

GRANİT MASA ve PLEYT KALİBRASYON METODLARI, METODLARIN KARŞILAŞTIRILMASI ve BELİRSİZLİK HESABI

Murat AKSULU*
Bülent ÖZGÜR
Okhan GANİOĞLU

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü PK. 54 41470 Gebze/KOCAELİ
Tel: 0262 679 50 00
E-Mail*: murat.aksulu@tubitak.gov.tr

ÖZET

Granit masa ve plate yüzey düzlemsellik kalitesi, masa üzerinde gerçekleştirilen cihaz ve master kalibrasyonlarını etkilemektedir. Bu sebeple granit masaların düzlemselliğinin kalibre edilmesi gereklidir. Masa düzlemsellik kalibrasyonunda genellikle, yüzeyde belli bir düzene göre doğrular boyunca eğim ölçümleri yapılmakta ve bunlar farklı metodlarla yükseklik dağılımına çevrilmektedir. Böylece masanın 3 boyutlu yüzey haritası elde edilmektedir. Düzlemsellik kalibrasyonunda kullanılan cihazlar otokolimatör, laser açısal interferometre ve elektronik eğim ölçerlerdir. Bu sunumda, yukarıda sayılan cihazlar kullanılarak yapılan masa kalibrasyonları izah edilmektedir. Bu cihazlara ek olarak, küçük boyutlardaki bir granit masanın, 3 Boyutlu ölçüm cihazı (CMM) ile doğrudan yükseklik dağılımı ölçülerek yüzey haritasının elde edilmesi mümkündür. Bu bildiride farklı metodların karşılaştırılmasını içeren bir çalışma sunulmaktadır. Sunulan çalışmadaki karşılaştırma neticesinde CMM, otokolimatör ve laser ölçüm sonuçları ile bunlara ait belirsizliklerin birbirine oldukça yakın olduğu gösterilmektedir. Ayrıca elektronik eğim ölçer kullanılarak ve Moody ölçüm metodu (düzeni) uygulanarak yapılan masa düzlemsellik kalibrasyonu için belirsizlik bileşenleri verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Düzlemsellik, granit masa, plate, otokolimatör, elektronik eğim ölçer, laser interferometre, 3 boyutlu ölçüm cihazı (CMM).

ABSTRACT

Flatness quality of granite surfaces and plates affect the calibration of devices and artefacts. Therefore, the calibration of the such plates is required for the proper calibration of these devices and artefacts. In flatness calibration of plates, most of the time, slope measurements are performed on the plate along the straight lines according to defined schemes and these slopes are converted into the height distribution using different mathematical methods and the topography of the plate is determined as a result. Devices which are used in flatness calibration are autocollimators, laser angular interferometers and electronic levelmeters. In this presentation, the plate calibrations that are performed using above devices are explained. It is also possible to obtain the surface topography of a small plate using Coordinate measuring machine (CMM), by measuring directly the surface height distribution. A comparison of different calibration methods is also illustrated in this presentation. As a result of this comparison, it is shown that the measurement results of CMM, autocollimator and laser angular interferometer and their uncertainties are in good agreement. Furthermore, the uncertainty contributions of a flatness calibration of a plate performed by using electronic levelmeter and applying Moody method, are given.

Key Words: Flatness, granite plate, autocollimator, electronic levelmeter, laser interferometer, Coordinate Measuring Machine (CMM).

1. GİRİŞ

Granit masa ve pleytler metrolojide referans “rijit ve düzlem yüzey” olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek ağırlıkları sebebiyle çevreden gelen titreşimi azaltırlar. Üzerinde, mihengir gibi cihazlar yardımıyla çeşitli artefaktların ölçümü gerçekleştirilir. Ayrıca mihengirin kendi kalibrasyonu ve silindir veya gönyelerin diklik ve paralellik kalibrasyonları da yapılır. Her çeşit referans düzlem gerektiren master ve cihazın/düzeneğin oturtulacağı yer olarak vazife görür.

Pleytin düzlemselliği, üzerinde yapılan ölçümü doğrudan etkileyebilir. Örneğin mihengir ile gönyelerin ve granit diklik standartlarının dikliği kalibre edilirken, masanın bir noktasından diğerine hareket ettirilen mihengirin eğimi, masanın düzlemsellik sapmasıyla orantılı olarak değişecektir. Eğimdeki değişme, gönyenin diklik değerine aynen veya belli bir oranda yansıtılabilir. Bu sebeple masanın düzlemselliğinin bilinmesi gerekir. Düzlemsellik kalibrasyonu yaygın olarak otokolimatör, elektronik eğim ölçer ve lazer açısız interferometre ile yapılır. Bu metodların hiç birinde masanın yükseklik dağılımı yani topografyasının direkt olarak ölçümü söz konusu değildir. Hepsinde belli bir düzene göre belirlenmiş doğrular boyunca ardışık açı ölçümleri yapılmakta ve buradan farklı matematiksel yöntemlere göre yükseklik dağılımı hesaplanmaktadır. Yani bir çok belirsizlik bileşeni içeren dolaylı metodlardır. Bu durum akla, “acaba yükseklik dağılımının doğrudan ölçüm imkanı olsaydı, yukarıdaki dolaylı metodlardan farklı düzlemsellik sonuçları bulunur muydu? veya daha düşük belirsizlik elde edilebilir miydi?” sorularını getirmektedir. Bir pleytin yükseklik dağılımını doğrudan ölçmenin en iyi yollarından biri CMM cihazı kullanmaktır. Pratikte çoğu masanın kalibrasyonunda CMM cihazının kullanılması mümkün olmamasına rağmen, CMM cihazının ölçüm alanına sığabilecek küçük masaların ölçümü mümkündür. Aşağıda yaygın ölçüm metodları hakkında kısaca bilgi verildikten sonra, bir grup araştırmacı tarafından yapılan bir metod karşılaştırmasında alınan sonuçlar ve metodların belirsizlikleri sunulacaktır [3]. Daha sonra, bir eğim ölçer kullanılarak Moody yöntemiyle düzlemsellik kalibrasyonuna ait belirsizlik bileşenleri verilecektir.

2. GRANİT MASA ve PLEYT DÜZLEMSELLİK KALİBRASYON YÖNTEMLERİ

2.1. Elektronik eğim ölçer ile kalibrasyon

Genelde köşegen uzunluğu 700 mm'nin altında olan pleytler kalibrasyon laboratuvarlarına gönderilebilir. Daha büyüklerin yerinde kalibre edilmesi daha uygundur. Pleyt, 3 adet ayarlı ayak üzerine oturmalıdır. Masa, ayarlı ayaklarla kabaca teraziye getirilir. Pleytin ölçüleri dikkate alınarak normal grid (dikdörtgen) veya union jack (Moody) yöntemine göre kurşun kalem ve T cetveli yardımı ile ölçüm planı çizilir (Şekil 1). Kenarlardan en az 75 mm pay bırakılır. Grid genişlikleri kalibrasyonda kullanılacak ayakların arasındaki mesafeye göre seçilir. Genelde küçük boy masalarda 50-100 mm, orta boy masalar için 100-150 mm, büyük boy masalarda 200-300 mm'dir.

Elektronik eğim ölçerlerde 2 adet eğim ölçen ünite (sensör) mevcuttur. Bunlar genellikle A ve B olarak isimlendirilir. A sensörü referans olarak kabul edilip pleytin bir köşesinde X yönünde sabit olarak tutulur. B sensörü ise, her zaman A sensörüne paralel ve aynı yönde tutularak, ölçüm planına göre gerekli duraklara getirilir ve o noktadaki eğim kaydedilir. A sensörüne paralel tüm hatlar boyunca bu işlem tekrarlanır. Sonra A sensörü, başlangıç noktasında Y yönüne çevrilir ve yukarıdaki işlemler Y yönü için yapılır. Ölçüm sonucunda açılardan yüzey yükseklik dağılımı elde edilir. Tipik bir granit masa yüzey topoğrafyası Şekil 2'de görülmektedir [1].

2.2. Laser açısız interferometre ve Otokolimatör ile kalibrasyon

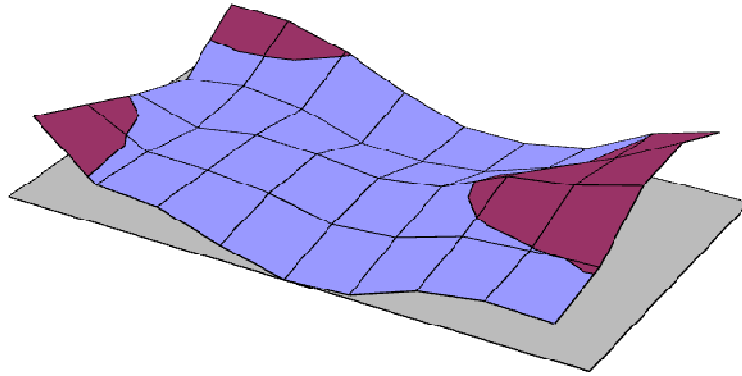
Lazer interferometre açılı optikleri veya otokolimatör aynaları masa üzerine yerleştirilerek, elektronik eğim ölçerde olduğu gibi ölçüm planı çizgilerinde ilerlenerek ve duraklarda durularak eğim değerleri tespit edilir (Şekil 3 ve 4). Lazer ile ölçümde kafa her bir ölçüm hattının hizasına getirilip yeniden ayarlanmak zorundadır.

Otokolimatör ve lazer ile düzlemsellik ölçümünde, elektronik seviye ölçerin zıddına, her bir ölçüm hattının düşey konumu rastgeledir [2]. Bu sebeple ölçümden sonra, tüm ölçüm hatlarına ait yükseklik profillerinin, bir düzlem içinde yer alacak şekilde verilerin düzenlenmesi gerekir. Bunu sağlayabilmek

için hatların tüm kesişme noktalarında, her hat için ayrı ayrı ölçüm alınır. Ancak bu da yeterli olmayabilir. Kesişme noktalarından geçen farklı yönlerde bir veya birden fazla ölçüm hattı eklenebilir. Örneğin Moody ölçüm metodu bu özelliğe sahiptir [2].



Şekil 1. Elektronik eğim ölçer ile granit masa kalibrasyonu



Şekil 2. Granit masa kalibrasyonu sonucunda elde edilen yüzey topoğrafyası

3. PLEYT DÜZLEMSELLİK ÖLÇÜM METODLARININ KIYASLANMASI [3]

3.1 CMM ile Direkt Yükseklik Ölçümü, Lazer Açısal İnterferometre ve Otokolimatör ile Açık/eğim Ölçümü

Karşılaştırmada kullanılan cihazlar:

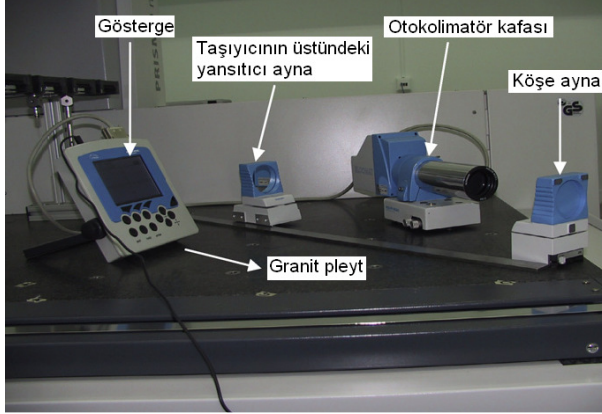
- 1) Elcomat 3000 Otokolimatör. Çözünürlüğü 0,05 arcsec (Şekil 3)
- 2) HP Agilent 5529 A Lazer İnterferometre. Çözünürlüğü 0,05" (Şekil 4)
- 3) Prismo/Zeiss CNC-CMM. Tarayıcı prob kafası doğruluğu $\pm (0,9 + L / 350)$ μm (ölçüm uzunluğu L: mm), Problama hatası 0,5 μm 'dir (Şekil 7)

Ölçümü yapılan granit masalar:

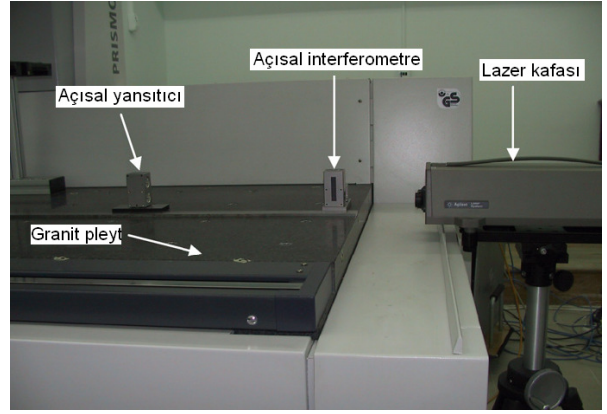
- 1) 0 Grade Granit: 600x600 mm. CMM cihazının kendi ölçüm tablası olup Lazer, Otokolimatör ve CMM ile ölçülmüştür.
- 2) 1 Grade Granit: 600x800 mm (Lazer ve Otokolimatör ile ölçülmüştür. Ağır olduğundan CMM ile ölçülemez)

Not: Grade 0 granit masanın max düzlemsellik sapması $5,2 \mu\text{m}$; Grade 1 granit masanın ise $11 \mu\text{m}$ olabilir [4].

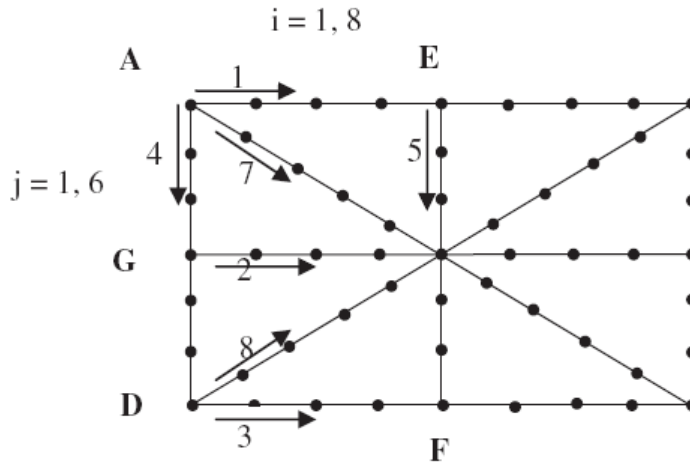
Karşılaştırmanın yapıldığı laboratuvarın sıcaklığı $20 \pm 1^\circ\text{C}$, sıcaklık gradyanı $0,2^\circ\text{C/m}$ 'dir. Tüm ölçümlerde Union-Jack (Moody) metodu kullanılmıştır. Ölçüm planı Şekil 5'de görülmektedir. Lazer ve otokolimatör ölçümlerinde kullanılan ayak uzunluğu $d = 100 \text{ mm}$ 'dir (Şekil 6). Lazer ve otokolimatör sistemlerindeki açı ölçümlerinin kararlılığını tespit etmek için araştırmacılar tarafından 8 saat süren ölçümler alınmıştır. Bu esnada açı değerinde max $\pm 0,1$ arcsec değişim gözlenmiştir.



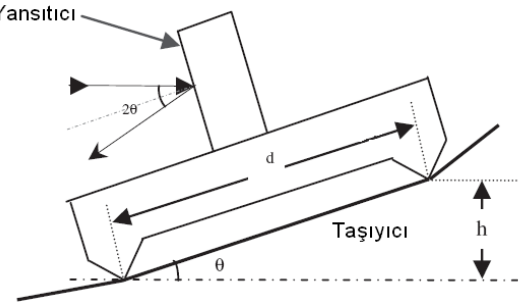
Şekil 3. Otokolimatör ile düzlemsellik ölçümü [3]



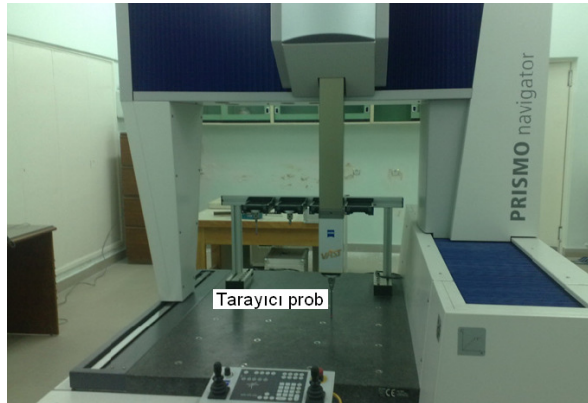
Şekil 4. Lazer ile düzlemsellik ölçümü [3]



Şekil 5. Masa üzerinde Union-Jack (Moody) ölçüm planı



Şekil 6. Taşıyıcı ve yansıtıcı [3]



Şekil 7. CMM ile düzlemsellik ölçümü [3]

3.2 CMM, Laser Açısal İnterferometre ve Otokolimatör Ölçüm Ölçüm Sonuçları ve Ölçüm Belirsizliklerinin Kıyaslanması

Ölçüm sonuçları ve ölçüm belirsizlikleri Tablo 1’de, Şekil 8 ve 9’da sunulmuştur. Üç metoda ait düzlemsellik ve belirsizlik değerleri birbirine çok yakındır. Laboratuvarlar, cihazlar, metodlar ve operatörler arası karşılaştırmalarda, ölçümlerin birbiriyle uyumluluğunu test etmek için kullanılan E_n kriteri, bu metod karşılaştırmasında da kullanılmıştır. Eğer ölçüm sonuçları birbiriyle uyumlu ise $E_n \leq 1$ olmalıdır. E_n kriterinin tanımı:

$$E_n = \frac{|F_1 - F_2|}{\sqrt{U_{F_1}^2 + U_{F_2}^2}} \quad (1)$$

Burada F_1 ve F_2 karşılaştırılan üç metottan her hangi ikisine ait ortalama düzlemsellik sapmaları, U_{F_1} ve U_{F_2} ise bu sapmalara ait %95 güvenlik düzeyindeki ölçüm belirsizlikleridir. Tablo 2’den görüldüğü gibi her hal için E_n değeri birin çok altındadır.

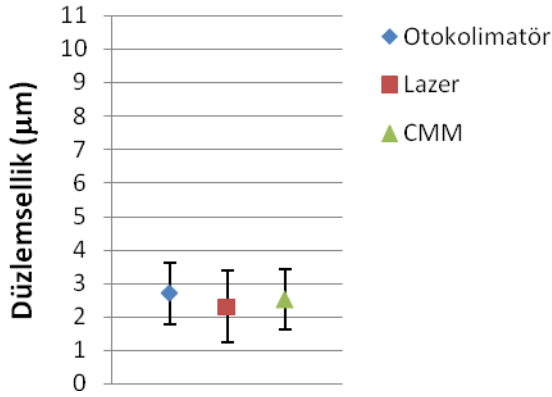
Tablo 1. Grade 0 ve 1 granit pleytlerin düzlemsellik sapmaları ve ölçüm belirsizliği [3]

Grade 0 Granit Pleyt	Otokolimatör	Lazer	CMM
Düzlemsellik (μm)	2,7	2,3	2,5
U_{95} (μm)	0,92	1,08	0,9

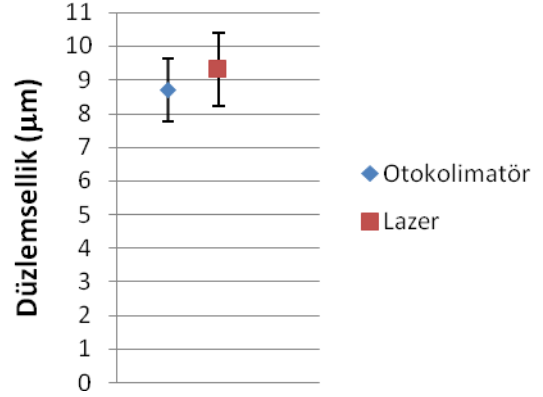
Grade 1 Granit Pleyt	Otokolimatör	Lazer
Düzlemsellik (μm)	8,7	9,3
U_{95} (μm)	0,92	1,08

Tablo 2. Ölçüm metodlarına ait E_n değerleri [3]

	Grade 0 Granit Pleyt E_n	Grade 1 Granit Pleyt E_n
Otokolimatör/ Lazer	0,2	0,3
Otokolimatör/ CMM	0,1	-
Lazer/CMM	0,1	-



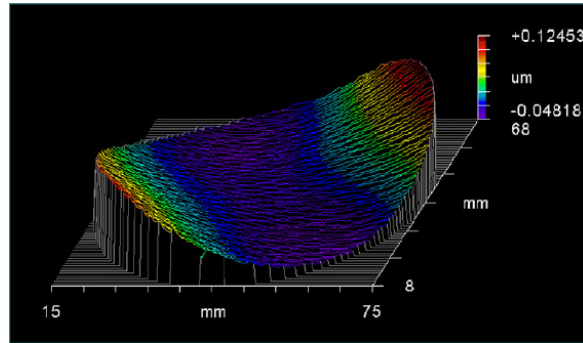
Şekil 8. Grade 0 granit pleyt ölçüm sonucu ve belirsizliklerin kıyaslanması (Hata çubukları belirsizliği göstermektedir $\pm U_{95}$) [3]



Şekil 9. Grade 1 granit pleyt ölçüm sonucu ve belirsizliklerin kıyaslanması (Hata çubukları belirsizliği göstermektedir $\pm U_{95}$) [3]

Lazer açısal interferometre ve otokolimatör ölçüm sistemlerindeki belirsizlik kaynakları önem derecesine göre şöyle sıralanabilir:

- Ayna düzlemsellik sapması (Şekil 10)
- Kararlılık (çevresel etkiler)
- Taşıyıcının pleyt üzerindeki konumunun belirsizliği
- Cihaz doğruluğu



Şekil 10. Yansıtıcı aynanın düzlemselliği [3]

CMM ölçümlerinde ise belirsizlik kaynakları önem derecesine göre şöyle sıralanabilir:

- Cihazın doğruluğu
- Problama hatası
- Tekrarlanabilirlik

CMM ölçümlerinde, tekrarlanabilirlik gibi A Tipi belirsizlik bileşenleri, bileşke belirsizliğin küçük bir yüzdesini oluştururken, diğer iki cihazda A Tipi belirsizlik bileşenleri, bileşke belirsizliğin çok daha büyük bir yüzdesini oluşturmaktadır.

4. EĞİM ÖLÇER KULLANILARAK MOODY YÖNTEMİYLE DÜZLEMSELLİK KALİBRASYONU İÇİN BELİRSİZLİK BÜTÇESİ [5]

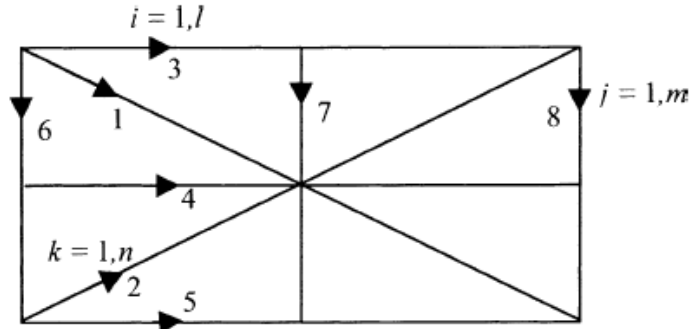
Düzlemsellik, gerçek yüzeyi içine alan iki paralel düzlem arasındaki en küçük mesafedir. Düzlemsellik model fonksiyonu:

$$\Phi = \max(z_{ij}) - \min(z_{ij}) \quad (2)$$

Burada Φ düzlemsellik, z_{ij} ise yüzey yükseklik dağılımına bir ideal düzlem uydurulduktan sonra yükseklik dağılımının bu düzlemden farkıdır. Verilen bir ham yükseklik dağılımının düzlemselliğini bulmak için en çok tercih edilen iki yaklaşım vardır: En küçük kareler düzlemi (LSPIa) ve Moody yaklaşımı. Her iki yöntem de gerçek düzlemsellikten daha büyük değer verir.

Eşitlik (2)'nin varyansını almadan önce şu basitleştirme yapılmıştır: Max ve min bulma işleminin (fonksiyonunun) belirsizliği yerine, max ve minimum noktaların yüksekliğinin belirsizliğini alınır. Zira max-min bulma fonksiyonunun elde edilmesi ve varyansının hesaplanması zorluk arzemektedir.

$$u^2(\Phi) = u^2(z_{ij_{\max}}) + u^2(z_{ij_{\min}}) \quad (3)$$



Şekil 11. Moody metoduna göre ölçüm hatları ve ölçüm duraklarının numaralandırılması [5]

4.1 Diagonaller üzerinde yükseklik profilinin ve belirsizliğinin elde edilmesi

Diagonaller 1 ve 2 numaralı ölçüm hatlarıdır (Şekil 11). Yükseklikleri "d" ile gösterilir. Diagonal üzerindeki ham yükseklik profiline bir ideal doğru uydurulur. Bu doğrunun eğimi, profilin iki ucunun birleştirilmesiyle oluşan doğrunun eğimine eşit olmalı ve diagonalin orta noktasında yükseklik sıfır olmalıdır.

$$d_k^r = d_k - \frac{k}{n} d_n - d_{n/2} + \frac{d_n}{2} \quad (4)$$

Burada d_k : k. noktadaki ham profil yüksekliği

d_n : Diagonalin son noktasındaki ham profil yüksekliği

$d_{n/2}$: Diagonalin orta noktasındaki ham profil yüksekliği

Eşitlik (4) için varyans:

$$\begin{aligned}
u^2(d_k^r) = & \left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_k}\right)^2 u^2(d_k) + \left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_n}\right)^2 u^2(d_n) + \left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_{n/2}}\right)^2 u^2(d_{n/2}) \\
& + 2\left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_k}\right)\left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_n}\right)u(d_k)u(d_n)r(d_k, d_n) \\
& + 2\left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_k}\right)\left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_{n/2}}\right)u(d_k)u(d_{n/2})r(d_k, d_{n/2}) \\
& + 2\left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_n}\right)\left(\frac{\partial d_k^r}{\partial d_{n/2}}\right)u(d_n)u(d_{n/2})r(d_n, d_{n/2})
\end{aligned} \tag{5}$$

Burada u belirsizlik, $r(d_k, d_n)$ örneğin d_k ile d_n arasındaki korelasyon katsayısıdır.

Bir ölçüm hattındaki yükseklik profili ardışık açı ölçümlerinin toplanmasıyla bulunmaktadır. O halde,

$$d_k = \sum_{f=1}^k S_d \theta_f \tag{6}$$

Burada θ_f ardışık açı ölçüm değerleridir. Bir ölçüm hattında S_d sabit kabul edilirse k .nokta için,

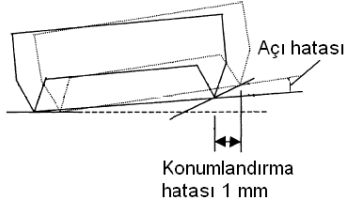
$$u^2(d_k) = S_d^2 \sum_{f=1}^k u^2(\theta_f) \tag{7}$$

Açı ölçümlerinin belirsizliği aşağıdaki unsurlara bağlıdır:

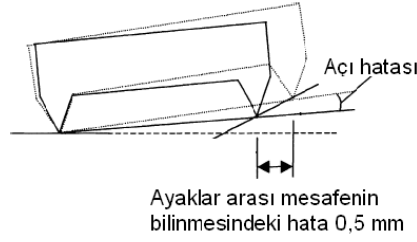
- 1) Cihazın doğruluğu
- 2) Sıcaklık kararlılığı
- 3) Taşıyıcı ile gerçekleştirilen adımlamadaki konum doğruluğu
- 4) Taşıyıcı ayakları arasındaki mesafenin bilinmesindeki doğruluk
- 5) Taşıyıcı ayaklarının yüzeye temas noktasının sonsuz küçük bir nokta değil, sonlu olması
- 6) Histerezis
- 7) Çözünürlük
- 8) Elektriksel gürültü ve titreşim

6, 7 ve 8. Maddeler ya yukarıdaki doğruluk değerlerinin içinde mevcuttur, ya da çok küçük mertebededir. Bu sebeple incelenmeyecektir. Aşağıda ilk 5 madde için örnek belirsizlik değerleri verilecektir:

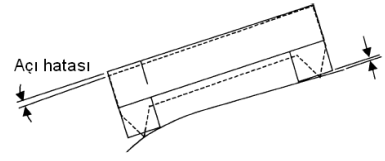
- 1) Tipik bir eğim ölçerin doğruluğu $\pm 0,5$ ark saniyedir
- 2) Fabrika ortamında sıcaklık değişimi $\pm 2^\circ\text{C}$. Bir plate yüzeyinde rastlanan maksimum açısal sapmalar ± 200 ark saniye mertebesindedir. Sıcaklık değişiminin sebep olduğu açısal hatanın tecrübelerden, 1°C sıcaklık değişimi için tüm skalanın % 0,02'si kadar olduğu bilinmektedir.
- 3) Taşıyıcının konumlandırılmasındaki belirsizlik, kullanılan cetvel yardımıyla çizilen çizgilerin kalınlığına ve göz paralax hatasına bağlıdır ve ± 1 mm civarındadır. 1 mm konum hatası başına oluşan açı hatası ise araştırmacı [5] tarafından A ve AA grade masalar üzerinde pek çok denemeye tespit edilmiş olup 0,03 ark saniye/mm mertebesindedir (Şekil 12).
- 4) Taşıyıcı ayaklarına konan işaretlerin konum belirsizliği ise kalem ile konulan işaretlerden daha düşüktür ve $\pm 0,5$ mm civarındadır. Bu konum belirsizliğini açı belirsizliğine çevirmek için yine 3.maddedeki gibi 0,03 ark saniye/mm oranı kullanılır(Şekil 13).
- 5) 1 mm^2 taşıyıcı ayak yüzeyi başına oluşan açı hatası yine araştırmacı tarafından A ve AA grade masalar üzerinde pek çok denemeye tespit edilmiş olup 0,02 ark saniye/ mm^2 mertebesindedir (Şekil 14).



Şekil 12. Taşıyıcı konumlandırma hatası [5]



Şekil 13. Taşıyıcı ayakları arasındaki mesafenin bilinmesindeki hata [5]



Şekil 14. Taşıyıcı ayaklarının sonlu genişlikte yüzeye sahip olmasının getirdiği hata [5]

Bu beş maddede ifade edilen belirsizlik bileşenlerinin tümü karesel olasılık dağılımına sahiptir, $3^{1/2}$ ile bölünecektir. Sonuç olarak açı ölçümü için varyans:

$$u^2(\theta) = 0,092 \text{ arksaniye}^2 \quad (8)$$

olarak hesaplanmıştır. Elektronik eğimölçerin ölçüm belirsizliği masa üzerinde konuma bağlı değildir ve sabit kabul edilecektir. Bu durumda Eşitlik (7):

$$u^2(d_k) = kS_d^2 u^2(\theta) \quad (9)$$

haline gelir. Benzer şekilde n. ve n/2. noktadaki varyanslar da aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$u^2(d_n) = nS_d^2 u^2(\theta) \quad (10)$$

$$u^2(d_{n/2}) = \frac{n}{2} S_d^2 u^2(\theta) \quad (11)$$

Eşitlik (5)'te hassasiyet katsayıları hesaplanır ve Eşitlik (9 – 11)'deki ifadeler de yerine yazılırsa Eşitlik (5) şu hale gelir:

$$u^2(d_k^r) = S_d^2 u^2(\theta) \left[k + n \left(\frac{1}{2} - \frac{k}{n} \right)^2 + \frac{n}{2} + 2 \left(\frac{1}{2} - \frac{k}{n} \right) \sqrt{kn} \cdot r(d_k, d_n) - \sqrt{2kn} \cdot r(d_k, d_{n/2}) - \left(\frac{1}{2} - \frac{k}{n} \right) n \sqrt{2} \cdot r(d_n, d_{n/2}) \right] \quad (12)$$

Bir ölçüm hattında, örneğin k. ve n. noktalar için $k < n$ olmak üzere d_k ve d_n arasındaki korelasyonun $(k/n)^{1/2}$ olduğu gösterilmiştir. Bu durumda $k \leq n/2$ için:

$$u^2(d_k^r) = S_d^2 u^2(\theta) \left(\frac{n}{4} - \frac{k^2}{n} \right) \quad (13)$$

ve $k \geq n/2$ için:

$$u^2(d_k^r) = S_d^2 u^2(\theta) \left(2k - \frac{k^2}{n} - \frac{3n}{4} \right) \quad (14)$$

İfadeleri geçerlidir. Diagonal ortasında $k = n/2$ Eşitlik (12) sıfır verir. Diagonalin iki ucunda ise ($k = 0$ ve $k = n$) belirsizlik max seviyededir ve Eşitlik (12) şu değere sahiptir:

$$u^2(d_k^r) = \frac{n}{4} S_d^2 u^2(\theta) \quad (15)$$

4.2 Çevresel ölçüm hatları üzerinde yükseklik profilinin ve belirsizliğin elde edilmesi

Çevresel ölçüm hatları 3, 5, 6 ve 8 numaralı ölçüm hatlarıdır (Şekil 11). Yükseklikleri “p” ile gösterilir. Bu hatlara ait yükseklik profilleri, halihazırda elde edilmiş olan diagonal profillerinin uç noktalarına eklenir, yani diagonal uç noktalarının fonksiyonudurlar. Diagonallerin profili ve belirsizliği hesaplanırken tüm belirsizlik bileşenleri izah edildiğinden burada doğrudan yükseklik profili ve belirsizlik verilecektir. Örnek olarak 3 numaralı çevresel ölçüm hattının profilini yazalım. “i.” durakta profilin, diagonal uç noktaları arasında çizilen ideal doğrudan düşey sapması:

$$p_{3i}^r = p_{3i} - \frac{i}{1} p_{3i} + d_{10}^r + \frac{i}{1} (d_{2n}^r - d_{10}^r) \quad (16)$$

olarak elde edilir. Çevresel ölçüm hatlarının orta noktalarında belirsizlik max seviyededir. Bu sebeple doğrudan orta noktalara ait varyansları verelim. Uzun kenarların orta noktasında varyans:

$$u^2(p_{1/2}^r) = \frac{1}{4} S_{ip}^2 u^2(\theta) + \frac{n}{4} S_d^2 u^2(\theta) \quad (17)$$

Kısa kenarların orta noktasında varyans:

$$u^2(p_{m/2}^r) = \frac{m}{4} S_{sp}^2 u^2(\theta) + \frac{n}{4} S_d^2 u^2(\theta) \quad (18)$$

4.3 Açıortay ölçüm hatları üzerinde yükseklik profilinin ve belirsizliğin elde edilmesi

Açıortay ölçüm hatları 4 ve 7 numaralı ölçüm hatlarıdır (Şekil 11). Yükseklikleri “b” ile gösterilir. Bu hatlara ait yükseklik profilleri, yukarıda elde edilmiş olan çevresel ölçüm hatlarının orta noktalarına eklenir, yani çevresel ölçüm hatlarının orta noktalarının fonksiyonudurlar. Burada da denklemlerin elde edilmesine girmeden doğrudan yükseklik profili ve belirsizlik verilecektir. Örnek olarak 4 numaralı açıortay ölçüm hattının profilini yazalım. Açıortaylar çevresel ölçüm hatlarına paralel olduklarından ve aynı adımlama uzunluğu kullanıldığından yine i ve j indisleri kullanılacaktır. “i.” duraktaki profil yüksekliğinin, çevresel ölçüm hatlarının orta noktaları arasına çizilen ideal doğrudan düşey sapması:

$$b_{4i}^r = b_{4i} - \frac{i}{1} b_{4i} + p_{6m/2}^r + \frac{i}{1} (p_{8m/2}^r - p_{6m/2}^r) \quad (19)$$

olarak elde edilir. Çevresel hatlarda olduğu gibi açıortay ölçüm hatlarının da orta noktalarında belirsizlik max seviyededir. Bu sebeple doğrudan orta noktalara ait varyansları verelim. Uzun hattın (No: 4) orta noktasındaki varyans:

$$u^2(b_{1/2}^r) = \frac{1}{4} S_{ip}^2 u^2(\theta) + \frac{m}{4} S_{sp}^2 u^2(\theta) + \frac{n}{4} S_d^2 u^2(\theta) \quad (20)$$

Kısa hattın (No: 7) orta noktasındaki varyans, uzun hattın ortasındaki varyans ile aynıdır:

$$u^2(b_{m/2}^r) = \frac{1}{4} S_{ip}^2 u^2(\theta) + \frac{m}{4} S_{sp}^2 u^2(\theta) + \frac{n}{4} S_d^2 u^2(\theta) \quad (21)$$

Eşitlik (21), masa üzerindeki yükseklik değerlerinin en yüksek belirsizliğe sahip noktasının masa merkezi olduğunu göstermektedir. Eşitlik (21) sadeleştirilerek aşağıdaki forma getirilebilir:

$$u^2(b_{m/2}^r) = u^2(b_{l/2}^r) = u^2(\theta) \left[l \left(\frac{S_{lp}}{2} \right)^2 + m \left(\frac{S_{sp}}{2} \right)^2 + n \left(\frac{S_d}{2} \right)^2 \right] \quad (22)$$

En kötü halde, açıortay hatlarının birinin orta noktasına yüzeyin max noktasının rast geldiğini, diğerinin orta noktasına ise yüzeyin min noktasının rast geldiğini kabul edelim. Bu durumda Eşitlik (3)'e göre düzlemsellik belirsizliği:

$$u(\Phi) = \sqrt{2}u(b_{l/2}^r) \quad (23)$$

olacaktır.

SONUÇ

Düzlemsellik kalibrasyonunda otokolimatör, laser açısal interferometre ve elektronik eğim ölçerler gibi cihazlar yaygın olarak kullanılmaktadır. CMM cihazı ile pleyt düzlemsellik kalibrasyonu pratikte kullanılmamasına rağmen sadece diğer metodlarla kıyaslama amacıyla faydalanılabilir. Aktarılan metod karşılaştırma çalışmasından görüldüğü kadarıyla düzlemsellik ölçümünde otokolimatör ve laser açısal interferometre sonuçlarıyla CMM sonuçları birbirine oldukça yakındır. Aynı şekilde bu cihazlarla yapılan ölçümlere ait belirsizlikler de birbirine çok yakındır. CMM ile pleyt kalibrasyonu en hızlı gerçekleştirilen kalibrasyondur. Otokolimatör ile ölçüm, laser açısal interferometre sistemine göre daha kolay ve hızlıdır.

Elektronik seviye ölçer kullanılarak ve Moody metodu uygulandığında, eşitlik (22)'den görüldüğü gibi masa yüzey topoğrafyasındaki yükseklik değerlerinin belirsizliği, taşıyıcı ayak boyu ile orantılıdır ve kullanılan adım sayısının karekökü ile orantılıdır. Ayrıca en yüksek belirsizlik masa merkezinde ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] "Talyvel 4 Operator's Handbook", Taylor Hobson, 1997
- [2] Haitjema H., Meijer Ir. J., "Evaluation of surface plate flatness measurements", European Journal of Mechanical Engineering 38 (4), S: 165-172, 1993
- [3] Zahwi, S.Z. et al., "On the calibration of surface plates", Measurement 46, S: 1019-1028, 2013
- [4] ISO 8512-2, "Surface Plates - Part 2: Granite", 1990
- [5] Drescher, J., "Analytical estimation of measurement uncertainty in surface plate calibration by the Moody method using differential levels", Precision Engineering 27, S: 323-332, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Murat AKSULU

1969 yılı İstanbul doğumludur. 1990 yılında İTÜ Makina Mühendisliğini bitirmiştir. Aynı üniversiteden 1993 yılında Yüksek Mühendis, 2008 yılında Doktor ünvanını almıştır. 1996 yılından beri TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Boyutsal Ölçümler Laboratuvarlarında görev yapmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü ve form ölçümleri konularında çalışmaktadır.

Bülent ÖZGÜR

1970 yılında Trabzon'da doğdu. 1991 yılında Yıldız Üniversitesi Makine Mühendisliğini bitirmiştir. 1993-1997 yılları arasında Metkon Metal Konstrüksiyon A.Ş.'de ve 1997-1999 yılları arasında Makine Takım Endüstrisi A.Ş.'de Makine Mühendisi olarak çalıştı. 1999'dan beri Tübitak-UME Boyutsal Laboratuvarında Araştırmacı olarak çalışmaktadır. TÜBİTAK-UME'de "Şerit metre ve Çelik Cetvel Kalibrasyon Sistemi" kurulması projesi, "Adım (Stage) Mikrometre Kalibrasyon Sistemi"nin geliştirilmesi projelerini tamamladı. "Silindirik Parçaların Nanometre Hassasiyette 3 boyutlu Karakterizasyonu" isimli TÜBİTAK 1001 projesinde kullanılan kontrol yazılımını gerçekleştirdi. Halen 2 adet TÜBİTAK 1007 projesinde tasarım mühendisidir. UME'de yapımı gerçekleştirilen yerli tasarım bir ölçme cihazının bilgisayarlı kontrol ve ölçme yazılımı üzerinde çalışmaktadır. "Çelik Cetvel ve Şerit Metre Kalibrasyonu Karşılaştırması" konulu Ulusal karşılaştırmayı yürütmektedir.

Okhan GANİOĞLU

1969 yılı İstanbul doğumludur. 1993 yılında ODTÜ. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü bitirmiştir. Aynı Üniversiteden 1996 yılında Yüksek Lisans derecesi almıştır. 1996-1997 Yılları arasında Özel bir firmada Arazi Ölçüm Cihazları konusunda teknik servis personeli olarak çalışmıştır. 1997 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Boyutsal Laboratuvarında araştırmacı olarak çalışmaya başlamıştır. 1999-2012 Yılları arasında Laboratuvar sorumlu vekili olarak görev yapmış, haziran 2012 tarihinden itibaren Boyutsal Laboratuvarı sorumlusu olarak görev yapmaktadır. 2005 yılında uzman araştırmacı, 2012 yılında başuzman araştırmacı unvanını almıştır. 2009 - 2011 yılları arasında TURKAK Ölçme Tekniği ve Kalibrasyon Sektör Komitesi'nde görev almıştır. 2012 Yılından itibaren EURAMET Uzunluk Teknik Komitesinde (TC-L) ve Uzunluk Danışmanlar Komitesi (CCL) Boyutsal Çalışma Gruplarında (WGDM) ülkemizi temsil etmektedir.