

DÜNYADA İLERİ SEVİYE AÇI METROLOJİSİ VE NANORADYAN AÇI ÖLÇÜM TALEPLERİ İÇİN MEVCUT SINIRLARIN ZORLANMASI

Tanfer YANDAYAN

ÖZET

İleri seviye açı metrolojisi, otomotiv, savunma, uzay, havacılık, endüstriyel robot ve otomasyon sektörlerindeki uygulamalarının yanında, bilimsel çalışmalarda kullanılan hassas optik yüzeylerin ölçümü ve imalatı sırasında geniş bir kullanım alanına sahip metroloji alanıdır. Açı enkoderleri, açı interferometreleri, küçük açı üreteçleri ve otokolimatör gibi hassas açı ölçüm cihazları, hassas imalat ve hassas açı metrolojisi uygulamalarının olduğu birçok bilimsel çalışmalarda kullanılmaktadır. Nanoradyan altı hassasiyetlerde izlenebilir açı ölçümlerinde bu cihazların kullanımı son derece zor olup, şimdiye kadar ihtiyaçlara cevap verebilecek düzeyde araştırılmamıştır. Tüm bunlara ilave olarak, serbest elektron lazer ve sinkrotron ışınımı kullanan hızlandırıcı merkezlerinde, yüksek enerji seviyesindeki X ışınlarının görüntüleme amaçlı yönlendirilmesinde kullanılan hassas optik yüzeylerin ölçüm uygulamaları için en iyi sonuçları veren, ileri seviye açı ölçüm metrolojisine ihtiyaç vardır. Avrupa Ulusal Metroloji Enstitüleri tüm bu ulaşılması zor talepleri dikkate alarak, 16 farklı ülkenin yer aldığı Açı Metrolojisi (SIB58 Angles, Angle Metrology) Avrupa Birliği (AB) projesini başlatmıştır. TÜBİTAK UME tarafından yürütücülüğü yapılan bu proje ile, Eylül 2013-2016 tarihleri arasında SI açısı birimi 'radyan' nın en zor uygulamalarda dahi izlenebilir bir şekilde dağıtımını sağlamaya yönelik üst düzey bilimsel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, hassas açı ölçümleri için izlenebilirlik önemli derecede iyileştirilmiştir ve ileri seviye bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan 0.01 arc saniye (50 nrad) altı genişletilmiş belirsizliklerde açı ölçümlerine ulaşılmıştır. Proje ile, şimdiye kadar talep edilen fakat ulaşılamayan açısal ölçüm hassasiyetindeki çalışmaları yapabilecek bir altyapı oluşturulmuş, yeni açı ölçüm metotları ve cihazları geliştirilerek açı metrolojisinde kilometre taşı olarak kabul edilen uygulamalara ulaşılmıştır. Proje sırasında geliştirilen cihazların bir kısmı ticari olarak piyasaya sürülmüş ve kritik çalışmalarda kullanıma alınmıştır. Makalede, proje çıktılarının özeti verilerek ileri seviye hassas açı metrolojisi konularındaki son çalışmalar hakkında bilgilendirme yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Açı metrolojisi, otokolimatörler, enkoderler, açı interferometreleri, açı üreteçleri, nanoradyan, X ışını optikleri, profil ölçümleri.

ABSTRACT

Advanced angle metrology is used in industrial applications such as the manufacture of cars and aeroplanes, industrial robots, space missions, and complex scientific applications including the precise measurement of optical surfaces. Precise angle measuring devices – such as angle encoders, angle interferometers, small angle generators and autocollimators – are extensively used in various applications where high precision is demanded. Meeting the demands to use these devices for accurate traceable angle measurement generation at sub-nrad sensitivity is very challenging and has previously not been addressed. In addition, there is a need for advanced angle metrology for highly curved optical surfaces. These are used in synchrotrons (SR) and Free Electron Laser (FEL) metrology laboratories worldwide. European National Metrology Institutes (NMIs) have taken into account these challenging demands and conducted an angle metrology project called SIB58 Angles with participation of 16 worldwide partners. The project, coordinated by TUBITAK UME, run between Sept. 2013-2016 to improve the dissemination of the SI angle unit 'radian' for the most challenging

applications. It has improved traceability for precise angle measurements and achieved the low less than 50 nrad uncertainty demanded for advanced scientific and industrial applications. The project developed novel methods, instruments, and guides, and has provided the foundations for greater accuracy in angle metrology to meet end user requirements for greater precision (never done before) and finally achieved milestones in angle metrology. Some of the new devices are already commercially available and have been started to be used for critical needs. This paper gives highlights of the project's outputs and inform the community about recent developments in high precision advanced angle metrology.

Key Words: Angle metrology, autocollimators, encoders, angle interferometers, angle generators, nanoradian, X-ray optics, profilometry.

1. GİRİŞ

Otomotiv, savunma, uzay, havacılık, endüstriyel robot ve otomasyon sektörlerindeki uygulamalarının yanında, bilimsel çalışmalarda geniş bir kullanım alanına sahip olan ileri seviye açı metrolojisinde aşağıda belirtilen hassas temel açı ölçüm cihazlarından faydalanılmaktadır [1].

- Otokolimatörler
- Hassas açı enkoderleri
- Küçük açı üreteçleri

Otokolimatörler, yansıyan yüzeylerin açısal değişimlerini temassız olarak ölçen optik ekipmanlardır [1]. Bu özellikleri kullanılarak, bilimsel çalışmalarda atomik boyutta görüntülemeye kullanılan optik yüzeylerin istenilen form verilerine sahip olup olmadıklarının kontrollünde kullanılmaktadır.

Hassas açı enkoderleri dönme hareketi yapan mil, tabla vb. elemanların dönme açılarının hassas bir şekilde tespiti ve kontrolü için kullanılmaktadır. Dönme işlemi yapan mil vb. ekipmanların açısal pozisyon hareketini elektriksel sinyale çevirerek hassas açı ölçüm ve kontrolü için veri sağlayan bu açı ölçüm ekipmanları geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir.

Küçük açı üreteçleri, SI açı birimi radyanın, tanımına göre hassas bir şekilde elde edilip açı ölçüm cihazları için izlenebilirliğin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin otokolimatörlerin kalibrasyonları, küçük açı üreteçleri kullanılarak yapılmaktadır. Hassas açı ölçüm ekipmanları ve kullanımı ile ilgili detaylı bilgi kaynak [1] de verilmektedir.

Bu cihazları kullanarak, nanoradyan (nrad) seviyede üst düzey açı ölçüm taleplerinin karşılanabilmesi son derece zor olup şimdiye kadar olumlu sonuçlar alınamamıştır. Ayrıca, eğri optik yüzeylerin ölçümü için ileri seviye açı metrolojisine ihtiyaç vardır. Bu uygulamalar serbest elektron lazer ve sinkrotron ışınımı kullanan hızlandırıcı merkezlerinde, özellikle X ışınlarının yönlendirilmesi, odaklanması amacı ile kullanılan hassas optik aksanların düzlemsellik ölçümü (ölçüm bilgilerini kullanarak ile 2 nm ve altı düzlemsellikte imalatı) için gereklidir. Otokolimatörlerin küçük apertürler (2-3 mm çapında) ile hassas bir şekilde optik yüzeylerin düzlemsellik haritalarının çıkarılmasında daha üst düzey performansta kullanımı için araştırma çalışmalarına ihtiyaç vardır. Nanoradyan açı ölçümü uygulama alanları için bazı örnekler aşağıda verilmiş olup, **Şekil 1**'de önemli bilimsel araştırma ve uzay çalışma alanlarındaki uygulamaları için örnekler gösterilmiştir.

- Nesnelerin hareket sırasında hassas eğilme miktarı (pitch ve yaw) ölçümleri (nano teknoloji)
- Teleskop aynaların dönme sırasındaki açısal kontrolü (1 nrad) - Yıldız izleme (star tracking)
- Uzay çalışmalarında uydularda kullanılan ivme ölçerlerin kalibrasyonları
- Jeodezi ve jeofizik uygulamalarında bölgesel eğilmelerin ölçümü (deprem tahminleri)
- Nanonewton kuvvet ölçümleri (1 nrad → 40 pN) - istenilen açısal eğilme çözünürlüğü 0.1 nrad.
- Gama ışınları spektrometrelerinde silikon kristalleri arasındaki açının ayarlanması
- G evrensel çekim sabiti değerinin çok daha hassas bir şekilde tespit edilmesi
- Ultra hassas X ışınları optik ve aynalarının incelenmesi ve profil ölçümleri

Avrupa ulusal metroloji enstitüleri yukarıda anlatılan bu ihtiyaçları dikkate alarak 'SIB58 Angles, Angle Metrology' adı altında açı metrolojisi projesi başlatmıştır [2, 3, 4]. Proje 2013-2016 yıllarında TÜBİTAK UME koordinatörlüğünde yürütülerek çalışmalarını tamamlamıştır. Proje konsorsiyumu dünyada açı metrolojisi alanında ileri seviye çalışmaları olan 16 uluslararası kuruluştan oluşmaktadır: TÜBİTAK UME (Türkiye), PTB (Almanya), INRIM (İtalya), LNE (Fransa), MWO (Almanya), HZB Bessy II (Almanya), CEM (İspanya), CMI (Çekya), IPQ (Portekiz), GUM (Polonya), SMD (Belçika), VTT (Finlandiya), FAGOR (İspanya), IK4-Tekniker (İspanya), KRISS (Kore) ve AIST NMIJ (Japonya).

Açı metrolojisi (SIB58 Angles) projesinde, SI aç birimi 'radyan'ın, sınırları zorlayan açı ölçümlerinde kullanılabilmesi, birimin dağıtım kabiliyetinin iyileştirilmesi ve izlenebilir hassas açı ölçümleri için deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. İleri seviye bilimsel çalışmalar ve katma değeri yüksek endüstriyel uygulamalarda talep edilen hassas ölçümler için 50 nrad (0.01") altında belirsizliklerde izlenebilirlik sağlanmıştır. Yeni açı ölçüm metotları ve cihazları, referans rehber dokümanlar (EURAMET kalibrasyon rehber dokümanları) proje sırasında üretilmiş ve ileri seviye açı metrolojisi uygulamaları için önemli temeller oluşturulmuştur. Dünyada ilk defa 2 boyutta otokolimatör kalibrasyonları gerçekleştirilmiş, hata ayırma teknikleri kullanılarak tek ekseninde 5 nrad (0.001") belirsizlikte otokolimatör kalibrasyonları yapılmıştır.

Bu makalede 'SIB58 Angles' açı metrolojisi projesinde yapılan bilimsel çalışmaların bir özeti anlatılmaktadır. Çalışmalar, otokolimatörlerin hassas optik yüzeylerin ölçümü ve üst düzey bilimsel çalışmalarda kullanımı için metrolojik karakterizasyonu, yeni nesil otokolimatörler için iyileştirme çalışmalarını, açı enkoderi hata araştırmaları ve yeni nesil açı enkoder (çok okuma kafalı) uygulamaları, nrad ve nrad altı seviyede açı üretimi ve ölçümü için geliştirilen hassas açı üreteçlerini ve ölçüm metodlarını kapsamaktadır.

2. OTOKOLİMATÖRLERİN METROLOJİK KAREKTERİZASYONU VE OPTİK YÜZEYLERİN ÖLÇÜMÜNDEKİ UYGULAMALARI

Nanoradyan (nrad) belirsizlik seviyesinde açı ölçümlerinin uygulama alanları gittikçe artmaktadır. 1 metre yarıçapı olan çemberde, 1 nm lik yay uzunluğunun oluşturduğu açı olarak tanımlanan 1 nrad, kısa kenarı 1 nm olan, uzun kenarı 1 metre olan bir dik üçgende açıya denk gelmektedir. Daha büyük skalada, uzunluğu 1000 km olan bir çubuğu, yani İstanbul'dan Erzurum'a kadar uzanan bir çubuğu 1 mm kaldırarak elde edebileceğimiz açı değeri olarak düşünebileceğimiz 1 nrad aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$1 \text{ nrad} = (1 \text{ nm} / 1 \text{ m}) = (1 \text{ mm} / 1\,000\,000\,000 \text{ mm}) = 10^{-9} \text{ radyan}$$



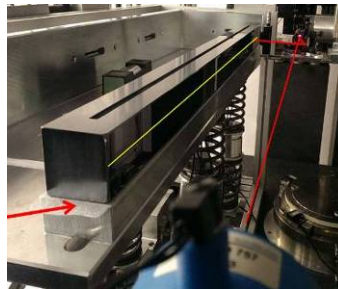
Şekil 1. Nanoradyan (nrad) açı metrolojisi uygulama alanları için örnekler

Nanoradyan (nrad) açı skalasında temassız açı ölçüm ihtiyaçlarına talep artmaktadır. Temassız olarak yapılacak bu açı ölçümleri için, 0.001" (arc saniye veya 5 nrad) çözünürlüğe sahip otokolimatörlerden faydalanılmaktadır. Örneğin, Newton'un evrensel kütle çekim yasasındaki, G evrensel çekim sabiti değerinin çok daha hassas bir şekilde tespit edilmesi için BIPM tarafından kullanılan torsiyon balans yönteminde (torsion balance) otokolimatör kullanılır ve bir aynanın nrad belirsizlikle açısal rotasyon hareketlerinin tespit edilmesi talep edilmektedir (**Şekil 1**) [5].

Otokolimatörler, X ışınlarının yönlendirilmesinde faydalanılan ultra hassas optik aynaların imalatı ve kurulumu sırasında, yüzey profillerinin çıkarılması ve arzu edilen profile göre ayarlanması için kullanılır [6]. Özellikle Avrupa'daki CERN, ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), Amerika'daki ARGONE APS (Advanced Photon Source), BNL (Brookhaven National Laboratory), ALS (Advanced Light Source) Berkeley Lab, gibi hızlandırıcı merkezlerinde ve Almanya'da yeni kurulan European XFEL serbest elektron lazer merkezinde bu tip optikler kullanılır ve maliyeti çok yüksektir. Örneğin European XFEL'de 25 adet kullanılan bu özel optik aynaların her birinin maliyeti 500 000 Euro civarındadır (**Şekil 2**).



X ışınlarının yönlendirilmesinde kullanılan ultra hassas optik ayna (500 000 Euro)



Otokolimatör ile X ışınları aynasının profil ölçümü



Otokolimatörle profili ölçülebilen dev aynalar

Şekil 2. Açı ölçüm cihazı otokolimatör kullanarak ölçülen hassas optik aynalar

Benzer üst düzey ihtiyaçların istenilen açı ölçüm belirsizlik (0.01" veya 50 nrad dan daha düşük) değerlerinde karşılanabilmesi için, otokolimatörlerin optik yüzey profil ölçümlerindeki kullanımı dikkate alınıp, geniş çaplı uygulamalı araştırmalarla, otokolimatörlerin metrolojik karakterizasyonun yapılması gerekmektedir. Ancak bu sayade, otokolimatör kullanılarak yapılan optik yüzey ölçümlerinde ve talep edilen diğer nrad açı ölçümlerinde otokolimatörler ile ulaşılabilecek metrolojik sınırlar belirlenebilir. **Şekil 3'** te otokolimatörün hassas optik yüzeylerin profilinin çıkarılması sırasındaki ölçüm şartları gösterilmektedir.

2.1. Otokolimatörlerin metrolojik karakterizasyonu

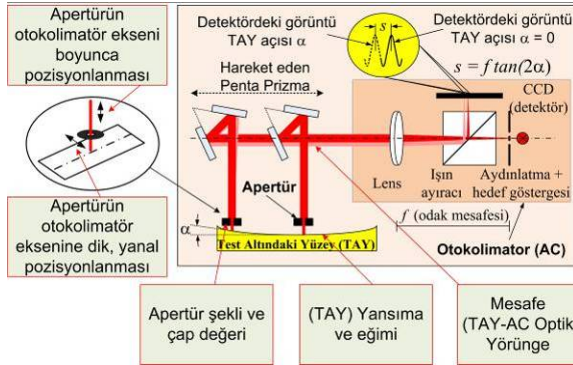
SIB58 Angles projesi başladığında ilk olarak, otokolimatörlerin uygulamalarını, performansları ve kalibrasyon durumlarını içeren bir araştırma yapılarak dünyada son geline nokta araştırıldı ve bir rapor hazırlandı. Rapora proje web sayfasından ulaşılabilir [2]. **Şekil 3'** te gösterilen otokolimatörün ölçüm şartlarından biri olan, otokolimatör ile hedef yüzey arasındaki mesafe değişiminin, otokolimatörün açı ölçüm kabiliyeti üzerindeki etkilerini incelemek için, proje ortakları tarafından 27 deneysel kalibrasyon veri seti almıştır. Ayrıca otokolimatörün optik yörüngesinin ZEMAX yazılımı ile simülasyonları (ray tracing) yapılmış, otokolimatörün açı ölçümünün, hedef mesafesi değişince nasıl ve ne kadar etkileneceği için elde edilen teorik sonuçlar ile deneysel sonuçların mükemmel bir uyumda olduğu bulunmuştur [2]. Bu amaçla proje ortağımız otokolimatör üreticisi MWO (MÖLLER-WEDEL OPTICAL) [10] ile ortak çalışmalar firma için gizlilik haklarını koruyarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları otokolimatör kullanıcıları için son derece önemli olup, özellikle CERN, ESRF gibi hızlandırıcı merkezlerinde X ışınlarını yönlendiren optikler üzerine çalışan kullanıcıların, optikleri incelemesi, ayarlaması sırasında otokolimatörlerdeki kullanım mesafesindeki değişimlerden kaynaklanan hataları azaltmasına (teorik bulunan denklemler kullanarak düzeltme yapılarak) yardımcı olacaktır. **Şekil 4'** te TÜBİTAK UME tarafından iki farklı optik hedef mesafesinde (300 mm ve 600 mm) alınan otokolimatör kalibrasyon sonuçları gösterilmektedir. Mesafe değişiminin otokolimatörün açısal hatalarındaki etkisinin 0.1 arc saniye (") den daha az olduğu görülmektedir. Bazı farklı üretici firma

otokolimatörlerinin, hedef mesafe değişimlerinin çok daha az olduğu durumlarda dahi (örn. 10-100 mm) birkaç arc saniye mertebesinde açısal hata ürettikleri görülmüştür. Bu tip hataların kullanıcı tarafından ayırt edilmesi çok zor olup, çoğu otokolimatör üretici firmasının ürettikleri otokolimatörlerin, mesafe değişiminde, ne kadar hata yaptıkları hakkında bilgisi yoktur.

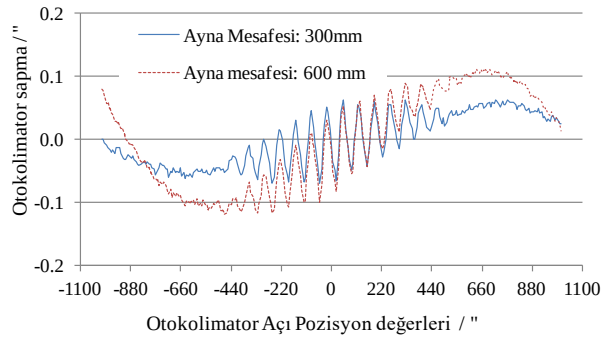
Bazı optik yüzeyler düz olmayıp, hafif iç bükümlü veya dış bükümlü olabilmektedir. Bu durumda, otokolimatörün her iki ekseninde (X ve Y) açısal değişim meydana gelir ve bazen bu değerler birbirini etkiler. Bu tip optik yüzeylerin profilleri çıkartılırken kullanılan otokolimatörlerin 2 ekseninde (katı açı) kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Proje çalışmalarında, 2 ekseninde otokolimatör kalibrasyonu yapabilen cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlardan biri Almanya Ulusal Metroloji Enst. PTB'deki katı açı otokolimatör kalibratörü (SAAC) [7] ve Finlandiya ulusal metroloji Ents. deki 2 ekseninde açı interferometresi prensibini kullanan kalibrasyon düzeneğidir [8]. Bu cihazlar, izlenebilir hassas katı açı elde eden ve dağıtan dünyadaki ilk cihazlar olup, açı metrolojisi alanında yeni bir ufuk açarak devrim yaratmıştır. Proje kapsamında, ilk defa dünyada 2 ekseninde otokolimatör kalibrasyonları gerçekleştirilmiş, karşılaştırması düzenlenmiş ve açı metrolojisi alanında kilometre taşı olarak yer almıştır.

Otokolimatörler imalatçı firmalar tarafından tam apertür yani ön kısımları açık (apertürsüz) kullanıma göre tasarlanıp kalibre edilirler. İhtiyaçlara göre yaklaşık 30-50 mm çapında değişen açık apertür kullanımı (apertürsüz), optik yüzeylerin ölçümünde, yüzeyden daha fazla veri toplamak için 3 mm çaplı apertürlere düşürülür. Veya bazen, çok küçük yüzeylerden veri toplanmak istenebilir. Bu uygulamalar otokolimatörlerin açısal ölçüm performansında değişikliğe neden olur ve kalibrasyon değerleri değişir. Küçük çaplı apertürler kullanılarak tekrar kalibrasyonlarının yapılması gerekir. 3 mm altındaki apertürlerde ise açı ölçme kabiliyetlerinde sorunlar ortaya çıkar.

Optik yüzeylerden daha çok veri toplayıp, daha hassas yüzey haritası çıkarmak için, 3 mm altındaki apertürler ile ölçümler almak gerekmektedir. Bu amaçla otokolimatörlerin iç yapılarının, özellikle algılama yapan detektörün iyileştirilmesi gerekir. Proje kapsamında, küçük apertürler ile çalışabilecek yeni tip bir detektör geliştirilmiş ve testleri yapılmıştır. Patenti alınan bu detektörün, yeni nesil otokolimatörlerde uygulanması ile 2.5 mm çap altındaki apertürler ile geleceğin X ışınları ve ultra mor ötesi ışınlar için kullanılan optik yüzeylerinin daha hassas kontrolü ve imalatı yapılabilecektir.



Şekil 3. Otokolimatörün optik yüzey profil ölçümünde kullanımı sırasındaki ölçüm şartları



Şekil 4. Otokolimatör (Elcomat 3000) sapma değerlerinin ayna mesafesine göre değişimi (UME)

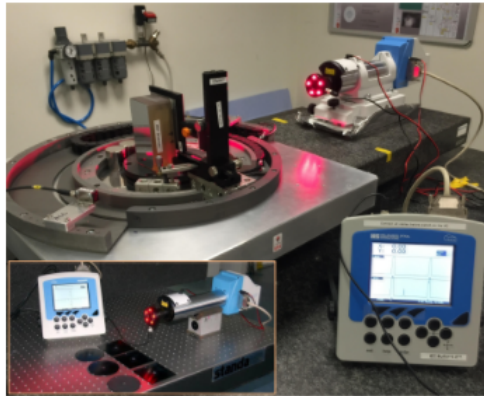
2.2. Otokolimatörlerin optik yüzey ölçümündeki uygulamaları

SIB58 Angles projesi kapsamında, otokolimatör esaslı optik yüzey ölçen profilometreler için detaylı bir araştırma yapıp, mevcut durum tespit edilmiştir [2]. Daha sonra, optik yüzeylerin yansıma miktarlarının ve yüzey eğimlerinin, otokolimatörlerin performansını nasıl etkilediğinin deneysel araştırmaları yapılmıştır. Bu araştırmalar, şu an serbest elektron lazer (FEL) ve sinkrotron ışınımı (SR) optikleri için kullanılan otokolimatör esaslı profilometrelerin (deflektometrelerin) kabiliyetlerinin ve limitlerinin belirlenmesi için son derece önemlidir [2].

Proje kapsamında apertürlerin, profilometrelerde kullanılan otokolimatör eksenine istenilen toleransta (< 0.1 mm) yerleştirilmesi için yeni bir apertür merkezleme cihazı (ACenD) geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. Bu cihaz ile ilk defa otokolimatörlerin profilometrelerde verimli bir şekilde kullanımı sağlanmıştır. ACenD cihazı otokolimatörlerin kalibrasyonu sırasında ve daha sonra profilometredeki kurulumu sırasında kullanılmaktadır.

AcenD yardımıyla, apertürler merkeze 0.1 mm den daha tekrarlanabilir şekilde yerleştirilebildiği için, otokolimatörün kalibrasyon değerleri güvenli bir şekilde gerçek uygulamasında kullanabilmektedir. ACenD proje ortakları tarafından bir otokolimatör kalibrasyonu karşılaştırması düzenlenerek test edilmiş ve 0.1 mm altında tekrarlanabilir apertür ayarı yapabildiği doğrulanmıştır. Daha önce kullanılan görsel lazer ayar aparatlarına göre, geliştirilen ACenD cihazının otokolimatör kalibrasyon sonuçlarına göre 3 kat daha iyi tekrarlanabilir sonuç verdiği TÜBİTAK UME ve PTB tarafından alınan hassas ölçüm sonuçları ile ispatlanmıştır [9]. ACenD, profilometreler için, ölçülebilir, dokümanite edilebilir, otokolimatörün kalibrasyonu ve kullanımında transfer edilebilir apertür pozisyonlama kabiliyeti sağlamıştır. Daha önce bu tip özellikleri taşıyan bir apertür pozisyonlama sistemi mevcut değildi. ACenD cihazı şu an MWO (Möller-Wedel Optical) firması tarafından ticari bir cihaz olarak satılmakta olup, FEL ve SR optiklerinin yüzey profili ölçümleri ve imalatı sırasında karşılaşılan sorunları ortadan kaldıracak çözümler sunmaktadır [9,10]. ALS Berkeley Lab., Argonne APS, Diamond Light Source (DLS), HZB Bessy II gibi hızlandırıcı merkezleri bu cihazı satın alıp kullanıma başlamıştır. **Şekil 5**'te ACenD cihazının TÜBİTAK UME'de testi sırasında çekilen fotoğraf ve konu ile ilgili Avrupa Metroloji Organizasyonu EURAMET web sayfasında çıkan haber bulunmaktadır.

Optical component available as commercial product



Calibration of an autocollimator and testing of Aperture Centring Device – a useful alignment tool to center an aperture up to 0.1 mm to the optical axis of the autocollimator (e.g. ELCOMAT 3000). – Courtesy of TÜBİTAK

Aperture centring device tested as part of EMRP project (SIB58 Angles) now available as a commercial product.

Precise angle measuring devices such as autocollimators, optical instruments for non-contact measurement of angles, are extensively used in applications where high precision is demanded, including the aerospace, optical, machine tool, semiconductor and automotive industries.

EMRP project **Angle Metrology** (SIB58 Angles) has made significant contributions to improve their performance by investigating the influence of reflectivity and curvature of optical surfaces on the angle response and developing an aperture centring device for use with the autocollimators.

The aperture centring device was created by unfunded industrial partner Möller-Wedel Optical GmbH, which concentrates on the research, development, production and sales of high-precision optical test equipment and precision optical components. The device has been tested by partners within the project and as a result has been made available as a commercial product by Möller.

Şekil 5. Otokolimatör imalatçısı MWO tarafından imal edilen apertür merkezleme cihazı (ACenD)'nin UME'de testi ve EURAMET web sayfasında konu ile ilgili çıkan haber

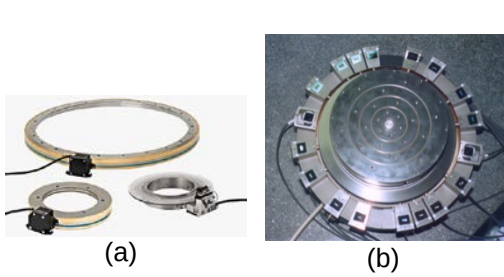
3. HASSAS AÇI ENKODERLERİ

Hassas açı enkoderlerinin uygulamalarını, performansları ve kalibrasyon durumlarını içeren bir araştırma yapılarak dünyadaki son geline nokta araştırılıp, bir rapor hazırlanmıştır [2]. İtalya Ulusal Metroloji Enstitüsü INRIM tarafından, açı enkoderlerindeki interpolasyon hatalarını azaltan yeni bir açı referans cihazın imalatı yapılmıştır [11]. Çoklu okuma kafasına sahip açı enkoderlerinin (yeni nesil enkoderler) işlem sırasında hassas kalibrasyonu için 'kendinden kalibrasyon' yöntemi PTB tarafından geliştirilmiştir. Burada, yeni nesil açı enkoderlerin maliyeti düşürülerek endüstriyel uygulamalarda kullanımı için işlem sırasında kalibrasyonunun optimize edilmesi amaçlanmıştır [12]. Açı enkoder tipleri hakkında açıklamalar **Şekil 6**'da verilmiştir.

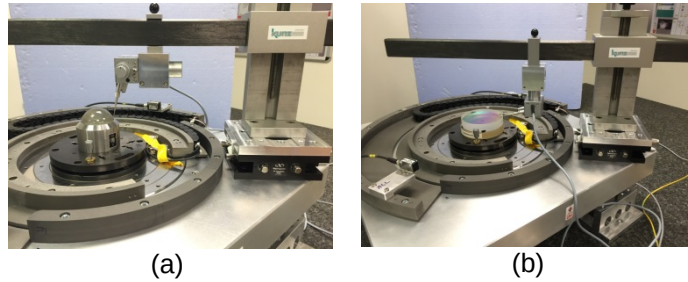
Açı enkoderlerin çalışma sırasında bağlı oldukları döner tablalar ile aralarındaki ayar kaçıklıkları ve tabla form hatalarının enkoder çalışma performansı üzerindeki etkileri TÜBİTAK UME tarafından detaylı bir şekilde deneysel olarak incelenmiştir (**Şekil 7**) [2]. İspanya Ulusal Metroloji Enstitüsü CEM, enkoder kalibrasyonları için yeni aparatlar geliştirmiştir. Tüm bu çalışmalar, açı enkoderlerinin çalışma performansını etkileyen parametrelerin anlaşılması ve yeni nesil enkoderlerin geliştirilmesi için değerli bilgiler içermektedir [2].

Otokolimatörlerin açı enkoderine bağlı referans tablalar ile çok hassas kalibrasyonu için ilk defa hata ayırma tekniği kullanılmış ('Shearing' tekniği) ve her iki referans standart (Açı enkoderi ve otokolimatör) aynı anda kalibre edilerek, hataları 0.001" (5 nrad) belirsizlikle tespit edilmiştir. Otokolimatör kalibrasyonu için en iyi ölçüm belirsizlikleri (CMC verileri) 0.1"- 0.01" belirsizliklerde iken, elde edilen değer, şimdiye kadar yapılan değerlerden en az 10 kat daha iyidir [13].

Hata ayırma (Shearing) tekniği kullanılarak açı enkoderlerinin ve enkoderden gelen sinyalleri işleyen 'interpolator' ların performansı hata ayırma tekniği kullanılarak incelenmiştir. Çalışma, TÜBİTAK UME, PTB, MWO ve Japonya Ulusal Metroloji Enstitüsü (AIST NMIJ) kurumlarının ortak yaptığı bir yayında paylaşılmıştır [13]. Sonuçlar shearing ayırma tekniğinin özellikle cihazların daha düşük çözünürlüklere ulaşırken maruz kaldığı interpolasyon hatalarının tespit edilmesi için ideal bir method olduğunu göstermektedir. Tüm bu çalışmaların sonuçları kullanılarak TÜBİTAK UME önderliğinde 2 adet EURAMET kalibrasyon rehber dokümanı (Otokolimatör ve Enkoder kalibrasyonu için) hazırlanmış ve EURAMET web sayfasında yayımlanmıştır [14, 15].



Şekil 6. Açı enkoderleri ve tipleri
(a) Klasik tip, tek okuma kafalı açı enkoderleri (b) Yeni nesil açı enkoderi, çok okuma kafalı

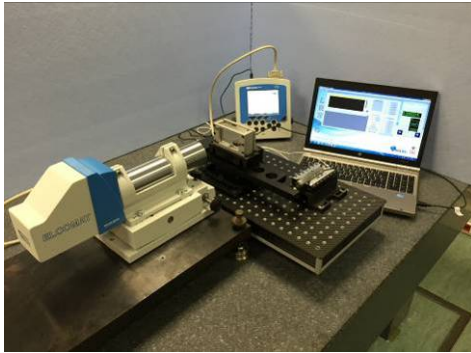


Şekil 7. TÜBİTAK UME primer referans açı tablasına monte edilmiş açı enkoderinin açı okuma performansına, tablanın dönme sırasındaki geometrik (form) hatalarının etkisinin incelenmesi (a) Yanal yönde (b) Eksen yönünde

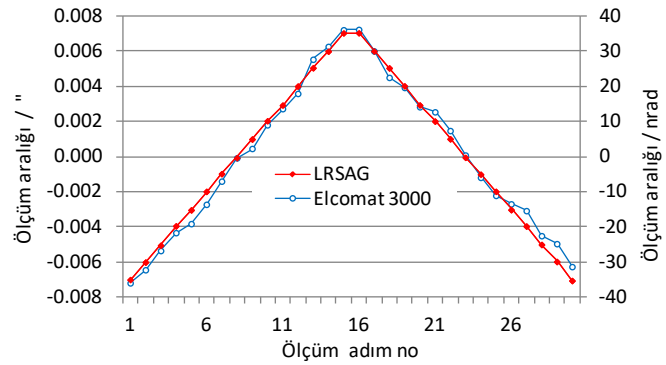
4. KÜÇÜK AÇI ÜRETEÇLERİ

Serbest elektron lazer (FEL) ve sinkrotron ışınımı (SR) kaynaklarının yer aldığı hızlandırıcı merkezlerindeki otokolimatör kullanıcıları ile yapılan detaylı görüşmeler ve mevcut kabiliyetlerin analizinden sonra [16], 3 farklı tip portatif geniş ölçme aralığına sahip küçük açı üreteçleri (LRSAG - Large Range Small Angle Generator) proje kapsamında geliştirilmiştir. Amaç, bu LRSAG cihazlarını kullanarak, 3600" ölçüm aralığında, 0.01" (50 nrad) genişletilmiş belirsizlikle otokolimatör kalibrasyonu gerçekleştirmek. TÜBİTAK UME tarafından yapılan LRSAG-1 [17] ve Çek Ulusal metrolojisi Enstitüsü CMI tarafından yapılan LRSAG-2, bu hedefe ulaşılırken, İspanya Ulusal Metroloji Enstitüsü CEM ve araştırma merkezi IK4-TEKNIKER [18] tarafından geliştirilen LRSAG-3 kısmen ulaşmıştır. Geliştirilen 3 tip LRSAG tamamen farklı yapıda olup, açı ölçümü ve üretme teknikleri için farklı metot ve referans skalalar kullanmaktadır. LRSAG-2 ve LRSAG-3 cihazlarının açı ölçme skalası açı interferometresinden oluşmaktadır. Kısaca fiyatı yaklaşık 40 000 Euro olan açı optikleri ve lazer interferometresinin cihaz ile beraber kullanılması gerekmektedir. UME tarafından geliştirilen LRSAG-1 de böyle maliyetli bir cihaza bağımlılık olmayıp, hassas mesafe enkoderi (0.5 nm çözünürlüklü) kullanılarak açı üretilip, ölçülebilmektedir. TÜBİTAK UME tarafından geliştirilen LRSAG-1 **Şekil 8'** de, cihazın 5 nrad adım performansı **Şekil 9'** de gösterilmektedir [17].

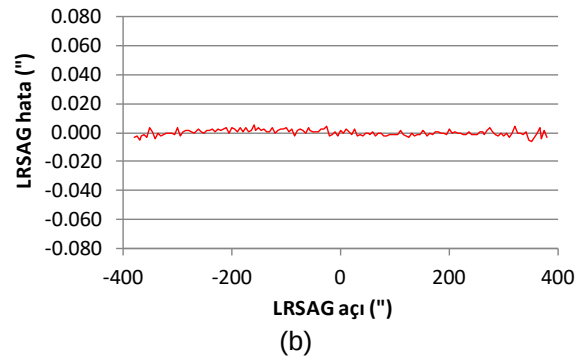
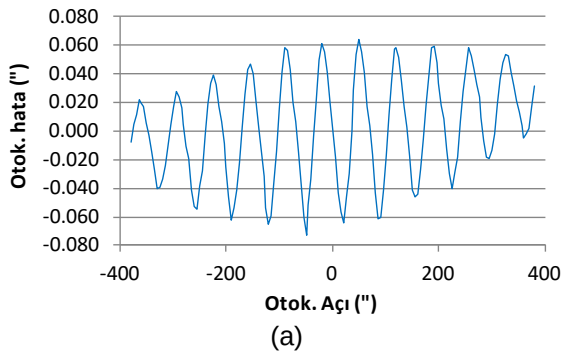
Proje kapsamında, FEL ve SR ışınım hatlarındaki taleplere göre, nrad ve nrad altı hassasiyette açı ölçümleri için, araştırmalar yapılmıştır. Dünyada ilk defa izlenebilir 1 nrad (0.0002") açısal adımlara nrad altı hassasiyette TÜBİTAK UME tarafından üretilen cihaz [19] ile ulaşılmıştır [20]. 1 nrad adımlar, TÜBİTAK UME tarafından daha önce geliştirilen, kısa ölçüm aralığına sahip hassas açı üretici HPSAG [19] ile elde edilmiştir. Bu adımları kontrol etmek amacıyla, 0.0002" çözünürlükte ölçüm yapabilecek otokolimatör dünyada bulunmadığı için (en iyileri 0.001" çözünürlüğe sahip), yüksek kararlı frekansı olan lazerden oluşan diferansiyel Fabry-Perot interferometresi (DFPI)'sinin iki lazer kolu arasında oluşan mesafe farkının çok hassas bir şekilde frekans değişimi olarak algılanması özelliğinden faydalanılmıştır. DFPI' ten çıkan birbirine paralel ve aralarında 20 mm mesafe olan iki lazer ışınımı, HPSAG üzerindeki düz aynadan yansıtılmış ve HPSAG ile üretilen 0.1" (500 nrad) ölçme aralığında, bu ışınımaların kollarında oluşan mesafe farkı frekans olarak ölçülmüştür. 500 nrad ölçüm aralığında HPSAG açı verileri referans olarak kullanılmış ve bu açı değerlerine denk gelen frekans değişimi DFPI'dan okunmuştur. DFPI frekans değişim değerlerini, açı değerlerine çeviren kalibrasyon denklemi hesaplanmıştır. Daha sonra HPSAG tarafından oluşturulan 1 nrad adımlar DFPI ile frekans değişimi olarak algılanmış ve frekans verileri, oluşturulan kalibrasyon denklemi ile açısal değerlere çevrilerek, nrad altı hassasiyette ölçümler gerçekleştirilmiştir [20].



Şekil 8. UME yapımı LRSAG-1 ile otokolimatör kalibrasyonu



Şekil 9. UME LRSAG-1 açı değerleri ile Otokolimatör açı değerlerinin 0.001" (5 nrad) açısal adımlarda karşılaştırılması

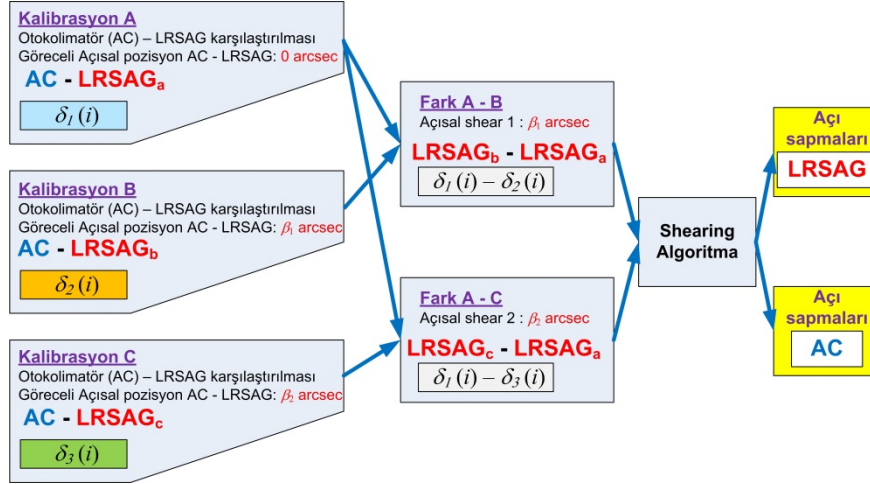


Şekil 10. Hata ayırma tekniği (shearing method) kullanılarak Otokolimatör (a) ve TÜBİTAK UME imalatı LRSAG (b) hatalarının 0.001" (5 nrad) standart belirsizlikle tespit edilmesi.

Ayrıca, TÜBİTAK UME ve PTB tarafından farklı açı üretme kavramları kullanılarak, otokolimatörlerin nrad seviyede açı ölçüm kabiliyetleri araştırılmıştır [21]. Yapılan çalışmayla, otokolimatörlerin çözünürlükleri olan 0.001" (5 nrad) adımlarda kalibrasyonun yapılabileceğini, ve otokolimatörlerinin görev esaslı kalibrasyonundan sonra, 0.001" (5 nrad) belirsizlikle temassız açı ölçümleri için (örneğin evrensel çekim sabiti G değerini tespit eden BIPM düzeneğinde) kullanabileceği gösterilmiştir [21]. Bu değerler, ilk defa küçük açı üretici (TÜBİTAK UME) ve özel açı enkoderi bağlı tablalar (PTB) ile otokolimatör kalibrasyonunda shearing ayırma tekniği kullanılarak doğrulanmıştır. TÜBİTAK UME geliştirdiği LRSAG-1 ve HPSAG'ı kullanarak 5 nrad belirsizlik değerine otokolimatör kalibrasyonu için ulaşmıştır.

TÜBİTAK UME tarafından geliştirilen LRSAG-1 ile otokolimatör çözünürlüğündeki açısal adımlar 5 nrad (0.001") üretilerek, otokolimatör (Elcomat 3000) tarafından okunan değerler ile karşılaştırılmıştır (**Şekil 9**). **Şekil 10'** da hata ayırma tekniği (shearing tekniği) kullanarak 0.001" belirsizlikte otokolimatör ve LRSAG-1 hatalarının incelenmesi gösterilmektedir.

LRSAG-1 ile otokolimatörün kalibrasyonu yapıp, elde edilen (AC-LRSAG-1) test-referans fark değerleri kullanılıp, özel bir işlemden geçirilip otokolimatör ve LRSAG-1 hataları ayrı ayrı tespit edilebilmiştir. **Şekil 10 (b)**' de görüldüğü gibi LRSAG-1 hataları $\pm 400''$ ölçüm aralığında $\pm 0.005''$ doğruluk değerleri içinde (0.002" rms) olarak bulunmuştur. Bu değer, en iyi üretici firma doğruluk değerleri $\pm 0.3''$ olan otokolimatörlerin kalibrasyonun rahatlıkla yapılabileceğini göstermektedir.



Şekil 11. Hata ayırma tekniğinin (shearing tekniği) şematik açıklaması

Şekil 11' de shearing tekniğini kısaca anlatan bir şema bulunmaktadır [22]. LRSAG-1 ve Otokolimatör arasında 3 farklı göreceli açıda (0, β_1 ve β_2) alınan 3 set kalibrasyon (a, b, c) ile elde edilen (AC-LRSAG_a), (AC-LRSAG_b), (AC-LRSAG_c) set değerleri kullanılarak, kalibrasyon sonuçları arasında farklar alınmaktadır. Bu işlemde, otokolimatör skalasında bir kayma yapılmazken (yani sürekli aynı skala değerinden kalibrasyona başlarken), LRSAG skalasında göreceli açılar (β_1 ve β_2) kadar kayma yapılarak kalibrasyona başlanır ve veri alınır. Yani LRSAG skalasının 3 farklı bölgesi ile (aralarında β_1 ve β_2 kadar faz farkı olan), otokolimatör skalasının aynı yeri A, B ve C kalibrasyonlarında karşılaştırılır.

A, B, ve C kalibrasyon sonuçları kullanılarak, A-B ve A-C farkları alınınca, skala pozisyonu değişmeyen AC değerleri birbirini götürceğinden, geriye birbiri arasında faz farkı olan LRSAG verileri kalır (**Şekil 11**). Bu veriler bir algoritma ile çözülerek ilk olarak LRSAG değerleri tespit edilir. Daha sonra bu veriler (AC-LRSAG_a), (AC-LRSAG_b), (AC-LRSAG_c) denklemlerinde yerine konarak, 3 adet AC (otokolimatör açı sapma) değeri bulunur. Bunların arasındaki yakınlık yapının işlemin kalitesi hakkında bilgi verir ve atık değerlerin standart sapması belirsizliğinin en önemli bir parametresi olarak kullanılır. **Şekil 10(a)**'da ortalaması gösterilen otokolimatör değerleri için elde edilen 3 set ölçümün birbirine yakınlığı, diğer bir deyişle, 3 otokolimatör sapma değerinin, her birinin ortalama değerden (3 veri kullanılarak bulunan) farkının standart sapması 0.001" (rms) olarak hesaplanmıştır. 427 adet veriden hesaplanan bu değer otokolimatörün çözünürlük değeri kadar bulunmuştur.

Shearing uygulamasında en kritik nokta, yapılan 3 set kalibrasyonun (A, B ve C) tekrarlanabilir şartlarda alınması şartıdır. Ancak bu şekilde hata ayırma sırasında sabit kalan cihazın kalibrasyon verileri birbirini tam olarak götürür ve ilk olarak skalası kaydırılan cihazın (LRSAG) hataları daha sonrada, skalası sabit tutulan cihazın (Otokolimatör) hataları hassas bir şekilde tespit edilir [22].

SONUÇ

'SIB58 Angles' Açı Metrolojisi projesinde gerçekleştirilen üst düzey araştırmaların bir özeti verilmiştir. SI açı birimi radyanın nrad belirsizliklerde (örn. 5 nrad) hassas bir şekilde elde edildiği ve açı metrolojisi alanında kilometre taşlarına ulaşıldığı anlatılmıştır. Otokolimatörlerin hassas optik yüzeylerin ölçümü ve üst düzey bilimsel çalışmalarda kullanımı için yapılan çalışmalar, yeni nesil otokolimatörler için iyileştirme çalışmaları, açı enkoderi hata araştırmaları ve yeni nesil açı enkoder (çok okuma kafalı) uygulamaları, nrad ve nrad altı seviyede açı üretimi ve ölçümü için geliştirilen hassas açı üreteçlerini ve ölçüm metodlarını hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca, projenin yeni açı ölçme teknikleri, cihazları, ve bilgi birikimi ürettiği açıklanarak, bunların açı metrolojisi kullanıcıları tarafından nrad belirsizlik talebi olan araştırma çalışmalarına ve geliştirecekleri ürünlere nasıl katkı sağlayacağı anlatılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] YANDAYAN T., "Açı metrolojisi: bilimsel ve endüstriyel alanlardaki uygulamaları, üst düzey yeni talepler ve projeler", Mühendis ve Makina, Cilt 55, Sayı 653, 2014.
- [2] SIB58 Angles, Angle Metrology proje web sayfası, <http://anglemetrology.com/>, Haziran 2019.
- [3] YANDAYAN T., Geckeler R. D., Pisani M., Prieto E. and Siewert F., "Recent developments in angle metrology", MacroScale 2014, Recent Developments in Traceable Dimensional measurements, 28-30 Oct. 2014, BEV - Wien, Austria.
- [4] YANDAYAN T., Geckeler R. D., Schlewitt C. and Siewert F. "State of the art in Angle Metrology and updated information for X-ray optics community", IWXM 2015 - International Workshop on X-Ray Optics and Metrology, July 13-16, 2015, Berkeley, USA. - INVITED
- [5] QUINN T J et al 2013 Phys. Rev. Lett. 111 101102, 1-5
- [6] SIEWERT F et al 2004 AIP Conf. Proc. 705 847-850
- [7] KRANZ O et al 2015 Advanced Optical Technologies doi: 10.1515/aot-2015-0017
- [8] HEIKKINEN V et al 2017 Metrologia 54, 253-261. doi: 10.1088/1681-7575/aa648d
- [9] GRUBERT B., KREITSCHIK D., SCHNABEL O., SIEWERT F., GECKELER R.D, SCHUMANN M., JUST A., KRAUSE A., YANDAYAN T., AKGOZ S. A. "A precise aperture centring device (ACenD) for autocollimator-based surface measuring profilers", The conference on Advances in Metrology for X-Ray and EUV Optics VIII, part of SPIE Optical Engineering + Applications, 11 - 12 August 2019 (Yayımlanacak)
- [10] MÖLLER-WEDEL OPTICAL 2018 www.haag-streit.com/moeller-wedel-optical
- [11] PISANI M. and ASTRUA M. 2017 Meas. Sci. Technol. 28 doi: 10.1088/1361-6501/aa5af6 045008
- [12] GECKELER R. D. et al 2014 Meas. Sci. Technol. 25 055003 10pp
- [13] YANDAYAN T. et al 2018, Investigations of interpolation errors of angle encoders for high precision angle metrology Meas. Sci. Technol.
- [14] EURAMET Guide 22, 2017, Calibration of Autocollimators <https://www.euramet.org/>
- [15] EURAMET Guide 23, 2018, Calibration of Angle Encoders <https://www.euramet.org/>
- [16] YANDAYAN T. et al 2014, SPIE Proc 9206, doi:10.1117/12.2060953
- [17] YANDAYAN T. 2017 SPIE Proc 10385 doi: 10.1117/12.2274178
- [18] OLARRA A et al 2016 euspen Proc. 16th Int. Conf. www.euspen.eu
- [19] YANDAYAN T. et al, "High precision small angle generator for realization of the SI unit of plane angle and calibration of high precision autocollimators" Meas. Sci. Technol. 23 (2012), 094006.
- [20] CELIK M et al 2016 Meas. Sci. Technol. 27 035201 10pp, doi:10.1088/0957-0233/27/3/035201
- [21] YANDAYAN T. and GECKELER R. D. 2017 euspen Proc 17th Int. Conf. May 29th – 2nd June 2017, Hannover, Germany, 2017, www.euspen.eu
- [22] YANDAYAN T. et al "Application of advanced shearing techniques to the calibration of autocollimators with Small Angle Generators and investigation of error sources", Review of Scientific Instruments 87, 051903 (2016); doi: 10.1063/1.4950720

ÖZGEÇMİŞ

Tanfer YANDAYAN

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