

FORM ÖLÇÜM CİHAZI PROBLARININ PRİMER ÖLÇÜMLERDE KULLANILMASI İÇİN ELEKTRONİK ÜNİTELERİN İNCELENMESİ VE KALİBRASYONLARI

Halit DEMİRBAĞ
Cihangir KAYADELEN
Tanfer YANDAYAN
Okhan GANİOĞLU
Murat AKSULU
Hüseyin Metin ERTUNÇ
Nihat AKKUŞ

ÖZET

Bu makalede, form ölçümü amacı ile kullanılan indüktüf problemlerin performansının iyileştirilmesi ve primer seviye ihtiyaçları karşılaması için yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Zamana göre parça yüzeyinden veri toplayan ve bu verileri inceleyen form ölçüm cihazlarında veya tarama özelliği olan CMM cihazlarında kullanılan indüktüf problemlerin form ölçüm performansını incelemek önemlidir. Özellikle Endüstri 4.0 uygulamalarında parça yüzeyinden hızlı ve kısa zamanda yeterli sayıda veri toplamak daha da önemli hale gelmiştir. Bu çalışma kapsamında, iki farklı tip indüktüf probun, farklı elektronik üniteler ile kullanılarak performans incelemeleri yapılmıştır. Elektronik ünitelerden alınan problemlerin DC gerilim çıkışları, hızlı Analog-Dijital (A-D) dönüştürücü ile bilgisayara LabView tabanında yazılmış bir program ile aktararak veriler işlenmiştir. Nano sensörlü izlenebilir Piezo aktüatör yardımı ile prob kalibrasyonları 5 nm'den daha iyi belirsizliklerle yapılmış; kalibrasyon eğrileri ve bu eğrilerin değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Üretici firma tarafından verilen elektronik çözünürlükler, 10-100 kat arasında iyileştirilmiş (10 nm'den 1 nm ve 0,1 nm'ye kadar), mevcut çözünürlükle tespit edilemeyen prob hataları tespit edilmiş ve incelenmiştir. Çalışmada, indüktüf problemlerin $\pm 5 \mu\text{m}$ ölçüm aralığında, $\pm 1 \text{ nm}$ içinde doğrusal olarak çalışabileceği gösterilmiştir. Çalışma TÜBİTAK UME tarafından primer seviyede form ölçümü yapan form cihazları projesinin (EURAMET EMPIR Project 18RPT01ProbeTrace) bir parçası olup, indüktüf problemlerin çalışma prensibi, statik ve dinamik kalibrasyonu ve performansı hakkında önemli ve özgün bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İndüktüf prob, Form ölçümü, Prob kalibrasyonu, boyutsal ölçümler.

ABSTRACT

In this study, the experimental work carried out for improvement of inductive probes used in form measuring machines in order to answer the primary form measurement demands is described. Two different inductive probes integrated with different electronic units were investigated. DC probe signals taken from the electronic units are processed in the PC through fast AD converters with help of LabView based software. The probes were calibrated using a traceable piezo actuator fitted with nanosensors in the uncertainties better than 5nm. The probe calibration curves and their evaluation was carried out. The resolution values were improved 10-100 times better than the original manufacturer values. In this way, probing errors that was previously impossible to detect was investigated. The work is one part of the research work in TUBITAK UME regarding to primary form measurement devices and present valuable and original information for inductive probes, their static and dynamic performance with help of experimental results.

Key Words: Inductive probes, form measurements, probe calibration, dimensional measurements

1. GİRİŞ

Günümüzde üretilen iş parçalarının yüzey yapıları ve form parametreleri, imalat, mühendislik ve Ar-Ge araştırmaları için incelenmektedir [1, 2]. İmalat sürecinde, üretim tezgâhlarındaki hatalar, parça yüzeylerinde parçaların istenilen formda üretilmesini engeller. Örneğin tornalanmış bir yüzey, ideal bir daire şeklinde üretilemez. Bu tip üretim hatalarının yüksek olması parçaların çalışma fonksiyonunu etkiler. Bu sebeple form hataları, talep edilen tolerans değerleri altında tutulur. Tolerans değerlerini kontrol etmek amacıyla, dairesellik, doğrusalık, paralellik vb. gibi form parametrelerinin ölçümünün yapıldığı form ölçme cihazları kullanılır. Bu cihazlar üretim hattında kullanıldığı gibi, bazen referansların ölçümü için laboratuvarlarda da kullanılmaktadır.

Form cihazlarında belli çalışma tolerans değerleri vardır. Cihazların bu değerleri sağlayıp sağlamadığı kalibrasyonları yapılarak kontrol edilir. Bu amaçla form ölçüm cihazı kalibrasyon standartları kullanılır. Bu standartların kalibrasyonu, birincil (primer) seviyede, TÜBİTAK UME gibi ulusal metroloji enstitüleri tarafından gerçekleştirilir.

Ulusal metroloji enstitülerinin görevi bu özel referans standartların kalibrasyonunu yaparak izlenebilirliği sağlamaktır [3]. Bunun için iki yol vardır; (1) başka bir ulusal metroloji enstitüsü tarafından kalibre edilmiş benzer referans standartları kullanıp özel referansları kalibre etmek veya (2) birincil (primer) seviyede ekipmanlar kullanarak kalibrasyonunu yaptıkları referans cihazları ile özel referansları kalibre edip ülke içinde izlenebilirliği kendi ulusal metre standardı üzerinden sağlamaktır.

TÜBİTAK UME primer seviyede bu işlemleri yapabilmek için, toplam 10 ülkeden oluşan bir Avrupa birliği projesini koordine etmek üzere almıştır. 18RPT01 ProbeTrace kısa isimli projede lazer interferometre ile kalibrasyonunu yapılan nano sensör ve nano mesafe ilerleme cihazları kullanarak, problemlerin statik kalibrasyonlarının yanında, dinamik performanslarını da inceleyecektir [4].

Zamana göre parça yüzeyinden veri toplayan ve bu verileri inceleyen form ölçüm cihazlarında veya tarama (ölçüm süresince yüzey üzerinden prob teması kesilmeden yapılan ölçüm) özelliği olan CMM cihazlarında kullanılan indüktüf problemlerin performansı form ölçümleri için önemli olup, Endüstri 4.0 uygulamalarında parça yüzeyinden hızlı ve kısa zamanda yeterli sayıda veri toplamak için de önem arz etmektedir.

Çalışmamızda bu primer form ölçüm cihazı problemlerinin arzu edilen seviyede kullanılması için farklı elektronik üniteler, farklı problemler ile kullanılarak incelendi. Bazı ilave devre imalatı ve eklemeleri yapıldı. Elektronik ünite üzerinden gelen prob verilerin bilgisayar ortamına farklı hızlarda aktarılması ve değerlendirilmesi gerçekleştirildi. Buradaki amaç, mevcut form ölçüm cihazımızda kullanılan, Mahr TW6 form cihazı probunu istenilen bir elektronik ünite ile eşleştirerek, hedef olarak verilen 5 nm altında hassasiyetle çalışmasını sağlamaktır.

İlk olarak problemlerden gelen mekanik verileri, elektronik sinyallere çevirmek için elektronik üniteler araştırıldı ve tespit edildi. Farklı elektronik üniteleri farklı problemler ile uyumlaştırılarak, problemlerin çalışması sağlandı. Problemlerin ilerlemesi sonucu oluşan gerilim değişim değerleri, National Instruments'ın hızlı A/D dönüştürücüsü (NI USB-4431) ile bilgisayara LabView yazılımı kullanılarak aktarıldı ve yazılım ile işlenerek mesafe verilerine çevrildi. Doğru çevirmenin yapılabilmesi için prob ve elektronik ünite çiftlerinin referans piezo-actuator transdüserler (PZT) kullanarak kalibrasyonları yapılarak kalibrasyon eğrileri bulundu.

Yapılan çalışma ile Mahr TW6 probu için arzulanan sonuçlar alınamaz iken, TESA GT22 probu için hedeflenen sonuçlara erişilmiştir. 10 nm çözünürlüklü GT22 probu; prob çözünürlüğü 0,1 nm'ye indirilmiştir. Ayrıca gerek statik gerekse dinamik ölçümlerde, 5 nm altında doğruluk değerlerine ulaşılmıştır.

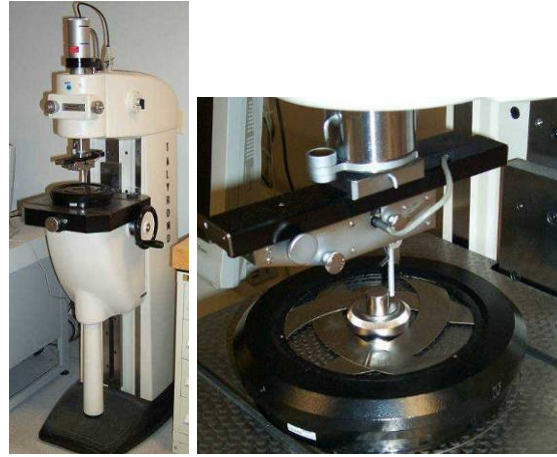
Bu çalışma kapsamında alınan test sonuçları, elde edilen gürültü değerleri, bunların prob performansı üzerindeki etkileri ve prob ile yapılacak statik ve dinamik ölçümler için doğruluğunun çıkarılması makalede anlatılmaktadır.

2. FORM ÖLÇÜM CİHAZLARI

Yuvarlaklık ölçümü yapan form ölçme cihazlarında, döner bir milin dönme eksenini referans olarak alınıp, iş parçası üzerinden, kısa mesafe ölçümü yapan bir prob ile iş parçası üzerindeki yarı çap değişimleri ölçülür. Bu işlemi yapan form veya yuvarlaklık ölçme cihazları iki temel prensiple çalışır. Döner mil üzerine yerleştirilen iş parçası döner mil merkezine göre ayarlandıktan (eşmerkezlilik ve tilt ayarları ile döner tabla eksenini ile parça eksenini çakıştırılır) sonra döndürülür ve sabit bir prob ile parça yüzeyinden, parça yüzeyinden probun teması kesilmeden, yarıçap değişimi verileri alınır. Diğer bir yöntemde ise parça sabit tutularak, prob ünitesi döner mil ile döndürülerek aynı işlem yapılır. Genelde indüktif problemler kullanılarak yapılan bu işlemde (kısa mesafe ölçümleri), yuvarlak parçaları yarıçap değişimleri küçük olduğundan, probun ölçme aralığının $\pm 20 \mu\text{m}$ olması yeterlidir. Bu tip form ölçme cihazları için örnek modeller, **Şekil 1**'de gösterilmektedir.



(a) Prob sabit, parça döner



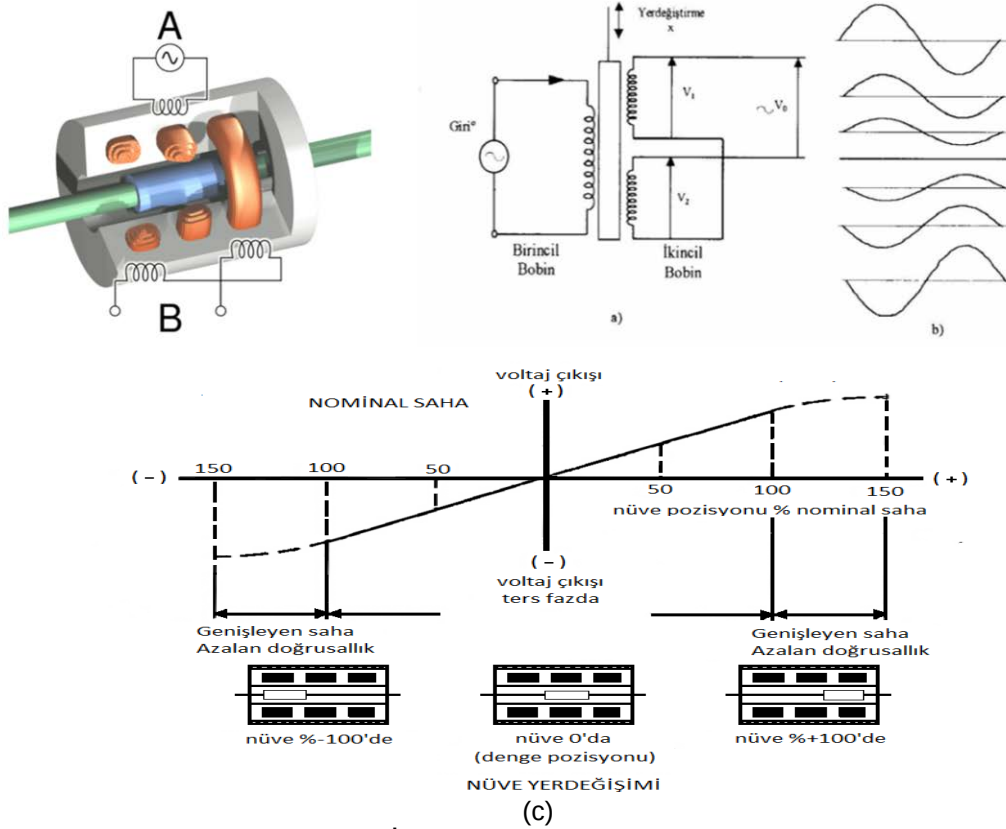
(b) Parça sabit, prob döner

Şekil 1. Form ölçüm cihazı tipleri

Form ölçüm cihazlarının doğru çalıştığından emin olmak için, kalibrasyonlarının yapılması gerekir. Kalibrasyon sırasında, referans döner tablanın ne kadar yuvarlak döndüğünün tespiti haricinde, yarıçap değişimlerini algılayan probun da bu işlem sırasında doğru çalışıp çalışmadığının kontrolü gerekir. Bu işlem iki şekilde yapılır: statik ve dinamik kalibrasyon. Statik kalibrasyonda, probun mesafe değişimleri doğru tespit edip etmediğini kontrol edilirken, dinamik kalibrasyonlarda, döner durumda hıza bağlı olarak ne kadar doğru veri aldığı (yarıçap değişimlerini tespit ettiği) dinamik olarak ölçülür. Prob olarak en çok indüktif prensibe göre çalışan problemler tercih edilmektedir.

2.1 İndüktif problemler (LVDT) ve çalışma prensipleri

Doğrusal değişken fark dönüştürücüler (Linear Variable Differential Transformer-LVDT) ortak indüktans prensibine göre çalışan sensörlerdir [5] (**Şekil 2**). Yapısı itibarıyla, birincil ve ikincil iki bobinden (sargılardan) oluşur ve bu bobinlerin ortasında nüve olarak, ferromagnetik bir malzemeden rod şeklinde yapılmış, demir çubuk kullanılır (**Şekil 2 (a)**). Bu nüve, bobinler arasında manyetik akı yolu sağladığı için, nüvenin pozisyonu ortak indüktans vasıtasıyla, çıkış gerilimlerini kontrol etme imkânı vermektedir. Birincil bobine bir AC gerilim uygulandığı zaman, ikincil bobinde bir gerilim indüklenir. Bu gerilimin genliği ve yönü, nüvenin konumuna göre değişmektedir (**Şekil 2 (b)**). Eğer nüve ortadaysa her iki ikincil bobinde ihmal edilebilecek kadar çok küçük bir atık (residual) gerilim dışında, herhangi bir çıkış alınamaz. Nüve hareket ettirilerek ikincil bobinden birine yaklaştırılıp diğerinden uzaklaştırılırsa, nüvenin yaklaştığı bobinde çıkış gerilimi artarken diğerinde aynı oranda azalmaktadır. **Şekil 2. (c)**'de görüldüğü gibi, denge pozisyonunun her iki tarafında düzgün bir doğrusal çıkış elde edilmektedir. İndüktif problemlerin doğrusallığını arttırmak için sinyal işleme devreleri (signal conditioning circuits) ile uyumlu olması gerekmektedir.



Şekil 2. İndüktif prob çalışma prensibi [5]

2.2 LVDT Sinyal İyileştirme Devresi (Signal Conditioning Circuit)

Sinyal iyileştirme devreleri, indüktif problemlerin birincil bobinleri için analog AC besleme gerilimi üretir ve ikincil bobinlerden çıkış AC sinyalini alarak; yükseltme (amplifying) ve filtreleme yaparak çıkış sinyalini DC gerilime çevirir. Diğer bir ifadeyle, indüktif probun merkezindeki demir nüvenin yer değiştirmesine göre doğrusal DC çıkış gerilimi üretir (**Şekil 2. (c)**). Bu sayede çıkış sinyalini doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artırır. LVDT sensörü ile sinyal iyileştirme devresi ne kadar uyumlu çalışırsa probun hassasiyeti aynı oranda artar.

3. KULLANILAN İNDÜKTİF PROBLAR VE ELEKTRONİK ÜNİTELER

Farklı iki prob ile iki 2 farklı elektronik ünite kullanılarak performanslar incelenmiştir. Bu çalışmada amaç, form ölçüm probu için orijinaline yakın, hatta gürültüsü daha iyi fakat çok hızlı veri alınabilecek elektronik ünitenin tespit edilmesidir.

3.1 Prob/Elektronik Ünite çiftleri

Farklı problemler ile farklı sinyal işleme devreleri (amplifier) birlikte kullanılarak, devreler ile problemlerin uyumu ve mesafe ölçüm performansları bu çalışmada incelenmiştir. İncelenen prob ve sinyal işleme devre çiftleri aşağıda sıralandığı gibidir.

1. Prob:Mahr MMQ 40, TW6 prob ve elektronik ünite: LVM-110 devresi
2. Prob:Mahr MMQ 40, TW6 prob ve elektronik ünite: TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404)
3. Prob:TESA GT-22 Prob ve elektronik ünite: TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404)

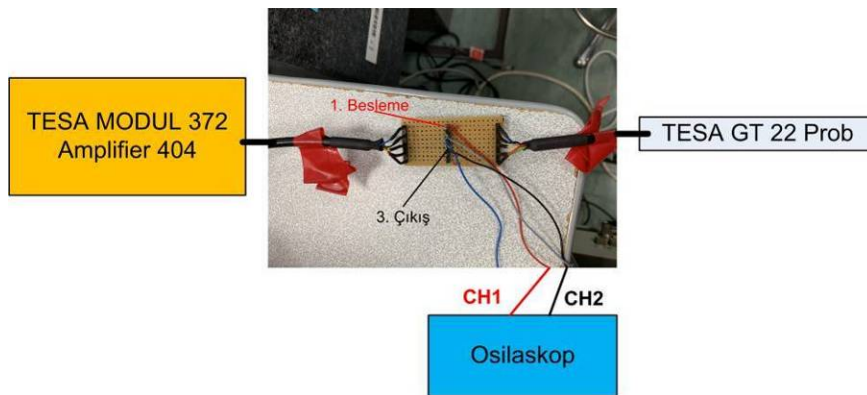
Probları farklı devrelerle kullanabilmek için problemleri orjinal elektronik üniteleri ile çalıştırıp sinyal alışverişini gözlemleyerek (veri akışını ölçerek), operasyon parametreleri tespit edilmiştir. Parametreler ve ilgili prob / elektronik ünite çiftleri **Şekil 3**'te verilmiştir.

 Mahr TW6 prob	 LVM-110 + El yapımı amplifier ±13.5 Volt (DC) → ±100µm  TESAMODUL Unit 372 ±0.4 Volt (DC) → ±100µm	 TESA GT22 prob	 TESAMODUL Unit 372 ±1 Volt (DC) → ±20µm
(a) Mahr TW6 prob ve Elektronik Üniteler		b) TESA GT22 prob ve Elektronik Üniteler	

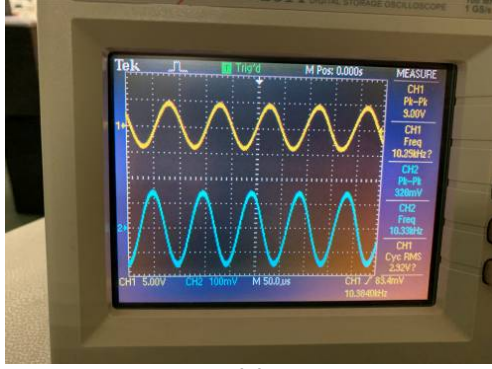
Şekil 3. İncelenen İndüktif prob ve Elektronik ünite çiftleri

3.2 Prob/Elektronik Ünite çiftlerinin çalışma parametrelerinin tespiti

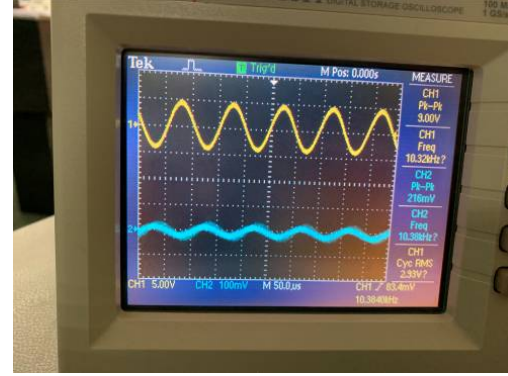
Farklı problemleri farklı elektronik üniteler ile kullanabilmek için, elektronik ünitelerin bağlantı ve çalışma parametrelerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Ancak bu konuda üretici firmalar, ticari kaygılardan ötürü, bilgi vermeyi tercih etmemektedirler. Fakat çalışma sırasında bağlantı aralarına girilerek ve sinyaller dinlenerek bağlantı için gerekli parametreler tespit edilmiştir. MMQ40 TW6 probunun besleme ve çıkış sinyal parametreleri bağlantı aralarına girilerek ölçülmüştür. Aynı yol izlenerek benzer çalışma bağlantı devresini Tesa GT 22 Probu için yapılmıştır (**Şekil 4**). Ölçüm sonuçları **Şekil 5**'de görüldüğü gibi osiloskop yardımıyla gözlemlenmiştir. **Şekil 5. (a)**'daki osiloskop ekranında besleme (üstteki) ve çıkış (alttaki) sinyalleri gözlemlenmektedir. **Şekil 5. (b)** ise indüktif pronun ortasındaki nüvenin merkeze yaklaştığındaki anda çıkış sinyalinin nasıl değiştiğini göstermektedir.



Şekil 4. TESA GT22 probunun orjinal Elektronik ünitesi ile bağlantısının izlenerek, giriş ve çıkış parametrelerinin tespiti



(a)



(b)

Şekil 5. TESA GT-22 Prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404) ile kullanımı sırasında giriş besleme- CH1 ve çıkış değerleri-CH2 (a) Prob maksimum ilerlemede (nüve uzakta) (b) Prob sıfır konumuna yakın (nüve merkezde)

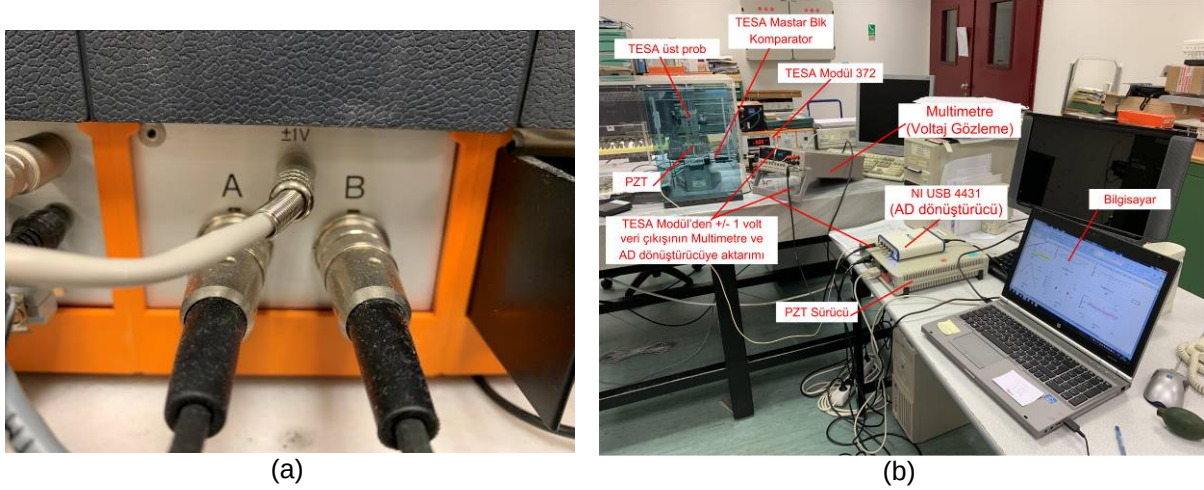
Tablo 1. Problar için elektronik üniteler ve besleme parametreleri

Sinyal İşleme Devresi	 Mahr MMQ40 form Cihazı (Orijinal Elektronik Ünite)	 LVM-110	 TESA MODUL 372 Amplifier 404
Besleme Frekansı	20 kHz	10 kHz	10 kHz
Besleme sinyali voltajı (AC) Tepeden Tepeye (PV)	7,60 volt	10 volt	9 volt

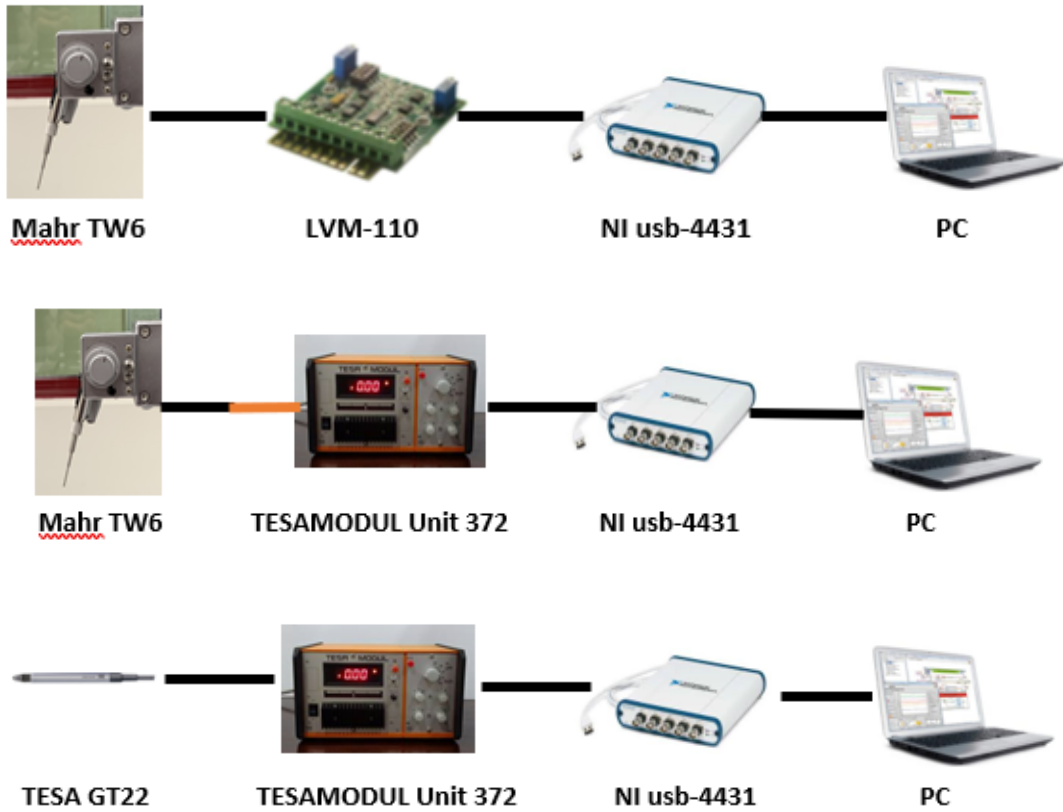
3.3 Prob/Elektronik ünitelerinden alınan DC voltaj çıkışların hızlı bir şekilde bilgisayara aktarımı

Form ölçüm cihazlarında kullanılan problar, ölçümün hızlı olması sebebiyle, hızlı veri almak durumundadır. Çünkü bu cihazlar dönen bir parça üzerinden sürekli veri toplar ve bu verileri analiz eder. Bu sebeple elektronik ünitelerden alınan DC sinyalleri Analog/Dijital (AD) dönüştürücü kullanarak, bilgisayar ortamına alınır. İş parçasının dönme hızına ve form ölçüm standartlarındaki verilere dayanarak 1 turda (12 saniyede) 3600 veri alınabilmesi için en az 300 Hz örnekleme hızına ihtiyaç vardır. Fakat bu çalışmada alınan ölçüm örneklerinin fazla sayıda alınıp hesaplamalarda ortalama değer kullanılabilmesi için daha hızlı veri alınmıştır. Bu amaçla örnekleme frekansı maksimum 112 kHz olan bir National Instruments'ın AD dönüştürücüsü (NI USB 4431) kullanılmıştır. **Şekil 6** ve **7** de prob sinyalinin bilgisayara aktarımını gösteren şemalar bulunmaktadır.

TESAMODUL Unit 372 aslında, endüstride yaygın olarak kullanılan referans master blok kalibrasyonun için üretilmiş master blok komparatöründe kullanılmakta olup, en iyi 0,01 μm çözünürlük ile prob sinyalini işlemektedir. İşlenen sinyaller, master blok kalibrasyonu için bilgisayara RS232 ile aktarılır. Bu çalışmada TESAMODUL Unit 372 arkasında bulunan, $\pm 20 \mu\text{m}$ değere karşılık gelen ± 1 Volt (DC) analog çıkış sinyali, işlenerek 0,1nm çözünürlüğe ulaşılmıştır. **Şekil 6.** da TESAMODUL Unit 372 analog çıkışı ve kalibrasyon kurulumu gösterilmektedir.



Şekil 6. Elektronik Unite prob bağlantı fotoğrafları (a) TESAMODUL Unit 372 arkasında bulunan, ± 20 μm değere karşılık gelen ± 1 Volt (DC) analog çıkış (b) ± 1 Volt (DC) analog çıkış sinyalin işlenmesi için düzene.



Şekil 7. Farklı elektronik ünitelerden alınan prob sinyallerinin bilgisayara şematik aktarımı

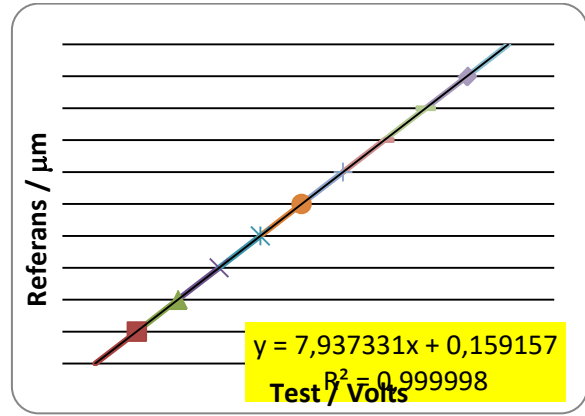
4. PROB KALİBRASYONU

İndüktüf problar çoğu zaman master bloklar ile kalibre edilirler. Bu işlemde master blokların tam olarak konumlandırılmaması ve sıcaklık etkileri sebebiyle (master değiştirme sırasında) kalibrasyon belirsizliği artmaktadır. Alternatif olarak nanosensörlü piezo aktuatör transdüsörler kullanılabilir.

Probtan alınan voltaj değerleri, bu değerlere karşılık gelen referans mesafe değerleri ile ilişkilendirilme işlemine probun kalibrasyonu adı verilir. **Şekil 8**'de prob sinyali gerilim değerlerinin, mesafe değerleri cinsinden nasıl elde edildiği gösterilmektedir. Elde edilen denklemde "x" yerine prob devresinden okunan gerilim değeri konulduğunda, probun ilerleme değeri uzunluk birimi mikrometre cinsinden "y" değeri hesaplanarak bulunur.

PZT (mikron)	Probe Volts	Probe Mikron
-5.0000	-0.6498	-4.9985
-4.0000	-0.5230	-3.9919
-3.0000	-0.3985	-3.0042
-1.9999	-0.2722	-2.0012
-1.0000	-0.1463	-1.0025
0.0001	-0.0207	-0.0053
1.0001	0.1059	0.9998
2.0001	0.2315	1.9967
3.0001	0.3580	3.0007
4.0001	0.4846	4.0057
5.0001	0.6100	5.0012

(a)

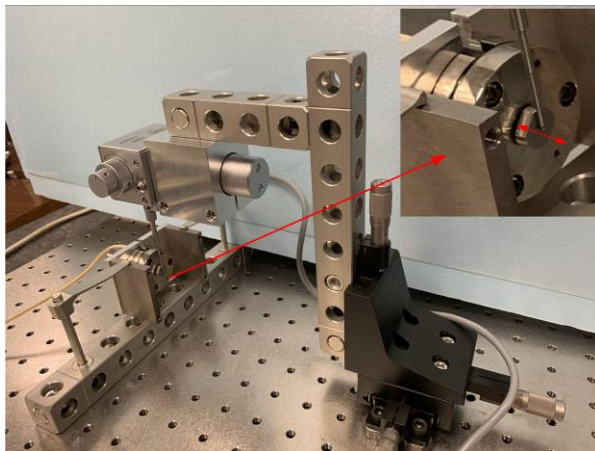


(b)

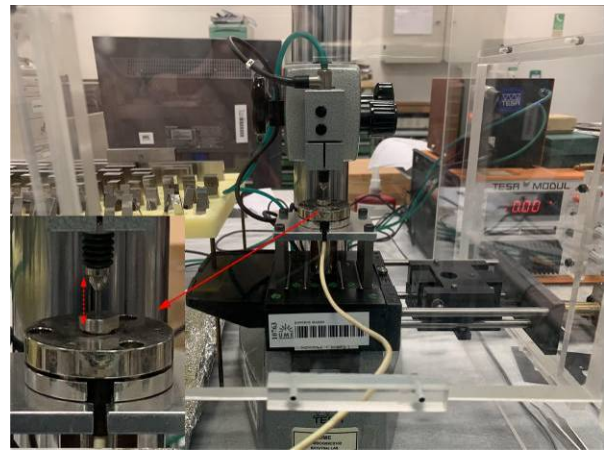
Şekil 8. Prob kalibrasyon eğrisi ve denkleminin çıkarılması (a) Voltaj – mesafe kalibrasyon tablosu (b) Voltaj – mesafe kalibrasyon eğrisi ve denklemi

4.1 Prob kalibrasyonu; prob/elektronik ünite çiftlerinin incelenmesi için düzenekler

Probların kalibrasyonu için daha önce lazer interferometre kullanılarak kalibrasyonu yapılmış, Digital Piezo Aktuatör/Transdüsör (PZT), (Quensgate NPS serisi) [6] kullanılmıştır. PZT ile $\pm 5 \mu\text{m}$ lik ölçüm aralığında 0,1nm çözünürlük, 5 nm belirsizlikle istenilen adımlarda izlenebilir mesafe üretilebilmektedir. **Şekil 9**'da probların PZT ile kalibrasyonu gösteren düzenekler bulunmaktadır.



(a)



(b)

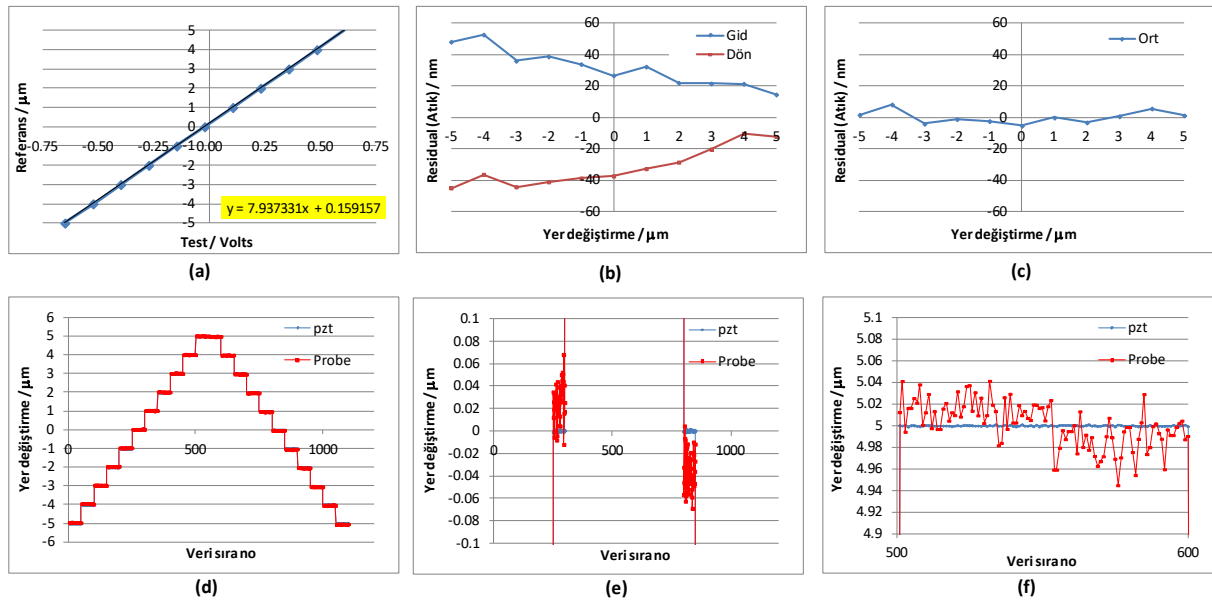
Şekil 9. Prob Kalibrasyon düzenekleri (a) Mahr TW6 probu kalibrasyonu, (b) TESA GT22 prob (TESA UPC Master Komparatörü üzerindeki üst prob) kalibrasyonu

4.2 Prob kalibrasyonu; prob/elektronik ünite çiftlerinin incelenmesi, statik kalibrasyon sonuçları

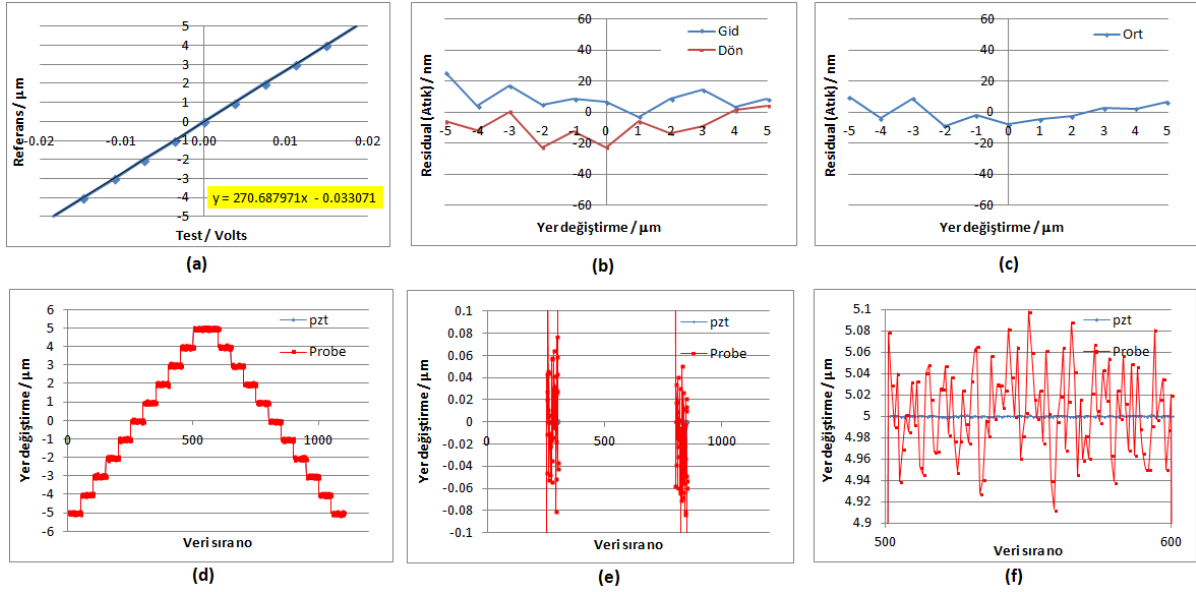
Çalışmada aşağıda listelenen prob-elektronik ünite çiftleri kalibrasyonu yapılmıştır.

1. Mahr MMQ 40, TW6 prob / LVM-110 devresi + İlave el yapımı Amplifier
2. Mahr MMQ 40, TW6 prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404)
3. TESA GT-22 Prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404)

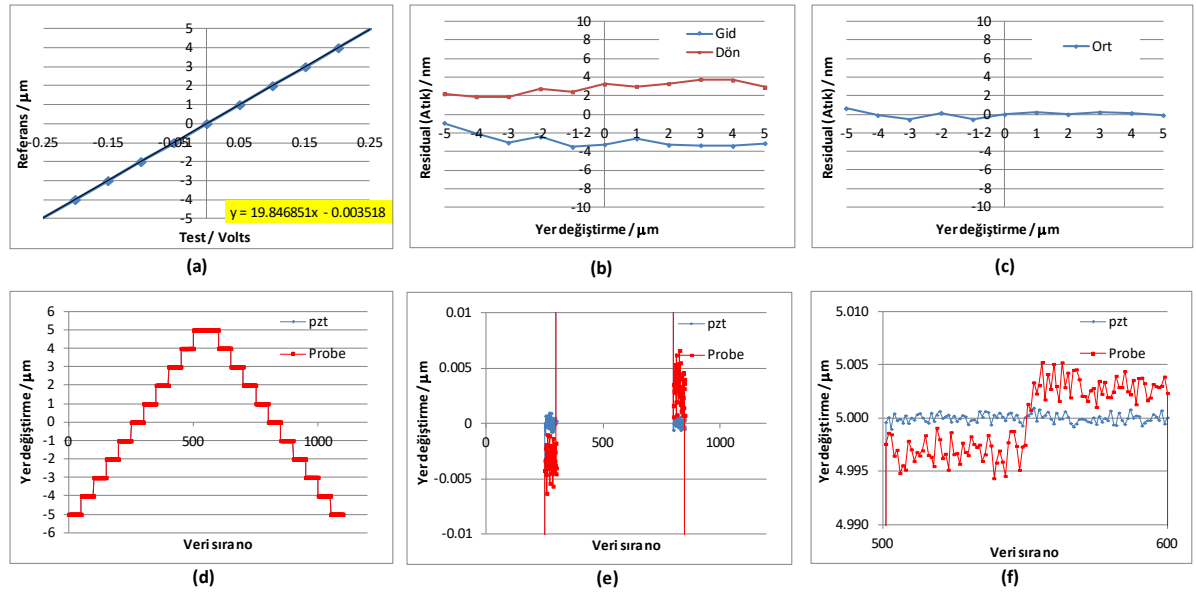
Şekil 10-13'te bu prob/elektronik ünite çiftleri ile alınan kalibrasyon ölçüm sonuçları bulunmaktadır. Her birinde benzer şekilde (a-f) şıkları arasında sonuçlar verilmiştir. Probtan okunan voltaj değerleri (test) ile PZT'den okunan referans mesafe değerleri (mikrometre) ilişkilendirilmiş ve kalibrasyon eğrisine, lineer bir denklem uydurularak, gerilim değerlerine karşılık gelecek mesafe değerleri mikrometre olarak hesaplanmıştır. Bu durum şekillerin (a) kısmında verilmiştir. Bu denklemin ne kadar doğru çalıştığı tespit etmek için, denklem kullanılarak aynı gerilim değerleri ile prob için mesafe değerleri bulunmuş ve referans değer olan PZT değerleri ile karşılaştırılmıştır. Aralarındaki fark nm cinsinden (b)'de probun Gidiş ve Dönüş değerleri için, (c)'de ise bunların ortalaması olarak gösterilmiştir. Aynı denklem kullanılarak alınan prob ham gerilim değerleri (her bir istasyonda 50 adet), mesafe değerinde çevrilmiş ve alınan prob kalibrasyon sonuçları (Gidiş daha sonra son noktayı geçerek Dönüş: merdiven şeklinde) (d) şıklarında verilmiştir. (d) şıkında verilen sonuçlara yakından detaylı bakıp analiz etmek için ölçeklendirme yapılmış, probun sıfır noktası civarında gidiş ve dönüş arasındaki farklar (e) şıkında gözlemlenmiştir. Probtan sıfır noktasında veri alımı sırasında zaman farklı olduğundan, oluşabilecek farkın, probun mekanik aksanındaki geri dönüş boşluğu mu (backlash) yoksa, ortam sıcaklığındaki değişimden meydana gelen kayma mı olduğunun tespiti için, (f) şıkında çok kısa zaman diliminde oluşan (+5 µm istasyonunda) prob gidiş-dönüş arasındaki farklar incelenmiştir.



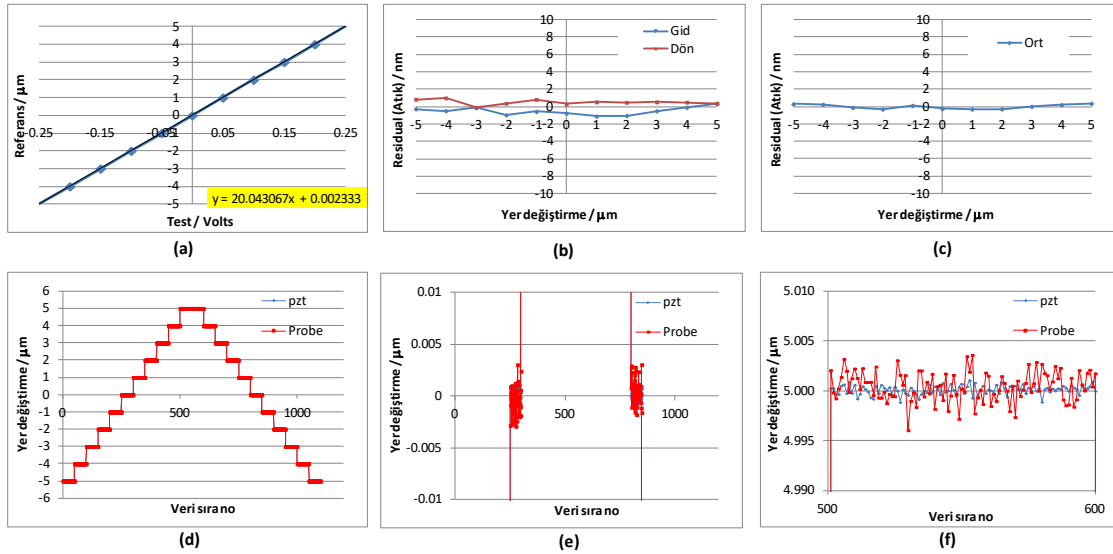
Şekil 10. Mahr MMQ 40, TW6 prob / LVM-110 devresi + Amf (a) Kalibrasyon eğrisi ve denklemini (b) Kalibrasyon eğrisinin Gidiş-Dönüş verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (c) Kalibrasyon eğrisinin ortalama verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (d) Kalibrasyon işleminin pozisyon noktaları (e) 0 µm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış, (f) 5 µm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış: Gidiş ve Dönüş noktalarında prob backlash boşluk değeri tespiti.



Şekil 11. Mahr MMQ 40, TW6 prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404) (a) Kalibrasyon eğrisi ve denklemi (b) Kalibrasyon eğrisinin Gidiş-Dönüş verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (c) Kalibrasyon eğrisinin ortalama verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (d) Kalibrasyon işleminin pozisyon noktaları (e) 0 μm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış, (f) 5 μm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış: Gidiş ve Dönüş noktalarında prob backlash boşluk değeri tespiti.



Şekil 12. TESA GT-22 Prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404) (Prob kullanım dışı) (a) Kalibrasyon eğrisi ve denklemi (b) Kalibrasyon eğrisinin Gidiş-Dönüş verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (c) Kalibrasyon eğrisinin ortalama verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (d) Kalibrasyon işleminin pozisyon noktaları (e) 0 μm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış, (f) 5 μm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış: Gidiş ve Dönüş noktalarında prob backlash boşluk değeri tespiti.



Şekil 13. TESA GT-22 Prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404) (Prob kullanım içi) (a) Kalibrasyon eğrisi ve denklemi (b) Kalibrasyon eğrisinin Gidiş-Dönüş verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (c) Kalibrasyon eğrisinin ortalama verileri için residual (atık) verileri "nm" olarak (d) Kalibrasyon işleminin pozisyon noktaları (e) 0 µm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış, (f) 5 µm civarındaki pozisyon noktalarına yakından bakış: Gidiş ve Dönüş noklarında prob backlash boşluk değeri tespiti.

İlgili prob çifleri sonuçları incelendiğinde, form ölçüm cihazlarında istenilen seviyede kullanıma uygun halde TESA GT22 prob / TESA Modül çifti uygun bulunmuştur. TW6 probu için kullanılan her iki elektronik ünite'de istenilen sonuçlara henüz ulaşılammıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde bunun en önemli sebepleri aşağıda sıralandığı gibidir:

Çalışmada TW6 için kullanılan her iki elektronik ünite besleme AC sinyali 10 kHz iken, TW6 orjinal besleme sinyali 20 kHz değerindedir. Bu durumda çıkış sinyalinde genlik düşüşüne sebep olmakta ve sonuç olarak birim ilerleme miktarı için daha düşük gerilim değeri alınmaktadır. Bu değerler gürültü seviyesine yakın olunca, arzu edilen hassas sonuçlar (5 nm altı) elde edilememiştir. Bu problem, ilave el yapımı amplifier ile çözülmek istense de, gürültü seviyesi yükseltildiği için istenilen seviyeye ulaşılammıştır.

Çalışmadaki hedeflerden birisi, TW6 probu ile **Şekil 13**'de TESA probe ve kendi elektronik ünitesine yapılan iyileştirmeye elde edilen sonuçlara ulaşmaktır. Bu hedefe ulaşabilmek için TW6 probu ile kullanılmak üzere 20 kHz besleme sinyali ile çalışacak bir amplifier imalatı yapılması gerekmektedir.

Şekil 12 ve **Şekil 13**'te iki aynı tip TESA GT22 prob incelenmiştir. **Şekil 12 (f)** ve **Şekil 13 (f)** incelendiğinde, kullanım dışı olan probun mekanik aksanlarında bir tutukluk olduğu ve bunun 5 nm civarında bir backlash'a sebep olduğu görülmüştür. Doğal olarak 10 nm çözünürlüğe sahip orjinal TESA Modül de bu ayrımı görmek söz konusu değildir.

4.3 Prob kalibrasyonu; prob/elektronik ünite çiftlerinin incelenmesi dinamik kalibrasyon için gürültü sonuçları

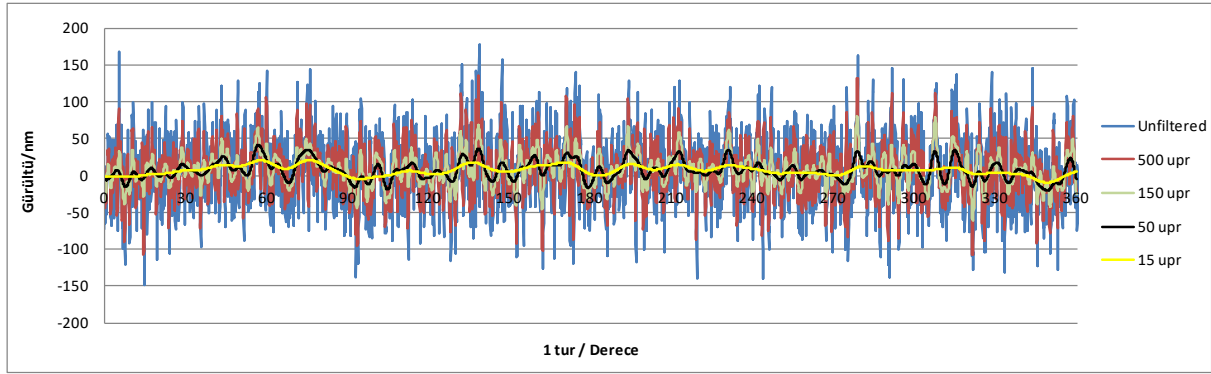
Form ölçüm problemleri, dönen bir parça üzerinden zamana karşı veri aldıkları için, dinamik performansı son derece önemlidir. Form ölçüm problemleri dinamik kalibrasyon çalışmaları TÜBİTAK UME'de devam etmektedir. Bu makalede, dinamik performans için ilk etapta prob/elektronik çiftlerinin gürültü değerleri farklı filtreler göre incelenmiştir. Bu çalışma sırasında prob bir yüzeye temas halinde iken, form ölçümü sırasında 1 tura denk gelecek zaman diliminde (12 saniye) sürekli veri alınmıştır (3600 adet toplam çevrede veri olacak şekilde). Veri alınırken prob dakikada 0,001°C'den daha kararlı ortam şartlarında (olabilecek sıcaklık kaymasını önlemek için) sabit tutulmuş ve hareket ettirilmemiştir. Bu sebeple sadece gürültü verileri incelenebilmektedir.

Form ölçümlerinde filtre, iş parçası üzerinde oluşan imalat hatalarının sebeplerini tespit etmek için kullanılır. Filtre tipleri ve şartları ISO 16610-21 standardında anlatılmaktadır. Çalışmada elde edilen gürültü verileri incelenirken, veriler filtresiz ve farklı filtreler kullanılarak değerlendirilmiştir.

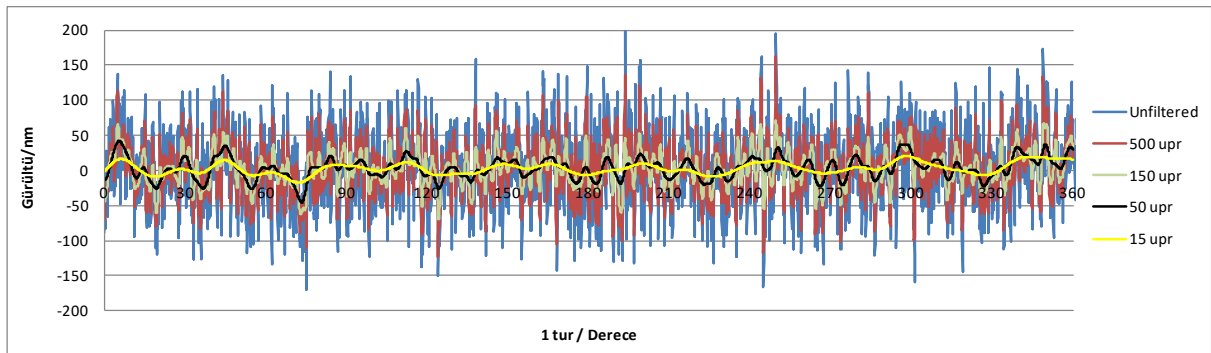
Tablo 2'de ölçüm sonuçları sırasıyla filtre uygulanmadan, 500, 150, 50, 15 UPR (Undulation Per Revolution / 1 turdaki salınım/dalga sayısı) alınmıştır. Ayrıca tabloda verilen değerlerin grafiksel gösterimi **Şekil 14, 15 ve 16'**da farklı prob/elektronik ünite çiftleri için gösterilmiştir.

Tablo 2. Prob/Elektronik ünite çiftleri için alınan sinyaldeki elektronik gürültü sonuçları (nm olarak)

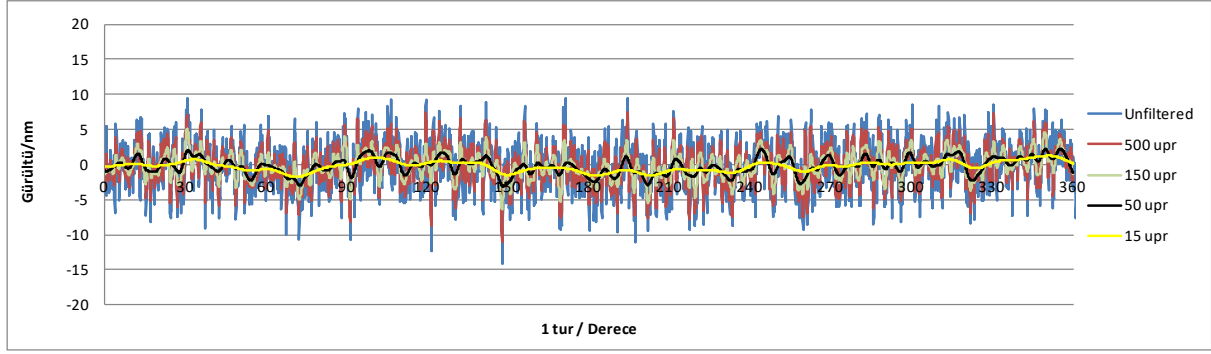
Probe / Devre (amplifier)	rms-gürültü/nm		
	Probe TW6 /LVM110	Probe TW6 /TESA 372	Probe TESA GT22 / TESA 372
Filtre yok / Unfiltered	47.6	52.6	3.3
500 UPR	35.7	40.2	2.7
150 UPR	21.4	24.7	1.9
50 UPR	12.0	14.5	1.1
15 UPR	6.3	7.9	0.7



Şekil 14. Mahr MMQ 40, TW6 prob / LVM-110 devresi gürültü sonuçları (farklı filtrelere göre)



Şekil 15. Mahr MMQ 40, TW6 prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404 gürültü sonuçları (farklı filtrelere göre)



Şekil 16. TESA GT-22 Prob / TESAMODUL unit 372 (TESA MODUL Amplifier 404) (Prob kullanım içi) gürültü sonuçları (farklı filtrelerle göre)

SONUÇ

Bu çalışmada; zaman uzayında parça yüzeyinden veri toplayan ve bu verileri inceleyen form ölçüm cihazlarında veya tarama özelliği olan CMM cihazlarında kullanılan indüktüf problemlerin, form parametrelerini ölçme kabiliyetlerini tespit etmek ve primer form cihazlarında kullanımı için gerekli özellikleri taşıyıp taşımadığını tespit etmek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

İki farklı tip indüktüf probun, farklı elektronik üniteler ile kullanılarak, performans incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Prob ve elektronik ünitelerin uyumluluğu araştırılmış ve prob ve elektronik ünitelerin birlikte kullanımında oluşan gürültü durumu incelenmiştir. 12 saniye boyunca alınan 3600 ham verinin standart sapması orjinal devresinden çıkış geriliminin işlenmesiyle 3,3 nm olarak bulunmuştur. Form ölçümlerinde genellikle uygulanan 500-15 UPR filtrelerinde, bu değerin (2,7-0,7) nm olarak değiştiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 10 nm altında bir belirsizlikte primer seviye form ölçüm yapmak mümkün olabilecektir.

Firma tarafından kullanılan Analog-Dijital dönüştürücüler ile elde edilen prob çözünürlük değerleri 10-100 kat daha iyileştirilerek, üretici firma tarafından verilen 10 nm'den daha küçük olan 1 nm ve 0,1 nm anlamlı çözünürlükler elde edilmiştir. Yapılan çalışmada problemler $\pm 5 \mu\text{m}$ ölçüm aralığında, 1 μm adımlarda kalibre edilmiş ve kalibrasyon eğrileri çıkarılmıştır. Her bir istasyonda alınan 50 verinin standart sapması en iyi şartlarda 1,5 nm ve en iyi elde edilen lineer kalibrasyon eğrisinin residual (atık) değerleri $\pm 1 \text{ nm}$ içinde bulunmuştur. Diğer bir değişle, $\pm 5 \mu\text{m}$ ölçüm aralığında bir indüktüf prob kalibre edilerek, $\pm 1 \text{ nm}$ içinde lineerlikten sapma ile kullanımı gösterilmiştir. Böylece elde edilen bu değerler ile master blok kalibrasyonunda da kullanılan indüktüf problemlerin kapasitesinin sınırları tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmayla, problemlerin gidiş, dönüş hareketleri arasındaki farkların 5 nm mertebelerinde olabileceği, fakat bunun 10 nm olan üretici firma elektronik göstergelerinde tespit edilemediği gösterilmiştir.

Farklı problemlere farklı elektronik üniteler uygulanarak, hedeflenen sonuçlara ulaşılamadığından dolayı diğer tip problemler için TÜBİTAK UME'de bu çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışma, TÜBİTAK UME tarafından primer seviyede form ölçümü yapan form cihazları projesinin bir parçası olup, indüktüf problemlerin çalışma prensibi, statik ve dinamik kalibrasyonu ve performansı hakkında önemli ve özgün bilgiler sunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Delibaş B. ve Yandayan T. "Form hataları ve önemi", Üretimde Kalite Dergisi, Aralık 2000.
- [2] Delibaş B. ve Yandayan T. "Yeni form ölçüm parametreleri ve standartları," IV. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 184-195, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 25-26 Ekim 2001.
- [3] Thalmann R. and Spiller J., Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 5879:140-149, August 2005. DOI: 10.1117/12.618219
- [4] 18RPT01 ProbeTrace projesi, <https://www.euramet.org/research-innovation/research-empir/empir-calls-and-projects/>
- [5] KAYADELEN C. "LVDT Sensörü ile Dönen Cisimlerin Geometrik Ölçümü ve Otomasyon Sisteminin Tasarımı", Bitirme Projesi, Teknoloji Fak. Mekatronik Böl. Marmara Uni. 2016
- [6] Queensgate NPS serisi, <https://www.prior.com/product-category/nanopositioning>

ÖZGEÇMİŞ

Halit DEMİRBAĞ

Halit DEMİRBAĞ, 04.7.1996 tarihinde Tekirdağ'da doğdu. İlk ve ortaokulu Atatürk İlköğretim okulunda okudu. Liseyi Pakize Narin Anadolu lisesinde okudu. 2014 yılında başlayan lisans eğitimi ise Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde devam etmektedir.

Cihangir KAYADELEN

1992'de İstanbul'da doğdu. Lise eğitimini Haydarpaşa Anadolu Teknik ve Meslek Lisesi, Elektrik-Elektronik bölümünde tamamladı. 2016 yılında Marmara Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2016 yılı lisans eğitimi süresi boyunca TÜBİTAK UME'de LVDT Sensörü ile Dönen Cisimlerin Geometrik Ölçümü ve Otomasyon Sisteminin Tasarımı projesinin geliştirilmesinde görev aldı. 2017 yılında Korkmaz Mutfak Eşyalarında ARGE departmanında Mekatronik Tasarımcı olarak ürün geliştirme ve tasarlama üzerine çalışmaya başladı. Aynı zamanda Diksiyon, JCI Liderlik ve Türk Mutfağı gibi kurslara gitmiştir. DESIGN WEEK TURKEY gibi birçok fuarlara ve seminerlere katılarak kendini tasarım alanında geliştirmektedir.

Tanfer YANDAYAN

1996 yılında Manchester Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümünde, 'CNC takım tezgahlarında iş parçalarının, lazer ile işlem sırasında temassız ölçümü' konulu projesiyle doktorasını tamamladıktan sonra, Mart 1997'de mecburi hizmetini yapmak üzere TÜBİTAK UME'de çalışmaya başlamıştır. 15 yıl boyunca, TÜBİTAK UME Boyutsal Laboratuvarı sorumluluğu yürüten Tanfer Yandayan, dönem dönem UME Mekanik Grup Koordinatörlüğü yapmıştır. Uzunluk, boyutsal ve açı ölçümleri için uluslararası alanda ülkemizi temsil etmiş, boyutsal laboratuvarının yurt dışında ilk karşılaştırma ölçümlerine katılmasında ve kalibrasyon kabiliyetlerinin uluslararası alanda kabul görmesinde ve listelenmesinde, TÜRKAK tarafından laboratuvarın akreditasyonunda, ve ara denetimlerinde boyutsal laboratuvarını hazırlamış ve yöneticiliğini yapmıştır. Dünya Bankası ve Alman hükümeti projelerinin kullanılarak, boyutsal laboratuvarının genişletilmesini, laboratuvar elemanlarının yetiştirilmesini, hizmet sayısının 5'ten 100'lü rakamlara çıkarılmasını, bunların karşılaştırmalar ile desteklenmesini sağlamıştır. Boyutsal ölçümler alanında, ülkemizdeki ilk karşılaştırmalı ölçümleri düzenlemiş, TÜRKAK'ın kuruluşu sırasındaki çalışmalarda yer almış, TÜRKAK adına ilk laboratuvar akreditasyonu denetimlerine katılmış ve TÜRKAK sektör komitesinde uzun süre görev yapmıştır. Avrupa Bölgesel Metroloji Organizasyonu EURAMET adına, ülkelerin ulusal metroloji enstitülerinin denetimlerine katılan Tanfer YANDAYAN, 2006 yılında, Makine Mühendisliği alanında üniversite doçenti olmuş, 2012 Mayıs itibarı ile laboratuvar yöneticiliği görevinden ayrılarak, Avrupa Metroloji Araştırma Programı çalışmalarına daha fazla yönelmiştir. 2008-2012 ve 2012-2016 yılları arasında Güney Asya Ülkelerinin metroloji faaliyetlerini açıklayan Avrupa Komisyonu için rapor hazırlamış ve uyumlaştırma çalışmalarında bulunarak AB çerçeve programları kapsamında 2 adet proje tamamlamıştır. 2012 yılında, 12 farklı ülkeden oluşan 16 proje ortağını bir araya getirip hazırladığı Açı Metrolojisi projesi ile TÜBİTAK UME'ye proje koordinatörlüğü kazandırmıştır. 2013-2016 yılları arasında üst düzey açı ölçümleri konusunda dünyada ses getiren çalışmaların gerçekleştirildiği bu projenin koordinatörlüğünü yapıp tamamlamıştır.

Çok sayıda uluslararası konferanslara ve kurumlara davetli konuşmacı olarak katılan Tanfer Yandayan, yabancı akreditasyon organizasyonlarının daveti üzerine eğitimler, danışmanlıklar vermekte ve laboratuvar akreditasyon denetimlerine katılmaktadır. Aynı zamanda akademik çalışmalarına devam eden Tanfer Yandayan, Gebze Teknik Üniversitesinde "Mekanik Ölçüm Prensipleri", Sabancı Üniversitesinde "İmalat Metrolojisi" yüksek lisans derslerini vermektedir. Boyutsal ölçümlerin tüm konularını kapsayan Tanfer Yandayan, bilimsel araştırmalarda daha ziyade açı, master blokları, skala ölçümleri, interferometrik ölçümler, çap ve form ölçümleri konularında çalışmaktadır.

Okhan GANİOĞLU

1969 yılı İstanbul doğumludur. 1993 yılında ODTÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 1996 yılında Yüksek Lisans derecesi almıştır. 1996-1997 yılları arasında özel bir firmada Arazi Ölçüm Cihazları konusunda teknik servis personeli olarak çalışmıştır. 1997 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Boyutsal Laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 1999-2012 Yılları arasında Laboratuvar sorumlu vekili olarak görev yapmıştır. 2012 - 2016 yılları arasında Boyutsal Laboratuvarı sorumlusu olarak görev yapmıştır. 2005 yılında uzman araştırmacı, 2012 yılında başuzman araştırmacı unvanını almıştır. 2009 - 2011 yılları arasında TURKAK Ölçme Tekniği ve Kalibrasyon Sektör Komitesi'nde görev almıştır. 2012 - 2016 yılları arasında EURAMET Uzunluk Teknik Komitesinde (TC-L) ve Uzunluk Danışmanlar Komitesi (CCL) Boyutsal Çalışma Gruplarında (WGDM) ülkemizi temsil etmiştir. Halen boyutsal laboratuvarında başuzman olarak çalışmakta olup, 2000 yılından beri aktif olarak TURKAK akreditasyon denetimlerinde görev almaktadır.

Murat AKSULU

1990 yılında İTÜ Makine Mühendisliğinden mezun olmuştur. Aynı Üniversiteden 1993 yılında Yüksek Lisans derecesi, 2008 yılında Doktora derecesi almıştır. 1996 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Boyutsal Laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 2008 yılında uzman araştırmacı, 2013 yılında başuzman araştırmacı unvanını almıştır. Ana çalışma konusu Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve Form ölçümleridir. Boyutsal metroloji alanında çeşitli Avrupa birliği projelerinde, TÜBİTAK 1001 projesinde ve TÜBİTAK iç projelerinde çalışmıştır. Halen boyutsal laboratuvarında başuzman araştırmacı olarak çalışmaktadır.

Hüseyin Metin ERTUNÇ

H. Metin Ertunç 1969 yılında Denizli'de doğmuştur. Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden 1991 yılında mezun olduktan sonra, 2 yıl Devlet Demiryolları'nda elektronik mühendisi olarak çalışmıştır. Kazandığı YÖK bursuyla 1994 yılında Amerika Birleşik Devletlerine otomatik kontrol konusunda yüksek lisans ve doktora eğitimi yapmak üzere gitmiştir. 1995 yılında yüksek lisans derecesini, 1999 yılında doktora derecesini aldıktan sonra yurda dönüp Kocaeli Üniversitesinde öğretim üyesi olarak göreve başlamıştır. Mekatronik Mühendisliği bölümünün kuruluşunda görev almış ve halen aynı bölümde akademisyen olarak çalışmaktadır. 30 adet SCI yayını bulunmaktadır. 2 Tübitak ve 1 SANTEZ projesinin yürütücülüğünü yapmış ve tamamlamıştır. Otomatik kontrol, sinyal işleme ve yapay zeka tabanlı sistemler konusunda çalışmaları bulunmaktadır.

Nihat AKKUŞ

Nihat Akkuş, Balıkesir Merkez Endüstri Meslek Lisesi Tesviye Bölümü mezunu olup, Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Marmara Üniversitesinde Fiziksel Metalürji (1983) ve Makine Eğitimi (1986) alanlarında tamamlamış ve takiben doktorasını 1992-1996 Yılları Arasında Tokyo Şehir Üniversitesinden "Titanyum alaşımlarının Yüksek Sıcaklık altında Süperplastik Şekillendirilmesi" üzerine yapmıştır.

Marmara Üniversitesinde Araştırma Görevlisi, Tokyo Üniversitesinde Öğretim Üyesi, Fransa Bourgony Üniversitesinde doktora sonrası araştırmacı ve doçent kadrolarında çalışmıştır. 2002 yılından itibaren tekrar katıldığı Marmara Üniversitesi Mekatronik Bölümünde 6 yıl Kurucu Bölüm Başkanlığı yapmış, Tezli ve Tezsiz Yüksek lisans Programlarını başlatmıştır. Kurucu Üniversite rektörlüğü, IIW, TR-ANB-Uluslararası Kaynak Enstitüsü, Türkiye Kurucu Başkanlığı gibi yöneticilik çalışmaları ile birlikte 20 civarında ulusal ve uluslararası projelerde yer almış, 120 civarında uluslararası yayını, makine - mekatronik teknolojileri ve temel ölçme alanlarında yayınlanmış 7 kitabı bulunmaktadır.