

# AÇI METROLOJİSİ, BİLİMSEL VE ENDÜSTRİYEL ALANLARDAKİ UYGULAMALARI, ÜST DÜZEY YENİ TALEPLER VE PROJELER

**Tanfer YANDAYAN**

TÜBİTAK UME, Barış Mah. Dr. Zeki Acar Cad. Pk54, 41470 Gebze / Kocaeli, Türkiye  
Tel: 0262 679 50 00 (İç hat: 5312)  
E-Mail: [tanfer.yandayan@tubitak.gov.tr](mailto:tanfer.yandayan@tubitak.gov.tr)

## ÖZET

Açı metrolojisi, gelişmiş ülkelerin küresel ortamda rekabet ettiği, katma değeri yüksek, hemen hemen tüm bilimsel çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda anahtar rol üstlenen bir teknolojidir. Uygulama alanları, serbest elektron lazerleri (FEL) ve hızlandırıcı merkezlerinde gerçekleştirilen üst düzey bilimsel çalışmalardan, robotik, nanoteknoloji gibi endüstriyel uygulamalara ve savunma sanayine kadar uzanmaktadır. Bildiride, açı metrolojisindeki ölçme cihaz ve standartlarının mevcut kabiliyeti ve sınırlarının açıklanmasından sonra, üst düzey bilimsel uygulamalar ve hassas üretim mühendisliği alanlarından gelen yeni talepler anlatılacaktır. Dünyada başka bir örneği olmayan, Avrupa Metroloji Araştırma Programı EMRP'e genel bir bakışı takiben, Avrupa 7. Çerçeve Programı (EMRP) kapsamında desteklenen TÜBİTAK UME'nin koordinatörlüğünü yapacağı, 12 farklı ülkeden 16 proje ortağının oluşturduğu 'JRP SIB58 ANGLES - Açı Metrolojisi' projesi, projenin finansal, çevresel ve sosyal alanda oluşturacağı üst düzey etkiler okuyucuya sunulacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** SI açı birimi radyan, otokolimatörler, açı enkoderleri, açı üreteçleri, hızlandırıcı merkezleri ve Serbest Elektron laserlerinde X ışınlarını yönlendirici optik aksanlar

## ABSTRACT

Angle metrology is a key enabling technology for almost all scientific and industrial areas of high value in which the advanced countries are globally competitive. Application areas vary from high level scientific applications carried out in synchrotron radiation beamlines and Free Electron Lasers – FEL to industrial applications such as robotics, nano technology and defence industry. After descriptions of angle metrology devices and standards with their current capabilities and limits, the new demands rising from high level scientific applications and precision industry will be presented in the paper. Following to short presentation of unique European Metrology Research Programme (EMRP), 'JRP SIB58 ANGLES – Angle Metrology' Project supported under European 7. Framework Programme (EMRP) and coordinated by TÜBİTAK UME (with 16 partners from 12 different countries) will be described with its high level financial, environmental and social impacts.

**Key Words:** SI angle unit radian, autocollimators, angle encoders, angle generators, X-ray beam-shaping optics in synchrotron radiation beamlines and Free Electron Lasers.

## 1. GİRİŞ

Açı metrolojisi, katma değeri yüksek endüstriyel uygulamalarda ve üst düzey bilimsel çalışmalarda, anahtar rol üstlenen bir teknolojidir. Bilimsel çalışmalarda, özellikle serbest elektron lazerleri ve hızlandırıcı merkezlerinde X ışınlarının yönlendirilmesi, odaklanması amacı ile kullanılan hassas optik aksanların düzlemsellik ölçümü (ölçüm bilgileri ile 2 nm ve altı düzlemsellikte imalatı) [1-3], ışınımın nanoradyan mertebesinde açısal olarak kontrol altına alınması, interferometrik düzlemsellik ölçümlerinde kullanılan referans optiklerin ölçümü üst düzey açı metrolojisi uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir [4,5]. Endüstriyel uygulamalarda, hareket mekanizmalarının geometrik hatalarının (doğrusallık, düzlemsellik, paralellik) ölçümü, robotların polar koordinatları, uzun mesafe ölçümlerinde kullanılan teodolitlerin ve lazer trackerların rotasyon ölçümleri SI aç birimi radyan'a izlenebilir.

SI aç birimi 'radyan' iki boy uzunluğunun birbirine oranı olarak tanımlanır ve izlenebilirlik, uzunluk birimi metreden elde edilir [6-9]. Alternatif olarak, arzu edilen açı büyüklüğü, açı değeri  $2\pi$  radyan olan tam bir dairenin bölünmesi prensibi ile de elde edilebilmektedir [10-15]. Bu amaçla açı standartları adını verdiğimiz, açı enkoderleri-döner tablalar, indeks tablalar, ve poligonlar kullanılmaktadır. Üretim ortamlarında kullanılan döner tablalar, motor mekanizmaların kontrolünde kullanılan açı enkoderleri, açı metrolojisinin ne kadar yaygın kullanım alanına sahip olduğunun göstergesidir. Ayrıca, medikal uygulamalarda kullanılan, örneğin kanser tedavi cihazlarının ışınım ayarları, hedefleme ve yönlendirme mekanizmaları, açı metrolojisindeki gelişmelerden faydalanmaktadır.

Katma değeri yüksek endüstriyel uygulamalar ve üst düzey bilimsel çalışmalardaki talepler neticesinde 2012 yılında TÜBİTAK UME önderliğinde, Avrupa ve Dünyadaki bazı Ulusal Metroloji Enstitüleri, açı ölçme cihazları üreten özel firmalar ve araştırma merkezlerinin birlikte sunduğu 'Açı metrolojisi' projesi, Fp7 EMRP (Avrupa Metroloji Araştırma Programı) kapsamında kabul edilmiştir [16]. Bütçesi 3 milyon Euro olan proje üç yıl sürecek ve Avrupa Komisyonu tarafından fonlanacaktır. 'Açı Metrolojisi Projesi' ile CERN, BESYII, ESRF, Argonne APS gibi dünyada sayısı 60'ı geçen hızlandırıcı merkezlerinde daha yüksek performanslı bilimsel çalışmaların yapılabilmesini sağlayacak optik aksanları geliştiren teknolojilerin talebi olan 50 nanoradyan'dan daha düşük belirsizlikte açı ölçümlerinin yapılması hedeflenmektedir. Çıktılarının otomotiv, uzay-havacılık, tıp, malzeme ve enerji gibi sektörlerinde önemli uygulama alanları bulunan; Almanya, Fransa, Belçika, İtalya, İspanya, Çek Cum., Polonya, Portekiz, Finlandiya, Japonya ve Kore'den toplam 16 kuruluşun katılımcı olarak yer aldığı bu projede açı metrolojisi alanındaki tüm uygulamaların koordinatörlüğü, Enstitümüz TÜBİTAK UME tarafından yapılacaktır. ABD'den APS Argonne, ALS Lawrence Berkeley Lab. ve NSLS-II Brookhaven National Lab. gibi hızlandırıcı merkezlerinin bu projenin çıktılarına yönelik işbirliği için başvurması, projenin etki alanının Avrupa dışında da son derece önemli olduğunun, ayrıca ülkemizde kuruluş faaliyetleri devam eden Türk Hızlandırıcı Merkezi (THK) için de önemli bir destek olacağını açık göstergesidir [17].

Bu bildiriye, açı metrolojisinin üst düzey uygulamaları, nanoradyan mertebesindeki açısal ölçümlere izlenebilir ulaşma yöntemleri, Açı Metrolojisi 'SIB58 ANGLES' projesinden örnekler verilerek açıklanacaktır. TÜBİTAK UME tarafından şimdiye kadar yapılan ve yapılması planlanan açı metrolojisi uygulamaları da kısaca aktarılacaktır.

## 2. MEVCUT AÇI ÖLÇME CİHAZLARI, KULLANIM ALANLARI VE EKSİKLİKLER

Açı ölçme cihazları ölçme aralıkları mertebesine göre temelde ikiye ayrılabilir:

- Küçük açıları ölçen ve üreten cihazlar (0-2 derece)
- Büyük açıları ölçen ve üreten cihazlar (0-360 derece)

Küçük açı ölçümü yapan cihazlar genelde çok daha hassas fakat ölçme aralığı küçük açılar ile ilgilenirken, büyük açı ölçme cihazları ise genelde tam bir tur (0-360 derece) ölçümleri ile ilgilenmektedir. Bazı cihazlar ise, bu iki vasfın ortasında kalmaktadır. Bunlar kullanıldıkları aralığa göre grup değiştirse bile, büyük açıların ölçümünde kullanılan cihazlar genelde tam bir turu ölçebilen cihazlar olarak isim alırlar.

## 2.1. Küçük açıları ölçen ve üreten cihazlar (0-2 derece)

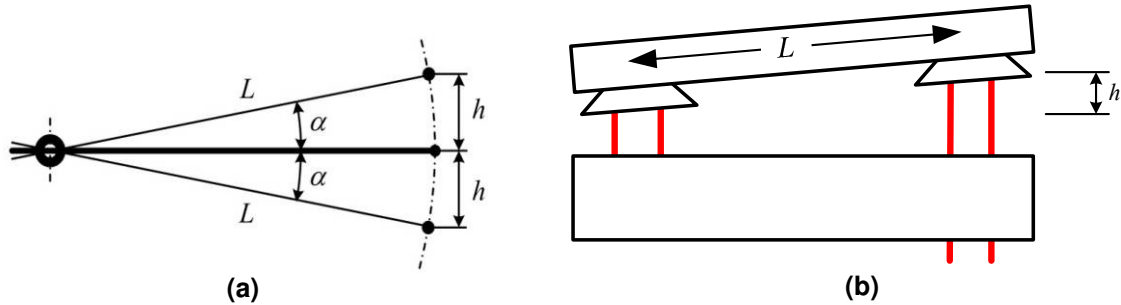
Açı interferometresi, seviye ölçerler (su terazisi, elektronik seviye ölçer) otokolimatör gibi açı ölçme cihazları bu gruba girerler (**Şekil 1**). Genelde seviye ayarlama veya hareket mekanizmalarında, hareketin açısal hatasının (pitch, yaw, roll) ölçümünde, yüzeylerde veya hareket sisteminde geometrik hataların tespitinde (doğrusallık, diklik, paralellik) geniş kullanım alanına sahiptirler. Bu cihazların diğer bir önemi ise, büyük açıları ölçen cihazların kalibrasyonu veya bir açısal referans standart ile karşılaştırılması sırasında, probleme amacı diğer bir değişle, ikisi arasındaki küçük açı farklarının hassas bir şekilde tespit edilmesi için kullanılırlar.



**Şekil 1.** Küçük açı ölçümü yapan cihazlar (a) Su terazileri [31] (b) Elektronik seviye ölçer [32] (c) Seviye ayarı için kullanılan optik takımlama cihazları – Nivo [33] (d) Otokolimatör [34].

### 2.1.1. Açı interferometreleri ve küçük açı üreticileri

Açı interferometreleri ve açı üreticileri (hassas sinüs veya tanjant çubuk mekanizmaları) trigonometrik prensibe göre çalışırlar [18]. Bu ekipmanlar, daha önceden boyutu ölçülen iki optik yansıtıcı (açı üreticileri için iki mafsallı nokta) arasındaki mesafeye ( $L$ ), açısal hareket ile oluşan ve interferometrik yöntem (açı üreticileri için kapasitif, indüktüf vs) ile ölçülen ( $h$ ) mesafesini oranlayarak açı ölçümü yaparlar (**Şekil 2**). Bazen açı üreticilerine monte edilen lazer interferometreler yardımı ile indüktüf veya kapasitif probleme yerine ( $h$ ) mesafesi interferometrik olarak ta ölçülebilmektedir.



**Şekil 2.** Küçük açı üretimi (a) SI açı birimi radyanın tanımı [9] (b) Açı interferometresi şematik resmi.

Çok küçük açılarda, açığı gören yay uzunluğu hemen hemen üçgenin dik kenar uzunluğuna eşit olduğu için,  $\alpha = h/L$  oranı (SI açı birimi radyanın tanımı) formülü kullanılarak ta ölçüm yapılabilir. İnterferometrik yöntemin en büyük avantajı, ( $h$ ) mesafesinin çok hassas ve doğru bir şekilde, direk ışığın dalga boyuna göre (izlenebilir olarak) bulunabilmesidir. Örneğin,  $L$  boyu 200 mm olan bir sistemde, klasik 1nm çözünürlükle çalışan lazer mesafe interferometresi ile 0.001" (5 nanoradyan) çözünürlükle açı üretmek ya da ölçmek teorik olarak mümkündür. Genelde ülkemizde de çok sayıda bulunan ve çok geniş kullanım alanına sahip Agilent, Renishaw lazer interferometrelerindeki, optik mesafesi 30-32 mm civarı olan açı optikleri ile 1 nm ( $h$ ) mesafesi ölçümü çözünürlüğü ile yine teorik olarak 0.007" (35 nanoradyan) açı ölçümü ve üretimi mümkündür. Fakat burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise, temel çözünürlüğü, kullanılan dalga boyunun yarısı 315 nm olan bu cihazlarda, 1nm mesafe ölçme çözünürlüğü elde edilirken, ortaya çıkan interpolasyon hatalarıdır. Yaklaşık 3-5 nm civarında olan interpolasyon hataları burada kısıtlayıcı bir rol oynarlar. Bunun haricinde, mutlak açı ölçümü için ise, ( $L$ ) boyunun doğru olarak ölçümü gerekir. Bu ise nanoradyan değerlerine inerken özellikle 30 mm gibi kısa mesafelerde çok hassas ve doğru bir

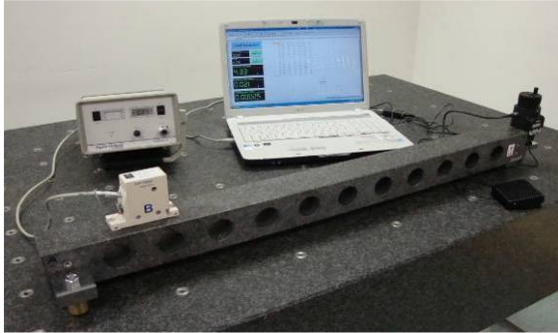
ölçüm gerektirir. Bu sebeptendir ki üretici firmalar bu cihazlardaki açı ölçme çözünürlükleri için, en iyi 0.01" (50 nrad) değerini verirler. Ayrıca açı optikleri veya açı interferometreleri kalibrasyonunda, (L) mesafesini ölçmek yerine bir referans açı değeri ile karşılaştırılan sonuçtan elde edilen doğrulama katsayıları kullanılır. Bu katsayılar aynı marka cihazda her açı optikleri için farklı olup, yazılımda belirtilen yere girilerek hassas ölçümlerde kullanılır. Açı interferometrelerinin kullanıldığı sistemlerde, uygun yerlere yerleştirilen yansıtıcılar ile temassız açı ölçümleri yapılabilir.

### 2.1.2. Seviye ölçerler

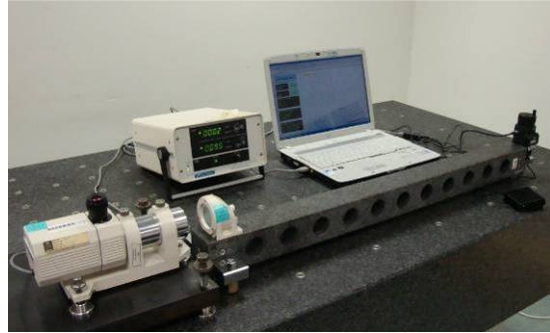
Seviye ölçerler, yerçekimine göre açısal hataların tespiti için kullanılırlar. Cihaz ve büyük makine kurulumlarında teraziye almak (yerçekimine göre ayarlamak) için sıklıkla kullanılan bu cihazların farklı modelleri mevcuttur. En basit olanı ise 'su terazisi' ismi ile anılmaktadır. Genelde 4-5" (0.020mm/m) çözünürlüğe kadar inebilen bu cihazlar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fakat 5" çözünürlükle çalışan bir su terazisi ölçme aralığı (15-20)" ile sınırlıdır.

Daha geniş ölçme aralığına ulaşmak amacı ile geliştirilen elektronik seviye ölçerler iç yapılarında bir sarkaç bulundurlar. Yerçekimine göre yapılan açısal hareket sonucunda, bu sarkaç sağa yada sola doğru hareket eder. Uygun elektronik ekipmanların yerleştirilmesiyle, bu hareket bir elektriksel sinyale dönüştürülür. Cihazın kalibrasyonu yapılırken, elektriksel çıktılar ile referans açı değerleri arasında oluşturulan ilişkiyle, elektriksel veriler açısal değerlere çevrilir ve kullanılır. Günümüzde  $\pm 1000''$  ölçme aralığında, 0,1" çözünürlükle ölçüm yapan seviye ölçerler mevcuttur. Seviye ölçerlerin kalibrasyonu için TÜBİTAK UME'de geliştirilmiş **Şekil 3**' te gösterilen 1 metre Küçük Açı Üretici (1mKAU) kullanılmaktadır [7]. Bu cihaz ikinci seviye laboratuvarlar (örn. TÜRKAK tarafından akredite laboratuvarlar) için de imal edilip bu laboratuvarlar tarafından kullanılmaktadır.

Elektronik seviye ölçerlerin 0.01 derece çözünürlükle, 0-180 veya 0-360 derece arasında ölçüm yapabilen tipleri de mevcuttur. Bu cihazların kalibrasyonu ise, 0-360 derece ölçme aralığına sahip döner tablalar ile dikey yönde yapılmaktadır.



(a)



(b)

**Şekil 3.** TÜBİTAK UME yapımı 1mKAÜ ile kalibrasyonlar (a) Elektronik seviye ölçer (b) Otokolimatör.

### 2.1.3. Otokolimatörler

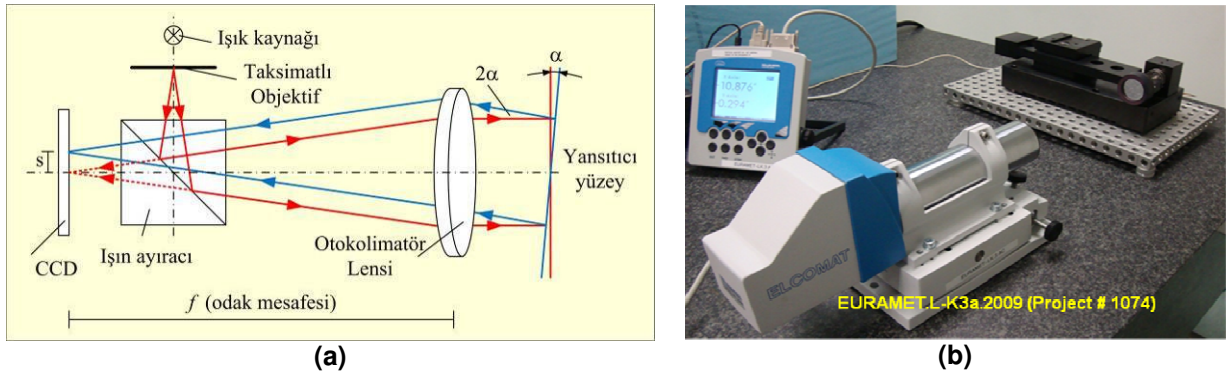
Otokolimatörler, yansıyan yüzeylerin açısal değişimlerini temassız olarak ölçen optik ekipmanlardır. Otokolimatörlere en yakın diğer optik cihazlar ise, optik takımlama da kullanılan, kolimatörler, teleskop, nivo ve teodolitlerdir. Otokolimatörler, aslında büyük cihaz ve makinaların optik takımlama yöntemleri ile ayarlandığı teleskop ve kolimatörlerin birleşmiş halidir. Kısaca kendi gönderdikleri ışınları kendileri toplarlar. Bazı teodolit ve nivolarda autokolimasyon özelliği bulunur. Özellikle savunma sanayinde, örneğin, jiroskop montajlarında, savaş gemilerinde silah mekanizmalarının ayarlanmasında, savaş uçaklarında hedef mekanizmalarının ayarlanmasında bu tip ekipmanlardan faydalanılır.

**Şekil 4a**' da elektronik olarak algılama prensibe göre çalışan bir otokolimatörün şematik görünümü mevcuttur. Otokolimatör lensinin odak noktasına yerleştirilen bir slit (küçük aralık) veya taksimatlı objektife ait aydınlatılmış görüntü sonsuza yansıtılır. Belirli bir mesafede, yansıtıcı bir yüzeyden geri

yansıtılan bu ışın, otokolimatör lensinin odak noktasında bulunan ışığa duyarlı alıcıya (örn. CCD) döner ve görüntü oluşturur. Burada kullanılan ışın ayırıcı giden ve dönen ışının ayrılmasını sağlar. Yansıtıcı yüzeyin giden ışına dik yerleştiği durumda, dönen ışın (görüntü) tam odak noktasına düşerken, yansıtıcı yüzeyde meydana gelen ( $\alpha$ ) kadar açısız bir hareketle, ışının otokolimatör lensine ( $2\alpha$ ) kadar bir açı ile dönmesi sonucu, görüntü ( $s$ ) mesafesi kadar odak noktasından kayacaktır. Kayma miktarı ( $s$ ) lense ait odak mesafesine göre aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

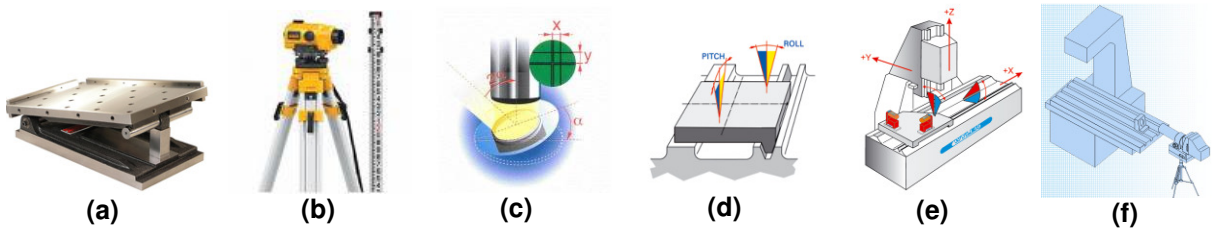
$$s = f \times \tan(2\alpha) \quad (1)$$

Burada, yansıtıcı yüzeyde oluşan açı değişimi, ölçülen  $s$  kayma miktarı ile doğru orantılı olduğundan, CCD üzerindeki kayma miktarı ölçüldüğünde, yansıtıcı yüzeydeki açı değişimi rahatlıkla tespit edilebilir. Formülden de görüldüğü gibi, otokolimatörlerin çözünürlükleri, odak mesafesinin artırılması ile yükseltilebilmektedir.



**Şekil 4.** Elektronik otokolimatörler, (a) Çalışma prensibi (b) TÜBİTAK UME yapımı hassas küçük açı üretici kullanarak,  $U=0,01''$  (50 nrad) belirsizlikte elektronik otokolimatör kalibrasyonu [9].

Temassız olarak küçük açıların ölçümünde kullanılan otokolimatörlerin, açı metrolojisinde çok ayrı bir önemi vardır (**Şekil 5 (c), (f)**). Özellikle, yansıtıcı yüzeyler yardımı ile birbiri ile karşılaştırılan ve bölüm 2.2 de ele alınan açı ölçüm cihaz ve standartlarının optik problama yöntemi ile karşılaştırılmasında otokolimatörler sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde  $0,001''$  (5 nrad) çözünürlükte ve  $1000''$  ölçüm aralığında  $0,25''$  doğruluk bandında çalışabilen elektronik otokolimatörler mevcuttur [19].  $\pm 15''$  gibi küçük ölçme aralıklarında ise, elektronik otokolimatörler  $0,01''$  (50 nrad) doğruluk bandında çalışabilmektedir.



**Şekil 5.** Küçük açı üretimi ekipmanları ve kullanım alanları (a) Sinüs tablası [31] (b) Nivo ile seviye ayarı [35] (c) Otokolimatör ile X ve Y düzlemlerinde açı sapması ölçümü [19] (d) Hareket mekanizmalarındaki açısal hatalar [32] (e) 3 boyutta çalışan cihazlarda açısal hatalar [32] (f) Otokolimatör ile takım tezgahlarında, hareket eden tablalarının açısal hata kontrolü [19].

Bu cihazların kalibrasyonları ise özel şartlarda çalışan cihazlar ile yapılmaktadır. Şu an dünyada en düşük genişletilmiş belirsizlik değeri  $U=0,01''$  birkaç ulusal metroloji enstitüsü tarafından verilebilmektedir [20]. TÜBİTAK UME  $U=0,01''$  ( $k=2$ ) belirsizlik değeri ile bu cihazların kalibrasyonu yapabilen dünyadaki birkaç kurumdan biridir (**Şekil 4b**) [9, 21].



## 2.2. Büyük açıları ölçen ve üreten cihazlar (0-360 derece)

Genelde tam bir rotasyona yani 360 dereceye kadar ölçüm yapabilen veya bu ölçme aralığında açı birimini muhafaza edebilen ekipmanlardır. Tam bir tur boyunca belli açısal aralıkların tespit edilmesinde ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılırlar. Örneğin dişli çark imalatında, ürün üzerinde çevreye belirli açılarda delik delinmesinde, radarların, teleskopların konumlandırılmasında, robotlarda, elektrik motorlarında, otomasyon uygulamalarının hemen hemen tümünde birçok kullanım alanına sahiptirler.

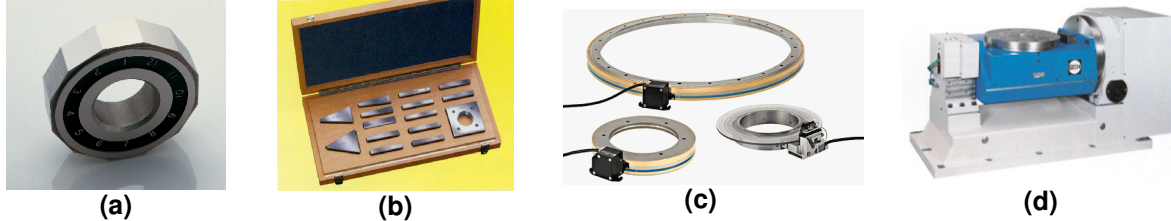
### 2.2.1. Açı artefakları

En uygun açı artefakları olarak poligonlar gösterilebilir. Poligonlar son derece basit fakat uygun yöntemler kullanıldığında, 0.03" belirsizlik değerine kadar 0-360 derece arasında açısal hataların tespitinde kullanılabilirler. 0-360 dereceye kapanarak, 'tam kapanma yöntemi' adı verilen yöntemin uygulanmasına izin verdikleri için, açı değeri  $2\pi$  radyan (360 derece) olan tam bir dairenin bölünmesi prensibiyle SI açı birimi radyanın elde edilmesinde kullanılabilir [15]. Bu şekilde de rotasyon hareketi olan cihazların kalibrasyonları ve hatalarının belirlenmesi için son derece pratik açı standartlarıdır.

Açı master blokları ise, tıpkı normal boyut ölçümlerinde kullanılan master blokları gibi, birbirlerine yapıştırılarak arzu edilen açı değerlerinin elde edilmesinde kullanılırlar. Çoğu zaman yüzey kaliteleri arzu edildiği şekilde sağlanamamasından dolayı istenilen belirsizlikte kalibre edilemezler. Ayrıca tam bir daire oluşturma için ideal olmadıklarından, tam kapanma yöntemi uygulanamaz ve başka bir açı standardı ile (örneğin indeks tabla) karşılaştırılarak kalibrasyonları yapılır. Genelde, basit açı ölçme cihazı olan protraktörlerin veya sinus çubuklarının kalibrasyonları için kullanılırlar.

### 2.2.2. Protraktör, Divizörler, index tablalar, döner tablalar, bölüntülü skala ve açı enkoderleri

Bu ekipmanlar, tam bir dairenin uygun aralıklar ile bölüntülenmesi ve bu bölüntülerin uygun yöntemler ile ölçümü prensibini kullanarak açı ölçümü yaparlar. Bunların içinde en hassas olanları, indeks tablalar ve açı enkoderleri takılmış döner tablalardır (**Şekil 6**).



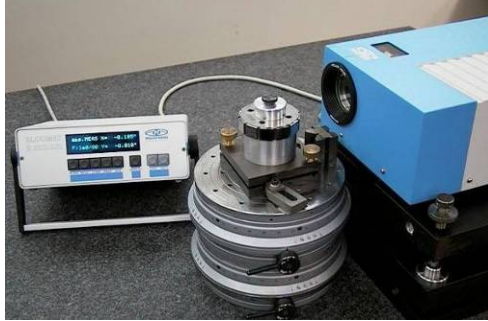
**Şekil 6.** Büyük açı ölçümü standart ve cihazları (a) Poligon [31] (b) Açı master blokları [36] (c) Açı enkoderleri [37] (d) Döner tablalar [38].

İndeks tablalarda, çevreye homojen V oyuklar açılmış iki disk parçanın bu oyuklara kapanması ile açı değerleri elde edilir. Poligonlar ve otokolimatör yardımı ile tam kapanma yöntemi kullanılarak kalibre edilebilen bu ürünler hala çok yaygın olarak kullanılmaktadır (**Şekil 7a**).

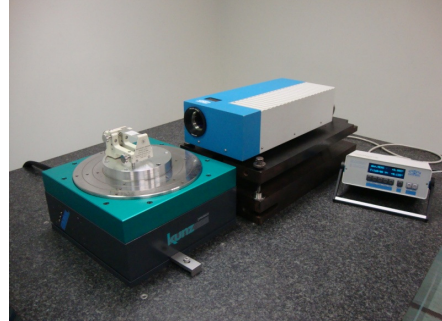
Açı enkoderleri ise, çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Üzerine çevresel olarak hassas skala bölüntüleri yapılmış, çelik ya da cam malzemelerden oluşan disklerde, bu bölüntülerin elektro-optik yöntemler ile ölçümü sonucunda, 1 tur boyunca elde edilen atımlar (pulse) sayesinde 360 derece arzu edilen dilimlere bölünebilir. Günümüzde bir turda 180 000 atım veren hassas açı enkoderleri mevcuttur. Temel çözünürlüğü  $360/180000=7,2$ " olan bu enkoderlerde, alınan analog sinyal, interpolate edilerek 0.001" çözünürlüğe inmek mümkün olmaktadır.

Açı enkoderleri uygun ekipmanlara monte edilerek çok farklı amaçlar için kullanılabilir. Örneğin, döner tablalara monte edildiğinde, divizör olarak veya açı ölçme tablası olarak kullanılabilir. Açı değeri  $2\pi$  radyan (360 derece) olan tam bir dairenin bölünmesi prensibiyle SI açı birimi radyanın elde

edilmesinde kullanılabilirler (**Şekil 7b**). Özellikle üretim alanında bir çok endüstride kullanılan açı enkoderlerinin en önemli katkısı, uzunluk ölçümüne dayalı olan kartezyan koordinat sistemine ilave olarak çok kompleks ve hassas parçalarında imalatının yapılabileceği açı ölçümüne dayalı olan polar koordinat sisteminin kullanımına olanak sağlamalarıdır.



(a)



(b)

**Şekil 7.** Açı değeri  $2\pi$  radyan (360 derece) olan tam bir dairenin bölünmesi prensibiyle TÜBİTAK UME'de SI açı birimi radyanın elde edilmesi (a) indeks tabla ve poligon kalibrasyonu (b) Açı bölüntü değerleri tam kapanma yöntemiyle belirlenmiş döner tabla ile otokolimatör kalibrasyonu

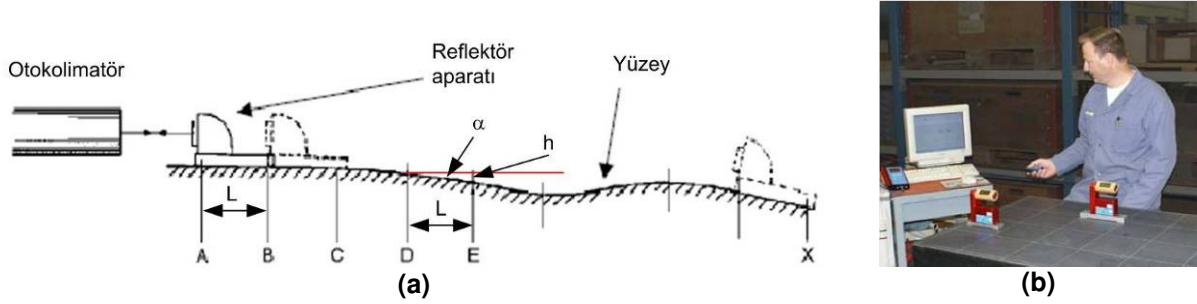
### 2.3. Açı ölçme cihazlarının kullanım alanları ve limitleri (eksiklikleri)

Açı interferometreleri ve açı üreteçleri, SI açı birimi radyanın 'nrad' mertebesinde tanımına göre mutlak olarak elde edilmesi için veya hassas açısal kontrolü için en önemli adaylardan biridir. Bu cihazlar ile şu an  $0,01''$  ( $50$  nrad) mertebesinde genişletilmiş belirsizlikte küçük açı üretimleri yapılabilmektedir [9]. Burada en önemli eksikler, interpolasyon hatalarının kontrol altına alınması, ve optikler arasındaki mesafenin (veya iki mafsallı nokta arasındaki mesafenin) daha düşük belirsizlikte ölçümü olarak sıralanabilir. Diğer önemli bir nokta ise,  $50$  nrad ( $0.01''$ ) belirsizlikte açı üretimi için, ölçme aralığının  $\pm 15''$  den  $\pm 3600''$  ( $1$  derece) civarlarına artırılması ve açı üretiminde nrad altı değerlere inilmesidir. Aslında çözünürlük ve tekrarlanabilirlik olarak açı üretimi için,  $0.5$  nrad mertebelerine TÜBİTAK UME'de inilmiştir [9] fakat bu değerlerinde altına (örn.  $0.1$  nrad) yeni araştırmalar ile inmek mümkündür.

Açı interferometreleri, elektronik seviye ölçerler ve otokolimatörler, uygun aparatlar yardımı ile form (doğrusallık ve düzlemsellik) ölçümlerinde yaygınca kullanılmaktadır (**Şekil 8**). Burada amaç, yüzey profilinin (iniş ve çıkışların) açısal olarak tespiti ve trigonometrik prensip ile boyut değerlerine çevrilmesi ve verilerin işlenerek doğrusallık veya düzlemsellik haritasının çıkarılmasıdır. Aparat kullanarak yapılan ölçümlerde mevcut cihazlar yeterlidir. Fakat bölüm 3. te anlatılan yeni uygulama alanlarında ise özellikle otokolimatörler için bazı kısıtlamalar mevcuttur. Örneğin, otokolimatörlerin önlerine küçük ( $1-10$ ) mm çaplarda apertür yerleştirilerek çıkan ışın çapı küçüldüğünde, otokolimatörlerin üretildikleri  $40-50$ mm çapındaki ışın ile gösterdiği performanstan farklı bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Küçük apertürler konulduğunda, farklı mesafelerde, ciddi hatalı ölçümler yaptığı, bu konuların incelenerek  $1$  mm çap civarında bir ışınla da doğru çalışmaların sağlanması gerekmektedir.

Yazıcılar, CD okuyucular, robotlar, asansörler, üretim tezgahları, yüksek teknoloji ürünleri, yarı iletken teknolojileri, lazer tarayıcılar, teodolitler gibi çok geniş bir yelpazede kullanım alanı bulan açı enkoderlerinin mevcut limitlerinin iyileştirilmesi son derece önem arz etmektedir. Mevcut açı enkoderlerinin en büyük zafiyeti, bağlandıkları parçalardaki dönme, yalpalanma, ve eksantriklik gibi hatalardan çok etkilenmeleridir. Hareketli mekanizmaların tümünde mevcut olan bu hatalar neticesinde ve ayrıca çevre şartlarının etkisi ile meydana gelen değişimler ile enkoderler ciddi hatalara maruz kalırlar. Bu hatalar neticesinde de kullandıkları cihazların performanslarını etkilerler. Örneğin, çözünürlüğü yüksek kaliteli bir açı enkoderinin robot kolunda kullanımı, robot hareketinin daha düzgün, pürüzsüz ve akıcı olmasını sağlar. Benzer durum ofislerimizde kullandığımız yazıcıların daha kaliteli baskı yapması, asansörlerin daha akıcı çalışması içinde geçerlidir. Dış ortamda kullanılan teodolitlerin

çevre şartlarından en az şekilde etkilenip, daha doğru ölçüm yapması kullanılan açı enkoderlerindeki limitlerin kaldırılması ile ilgilidir.



**Şekil 8.** Küçük açı ölçümü cihazları ile düzlemsellik ölçümü (a) Profil çıkarılması prensibi (Otokolimatör + Ayna aparatı kullanarak) (b) Elektronik seviye ölçer ile granit masa düzlemsellik ölçümü [32].

Açı enkoderleri, aynı zamanda SI açı birimi radyanın, tam bir dairenin bölünmesi yöntemiyle elde edilmesi için de kullanılır (Şekil 7b). Burada hassas döner tablalara (örn. hava yastıklı) bağlanan açı enkoderleri kullanılır. Tabla ne kadar hassas dönme kabiliyetine sahip olsa da, nrad seviyelerinde küçük form ve eksantriklik hataları sorun çıkarır. Bu sorunların detaylı bir şekilde incelenmesi, araştırılması ve önlemlerinin alınması gerekmektedir.

### 3. AÇI ÖLÇÜMLERİNDE ÜST DÜZEY TALEPLER VE POTANSİYEL ETKİLER

Günümüzde optik parçalar cep telefonlarından, yazıcılara, haberleşme ünitelerine, silah hedef mekanizmalarına, dev teleskoplara, genetik ve malzeme araştırmalarında atomik boyutta görüntüleme tekniklerinde kullanılan ekipmanlara kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bazen bu optik parçalar, yansıtma miktarını artıran (alimünyum, gümüş vs.) gibi malzemeler ile kaplanıp kullanılır. Bazende bunlar kaplanmadan, optik cam olarak tabir edilen şekilde, şeffaf olarak kullanılırlar. Bu tanımlamaların hepsine lensler, iç ve dış bükey aynalar gibi optik parçalarda dahildir.

Optik aksanların en önemli incelenmesi gereken özelliklerinden biri yüzey kalitesi ve düzgünlüğüdür. Bilindiği gibi, yansıtılan ışının dalga boyuna göre bu düzgünlük ve yüzey kalitesindeki talepler değişmektedir. Örneğin, görünen bölgede, 600 nm civarındaki dalga boyu ile kullanılan optik parçalarda arzu edilen düzlemsellik veya belli bir profilden sapma değeri dalga boyunun 10 da biri (60 nm) veya 20 si (30 nm) şeklinde talepler ile karşımıza çıkar. Bunun sebebi ise yansıyan ışının dalga boyundan küçük yüzey hataları olan bölgeden yansıtılarak, ışının kesintisiz yansıtılması ve görüntü kalitesinin teminidir. Örneğin buzlu camın yüzey kalitesi özellikle kötü yapılarak görüntünün bozulması sağlanır. Ayrıca arzu edilen profile sahip olmayan optiklerde, odaklama sorunları yaşanır.

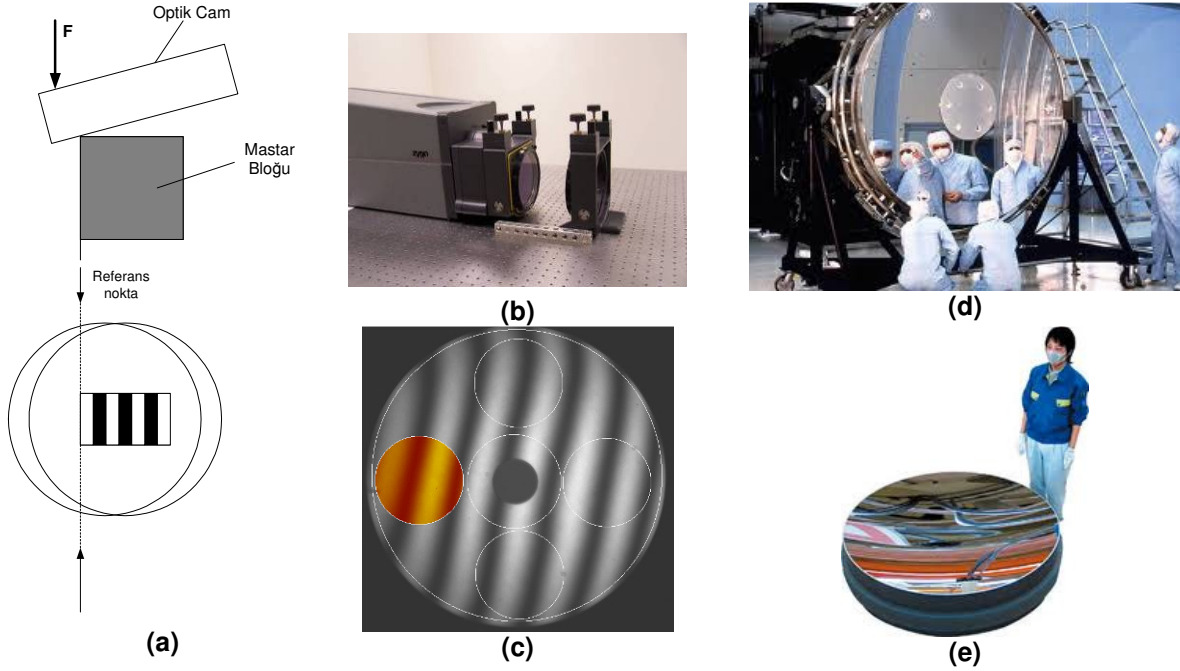
#### 3.1. Görünen ışık dalga boyu (390-700 nm) için kullanılan optik yüzeyler ve üst düzey talepler

Görünen ışık için, bu değerlerde parçaların düzgün işlenmesinde ve birkaç nm Ra değerinde yüzey pürüzlülükleri elde edilmesinde hiçbir sorun yoktur. Burada en büyük sıkıntı, büyük boyutlarda düzgün yüzey elde edilmesidir. Bunun içinde ilk olarak büyük boyutlarda işlenen optik yüzeylerin düzlemsellik ölçümü ve izlenebilirlik durumu akla gelmektedir.

Optik yüzeylerin düzlemsellik ölçümlerinde en çok arzu edilen yöntem temassız ve yatay yönde çok yüksek çözünürlüğe inilebildiğinden yıllardır kullanılan interferometrik yöntemdir (Şekil 9). Elinize aldığınız 60 nm düzlemselliğe sahip bir optik cam ile, optik yüzeylerin düzlemsellik durumlarını gözünüzle, girişim çizgilerini okuyarak 50-70 nm hata ile inceleyebilirsiniz (Şekil 9a). Burada görünen ışıktan faydalanırsınız. Kullanılan ve yaklaşık 50 mm çapında olan bu optik camların kalibrasyonu ise, başka bir optik cam ile karşılaştırılarak yapılmaktadır. Kısaca göz ile yapılan girişim çizgisi okuma,



burada kamera ile daha hassas yapılmaktadır. Ayrıca beyaz ışık yerinde, tek dalga boylu ışık olarak lazer ışığı da kullanılabilir. Bu ekipmanların hiçbirinde bir sorun veya problem yoktur. Sorun test yüzey ile karşılaştırılarak, girişim çizgileri oluşturmak için kullanılan referans optik yüzeydedir. Bunun düzgün işlenmesi, ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaçla farklı teknikler kullanılır. Bazen yerçekimine göre uzun süre bekletilmiş, civa veya silikon yağı yüzeyleri, bazen benzer bir optik cam ile gerçekleştirilmiş, tersine hata ayırma metodları... Her iki metottaki en büyük sıkıntı, büyük boyutlarda elde edilmesi sorunudur. Genelde 150 mm çapına kadar, maksimum 300 mm çapına kadar elde edilen bu referans optik yüzeyler interferometrik yöntemler için referans yüzey olarak kullanılırlar (**Şekil 9 (b) ve (c)**).



**Şekil 9.** Interferometrik yöntem ile optik yüzeylerin düzlemsellik ölçümleri ve limitleri (a) Mastar blok yüzeyinin interferometrik yöntem ile düzlemselliğinin ölçümünün şematik gösterimi (b) TÜBİTAK UME'deki ZYGO düzlemsellik interferometresi ve (c) ZYGO ile alınmış girişim görüntüleri (çap 150mm), (d) Teleskoplarda ve uzay çalışmaları için kullanılan birkaç metre boyutundaki aynanın montajı [39] (e) İnsan boyutundan büyük hassas dev optik yüzeyler [40].

1000 mm ve daha yukarıdaki çaplarda ayna ve optik yüzeylerin test edilmesine ihtiyaç vardır. Özellikle dev teleskop aynalarında, ayna çapları büyük olup, düzlemsellik kontrolü gerektirmektedir. Kontrol yapılıp, istenilen seviyeye kadar işleme devam eder. İşte bu şekilde olan büyük boyutlarda referans yüzey bulunmadığından, interferometrik düzlemsellik ölçme yöntemleri, ileri seviye uygulamalarda eksik kalmaktadır **Şekil 9 (d) ve (e)**.

Ayrıca, küçük çaplarda bu metot ile şu an elde edilebilen belirsizlik değerleri 10-15 nm civarlarındadır. Çünkü civa veya silikon yüzeyi kullanım sırasında çevresel etkilerden çok etkilenirler. Ayrıca bu yüzeylerin izlenebilir olduğuna dair sıkıntılar vardır. Tersine hata ayırma teknikleri ise (Referans ve test parçayı farklı konumlarda ölçüm hatalarının ayrılması) konumlama sırasında sorunlar çıkardığından tekrarlanabilirlik değerlerindeki problemler neticesinde nm ve altı belirsizliklere inmek için eksik kalmaktadır.

### 3.2. X ışınları için kullanılan optik yüzeyler ve üst düzey talepler

(100 – 0,05) nm boyut aralığında bulunan proteinlerin, moleküllerin ve atomların görüntülenmesi için bu boyutlardan daha küçük dalga boyuna sahip olan ışık kaynaklarına ihtiyaç vardır. X ışınlarının dalga boyları (10 – 0,01) nm arasında olduğundan bu işlem için kullanılmaktadır.

X ışınlarını kullanabilmek için, bu ışınları, kaynağından alıp, yönlendirecek gerektiği yerde odaklayacak optik parçalara ihtiyaç vardır. Fakat bu optik parçaların yüzey kalitesi ve düzgünlükleri, nanometre altında olmak durumundadır. Yukarıda bahsedilen limitler neticesinde, interferometrik yöntemler ile bu seviye inerek doğru ölçüm yapmak ve daha sonra üretim yapmak pek mümkün değildir.

CERN, APS ARGONE, BNL-NLSLS II gibi dünyada yaklaşık 60'ın üzerinde hızlandırıcı merkezlerinde, çok güçlü X ışınları ile görüntüleme çalışmaları yapılmaktadır. Tüm bu merkezlerde kullanılan optik aksanların yukarıda açıklanan taleplere ihtiyacı vardır.

### 3.3 Temassız yeni düzlemsellik ölçme metotları ve üst düzey talepler

2000 li yıllarda interferometrik düzlemsellik ölçüm metoduna alternatif olarak yeni bir metot geliştirildi [1-6]. Kısaca 'deflektometri' olarak adlandırılan bu yeni metotta, açı ölçme cihazları kullanılarak optik yüzeylerin doğrusallık ve düzlemsellik ölçümleri yapıp profil haritaları çıkarılmaktadır. Aslında açı ölçümleri ile profil çıkarma veya düzlemsellik ölçümü yeni değildir. Daha önce anlatıldığı gibi, seviye ölçer, açı interferometreleri ve otokolimatörler ile kullanılan bazı aparatlar yardımıyla bu işlem yapılıyordu. **Şekil 8'** de anlatılan granit masaların düzlemsellik ölçümü bu yöntemle örnek gösterilebilir. Fakat burada ayna yüzeyi veya açı optikleri, mekanik parçalara bağlanıyor, ve bu mekanik parça ayaklarının yüzey üzerinde gezinmesi ile oluşan farklı açılar neticesinde, yüzey haritası çıkarılıyordu. Optik yüzeylere bu işlem ise farklı bir şekilde uygulanmıştır. Temassızlık gerektirdiğinden, otokolimatörden çıkan ışın bir prizma yardımı (penta prizma) ile yönlendirilip, yüzey üzerinden yansıtılmıştır (**Şekil 10 ve 11**). Yüzey profilindeki eğim vs gibi topografik sapmalar, otokolimatörde açısal sapmalara sebep olduğu için çok daha büyük bir hassasiyette tespit edilmiştir (**Şekil 10a ve 11a**). Açı sapmaları SI açı birimi radyana izlenebilir olup, doğrusallık standardı için, ışığın düz bir şekilde yayılmasından faydalanılır (**Şekil 10b**). Doğrusallık profilleri birleştirilerek, daha önceki uygulamalardaki gibi, düzlemsellik değeri hesaplanır.

Bu amaçla, 2000 li yıllarda Möller Wedel firması tarafından Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü ile yapılan ortam çalışmalar neticesinde, ELCOMAT 3000 otokolimatör cihazı geliştirilmiştir [19]. Bu cihaz ile daha önce sadece ayna gibi yansıtma oranı (%90) yüksek yüzeylerde açı ölçümü yapılırken, %5 civarı yansıtması olan şeffaf optik yüzeylerden de açı okuması 5 mm gibi küçük apertürler ile yapılabilir hale gelmiştir. İşte böylece, bir firma ve ulusal metroloji enstitüsü ortak çalışması ile üst düzey ölçümlerde kullanılabilecek bir ölçme cihazı geliştirilmiştir (**Şekil 11b**).

Otokolimatörlerin önüne yerleştirilen küçük bir apertüre yardımıyla yatayda tarama aralığı çözünürlüğünün, (40-50) mm den (3-5) mm seviyesine indirilmesi, otokolimatörün doğru açı okuma performansında sorunlar çıkarmıştır. Otokolimatör normal serbest çapı olan 40 mm'deki çalışmasından çok farklı bir performans göstermiştir. Ayrıca yeni yöntemde optik yörünge boyu değiştiği için otokolimatörün performansı bunun içinde incelenmelidir. Yapılan ilk çalışmalarda bu konuda da sıkıntı olduğu tespit edilmiştir.

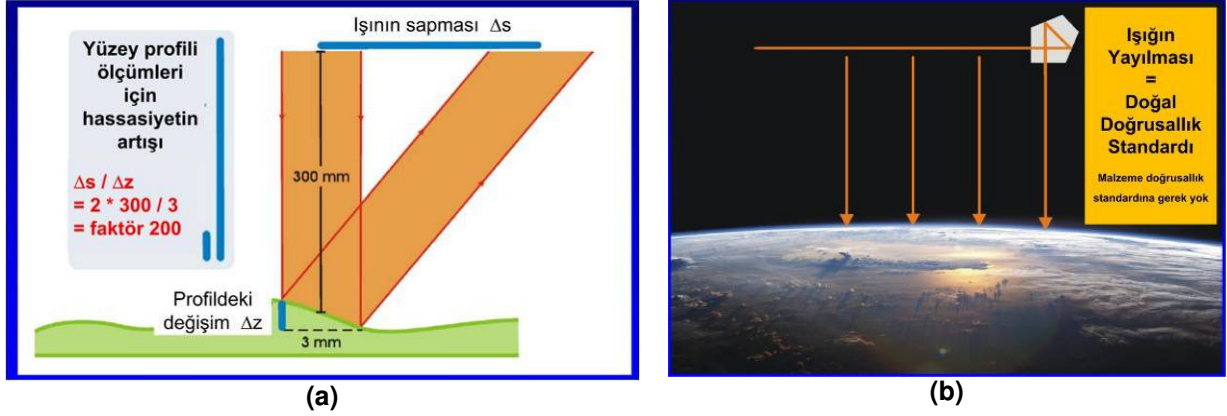
Diğer bir konu, X ışınları için kullanılan optik yüzeylerdeki profil durumudur. Bu yüzeyler tam olarak düz değil, X ışınlarını odaklamak ve yönlendirmek için hafif eğimlidir (daireseldir). Bu değer çapı 10 m ile 300 km arasında değişmektedir. Eğimin fazla olduğu yüzeylerin ölçümü için, daha geniş açı ölçme aralığına sahip otokolimatörlerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Diğer önemli bir konu da, eğimli yüzeylerde, otokolimatörün X ve Y ekseninin performansdır. Şimdiye kadar dünyada hiçbir kurum bir otokolimatörün aynı anda X ve Y yönünde performansını incelememiştir. Bu tip yüzeylerin çok hassas ölçüm talebi bu incelemeleri ortaya çıkarmıştır.

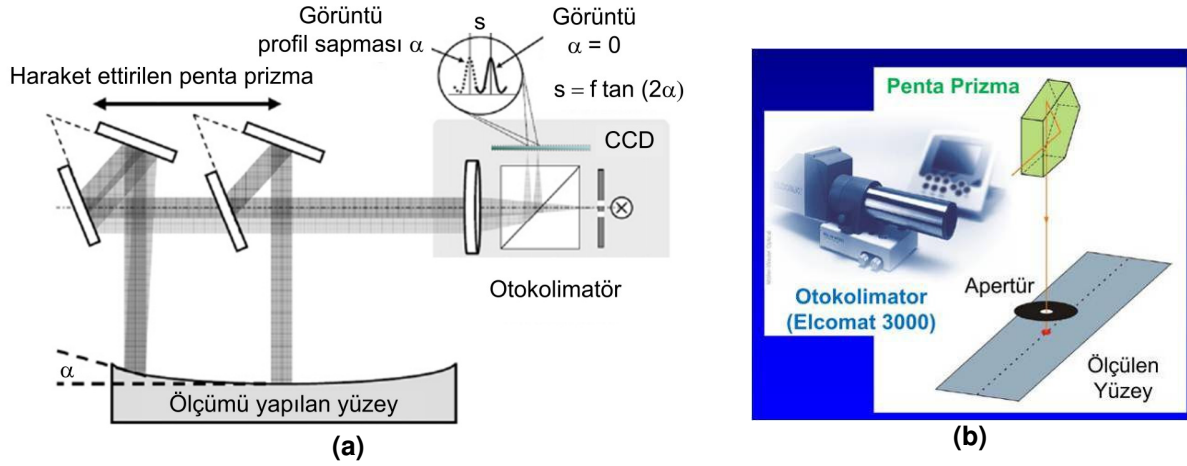
Tüm bu testlerin yapılabilmesi için 50 nrad gibi düşük belirsizlikte çalışan ve geniş bir ölçüm aralığında ( $\pm 3600''$ ) referans açı üreteçlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu referans açı üreteçleri ile kalibrasyonu yapılan otokolimatörlerin, ilgili düzeltmeler yapıldığında, doğruluk limitlerini, 0,25" den 0,1" altına çekmek mümkündür. Ayrıca yapılan testler sonucu yeni geliştirilecek algoritmalar ile 1 mm çap ve altındaki apertürler ile otokolimatörleri kullanmak mümkün olabilecektir.

Otokolimatörlerin kalibrasyonundan sonra, performanslarının kullanım sırasında kontrolü de önemlidir. Çünkü otokolimatör lensinin şoklara maruz kaldığında gevşemesi, veya başka sorunlar, ölçümlerin hatalı olmasına neden olmaktadır. Örneğin, otokolimatör kalibrasyonu için düzenlenen EURAMET.L-K3.2009 [22] karşılaştırmasında, ulaşım sırasında otokolimatörün lensinde gevşeme olmuş ve 0.009" sonuçlarda sapma olmuştur. Bu sapma Almanya ve TÜBİTAK UME gibi çok az enstitü tarafından tespit edilebilmiştir.

Tüm bu sorunlar, deflektometre sistemlerinde kullanılan otokolimatörlerin ara ara testlerinin yapılması için  $\pm 3600''$  ölçüm aralığında, 0.01" (50 nrad) belirsizlikle çalışabilen portatif açı üreteçlerine ihtiyaç olduğunu ortaya çıkarmıştır.



**Şekil 10.** Otokolimatör ile yüzey profil ölçümü (a) Yüzeyden yansıyan ışığın açı ölçümleri ile profil değişiminin daha hassas tespit edilmesinin şematik açıklanması (b) Işığın doğal doğruluk standardı olarak kullanımının şematik gösterimi [1].



**Şekil 11.** Deflektometri yöntemi ile profil ölçümleri ve kullanılan cihazlar (a) Deflektometri prensibinde açı değişiminin tespiti ile yüzey profilinin çıkarılması [2] (b) Elektronik otokolimatörlerin apertür ile profil ölçümü için kullanımı [1].

### 3.4. Nanoradyan mertebesinde hassas açı kontrolü talepleri

Çok küçük açıların üretimi, ölçümü ve açısal hareketli mekanizmaların çok hassas kontrolü ve nrad belirsizlikte kararlı halde arzu edilen açı değerine getirilmesi üst düzey bilimsel çalışmalar için talep edilmektedir. Örneğin 10 nrad (0.002") ve daha iyi bir belirsizlikte açısal kontrol, yüksek hassasiyete sahip X ışınları kristal optik aksanları için gereklidir. Ayrıca gelecekteki X ışınları Serbest Elektron

Lazer Osilatörleri (X-ray Free Electron Laser Oscillators - XFELs) kavitelelerinin kontrolü içinde 10 nrad altında açısal ölçüme ihtiyaç duyulmaktadır. Şu an elde edilebilen değer 50 nrad' dır.

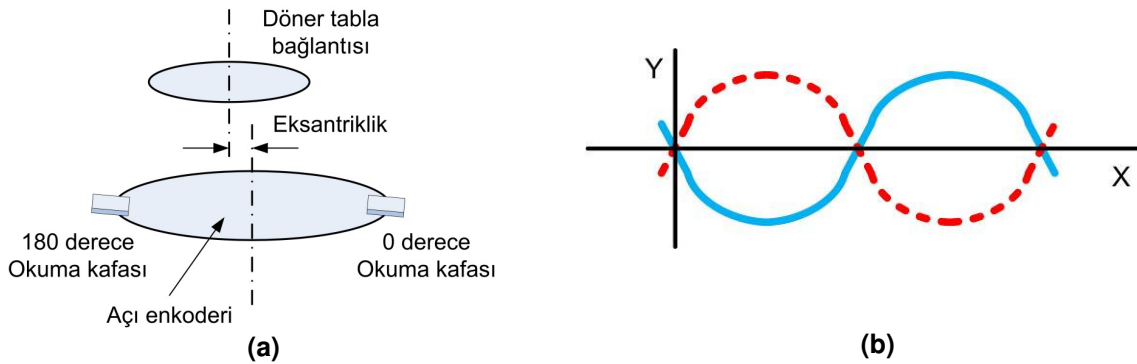
İki boyutun oranı ile açı üretimi yapılan ve 50 nrad belirsizlik değerine sahip olan çalışmalar [9, 10] bu sorunların çözümü için en ideal adaylardır. Mevcut durumda L/h oranındaki değişkenlerin mutlak ölçümüne alternatif olarak, tersine (reversal) yöntemler veya hata ayırma yöntemleri ile bu değişkenlerin çok daha hassas tespit edilmesi üzerine çalışmalar gerekmektedir. Ayrıca nrad seviyede açısal ölçümler için, hassas nanopozisyonlama mekanizmaları, titreşim ve çevre şartlarının etkisini en alt seviyeye indiren özel önlemler gerekmektedir.

Kısaca, nanoradyan seviyede açısal kontrole, hızlandırıcı merkezlerinde ve serbest elektron lazerlerinde (FEL) kullanılan X ışınları optik aksanların açısal kontrolünde ve stabilizasyonunda önemli ihtiyaçlar bulunmaktadır.

### 3.5. Yeni nesil açı enkoder ihtiyaçları

Mevcut açı enkoderleri, bağlandıkları mekanizmaların geometrik hatalarından (yalpalama, yuvarlaklık), montaj hatalarından (eksantriklik), çevre şartlarındaki değişimler (sıcaklık değişimi ile skala deformasyonu), yük koşullarındaki değişimlerden etkilenirler (**Şekil 12a**). Etkilenmeyen yeni nesil açı enkoderlerine ihtiyaç vardır. Bunun için en önemli adaylardan biri, üzerinde araştırma çalışmaları yapılan 'kendi kendinin kalibrasyonu yapabilen' (self-calibratable) açı enkoderleridir [16, 23].

Bu tip enkoderler, eksantriklik hatasının nasıl kontrol altına alındığının açıklanması ile anlatılabilir. Dairesel disk üzerindeki açı skala bölüntüleri normalde 1 adet okuma kafası ile alınırken, bu işlemin  $0^\circ$  ve  $180^\circ$  karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki okuma kafası ile alındığını düşünelim.  $0^\circ$  deki okuma kafasından okunan açısal sapma değerleri X eksenini nominal, Y eksenini sapma olarak çizildiğinde, eksantriklik hatası sebebiyle bir sinüs eğrisi oluşacaktır. Aynı anda  $180^\circ$  uzakta olan okuma kafasından alınan açısal sapma değerleri de çizildiğinde, yine bir sinüs eğrisi eksantriklik hatasını sebebiyle oluşacaktır. Fakat  $0^\circ$  ve  $180^\circ$  derecede alınan sapma grafikleri karşılaştırıldığında, aralarında  $180$  derece faz farkı olduğu görülecektir (**Şekil 12b**). Eğer bu iki grafikteki veriler birbiri ile işleme tabi tutulursa, eksantriklik nedeni ile ortaya çıkan 1. Harmonik hatası sistemden çıkarılmış olacaktır.



**Şekil 12.** Açı enkoderlerinde eksantriklik hatası (a) Şematik gösterimi (b) 2 okuma kafası ile alınan 180 derece faz farkı olan veriler.

Benzer şekilde, çok sayıda okuma kafası çevrede kullanıldığında, yuvarlaklık, yalpalama vs. mekanik hatalardan dolayı ortaya çıkan açısal hataları da ortadan kaldırmak mümkün olacaktır. Ayrıca bu okuma kafalarından alınan veriler işlenerek, dairenin tam kapanma prensibi uygulanıp, açı enkoderinin sahip olduğu hatalar tespit edilip kompanse edilebilir. Çalışma sırasında, yapılan 1 tur döndürme ile açı enkoderini birinci seviye yöntem ile (açı değeri  $2\pi$  radyan olan tam bir dairenin bölünmesi prensibi) başka bir referans standarda ihtiyaç duymadan kalibre etmek mümkün olacaktır.

Özetle, bu tip açı enkoderine sahip bir firma, aynı zamanda, ulusal metroloji enstitüsünün sahip olduğu ulusal açı standardına sahip demektir. Diğer bir deyişle, bu tip bir açı enkoderi ile başka bir referans açı standardına ihtiyaç duyulmadan SI açı birimi radyana izlenebilirliği sağlamak mümkün olup, firmanın üst seviye açı standartları bulundurmasına ve elindeki cihazı kalibrasyona göndermesine gerek kalmayacaktır.

Diğer taraftan ise, ileri seviye üretim teknolojilerinde çok daha hassas üretim yapmak, otomasyon mekanizmalarında daha pürüzsüz ve doğruluğu yüksek hareketler elde etmek, kendi kendinin kalibrasyonu yapabilen' (self-calibratable) açı enkoderleri ile mümkün olacaktır.

En önemli konu ise, şimdiye kadar belli bir band aralığında çalışması ile tespit edilen açı doğruluk değerleri yerine (örneğin  $\pm 10''$ ), bu aralık içerisinde her bir açı enkoderinin sahip olduğu açısız hatayı tespit etmek ve tespit edilen hatayı kullanarak kompanze etmek mümkün olacaktır.

### **3.6. Açı metrolojisindeki gelişmelerin bilimsel çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar için potansiyel etkileri**

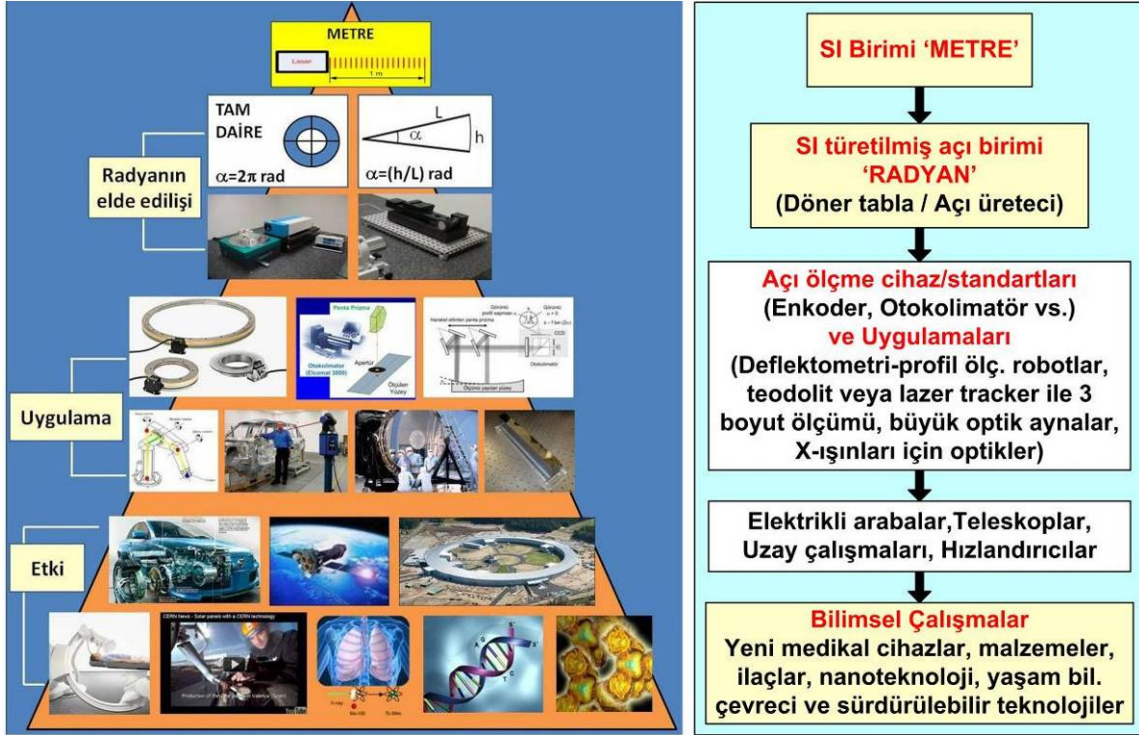
SI açı birimi radyanın daha düşük belirsizlik ile elde edilmesinin, açı standart ve cihazlarının iyileştirilmesinin, yeni nesil açı ölçme cihazlarının geliştirilmesinin son derece önemli etkileri vardır. **Şekil 13'** te SI açı birimi radyan'a olan izlenebilirlik zinciri, kullanım alanları ve üst düzey bilimsel çalışmalar için etkisi gösterilmektedir.

**Şekil 13'** te görüldüğü gibi, SI açı birimi radyan, metrenin tanımına izlenebilir yapılan iki boy ölçümünün birbirine oranı veya açı değeri  $2\pi$  radyan olan tam bir dairenin bölünmesi prensibi birinci seviyede elde edilebilir. Elde edilen açı birimi radyan, açı ölçme standartları veya cihazları ile farklı kullanım alanlarında dağıtılır. Örneğin, açı ölçme cihazı otokolimatörler yardımı ile nanometre altı düzgünlükte düzlemsellik ölçümleri yapmak ve bu ölçüm sonuçlarını kullanarak, leblenmiş optik yüzeyler üzerinde iyon bombardımanı teknikleri uygulanarak, X ışınları için kullanılacak optik yüzeyleri işlemek mümkündür (**Şekil 14**). İyon bombardımanı bir nevi kuşlama tekniğine benzetilebilir. Kum tanecikleri yerine, iyon parçacıklarının, bilgisayar kontrolüne alınmış pozisyonlama mekanizmaları ile optik yüzey üzerine gönderilerek yüzey nm altı seviyede işlenir. Düz işlenen bu yüzeylere odaklama kabiliyeti kazandırmak için, eğme ve bükme aparatları kullanarak, 10 metre ile 300 km çapa denk gelecek iç bükme yüzeyler oluşturulur. Bu yüzeylerin arzu edilen ölçülerde oluşturulması içinde açı ölçme cihazları olan otokolimatörler kullanılır.

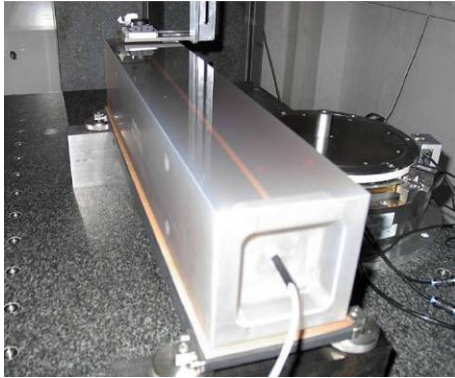
#### **3.6.1 Dünyada hızlandırıcı merkezleri ve hassas açı ölçümlerinin etkileri**

Yukarıda anlatılan optik yüzeyler hızlandırıcı merkezlerinde (synchrotron metrology laboratories) serbest elektron lazerlerinde (FEL) geniş bir kullanım alanlarına sahiptir. Medyada en fazla gündeme gelen CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Organizasyonu) aslında bir hızlandırıcı merkezidir [23]. Burada medyada gündeme sürekli gelen çalışmaların haricinde, bilimin hemen hemen her alanında (malzeme, genetik, yeni ilaç geliştirme, nanoteknoloji uygulamaları vs.) üst düzey çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin Cenevre Havalimanı üzerinin kaplandığı yeni teknolojiye sahip güneş panelleri CERN'de bulunan hızlandırıcıda yapılan çalışmalar sayesinde geliştirilmiştir [24]. Avrupa Hızlandırıcı Radyasyon Merkezi ESRF [25], Amerika Birleşik devletlerindeki, APS ARGONNE [26], BNL-NSLS II [27] bu tip üst düzey çalışmaların yapıldığı hızlandırıcı merkezleridir (**Şekil 15**). Yaklaşık olarak dünyada 60 adet hızlandırıcı merkezi bulunmaktadır. Buralarda, hemen hemen bilimin her alanından gelen bilim insanları, hızlandırıcı da elde edilen farklı dalga boylarındaki güçlü radyasyon kaynakları ile görüntüleme yaparak bilimsel çalışmalarda bulunur. Örneğin bu merkezlerdeki güçlü radyasyon ile kimyasal reaksiyonlar videoya alınır, an ve an görüntülenir. Yeni ilaçların organizmalar üzerindeki etkilerini yıllar geçmeden kısa sürede devreye almak için, bu görüntüleme teknikleri ile incelenmesi ve yıllar sonraki etkilerinin tespit edilebilmesi çalışmaları yapılmaktadır.

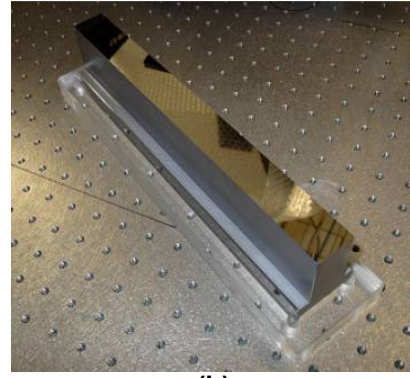




Şekil 13. Açı ölçümü izlenebilirlik zinciri ve üst düzey kullanım alanlarındaki etkisi.



(a)



(b)

Şekil 14. X ışınları için kullanılan optikler [2] (a) Deflektometri ile ölçümü (b) X ışınlarının ulaştırılması için kullanılacak hazır optik yüzey.



(a)



(b)

Şekil 15. Hızlandırıcı merkezleri ve yapılan çalışmalar (a) ABD'de 1 milyar dolar bütçe ile kurulan NSLS II Brookhaven National Laboratory hızlandırıcı merkezi [27] (b) Hızlandırıcı merkezlerinde yapılan çalışmaya örnek; güvercinlerin gagalarında demir atomlarının bulunduğu X ışınları ile tespit edilmiştir [24].

Bu merkezlerde daha iyi çalışmaların yapılabilmesi için açılı ölçüm standartlarının ve cihazlarının iyileştirilmesine ihtiyaç vardır. Özellikle, 3. jenerasyon hızlandırıcı merkezlerinde kullanılacak üst düzey X ışınları optik aksanları için nrad ve nrad altı SI açılı birimine izlenebilir açısal kontrollere ihtiyaç bulunmaktadır [16].

### 3.6.2 Ülkemizde açılı ölçümlerine ihtiyaç ve etkileri (Hızlandırıcı merkezleri)

Dünyadaki çoğu hızlandırıcı merkezlerinde çalışan, veya araştırma için üniversitelerimizden göreve giden Türk bilim insanlarının haricinde, ülkemiz, Ürdün'de kurulan, Ortadoğu Hızlandırıcı Merkezi SESAME (Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East)'in üyesi olup, tüm faaliyetlerinde yer almaktadır. SESAME organizasyonunun yönetiminde ve teknik komitelerinde üniversitelerimizden Türk bilim insanları bulunmaktadır [28].

Türkiye Atom Enerjisi tarafından SANAEM'de (Sarayköy, Ankara) kurulan Proton Hızlandırıcı Tesisine ilave olarak, ülkemizde bir hızlandırıcı merkezinin kurulması çalışmaları devam etmektedir. Çeşitli üniversitelerin katılımı ile oluşturulan bir organizasyonla, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında Ankara Üniversitesi (Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü) Gölbaşı Kampüsünde kurulumu süren Elektron Hızlandırıcısı ve Lazer tesisi bu çalışmalara örnek gösterilebilir [29].

2006 yılında başlayan çalışmalar ile, Ankara Gölbaşı'nda aşama aşama kurulumu yapılan Türk Hızlandırıcı Merkezinde (THM), X ışınları hattı kurulumu önümüzdeki 10 yıl içinde hedeflenmektedir. TÜBİTAK-UME olarak gerçekleştirdiğimiz faaliyetler ile bu ünitenin kurulumu için, açılı ölçümleri izlenebilirlik alanındaki, alt yapı ve teknik destek şu an mevcut olup, koordinatörlüğü yürüttüğümüz SIB58-Angle Metroloji Projesi 3 yıl içinde tamamlandığında çok daha üst seviyede olacaktır.

### 3.6.3 Açılı metrolojisinde gerçekleştirilecek araştırmaların potansiyel etkileri

Potansiyel etkileri aşağıdaki kategorilerde incelemek mümkündür.

#### 3.6.3.1 Çevresel etki (Çevre koruması, sürdürülebilir enerji elde etme yöntemleri)

Serbest elektron lazer (FEL) ve Hızlandırıcı merkezlerinde yapılan bilimsel çalışmaların çıktıları, medikal, malzeme, enerji gibi sektörleri önemli kullanım alanına sahiptir. Örneğin, sürdürülebilir enerji kaynakları için CERN'de geliştirilen güneş panelleri, ısıtma, soğutma, aydınlatma vs. için sürdürülebilir çevreci enerji kullanımını sağlayacak önemli bir uygulama olarak gösterilebilir [24].

#### 3.6.3.2 Sosyal etki (toplum üzerindeki etkisi)

Havacılık, makine, üretim, otomasyon, otomotiv, sektörlerinin tümü açılı metrolojisinden faydalanır. Bu alanlarda iş imkanlarının sağlanması, toplumların rahat yaşamı için önemli rol oynar. Yine ayar mekanizmalarında açılı metrolojisinden faydalanılan, yüksek maliyetler içeren, ileri seviye ışın ile tedavi yöntemleri, toplumun sağlık problemlerinde kullanılmaktadır. Açılı metrolojisindeki, gelişmeler ışın tedavi yöntemlerinin daha ileri seviyeye gitmesinde etkili olacaktır. Hızlandırıcı kaynaklarından elde edilen ışınımlar ile tümörler üzerinde yapılan son derece önemli çalışmalar vardır. 2009 yılında, kimya alanındaki Nobel ödülü, hücrelerin protein fabrikalarında çalışma yapan bilim insanlarına verilmiştir. Tüm bu çalışmalar düşünüldüğünde, açılı metrolojisinin hızlandırıcı merkezlerindeki uygulamalarının nasıl bir geniş kitleyi etkilediği rahatça görülebilmektedir.

#### 3.6.3.3 Finansal etki (Ekonomi üzerindeki katma değeri)

Dünyada 60'ın üzerinde olan hızlandırıcı merkezleri, açılı metrolojisinin sağladığı imkanlardan faydalanmaktadır. Özellikle, optiklerin ayar çalışmaları için CERN her yıl 3 ay kapalı tutulup, bakım ve onarım çalışmaları yapılır. Açılı metrolojisinde geliştirilen yeni yöntemler ile bu süre azaltılıp, çok geniş

bir çevrenin çalışmalarını etkileyen gecikmeleri ve maliyetleri indirmek mümkündür. Amerika'da yeni kurulan ve 2015 te açılacak NSLS-II hızlandırıcı merkezinin maliyeti 1 milyar dolardır.

Açı enkoderleri kullanan üretim ve ölçme endüstrisi ekonomide önemli bir pay alırlar. Örneğin, açı enkoderi takılı lazer tracker ve optik takımlama cihazları kullanılan havacılık sanayinin, dünya ekonomisine katkısı 165 milyon Euro olup, bunun %30 payı Avrupa'daki şirketlerden gelmektedir.

Avrupada bulunan, açı enkoderi takılı robot, takım tezgahları, boyut ölçüm cihazları kullanan otomotiv sektörü 2 milyon kişi çalıştırmakta olup, 140 milyar Euro yıllık bütçe ile ekonomide yer almaktadır. Bu miktarın %25'i kalitenin sağlanması için yapılan ölçüm uygulamalarına ayrılmaktadır. Açı metrolojisindeki gelişmeler, hassas üretim ve ölçüm yapan tüm cihazları etkileyeceğinden, ekonomik olarak katkısı tartışılmaz olacaktır.

#### **4. ÜST DÜZEY TALEPLERİN KARŞILANMASI İÇİN AÇI METROLOJİSİNDEKİ BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR**

Genel olarak metroloji alanında bilimsel araştırmalar ulusal kaynaklar ile desteklenmekte olup, ülke bazındaki işbirlikleri çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen metot veya standartlar bölgesel metroloji organizasyonları içerisinde, örneğin, EURAMET (Avrupa Bölgesi Metroloji Org.) APMP (Asya Pasifik Bölgesi Metroloji Org.) kapsamında veya bölgesel metroloji organizasyonları temsilcileri ve BIPM (Uluslar arası Ölçüler ve Ağırlıklar Merkezi) kapsamında düzenlenen karşılaştırmalar ile incelenmektedir.

Kapsamlı, planlı ve programlı olarak metroloji alanında bilimsel araştırma çalışmaları ilk defa Avrupa Metroloji Araştırma Programı – EMRP ile 2007 yılından itibaren ortaya çıkmıştır. EURAMET tarafından yönetilen bu program, dünya üzerindeki tek uluslar arası metroloji araştırma programı olup, Avrupa Birliği 7. Çerçeve Programı (Fp7) altında Madde 185. kapsamında desteklenmektedir. Amacı, gereksiz tekrarlı araştırma faaliyetlerini azaltarak, kompleks ve disiplinler arası küresel sorunları (sağlık, çevre, enerji vs.) çözüp büyük bir etki yaratmak olan Fp7 EMRP; Avrupa ülkelerinin ortak metroloji araştırma alanlarının temsil edildiği çok ortaklı bir araştırma programı olarak karşımıza çıkmaktadır [30].

##### **4.1. Avrupa Metroloji Araştırma Programı (European Metrology Research Programme – EMRP)**

Fp7 EMRP programında her yıl daha önce belirlenen ana konularda iki aşamalı proje çağrılarında yapılır. Her yıl mart ayı civarı başlayan ilk aşamada, o yıla ait ana konulara göre proje başlıkları için çağrılar yapılır. Hazırlanan proje başlıklarında, metroloji alanındaki ilgili araştırma konusu hakkında bilgi verilir. Teslim edilen bu proje başlıkları, komite tarafından incelenir ve uygun görülenler ikinci aşamada proje çağrısına çıkar. Fp7 kurallarının tamamı bu projelerde geçerli olup, en az 3 farklı ülke organizasyonunun bir araya gelmesi ile konsorsiyum oluşturma şartı vardır. Proje ortaklarını bir araya getiren proje koordinatörü önderliğinde, proje teklifi, neler yapılacağı ve ne zaman neden yapılacağına varana kadar detaylı hazırlanıp, eylül ayı civarı teklif olarak sunulur. Bağımsız hakemler tarafından değerlendirilen bu projeler, proje koordinatörlerinin mülakata alınması ve projelerini savunması sonrası kasım ayı civarında değerlendirilir. Alınan puanlara göre yapılan sıralama sonucunda, eşik değerini geçen ve Avrupa birliğinden ayrılan kaynağın miktarına göre projelerin desteklenmesine karar verilir. Ancak, üst düzey, Avrupa Birliği'nin ihtiyaçlarını karşılayacak, dünya çapında büyük etki yaratacak projelerin desteklenmesine karar verilir.

Projelerin maliyetinin yaklaşık %50 si AB tarafından desteklenir. Diğer %50 si ise, proje ortakları tarafından desteklenir. Destek sadece EMRP kapsamında üye olan Avrupa Ulusal Metroloji Enstitülerine (Örneğin, Amany PTB, Türkiye-TÜBİTAK UME) yapılır. Avrupadaki diğer kurum veya firmalara, EURAMET harici ulusal metroloji organizasyonlarına bir destek verilmez. Bu organizasyonlar dilerse, destek almadan projede yer alabilirler.

Her bir projenin konusunda üst düzey çalışmaları olan, hakemler tarafından değerlendirmeye tabi tutulmuş, mükemmel araştırmacı (Researcher Excellent Grant – REG) çalıştırma hakkı vardır. Bunlar ulusal metroloji enstitüleri haricindeki kurumlar yada kurumlardan olmak zorundadır. Burada amaç, metroloji haricindeki kurum, üniversite ve firmaları da metroloji araştırmalarına çekmektir. Bu kişi ve kurumlara %100 destek AB tarafından verilir.

#### 4.2. 2012 yılındaki EMRP çağrıları ve Açı Metrolojisi projesi

2012 yılında Endüstri, SI Birimleri, Açık mükemmeliyet adı altında çıkan 3 ana tema için, TÜBİTAK UME tarafından oluşturulan katılımcı topluluğu ile birlikte 'Açı metrolojisi' başlıklı proje konusu EMRP komitesi tarafından 1. aşamada uygun bulunmuştur. Daha sonra toplam 16 proje ortağı ile birlikte, TÜBİTAK UME koordinatörlüğünde Eylül 2012 'de proje sunulmuştur.

20-23 Kasım 2012 tarihlerinde proje teklifi değerlendirmelerinin yapıldığı MONACO'da "Açı Metrolojisi" isimli projenin savunması, TÜBİTAK UME'den Proje Koordinatörü Doç. Dr. Tanfer YANDAYAN tarafından yapılmış, ilk defa koordinatör olarak başvuru çok ortaklı Fp7 Projesinin, 100 üzerinden 91 puan almasıyla, Avrupa Komisyonu (EC) tarafından desteklenmesine karar verilmiştir.

Proje, Türkiye-TÜBİTAK UME, Almanya-PTB, Fransa-LNE, Belçika-SMD, İtalya-INRiM, İspanya-CEM, Çek Cumhuriyeti-CMI, Polonya-GUM, Portekiz-IPQ, Finlandiya-MIKES, Japonya-AIST NMIJ, Kore-KRISS, İspanya-TEKNIKER, İspanya-FAGOR, Almanya-MÖLLER-WEDEL OPTICAL, toplam 15 ortaktan oluşmaktadır. Burada Avrupa Ulusal Metroloji Enstitüleri EC'den finansal destek alırken, Japonya, Kore Ulusal Metroloji Enstitüsü, ve diğer 3 adet Avrupa firması herhangi bir destek almadan projede çalışmayı kabul etmiştir (**Şekil 16**).



**Şekil 16.** SIB 58 ANGLES – Açı Metrolojisi projesinin ortakları [16].

Bunlara ilave olarak, ABD'den APS Argonne, ALS Lawrence Berkeley National Laboratory ve NSLS II Brookhaven National Laboratory gibi hızlandırıcı merkezlerinin bu projenin çıktılarını kullanmak üzere işbirliği kurumları olarak başvurusu, projenin etki alanının Avrupa dışında da son derece önemli olduğunu açıkça göstermektedir.

Projede Almanya Hızlandırıcı merkezi HZB BESSY-II'den Frank Siewert (Dünyada hızlandırıcı merkezlerinde ilk defa açı ölçme cihazları ile optik yüzeylerin ölçümleri gerçekleştiren, Nano Optik Ölçme Cihazını geliştiren, bu cihazlar için APS ARGONE gibi diğer hızlandırıcı merkezlerine danışmanlık yapan kişi) Mükemmel Araştırmacı olarak projede görev yapacaktır. Bütçesi yaklaşık 3 milyon Euro olan Açı Metrolojisi Projesi, Eylül 2013-2016 yılları arasında yürürlükte olacaktır.

#### 4.3. Açı metrolojisi alanındaki üst düzey çalışmalar ve Açı Metrolojisi ortakları

Açı metrolojisi alanında Almanya önemli bir konumdadır. Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü, enkoder üretici firması, Heidenhain tarafından geliştirilen özel açı komparatörünü kullanarak SI açı birimi radyanı üretmektedir. Bu cihazı kullanarak ELCOMAT 3000 otokolimatörün geliştirilmesinde önemli çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, Möller Wedel firması ELCOMAT 3000 ü geliştirmiştir. Şu an hızlandırıcı merkezlerinde, optiklerin nanometre seviyesinde belirsizlikle optik aksanların düzlemsellik ölçümü ELCOMAT 3000 ile yapılmaktadır. Bu konuda rakipsiz olan Möller-Wedel firması, Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü ile birlikte SIB58 ANGLES Açı Metrolojisi projesinde ortak olarak çalışmaktadır.

Yapılan bu çalışmaların en önemli kullanıcısı ise, HZB BESSY-II Hızlandırıcı Metroloji Laboratuvarıdır. PTB ile yaptıkları ortak çalışmalar neticesinde, alanında en üst düzey seviyede olan bu laboratuvar, BESSY-II haricindeki, DESY, The European XFEL (Avrupa X ışınları serbest elektron lazeri) gibi

hızlandırıcı merkezlerinin de optik aksanlarını ölçmektedir. HZB BESSY-II Hızlandırıcı Metroloji Laboratuvarı, TÜBİTAK UME'nin koordinatörlüğünü yürüttüğü SIB-58 ANGLES (Açı Metrolojisi) projesinin mükemmel araştırmacı organizasyonudur.

Japonya Ulusal metroloji Enstitüsü (AIST NMIJ), Japonya'nın mevcut elektronik ve otomasyon endüstrisi sebebiyle daha ziyade, açı enkoderleri konusunda üst düzey çalışmalar yapmıştır. Kendi kendine kalibrasyon yapabilen açı enkoderleri konusunda çalışmaları vardır. NMIJ bu tecrübelerini kullanarak, SIB-58 ANGLES projesinde ortak olarak görev almaktadır.

Kore Ulusal Metroloji Enstitüsü, KRISS, açı metrolojisi çalışmalarında, yeni geliştirdikleri, özel açı enkoderli döner tabla ile katılım sağlamaktadır. Belçika ulusal metroloji enstitüsü SMD ile interferometre + enkoder (Hibrit) sistem üzerinde çalışmalar yapacaktır.

TÜBİTAK UME, kendi geliştirdiği, nanoradyan açı üretici (HPSAG) ve Fabry-Perot interferometrik teknikleri ile nanoradyan altı açı ölçümleri çalışmalarında bulunacaktır. Ayrıca hızlandırıcı merkezleri için portatif geniş aralıklı küçük açı üretici geliştirecektir. Bu konuda yer alacak, İtalya, Çek Cumhuriyeti, İspanya ulusal metroloji enstitüleri, TEKNİKER araştırma enstitüsü ve HZB BESSY-II Hızlandırıcı Metroloji Laboratuvarı ile ortak çalışmaları olacaktır.

Açı enkoderleri konusunda, form hatalarının açısal ölçümlere etkisi TÜBİTAK UME tarafından incelenecek, bu konuda Japonya, Kore, Almanya, İspanya, Polonya, Fransa ulusal metroloji enstitüleri ve İspanya FAGOR otomasyon firması ile ortak çalışmalarda bulunacaktır. Özellikle açı enkoderleri kalibrasyonu konusunda, EURAMET rehber dokümanı, Almanya kalibrasyon dokümanı yayımcısı VDI için öneriler hazırlanması konularında görev alacaktır.

TÜBİTAK UME Otoklimatörlerin farklı mesafelerde, farklı çaplardaki apertür ile testleri için ilk etapta Möller-Wedel firması ve PTB ile, daha sonra tüm ulusal metroloji enstitüleri ile ortak çalışmalarda bulunacaktır.

TÜBİTAK UME, bu projenin genel koordinatörü olmasının yanında, küçük açı üreticilerinin inceleneceği, iş paketi 4 ve Yönetim iş paketi 6'nın liderliğini yapacaktır. Bunun yanında, patent başvuruları, bilgi transferi konusunda yönlendirme ve liderlik görevlerini üstlenecektir.

TÜBİTAK UME, tüm uluslar arası organizasyonlar ile işbirliklerine girmek ve kontak kurmak için 5 nolu iş paketi lideri İspanya Ulusal Metroloji Enstitüsü ve PTB ile ortak çalışmalarda bulunacaktır. Özellikle APS ARGONE (ABD), BNL NSLS II (ABD), ALBA-CELLS (İspanya) ALS Lawrence Berkeley National Laboratory (ABD) hızlandırıcı merkezleri ile işbirliği çalışmalarında bulunacaktır.

## SONUÇ

Açı metrolojisindeki cihaz ve standartlarının kısaca tanımları yapıldıktan sonra, mevcut kabiliyetleri ve kısıtlamaları, uygulama alanlarından örnekler verilerek açıklanmıştır.

İleri seviye ülkelerin küresel rekabette bulunmalarına destek olan üst düzey bilimsel çalışmalar ve endüstriyel uygulamalarda, açı metrolojisinden beklenen üst düzey talepler ve bunların önemi detaylı olarak anlatılmıştır. SI açı birimi radyana izlenebilir, 50 nrad altında bir belirsizlikle  $\pm 1$  derece (0.017 radyan) aralıkta çalışan açı üreticilerine, 2mm altındaki küçük apertürler ile, farklı mesafelerde doğru çalışabilecek otoklimatörlere, kendi kendinin kalibrasyonu yapabilen açı enkoderlerine, nrad altı hassasiyette açı üretimi ve kontrolüne, özellikle serbest elektron lazerleri (FEL) ve hızlandırıcı merkezlerinde gerçekleştirilen üst düzey bilimsel çalışmalarda, robotik, nanoteknoloji gibi endüstriyel uygulamalarda ve savunma sanayinde ihtiyaç olduğu, detaylı açıklamalar ile vurgulanmıştır.

Tüm bu uygulamaları kapsayan, TÜBİTAK UME tarafından koordine edilecek, Avrupa 7. Çerçeve Programı kapsamında desteklenen (EMRP), 12 farklı ülkeden 16 proje ortağının oluşturduğu 'JRP



SIB58 ANGLES - Açı Metrolojisi' projesi, oluşturacağı üst düzey finansal, çevresel, ve sosyal etkiler okuyucuya aktarılmıştır.

2007-2013 yıllarında yürürlükte olan, tüm Avrupa'nın katılımına açık olan ve ülkemizin 487 proje ile yer aldığı çok ortaklı Fp7 Projelerinin 20 tanesinin koordinatörlüğü ülkemizdeki kurumlara aittir. SIB 58 projesi koordinatörlüğünün TÜBİTAK UME tarafından üstlenilmesi ülkemizin Fp7 Projeleri'nde payının artırılmasına da katkıda bulunmuştur. Tüm bu faaliyetler ile TÜBİTAK UME 'Açı Metrolojisi' alanında dünyadaki sıralamada ilk beşe giren ulusal metroloji enstitüleri arasında yer alıp, en ileri seviye çalışmaların yapıldığı bir projenin yöneticisi konumundadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Geckeler R D, Optimal use of pentaprisms in highly accurate deflectometric scanning Meas. Sci. Technol.. 18, 115-125
- [2] Siewert F, Lammert H, Zeschke T 2008 The nanometer optical component measuring machine In: Modern developments in X-ray and neutron optics, eds. Erko A, Idir M, Krist T, Michette A G (Berlin: Springer) 137 193-200
- [3] Geckeler R D, Just A, Krause M and Yashchuk V V 2010 Autocollimators for deflectometry: Current status and future progress Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 616 (2-3) 140-6
- [4] Geckeler R D, Weingartner I, Just A and Probst R 2001 Use and traceable calibration of autocollimators for ultra-precise measurement of slope and topography Proc. SPIE 4401 184-95
- [5] Geckeler R D 2006 Proc. SPIE 6293 62930O-12
- [6] SI Brochure (8th Edit.), <http://www.bipm.org/en/si/>
- [7] Yandayan T, Karaböce N, Özgür B and Yaman O 2010 Small angle generators for angle measurement International Metrology Conference CAFMET (Cairo, Egypt)
- [8] Astrua M and Pisani M 2009 The new INRiM nanoangle generator Metrologia 46 674-81
- [9] Yandayan T, Ozgur B, Karaboce N and Yaman O 2012 High precision small angle generator for realization of SI unit of plane angle and calibration of high precision autocollimators Meas. Sci. Technol.. 23, 094006-18
- [10] Sim P J 1984 Angle standards and their calibration Modern Techniques in Metrology ed P L Hewitt (Singapore: World Scientific) pp 102-21
- [11] Probst R, Wittekopf R, Krause M, Dangschat H and Ernst A 1998 The new PTB angle comparator Meas. Sci. Technol. 9 1059-66
- [12] Yandayan T., Akgöz S. A. and Haitjema H., "A novel technique for calibration of polygon angles with non-integer subdivision of indexing table," Precision Engineering: J. Int. Soc. Precision Engineering and Nanotechnology, 26, 412-424 (2002).
- [13] Yandayan T., Akgöz S. A. and Haitjema H., "A new calibration method for polygons with pitch angle which does not match with the subdivision of the used indexing table," Proc 3rd Int. Conference, euspen, , Eindhoven, The Netherlands, 481-484, May 26-30, 2002.
- [14] Yandayan T., "Application of the novel technique for calibration of 23-sided polygon with non-integer subdivision of indexing table," IMEKO 8th International Symposium on ISMQC, Erlangen, Germany, October 12-15, 2004.
- [15] Yandayan T., Akgöz S.A. ve Karaböce N., "Hassas Poligonlarda Açık Kalibrasyonu ve Euromet 371 Nolu Proje Karşılaştırma Sonuçları,," III. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 94-101, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 7-8 Ekim 1999.
- [16] Publishable JRP Summary Report for JRP SIB58 Angles, Angle Metrology, [http://www.euramet.org/fileadmin/docs/EMRP/JRP/JRP\\_Summaries\\_2012/SI\\_Broader\\_Scope\\_JRPs/SIB58\\_Publishable\\_JRP\\_Summary.pdf](http://www.euramet.org/fileadmin/docs/EMRP/JRP/JRP_Summaries_2012/SI_Broader_Scope_JRPs/SIB58_Publishable_JRP_Summary.pdf)
- [17] TÜBİTAK UME Web sitesi, [http://www.ume.tubitak.gov.tr/menu\\_diger.php?f=9352](http://www.ume.tubitak.gov.tr/menu_diger.php?f=9352)
- [18] Yandayan T., "İmalat Metrolojisinde Laser kullanarak Yapılan Ölçme Teknikleri," II. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, 216-232, Eskişehir, Makine Müh. Odası, 23-24 Ekim 1997.
- [19] Moeller Wedel optical, <http://www.moeller-wedel-optical.com/en/produkte/electronic-autocollimators.html>
- [20] CMC (Calibration Measurement Capabilities) database of the BIPM, <http://kcdb.bipm.org/appendixC/>

- [21] TÜRKAK Web sitesi, <http://www.turkak.org.tr/online/search/akredite.asp>
- [22] Geckeler R D and Just A 2009 Angle comparison using an autocollimator EURAMET.L-K3.2009 Technical Protocol, EURAMET Project No 1074  
[http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/EURAMET.L-K3.2009/EURAMET.L-K3.2009\\_Technical\\_Protocol.pdf](http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbresults/EURAMET.L-K3.2009/EURAMET.L-K3.2009_Technical_Protocol.pdf)
- [23] Watanabe T., "Is angular Standard necessary for rotary encoders ?", Synthesiology-English edition, 1, No: 4 2009.
- [24] CERN (Avrupa Nükleer Araştırma Organizasyonu) web sitesi; <http://home.web.cern.ch/>
- [25] ESRF (Avrupa Hızlandırıcı Radyasyon Merkezi) web sitesi; <http://www.esrf.eu/>
- [26] Advance Photon Source, USA (APS Argonne), Web sitesi: <http://www.aps.anl.gov/>
- [27] Brookhaven National Laboratory, USA, (BNL - NSLS II) Web sitesi:  
<http://www.bnl.gov/nsls2/project/>
- [28] Ortadoğu Hızlandırıcı Merkezi SESAME (Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East) Web sayfası: <http://www.sesame.org.jo/sesame/>
- [29] Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, <http://hte.ankara.edu.tr/>
- [30] Avrupa Metroloji Araştırma Programı – EMRP : <http://www.euramet.org/index.php?id=emrp>
- [31] <http://www.starrett-webber.com/>
- [32] [http://www.wylerag.com/pages\\_eng/e\\_prosp\\_ww.html](http://www.wylerag.com/pages_eng/e_prosp_ww.html)
- [33] <http://www.brunson.us/>
- [34] <http://www.taylor-hobson.com/>
- [35] <http://www.3cpth.com/surveying-location.html>
- [36] <http://www.tesabs.ch/>
- [37] <http://www.heidenhain.com/>
- [38] <http://www.rotary-table-1.com/nc-tilting-rotary-table/01.htm>
- [39] <http://www.howstuffworks.com/hubble1.htm>
- [40] <http://www.majestic-coatings.com/astronomy-telescope-coating.html>

## ÖZGEÇMİŞ

### Doç. Dr. 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, 1997 yılında mecburi hizmetini yapmak üzere TÜBİTAK ÜME'de çalışmaya başlamıştır. 15 yıl boyunca, TÜBİTAK ÜME Boyutsal Laboratuvarı sorumluluğu yürütmüştür. Uzunluk, boyutsal ve açı ölçümleri için uluslar arası alanda ülkemizi temsil etmiş, boyutsal laboratuvarının yurt dışında ilk karşılaştırma ölçümlerine katılmasında ve kalibrasyon kabiliyetlerinin uluslar arası alanda kabul görmesinde ve listelenmesinde, TÜRKAK tarafından laboratuvarın akreditasyonunda, ve ara denetimlerinde boyutsal laboratuvarının 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 akreditasyonlarına katılmıştır. Avrupa Bölgesel Metroloji Organizasyonu EURAMET adına, ülkelerin ulusal metroloji enstitülerinin denetimlerine katılan Tanfer YANDAYAN, 2006 yılında, Makine Mühendisliği alanında üniversite doçenti olmuş, 2012 Mayıs itibari ile laboratuvar yöneticiliği görevinden ayrılarak, Avrupa Metroloji Araştırma Programı çalışmalarına daha fazla yönelmiştir. 2012 yılında, 12 farklı ülkeden oluşan 16 proje ortağını bir araya getirip hazırladığı Açı Metrolojisi projesi ile TÜBİTAK ÜME'ye proje koordinatörlüğü kazandırmıştır. Açı projesinin koordinatörlüğü haricinde, Güney Asya Ülkelerinin metroloji faaliyetlerini Avrupa Komisyonu için inceleyen birinci Fp7 projesini tamamlamış, 2012-2016 yılları için uyumlaştırma projesine başlamıştır. Boyutsal ölçümlerin tüm konularını kapsayan, bilimsel araştırmalarda daha ziyade açı, master blokları, skala ölçümleri, interferometrik ölçümler, çap ve form ölçümleri konularında çalışmaktadır.