

# PÜRÜZLÜLÜK VE FORM ÖLÇÜM CİHAZI PROPLARI İÇİN YENİ İZLENEBİLİRLİK YOLLARI

**Okhan GANİOĞLU**  
**Tanfer YANDAYAN**  
**Murat AKSULU**

## ÖZET

İmalat ve üretim süreçlerinden elde edilen ürünlerin yüzey yapıları ve form parametreleri, mühendislik ve bilimsel çalışmalar için, incelenmesi gereken önemli özelliklerdir. Günümüzde, yuvarlaklık, düzlemsellik, paralellik, yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey parametrelerini karakterize etmek için, pürüzlülük ölçümlerinde iğne uçlu ve temaslı proplara sahip, form ölçümlerinde ise küresel ve temaslı proplara sahip cihazlar kullanılmaktadır. Bu ölçümlerin güvenilirliğini sağlamak için "özel referans standartlar" kullanılarak bu cihazlar kalibre edilir. Özel referans standartların kalibrasyonunun yapılabilmesi için Ulusal Metroloji Enstitüleri, önemli bilimsel çalışmalar yapmaktadır. Toplam 10 proje ortağı ülkenin katıldığı, koordinatörlüğünü TÜBİTAK UME'nin yaptığı, yüzey pürüzlülüğü ve form cihazı standartlarının kalibrasyonu konusunda araştırmalar yapacak, 18RPT01 ProbeTrace kısa isimli proje Eylül 2019 itibariye ile başlamıştır. Bu makalede form ve yüzey pürüzlülüğü cihazlarının kalibrasyonu için mevcut durum ve sorunlar gösterildikten sonra, 18RPT01 ProbeTrace projesinde yapılacak çalışmalar ile bu sorunların nasıl giderileceği anlatılacaktır. Ülkemizdeki ikinci seviye laboratuvaların ve hassas parça imalatında bulunan firmaların konu ile ilgili bilgilendirilmesi ve önümüzdeki yıllarda proje çıktılarından nasıl faydalanabilecekleri kısaca aktarılacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Yüzey Yapısı, Form Ölçümleri, İzlenebilirlik, Kalibrasyon Yöntemleri, Prop, Pürüzlülük.

## ABSTRACT

Surface finish and form parameters of products from manufacturing processes are important features to be examined for engineering and scientific purposes. Currently, form and surface measurement devices with contact probes and stylus are used to characterize engineering surface parameters such as roundness, straightness, parallelism, roughness etc. These devices are calibrated using "special reference standards" to ensure the reliability of these measurements. National Metrology Institutes (NMIs) conduct research for better calibration of these reference standards. The project 18RPT01 ProbeTrace, with a total of 10 project partner countries started in September 2019 and is being coordinated by TUBITAK UME. Research will be carried out under this project for calibration of form and surface roughness standards studying novel methods providing direct traceability SI unit metre. In this paper, the planned research work under 18RPT01 ProbeTrace project will be shared in order to facilitate dissemination activities to reach much better impact after review of the current state of the art and problems. It will also be described that how the project will address these problems and provide solutions.

**Key Words:** Surface Texture, Form Measurements, Traceability, Calibration Methods, Probe, Roughness

## 1. GİRİŞ

İmalat ve üretim süreçlerinden elde edilen ürünlerin yüzey yapıları ve form parametreleri, mühendislik ve bilimsel çalışmalar için, incelenmesi gereken önemli özelliklerdir. İmalat endüstrisinde, parça yüzeyleri; belirli pürüzlülük ve form toleransları içerisinde üretilmektedir. Bu nedenle, yüzey pürüzlülüğü ve form parametrelerinin doğru bir şekilde ölçülmesi gerekir. Günümüzde, yuvarlaklık, düzlemsellik, paralellik, yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey parametrelerini karakterize etmek için; pürüzlülük ölçümlerinde iğne uçlu ve temaslı proplara sahip, form ölçümlerinde ise küresel ve temaslı proplara sahip cihazlar kullanılmaktadır.

Prop uç çapları, form ölçüm cihazlarında birkaç milimetre civarında olmasına rağmen, pürüzlülük ölçüm cihazlarında uç yuvarlaklık yarıçapı mikrometre mertebelerine kadar inmektedir. Her iki cihazda, işlenmiş yüzey üzerinde, dinamik olarak, yani uç veya yüzey hareket halindeyken, birkaç yüz mikrometre (Maks.:1000 µm) ölçüm aralığında ölçümler alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu ölçümlerin güvenilirliğini sağlamak için "özel referans standartlar" kullanılarak bu cihazlar kalibre edilir.

Ulusal metroloji enstitülerinin görevi bu özel referans standartların kalibrasyonunu yaparak izlenebilirliği sağlamaktır. Bunun için iki yol vardır;

1. Başka bir ulusal metroloji enstitüsü tarafından kalibre edilmiş benzer referans standartları kullanıp özel referansları kalibre etmek
2. Birinci (primer) seviyede cihaz, standart ve ekipmanlar kullanarak kalibrasyonunu yaptıkları referans cihazlar ile özel referansları kalibre edip ülke içinde izlenebilirliği kendi ulusal metre standardı üzerinden sağlamaktır. İkinci yolu gerçekleştiren dünyada sayılı birkaç ülke vardır.

TÜBİTAK UME; mevcut standartlara alternatif olacak, izlenebilirliğin doğrudan metrenin tanımından sağlanabileceği ve cihaz ölçüm aralığının tümünün kesintisiz bir şekilde taranabileceği metotlar üzerine çalışmak amacıyla, Avrupa Birliği (AB) Metroloji Araştırma ve İnovasyon Programına, çok uluslu bir ortak proje önerisi sunmuş ve Kasım 2018'de savunmasını başarıyla gerçekleştirerek projenin AB'den desteklenmesini sağlamıştır.

Toplam 10 ülkenin proje ortağı olarak katıldığı, "18RPT01 ProbeTrace " Traceability for contact probe and stylus instrument measurements" [1] isimli projenin koordinatörlüğünü TÜBİTAK UME yapacaktır. Projede TÜBİTAK UME lazer ile kalibrasyonunu yaptığı, nano sensör ve nano mesafe ilerleme cihazlarını kullanarak, problemlerin statik kalibrasyonlarının yanında, dinamik performanslarını da inceleyecektir. Çıktıları arasında EURAMET (Avrupa Metroloji Birliği) rehber dokümanlarının yazılması da olan proje sonunda, gelişmekte olan ulusal metroloji enstitüleri ve ikinci seviye laboratuvarların, cihaz ve referans standartlarının kalibrasyonu için izlenebilirliği kendi üzerlerinden sağlaması beklenmektedir.

## 2. GENEL YÜZEY HATALARI, FORM VE PÜRÜZLÜLÜK HATA FARKLARI

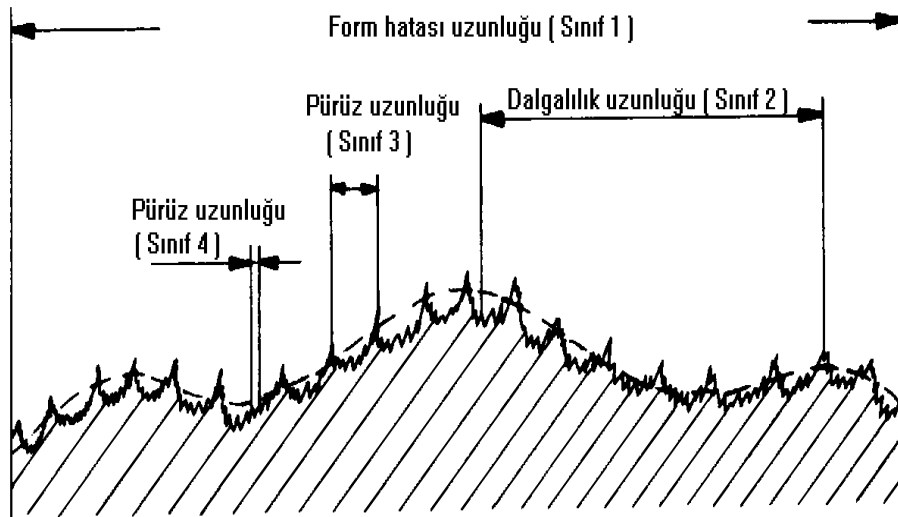
Ölçüm parçaları işleme sırasında genelde 3 tür hataya maruz kalırlar. Bunlar istenilen boyutta, istenilen geometrik şekilde ve istenilen yüzey pürüzlülüğü değerinde parçaların elde edilememesine sebep olur. Bu hataların oluş biçimi, parçanın üretim şekli ve metotlarına göre değişiklik gösterir.

Bu hatalar arasında yer alan ideal geometrik şekilden sapma (form) ve yüzey pürüzlülüğü hataları genel olarak yüzey hatalarını (Tablo 1.) oluştururlar. Form hataları ideal geometrik şekilden sapma iken, yüzey pürüzlülük hataları ise yüzeydeki girinti ve çıkıntılardır. Dünyanın şekli buna güzel bir örnektir. Dünyamız uzaydan ideal yuvarlak bir küre olarak görünmektedir. Fakat gerçekte dünyanın şekli tam bir küre değildir. Dünyamız kutuplardan basık iken ekvator bölgesinde ise daha şişkindir. Yani ekvatorun dünya merkezine olan uzaklığı kutup noktalarının dünya merkezine olan uzaklığından daha büyüktür. Ayrıca dünya üzerinde herhangi bir noktanın merkeze olan uzaklığı her yerde aynı değildir. Bunun nedeni yer şekilleridir (dağlar, ovalar, çukurlar). Bu dünyanın ideal küre şekline göre form hatasıdır. Dünyamızın yüzey pürüzlülük hataları ise daha küçük alandaki yer şekilleridir.

Yüksek bir dağdan bir ovaya baktığımızda, ovayı düz olarak görebiliriz. Ancak, dağdan inip alçak bir tepeden ovayı yakından incelersek, yüzeyin tam olarak düz olmayıp “engebeli” olduğunu fark ederiz. Bu engebeler örneğin 15 m yükseklikte ve 300 m uzunlukta olabilir. Yer yüzeyine daha da yakından bakarsak, daha önce fark edemediğimiz başka engebelerle karşılaşırız. Bunlar da örneğin 5 m yükseklikte ve 30 m uzunlukta olabilir. Dikkat edilirse, bu iki tip engebe arasındaki en önemli fark dalga boylarıdır. Büyük dalgaboyuna sahip engebe “dalgalılık”, küçük dalgaboyuna sahip engebe ise “pürüzlülük” olarak isimlendirilir. Bu durumda gerçek yüzey, saf pürüzlülüğün saf dalgalılık üzerine eklenmesinden oluşacaktır. Makine elemanlarının form ve yüzey pürüzlülük hatalarını da aynı mantıkla düşünebiliriz. İş parçası üzerindeki yüzey hatalarını dört grupta toplayabiliriz (Şekil 1.).

**Tablo 1.** Genel yüzey hataları.

Form hatası (Sınıf 1)	: Uzunluğu genişliğinin (tepe yüksekliğinin) yaklaşık 1000 katı olan hatalardır
Dalgalılık (Sınıf 2)	: Uzunluğu genişliğinin (tepe yüksekliğinin) yaklaşık 100 ile 1000 katı arasında olan hatalardır
Yüzey pürüzlülüğü (Sınıf 3,4)	: Uzunluğu genişliğinin (tepe yüksekliğinin) yaklaşık 5 ile 100 katı arasında olan hatalardır



**Şekil 1.** Genel yüzey hataları

Aslında yüzey hatalarının ölçümleri aynı olmasına rağmen, ölçümler sırasında pürüzlülük, dalgalılık ve form sapmalarının birbirinden ayrılmasında seçilen “cut-off (sınır) dalga boyu etkilidir. Büyük dalga boylu sapmaları elimine edecek kadar küçük değer seçersek, pürüzlülük ölçümlerine yoğunlaşmış oluruz. Bu durumda seçilen cut-off’tan büyük dalgaboyuna sahip sapmalar dalgalılık kabul edilir ve incelemeye alınmaz. Dalgalılık ve formu incelemek istiyorsak bunun tersi yapılır. Eğer bir yüzeyde dalgalılık yoksa cut-off ne seçilirse seçilsin, pürüzlülük sonucunda hep aynı tepe ve çukurları görürüz. Yüzeyde dalgalılık varsa, seçilen cut-off büyüdükçe daha iri tepe ve çukurları pürüz olarak görürüz. Yani daha küçük bir cut-off için dalgalılık gözüyle baktığımız sapmalara, büyük cut-off seçtiğimizde pürüzlülük gözüyle bakarız [2].

Form ve pürüzlülük hatalarını ayırmak için ayrıca filtreler kullanılır. Filtreler, geometrik sapmaları dalga boylarına göre birbirinden ayırmaya yarar. Bilindiği gibi iş parçaları üzerinde, değişik sınıflarda geometrik sapmalar vardır (Şekil1.). Form hatasının belirlenmesi için birinci ve ikinci sınıf sapmaların göz önünde bulundurulması gerekir, yani form hataları için yüzey pürüzlülük sapmalarını filtre yardımıyla elimine etmek ve böylece, birinci ve ikinci düzeydeki form hatalarına ulaşmak gerekir.

### 3. FORM ve PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİNDE KULLANILAN CİHAZLAR

#### 3.1. FORM ÖLÇÜM CİHAZLARI

Form ölçüm cihazlarında ana ölçme fonksiyonu dairesel ölçümlerdir (yuvarlaklık, salgı vb.). Dairesel ölçümlerde temel prensip yuvarlak parçaların merkeze göre yarıçap değişikliğinin bulunmasıdır. Ölçümlerde döner bir milin dönme eksenini referans olarak alınıp, iş parçası üzerinden, kısa mesafe ölçümü yapan bir prob ile, iş parçası üzerindeki yarıçap değişimleri ölçülür. Temel olarak iki farklı prensiple çalışan cihazlar mevcuttur; Döner Prob tipli form ölçüm cihazı, döner tabla tipli form ölçüm cihazı (Şekil 2.). Döner Prob tipli form ölçüm cihazında parça sabit, prob dönmekte iken diğerinde prob sabittir ve parça dönmektedir. Döner Prob tipli form ölçüm cihazının tercih edilme sebebi daha büyük ve ağır parçaların problemsiz olarak ölçülmeleridir.



a) Döner prob tipli form ölçüm cihazları



b) Döner tabla tipli form ölçüm cihazları

**Şekil 2.** Form Ölçüm Cihazları

Döner kısımlarda, yataklamadan gelecek hataların daha sonra izole edilmesi zor olduğu için, hassas yataklama için özel rulmanlı yataklar kullanılmaktadır (örneğin ball bush bearing). Fakat hava yatakları da tercih edilebilmektedir. Bu sistemde basınçlı hava sayesinde sürtünen yüzeyler birbirinden ayrılır. Böylece sürtünme kuvvetleri ortadan kalkar. Ancak basınçlı hava sağlayan devrede basınç dalgalanması varsa ölçümler etkilenebilmektedir.

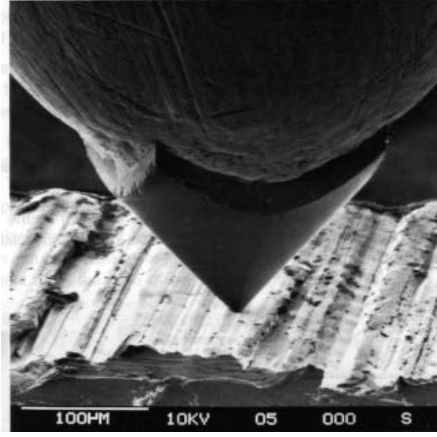
Cihazlarda ölçüm kısmında indüktüf problar kullanılmaktadır. Zaman zaman bu problar doğrusal değişen fark dönüştürücüler (Linear Variable Differential Transformer-LVDT) olarak da adlandırılmaktadır. Yüzeyle temas ederek ve yüzeyden ayrılmadan ölçüm alan bu probların uç çapları birkaç mm civarında olmaktadır. Bu problar ile yapılan işlemde (kısa mesafe ölçümleri), yarıçap değişimleri küçük olduğundan, probun ölçme aralığının yaklaşık  $\pm 20 \mu\text{m}$  olması yeterli gelmektedir. Ayrıca probların dinamik olarak performansının, prob devresi ve filtreleme özellikleri ile kontrol edilmesi gerekir. Aksi takdirde, hareket halindeki parça yüzeyinde, zamana göre alınan mesafe değişim değerlerinin ne kadar sağlıklı olduğundan emin olunamayacaktır.

#### 3.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜM CİHAZLARI

Yüzey pürüzlülüğü ölçüm metodları temelde, karşılaştırma ve direkt ölçüm olarak ikiye ayrılır. Bazı kaynaklarda ölçüm cihazları, temaslı ölçüm ve temassız ölçüm olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu durumda, iğne uçlu cihazlar ve yüzeye değen objektiflere sahip optik cihazlar temaslı, yüzeye değmeyen optik cihazlar ise temassız ölçüm sınıfına girmektedir. Temassız ölçüm yapan cihazlara örnek olarak interferometrik prensiple ölçüm yapan 3d cihazlar verilebilir.

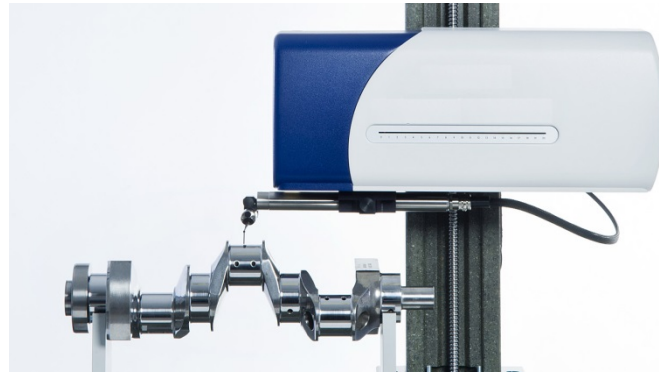
İndüktif proba sahip olmaları sebebiyle bizim esas konumuz İğne uçlu ölçüm cihazlarıdır. Bu cihazların indüktif problemlerinin ucunda, yüzeye temas eden ve ölçümleri üniteye aktaran iğne (stylus) kısmı bulunmaktadır (Şekil 3.). Günümüzde iğneler için 2 µm uç yuvarlatma yarıçapı yaygın olarak kullanılmaktadır. İğneler koni ve piramit olmak üzere iki tipte imal edilmekte olup tepe açıları 60° veya 90°'dir. Pürüzlülük cihazlarında ölçüm sırasında yüzey sabit, iğne hareket etmektedir. İğneyi yüzey üzerinde hareket ettiren kısma pikap veya prob denilmektedir ve pikaplar, pabuçlu ve pabuçsuz olmak üzere iki çeşittir. Günümüzde sabit cihazlarda genellikle pabuçsuz ölçüm alınmaktadır, çünkü pabuçsuz pikaplar ideal bir referans düzlemde hareket edebilirler. Pürüzlülük, dalgalılık ve form sapmalarının tümü tespit edilebilir ve yüzey profili değişikliğe uğramadan elde edilir.

Pabuçlu pikaplar ise portatif sistemlerde daha hızlı ölçüm yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Pabuç "mekanik filtre" vazifesi görüp form sapmalarını eleyebilir. Pabuçlu problemler, pabuçsuz problemlerden daha az titreşimden etkilenir. .



Şekil 3. İğne ucu

Ölçüm sırasında iğnenin yüzeye sürekli temas etmesi için, belli bir kuvvet (statik ölçme kuvveti) uygulanmaktadır. Cihazda, iğnenin hareketi indüktif olarak elektrik sinyallerine dönüştürülmektedir. Proben yüzeydeki hareketi elektrik motoru ve dişli kutusuyla sağlanmaktadır. Elektrik sinyali yükseltilmekte, dijitale çevrilmekte ve filtre edilmektedir. Sistemdeki filtrenin vazifesi, pürüzlülüğü ve dalgalılığı birbirinden ayırmaktır.



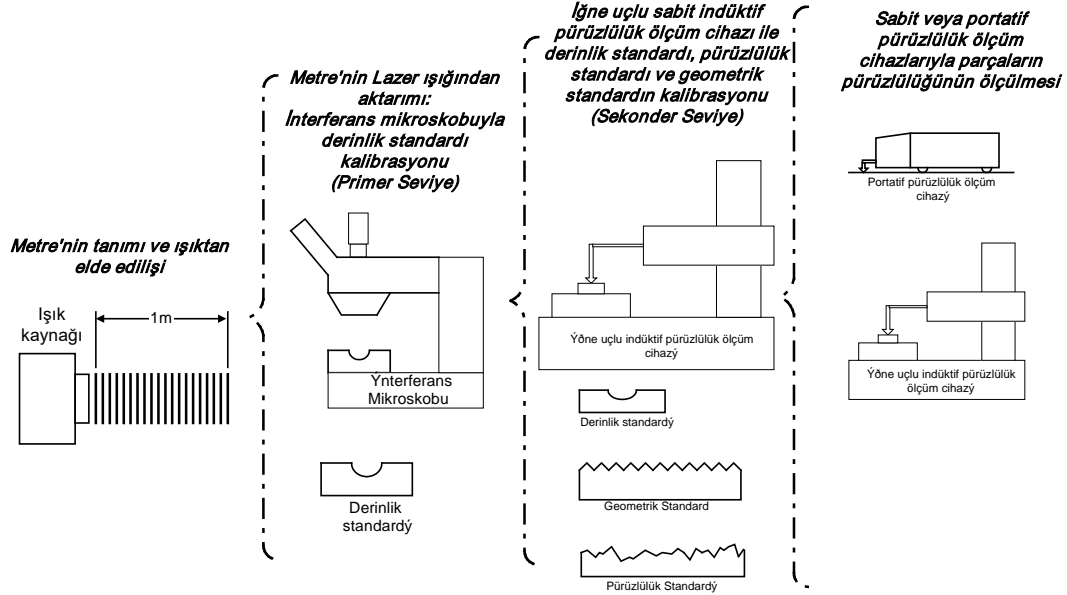
Şekil 4. Pürüzlülük ölçüm cihazı

#### 4. CİHAZ KALİBRASYONLARI

Form ve pürüzlülük cihazlarının doğru çalıştığından emin olmak için, belirli zaman aralıkları ile kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Ayrıca cihazlar dinamik ölçüm yapan sistemler olduklarından, hem statik hem de dinamik kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir.

#### 4.1. PÜRÜZLÜLÜK CİHAZI KALİBRASYONU

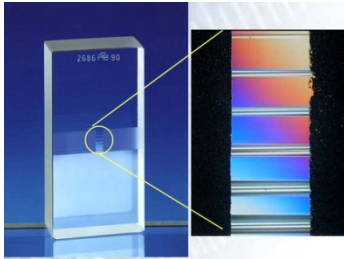
Cihazın kalibrasyonu 3 farklı referans standart ile yapılmaktadır. Derinlik mastarı, Geometrik Standart ve Pürüzlülük Standardı.



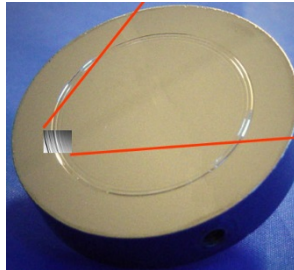
Şekil 5. Pürüzlülük Ölçümlerinde İzlenebilirlik Zinciri

##### 4.1.1 Derinlik Standardı (oluk derinliği standardı)

Cihazlarda bulunan problemlerin kalibrasyonları derinlik standardı (Şekil 6-7) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Derinlik standardı olarak tanımlanan standartlar, üzerinde farklı sabit derinliklerde oluklara sahip referanslardır. Yapılan kalibrasyon işlemi sırasında sadece referans oluk derinliği mertebesinde probun kalibrasyonu yapılmıştır. Bu işlem probun tüm çalışma aralığını kapsamamaktadır. Ara değerlerdeki sapmalar ölçümü yapılan değerlere göre lineer olduğu varsayılarak hesaplanmaktadır (Şekil 8). Fakat gerçek böyle olmayabilir.



(0,02 – 10) µm

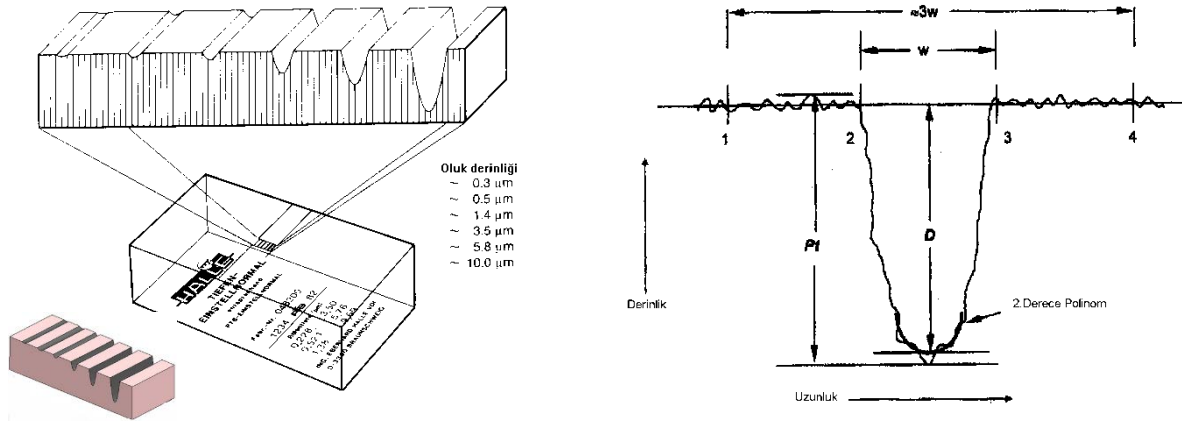


(0,24 – 75) µm



(1 – 1000) µm

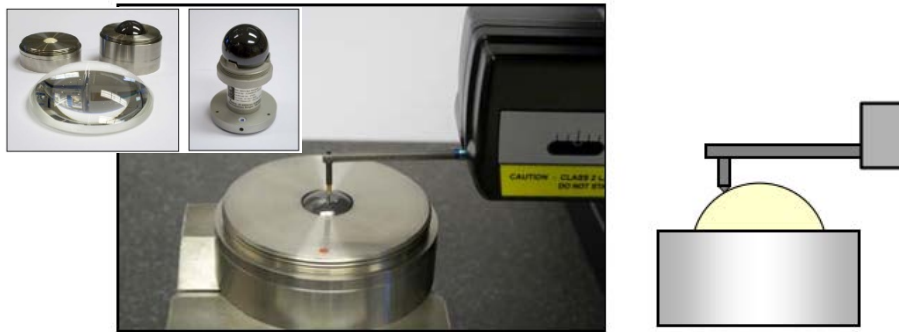
Şekil 6. Derinlik standartları



**Şekil 7.** 6 farklı oluğa sahip derinlik standardı ve oluk profil görüntüsü

Buradaki diğer önemli nokta referans üzerindeki oluk derinliklerinin düşük belirsizlik ile metreye izlenebilir olarak belirlenebilmesidir. Bu işlem dünya üzerinde sayılı metroloji entitüsü tarafından, kullanımı zahmetli ve bilgi gerektiren interferans mikroskopları ile yapılabilmektedir. Fakat interferans mikroskoplarının ölçüm yapabileceği maksimum derinlik  $10 \mu\text{m}$  ile sınırlıdır. Günümüzde pürüzlülük cihazlarının prob çalışma aralığı  $10 \text{ mm}$ 'ye kadar çıkabilmektedir. Yeni nesil derinlik masterlarında  $1 \text{ mm}$  derinliğe sahip oluklar bulunabilmektedir. Bu ölçüm aralığı birinci ve ikinci seviye ölçüm laboratuvarları için izlenebilirlik problemi oluşturmaktadır.

Kalibrasyon sırasında pürüzlülük cihazı ile oluk derinleri ölçülür ve gerçek değer ile arasındaki farka göre belirlenen düzeltme (kazanç ayarı) faktörü hesaplanır ve cihaza girilir. Birkaç deneme ile gerçek derinlik değerine en yakın sonucu veren düzeltme faktörü belirlenebilir ve cihaz yazılımına kaydedilir. Ayrıca bu işlemin her kalibrasyon öncesinde yapılması tavsiye edilmektedir. Bu işleme günlük kalibrasyon da denilmektedir. Günlük kalibrasyonda referans derinlik standardının, ölçüme uygun bir oluğu seçilir ve ölçülür. Referans standardın sertifika derinliği, ölçümde bulunduğumuz sonuca bölünerek günlük düzeltme faktörü (K) elde edilir ve daha sonra iş parçasında ölçülen tüm genlik parametreleri bu faktörle çarpılır.



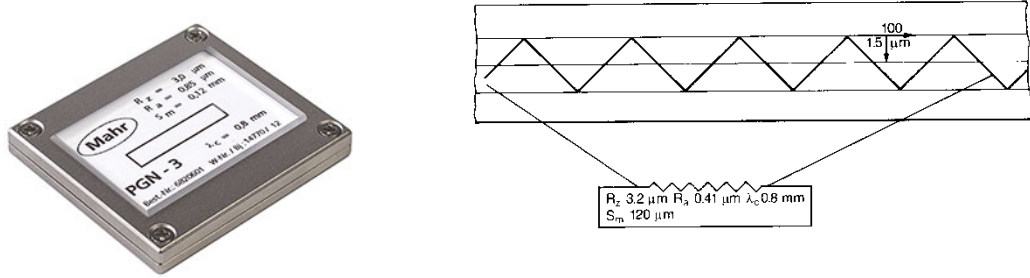
**Şekil 8.** Küre Standart

Bazı üreticiler ise prob kalibrasyonu için oluk derinliği standardı yerine küre standartlar (Şekil 8.) kullanmaktadır. Probon küre üzerindeki hareketinde hassas olarak hesaplanan "düşey yer değişimi", oluk derinliği yerine referans olarak kullanılmaktadır. Fakat bu işlem yaygın bir kullanıma sahip değildir. Çünkü hesaplama işlemleri bu cihazlara özel yazılımlar sayesinde yapılabilmektedir. Bu yüzden her pürüzlülük cihazında uygulanamamaktadır.



#### 4.1.2 Pürüzlülük Standartları

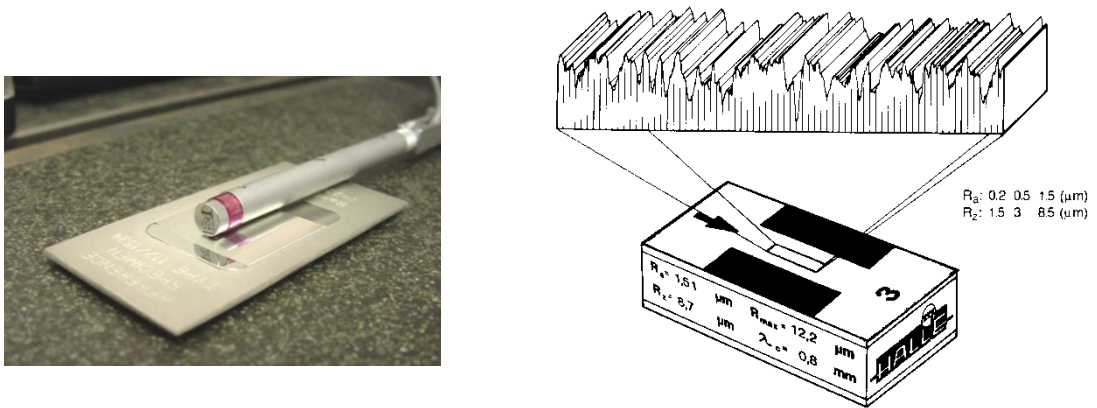
Kalibrasyon faktörü K (derinlik standardı veya küre ile) belirlendikten sonra cihazı kontrol etmek için “Geometrik Standart (Şekil 9.) veya “Rastgele Yüzeyle Pürüzlülük Standardı” (Şekil 10.) kullanılır. Standart üzerinde, işaretli ölçüm bölgesi içinde ölçümler alınıp, pürüzlülük parametrelerinin ortalaması hesaplanır. Eğer ölçülen parametreler beklenen belirsizlik seviyesinde doğru değilse “Oluk derinliği standardı” ile cihaz tekrar kalibre edilmelidir. Pikap veya iğne ucu değiştirildikten sonra da “Oluk derinliği standardı” ile kontrol yapılması faydalı olabilir.



Şekil 9. Geometrik standart

Geometrik standartlar, sinüzoidal üçgenel veya trapezoid gibi düzgün profile sahip standartlardır (Şekil 9.).

Rastgele yüzeyle pürüzlülük standartları, düzensiz yüzey profiline sahip mastarlardır (Şekil 10). Bu standartlar ile Prob büyüme oranı, iğne uç yarıçapı, parametrelerin sayısal hesabı (implementasyonu), sayısal filtre kontrol edilmiş olur. Pürüzlülük standartları, dalgalılık ve pürüzlülük bileşenlerini içeren, değişik dalga boyu, genlik ve fazlarda yüzey yapılarına sahiptir. Rastgele pürüzlülük standartları gerçek yüzeylere yakın olduğundan, geometrik standartlardan daha iyi bir kontrol sağlarlar.



Şekil 10. Pürüzlülük standardı

Ölçüm sistemindeki mekanik ve elektriksel gürültünün bulunabilmesi için ideal düzlükte bir yüzeyin (optik cam) üstünde ölçüm yapılır. Bu işlem hem pikap sabitken hem de hareketli iken yapılır.  $R_z$  ve  $W_t$  parametreleri ölçülür.



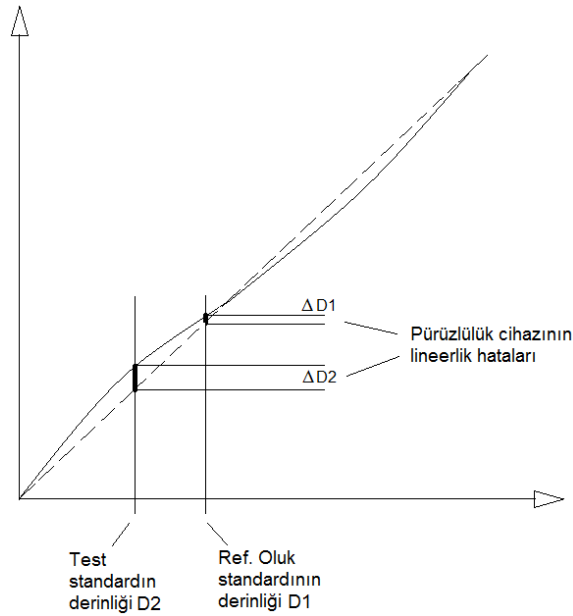
#### 4.1.3 ProbTrace Projesinin, Problar için Düşey Yerdeğişimi Belirlenmesindeki, Katkısı

Şekil 11’de verilen pürüzlülük ölçüm cihazının lineerlik grafiğinden görüldüğü gibi test pürüzlülük mastarı veya test oluk derinliği mastarına (Değeri D2) en yakın derinlikteki referans oluk (Değeri D1) seçilerek K faktörünü hesapladığımızda;

$\Delta D_1$ , D1 mertebesinde lineerlikten sapma hatası (non-lineerlik),  
 $\Delta D_2$ , cihazın D2 mertebesinde lineerlikten sapma hatasıdır.

Sayısal bir örnek verirsek: Test oluk derinliği  $D_2 = 8,00 \mu\text{m}$  olan oluk ölçümü için çok oluklu referans mastardan seçilebilecek en yakın oluk  $D_1 = 9,00 \mu\text{m}$  olabilir. Örneğin, D1 ve D2 mertebelerindeki cihaz lineerlik hataları, yüksek kalitede sabit bir pürüzlülük cihazında  $\Delta D_1 = 30 \text{ nm}$  iken,  $\Delta D_2 = 10 \text{ nm}$  olabilir. Bu durumda gerçekte kullanılması gereken düzeltme faktörü  $K_1 = 0,9963$  iken,  $K_2 = 0,9989$  kullanılacaktır. Bu da kalibrasyon sonucunun sertifikada örneğin  $8,00 \mu\text{m}$  verilmesi yerine  $8,02 \mu\text{m}$  verilmesine yol açacaktır.

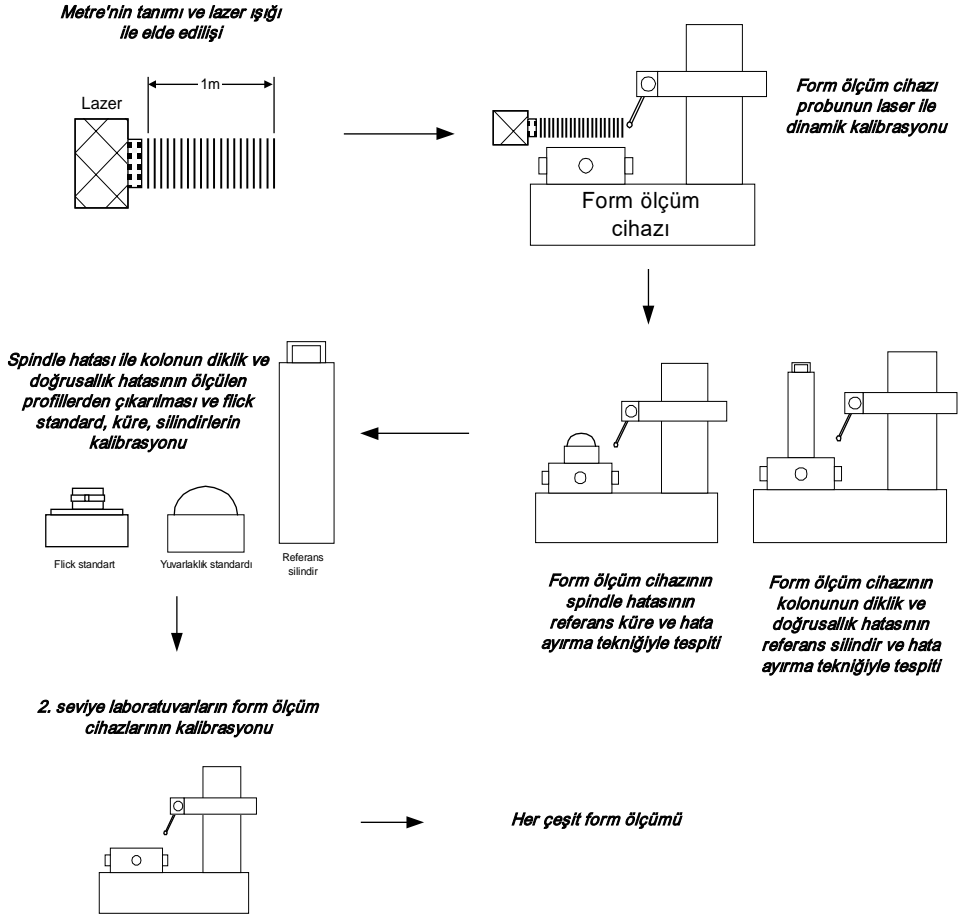
ProbTrace projesinde planlandığı şekilde Piezo nano konumlandırıcılar kullanılması durumunda ölçüm aralığında tam olarak istenen değerde “referans düşey yer değişimi” elde edilecek ve bunlar çok sınırlı sayıdaki referans oluk derinliği yerine kullanılacaktır. Böylece cihaz lineerlik hatasından kaynaklanan ve yukarıda anlatılan belirsizlik kaynağı hemen hemen sıfıra indirilmiş olacaktır.



Şekil 11. Pürüzlülük cihazı Non-lineerlik hatası

#### 4.2. FORM CİHAZI KALİBRASYONU

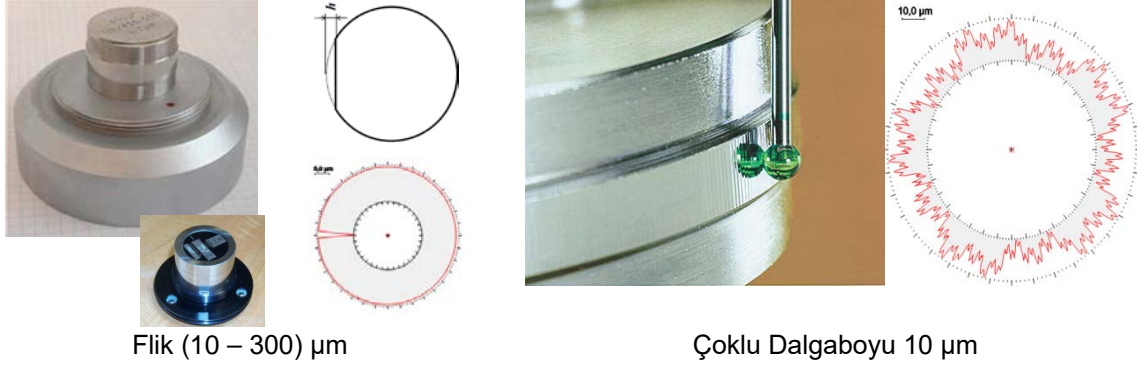
Form cihazının kalibrasyonu sırasında, referans döner tablanın ne kadar düzgün/salgısız döndüğünün “Yarıküre” ile tespiti haricinde; yarıçap değişimini algılayan probun doğru çalışıp çalışmadığının kontrolü de gerekir. Bu işlem iki şekilde yapılır: statik ve dinamik kalibrasyon. Statik kalibrasyonda, probun statik şartlar altında büyütme oranı tayin edilirken; dinamik kalibrasyonda, probun, sabit açısal hızla dönen iş parçasına temas ederken, yani sürtünme kuvveti etkisinde, dinamik olarak ne kadar doğru veri aldığı tespit edilir.



**Şekil 12.** Form ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri

Statik Prob kalibrasyonunda yaygın kullanılan yöntem optik cam üzerine, yan yana üç farklı master yapıştırılarak elde edilen adımların statik olarak ölçülmesidir (genel olarak oluşturulan farklar 0,1 mm ve 0,9 mm'dir). Yükseklik farkının ölçülmesi ile probun büyütme oranı kalibre edilmiş olur. Küçük olan fark, yükseklik farkı hassas ölçüm aralığını, büyük olan fark ise kaba ölçüm aralığını kalibre etmek için kullanılır. Bu işlem probun statik kalibrasyonu olarak da adlandırılır.

Cihazın dinamik kalibrasyonunda kesik bir silindirden oluşan Flick standart veya çoklu dalgaboyu standartları kullanılmaktadır. Flick standart, yüzeyinin bir kısmı traşlanmış/düzleştirilmiş bir silindirdir. Çoklu dalgaboyu standardı ise yüzeyi farklı dalga boyunda sinüs dalgası şeklinde işlenmiş silindirik yüzeylerdir (Şekil 13.). Flick standart veya Çoklu dalgaboyu standart üzerinde yuvarlaklık ölçümü yapılarak yüzeydeki radyal farklılık, bir yuvarlaklık sapması olarak tespit edilir. Bu yuvarlaklık sapması sertifikalandırılmıştır. Referans standart ile, probun dönüş sırasında veri alırken performansı incelenmektedir. Ayrıca cihazın filtresi de kontrol edilmiş olmaktadır. Flick standart veya çoklu dalgaboyu standardı, form cihazı tarafından çeşitli filtre ve değerlendirme metodlarında ölçülür. Bulunan değerler Flick standart veya Çoklu dalgaboylu standard sertifikası ile karşılaştırılır. Fakat buradaki temel problem yine referans standardın kendi kalibrasyonundan kaynaklanmaktadır. Bu işlemi yapabilen metroloji enstitüsü azdır ve bu metroloji enstitüleri özel olarak bütün hataları tespit edilmiş ve hataları elimine edilmiş referans form ölçüm cihazları kullanılmaktadır. Ayrıca her iki durumda da (statik ve dinamik kalibrasyon) temel problem yine probun kalibrasyonunun prob ölçüm aralığında sadece bir veya iki farklı değer için yapılmış olması ve bu kalibrasyonun probun çalışma aralığının tamamını kapsamamasıdır.



**Şekil 13.** Flick ve Çoklu Dalgaboyu Standartları

Cihazın spindle radyal kalibrasyonu yuvarlaklık değerleri  $0,02 \mu\text{m}$  -  $0,03 \mu\text{m}$  aralığında olan yarıküre standardı (yarıküre) ile yapılır.

Cihazın kolon kalibrasyonu için ise referans silindir kullanılmaktadır. Silindir üzerinden doğrusalık, paralellik ve yuvarlaklık hataları ölçülür. Silindir eksenini doğrultusunda genellikle  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  ve  $270^\circ$  konumlarında doğrusalık ölçümleri alınır. Bu doğrusalık ölçümlerinden, silindirin karşılıklı yüzeylerinin paralelliği ( $0^\circ/180^\circ$  ve  $90^\circ/270^\circ$ ) hesaplanır.

Optik cam ile döner tabla ya da döner kafalı probun dönme hareketinde oluşturduğu düzlemsellik ölçülür böylece spindle eksenini düşey kalibrasyonu yapılmış olur [3-4].



**Şekil 14.** Form ölçüm cihazı kalibrasyonu için kullanılan standartlar

## 6. YENİ YÖNTEM ÇALIŞMALARI (18RPT01 ProbeTrace)

Yeni teknoloji ve düşük toleranslar ile parça imalatı sebebiyle, günümüzde form ve pürüzlülük standartlarının (10-100) nm belirsizlik ile izlenebilir kalibrasyonlarının yapılma ihtiyacı doğmuştur.

Bu ihtiyacı karşılayabilmek için Metroloji Enstitüleri cihazlar üzerinde (mevcut cihazların geliştirilmesi veya yeni cihaz üretilmesi), yöntem geliştirme (mevcut yöntemlerin geliştirilmesi veya yeni yöntemlerin oluşturulması) ve ölçüm kabiliyetlerini artırma yönünde çalışmalar yapma ihtiyacı oluşmuştur.

Cihazlarda kullanılan problemler (indüktif prob sistemleri) benzerdir. Her iki sistemde de prob yüzeyden ayrılmadan, parça dönerken veya prob ünitesi hareket ederken dinamik olarak ölçüm alınmaktadır. Bu yüzden cihazların kalibrasyonlarının sadece statik değil dinamik olarak da yapılması gerekmektedir.

Üreticiler kalibrasyonda kullanılmak üzere bazı basit çözümler ve standartlar üretmişlerdir. Örneğin form ölçüm problemleri statik olarak master blokları ile oluşturulan bir adım mastarı ile kalibre edilirken,

dinamik ölçümler için tasarlanmış olan flick standart kullanılmaktadır. Flick standart ve Çoklu dalgaboylu standartlar bu iş için geliştirilmiş ideal ekipman olsa da asıl problem bu standartların izlenebilir olarak kalibrasyonlarının yapılabilmesidir. Çünkü bu işlem için bütün hataları tam olarak belirlenebilmiş olan ve hatta metre'ye izlenebilir referans form ölçme cihazlarına ihtiyaç vardır. Ancak bu işlemi yapabilecek Metroloji Enstitüsü sayısı çok azdır. Bu enstitüler önce kendi form cihazının hatalarını araştırmalı ve bunları tespit edecek yöntemler geliştirmelidirler. Daha sonra ekipmanlarının kalibrasyonunu yapmalı ve bunun ardından diğer (müşterilerin) Metroloji Enstitülerinin kendi form cihazlarının kalibrasyonlarında kullanacakları flick standartların kalibrasyonlarını yapmalıdırlar.

Fakat geliştirilen yöntemlerin teyidi ve doğrulaması için yapılan ve gelişmiş Metroloji Enstitülerinin dahil oldukları bu karşılaştırmada (EURAMET Project 649) [5] elde edilen sonuçlar bu çalışmaların yeterli olmadığını ve farklı enstitülerde geliştirilen yöntemlerin birbiriyle uyumlu olmadığını göstermiştir.

Bunun yanında pürüzlülük ölçüm cihazlarının prob kalibrasyonu için tasarlanmış olan derinlik masterlarına ait nominal derinlik değerlerinin belirlenmesi öncelikle interferans mikroskop ile veya hataları hassas bir şekilde belirlenmiş ve ayıklanmış pürüzlülük ölçüm cihazları ile yapılmaktadır. Başka bir deyişle, izlenebilirlik, yüzey pürüzlülüğü cihazları tarafından kalibre edilmiş sabit masterlar vasıtasıyla elde edilmektedir. Diğer enstitüler referans cihazlarını, tıpkı ikincil seviye laboratuvarlarla aynı şekilde, gelişmiş metroloji enstitüleri tarafından kalibre edilmiş masterlar kullanarak kalibre etmektedirler.

Bu masterların birinci seviye kalibrasyonu ise (derinlik verilerinin belirlenmesi) gelişmiş metroloji enstitülerinde bulunan interferans mikroskobu ile karmaşık interferometrik yöntemler kullanılarak kalibre edilmesiyle yapılmaktadır. Yalnızca birkaç gelişmiş NMI, gerekli hassasiyet seviyesi için, örneğin 1-10 nm belirsizlik ile 1 mm derinliğe kadar ölçüm yapabilmektedir. Ayrıca bu cihazları kullanmak tecrübe ve bilgi birikimi gerektirmektedir. Fakat endüstrinin gelişmesi ve taleplerin karşılanabilmesi için üretilen yeni cihazların çalışma aralıkları ise 10000 µm veya daha fazla yüksekliklere kadar çıkmaktadır. Bu ise kendi içerisinde izlenebilir ölçüm yapılabilme problemini ortaya çıkartmaktadır.

Bu nedenle, daha az gelişmiş veya gelişmekte olan enstitüler için referans cihazlarının SI birimi metreye izlenebilir ölçüm yapabilme ihtiyaçları vardır. Ayrıca bu güne kadar, alternatif yollar veya derinlik masterları kullanılması dışında pürüzlülük ölçüm cihazlarının kalibrasyonu için ayrıntılı araştırmalar (özellikle metroloji enstitülerinde referanslar) için herhangi bir yardımcı dokümantasyon mevcut değildir.

Bazı üreticiler referans pürüzlülük cihazları kalibrasyonu için küre masterlar da kullanırlar. Fakat bu yöntem standartlaştırılmamış bir yöntemdir, bu yüzden sınırlı kullanıma açıktır ve özel yazılımlara ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, bu yöntemin validasyonu henüz tam anlamıyla yapılmamıştır. Ayrıca bu kalibrasyon yöntemini detaylı anlatan dokümanlar mevcut değildir.

Derinlik masterına ve küre masterlara alternatif olarak lazer interferometre ile kalibrasyonu yapılmış piezzo nano konumlandırıcılar kullanılmaktadır. Fakat bu çalışma henüz netlik kazanamamış ve kendisini ispatlayamamıştır. Çünkü çalışmanın bilinmeyenleri, abbe hatası, kullanılan piezzo konumlandırıcının uç yüzey düzlemsellik değerinin kullanım sırasında değişmesi vb. gibi etkenlerin araştırılması gerekmektedir.

2000'li yıllarda lazer interferometre ile beraber geliştirilmiş nano mesafe ilerleme cihazlarının çalışma aralıkları 20 µm -50 µm ile sınırlandırılmıştı. Ayrıca geliştirilen cihazların büyüklükleri sebebiyle pürüzlülük ölçüm cihazları ile kullanılmaları mümkün olmamıştır.

Piezo teknolojisinin hızlı gelişimi sayesinde, kapasitif sensörler, lineer enkoderler ile, özel mekanik kılavuzlama sistemlerine sahip kompakt boyutlu yer değiştirme transdüserleri, nm hassasiyetle birkaç milimetre ölçme aralığında çalışabilmektedir.

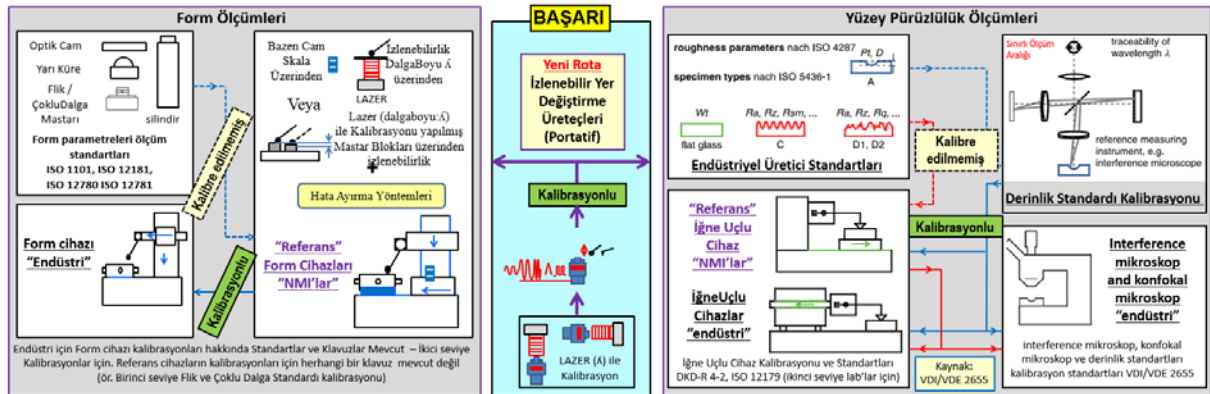
Bu sistemlerdeki kritik hata kaynaklarından biri, interferometrelerin (örneğin 300 nm) çözünürlüğünün, daha düşük çözünürlük (ticari lazer interferometreler için yaklaşık 5 nm) elde etmek üzere bölündüğü zaman meydana gelen enterpolasyon hatalarıdır. Ayrıca yer değiştirme transdüserlerinin uzun dönem

kararlılıkları ile sürüklenme hataları henüz tam olarak çalışılmamıştır. Bu yüzden bu teknoloji henüz prob kalibrasyonlarında denenmemiştir.

Şu anda, birkaç gelişmiş metroloji enstitüsünde, flick standartlarının kalibrasyonu için kullanılacak form ölçüm cihazlarının problemlerini kalibre etmek amacıyla bir interferometre ile birleştirilmiş eski tip yer değiştirme transdüserlerini kullanmaktadır.

Yukarıda saydığımız sebep ve nedenlerden ötürü gelişmiş ve gelişmekte olan ve daha geniş ölçüm kabiliyetine sahip olan metroloji enstitüleri için, kendisini ispatlamış, fazla maliyet gerektirmeyen yeni kalibrasyon yöntemlerinin ve kalibrasyonda kullanılacak standartların geliştirilmesi gerekmektedir.

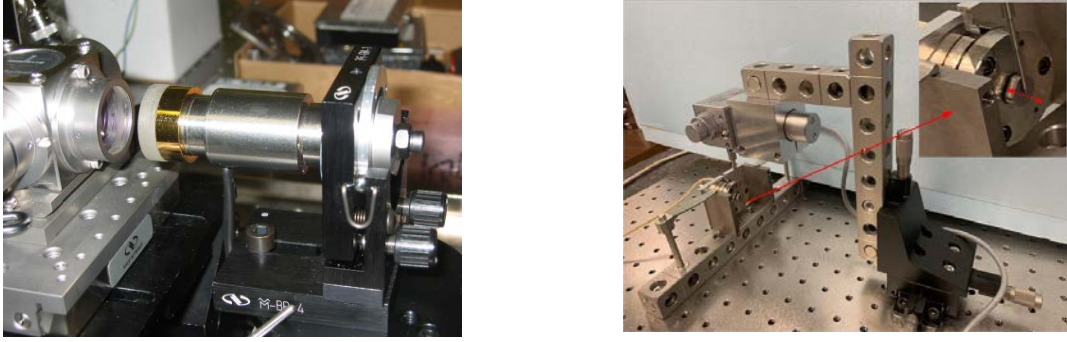
Bu yüzden TÜBİTAK UME mevcut standartlara alternatif olacak, izlenebilirliği doğrudan metrenin tanımından kolayca alabilecek, cihaz ölçüm aralığının tümünü kesintisiz bir şekilde tarayabilecek metodlar üzerine çalışmak üzere Avrupa Birliği (AB) Metroloji Araştırma ve İnovasyon Programına çok uluslu ortak bir proje önerisi sunmuş ve Kasım 2018 de savunmasını başarıyla gerçekleştirerek projenin AB'den desteklenmesini sağlamıştır. Toplam 10 proje ortağı ülkenin katıldığı, 18RPT01 ProbeTrace kısa isimli projenin koordinatörlüğünü yapacak TÜBİTAK UME, lazer ile kalibrasyonunu yaptığı nano sensör ve nano mesafe ilerleme cihazları kullanarak, problemlerin statik kalibrasyonlarının yanında, dinamik performanslarını da inceleyecektir. Çıktılar arasında EURAMET (Avrupa Metroloji Birliği) rehber dokümanlarının yazılması olan proje sonunda, gelişmekte olan ulusal metroloji enstitüleri ve ikinci seviye laboratuvarların bu özel standartlarının kalibrasyonu için izlenebilirliği kendi üzerlerinden sağlaması beklenmektedir.



**Şekil 15.** Form ve Pürüzlülük ölçüm cihazları mevcut kalibrasyon teknikleri ve hedeflenen yöntemler

Proje, SI birimine doğrudan izlenebilirlik sağlayacak yeni yollar ve yeni metotlar bulmaya çalışacak, sabit nominal değerlere sahip master blok kullanmak yerine, 10 nm'den daha iyi bir belirsizlikle izlenebilirliği sağlanabilen, ölçüm aralığı boyunca kesintisiz ölçüm yapabilen, taşınabilir yer değiştirme jeneratörlerini kullanarak referans cihazları kalibrasyonlarının yapılmasına olanak sağlayacaktır. Böylece derinlik masterlarındaki gibi probun çalışma aralığında sadece birkaç aralık için ölçüm alınması yerine, çalışma aralığının tamamı taranarak aynı zamanda kesintisiz ölçüm alınması ve daha geniş, +/- 1000 µm gibi, bir aralık için çalışma imkanı olacaktır. Böylece kalibrasyonu yapılan cihazın hata tespiti daha iyi yapılmış ve daha çok bilgi edinilmiş olacaktır.

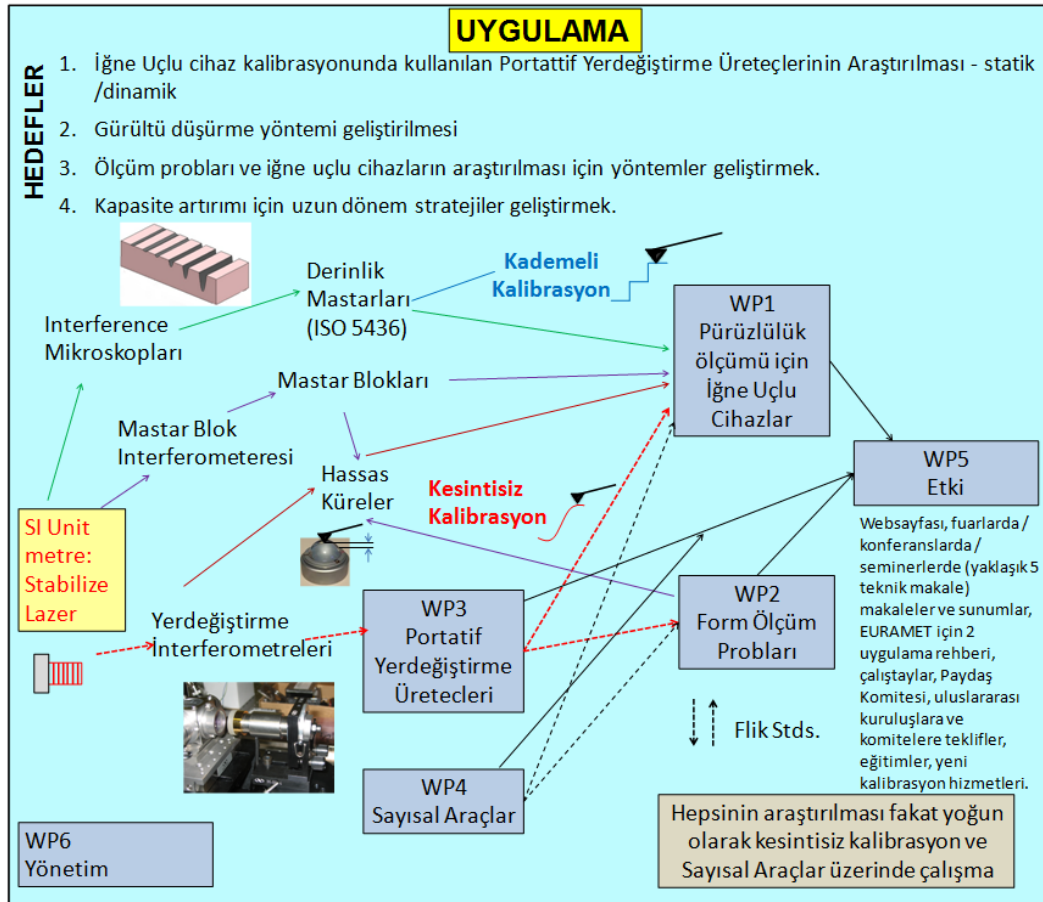
Ayrıca bazı pürüzlülük cihazlarında kullanılan küre standartları için ise her cihazda kullanılacak ve kullanıma açık bir yazılım ve yöntem geliştirilmeye çalışılacaktır. Böylece standart bir alternatif uygulama elde edilmiş olacaktır.



Şekil 16. Taşınabilir yerdeğiştirme jeneratörleri.

Yapılan çalışma sonucunda alternatif kalibrasyon yöntemleri geliştirilmiş olacaktır. Ayrıca yapılan çalışmada lazer interferometre içermeyen fakat lazer interferometre ile kalibrasyonu yapılan yer değiştirme transdüserlerinin kullanılmasına imkan sağlanmış olacaktır. Böylece pürüzlülük cihazları kalibrasyonda derinlik masterları yerine kullanılacak alternatif cihazlar geliştirilmiş olacak.

Mevcut ölçüm sistemlerinde, yüzey pürüzlülüğü ve form ölçümlerine gürültü azaltma yazılımları uygulanmamaktadır, bunun yerine, ISO 3274'e [6] göre uygun bir filtreleme işlemi uygulanmaktadır. Ölçüm profilleri üzerinde rastgele oluşan gürültüyü azaltma programları üzerindeki çalışmalar Han Haitjema [7] tarafından uygulanmıştır. Fakat yüzey ve form ölçümleri için henüz bir çalışma yapılmamıştır.



Şekil 17. Proje 18RPT01ProbeTrace Uygulama planı.

Projede geliştirilecek olan yazılım ile ölçümlere etki eden rastgele gürültünün azaltılması için sayısal yöntemlerin geliştirilmesi ile belirsizliğe etki eden parametreler azaltılmış olacak ve bu şekilde belirsizlik bütçesindeki en büyük parametresi düşürülmüş ve genel belirsizlik değeri azaltılmış olacaktır.

## 7. SONUÇ

Yüzey pürüzlülüğü ve form ölçüm cihazlarında yapılan ölçümlerin güvenilirliği için kullanılan kalibrasyon referans standartları ve bunların kalibrasyonu için mevcut durum analizi yapıldıktan sonra problemler hakkında kısa bilgilendirme yapılmıştır. Eylül 2019 da başlayan, TÜBİTAK UME tarafından yürütülen 10 ülkeden proje ortağının katıldığı 18RPT01 ProbeTrace projesinde yapılacak çalışmalar ile bu sorunların nasıl giderileceği anlatılmıştır. Verilen bilgiler sayesinde, proje web sayfasını takip edilerek, katılımcıların araştırma sonuçlarına nasıl ulaşacağı aktarılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] 18RPT01 ProbeTrace projesi” Traceability for contact probe and stylus instrument measurements”, <https://www.euramet.org/research-innovation/research-empir/empir-calls-and-projects/>
- [2] Aksulu M., Ganioglu O. ve Yandayan T., “Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri ve Yüzey Pürüzlülük Parametreleri,” IV. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 165-172, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 25-26 Ekim 2001.
- [3] Delibaş B. ve Yandayan T. “Form hataları ve önemi”, Üretimde Kalite Dergisi, Aralık 2000.
- [4] 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.
- [5] Jusko O, Bosse H, Flack D, Hemming B, Pisani M and Thalmann R 2012 A comparison of sensitivity standards in form metrology: Final results of the EURAMET project 649. Meas. Sci. Technol. 23 054006.
- [6] ISO 3274:1998 Geometric product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Nominal characteristics of contact (stylus) instruments. Published 15/05/1997
- [7] H. Haitjema, M.A.A. Morel “Noise bias removal in profile measurements”, Measurement 38 (2005) 21-29

## ÖZGEÇMİŞ

### 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. 2000 yılından beri aktif olarak TURKAK akreditasyon denetimlerinde görev almaktadır. Eylül 2019 tarihi itibarı ile TÜBİTAK-UME'den emekli olarak ayrılmıştır. Şuan serbest danışman ve eğitmen olarak çalışmaya devam etmektedir.



## **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 oluşumu 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 Avrupa Komisyonu raporunu 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.

## **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, Tübitak 1001 projesinde ve Tübitak iç projelerinde çalışmıştır. Halen boyutsal laboratuvarında başuzman araştırmacı olarak çalışmaktadır.