve yukarı yönde hareket ederken sağa ve sola hareket etmemesi için de iki yanından silindirik metal bloklara geçirilmiştir. Piezo tüpü taşıyan alüminyum bölüm de bu ana tabla ile birlikte hareket etmektedir. Tarama iğnesi ise sabitlenen bu yapının ucundaki piezo tüp içerisine bir mıknatıs vasıtası ile konumlanmıştır. Örneğin konumlanacağı yüzey ise baskı devre plakasından olup tüm kısımlardan izole olacak şekilde ve tarama iğnesinin odak noktasında olacak şekilde alüminyum plakaya sabitlenmiştir.

Piezo tüpler PI CERAMIC firmasından temin edilen PT130-14 modelidir.  $\pm 200V$  çalışma aralığında çalışmaktadır. Piezo tüp  $30\text{mm} \times 6.35\text{mm} \times 5.35\text{mm}$  boyutlarındadır. Eksenel yöndeki uzaması maksimum  $\pm 8 \mu\text{m}$ 'dir. Ayrıca radyal yöndeki uzama aralığı ise  $1.0 \mu\text{m}$ 'dir.

Tarama iğnesi ise NANOSCIENCE INSTRUMENTS firmasının TTM'ler için ürettiği STM TIP WIRE PART#20110 Pt<sub>8</sub>Ir<sub>2</sub> platin iridyum teldir. Kullanılan telin çapı  $0.25\text{mm}$ 'dir. Yan keski ile mümkün olduğu kadar büyük açıyla kesilerek yeniden sivriltilip bir süre aseton içinde bekletildikten sonra piezo tarayıcı üzerine monte edilmiştir.

### 3.1.4 Titreşim önleyici sistem

Dışarıdan gelecek titreşimlere ve titreşim yaratabilecek darbelere, mekanik vibrasyona karşı korunmak için mekanik kısım BELL SOUND SYSTEMS, INC.'in ürettiği darbe emici plakanın (hava yastığı) üzerine konumlandırılmıştır. Ayrıca bütün sistem yeterince büyük ve sabit bir masa düzleminin üzerinde kurularak kullanıma hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.1'de bu firmaya ait darbe emici plaka gösterilmektedir.



**Şekil 3.1** Mekanik bölümün konumlandırılacağı darbe – titreşim emici plaka.

## 3.2 Elektronik Tasarım

Sistemin elektronik bölümleri; bilgisayar kontrollü 200V bipolar güç kaynağı bölümü, akım – voltaj çevirici devresi, kontrol sistemi olarak 3 ana devreden oluşmaktadır. Ayrıca güç kaynağı içerisinde akım – voltaj çevirici için sabit gerilim kaynağı ile X – Y ve Z yönleri için ayarlanabilir ofset voltajı üretici bulunmaktadır.

### 3.2.1 Bilgisayar kontrollü 200V bipolar güç kaynağı bölümü

TTM tasarımında çalışma hassasiyeti göz önüne alındığında kararlılık ve gürültü, her aşamada dikkat edilmesi gereken en önemli konulardır. Bu nedenle baskılı devrenin tasarımından başlayarak, özellikle kullanılacak baskı devre plakalarına ve devre elemanlarının seçimine, devrenin imalat şekline ve de montaja oldukça önem verilmiştir.

Gürültü problemini köklü bir biçimde bertaraf etmek için baskılı devrenin bir yüzü toprak olarak kullanılmış, cihazın kutusu da tek noktadan bu yüzeye irtibatlanarak genel topraklama sağlanmıştır. Ayrıca elektromanyetik etkilere karşı trafo ile devrenin birbirlerinden yalıtımı gerçekleştirilmiştir.

TTM için hedeflenen sistemin çalışma prensipleri gereği yapılan güç kaynağının çift yönlü (bipolar) ve bilgisayar kontrollü olması gerekmektedir.

Gerilimin  $\pm 200$  V gibi yüksek bir değer olması nedeniyle böyle bir güç kaynağının tasarımında temel olarak malzeme sorunu ortaya çıkmaktadır. Yüksek gerilim altında çalışan ve bu özellikleri sağlayacak tek bir regülatör entegrasyonu mevcut değildir. APEX, NATIONAL ve MOTOROLA gibi bazı firmaların ürettiği yüksek güçlü işlemsel kuvvetlendiriciler mevcuttur. Fakat mevcut piyasadan bunları elde etmek mümkün olmadığından piyasadan temin edilebilecek malzemelerle bir güç kaynağı yapmak yoluna gidilmiştir. Dahası bu durumda dahi yüksek gerilim altında çalışacak "PNP" tip transistör bulmak kolay değildir. Yapılan piyasa araştırması sonucunda MJE340 ve MJE350 (FAIRCHILD SEMICONDUCTORS) "NPN" tip ve "PNP" tip transistör çiftinin kolay ve düşük maliyetli olarak temini mümkün olmuştur.

Güç kaynağının giriş bölümünde kullanılacak olan kapasitörler ise yüksek gerilim altında çalışabilecek 400V 330 $\mu$ F ve 400V 100 $\mu$ F olarak temin edilmişlerdir. Regülasyonu sağlamak için tasarlanan devrede kullanılacak zener diyotlar 5W'lık değerlerde seçilmiştir. Devrede standart bir işlemsel kuvvetlendirici olarak NATIONAL firmasının LF 356 JFET işlemsel yükselteci kullanılmıştır.

Bu işlemsel yükselteç, bilgisayar ortamından kontrol edilebilen bilgi aktarım kartından (B.A.K.) kontrol voltajının izlenmesi ve gerekli kazancın ayarlanması için kullanılmaktadır.

Fakat standart işlemsel kuvvetlendiricilerin bu gerilim altında çalışması mümkün olmadığından MJE340 ve MJE350 çiftinin bir tanesi, yüksek gerilimi

karşılama, işlemsel kuvvetlendiricinin besleme gerilimini sağlamak ve diğer katlar üzerindeki transistör çiftini sürmek amacıyla kullanılmıştır. İşlemsel kuvvetlendiricinin çektiği akım, çıkıştaki transistörlerin sürülme akımını belirlemektedir.

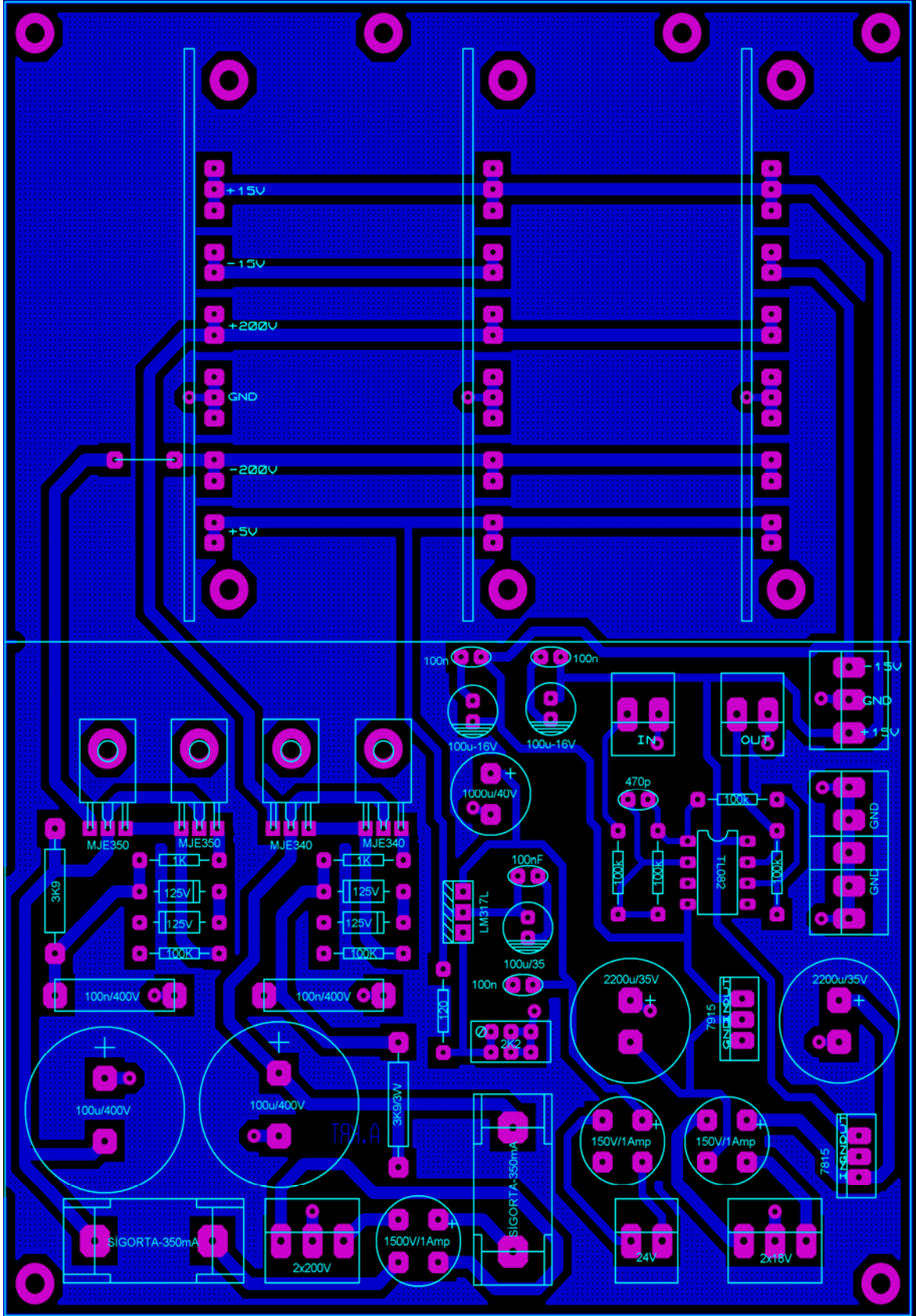
Çeşitli sebeplerden kaynaklanacak istenmeyen durumları engellemek amacıyla devrenin girişinde 400mA'lik sigortalar kullanılmıştır.

Ayrıca güç kaynağı tasarımında piezo tüpü X – Y ve Z düzlemlerinde konumlamak için kullanılacak sürücü devreler ise modüler olarak tasarlanmıştır. Özgünlük olarak öne çıkan bu bölümlerde ve ana güç kartının üzerinde bulunan bias (ön gerilim) bölümünde gelen sinyalleri gürültüden arındırmak için her bir modüle özgülü farklı kesim frekansında alçak geçiren filtre tasarlanmıştır. Bu filtrelerde kullanılmak üzere piyasadan %1 toleranslı dirençler temin edilmiştir. Ayrıca filtrede kullanılacak işlemsel yükselteç NATIONAL firmasının TL082 geniş bant aralığına sahip JFET işlemsel yükselteçidir.

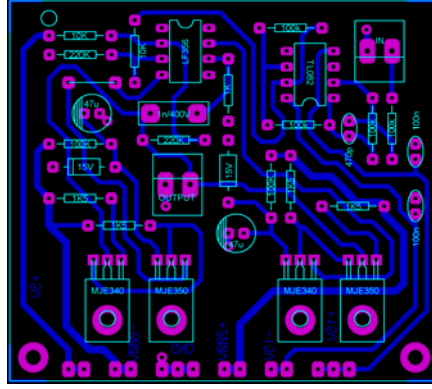
X – Y ve Z modüllerinde kullanılacak referans gerilim üretimi de güç kartı üzerine entegre bir şekilde tasarlanmıştır. 0 ile 24V aralığında referans gerilim üretimi çok turlu bir trimpot kullanılarak sağlanmıştır.

Ayrıca regülasyon için NATIONAL firmasının LM317 voltaj regülatörü kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan kapasitans değeri ise 50V 1000µF şeklindedir.

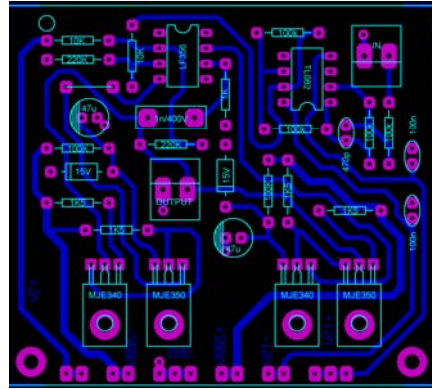
Tasarımı ve imalatı yapılan devreye ait baskı devre yerleştirme planının lehim yüzü Şekil 3.2'de, her bir bölüm için ayrı modül olarak tasarlanan, piezoelektrik tüpü X – Y ve Z yönlerinde sürmek için kullanılan, güç kartları ise sırasıyla Şekil 3.3'de sunulmuştur.



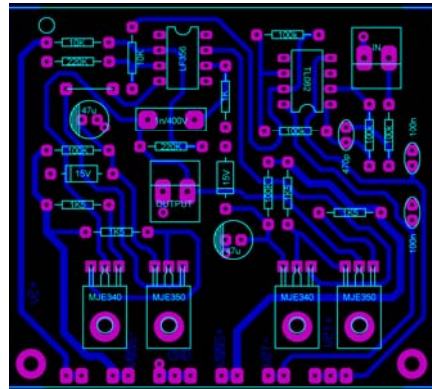
Şekil 3.2 Güç kartı bölümünün baskı devre şeması.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 3.3** Piezo tüpü X – Y ve Z yönünde hareket ettirmek için kullanılan güç devreleri: **(a)** X Bölümünün baskı devre şeması, **(b)** Y Bölümünün baskı devre şeması, **(c)** Z Bölümünün baskı devre şeması.

### 3.2.2 Akım – Voltaj çevirici bölümü

Tasarımın bu bölümünde Akım (I) - Voltaj (V) çeviricide kullanmak amacıyla piyasada kolay bulunan ve benzer diğer malzemelere göre daha ucuz olan BURR BROWN firmasının ürettiği OPA129 ultra düşük ön gerilimli işlemsel yükselteç

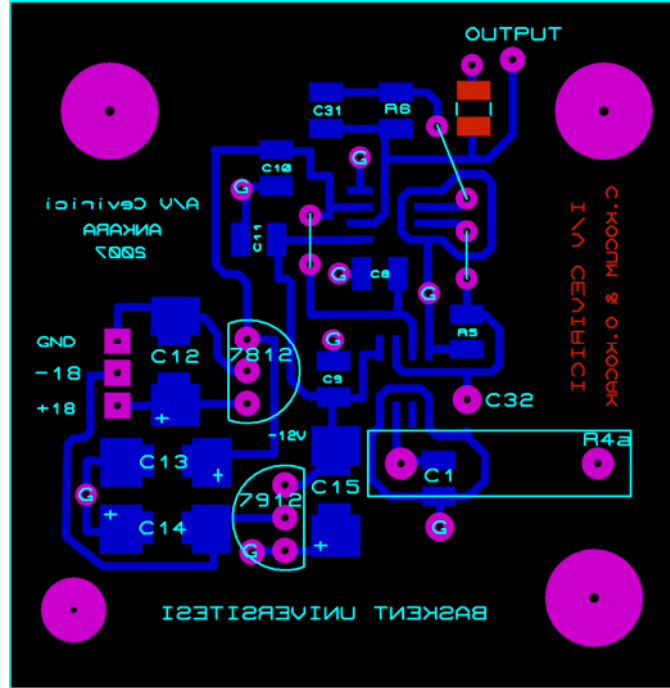
entegre devresi tercih edilmiştir. Tercih edilmesinin başlıca nedenleri; giriş uçlarının dielektrik izolasyonlu “FET” (Difet) tip bir işlemsel kuvvetlendirici olması, ( $10^{13} \Omega$ ) yüksek giriş empedansına sahip olması, buna karşılık giriş ofset voltajının (2 mV max) düşük olması, ayrıca ısıl kayma değerinin ise  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$  olmasıdır. Amaçlanan çalışma akımları (10pA - 1nA) son derece düşük olduğu için baskılı devreden kaynaklanacak sızıntı akımlarını engelleyebilmek amacıyla akım – voltaj çevirici devresinde kullanılan baskılı devre bu amaç için üretilen TACONIC marka teflon plaka olup çift yüzlü özelliğe sahiptir. Ayrıca kullanılan teflon plaka diğer baskı devre plakalarından farklı olarak oldukça esnek ve hafiftir (Şekil 3.4)



**Şekil 3.4** Kullanılan teflon baskı devre plakası.

Ayrıca I/V çevirici tasarımında da güç kaynağında uygulandığı gibi bir yüzü tamamen toprak olarak kullanılmış ve bütün devre bakır plakalardan oluşan bir kafes kutu içine alınmıştır. Kafes kutu aynı zamanda baskılı devrenin toprak yüzü tarafına kenarlar boyunca lehimlenmiştir. I/V çevirici üzerinde işleme tabi tutulacak bütün sinyaller blendajlı kablo kullanılarak taşınmıştır. Çevresel gürültülerden korunmanın bir diğer kuralı da sinyal kaynağına yakın olmaktır. Bu amaçla I/V çevirici devresi tarama iğnesinin hemen arkasına yani mekanik kısmın arka duvarına monte edilmiştir. Devreyi besleyen  $\pm 18\text{V}$  güç ise bipolar güç kaynağının trafosundan alınarak güç kaynağı içine yerleştirilmiştir. Aradaki mesafeden kaynaklanacak gürültüler ise I/V çeviricisinin besleme noktalarına çeşitli değerlerde kapasitörler konularak engellenmiştir.

$\pm 18V$  güç, NATIONAL firmasına ait 78L12 ve 79L12 pozitif ve negatif voltaj regülatörleri ile regüle edilmiştir. Devredeki elemanların büyük bir çoğunluğu yüzey montaj (surface mount) olarak tercih edilmiştir. İmalatı yapılan devreye ait yerleştirme planının lehim yüzü Şekil 3.5'de sunulmuştur.



Şekil 3.5 I/V çevircisinin yerleştirme planı.

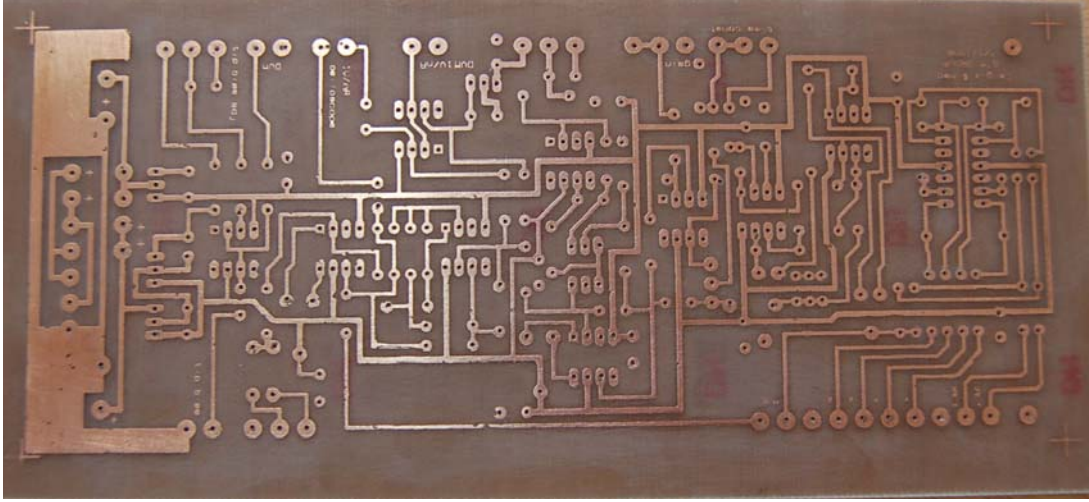
### 3.2.3 Kontrol bölümü

Tasarlanan TTM cihazının kontrol bölümü PI kontrol mantığı ile gerçekleştirilmiştir. Kontrol bloğu klasik eviren yükselteçten, doğrultma devresinden (mutlak değer), logaritmik yükselteçten, çarpma devresinden, integratör ve toplama devrelerinden oluşan klasik bir PI kontrol devresidir.

Giriş bölümünde 4700  $\mu F$  transistörler kullanılmıştır. Doğrultucu için kullanılan diyotlar ise 1N4001 tipidir. I/V çevirciden gelen sinyalin doğrultulmasında LM11 tip işlemel yükselteçler kullanılmıştır. Logaritmik yükselteç bölümünde ise TL082 entegresinden ve %1 toleranslı direnç değerlerinden yararlanılmıştır.



Çarpma ve toplama devrelerinde LM11 işlemsel yükseltici kullanılırken integratör bölümünde OP07 entegresi tercih edilmiştir. Ayrıca diğer bölümlerde uygulanan tasarım ve imalata dair tüm kurallar ve çeşitli uygulamalar aynen kontrol bölümünün tasarım ve imalatında da uygulanmıştır. Şekil 3.6'da tasarlanan kontrol bölümünün baskılı devre şekli görülmektedir.



**Şekil 3.6** Kontrol bölümü baskılı devre şekli.

### 3.3 Veri Toplama, Yazılım ve Bilgisayar Bölümü

Tasarlanan elektronik sistemin kontrolü için bilgisayar ve yazılımdan yararlanılmıştır. Mekanik ve elektronik kısımlarla birlikte görüntü elde edebilmek ve elde edilen görüntüyü iyileştirmek için hedeflenen amaçlar iki ana başlık altında incelenmektedir.

TTM cihazının kritik parçası olan tarama iğnesinin X - Y ve Z düzlemlerindeki hareketlerini gerçek-zamanlı olarak kontrol edebilmesini ve bu tarama iğnesinden alınan verileri kullanarak, örnek yüzeyinin gerçek-zamanlı topografik haritasının çıkarılmasını gerçekleştirmektedir.

Bu hedeflenen amaçları gerçekleştirmek için Başkent Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümünde bulunan, üniversite kullanım lisansına sahip NATIONAL

INSTRUMENTS firmasının ürettiği, LabVIEW programının 7.0 sürümü kullanılmıştır.

LabView programı, gerçek-zamanlı kontroller için özel araç kutularına (toolbox) sahip olduğundan ve üniversitemizde LabView uyumlu B.A.K. (DAC) bulunduğundan bu programın kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Bünyemizde bulunan bilgi alma kartları NATIONAL INSTRUMENTS firmasının üretmiş olduğu USB-NI6008 ve USB-NI6009 modelleridir. Şekil 3.7’de NI USB 6009 modelinin iç yapısı ve dış görünüşü görülmektedir.



**Şekil 3.7** NI USB 6009 B.A.K.’ın genel görünümü.

NI6008 ve NI6009 modellerinin 8 adet analog girişi ve 2 adet analog çıkışı bulunmaktadır. Ayrıca analog giriş değerleri  $\pm 10V$  aralığında, analog çıkış değerleri ise 0V ve 5V aralığında çalışmaktadır. Birbirlerinden farklı olarak NI6008 B.A.K. kartının giriş çözünürlüğü (input resolution) 12 bit iken, NI6009 modelinin giriş çözünürlüğü 14 bittir. Bu kartların çıkış çözünürlükleri ise (output resolution) 12 bittir. Ayrıca NI6008 modelinin maksimum örnekleme hızı 10kS/s iken, NI6009 modelininkiyse 48kS/s’dir. Kullanılan B.A.K. kartlarının içerdiği bu farklılıklar sistem için sorun teşkil etmemektedir.

Sistemde iki adet B.A.K. kartına ihtiyaç duyulmasının sebebiyse; bu kartların her birinde, AO0 ve AO1 olarak adlandırılan, 2 analog çıkış bulunmaktadır. Tasarlanan TTM sisteminin ise ön gerilim voltajı, X düzleminde hareket, Y düzleminde hareket

olmak üzere toplam 3 analog çıkışa ihtiyacı vardır. Ayrıca akım – voltaj çeviriciden gelen değerin kontrol yazılımına iletilmesi amacıyla B.A.K.'larda mevcut olan analog girişlere (AI1) ihtiyaç duyulmuştur. Mevcut bu yönelimleri gerçekleştirebilmek için iki tane B.A.K. kullanılmıştır.

TTM cihazının kontrol bölümü için LabView programı, elde edilen görüntülerin bilgisayar ekranı üzerinde çizdirilmesi ve üzerinde görüntü düzeltme (Image Enhancement) işlemlerinin yapılması amacıyla Başkent Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Bölümün'de bulunan üniversite kullanım lisansına sahip MATHWORKS firmasına ait MATLAB programının 7.2 numaralı sürümü kullanılmıştır. Matlab programı görüntü işleme konusunda çeşitli programlara göre çok gelişmiş olduğu ve kullanım kolaylığı sunduğu için tercih edilmiştir.

### **3.4 Görüntüleme Prosedürü**

Tüm bölümleri ile bütün bir sistem haline getirilen cihaz, toplanan verilerin görselleştirilmesi için kullanılan yazılımın da tamamlanmasından sonra görüntü alabilir duruma gelmiştir.

Sistemde görüntülemek için NANOSURF AG firmasının NanoGRID numunesi üzerinde çalışılmıştır. Örnek çeşidine bağlı olarak 0-2000 mV aralığında iğne-örnek öngerilim değerleri seçilerek 10 pA - 10 nA arasında çalışma akımları taranmıştır. Belirlenen en iyi parametreler kullanılarak tekrarlanabilir görüntüler elde edilinceye kadar görüntülemeye devam edilmiştir.

Elde edilen görüntüler Matlab programı yardımıyla çeşitli filtreleme işlemlerinden geçirilmiştir. Kullanılan bu filtre metotlarının ve etkinliğinin tartışması Sonuç Tartışma bölümünde aktarılmıştır.

## **4. SONUÇ ve TARTIŞMA**

Bu bölüm, yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemleri ve detaylarını içermektedir. Gerçekleştirilen çalışmanın ilk kısmında mekanik tasarım aşamalarından ve imal edilen parçalardan bahsedilmiştir. İkinci kısımda, elektronik tasarım gerçekleştirilirken göz önünde bulundurulmuş kriterler ile ortaya çıkan elektronik devreler ve kartlarla ilgili bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde ise gerçekleştirilen veri toplama ve bilgisayar yazılımı kriterlerine değinilmiştir. Dördüncü bölümde yüzey özelliği incelenen örnek görüntülerinin toplanması ile ilgili yapılan çalışmalardan ve ortaya çıkan tasarım problemlerinden bahsedilmiştir. Son olarak da çalışmanın genel bir değerlendirmesi yapılarak ortaya çıkan temel tasarım ve gerçekleştirme hatalarından ve bunlara karşı alınan tedbirlerinden söz edilmiştir. Her aşamada yapılan çalışmalar ve bunların sonuçları aşağıdaki bölümlerde sırasıyla incelenmiştir.

### **4.1 Mekanik Tasarım**

Çalışmanın bu aşamasında, örnek yüzeylerini görüntüleme amacına uygun bir TTM hareket ve örnek konumuyla sistemi tasarlanıp gerçekleştirilerek kullanılabilir hale getirilmiştir.

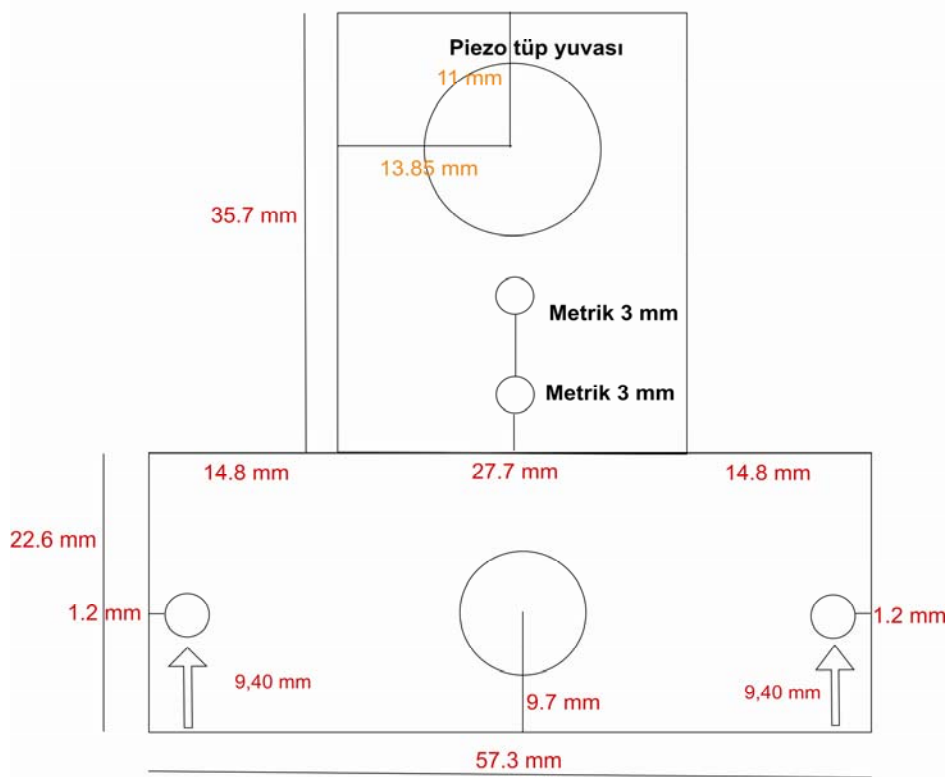
#### **4.1.1 Kaba yaklaştırma mekanizması**

TTM'de örneğin görüntülenmesi, algılanması hayli hassas bir konumlama isteyen tünel akımının elde edilmesiyle sağlanmaktadır. Bunun için yüzey özellikleri görüntülenecek olan örnek ile tarama iğnesi tünel akımının görülmeye başladığı ilk noktaya kadar mekanik bir sistem ile yaklaştırılmaktadır. Bu uzaklık yaklaşık 10 Å civarındadır. Tünel akımının görülmeye başladığı değerler ise bir osiloskop yardımıyla gözlenmektedir.

Ulaşılması gereken uzaklığın sahip olduğu hassaslık düşünüldüğünde imal edilecek mekanizmanın tasarımında dikkat edilecek gereksinimler ortaya çıkmaktadır.

Bu gereksinimlerin en kritik olanı tünel akımını algılamada yaklaştırma mekanizmasının iki ayrı bölüm şeklinde tasarlanmasıdır. Bunlardan birisi 0.01mm hassasiyetli mikrometre kullanılarak imal edilen kaba yaklaştırma mekanizmasıdır.

Bu bölüm tarama iğnesini dikey doğrultuda hareket ettirecek mikrometre başlığı ve piezo tüp tarama iğnesi bölümünün konumlanacağı alüminyum tablayı içermektedir. Kaba yaklaştırma mekanizması hareket sisteminin imali için piyasadan 0.01mm hassasiyetli mikrometre alınarak ölçme bölümü sökülmüş, hassas vida olarak çalışan kısmı bir rulman aracılığı ile taşıyıcı alüminyum tablaya sabitlenmiştir. Şekil 4.1’de imal edilen alüminyum parçanın ölçülü şematik çizimi görülmektedir.



**Şekil 4.1** Kaba yaklaştırma mekanizmasında kullanılan parçanın ölçülü şematik çizimi.

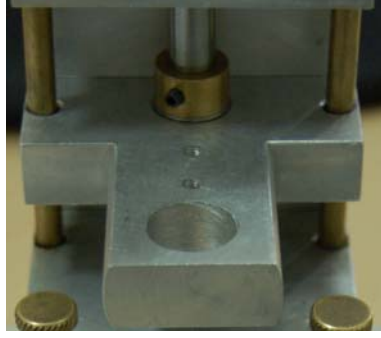
Parçanın uç bölümünde bulunan 14 mm çapa sahip boşluğa piezo tüp ve tarama iğnesi konumlandırılmıştır. Farklı boyutlarda tüpler, farklı boyut ve karaktere sahip örnek görüntülemeleri için kullanılacağından bu boşluğun çapı olabildiğince büyük imal edilmeye çalışılmıştır.

Piezo tüp yuvasının hemen altında metrik 3 (3 mm çapında) kılavuzlar kullanılarak dış açılmıştır. Bunun amacı ise piezo tüpü taşıyacak diğer tablanın kaba yaklaştırma mekanizması üzerine düzgün ve sağlam biçimde konumlanmasıdır.

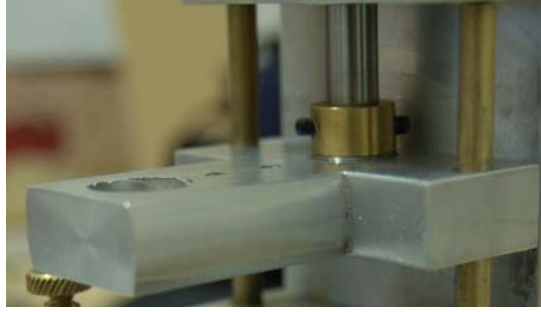
Kenardan 9.7 mm kadar içeride merkezi bulunan çembere, mikrometre kısmı bir rulman aracılığı ile monte edilmiştir. Aşağı ve yukarı yönde hareket bu prensiple sağlanmaktadır. Sağa ve sola hareketi engellemek için parçanın rulman yuvası bölümündeki kenarlara 1.2 mm uzaklıktaki çember boşluklardan silindirik metal borular geçirilmiştir. Sistem bu boruların üzerinde hareketini gerçekleştirmektedir. Parçaların hassas ve düzgün bir biçimde istenilen hareketi gerçekleştirebilmesi için metal borular ve rulman ince makine yağı ile yağlanmıştır. Böylece istenmeyen kasılmalar ve tek yönde kontrolsüz hareket önlenmiştir.

Parçalarda kullanılacak alüminyum piyasadan temin edilmiştir. Ölçülü resime göre imalatı ise Başkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne ait Mekanik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

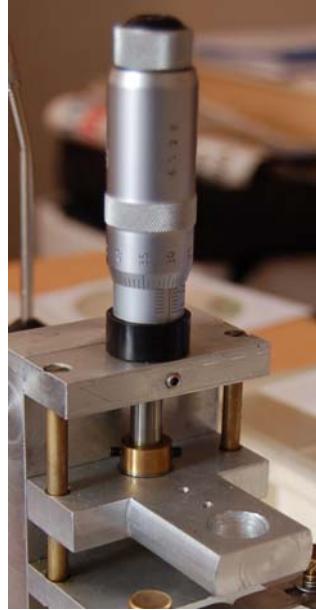
Üretilen kaba yaklaştırma mekanizmasına ait resimler aşağıda sunulmuştur. Şekil 4.2a' da sistemin önden görünüşü, Şekil 4.2b' de ise sistemin yandan görünüşü resmedilmiştir. Piezo yuvası ve taşıyıcı tabla için açılmış metrik 3 dişler bu şekillerde görülmektedir. Rulman yardımı ile birleştirilmiş mikrometre ve alüminyum parçanın görüntüsü Şekil 4.2c' dedir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.2** Kaba yaklaştırma mekanizması: **(a)** Sistemin önden görünüşü, **(b)** Sistemin yandan görünüşü, **(c)** Kaba yaklaştırma mekanizmasının sistemde kullanıma hazır hale getirilmiş görüntüsü.

#### 4.1.2 İnce yaklaştırma mekanizması

Diğer yaklaştırma mekanizması ise 0.001mm hassasiyetli iki sonsuz turlu vidadan oluşan ve örneğin yerleştirileceği tabla kısmını da içeren ince yaklaştırma mekanizmasıdır.

Kaba yaklaştırma mekanizmasının varlığı tünel akımını algılamak için yeterli değildir. Kaba yaklaştırma işleminden sonra tünel akımının başlayacağı noktaya kadar milimetrenin binde biri büyüklükte adımlarla gidilmesi gerekmektedir. Bunun için tasarımıımızda ince yaklaştırma diye isimlendirilen bu mekanizmaya ihtiyaç duyulmuştur.

Bir sonsuz turlu vida diğer bir dişli yardımıyla örnek tablasını kaba yaklaştırma mekanizmasının da bağlı olduğu metal raylar üzerinde düşey yönde (kaba yaklaştırma mekanizması ile aynı doğrultuda) hareket ettirmektedir. Bu bölümde bulunan sonsuz vida ve dişli mekanizması pirinçten yapılmıştır.

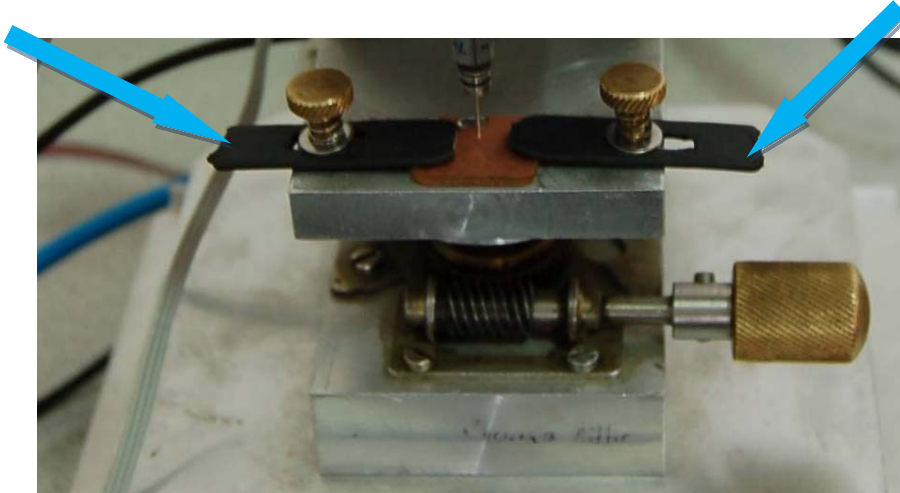
Örnek tablası da kaba yaklaştırma mekanizması konumlama tablası gibi alüminyumdan aynı prosedürler takip edilerek imal edilmiştir. Örnek tablasının üzerine yani piezo tüpün tam merkezine konulacak şekilde bir örnek tutucu bölümü yapılmıştır.

İncelenecek örnek ile tarama iğnesi arasında belli bir tünel akımının oluşabilmesi için örneğe bir ön gerilim vermek gerekir. Ön gerilim verilirken örneğin tüm sistemden izole olması şarttır. Bu kurallar göz önünde bulundurularak örnek konumlama sistemi için küçük bir baskı devre plakası, diğer çalışmalarımızda sıkça kullandığımız tipte, DC motor yardımıyla kesilmiş ve örnek tutucu bölümünün üzerine yapıştırılmıştır. Baskı devre plakasının iki yüzeyi birbirinden bağımsız bir yapıya sahip olduğu için, ön gerilimin verileceği ortamın sistemden izole edilmiştir.



Örnek konumlama tablası üzerinde örneği baskı devre plakasına sabitlemek için vida ve basit yaylardan oluşan bir kenetleme sistemi tasarlanmıştır. 2.5 cm boyundaki iki alüminyum çubuğun ortasına açılan delikten yay geçirilmiş vidalardan oluşan bir mekanizmadır. Vida ve yayın, çubukların üzerinde dengeli bir biçimde konumlanabilmesi için pullardan yararlanılmıştır. Vidalar, örnek tablası yüzeyi üzerine açılmış dişlere vidalanarak sabitlenir. Böylelikle yayın esnekliği sayesinde, farklı boyutlara sahip örneklerin örnek tablası üzerinde sabitlenmesi de bu sistemle birlikte mümkün olmaktadır.

Ön gerilimin verilmesi esnasında örnek diğer tüm birimlerden izole olmak zorundadır. Bunun için alüminyum çubuklar üzerine daralan boru geçirilerek yalıtım sağlanmıştır. Tasarlanan ince yaklaştırma mekanizması ve örnek konumlama tablası Şekil 4.3 de sunulmuştur.



**Şekil 4.3** İnce yaklaştırma mekanizması ve örnek konumlama tablası. Şekilde mavi oklarla gösterilen bölüm örnek konumlama mekanizması üzerine yerleştirilen ortamdan yalıtılmış örnek tutucularıdır.

İnce yaklaştırma mekanizmasında ortaya çıkan problemlerden biri metal raylar üzerinde hareketin düşey yönde düzgün bir şekilde sağlanmasıdır. Bunun için dişli sistemi örnek tablasının tam merkezine monte edilmiştir. Düzgün hareketi sağlamak için montaj işlemi aşamaları birkaç kez tekrarlanmış ve tünel akımı sınırının kolayca tespit edilebildiği görülerek iyi çalıştığına kanaat getirilmiştir.

Ayrıca dişli sistemi arasında zamanla birikecek toz vb. maddeler hassas hareketi güçleştireceğinden periyodik olarak sistemi yağlamak gerekmektedir.

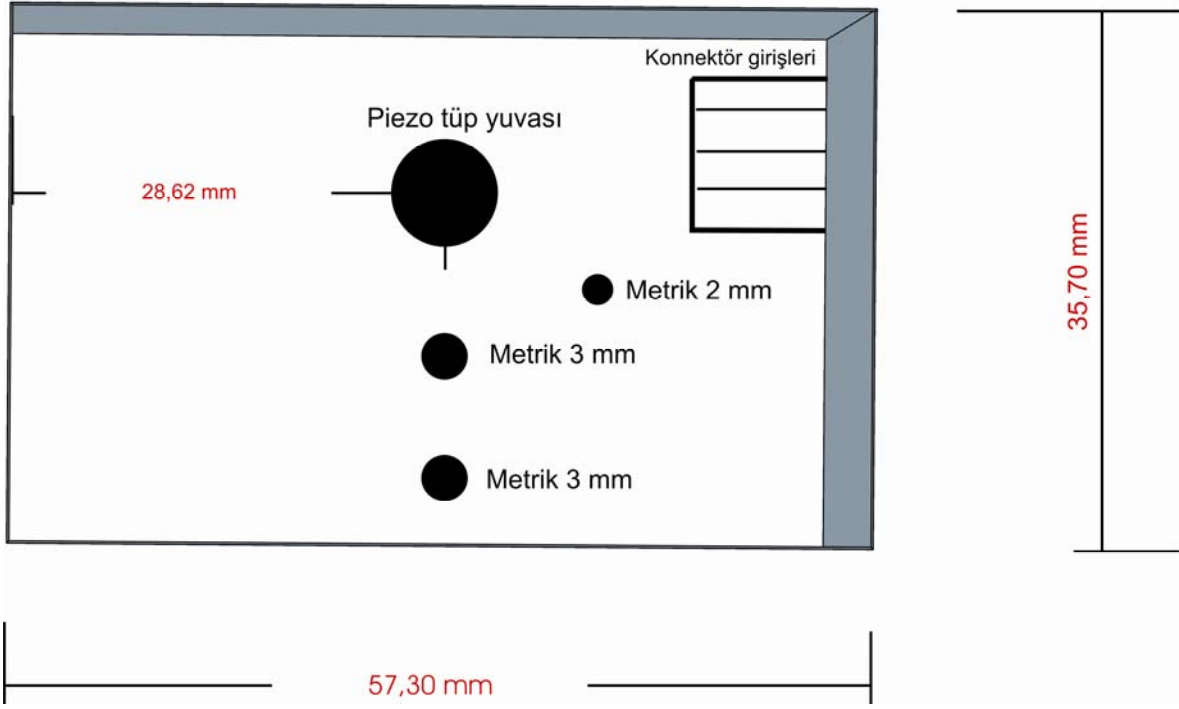
Örnek ile iğne birbirine pirinç vida yardımıyla operatör tarafından elle yaklaştırılırken kontrol devresi de iğneyi hareket ettirerek tünel akımını yakalamaya çalışmaktadır. Akımın algılanması için birçok kez tekrar yapılmıştır. Bu işlem kimi durumlarda oldukça fazla zamana mal olmaktadır. Bunun için sistemi kullanacak operatör tarama iğnesinin örnek üzerinde konumlanması konusunda oldukça dikkatli olmalı ve kontrol adımlarını gerekli hassasiyet çizgisine göre atmalıdır.

#### **4.1.3 Piezo tüp ve tarama iğnesi konumlandırma mekanizması**

Piezo tüp ve tüpün içerisine konumlanan tarama iğnesini örnek üzerine sabitleyecek alüminyumdan imal edilen bu parça; rulman yardımıyla mikrometre vidasına bağlanmış olan kaba yaklaştırma mekanizması, konumlama tablasının üzerine metrik 3 vidalar yardımıyla tutturulmuştur.

Bu parçanın tasarlanıp sisteme bütünleştirilmesiyle farklı piezo tüpler ile çalışabilme özelliği de başarılmış olmaktadır. Bu parçadan kendi çalışmalarımızda kullanılmak üzere 7 mm ve 10.5 mm tüp deliği çaplarına sahip iki adet imal edilmiştir. Mevcut olan piezo tüpleri sisteme takıp çıkartmak uzun zaman alıcı, zor ve riskli olduğundan tüpler yerine imal edilen bu alüminyum parçalar konumlama tablasına vidalanarak takılıp çıkartılabilmektedir.

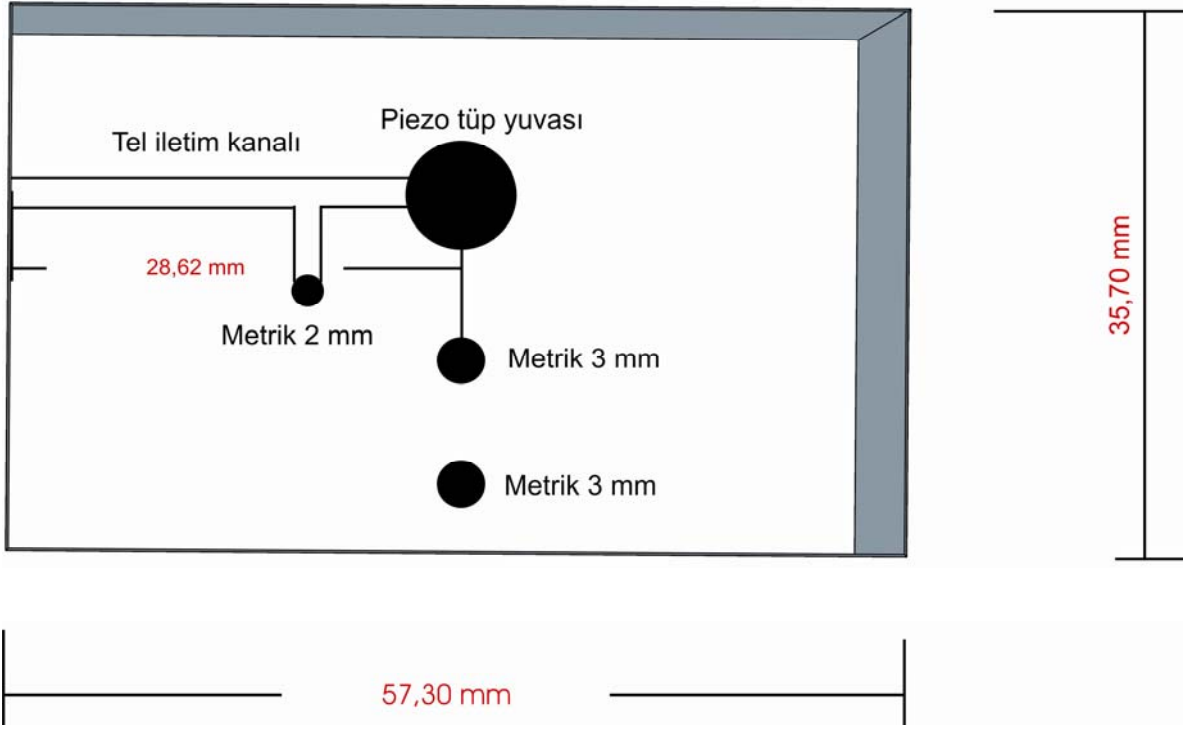
Sistemde ilk olarak 6.35 mm çapa sahip piezo tüp ile örnek taraması yapılmıştır. Bu tüp için imal edilen parçanın çapı 7 mm'dir. Piezo tüpün rahat bir biçimde montajı için yaklaşık 0.5 mm'lik açıklık pay olarak bırakılmıştır. Şekil 4.4'de imal edilen piezo tüp taşıyıcı parçanın ön yüzeyinin teknik özellikleri ölçülü şematik resim ile verilmiştir.



**Şekil 4.4** Piezo tüp taşıyıcı alüminyum parçanın ön yüzünün ölçülü şematik resmi.

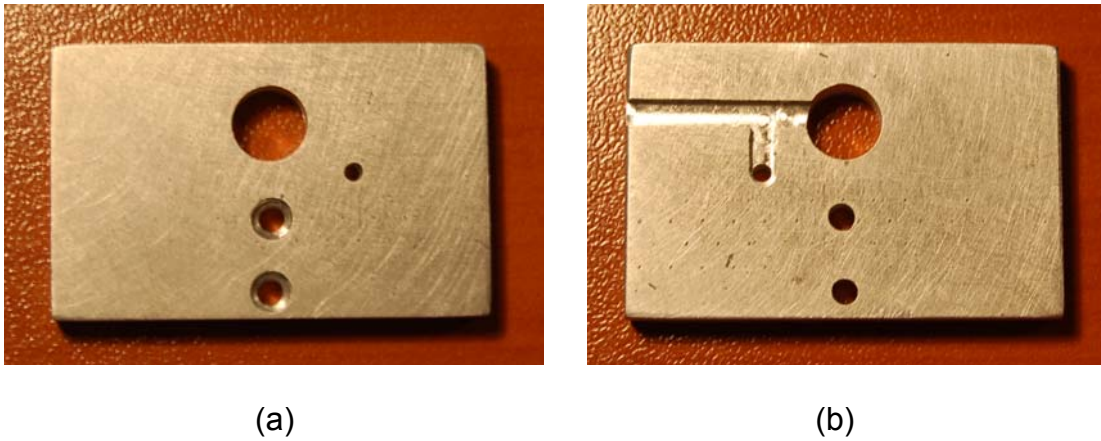
Piezo tütün konumlandırılacağı piezo tüp yuvası bölümünün hemen yanına 5 li konektör monte edilmiştir. Piezo tüpe gelen besleme voltajlarını irtibatlamak ve tütün gerekli bölgelerine yönlendirmek için konektör kullanımının uygun olduğu düşünülmüştür. Yüzeye açılan metrik 3 (3 mm çapında) vidaya uygun boşluklar aracılığıyla piezo tüp kaba yaklaştırma mekanizması tablasına monte edilmiştir.

Şekil 4.5’de piezo tüp konumlandırma sisteminin arka yüzü görülmektedir. Bu bölüm yüzeyine, 2 mm derinliğinde, konektör bloğunun tam altından olmak üzere bir tel iletim kanalı açılmıştır. Piezo tüpe gelen besleme kablolarının ortamda rastgele konumlanmasını engellemek için tel iletim kanalı içerisinde nakiller yapılmıştır. 2 mm çapında açılmış delik yardımıyla üst yüzeyde bulunan konektöre iletim sağlanmıştır.



**Şekil 4.5** Piezo tüp taşıyıcı alüminyum parçanın arka yüzünün ölçülü şematik resmi.

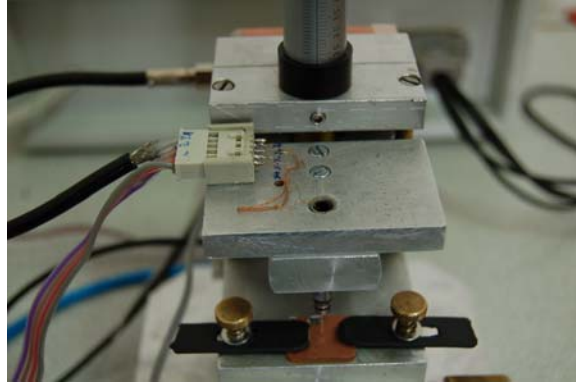
Şekil 4.6'da ise parçanın üretildikten sonraki durumu sunulmuştur. 4.6a'da üretilen alüminyum tablanın ön yüzü, 4.6b'de tablanın arka yüzü görülmektedir.



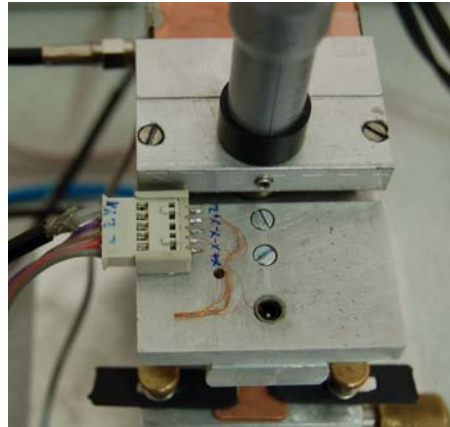
**Şekil 4.6** Üretilen alüminyum tablanın ön ve arka yüzeyleri: **(a)** Tablanın ön yüzü, **(b)** Tablanın arka yüzü.

Şekil 4.7’de piezoelektrik tüp ve tarama iğnesinin konumlandırma tablasına monte edildikten sonraki hali görünmektedir. Akım - gerilim çeviriciden ve güç kaynağından gelen sinyallerin piezo tüpe aktarımı, mekanik hareketi engellemeyecek şekilde sağlanmıştır. Bu tabla metrik 3 vidalar yardımıyla kaba yaklaştırma mekanizmasının üzerine monte edilmiş ve düşey yönde kaba ve ince yaklaştırma gerçekleştirilmiştir.

Tarama iğnesi, örnek üzerinde istenilen boyutlarda hareket edebilmesi için örnek konumlama plakasının geometrik merkezine karşılık gelecek şekilde konumlanmıştır. Tüm tabla ve plakaların tasarımı bu kritere göre gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4.7** Piezo tüp tarama ve konumlandırma mekanizması: **(a)** Piezo tüp ve tarama iğnesi konumlandırma tablası, **(b)** Piezo tüpün konumlama tablasının ve konektör bloğunun üstten görünümü.

#### 4.1.4 Titreşim önleyici sistem

Görüntüleme esnasında kullanıcıdan kaynaklanan ve sisteme doğrudan etkiyen mekanik titreşim ve darbelerin sisteme etki etmesini engellemektedir. Ayrıca trafo gürültüsü ve bilgisayar kasasından kaynaklanan mekanik gürültülerin sisteme etkisini gözle görülür şekilde azaltmaktadır. Darbe emici plaka (hava yastığı) kullanılarak yapılan testlerle, kullanılmadan yapılan testler arasında gürültü yönünden farklılıklar gözlemlenmiştir. Her ölçümde sistemde bulunmasına karar verilmiştir. Bunun için plakanın üzerine sistemimizi sabitleyecek kaymaz plastik ayaklar monte edilmiş ve tüm mekanik aksam bu darbe emici plakanın üzerine konumlandırılmıştır.

#### 4.1.5 Tarayıcı piezoelektrik tüp

Çalışma kapsamında kullanılan tarayıcı tüp dört kuadranlı yapıdan oluşmaktadır. Bu tip piezoelektrik tüplerle üç boyutta hareket mümkündür. Bir ucu piezoelektrik tüp konumlama sistemine sabitlenmiş tüpün dıştaki karşılıklı elektrotlarına uygulanan gerilim, X - Y yönlerindeki merkezden sağa (pozitif) ve sola (negatif) olan hareketi sağlar. İçteki elektrod ise tüpün genişip büzülerek Z yönünde hareketine olanak verir.

Böyle bir tüpte karşılıklı elektrotlara uygulanan gerilimle x(y) yönünde atomik seviyede hareket sağlanmış olur. Bu da örnek yüzeyinde tarama yapmanın genel prensibidir.

Kalınlığı  $h$ , uzunluğu  $l$  olan çubuk şeklindeki bir tarayıcıya  $U$  voltajı uygulandığında boy değişimi ( $\Delta l$ ), Denklem 4.1'de ki gibi tanımlanmıştır [65].

$$\Delta l = d_{31} \frac{l}{h} U_p \quad (4.1)$$

Burada  $d_{31}$  kullanılan kristale ait piezoelektrik katsayısıdır. Bu çubuklardan üç tane kullanılarak tripot şeklinde tarayıcı yapmak ve üç boyutta hareket sağlamak mümkündür.

$$\Delta x(\Delta y) = 2\sqrt{2}d_{31} \frac{l^2}{\pi Dh} U_{x(y)} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'ye göre piezoelektrik tüpün bükülme miktarı (m),  $d_{31}$  piezoelektrik sabiti, D piezoelektrik tüpün iç çapı (m), l piezoelektrik tüpün boyu (m), h piezoelektrik tüpün duvar kalınlığı (m), U elektrodlar arasına uygulanan gerilimdir (V).

Bu çalışmada tarama amaçlı kullanılan piezoelektrik tüpün +X, -X, +Y, -Y yönlerinde hareketi için dört yüzeye gerilim uygulanmıştır. Bu gerilim güç kaynağından piezo tüpe ince trafo telleri yardımıyla aktarılmıştır. Ayrıca bu teller piezo üzerine gümüş boya (silver paint) denen kurduğunda iletken duruma geçen özel bir tip yapışkan ile tutturulmuştur. Lehim piezonun karakteristiğini değiştireceğinden gümüş boya metodu tercih edilmiştir. Teller yüzeye ve iç kısma yapıştırıldıktan sonra yapılan bağlantıların kalitesi ohmmetre ile test edilmiştir. Her bir bağlantının direncinin  $10\Omega$ 'dan küçük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.8'de kullanılan piezo tüpe gerilim tellerinin gümüş boya ile tutturulması görülmektedir.



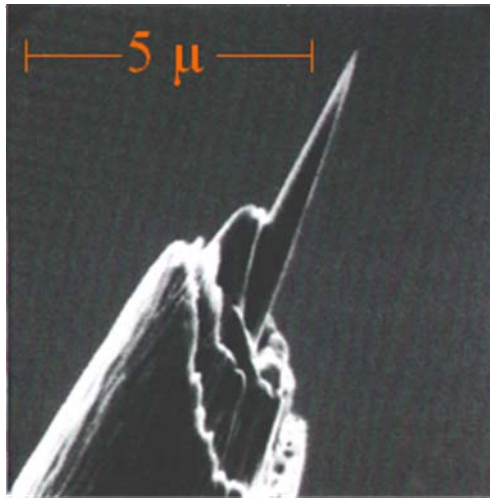
**Şekil 4.8** Piezoelektrik tüp ve gerilim telleri.

#### 4.1.6 Tarama iğnesi

Atomik çözünürlükteki TTM çalışmalarında tarama iğnesinin ucunun tek atom olması önemlidir, ancak iğnenin makroskopik yapısı çok kritik değildir. Tünel akımı, iğne-örnek arasındaki uzaklığa üstel olarak bağımlı olduğundan örneğe en yakın olan atomun etkisi ağırlık kazanır[4]. 3 Å ve daha uzaktaki atomların etkisi önemsiz hale gelir. Bağlı olarak büyük moleküllerin TTM çalışmalarında, iğnenin makroskopik yapısı da önem kazanmaktadır. Yüzeyledeki çukur yapıların dip noktalarının görüntülenebilmesi için iğnenin uca doğru olan konik şeklinin açısı önemlidir.

Çalışma kapsamında görüntü elde edilmesi işlemlerinde Pt/Ir (Platin/İridyum) iğneler kullanılmıştır. İğneler uygun bir kesici ile (maket bıçağı, jilet, yan keski) mümkün olduğunca küçük bir açıyla kesilir. Pt/Ir iğneler diğer iğnelere göre oda koşullarında basit kesme yöntemleriyle atomik çözünürlükte çalışmaya imkân sağlarlar.

Yan keski ile kesilmiş Pt/Ir iğnenin TEM fotoğrafı Şekil 4.9'da sunulmuştur. Sunulan çalışmada iğne hazırlama yöntemi olarak, kolay, hızlı ve ucuz çalışmaya olanak sağladığı için mekanik kesme yöntemi tercih edilmiştir. Mekanik kesme yönteminin bir avantajı da iğnenin hazırlanması sırasında oluşan kimyasal oksidasyon sorununun olmamasıdır.



**Şekil 4.9** Pt/Ir TTM iğnesinin TEM resmi [4].



#### 4.1.7 Tarayıcı tüp ile tarama iğnesinin bir araya getirilmesi

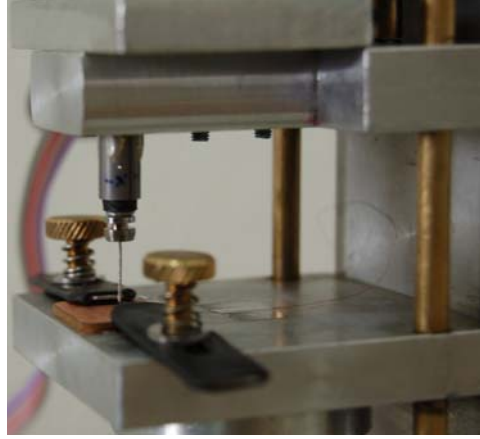
Tarama iğnesi ise kaba yaklaştırma mekanizması tablasına sabitlenen bu yapının ucundaki piezo tüp, içerisine silindirik bir metal ve mıknatıs vasıtası ile konumlanmıştır. Piezo tüpün içerisine piezo tüpün iç çapına yakın (yaklaşık 5.35 mm) çapta bir silindirik metal, daralan boru yardımıyla tüpten izole edilecek şekilde sabitlenmiştir. Buradaki amaç piezoelektrik tüpe uygulanan yaklaşık  $\pm 200V$  gerilimden mıknatısı korumaktır. Hareket etmeyecek şekilde sabitlenmiş, daralan boru ile izole edilmiş olan silindirin ucuna bir mıknatıs gümüş boya (silver paint) yardımıyla yapıştırılmıştır. Sisteme sabitlenmiş bu mıknatısa, uygun boyda kesilmiş ve Pt/Ir'den yapılmış, tarama iğnesinin metal tutucusu konumlandırılmıştır.

Şekil 4.10a ve Şekil 4.10b'de sisteme adapte edilmiş tarama iğnesi ve piezoelektrik tüpün yakından çekilen görüntüleri sunulmaktadır.

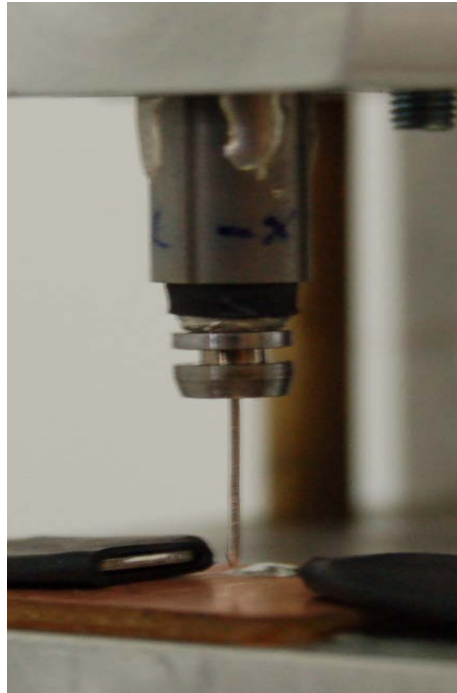
Mıknatıs metal silindirin üzerinden kolaylıkla ayrılabileninden dolayı iğne değişimi ve modifikasyonu sadece saniyeler mertebesinde yapılabilmektedir. Sistemi baştan sökmeye ve piezo tüpü sistemden ayırmaya bu metodun geliştirilmesiyle birlikte gerek kalmamıştır.

Fakat bu sistem piezonun iç elektrodu ile mıknatıs arasında pF seviyelerinde de olsa bir kapasitans oluşturduğu için, X –Y ve Z tarama sinyallerinin gelmesiyle birlikte I/V çevirici üzerinde bir gürültüye neden olmuştur. Bu nedenle piezo tüpe konumlanacak olan tarama iğnesi tutucusu yeniden tasarlanmıştır.

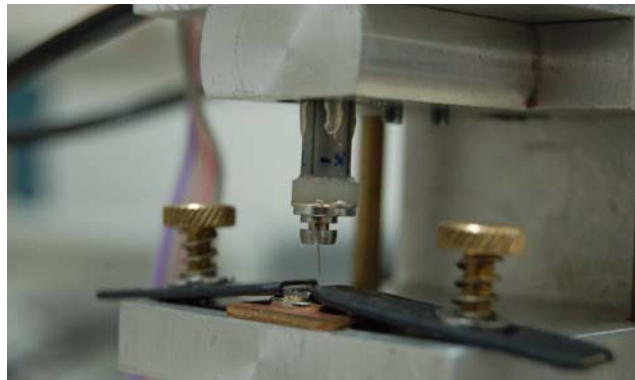
Bu yeni tasarımda küçük bir poliamid parçası imal edilerek piezoya tutturulmuştur. Mıknatıs ve iğne tutucusu ise bu poliamid parça üzerine monte edilmiştir. Bu sayede mıknatıs ve iğne tutucusunun piezo tüpten en az 8mm uzakta olması sağlanmıştır. Böylece yüksek gerilim altında çalışan piezo tüp ile iğne tutucusu arasında bir kapasitans oluşması engellenmiştir. Şekil 4.10c'de yeni tasarlanan iğne tutucusunun fotoğrafı verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

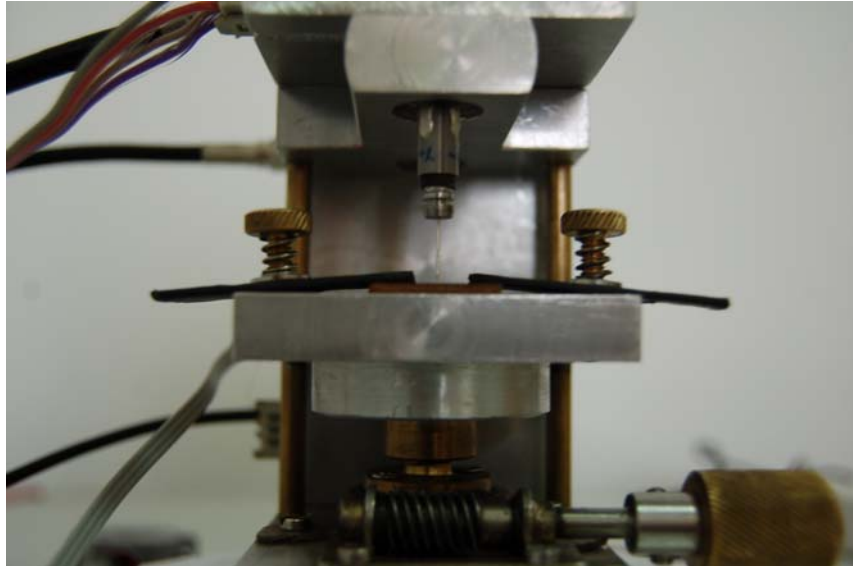
**Şekil 4.10** Tarayıcı (piezo) tüp ile Pt/Ir tarama iğnesinin bir araya getirilip sisteme monte edilmesi: **(a)** Piezo tüp, tarama iğnesi ve mıknatıs sisteminin yandan görünümü, **(b)** Piezo tüp, mıknatıs ve tarama iğnesinin yakından görünümü, **(c)** yeni tasarlanan iğne tutucusunun görünümü.

#### 4.1.8 Tarama kafası ile mekanik aksamın bir araya getirilmesi

Kaba yaklaştırma mekanizması ve konumlama tablası, ince yaklaştırma mekanizması ve örnek konumlama merkezi, piezoelektrik tüp ve tarama iğnesi konumlandırma mekanizması başarı ile imal ve montaj edilerek titreşim önleyici sistem (hava yastığı) üzerinde konumlandırılmıştır.

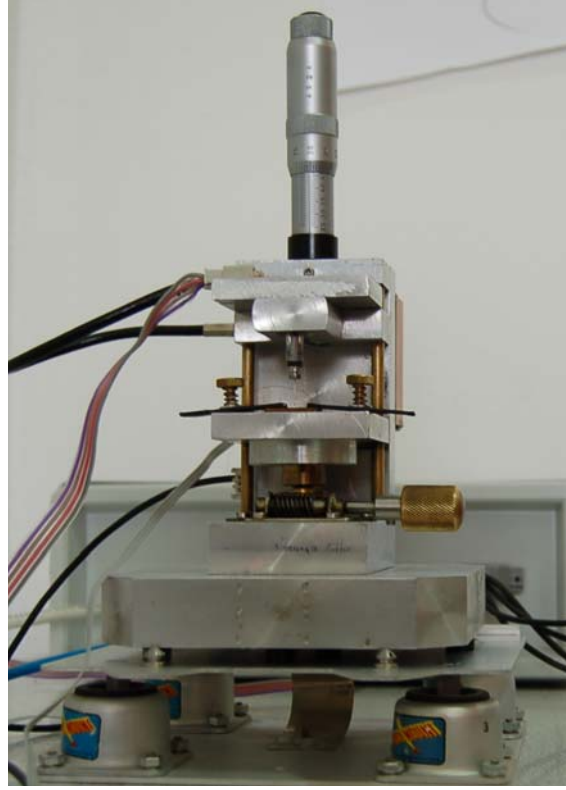
Alüminyumdan yapılan ana tablanın üzerine ince yaklaştırma mekanizması alyan vidalar yardımıyla sabitlenmiştir. Daha sonra metal raylar sisteme adapte edilerek gerekli sabitleme tamamlanmıştır. Ardından kaba yaklaştırma mekanizması ve onun hareketini sağlayan mikrometre sistemi raylara geçirilerek ana blok üzerinde sabitlenmiştir. Son olarak piezo tüp ve tarama iğnesinin sabitlendiği alüminyum tabla, kaba yaklaştırma mekanizması tablasına vidalarla sabitlenerek mekanik tasarım tamamlanmıştır.

Şekil 4.11'de tamamlanan mekanik tasarımın ince yaklaştırma mekanizması ve piezo tüp ile tarama iğnesinin konumlandırıldığı bölüm görülmektedir.

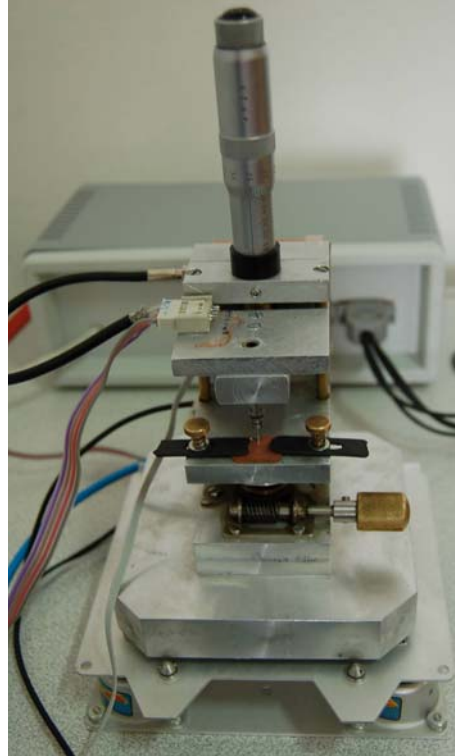


**Şekil 4.11** Mekanik sistemin önden görünümü.

Şekil 4.12a ve 4.12b'de mekanik sistemin tüm bölümleriyle elektronik sistem ile bir araya getirilmeye hazır hali görülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 4.12** Mekanik sistemin tamamlanmış hali: **(a)** Mekanik sistem hava yastığı ile birlikte konumlandırılması, **(b)** Mekanik sistemin genel görünümü.

## 4.2 Elektronik Tasarım

Çalışmanın elektronik kısımlarının tasarım ve imalatı aşamasında gerçekleştirilen devreler,  $\pm 200$  V bipolar bilgisayar kontrollü güç kaynağı, akım (I) / voltaj (V) çevirici ve kontrol devresinden oluşmaktadır. Ayrıca güç kaynağı içerisinde I/V çevirici için sabit gerilim kaynağı ile X – Y ve Z yönleri için ayarlanabilir ofset voltajı üretici bulunmaktadır.

Bu elektronik tasarım ile TTM’de piezo tüplerin sürülmesi, referans voltaj üretimi ve akım - voltaj çevirici devrenin beslenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca hedeflenen tünel akımının algılanması ise I/V çevirici tarafından gerçekleştirilecektir. Bu tasarımlara ait parametreler aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

### 4.2.1 200V bipolar bilgisayar kontrollü güç kaynağı bölümü

TTM de X – Y ve Z yönlerinde (üç boyutta) hareket, bir piezo tüp ve bu piezo tüpe uygulanan gerilim aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak olan piezo tüpler  $\pm 200$ V besleme gerilimi ile çalışabilmektedir. Bu sınırlar içerisinde en yüksek tarama alanı ve tünelleme uzaklığının kararlılığı voltaj yükselticinin özelliklerine bağlıdır. Bu amaçla tarama yönleri için, bilgisayar aracılığı ile kontrol edilebilen bipolar yüksek voltaj güç kaynağı tasarlanıp imal edilmiş, çalışma parametreleri test edilerek aşağıda sunulmuştur.

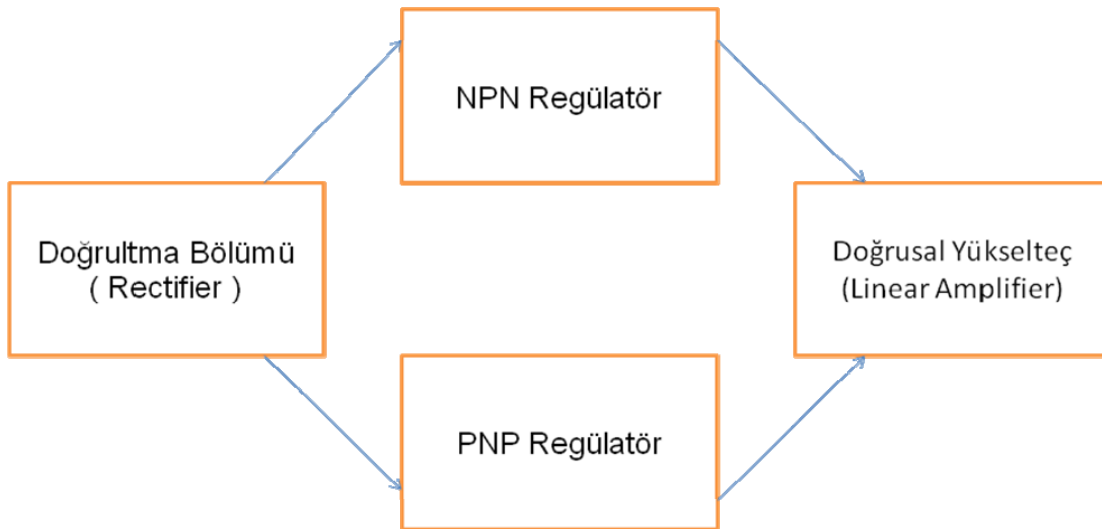
#### 4.2.1.1 Voltaj regülasyonu ve X – Y – Z kazançları

Materyal metod bölümünde bahsedildiği gibi güç kaynağında X – Y ve Z yönlerinde hareketi sağlayacak olan devreler güç kaynağı regülasyon bölümünden ayrı küçük kartlar şeklinde basılmış ve ana karta dikey olarak monte edilmiştir. Böylelikle kullanılan kutu içerisinde yer tasarrufuna gidilmiştir (Materyal Metod Bölümü Şekil 3.2 ve 3.3). Ayrıca kartların gerçekleştireceği işlemlerin karakteristikleri açısından kazanç ve frekans özelleşmesine gidilmiştir.

$\pm 200V$  gibi yüksek gerilim değerleri için hazır regülatör entegreleri olmadığından regülasyon devresi ayrı olarak tasarlanmıştır. İlk önce trafonun  $\pm 200V$  çıkışı kullanılarak gerçekleştirilen regülasyon devresinde, bu değerin transistörlerde fazla ısınmaya neden olduğu saptanmıştır. Daha sonra başka bir trafo sardırılarak mevcut sarım değerlerine ek olarak  $\pm 180V$  eklenmiş ve regülasyon devresi buradan beslenmiştir. Sonucunda yapılan testlerde ısı problemlerin transistörlerin karakteristiğini etkilemediği tespit edilmiştir.

$\pm 180 V$  trafo çıkışından gerilim ısınmaya karşı 5W'lık köprü diyotlar yardımıyla doğrultulmuş ve 400V - 400 $\mu V$ 'luk kapasitörler ile filtrelenmiştir. Çıkıştaki gürültü değerleri her aşamada ölçülmüştür. En ideal değeri veren kapasitörler kullanılmıştır. Daha sonra sinyalin, 150V ve 50V'luk 5W'lık zener diyotlar seri bağlanarak yaklaşık  $\pm 197V$ 'a regüle edildikleri bir voltmetre yardımıyla ölçülmüştür.

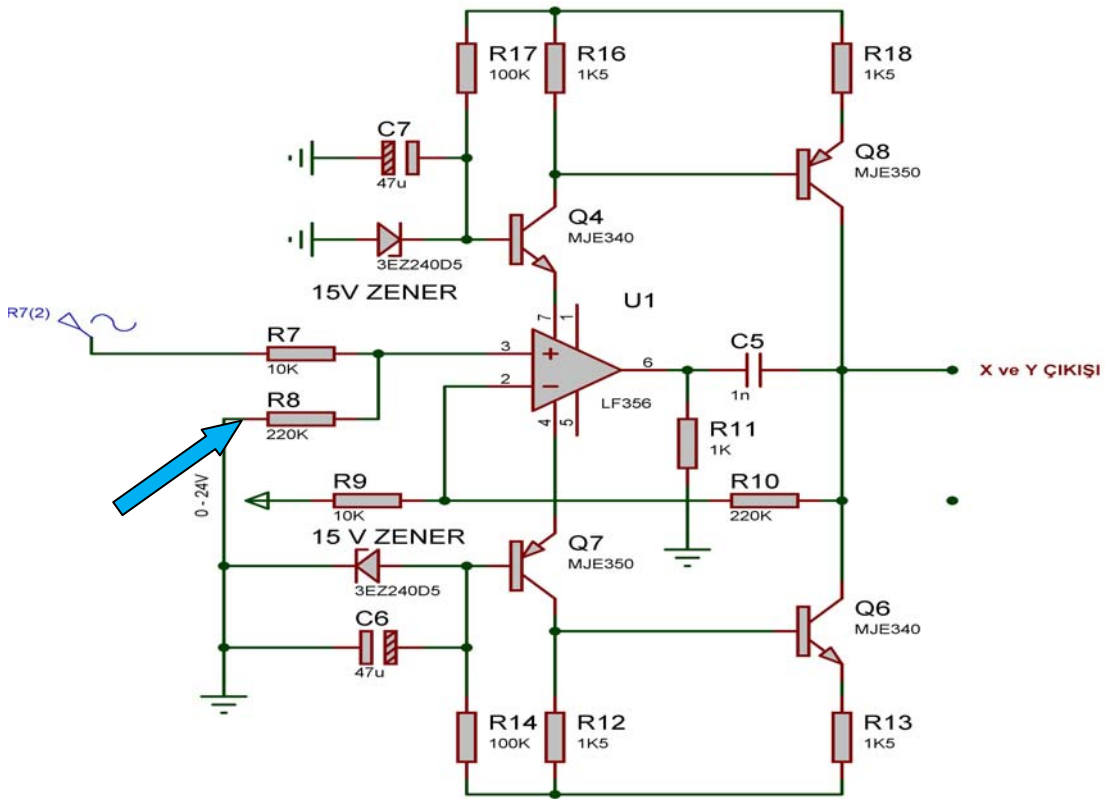
Şekil 4.13'de gösterildiği gibi  $\pm 200V$  değerine regüle edilen sinyal X – Y ve Z güç devrelerini (amplifikatörlerini) sürmek için gerekli gerilimi sağlar. Fakat standart işlemsel kuvvetlendiricilerin bu gerilim altında çalışması problem yaratabileceğinden kartlar üzerindeki MJE340 ve MJE350 çiftinin bir tanesi, yüksek gerilimi karşılamak, işlemsel kuvvetlendiricinin besleme gerilimini sağlamak ve üzerindeki transistör çiftini sürmek amacıyla kullanılmıştır.



**Şekil 4.13** Güç kaynağı blok şeması.

İşlemsel kuvvetlendiricinin çektiği akım çıkıştaki transistörlerin sürülme akımını belirlemektedir. X – Y ve Z güç amplifikatörleri lineer olarak çalışmaktadır. Bu özelliği sayesinde giriş sinyalinin formu ve fazı bozulmadan ve istenilen seviyeye yükseltilerek çıkıştan alınmaktadır.

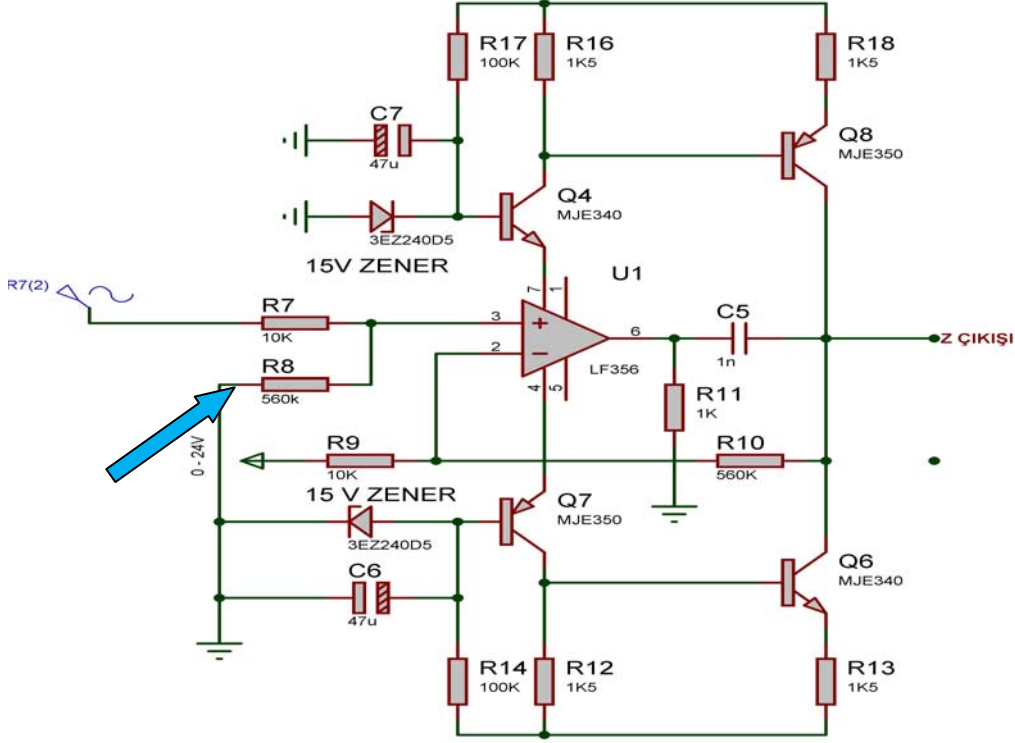
Tasarlanan güç kaynağı, çıkış voltajları 0 ile 5V aralığında olan, Pentium IV 1.GHz işlemcili, 1GB DDR RAM'li bir (PC) bilgisayara monte edilmiş BAK kartlar ile kontrol edilmiştir. X ve Y tarama yönleri için kazanç 22 değerine ayarlanmıştır. BAK kartlar negatif voltaj üretmediğinden negatif değerlerde voltaj vermek için yazılımdan yararlanılmıştır. Daha sonra X ve Y'de çıkış voltajının  $\pm 55V$  aralığında kontrol edilip edilemediği test edilmiştir. Şekil 4.14'de X ve Y güç devrelerine (amplifikatörlere) ait devre çizimi sunulmuştur.



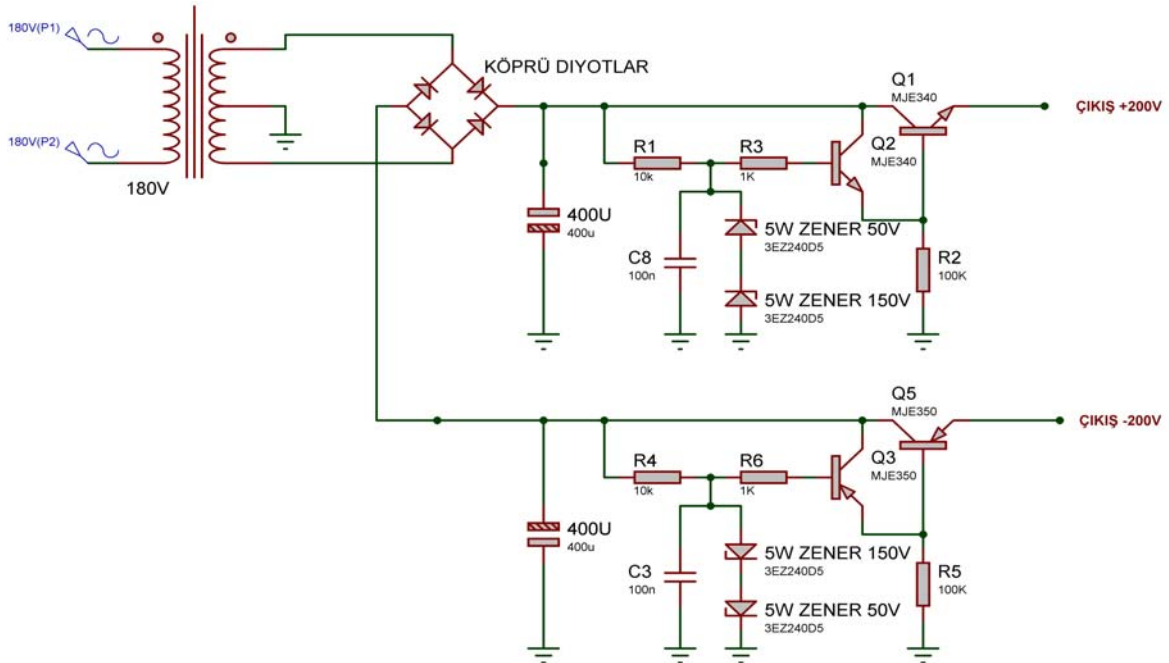
**Şekil 4.14** X ve Y güç amplifikatörü devre şeması. Şekilde mavi ok ile gösterilen direnç kazanç ayarlamada kullanılmaktadır.

Z tarama yönünde tünel akımı algılama ve çıkış voltajı üretme işi PI kontrol bölümü tarafından gerçekleştirilmiştir. Hassas bir tarama hedeflendirildiğinden kazanç 56

olarak ayarlanmıştır. Buna göre Z tarama aralığının  $\pm 140V$  olup olmadığı hem güç kartı üzerinden hem de mekanik blok üzerindeki konektörlerden test edilmiştir. Şekil 4.15'de Z güç devresine (amplifikatörüne) ait devre çizimi sunulmuştur.



Şekil 4.15 Z güç amplifikatörü devre şeması. Şekilde mavi ok ile gösterilen direnç kazanç ayarlamada kullanılmaktadır.



Şekil 4.16 Doğrultma ve Regülasyon devresi.



Tüm değerlerin multimetre ve osiloskop ile istenen gerilim aralıklarında rahatlıkla kontrol edilebildiği görülmüştür. Şekil 4.16'da regülasyon kısmına ait devre tasarımı sunulmuştur.

#### **4.2.1.2 Frekans Bantları**

Tasarlanan elektronik bölümde X – Y ve Z bölümleri (amplifikatörleri) için ayrı karakterlerde R-C filtre devreleri tasarlanmıştır. Ayrıca yazılım yardımıyla üretilen ön gerilim voltajı için de bir filtre tasarımına gidilmiştir. Bu filtre güç kartı ana bölümüne diğer elemanlarla birlikte basılmıştır.

X ve Y devreleri için  $100k\Omega$  ile  $1nF$  kullanılarak yaklaşık  $1.5KHz$ 'lik bir frekans değerine ulaşılmıştır. Hızlı tarama değerlerine çıkılacağı düşünülerek Z devresinde  $100k\Omega$  ve  $220pF$  değerleri kullanılarak yaklaşık  $7.2KHz$ 'lik bir kesim frekansı elde edilmiştir. Ön gerilim değerinin idealde tam bir DC (doğru akım) gibi davranması istenir. Bu nedenle ön gerilim değerine yüklenebilecek bir gürültü için  $100k\Omega$  ve  $470nF$  değerleri kullanılarak yaklaşık  $3Hz$ 'lik bir filtre tasarlanmıştır. Filtre devreleri için TL082 işlemsel yükseltici ile %1 toleranslı dirençler kullanılmıştır. Böylelikle istenilen değerler nizami olarak elde edilmiştir. Bu değerler bir fonksiyon jeneratörü ile amplifikatörlere sinüs fonksiyonu uygulanarak genlik kaybı olmaksızın ve sinüs fonksiyonunun formu bozulmaksızın filtreleme işleminden çıkabildiği en yüksek frekans değerleri saptanmış ve uygun oldukları görülmüştür. Her bir güç devresi için kazanç ve frekans değerleri Çizelge 4.1'de görülmektedir

**Çizelge 4.1** Güç devreleri için kazanç ve frekans tablosu.

GÜÇ DEVRESİ	KESİM FREKANSI	KAZANÇ
X DEVRESİ	1.5KHz	22
Y DEVRESİ	1.5KHz	22
Z DEVRESİ	7.2KHz	56
ÖN GERİLİM BÖLÜMÜ	3Hz	-

#### **4.2.1.3 Tırmanma zamanı**

X – Y ve Z amplifikatörlerinin girişlerine kare dalga uygulanarak 0V'dan en yüksek gerilim değerine kadar olan tırmanma zamanı ölçülür. Laboratuvar şartlarında kullandığımız osiloskop dijital olduğu için her türlü tarama sistemini barındırmaktadır ve sonuçlar takip edilebilmektedir. Tarama hızı 1.5KHz seviyesinde olduğu için bu test daha çok kararlılık açısından önemlidir. Sistemin kapasitif yük altında osilasyon eğiliminde olup olmadığı, step fonksiyondan sonraki dalgalanma süresi “sustain” olup olmadığı test edilmiş, ancak herhangi bir osilasyon ve dalgalanma görülmemiştir.

#### **4.2.1.4 Gürültü değerleri**

X – Y ve Z amplifikatörlerinin girişleri BAK kartlara ve toprağa bağlanarak minimum ve maksimum gerilim aralıklarında devrenin gürültü ve regülasyon özellikleri osiloskop ile test edilmiştir. TL 082 entegresi ve %1 toleranslı dirençler kullanılarak imal edilen filtreden önce sistemlerin her birinde tepeden tepeye yaklaşık 500mV'luk bir gürültü tespit edilmiştir. Filtreleme işlemi gerçekleştirildikten sonra gürültü değerinin dramatik bir şekilde tepeden tepeye 10mV değerine düştüğü gözlenmiştir.

#### **4.2.1.5 Toprak döngüsü (Ground Loop)**

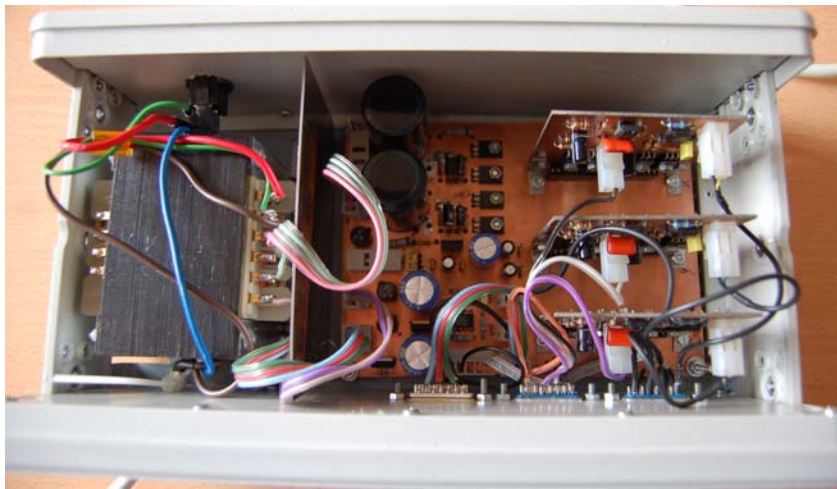
İmal edilen devrelerde kullanılan baskılı devrenin bir yüzü tamamen toprak olarak kullanılmış, toprak noktasına bağlanacak bütün devre elemanlarının ayakları bu yüze bağlanmıştır. Ayrıca tüm kabloların ve elemanların yıldız bağlantı metoduna göre topraklanması gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonunda gürültü sorununun bağlantı noktalarına bağlı olan kısımları üstesinden başarıyla gelinmiştir.

#### **4.2.1.6 X – Y ve Z amplifikatörleri çıkış empedansı ve kapasitif yükleme**

Bir işlemsel kuvvetlendiricinin çıkış empedansı geribesleme devresi ile ayarlanabilir. Fakat gerilim kaynağı olarak kullanılacak olan bir amplifikatörde geribesleme devresi daha çok açık çevrim kazancından kapalı çevrim kazancına inebilmek için kullanılır.

X – Y ve Z voltaj amplifikatörleri kapasitif yük olarak davranan piezo tarayıcı tüpü sürmek amacıyla tasarlanmıştır. X ve Y doğrusal yükselteçlerinde geri besleme dirençleri  $R_F=220K\Omega$ ,  $R_1=10K\Omega$ , olarak seçilmiş kazanç 22 değerine ayarlanmıştır. Z'de ise geri besleme dirençleri  $R_F=560K\Omega$ ,  $R_1=10K\Omega$  seçilmiş ve kazanç 56 değerine ayarlanmıştır.

Amplifikatörlerde 1.5KHz'in altında çıkış empedansı  $m\Omega$  seviyelerindedir. Hâlbuki bağlantı kabloları ve ara bağlantılar çok daha yüksek empedansa sahiptir. Bu nedenle düşük frekanslarda çıkış empedansının fazla bir önemi yoktur. Yüksek frekanslarda ise reaktif ve kapasitif yükler nedeniyle çıkış empedansı önem kazanmaktadır. TTM'nin tarama frekansı da son derece yavaş olduğu için faz kompanzasyonu ve kararlılık açısından bir sorun ortaya çıkmamaktadır. Şekil 4.17'de tasarlanıp imal edilen  $\pm 200V$  bipolar güç kaynağının kutu içerisindeki yerleşimi görülmektedir.



**Şekil 4.17**  $\pm 200V$  bipolar güç kaynağının elektronik bölümlerinin kutu içerisindeki yerleşimi.

Şekil 4.18'de ise sistemin kutulandıktan sonraki kullanıma hazır hali sunulmaktadır.



**Şekil 4.18**  $\pm 200V$  bipolar güç kaynağının kutulanmış şekli.

#### 4.2.2 I/V çevirici için sabit gerilim kaynağı

Sistemin en kritik parçalarından birisi olan lazer I/V akım çeviricinin çalıştırılabilmesi için  $\pm 15V$  güç kaynağına ihtiyaç vardır. Bu amaçla piyasada kolaylıkla bulunabilen 7815 ve 7915 voltaj regülatör entegrelerinden faydalanılmıştır.

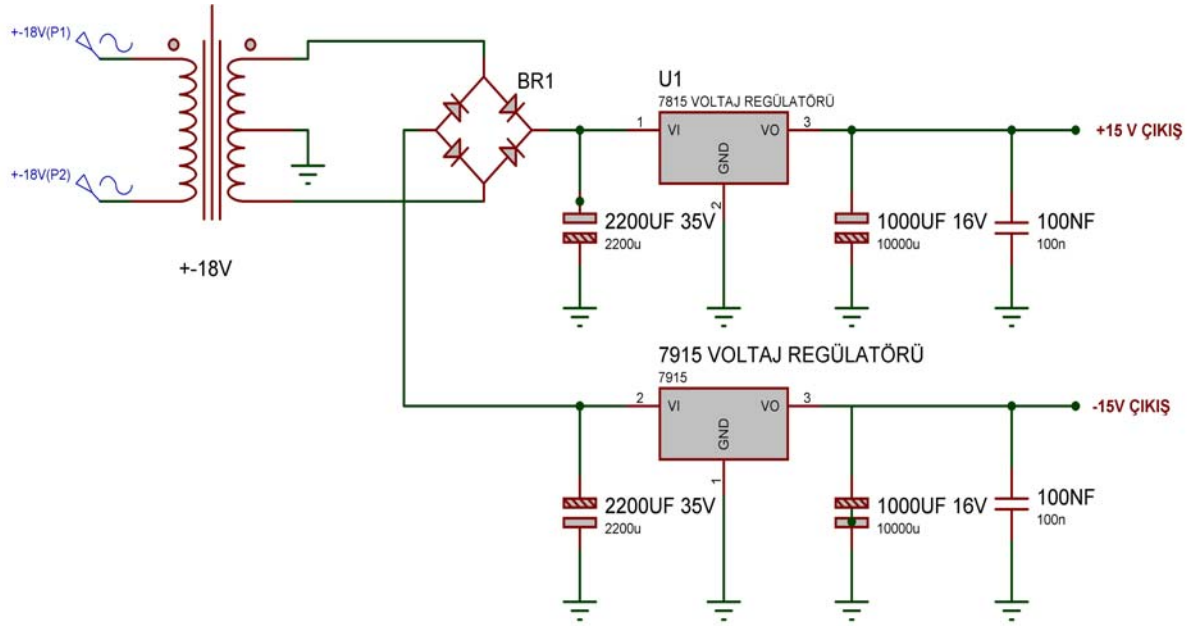
Üretici firmaların verdiği bilgilere göre verimli bir regülasyon için entegre girişine bağlanacak trafo geriliminin regülasyon değerinden en az 3V fazla olması gereklidir. Bu değer 35V değerine kadar ulaşabilmektedir.

Fakat gereğinden fazla gerilim uygulanması halinde, çekilen akımla orantılı olarak regülatör entegresi üzerinde ısı olarak harcanacak enerji miktarı artmakta, bu da soğutma problemi yaratmaktadır. Bu nedenle hem soğutma probleminden kurtulmak hem de uygun bir regülasyon sağlamak amacıyla girişe 18V uygulanmıştır. Böylelikle entegreler üzerinde ısıl problem sorunu çözülmüştür.

Hassas olarak  $\pm 15V$  çıkışları elde edilmiştir. Çıkış noktasında kullanılan  $10\mu F$  değerindeki kondansatör ise regülasyon sırasında oluşan yüksek frekanslı gürültüleri filtre etmek amacıyla kullanılır. Bu amaçla üretici firmanın tavsiye ettiği değer değişiklik yapılmaksızın kullanılmıştır.

Güç kaynağının çıkış gerilimi incelendiğinde dalgalanmanın, yük altında tepeden tepeye değerinin  $1\text{ mV}$ 'un altında olduğu görülmüştür. Özel bir durum söz konusu değilse bu değer sabit gerilim kaynakları için yeterli bir sonuçtur. Ayrıca bu gerilim değerleri ana kart ve güç devreleri üzerinde bulunan filtre entegrelerini beslemek içinde kullanılmıştır.

Tasarlanıp imal edilen sabit gerilim kaynağının elektronik devre şeması Şekil 4.19'da sunulmuştur.



Şekil 4.19 I/V çevirici için sabit gerilim kaynağı.

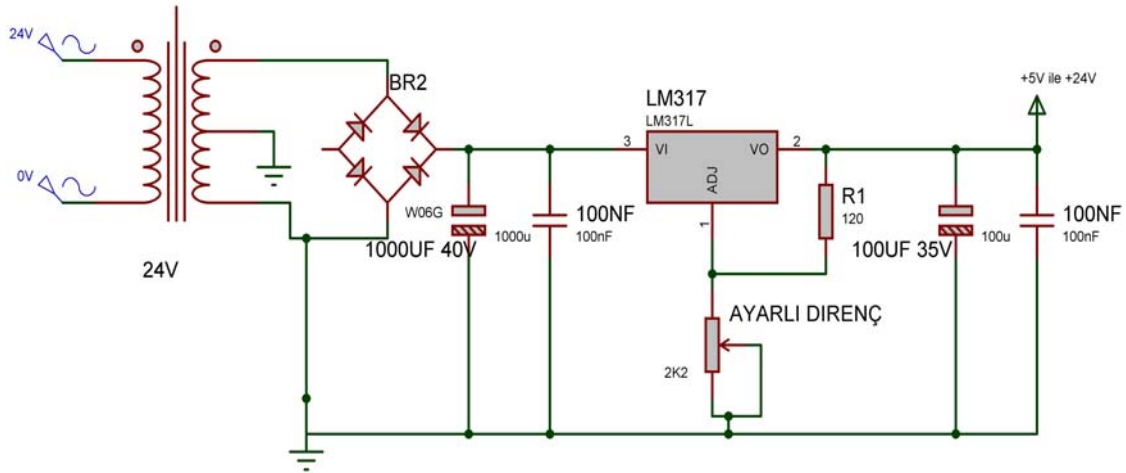
#### 4.2.3 X – Y ve Z güç amplifikatörleri için ayarlanabilir ofset voltajı üretici

X – Y ve Z yönündeki konumlama bilgileri bilgisayarda tasarlanarak B.A.K. kartlar aracılığıyla güç amplifikatörlerine gönderilir. X – Y ve Z güç

amplifikatörlerinin çıkışları yükseltilebilir sinyali piezo tüpe yönlendirilerek üç boyutta konumlandırma sağlar.

Fakat negatif yönde konumlandırma yapabilmek için (negatif voltaj üretmek) elimizdeki mevcut B.A.K. kartlarının negatif çıkışı (negatif voltaj üretme yeteneği) bulunmamaktadır. B.A.K. kartların çıkışları 0V ile 5V arasındadır. Bunun için 5V çıkış değerinin 2.5V değerine ayarlanması gerekmektedir. Böylelikle 2.5V çıkış değeri 0V değerine, 0V çıkış değeri ise -2.5V değerine ayarlanmış olur. Son durumda çıkış değerleri -2.5V ile 2.5V arasına gelmiş olur. Bu ayarlama ise güç amplifikatörlerine Şekil 4.21 de sunulan ofset voltajı üretici ile mümkün olmaktadır.

B.A.K. kart çıkışı bilgisayar ortamında 0V değerine getirilip ofset voltajı ayarlı direnç yardımıyla osiloskoptan -2.5V değerini görene kadar ayarlanır. Güç amplifikatörü çıkışında -55V değeri görüldüğünde ise ofset voltajı istenilen aralığa ayarlanmış olur. Bu ayarlamalardan sonra piezo tüpün çalışma aralığı  $\pm 55V$  aralığa ayarlanmıştır ve çıkış değerleri osiloskoptan okunmuştur. Şekil 4.20'de ayarlanabilir ofset gerilim üreticinin elektronik devre çizimi görülmektedir.



**Şekil 4.20** Ayarlanabilir ofset gerilim üretici.

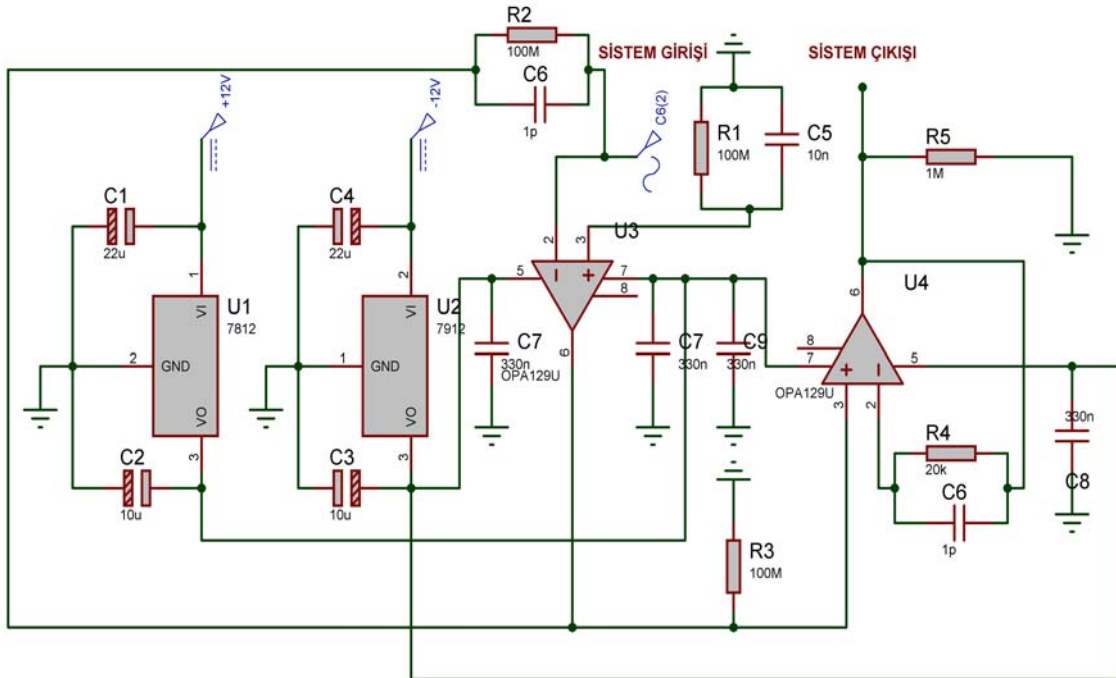
#### 4.2.4 I/V çevirici devre

Akım – voltaj çeviriciler zayıf akımları sayısal sistemlerin algılayabilip işlenebilir voltaj seviyesine çıkartan yükselteçlerdir.

Görüntülenmek istenen örnek ile tarama iğnesi arasında oluşacak tünel akımının algılanması ve bu algılanan değere bağlı olarak iğnenin dikey eksende hareketi projenin temelini oluşturmaktadır. Bu nedenle ölçme devresinin çalışma koşulları içindeki performansının bilinmesi ve koşullara uygun devrenin tasarlanması son derece önemlidir. Bu temel göz önüne alınarak Şekil 4.21’de devre şeması verilen bir I/V çevirici devre tasarlanıp imal edilmiştir.

Gelen sinyalin kararlılığı sistemin de kararlılığını doğrudan etkileyeceğinden I/V çeviricisinin, gürültüden arındırılmış olması, çok düşük çalışma akımları gerektiğinden yüksek empedanslı bir girişe sahip olması, giriş ofset-voltajı ve ofset-akımlarının olabildiğince düşük olması ve zaman sabitlerinin uygun seçilmiş olması gereklidir.

Tasarlanan devre standart işlemsel kuvvetlendiricili bir I/V çeviricisidir ve devrede kullanılan işlemsel kuvvetlendiricinin teknik özelliklerine son derece bağlıdır.



**Şekil 4.21** I/V çevirici devre blok şeması.

Bu nedenle BURR BROWN firmasının ürettiği OPA129 ultra düşük ön gerilimli işlemsel yükselteç entegre devresi tercih edilmiştir. Bu işlemsel yükselteci tasarlanan devrede kullanmak için birçok simülasyon testi yapılmıştır. Birçok alternatif yükselteç belirlenmiş ve piyasadan temin edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerin sonucunda OPA129'un kullanılmasına karar verilmiştir. Bu entegrenin tercih edilmesindeki kritik etken çok düşük giriş akımlarını karşılayabilmesidir. Femto amper (fA) seviyelerinde giriş akımı sağlarken gürültü ve ofset değerlerinin de diğer yükselteçlere göre daha tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Firmanın kataloğunda verdiği uygulamalara sadık kalınarak imal edilen devrenin elektronik açıdan performansı aşağıda tartışılmıştır. Çizelge 4.2 ve 4.3'de seçilen işlemsel yükselteçlerin teorik verileriyle, simülasyon sonuçları görülmektedir.

**Çizelge 4.2** Seçilen işlemsel yükselteçlerin teorik verileri.

		Giriş Akımı	Drift	Gain	Gürültü	Ofset
OPA27		80 nA	0.4 $\mu$ V/°C	117dB	4.5nV/ $\sqrt$ Hz	100 $\mu$ V
OPA111		1pA	1 $\mu$ V/°C	120dB	8nV/ $\sqrt$ Hz	250 $\mu$ V
OPA129		100fA	10 $\mu$ V/°C	94dB	15nV/ $\sqrt$ Hz	2mV
OPA627		5pA	0.8 $\mu$ V/°C	120dB	4.5nV/ $\sqrt$ Hz	100 $\mu$ V
OPA703		1pA	4 $\mu$ V/°C	120dB	45nV/ $\sqrt$ Hz	160 $\mu$ V
MAX4238		1pA	10nV/°C	140dB	30nV/ $\sqrt$ Hz	0.1 $\mu$ V
AD8601		60pA	2 $\mu$ V/°C	83dB	18nV/ $\sqrt$ Hz	500 $\mu$ V
AD8603		1pA	4.5 $\mu$ V/°C	100dB	22nV/ $\sqrt$ Hz	50 $\mu$ V
AD8605		1pA	4.5 $\mu$ V/°C	120dB	6.5nV/ $\sqrt$ Hz	65 $\mu$ V
AD8615		1pA	7 $\mu$ V/°C	120dB	8nV/ $\sqrt$ Hz	65 $\mu$ V

**Çizelge 4.3** Seçilen işlemsel yükselteçlerin simülasyon sonucu elde edilen değerleri.

		Giriş Akımı	Frekans	Gürültü	Ofset
		(teorik)			
OPA27		80 nA	1kHz	67 $\mu$ V	11V
OPA111		1pA	60khz	3 $\mu$ V	13.56mV
OPA129		100fA	1MHz	4 $\mu$ V	12mV
OPA627		5pA	15MHz	4 $\mu$ V	13mV
OPA703		1pA	0hz	0 $\mu$ V	1mV
MAX4238		1pA	500Hz	8.5 $\mu$ V	1.193V
AD8601		60pA	3MHz	4 $\mu$ V	2.439mV
AD8603		1pA	100kHz	4 $\mu$ V	250.31 $\mu$ V
AD8605		1pA	8MHz	4 $\mu$ V	467.61 $\mu$ V
AD8615		1pA	8Mhz	4 $\mu$ V	424.87 $\mu$ V



#### 4.2.4.1 Devrenin çalışma aralığı

Tasarlanan devrede, örnek ile tarama iğnesinden algılanacak çalışma akımları 10 pA ile 1 nA değerleri arasındadır. Tasarlanan devrenin transfer fonksiyonu Denklem 4.3'de gösterilmektedir.

$$V_o = - (I_i)R \quad (4.3)$$

Burada  $V_o$  çıkış gerilimi (V),  $I_i$  giriş akımı (A), R geri besleme direncidir ( $\Omega$ ). Denklem 4.3'deki transfer fonksiyonundan anlaşıldığı gibi çıkış sinyali negatif değere sahiptir. Bu nedenle de kontrol bölümü içerisinde mutlak değer alma fonksiyonu ile sinyalin işareti değiştirilmiştir.

Sinyalin lineer hale getirilmesi için kontrol bölümünde bir logaritmik yükselteç kullanılmıştır. Sistemin kazancı 50 kat olacak şekilde tasarlanmıştır. Devrenin birinci kısmı akım voltaj çeviricisidir ve geri besleme direnci 100M $\Omega$  olarak seçilmiştir. İkinci kısım ise yükseltme görevini üstlenir. Kullanılan dirençler ise 2k $\Omega$  ile 100k $\Omega$ 'dur. Böylelikle 50 kat kazanç sağlanmış olur. Çizelge 4.4'de, tasarlanan devrenin giriş akımına karşı çıkış voltaj değeri görülmektedir.

**Çizelge 4.4** Giriş akımı çıkış voltajı değerleri.

GİRİŞ AKIMI	ÇIKIŞ VOLTAJI	KAZANÇ
10pA	50mV	50
100pA	500mV	50
1nA	5V	50

#### 4.2.4.2 Giriş ofset akımı

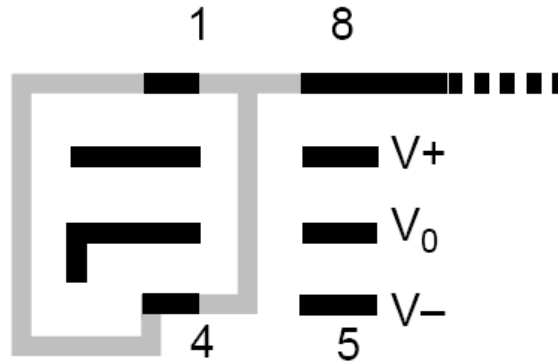
Seçilen işlemsel kuvvetlendiricide giriş ofset akımı yaklaşık 30 fA seviyelerindedir. İmal edilen TTM sisteminin çalışma akımı ise 10pA ile 1nA'dır. Ofset akımı düşük çalışma akımları için önem kazanmaktadır. Fakat seçilen işlemsel kuvvetlendiricinin giriş ofset akımı minimum çalışma akımından çok küçük

olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir. Seçilen işlemsel yükseltecin diğer yükselteçlere göre artı özelliklerinden biri de giriş ofset akımı değerinin çok düşük olmasıdır.

#### 4.2.4.3 Sızıntı akımı

Baskılı devreden kaynaklanan sızıntı akımlarını engellemenin yollarından biri giriş uçlarının etrafının çevrilmesidir. Bu işlem bir koruma halkası yaratarak bu uçlar ile giriş uçlarının aynı potansiyele gelmesini sağlamaktadır. Böylelikle sızıntı akımı önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

Tasarımda kullanılan entegre devrenin yüzey montaj (surface mount) için üretici firma (BURR BROWN) tarafından önerilen koruma halkası tekniği Şekil 4.22’de görülmektedir.



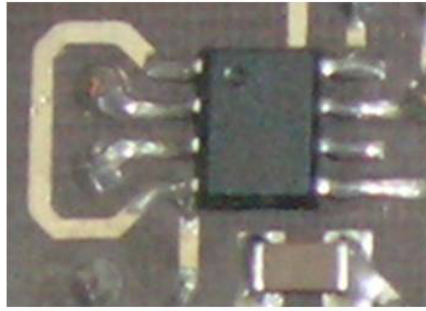
**Şekil 4.22** Yüzey montaj OPA129 için sızıntı akımı engelleme tekniği.

Şekil 4.23 ve 4.24’de koruma halkasının akım – voltaj çevirici devresinde uygulanması görülmektedir.

Koruma halkası metodunun yanında, kullanılan baskılı devre plakası ve montaj tekniği de önem kazanmaktadır. Giriş uçları, biri baskılı devrenin alt yüzünde diğeri üst yüzünde olacak şekilde montaj yapılmış, ayrıca genel bilgiler kısmında anlatılan diğere önlemler alınmıştır.



**Şekil 4.23** Koruma halkası simülasyonu.



**Şekil 4.24** Koruma halkası baskı devre şekli.

#### **4.2.4.4 Isıl kayma**

Diğer bölümlerde de vurgulandığı gibi örnek yüzeyinin görüntülenmesinin temeli göreceli olarak toplanan akım bilgilerine bağlıdır. Bu nedenle görüntüleme sırasında akım-gerilim çeviricisinin gösterdiği nicelikleri etkileyebilecek kaymalar olmamalıdır. Isıl kaymanın önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır. Ayrıca devrede kullanılan elemanların tümüne bağlıdır. Bu nedenle devrede özellikle yüzey montaj elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca seçilen işlemsel kuvvetlendirici OPA129 için üretici firma  $10\mu V/^{\circ}C$  gibi oldukça iyi bir değeri garanti etmektedir. Devrede OPA129 kullanılmasının temel nedenlerinden biride ısıl kaymaya olan oldukça düşük cevabıdır.

#### **4.2.4.5 Gürültü koruması**

Devrenin giriş empedansı kullanılan işlemsel kuvvetlendiricinin giriş empedansına ( $10^{13}\Omega$ ) ve geri-besleme devresinde kullanılan direç değerlerine

(imal edilen devrede  $10^8\Omega$ ) bağılıdır. Giriş empedansının bu kadar yüksek olması devrenin çevre etkilerine (manyetik ve elektrik alanlar vb.) karşı da son derece hassas olmasına neden olmaktadır.

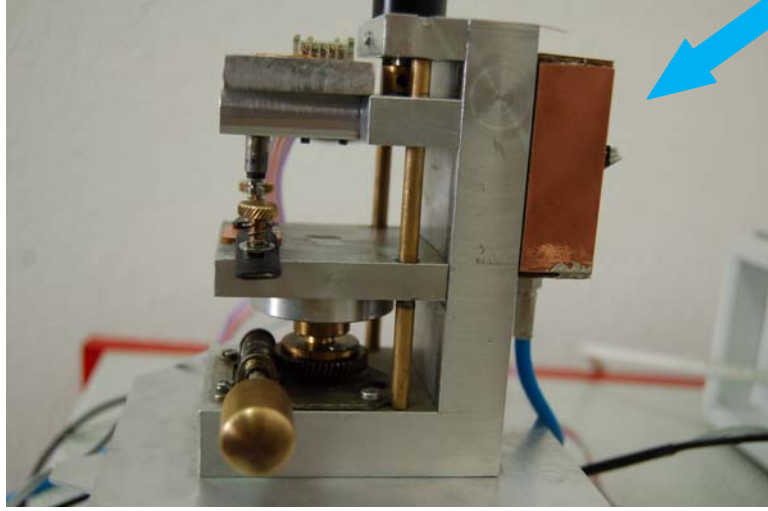
I/V çevirici  $\pm 15V$  regüleli güç kaynağından beslenmektedir. Güç kaynağından oluşabilecek gürültüler ise I/V çeviricisinin besleme noktalarına çeşitli değerlerde yüzey montaj kapasitörler konularak engellenmiştir. Bu işlemlerin sonucunda çıkışta osiloskop ile bakıldığında yaklaşık 10mV civarında gürültü görülmüştür. Bu sorunu minimuma indirmek için bilinen diğer önlemler alınmıştır.

Ayrıca giriş sinyali miknatısın üzerinden alınarak blendajlı kablo yardımı ile I/V çeviriciye taşınmıştır. Yine çıkış sinyali de blendajlı kablo ile B.A.K. kartlara aktarılmıştır.

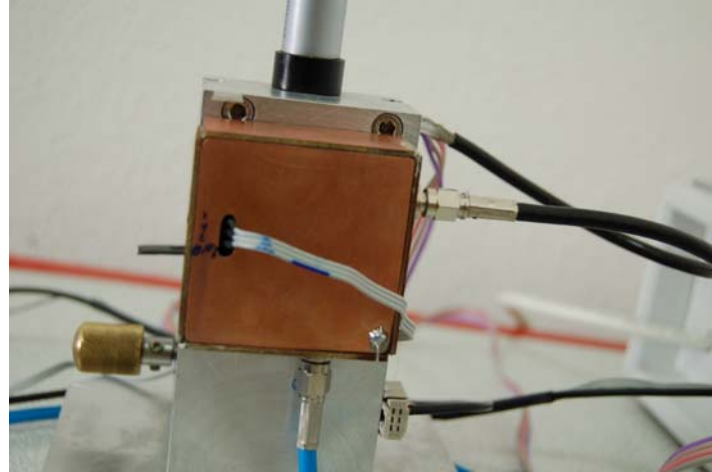
Giriş ve çıkış birimleri BNC tip konektörler kullanılarak çevresel gürültülerden korunmaya çalışılmıştır. Bunun yanında devrede topraklamalara dikkat edilmiştir. Devre teflon plakaya basılarak bir yüzü toprak olarak bırakılmıştır. Montaj işlemi gerçekleştirildikten sonra devre bakır kafes içine alınmış ve yüzeye yapılan topraklama ile kutunun dış yüzeyi birleştirilmiştir. Böylece tüm bakır kafes toprak halini almıştır.

Çevresel gürültülerden korunmanın bir diğer kuralı da devrenin sinyal kaynağına mümkün olduğunca yakın olmasıdır. Böylelikle aşırı uzunlukta kablo kullanımı engellenecektir. Bu amaçla I/V çevirici devresi tarama iğnesinin hemen arkasına yani mekanik kısmın arka duvarına monte edilmiştir. Montaj sonrasında mekanik kısım ile bakır kafes ortak toprak halini almıştır. Sinyalin aktarımı minimum uzunlukta kablo kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu işlemlerin sonucunda yapılan ölçümlerde gürültü konusunda gözle görülür bir iyileşme sağlanmıştır. Şekil 4.25 ve 4.26'da I/V çevirici devrenin kafes içine alınıp mekanik bloğa monte edilişi resmedilmiştir.



**Şekil 4.25** I/V çeviricinin mekanik kısım üzerine monte edilmiş hali (yan görünüm).



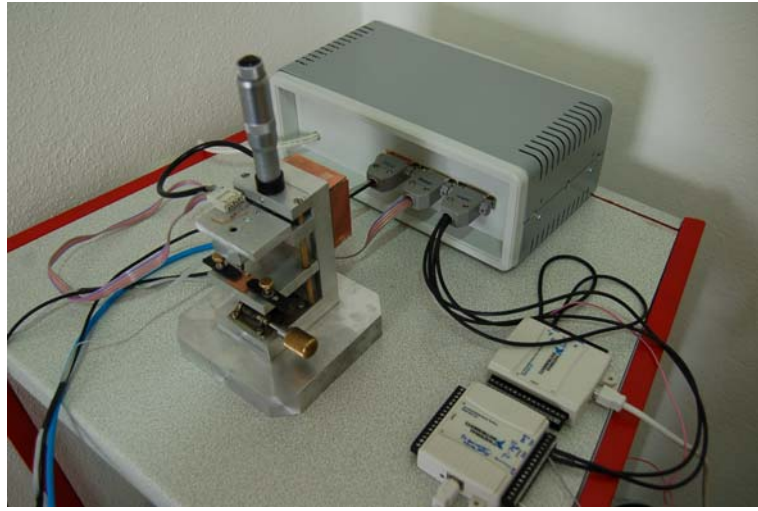
**Şekil 4.26** I/V çeviricinin bakır kafes (kutu) içine alınmış ve mekanik kısım üzerine monte edilmiş hali.

#### **4.2.4.6 Zaman sabiti**

İmal edilen devrede şönt dirençlerine paralel bağlanan kondansatörler kontrol devresinin kararlı çalışmasını sağlamak amacıyla kullanılmış ve uygun değerlerde seçilmiştir. Bu değerlerin seçilebilmesi için birkaç farklı kapasitör ile deneme yapılmış ve en uygun kombinasyon olan  $R=100M\Omega$  ile  $C=242pF$  değerleri bulunmuştur. Burası sistemin algılama noktasıdır ve genellikle algılamanın son derece hızlı olması istenmektedir.

Fakat çevre gürültüleri veya hızlı tarama gibi nedenlerden kaynaklanan, akımdaki çok ufak dalgalanmalara karşı gösterilen ani reaksiyon da kararsızlık yaratabilmektedir. Bu nedenle küçük bir zaman gecikmesi yaratılarak sistemin daha kararlı halde çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu gecikme kontrol bölümü aracılığı ile sağlanmıştır.

Şekil 4.27’de mekanik tasarım ile elektronik devrelerin biraraya getirilerek sistemin çalışır haldeki konumu görülmektedir.



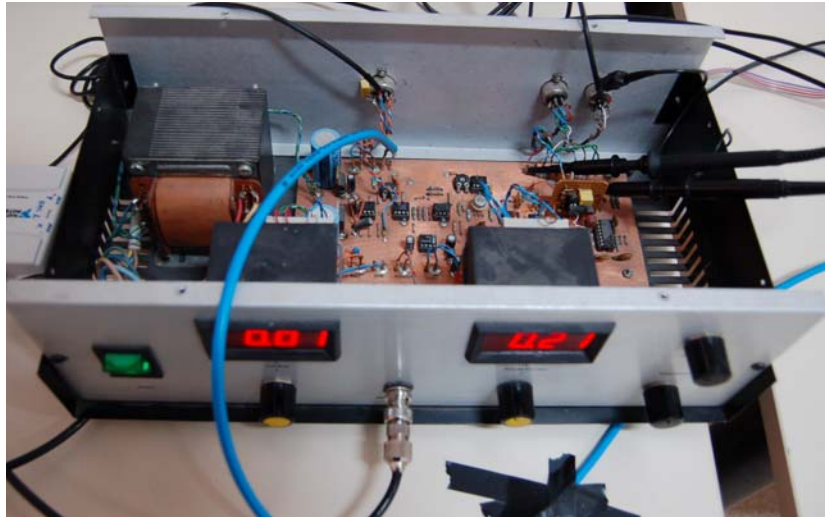
**Şekil 4.27** Mekanik tasarım ile elektronik güç devresinin biraraya getirilmesi.

#### **4.2.5 Kontrol bölümü**

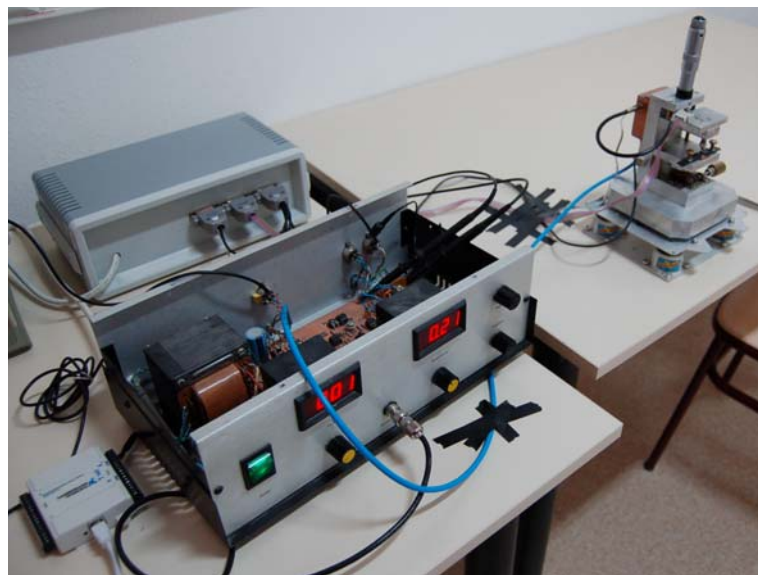
Yaklaşma ve ilk algılama aşamalarından sonra iğne ve numune yüzeyi arasındaki uzaklığın kontrol edilebilmesi ve iğnenin belli bir mesafede tutulabilmesi için bir kontrol devresine ihtiyaç vardır. Bu amaçla tasarlanan TTM cihazının kontrol bölümü PI (oransal-integral) kontrol mantığı ile tasarlanmıştır.

Özellikle TTM’de gelen akım bilgisi üstel ifadelerle sahip olduğundan kolay işlenebilmesi için doğrusallaştırılması gerekir. Bu nedenle bir logaritmik yükselteç ayarlanan değer ile okunan değerlerin logaritmik farklarını alır. Fakat bu sistemin sağlıklı çalışabilmesi için de girişine negatif işaretli gerilim gelmemesi gerekir. Bir

doğrultmaç veya bir başka deyişle mutlak değer devresi gelen akım bilgisi negatif değerli olsa dahi mutlak değerini alarak logaritmik yükseltcin girişine ulaşmasını sağlar. Daha sonra PI devresi bu bilgilerden hata sinyali üreterek yeni Z yönü bilgisini piezo tüpe gönderir. Böylece tarama sınırı içinde atlanan her noktada kısa bir cevap zamanı sonrasında iğne-örnek arası mesafe ayar değeri olan bir noktada tutulmuş olur. Şekil 4.28'de tasarlanıp imal edilen PI kontrol devresi görülmektedir. Şekil 4.29'da ise  $\pm 200V$  bipolar güç kaynağı, mekanik bölüm ve I/V çevirici B.A.K.'lar ile kontrol devresinin bir araya getirilerek TTM sisteminin son hali oluşturulmuştur.



**Şekil 4.28** PI kontrol devresi.



**Şekil 4.29** Tasarlanan tüm sistemlerin bir araya getirilmesi.

### **4.3 Veri Toplama ve Bilgisayar Yazılımı Bölümü**

Bu bölümde TTM cihazının tarama yapabilmesi için gerekli bazı sinyallerin (öngerilim, X ve Y konumu) oluşturulması, I/V çeviriciden gelen Z konum bilgilerinin bilgisayar ortamında depo edilmesi ve yazılım aracılığıyla görüntü oluşturulması anlatılmıştır.

#### **4.3.1 Veri toplama işlemi**

X ve Y yönündeki taramalar için gerekli gerilim değerleri bilgisayardan yazılım aracılığı ile üretilerek B.A.K.'lar aracılığıyla sisteme gönderilir. Her tarama noktasında akım değişimi kontrol ünitesinden alınarak bilgisayara B.A.K. aracılığı ile kayıt edilir. Yani bu kart üzerindeki A.S.Ç. (analog – sayısal çevirici) akım bilgilerinin toplanması, S.A.Ç. (sayısal – analog çevirici) ise tarama iğnesinin pozisyonunu kontrol etmek için gerekli olan tarama sinyallerinin üretilmesi amacıyla kullanılmıştır. Eşit akım değerleri eşit yükseklik değerlerine karşılık geldiği için her yükseklik değerine bir renk verilerek incelenen yüzeyin atomik boyutta topografik bir haritası elde edilmiş olur. Tarama alanını genişletmek amacıyla, bir yüksek gerilim kuvvetlendiricisi kullanarak X, Y, Z gerilim değerlerini piezo tarama tüpünün izin verdiği ölçüde yükseltmek mümkündür.

#### **4.3.2 Bilgisayar yazılımı (LabView kontrol programı)**

Piezo tüpün örnek yüzeyinde yapacağı X ve Y yönündeki hareketler ile ön gerilim değeri LabView programı yardımıyla bilgisayar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Üretilen sinyal B.A.K.'lar aracılığıyla piezoya gönderilmiş böylece hareket için gerekli gerilim temin edilmiştir. Z yönündeki hareketin kontrolü ise tamamen tasarlanıp imal edilen analog kontrol devresine aittir. Ayrıca Z yönünden gelen akım bilgisi de bilgisayara kaydedilerek görüntüler oluşturulmaktadır. Örnek üzerinde taranacak alan kullanıcı tarafından girilerek, istenilen piksel değerine bölünerek piezo tarayıcının adımları ayarlanmıştır. Bu işlem tasarlanan arayüzde gerçekleştirilmektedir. Her adımdan sonra tarama iğnesinin göreceli olarak değişen yükseklik değeri akım-gerilim çeviricisi tarafından



gerilime çevrilerek B.A.K tarafından sayısal değerlere dönüştürülmüş ve işlenmek üzere hafızaya alınmıştır. Hafızaya alınan bölüm ise LabView programı içerisine uygulanan Matlab script bölümüdür. Görüntü oluşturabilmek için elde edilen akım bilgilerinin matris haline getirilmesi bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

Yazılım  $\pm 200V$  bipolar bilgisayar kontrollü güç kartına gönderdiği gerilim değerleriyle iğnenin yüzey üzerindeki yatay X - Y düzleminde tarama hareketini gerçekleştirmekte, aynı zamanda kartın girişine bağlı olan akım-gerilim çeviricisinden gelen sinyalleri kaydederek iğnenin Z yönündeki pozisyonunu bu X - Y değerlerinin bir matrisi olarak kaydetmektedir. Girilen ofset değerlerine göre maksimum tarama alanı limiti içerisinde istenilen çözünürlükte ve istenen bölgede tarama yapılabilmektedir. Toplanan bu veriler üç boyutlu topografik görselleştirme için kullanılan programın okuyabildiği formatta istenirse kaydedilebilmektedir.

#### 4.3.2.1 Bias'ın (ön gerilim) oluşturulması

LabView'de yazılan kontrol programı, öncelikle kullanıcıdan bazı önemli giriş parametrelerini sisteme girmesini istemektedir. Bunlardan bir tanesi de iğne ile örnek arasındaki voltaj farkını sağlayan ön gerilim (bias voltajı) parametresidir. Kullanıcı Şekil 4.30a'da sol tarafta gösterilen kutucuk içine bias voltaj değerini yazar ve sistem çalışma halindeyken istediği zaman bu kutucuğun içindeki değeri değiştirebilir. Kullanıcının girdiği bias voltaj değeri B.A.K. içindeki a01 (analog output1) üzerinden elektronik sisteme gönderilmektedir (Şekil 4.30b). Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, B.A.K.'ın çıkışının 0 – 5 Volt aralığında olmasıdır. 5V'den daha yüksek bir öngerilim sağlayabilmek için ek bir elektriksel donanıma ihtiyaç vardır. Tasarlanan TTM sisteminde ise kullanılacak öngerilim değeri son derece düşük olduğu için kullanılan kartlar yeterli olmuştur.



**Şekil 4.30** Bias üretimi: (a) Ön panel görüntüsü, (b) blok diyagram içi

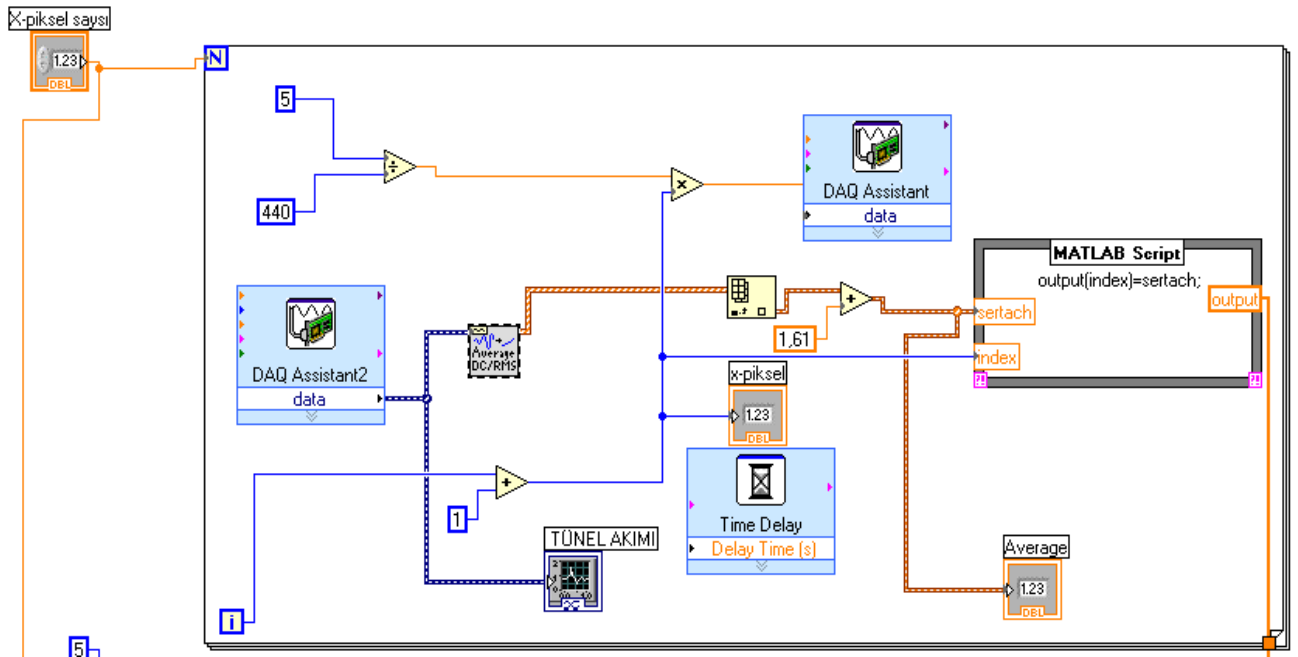
#### 4.3.2.2 Tarama iğnesinin X – düzlemindeki hareketinin kontrol edilmesi

TTM iğnesinin X düzlemindeki hareketini sağlamak için gerekli gerilimin üretilmesi ve bu iğnenin bağlı bulunduğu piezo tüpe gönderilmesi gerekmektedir. Yazılımın ilk olarak X boyutunda ne kadar hareket edeceğini bilmesi gerekir. Bunu sağlamak için kullanıcıdan X piksel sayısını LabView programında bulunan kutucuk sistemine girmesi gerekmektedir.

X düzlemindeki hareketi birbiri ardına sürekli yapabilmek için bir döngü sistemi kurulmuştur. BAK kartının analog çıkışı 0 – 5 volt aralığında olduğu için Denklem 4.4’de verilen dönüşüm formülasyonu X düzleminde her bir adım için gerekli voltaj seviyesini bulmak amacıyla kullanılmıştır:

$$x(i) = \frac{5}{\text{pikselsayısı}} * (i) \quad i = 1,2,3 \dots \text{pikselsayısı} \quad (4.4)$$

Kullanıcının girdiği piksel sayısının B.A.K. ao0 portuna gönderilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.31’de X yönündeki hareketin B.A.K.’lara gönderilmesi görülmektedir.



Şekil 4.31 X yönündeki hareketin LabView programı ile kontrolü.

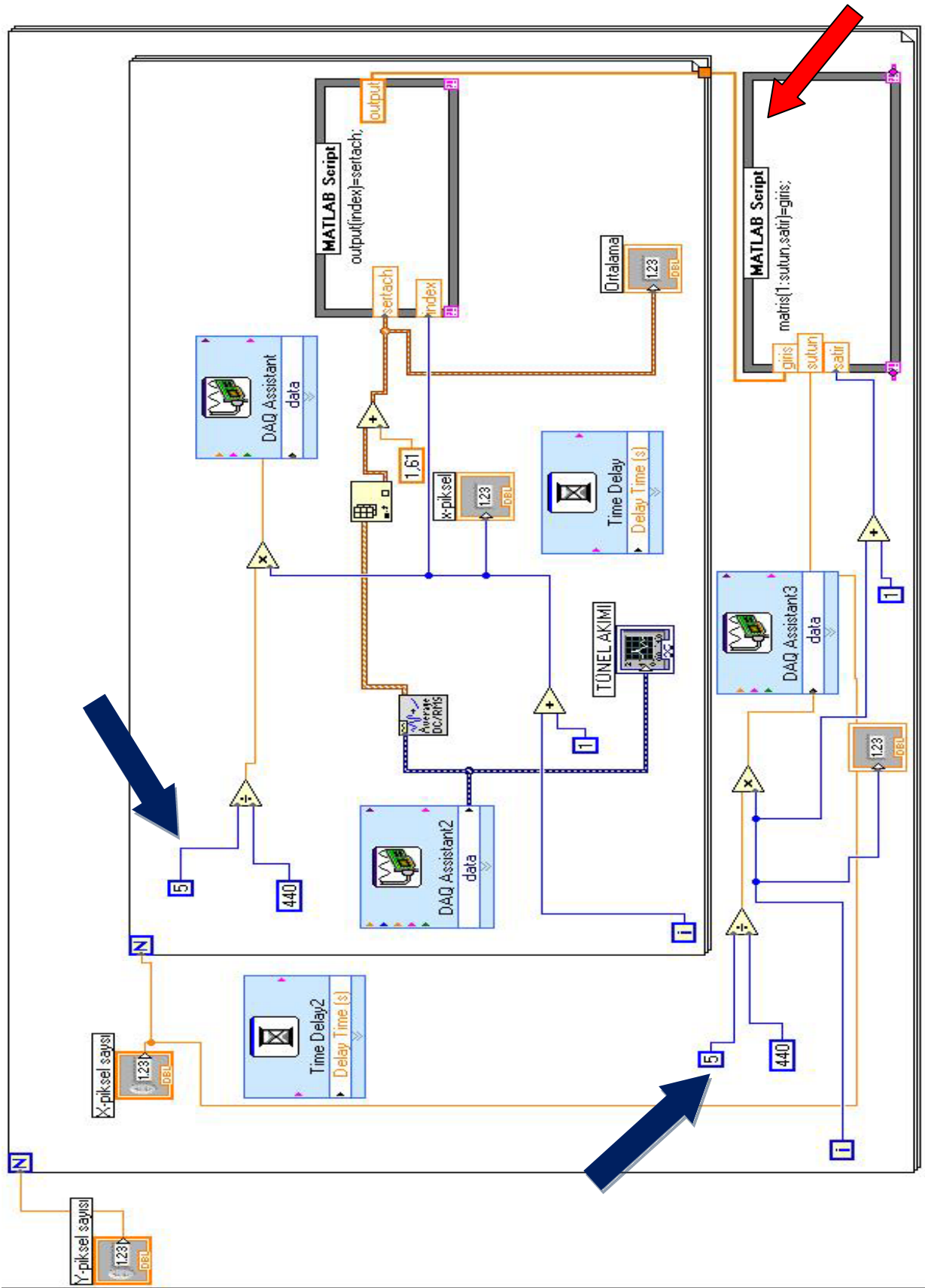
#### **4.3.2.3 Tarama iğnesinin Y – düzlemindeki hareketinin kontrol edilmesi**

İğnenin X düzlemindeki hareketinden sonra, Y düzleminde de hareketinin sağlanması gerekir. TTM iğnesinin Y düzlemindeki hareketini sağlamak için gerekli gerilimin üretilmesi ve bu iğnenin bağlı bulunduğu piezo tüpe gönderilmesi gerekmektedir. Bu bölümde de yazılımın Y boyutunda ne kadar hareket edeceği kullanıcı girişi olarak ayarlanmıştır. Y düzlemindeki hareketi birbiri ardına sürekli yapabilmek için bir döngü sistemi kurulmuştur. B.A.K.'ların analog çıkışı 0 – 5 volt aralığında olduğu için Denklem 4.4'de kullanılan dönüşüm formülasyonu Y düzleminde her bir adım için gerekli voltaj seviyesini bulmak amacıyla kullanılmıştır.

Kullanıcının girdiği piksel sayısının B.A.K ao1 portuna gönderilmesi sağlanmıştır. Sistem kullanıcının girdiği her bir X değeri için döner ve buradan elde ettiği akım bilgilerini Matlab script dosyasına yazmaktadır. Her Y döngüsü için bu işlem tekrar etmektedir. Sonuçta kullanıcının girdiği piksel değeri büyüklükte, örneğin 100x100, bir matris elde edilir. Şekil 4.32'de Y yönündeki hareketin LabView aracılığıyla B.A.K.'lara gönderilmesi aktarılmaktadır.

Şekil 4.32'de lacivert oklarla gösterilen bölüm tarama esnasında piezo tüpün numune üzerinde takip edeceği adımlar arasındaki mesafeyi belirleyen bölümdür. Piksel sayısı kullanıcı tarafından arayüzde girilmektedir. Adım sayısı ise blok diyagram üzerinden takip edilmektedir. Kullanılan B.A.K.'lar maksimum 12 bit çıkış çözünürlüğüne sahiptir. Tarama iğnesini hareket ettirecek olan piezo tüp X – Y düzlemlerinde maksimum  $\pm 8\mu\text{m}$  uzamaya sahiptir. Bu uzamayı ise  $\pm 200\text{V}$  aralığında gerçekleştirir. B.A.K kartları ise çıkışını 0 – 5V arası verdiği için 4096 adım aralığında bu çıkışı değiştirebilir. Bu veriler ışığında bir orantı kurulursa  $+8\mu\text{m}$  lik bir uzama  $+200\text{V}$  ile mümkün oluyorsa  $5/4096$ 'lık bir gerilimle gidilen adımın büyüklüğü bulunabilir. Z amplifikatörünün kazancının 22 olduğu da hesaba katıldığında sonuç  $1.07\text{nm}$  olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 4.32'de kırmızı ok ile gösterilen bölüm ise X ve Y tarama yönlerinden toplanılan akım bilgisinin bulunduğu matristir. Bu matristeki datalar Matlab yardımıyla işlenerek görüntü oluşturulmaktadır.



Şekil 4.32 Y yönünde hareketin LabView programı ile kontrolü.

#### **4.3.2.4 Z yönündeki bilgilerin analog kontrol devresinden alınması**

İğneden elde edilen akım değeri I/V çeviriciden geçirilerek voltaj değeri haline getirilmiştir. Gelen voltaj değeri ise B.A.K.'ın ai0 portu üzerinden bilgisayara gönderilmiştir.

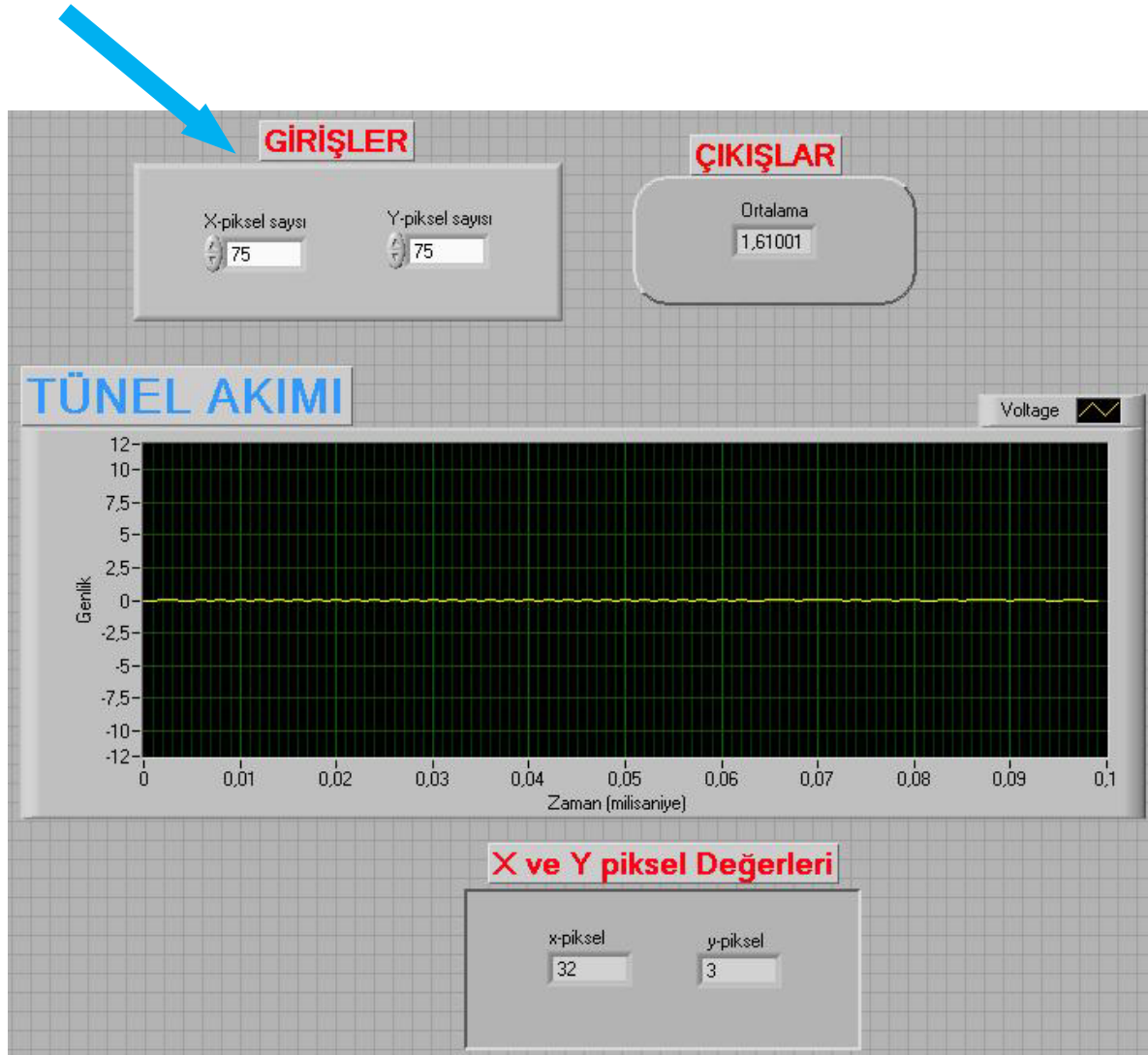
Yükseklik değerleri X – düzlemindeki her hareket için hesaplanır ve bu şekilde X – piksel sayısı kadar bir satır vektörü elde edilmektedir. Ayrıca her Y – düzlemi için bu satır vektörlerinin eldesi tekrarlanmaktadır. Bu vektör bir Matlab script aracılığı ile Matlab'ın içinde bir vektöre atanır.

Atom boyutunda görüntüleme yapmak için I/V çevirici çıkışından alınan tünel akımına veya analog PI kontrol devresinin ürettiği kontrol sinyaline ( $\Delta z$ ) ihtiyaç duyulmaktadır. Dizayn edilen LabView arayüzünde her iki sinyali de alabilmek mümkündür. B.A.K'ların örnekleme hızına göre saniyede 1000 tane örnek tünel akımından veya kontrol sinyalinden örnekleme yapılabilmektedir. Kontrol ünitesi yükseklik değerinin belli bir ayar değerine oturtana kadar toplanan bu örneklerin belli bir kısmının ortalaması alınarak her bir X ve Y'deki değer için yükseklik bilgisi elde edilir. Set değerine gelinceye kadar ortalama alma işleminde time delay (zaman gecikmesi) bloklarının katkısı olmuştur. Bu yükseklik bilgisi Matlabda yaratılan matrisin ilgili yerine yazılır.

Tasarlanan ve gerçekleştirilen sistemin en büyük kolaylığı ise kullanıcının yukarıda belirtilen parametrelerin değerlerini gerçek-zamanlı olarak değiştirebilmesidir. Şekil 4.31 ve 4.32'de X ve Y kontrol blokları üzerinde gelen akım bilgilerinin matris hale dönüştürülmesi için kullanılan LabView bloğu ve Matlab scripti görülmektedir. Şekil 4.33'de ise tasarlanan ve gerçekleştirilen LabView sisteminin arayüzü verilmektedir. Mavi okla gösterilen bölüm kullanıcı tarafından belirlenen tarama çözünürlük değerleridir. Tünel Akımı olarak belirtilen osiloskop ekranı ise alınan akım bilgilerinin ( $\Delta z$  kontrol sinyal bilgisi ya da I/V çevirici çıkışından alınan sinyal) dijital olarak görüldüğü bilgisayar üzerindeki osiloskop ünitesidir.

Bu sinyal ayrıca sistemin dışında PI kontrol devresinin çıkışına bağlanan ayrı bir osiloskop ile de izlenmektedir.

Arayüzün alt kısmında bulunan X ve Y piksel değerleri bölümü ise taramanın hangi koordinatta yapıldığını anlık olarak göstermektedir. Çıktılar olarak isimlendirilen bölüm ise toplanan akım bilgilerinin ortalamasının alınmasından sonraki değeridir. Her satır ve sütün için yapılan bu ortalama alma işlemi sayesinde  $\Delta z$  yükseklik bilgisi oluşturulmaktadır.

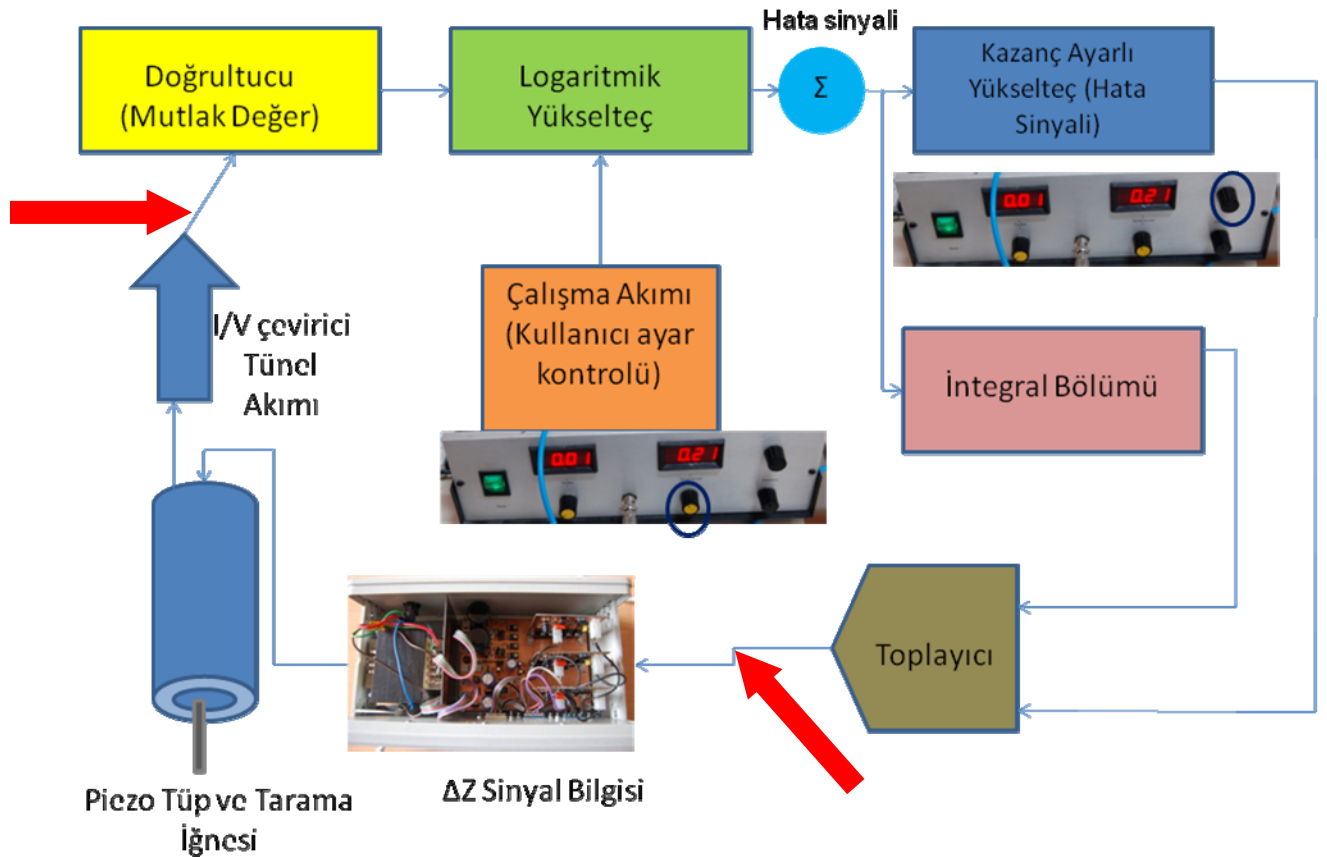


**Şekil 4.33** Tasarlanan ve gerçekleştirilen LabView sisteminin arayüzü.

#### 4.4 Alınan Görüntüler

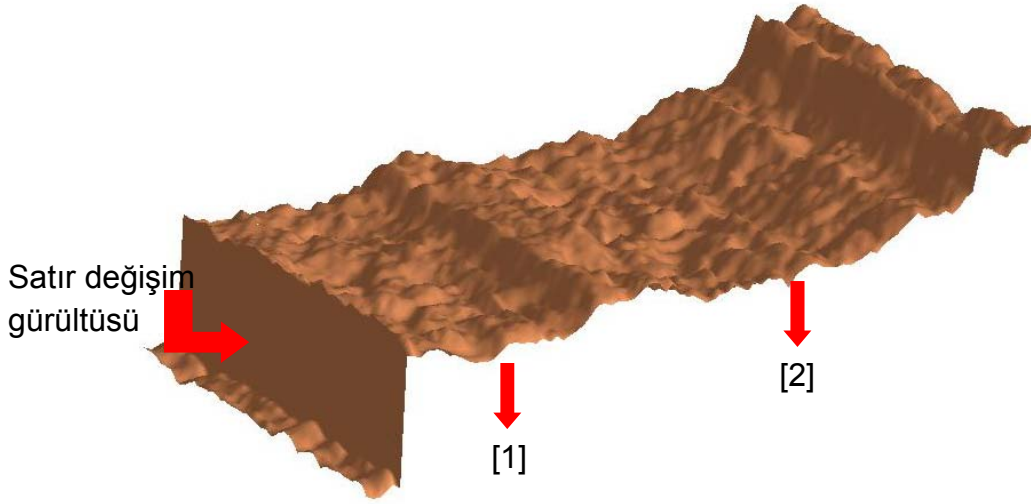
Tasarlanan mekanik bölümler, elektronik kısımlar ve yazılım ünitesinden sonra cihazın ne kadar etkin çalıştığının gözlenebilmesi için görüntü alma kısmına geçilmiştir. Görüntü oluşturmak için öncelikle, elde edilmesi gereken yükseklik bilgisini verecek akım değerlerinin bir matris içerisinde toplanıp kaydedilmesi gerekmektedir.

Görüntüyü oluşturacak olan bu akım değerleri iki yoldan toplanabilmektedir. Bunlardan birincisi sinyalin, kontrol sinyalinin çıkışından ( $\Delta z$  sinyali), ikincisi ise I/V çeviricinin çıkışından alınması şeklindedir. Şekil 4.34'de PI kontrol ünitesinin çalışma bloğu görülmektedir. Kırmızı oklarla işaretlenen yerler ise çıkışların alındığı bölümleri göstermektedir.



Şekil 4.34 PI kontrol çalışma bloğu üzerinden toplanan akım bilgileri.

Görüntü oluşturma çalışmalarına öncelikle  $\Delta z$  sinyal bilgisinin toplanıp Matlab'da görüntü haline dönüştürülebilir duruma getirilmesiyle başlanmıştır. Görüntülenecek olan yapı daha önceki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılan NanoGRID'dir. İstenilen tarama çözünürlüğü 75x75 şeklinde tercih edilmiş ve kullanıcı tarafından programa girilmiştir. NanoGRID sertifikalı bir yapı olduğu için görülmesi beklenen yapı ve geometrik özellikleri bilinmektedir. Her yapının kapladığı temel alan yaklaşık 160nm'dir. Bu yüzden öncelikle 10nm'lik adımlarla tarama yapılması tercih edilmiştir. Böylelikle 750nmx750nm'lik bir alan taranmıştır. Şekil 4.35'de tasarlanıp imal edilen TTM cihazından elde edilen NanoGRID görüntüsü görülmektedir.

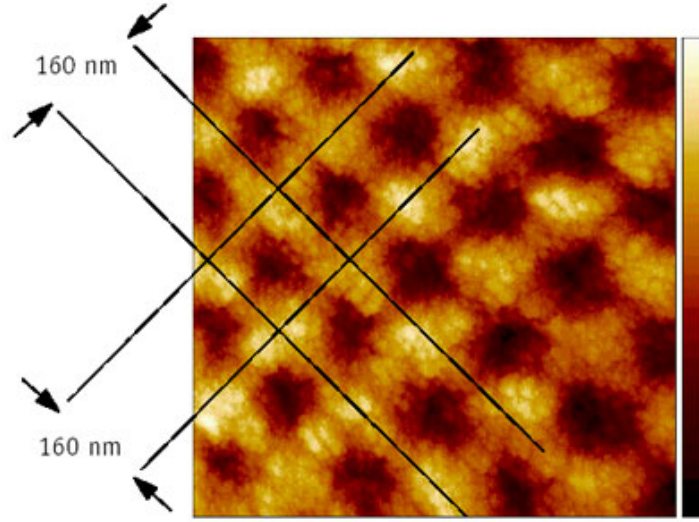


**Şekil 4.35** 75x75 10nm NanoGRID görüntüsü.

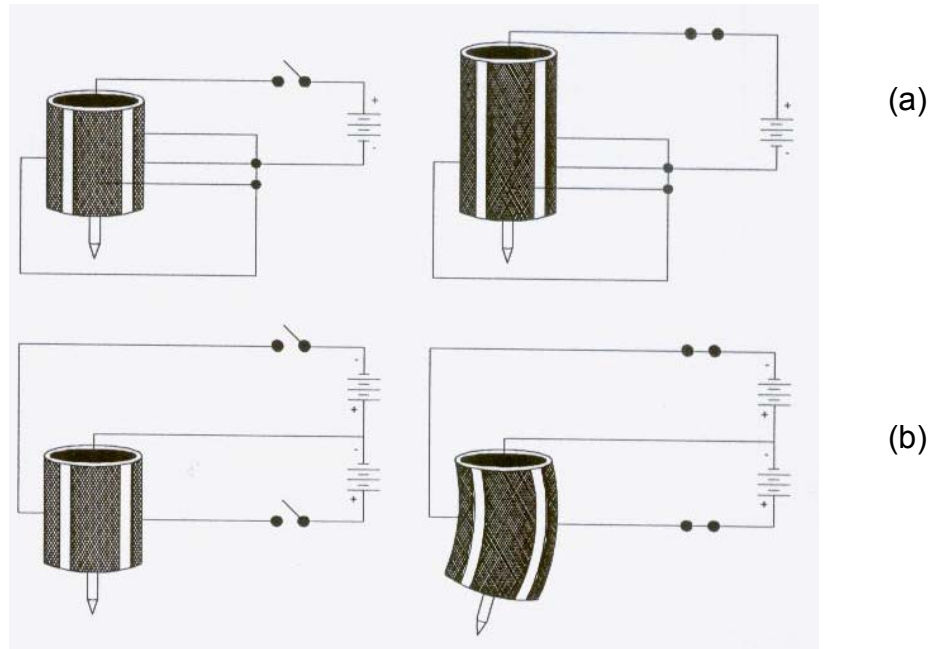
Elde edilen bu ilk görüntü her ne kadar sertifika görüntüsüne (Şekil 4.36) yakın bir sonuç olmasa da sistemin çalıştığını müjdelemektedir. Bunun açıklaması ise oldukça basittir. Piezo tüp gerilim durumunda X ve Y yönündeki hareketini bir yay hareketi olarak gerçekleştirmektedir (Şekil 4.37). Dolayısıyla set akımına ulaşmak için gereken yükseklik mesafesi parabolik bir eğri oluşturmaktadır.  $\Delta z$  sinyalinden alınan görüntü bilgilerinde bu parabolik sonuç görülmektedir (bkz Şekil 4.35). [1]. Bölgede piezonun tarama alanını arttırmak için negatif voltaj verilmiştir. Bu ofset küçük bir değer olduğu için küçük bir parabol olarak görülmektedir. [2]. Bölgedeyse bu değer kendini set etmiş ve yeni değere ulaşmak için burulmaya devam etmiştir.



Satır değişim gürültüsü olarak da belirtilen bu durum tarama işleminin Y yönündeki ilk satır bilgilerinde görülmektedir. Bunun nedeni ise X yönündeki taramasını tamamlayan piezo tüp ve tarama iğnesinin her Y değeri için ilk satıra geri dönmesidir. Bu durum ilk satırlardaki bilgilerde gürültü olarak karşımıza çıkmaktadır.

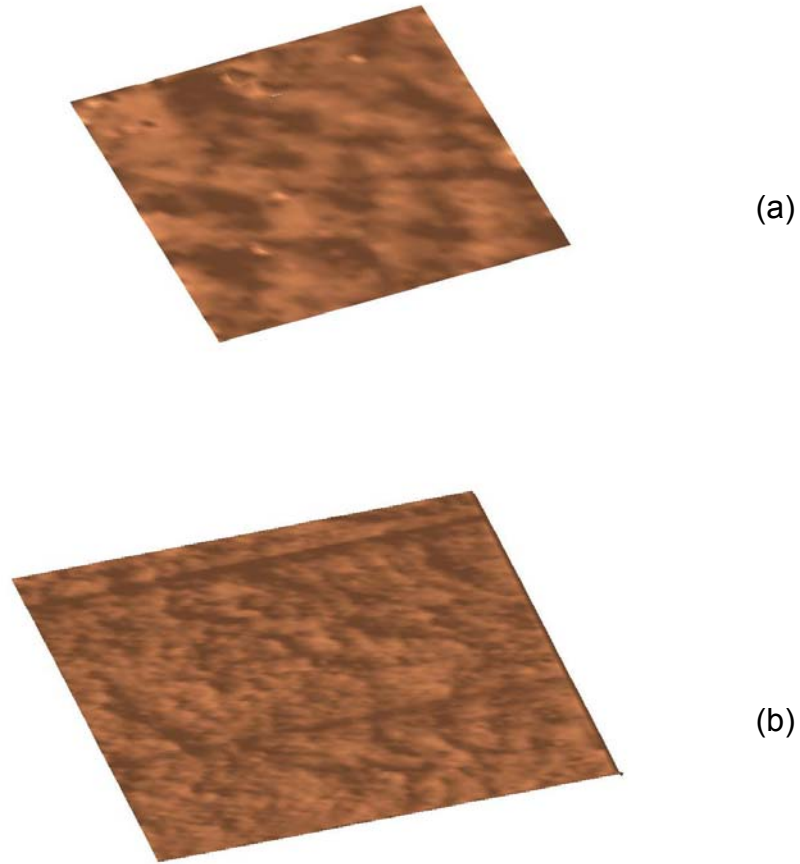


Şekil 4.36 NanoGRID sertifika görüntüsü.



Şekil 4.37 Burleigh Instruments, Inc.,[41]'den alınan piezo tüpün gerilim altındaki karakteristiğini içeren katalog bilgisi: (a) piezo tüpün gerilim altında aksiyel yönde uzaması, (b) piezo tüpün gerilim altında X ve Y yönünde hareket etmesi.

$\Delta z$  sinyal bilgisinin toplanıp Matlab'da görüntü haline dönüştürülebilir duruma getirilmesinden sonra I/V çeviricinin çıkışından toplanan bilgilerden görüntü oluşturulması denenmiştir. İlk olarak görülen sonuçlar parabolik hareketlerin ortadan kalktığıdır. Farklı çözünürlüklerde taramalar yapılarak bu yöntemle görüntüler elde edilmeye çalışılmıştır. Bunlar 10nm'lik adımlarla taranan 40x40, 100x100 ve 75x75'lik görüntülerdir. Elde edilen görüntülerin çözünürlük farkı ile kıyaslanması için bu metot izlenmiştir. Şekil4.38'de bu görüntülerden 40x40 ile 100x100'lük olanlar yer almaktadır.

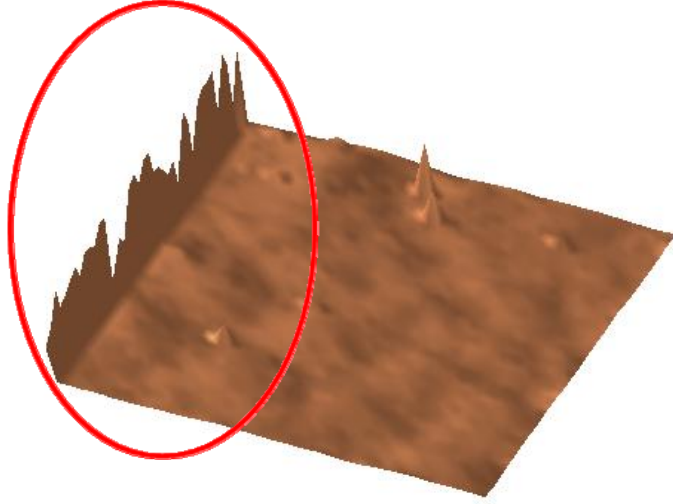


**Şekil 4.38** Elde edilen NanoGRID görüntüleri; **(a)** 40x40 10nm NanoGRID görüntüsü, **(b)** 100x100 10nm NanoGRID görüntüsü.

Bu görüntüler sistemin bir takım sonuçlar verdiğini belli etmektedir. Fakat sertifika görüntülerine benzer şekilde görüntüler yakalanamamaktadır. Bunun için 75x75'lik çözünürlüğe sahip görüntüye temel görüntü işleme teknikleri

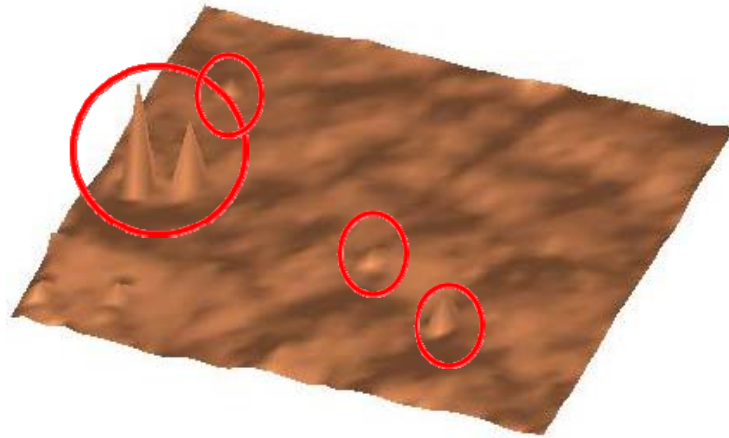
uygulanmıştır. Üzerine bindiği tahmin edilen gürültülerin yok edilebileceği ve bu yolla sonuca ulaşılacağı düşünülmüştür.

İlk olarak Şekil 4.39'da görülen 75x75 10nm'lik görüntü üzerinde var olan ilk satır gürültüleri matristen kaldırılmıştır (Kırmızı çember içerisindeki bölge).



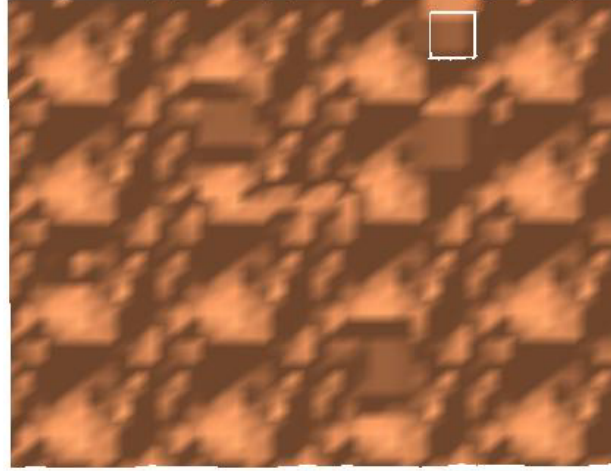
**Şekil 4.39** TTM cihazından elde edilen nanoGRID görüntüsü 75x75 10nm.

İlk satır hataları çıkarıldıktan sonra Şekil4.40'daki görüntü elde edilmiştir. Fakat elde edilen bu yeni görüntüde de belli başlı tepeler görülmektedir. Gürültüden ve mekanik vibrasyondan kaynaklanan bu tepeler matris içinden çıkarılarak yok edilmiştir.



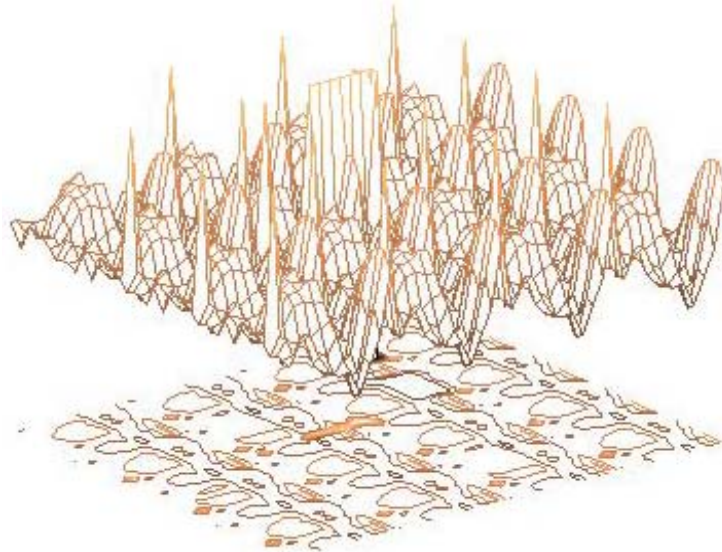
**Şekil 4.40** İlk satır hataları silinmiş nanoGRID görüntüsü 75x75 10nm.

Bu işlemde gerçekleştirildikten sonra Şekil 4.41'de ki görüntü elde edilmiştir. Şekil 4.41'de verilen görüntü orijinal nanoGRID sertifikasındaki görüntüyü andırmaktadır. Yapı üzerindeki tepeler ve çukurluklar belli olmaktadır. Görüntünün ham olarak elde edilmesiyle birlikte çeşitli filtreleme işlemleri gerçekleştirilerek sertifikaya daha yakın bir görüntü elde edilmek istenmiştir.



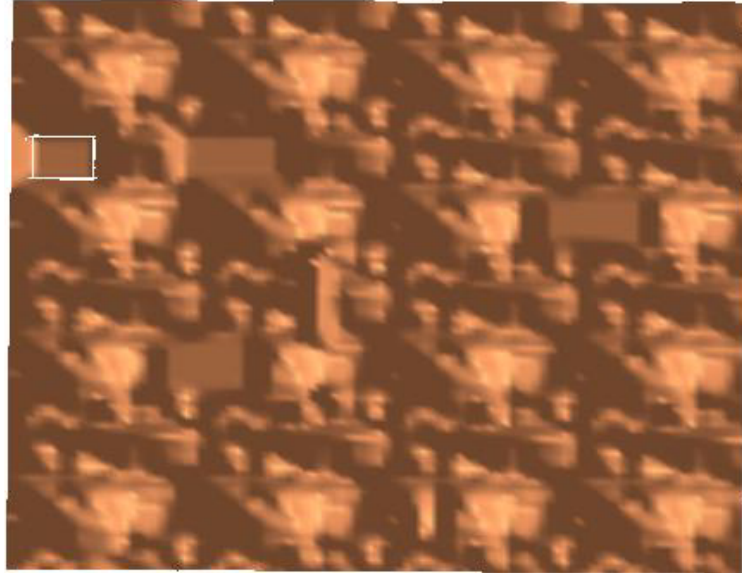
**Şekil 4.41** İlk satır hataları kesilmiş nanoGRID görüntüsündeki tepelerin yok edilmesinden sonra oluşan görüntü. 75x75 10nm.

Bunun için ilk olarak literatürde sıkça rastlanan mesh contour çizimine gidilmiştir. Mesh contour çizimi Şekil 4.41'de ki görüntüden elde edilmiştir. Şekil 4.42'de alt yüzeyde görüntünün topografik haritası görülmektedir.



**Şekil 4.42** NanoGRID'in mesh contour çizimi.

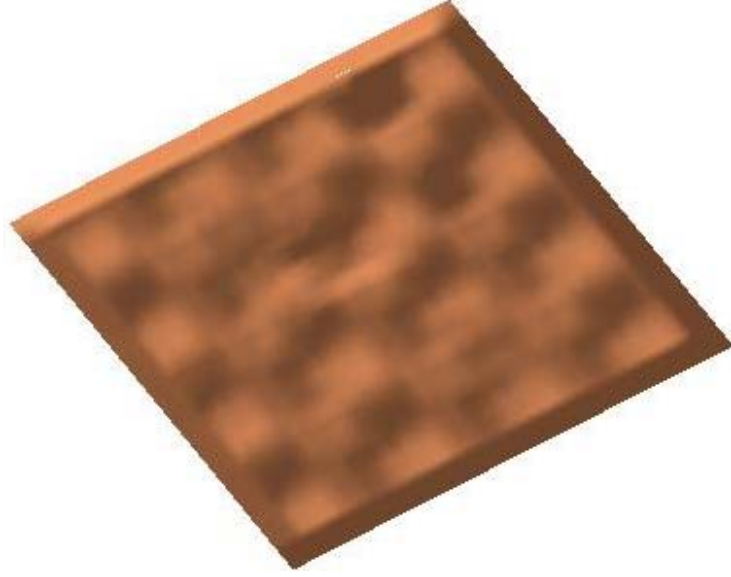
Topografik haritalamaya yarayan bu komutun kullanımı ile elde edilen görüntü literatürde bahsedilen çalışmalarla paralellik göstermektedir. Topografik görüntüye bakarak bilgi edinmenin yanında ayrıca görüntünün çözünürlüğünü değiştirerek görüntü hakkında bilgi almak istenmiştir. Resize komutu ile görüntünün piksel değerleriyle oynanarak, interpolasyon yapılarak 256x256'lık bir görüntü elde edilmiştir. Bu çözünürlüklerdeki taramalar oldukça vakit alıcıdır. Fakat Matlab yardımıyla görüntünün çözünürlüğü değiştirilerek, varsa eğer, gözden kaçan noktalara değinilebilir. Şekil 4.43'de ve Şekil 4.41'de ki görüntünün boyutu değiştirilerek elde edilen yeni görüntü görülmektedir. NanoGRID açısından aralarında gözle görülür bir fark bulunamamıştır. Bu işlemlerden sonra Matlab üzerinde görüntü filtreleme tekniklerine başvurulmuştur.



**Şekil 4.43** Resize komutu kullanılarak görüntünün piksel değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilen 256x256'lık görüntü.

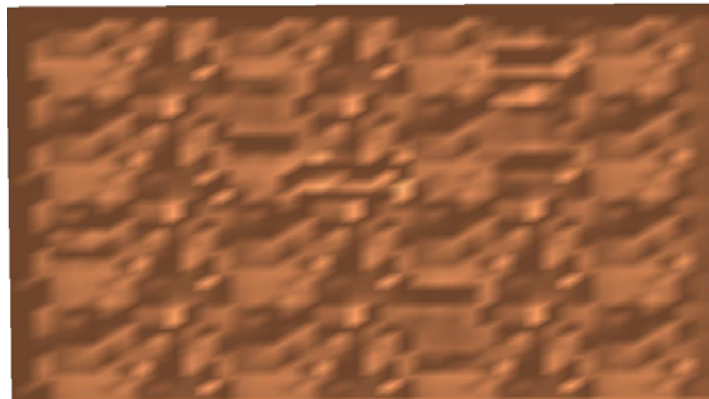
75x75 10nm'lik NanoGRID görüntüsü Matlab yardımıyla korelasyon filtre, averaj filtre, unsharp maskeleme ve medyan filtreleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu filtreleme işlemleri sonucunda elde edilen görüntüler nanoGRID sertifika görüntüsü ile karşılaştırıldığında tutarlı sonuçlar görmek mümkün olmuştur.

Şekil 4.44'de korelasyon tip filtreleme yapılmış nanoGRID görüntüsü görülmektedir. Korelasyon filtreleme için 5x5'lik bir maske, görüntünün içerisinde gezdirilerek her noktanın bu maskeye göre korelasyon değeri alınmaktadır. Aslında bir alçak geçiren filtre işleminin genişletilmiş halini göstermektedir. Şekil 4.44'de görüldüğü gibi tepe ve çukurluklar kısmen de olsa ayırt edilmeye başlanmıştır. Bu metot literatürde sıkça karşımıza çıkmaktadır [34].



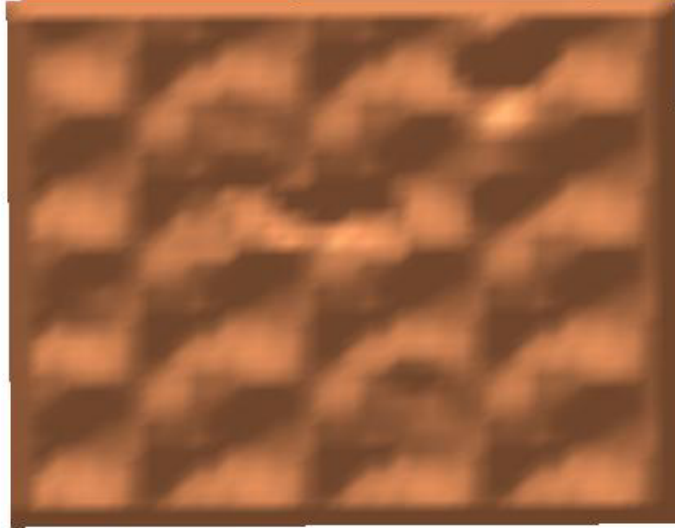
**Şekil 4.44** NanoGRID görüntüsünün korelasyonu alınarak elde edilmiş görüntü 75x75 10nm.

Şekil 4.45'de ise unsharp maskesi kullanılarak elde edilen görüntü verilmiştir. Bu yöntem ile köşeler daha baskın hale getirmiştir. Fakat sonuç istenilen gibi değildir.



**Şekil 4.45** Unsharp maskeleme ile elde edilen görüntü 75x75 10nm.

TTM'den alınan görüntüye uygulanan bir diğer filtre ise averaj filtredir. Bu filtreleme ile sıfırıncı dereceden beyaz gürültüler bastırılmış olur. Şekil 4.46'da averaj filtrelemeden sonra elde edilen görüntü görülmektedir. Korelasyon filtrelemeye göre (bkz Şekil 4.44) orijinal sertifika görüntüsüne daha yakın bir sonuç alınmıştır (bkz Şekil 4.36).

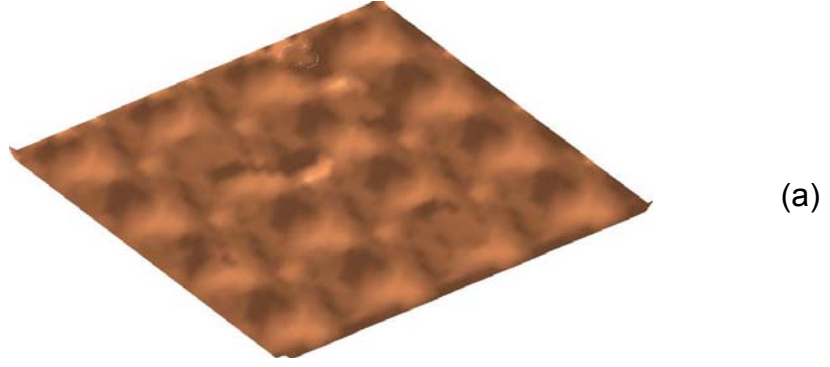


**Şekil 4.46** Averaj filtreleme işleminden sonra elde edilen görüntü 75x75 10nm.

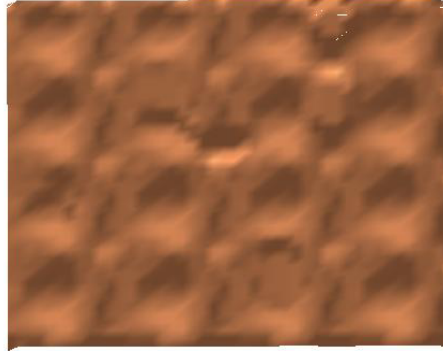
Son olarak da medyan filtreleme tekniği görüntü üzerinde denenmiştir. Literatürde bu filtreleme yönteminin TTM uygulamalarındaki başarısı hakkında bulgulara rastlanmıştır [28] ve bu yöntemin denenmesine sıcak bakılmıştır.

Aslında medyan filtre yönteminin de işlev olarak diğerlerinden fazla bir farkı yoktur. Medyan filtrelerde doğrusal filtrelemelerdeki işlemlerin yanı sıra, komşu piksellerin sıralanarak ortalama değerinin alınmasıyla elde edilmektedir. Görüntü üzerindeki tuz biber gürültüsünü ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır.

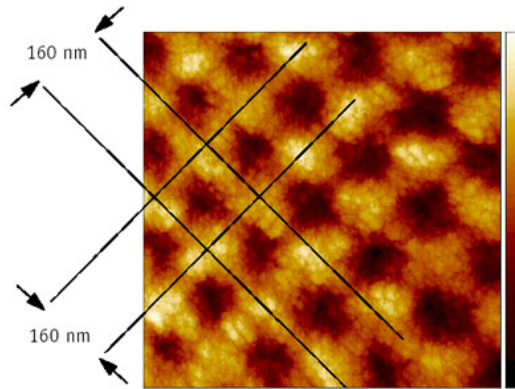
Şekil 4.47a'da ve Şekil 4.47b'de 75x75 10nm'lik nanoGRID görüntüsüne medyan filtre uygulandıktan sonra elde edilen görüntüler görülmektedir. Şekil 4.47c'de tekrar verilen nanoGRID sertifika görüntüsü ile karşılaştırıldığında sonuçların birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.47** Medyan filtreleme sonucu elde edilen nanoGRID görüntüsü 75x75 10nm: **(a)** Medyan filtreleme sonucu elde edilen görüntünün yandan görünümü, **(b)** medyan filtreleme sonucunda elde edilen görüntünün önden görünümü, **(c)** orijinal sertifika görüntüsü.

Tasarlanan TTM cihazının I/V çevirici çıkışından alınan yükseklik bilgisi sinyali kullanılarak elde edilen görüntü, Matlab yardımıyla çeşitli görüntü işleme teknikleri uygulandıktan sonra sertifikası ile uygun benzerlikteki seviyeye gelmiştir.



Bu benzerlik tasarlanan TTM cihazının başarıyla imal edildiğini göstermektedir. EK-1'de imal edilen bu cihazın teknik özellikleri genel bir tablo halinde aktarılmıştır.

#### 4.5 Çalışmadaki Sınırlayıcı Etkenler

Gerçekleştirilen tasarımların ve bu tasarımlara bağlı olarak elde edilen mekanik ve elektronik bölümlerin, ayrıca yazılım bölümünün belli aşamalarında sınırlayıcı bir takım etkenlerin varlığı söz konusudur.

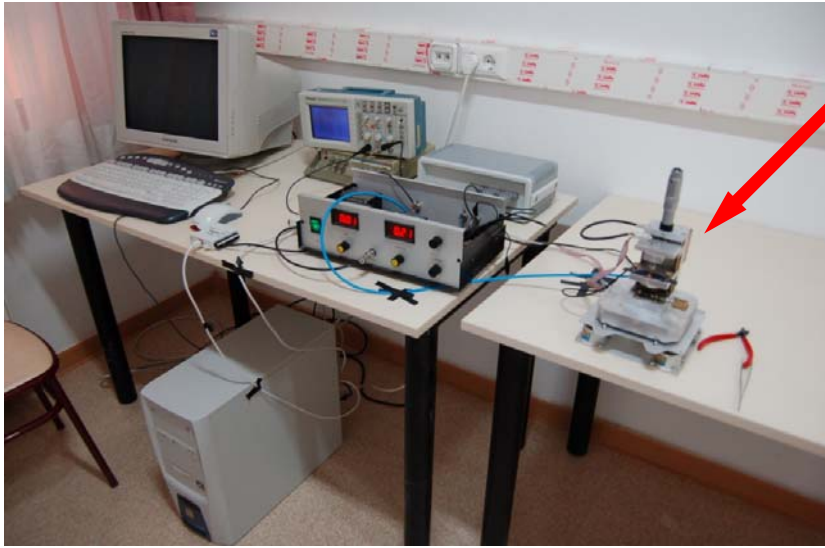
Bu çalışma elektronik, mekanik, elektromekanik ve yazılım gibi birçok disiplini biraraya getirdiği için ortaya çıkan sınırlayıcı etkenlerin aşılması oldukça güç olmuştur.

Mekanik ve elektronik bölümlerin tasarımından imalatına kadar tüm aşamalarda birçok sürpriz problem karşımıza çıkmıştır. Bu problemlerin hemen hepsi temel önlemler sayesinde aşılmıştır. Fakat tüm sistemin çalışmasıyla birlikte ortaya çıkan problemlerin başında vibrasyon gelmektedir ki bu da sistem üzerinde giderilemeyen bir gürültü oluşturmaktadır. Bu problemi aşabilmek için mekanik aksamların montajı tekrar yapılmış, elektronik kısımda tüm gürültü engelleme kurallarına uyulmuştur. Bilgisayarın çalışırken yaydığı gürültüyü minimize etmek için sessiz çalışan soğutucular temin edilerek bilgisayara monte edilmiştir, B.A.K'ların çalışma gürültülerinin etkisini azaltmak için mekanik bölümden uzak olarak bilgisayar yakınına sabitlenmişlerdir, elektronik aksamın trafo gürültülerini engellemek için tüm sistem mekanik sistemden bağımsız bir masaya konumlandırılmıştır. Sistemin havadaki titreşimlerden, konuşmalardan, bina içerisindeki vibrasyonlardan ve floresan lambanın yaydığı 50Hz gürültülerden etkilenebileceği düşünülerek ölçümler özellikle hafta sonu ve aydınlıkta yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca sistemin kurulu olduğu yer değiştirilerek daha sessiz ve hava akımından uzak bir odaya taşınmıştır (Şekil 4.48a ve Şekil 4.48b). Bunlarla birlikte gözle görülür bir iyileşme sağlanırken kesin sonuca ulaşılamamıştır. Tekrarlanabilir görüntüler almaya çalışılırken gürültü yüzünden sonuçlar istenilen seviyede çıkmamıştır.

Bu problem, sistemin sestem ve fiziki titreşimlerden tamamen yalıtılmış ve sessiz oda diye tabir edilen her yönden izole bir mekânda kullanımı ile birlikte çözüleceği düşünülmektedir.



(a)



(b)

**Şekil 4.48** Tasarlanan TTM sisteminin konumlandırılması: **(a)** TTM sistemin standart bir odada konumlanmış hali (yukarıda belirtilen değişiklikler yapılmadan önceki hali), **(b)** TTM sisteminin kısmen izole bir odaya konumlandırılmış hali, mekanik sistem diğerlerinden yalnız bırakılarak (okla gösterilen bölüm) gürültü minimize edilmeye çalışılmıştır.

Sınırlayıcı etkenlerden bir diğeri de yazılımdan kaynaklanan problemlerdir. Elde edilen akım bilgisinden tespit edilen z konum bilgisi sadece LabView programı kullanılarak matris haline dönüştürülemedi. Matris haline getirebilmek için Matlab script'i LabView içine gömerek problem aşılmıştır. Fakat iki programın aynı anda ve birbirinin içinde çalışıyor olması sebebiyle 256x256'lık bir görüntü yaklaşık 2 saat gibi uzun bir sürede alınabilmektedir. Bu da daha önce imal edilen TTM'lere ve mevcut kullanılanlara göre oldukça büyük bir handikaptır. Bu problemin çözülmesi, içerisinde topladığı bilgileri matris halinde kaydedebilen farklı bir yazılımın kullanılmasıyla mümkün olabilir.

#### **4.6 Gelecekteki Çalışmalar**

Tasarlanıp üretilen TTM cihazının gelecekte devam edecek bir takım çalışmalara temel oluşturması hedeflenmektedir.

Bu çalışmalardan birisi QCM (Kuartz Kristal Mikrodenge) ile yüzey ağırlığını tespitinin TTM cihazı ile kontrolüdür. QCM cihazı yüzey aktivasyonu gerçekleştirilmiş kristallerin yüzeylerine bağlanan moleküllerin nanogram mertebelerindeki ağırlığını tespit etmeye yarayan mikrogravimetrik bir ölçüm yöntemidir. TTM cihazı ile yüzeyine molekül bağlanmış kristallerin yüzeyleri belli bir alan sınırında taranabilir. Taranan birim yüzeyden tespit edilecek moleküllerin alana göre kütleleri çıkarılabilir ve bu sonuçlar QCM'den alınan kütle verileriyle karşılaştırılarak sistemlerin birbirlerine göre doğruluğu tespit edilebilir. QCM'den tespit edilen immobilizasyon sonuçlarının TTM ile görsel hale dönüştürülmesi sağlanabilir.

İmal edilen bu TTM cihazı farklı disiplinlerdeki yüzey kaplama ve karakterizasyon çalışmalarının özellik bakımından incelenmesi çalışmalarında rahatlıkla kullanılacaktır. TTM cihazı; kullanıcı dostu bir tasarıma sahip olması sayesinde ilgili bölümlerin değişimleriyle birlikte AKM, Nanodesenleme makinesi gibi farklı cihazlara dönüşebilir.

## KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] BINNIG, G., GERBER, C.H., STOLL, E., ALBRECHT, T.R. and QUATE, C.F., Atomic Resolution with Atomic Force Microscope, Europhysics Letters, Vol.3, No.12, s.1281-1286, 1987.
- [2] BINNIG, G. and ROHRER, H., Scanning Tunneling Microscopy – From Birth to Adolescence, Nobel Lecture, 1986a.
- [3] BINNIG, G., ROHRER, H., GERBER, C.H., WEIBEL, E., Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy, Physical Review Letters Vol.49, No.1, s.57-60, 1982.
- [4] WIESENDANGER R., Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy Methods and Applications, Cambridge University Press, s.81-179, 1994.
- [5] GUNTHERODT, H.J. and WIESENDANGER R., Scanning Probe Microscopy I.Springer-Verlag, New York 1992a.
- [6] WIESENDANGER R., and GUNTHERODT, H.J., Scanning Probe Microscopy II.Springer-Verlag, New York 1992b.
- [7] JOSEPH, W. Lyding, Variable Temperature Scanning Tunneling Microscope, The Board of Trustees of The University of Illinois, United States Patent Office, Patent No 170.732, 1988a.
- [8] HANSMA, P.K., ELINGS, V.B., MARTI, O., CE BRACKER, C.E., Scanning Tunneling Microscopy and Atomic Force Microscopy: Application to Biology and Technology , Science, Vol.242, No.4876, s.209-216, 1988b.
- [9] SCHAEFER, Roland, Design and Construction of A Scanning Tunneling Microscope, Msc. Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh Pennsylvania U.S., 1989a.
- [10] CHEN, C. C., CHUANG, C. S., CHEN, T. T., CHOU, Y. C., Construction of an Air-Operated Scanning Tunneling Microscope, Chinese Journal Of Physics Vol.21, No.5,1989b.

- [11] HOOGEMAN, M. S., GLASTRA VAN LOON, D., M. LOOS, R. W., FICKE, H. G., DE HAAS, E., VAN DER LINDEN, J. J., ZEIJLEMAKER, H., KUIPERS, CHANG, L.M.F and KLIK, M.A.J, FRENKEN, J. W., Design and Performance of a Programmable-Temperature Scanning Tunneling Microscope, Review of Scientific Instruments, Vol.69, No.5, s.2072-2080, 1998.
- [12] OAKES, P.W., Projects in the Design and Construction of a Scanning Tunneling Microscope and UHV Sample Analysis, B.S. Honor Thesis, Physics of Boston College, Boston U.S., 2004.
- [13] PARK, Sang-Il, and QUATE C.F., Scanning Tunneling Microscope, Review of Scientific Instruments, Vol.58, No.11, s.2010-2017, 1987.
- [14] KLEINDIEK, S. and HERRMAN K.H., A miniaturized Scanning Tunneling Microscope with Large Operation Range, Review of Scientific Instruments, Vol.64, No.3, s.692-693, 1993.
- [15] JAYADEVAIAH, M. and LAKSHMINARAYANAN M.V., Design of a compact Scanning Tunneling Microscope With Feedback to Coarse Approach Controller for Low Scan Ranges, Measurement Science and Technology, Vol.15, No.5, s.35-38, 2004.
- [16] POHL, D.W. Dynamic Piezoelectric Translation Devices, Review of Scientific Instruments, Vol.58, s.54-57, 1987.
- [17] ALEXANDER, John, STM Project, [www.geocities.com/spm\\_stm/Project.html](http://www.geocities.com/spm_stm/Project.html), 2006.
- [18] KOOPS, R. and SAWATZKY G. A., New Scanning Device for Scanning Tunneling Microscope Applications, Review of Scientific Instruments, Vol.63, No.8, s.4008-4009, 1992.
- [19] MULLER, Jürgen, STM, [www.e-basteln.de/index.htm](http://www.e-basteln.de/index.htm), 2006.

- [20] ROGERS, B. L., SHAPTER, J.G., SKINNER, W. M., GASCOIGNE, K., A Method for Production of Cheap, Reliable Pt-Ir Tips, Rev. of Scien. Inst., Vol.71, No.4, s.1702-1705, 2000.
- [21] GUPTA, Anjan K., NG, K. W., Compact Coarse Approach Mechanism for Scanning Tunneling Microscope, Rev. of Scien. Inst., Vol.72, No.9, s.3552-3555, 2001.
- [22] KUK, Y. and SILVERMAN, P. J., Scanning Tunneling Microscope Instrumentation, Rev. of Scien. Inst., Vol.58, pp. 165-180, 1987.
- [23] MAPS, J., Simple Raster Generator for Use With Scanning Tunneling Microscope, Rev. of Scien. Inst., Vol.62, No.2, s.357-359, 1991.
- [24] STROM, V., GOMEZ, R. D., NOGUES, J., RODELL, B. and RAO, K. V., Inexpensive High Voltage Low-Current Amplifier for Driving Long -Range Scanning Tunneling Piezoactuators, Measurement Science and Technology, Vol.6, s.1072-1077, 1995.
- [25] CHEN, Y..P., COX, A. J., HAGMANN, M. J., SMITH, H. D. A., Electrometer Preamplifier for Scanning Tunneling Microscopy, Rev. of Scien. Inst., Vol.67, No.7, s.2652-2653, 1996.
- [26] ZAREIE,M.H., Scanning Tunneling Microscope: Design Construction and Applications, PhD Thesis, Hacettepe University, TR, 1995.
- [27] PIŞKİN E, KOÇUM C, ÇUBUKÇU E, ÜLGEN D., Atomic force microscopy tips (cantilevers) as molecular nucleic acid sensors, Ultramicroscopy, Vol.106, No.4-5, s.326 – 333, 2006.
- [28] KOÇUM C., Taramalı Tünelleme Mikroskobunun Modifikasyonu ve Özel Uygulamalar İçin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, TR, 2000.
- [29] FOWLER, R. H. and NORDHEIM, L., Electron Emission in Intense Electric Fields, Proceedings Royal Society A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Vol.119, No.781, s.173-181, 1928.

- [30] BURSTEIN, E. and LUNDQUIST, S., Tunneling Phenomena in Solids, New York Plenum Press, 1969.
- [31] BARDEEN. J., Tunneling From A Many-Particle Point of View, The American Physical Society, Phys. Rev. Lett., Vol.6, s.57-59, US, 1961.
- [32] TERSOFF, J. and HAMANN, D.R., Theory of the Scanning Tunneling Microscope, American Physical Society, Phys. Rev. Lett.B, Vol.31, No.2, s.805-813, 1985.
- [33] TERSOFF, J. and HAMANN, D.R., Theory and Application for the Scanning Tunneling Microscope, American Physical Society, Phys. Rev. Lett., Vol.50, No.25, s.1998-2001, 1983.
- [34] YEE, Shannon, Design of a Scanning Tunneling Microscope, B.S. Honor Thesis, Department of Mechanical Engineering The Ohio State University U.S., 2007.
- [35] DEMUTH, J. E., HAMERS, R. J., TROMP, R. M. and WELLAND, M. E., Scanning Tunneling Microscopy of Si, American Physical of Society, Phys. Rev. B, Vol.34, No.8, s.5343 – 5357, 1986.
- [36] ALBRECHT, T. R., MIZES, H. A., NOGAMI, J., PARK, S. I. and QUATE, C. F., Observation of Tilt Boundaries In Graphite by Scanning Tunneling Microscopy and Associated Multiple Tip Effects, Appl. Phys. Lett., Vol.52, No.5, s.362-364, 1988a.
- [37] PARK, S. I., NOGAMI, J., MIZES, H. A. and QUATE, C. F., Chemical dependence of the multiple-tip effect in scanning tunneling microscopy, Appl., Phys. Lett., Vol.52, No.6, s.4269 – 4272, 1988b.
- [38] PARK, S. I., NOGAMI, J. and QUATE, C. F., Behavior of Ga on Si(100) as Studied By Scanning Tunneling Microscopy, Appl. Phys. Lett., Vol.53, No.21, s.2086-2088, 1988c.

- [39] MIZES, H. A., PARK, S. I. and HARRISON, W. A., Multiple-tip Interpretation of Anomalous Scanning Tunneling Microscopy Images of Layered Materials, American Physical of Society, Phys. Rev. B, Vol.36, No.8, s.4491 – 4494, 1987.
- [40] PARK. S. and QUATE, C. F., Tunneling Microscopy of Graphite in Air, Appl. Phys. Lett. , Vol.48, No.2, s.112-114, 1986.
- [41] Burleigh Instruments, Inc., Burleigh Park, Fishers, NY 14453, USA.
- [42] COLTON, R.J., BAKER, S.M., DRISCOLL, R. J., YOUNGQUIST, M. G.,BALDESCHWIELER, J.D.,KAISER, W. J., Imaging Graphite in Air by Scanning Tunneling Microscopy: Role of the Tip, Journal of Va. Sci.& Tech.A: Vacuum, Surfaces, and Films, Vol.6, No.2, s.349-353, 1988.
- [43] MIZES, H. A., FOSTER, J. S., Long-Range Electronic Perturbations Caused by Defects Using Scanning Tunneling Microscopy, Science, Vol.244, No. 4904, s.559 – 562, 1989.
- [44] GIMZEWSKI, J. K., HUMBERT, A., BEDNORZ, J. G. AND REIHL, Silver Films Condensed at 300 and 90 K: Scanning Tunneling Microscopy of Their Surface Topography, Physical Review Letters, Vol.57B, No.9, s.867-869, 1985.
- [45] REISS, G., SCHNEIDER, F., VANCEA, J. AND HOFFMANN, H., Scanning tunneling microscopy on rough surfaces: Deconvolution of constant current images, Applied Physic Letters, Appl. Phys. Lett. Vol.57, s.867-869, 1990.
- [46] MUSSELMAN, I.H. and RUSSELL, P.E., Platinum/Iridium Tips with Controlled Geometry for Scanning Tunneling Microscopy, Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, Vol.8, No.4, s.3558-3562, 1990.
- [47] VAN LOENEN, Evert, J., Method of And Device for Sub-Micron Processing a Surface, United States Patent, P.N. 5038322, US, 1989.
- [48] KHOO, M.C.K., Physiological Control Systems: Analysis, Simulation, and Estimation,IEEE Press, 2002.



- [49] JOHNSON, M.A., CROWE, J., MORADI, M.H., Pid Control: New Identification And Design Methods, ISBN 1852337028, Springer Press, 2005.
- [50] ASTROM, K. J. and HÄGGLUND, T., Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control, Journal of Process Control , Volume 14, Issue 6, pp. 635-650, 2004.
- [51] ASTROM, K.J., PID Control, Control System Design Lecture Notes, Department of Mechanical and Environmental Engineering University of California Santa Barbara, US, 2002.
- [52] SUNAY, A.S., KOÇAK, O., KAMBERLI, E. and KOÇUM, I.C., Design and Construction of a Labview Based Temperature Controller with Using Fuzzy Logic, 5th International Cpnference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2007, Uludag Univ., s.377-380, 2007.
- [53] JANTZEN, Jan, Tuning Of Fuzzy PID Controllers, Technical University of Denmark, Department of Automation, Tech. report no 98-H 871 (fpid), Denmark, 1999.
- [54] ASTROM, K. J. and WITTENMARK, B., Adaptive Control, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1994.
- [55] ASTROM, K. J. and HÄGGLUND, T.,PID Controllers, Instrument Society of America, 1995.
- [56] MARCO, B. and MOISÉS, V.B.E., Estudio e implementacion de un metodo de ajuste de controladores pid–difusos aplicado en el control, JIEE, Vol.19, 2005.
- [57] CANALES, F., BARBOSA, P., LEE, F.C., A Zero-Voltage and Zero-Current Switching Three-Level DC/DC converter, Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol.17, No.6, s.898- 904, 2002.
- [58] BINNIG, G., FUCHS,H., GERBER,C.H., ROHRER, H., STOLL, E., and TOSATTI, E., Energy-Dependent State-Density Corrugation of a Graphite Surface as Seen by Scanning Tunneling Microscopy, A Letters Journal Exploring The Frontiers of Physics, PACS numbers: 68.35., s.73.40.Gk, Issue 1, 1986b.

- [59] T. M. H., WONG, Digital Implementation of a Feedback Controller for Scanning Probe Microscopy, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 1991.
- [60] NAWAZ, Z., CATALDI, T. R. I., KNALL, J., SOMEKH, R. and PETHICA, J. B., STM Imaging of Molecules : Factors Affecting Their Reliable Imaging, Surface Science Vol.265, s.139-155, 1992.
- [61] BLACKFORD, B. L., DAHN, D. C. AND JERICHO, M. H., High Stability Bimorph Scanning Tunneling Microscope, Review of Scientific Instruments, Vol.58, s.1343-1352,1987.
- [62] AMREIN,M., WANG, Z., and GUCKENBERGER, R., Microelectronics and Nanometer Structures, J. Vac. Sci, Technol., Vol.B 9, No.2, s.1276-1281, 1991.
- [63] GUCKENBERGER, R., KÖSSLINGER, C., GATZ, R., BREU, H., LEVAI, N., BAUMEISTER, W., A Scanning Tunneling Microscope (STM) for Biological Applications: Design and Performance, Ultramicroscopy, Vol.25, No.2, s.111-121, 1988a.
- [64] GUCKENBERGER, R., KÖSSLINGER, C., BAUMEISTER, W., Design of a Scanning Tunneling Microscope for Biological Applications, Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films, Volume 6, Issue 2, pp. 383-385, 1988b.
- [65] BINNIG, G., SMITH, D.P.E., Single-Tube Three-Dimensional Scanner for Scanning Tunneling Microscopy, Rev. Sci. Instrum. Vol.57, No.8, s.1688-1689, 1986.

## EK-1 STM-BD-2007 Teknik Özellikleri

Elektronik Özellikler	
Bipolar Güç Kaynağı boyutu ve ağırlığı	300 x 120 x 100 mm / 2.2 kg
Kontrol Devresi boyutu ve ağırlığı	360 x 200 x 125 mm / 1.9 kg
Kullanılan güç (amplifikatör ve kontrol kaynağı)	240 V~/ 50 W 50 / 60 Hz
Bilgisayar arayüzü	USB 2.0
Güç Kaynağı ile İletişim	DAC-port
DAC Ölçüm özellikleri	
NI6009	NI6008
14 bit A/D çevirici	12 bit A/D çevirici
48kS/s örnekleme hızı	10kS/s örnekleme hızı
150 Hz çıkış çözünürlüğü	150 Hz çıkış çözünürlüğü
Tarama Aralığı (Ortalama)	9 – 12 bit
Tarama Hızı (100x100 için)	Yaklaşık 20m /100'lük verihattında
Tarama Sinyal Aralığı	0 – 5 V aralığı (DAC çıkışı) 0 – 200V aralığı (Piezoelektrik Tüp) ±197V aralığı (Güç kaynağı çıkışı)
Tarama Alanı ve Data	X – Y ve Z yönlerinde / maks. 256x256 data boyutunda
Ofset Aralığı	0 – 24V aralığı
Tarama iğnesi adım aralığı	Min 1.07nm – optimum 10nm
Tarama iğnesi Hareketi	X ve Y yönünde 8µm Z yönünde 1µm

Güç Kaynağı Çıkışı	X 110V Y 110V Z 55V
I/V çevirici için	±15V ve GND
I/V çevirici tarama fonksiyonu	0.1V/nA

Yazılım	
Sinyal toplamada kullanılan program	Labview
Tarama işleminin parametrelerini kullanıcının belirlemesini sağlayan arayüz	
Akım bilgilerini matris olarak kaydetme	Labview içerisine gömülü Matlab script ile
Görüntü iyileştirme	Matlab Image Processing işlemleri

Bilgisayar	
İşletim sistemi	Windows XP
Elektronik arayüz	USB port
Tavsiye edilen min. gereksinim	Pentium 4/M or AMD Athlon, 256MB, True colour 1024x786 video card, Open GL accelerator, 1GB Ram

TTM ile Ölçüm				
TTM tarafından algılanan akım	<b>10pA</b>	<b>100pA</b>	<b>1nA</b>	<b>10nA</b>
TTM tarafından üretilen çıkış gerilimi	1mV	10mV	100mV	1V
Max. X-Y adımı	160 nm	160 nm	160 nm	160 nm
X-Y çözünürlüğü	10nm	10nm	10nm	10nm

Akım Set değeri	~700pA
Akım Toplama	$\Delta z$ bilgisi, I/V çevirici çıkışı
Tarama iğnesi öngerilimi	10 – 500 mV arası değerler

Mekanik Bölümler	
Kaba yaklaştırma	10 $\mu$ m/tur
İnce yaklaştırma	1 $\mu$ m/tur