

**Teknik Doküman
(Technical Document)**

EN ISO 376 Standardına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi

Doç. Dr. Bülent AYDEMİR, Dr. Haldun DİZDAR, Cemal VATAN
TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME), Gebze/Kocaeli, TÜRKİYE,
bulent.aydemir@tubitak.gov.tr, haldun.dizdar@tubitak.gov.tr, cemal.vatan@tubitak.gov.tr

Özet

Bu çalışmada, EN ISO 376 standardına göre kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı kapsamında bilgilere yer verilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen ölçüm verileri kullanılarak kuvvet ölçme cihazının belirsizliği sayısal bir örnek ile hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: EN ISO 376, Kuvvet Kalibrasyonu, Ölçüm Belirsizliği

An Investigation and Calculation of Uncertainty in Calibration of Force-proving Instruments according to EN ISO 376 Standard

Abstract

In this study, it has been focused on calibration of force-proving instruments concerning to EN ISO 376 standard. An investigation and calculation of force-proving instrument calibration uncertainty has been analysed by using real measurement data, in additionally; a numerical sample has been detailed for individuals who perform force-proving instrument calibration.

Keywords: EN ISO 376, Force Calibration, Measurement Uncertainty

1. GİRİŞ

Endüstride yaşanan rekabet ve ilerleyen teknoloji nedeniyle daha kaliteli ve güvenilir ürünleri tüketiciye sunmak ve böylece pazar payını artırmak isteyen üreticiler, malzeme ve ürünlerine çeşitli testler uygularlar. Malzeme testleri, endüstriyel ürünlerde kullanılan malzemelerin uygunluklarının belirlenmesi amacını güder. Böylece uygun olmayan malzeme kullanımından kaçınılmış olur. Malzeme testleriyle özellikleri belirlenen malzemeleri kullanmak, tasarım aşamasından ürün aşamasına kadar olan tüm proseste, ekonomik ve daha güvenilir ürünlerin geliştirilmesini ve imalatını sağlar. Bu testlerde kullanılan düzenekler ve makinalar, kuvvetin uygulanması ve ölçülmesi prensibiyle çalışırlar.

Kuvvet ölçümleri, kalite kontrol ölçümlerinde, üretim hatlarındaki süreç kontrolünde, robot teknolojisinde, uçak, inşaat, makine, gemi, otomotiv gibi birçok mühendislik dalında, emniyet mühendisliği, tıp (ortopedi), askeri alanda, uzay çalışmalarında ve her türlü ağırlık ölçümlerinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, kuvvetin hassas ve doğru ölçülmesi büyük önem taşımaktadır.

Bilim ve teknolojiye paralel olarak, günümüz endüstrisinde yüksek doğruluklu kuvvet ölçme cihazlarının geliştirilmesi sağlanmış ve buna bağlı olarak kuvvet ölçümünün önemi ve kullanımı daha da

Bu yayına atıf yapmak için

Aydemir B., Dizdar H., Vatan C., "EN ISO 376 Standardına Göre Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi" Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, TÜBİTAK UME, S.2, N.1, 2019 (1-11)

In order to cite this publication

Aydemir B., Dizdar H., Vatan C., "An Investigation and Calculation of Uncertainty in Calibration of Force-proving Instruments according to EN ISO 376 Standard" Force Laboratory Technical Document, TUBITAK UME, S.2, N.1, 2019 (1-11)

artmıştır. Yüksek doğruluklu kuvvet ölçme cihazlarının kullanılması ile yapılacak çalışmaların kalitesi, cihazların uluslararası standartlara izlenebilir kalibrasyonlarının yapılmasıyla mümkün olabilmektedir.

Kuvvet ölçümleri, Newton'un ikinci kanunu olan " F (Kuvvet) = m (Kütle) $\times$ a (İvme)" prensibinin kullanıldığı statik kuvvet ölçümlerine dayanmaktadır ve böylece standart kuvvetler oluşturulmaktadır. Bu prensibe göre standart kuvvet değerlerini oluşturan sistemlere Kuvvet Standardı Makinaları veya Kuvvet Kalibrasyon Makinaları adı verilir ve bu makinalar kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda kullanılırlar. Türkiye'de yapılan tüm ölçümleri güvence altına almak, bu ölçümlerin uluslararası sisteme entegrasyonunu sağlamak amacıyla kurulan TÜBİTAK'a bağlı Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME) bünyesinde, kuvvet ölçümleri konusunda, Kuvvet Laboratuvarı kurulmuştur. TÜBİTAK UME Kuvvet Laboratuvarında 0,5 N – 3000 kN aralığında birincil yani en üst seviyede oluşturulan kuvvet standartlarıyla kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonları yapılmaktadır.

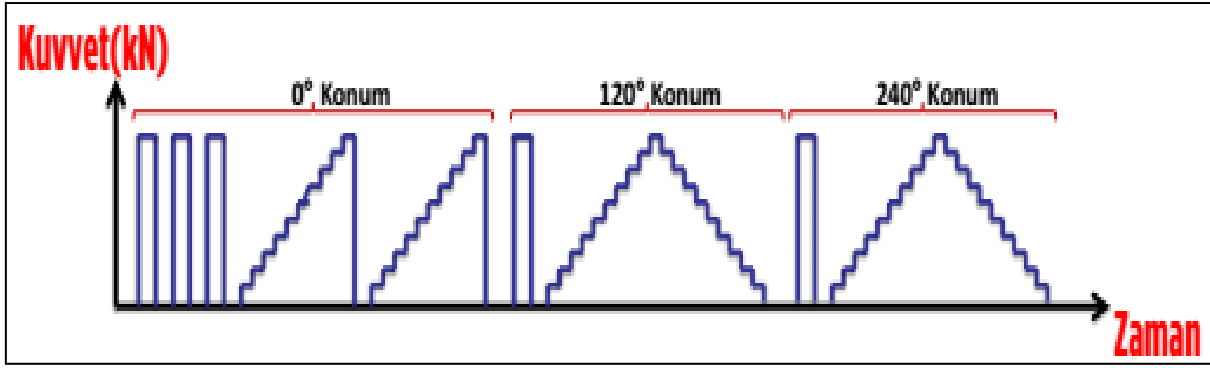
Bu çalışmada, EN ISO 376 standardına göre kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı kapsamında bilgilere yer verilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen ölçüm verileri kullanılarak kuvvet ölçme cihazının belirsizliği sayısal bir örnekle hesaplanmıştır [1,2].

2. KUVVET ÖLÇME CİHAZLARININ KALİBRASYONU

Kuvvet ölçme cihazlarının en yüksek doğrulukla kullanılacakları noktalar istisnai durumlar dışında "Tek Eksenli Malzeme Test Makinaları"nın kuvvet kalibrasyonudur. Bir diğer yaygın kullanım noktası ise sertlik ölçme makinalarının kuvvet ölçme kısımlarının kalibrasyonudur. Bu amaçla, Avrupa Birliği ve Gümrük Birliği kavramlarının oluşmasından önce ülkeler kendi belirledikleri yöntemlerle kalibrasyon yaparlarken; globalleşen dünyada ölçmenin mutlak gerekliliğinin yanında en temel şart olan ölçümlerin karşılaştırılabilirliği koşulunu sağlamak amacıyla "EN (EuroNorms)" olarak tüm dillerde ifade edilen Avrupa Standartları geliştirilmiştir. Bu kapsamda tek eksenli malzeme test makinalarının statik olarak doğruluklarının kontrolü için kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunu düzenleyen EN 10002-3 numaralı standart Mayıs 1994'de yürürlüğe girmiştir [3]. Türkiye Cumhuriyeti'nin Gümrük Birliği içinde yer alması ile ülke sınırları içinde bu standartların uygulanması koşulu oluşmuştur. 2004 yılında EN 10002-3 standardının yerine EN ISO 376 standardı yayınlanmıştır. Günümüzde halen EN ISO 376 standardının 2011 sürümü kullanılmaktadır [1].

Bu standartta kuvvet kalibrasyonunun en genel tarifi, değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin kuvvet ölçme cihazına uygulanması ve kuvvet ölçme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen ölçme sisteminden (gösterge cihazından) verilerin kaydedilmesi şeklinde açıklanmaktadır.

Kuvvet ölçme cihazlarının EN ISO 376 standardına göre kalibrasyonu kısaca aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir. Öncelikle kuvvet ölçme cihazı, uygulanacak en büyük kuvvet kapasitesine kadar ön yük ile üç defa yüklenir. Ardından kuvvet ölçme cihazına artan değerlerde iki seri kalibrasyon kuvveti basamaklı olarak uygulanır. Bu esnada kuvvet ölçme cihazının pozisyonu değiştirilmez. Daha sonra, en az iki ilave seri artan ve azalan değerlerde belirlenmiş olan kalibrasyon kuvveti basamaklı olarak kuvvet ölçme cihazına uygulanır. Artan ve azalan değerlerde kalibrasyon kuvvetinin aşamalı olarak kuvvet ölçme cihazına uygulanması öncesinde en büyük kuvvet kapasitesine kadar bir defa ön yükleme işlemi gerçekleştirilmelidir. Her bir ilave kuvvet serisi arasında, ölçme cihazı kendi eksenini etrafında simetrik olarak, 360° 'ye eşit olarak dağıtılmış konumlara (örneğin, 0° , 120° , 240°) döndürülür. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, (0° , 180° , 360°) gibi üç konumun uygulanması kabul edilebilir. Serilerdeki kuvvet basamakları yaygın olarak kuvvet ölçme cihazının en büyük kapasitesinin on kuvvet adımına bölünmesiyle elde edilecek kuvvetler şeklinde belirlenir. Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda enterpolasyon eğrisinin belirlenebilmesi için, uygulanacak kuvvet basamak sayısı sekizden az olmamalıdır. Ayrıca; bu kuvvetler, kalibrasyon bölgesi üzerinde mümkün olduğunca düzgün bir şekilde dağılmış olmalıdır. Aşağıda Şekil 1.'de, EN ISO 376 standardına göre çizilen kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunda uygulanan kuvvet ile zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 1. EN ISO 376 standardına uygun kuvvet-zaman grafiği

Kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, EN ISO 376 standardının Ek C kısmında ve EURAMET CG-04 dokümanında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu yayın, bahsi geçen dokümanlar referans alınarak oluşturulmuştur [1,2,4,5].

3. KUVVET ÖLÇME CİHAZLARINDA BELİRSİZLİK HESABI

Kuvvet ölçme cihazının kuvvet standardı makinasında kalibrasyonu EN ISO 376 standardına göre gerçekleştirilir ve kalibrasyon sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, Tablo 1’de detaylandırılan ve ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik, sürünme, sıfır, histerisiz-tersinebilirlik, çözünürlük, enterpolasyon, sıcaklık, kayma) bileşenler hesaplanır. Kalibrasyon verileri elde edildikten sonra her bir kuvvet değeri için etki büyüklüklerinin bağıl değerleri hesaplanır. Aşağıda bu büyüklükler ve bunlara ait tahmini istatistiksel dağılım fonksiyonları verilmiştir. Bu dağılım fonksiyonlarının seçimi deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Bileşik belirsizlik aşağıdaki (1) numaralı formül ile hesaplanır.

$$w_C = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (1)$$

Genişletilmiş bağıl belirsizlik aşağıdaki (2) numaralı formül ile hesaplanır;

$$W = k \times w_C \quad (2)$$

Kuvvet biriminde belirsizlik ise aşağıdaki (3) numaralı formül ile hesaplanır;

$$U = W \times F \quad (3)$$

(1) numaralı formüldeki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

- w_1 : Uygulanan kuvvetin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_2 : Kalibrasyon sonuçlarının yeniden üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_3 : Kalibrasyon sonuçlarının tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_4 : Gösterge çözünürlüğünün bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_5 : Kuvvet ölçme cihazının sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_6 : Kuvvet ölçme cihazının sıfır değerindeki kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_7 : Kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,
- w_8 : Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni,

Bu parametrelerin hesabına aşağıda detaylı olarak yer verilmiştir.

3.1 Kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_1 :

Kalibrasyon kuvveti, kuvvet ölçme cihazına çekme ya da basma kuvvetini uygulayan sistemin sertifikasından bağıl belirsizlik değeri olarak alınır.

3.2 Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_2 :

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (4) numaralı formül ile hesaplanır:

$$w_2 = 100 \times \frac{1}{\overline{X_r}} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{i=1,3,5} (X_i - \overline{X_r})^2} \quad (4)$$

3.3 Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_3 :

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (5) numaralı formül ile hesaplanır:

$$w_3 = \frac{b'}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

3.4 Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_4 :

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (6) numaralı formül ile hesaplanır:

$$w_4 = 100 \times \frac{r}{\sqrt{6} \times X_r} \quad (6)$$

3.5 Sürünme ve tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_5 :

Eğer cihazın sınıflandırmasında sürünme hatası dikkate alınıyorsa, yani Durum A ve C için sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (7) numaralı formül ile hesaplanır:

$$w_5 = \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Eğer cihazın sürünme testi yapılmamış ise sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni tersinebilirlik hatasının 1/3'e dikdörtgen dağılım uygulanması ile hesaplanır. Bu durumda formül aşağıdaki (8) numaralı eşitlik şeklinde yazılır:

$$w_5 = \frac{v}{3\sqrt{3}} \quad (8)$$

3.6 Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_6 :

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (9) numaralı formül ile hesaplanır:

$$w_6 = \left| \text{maksimum}(f_0)_i - \text{minimum}(f_0)_i \right| \quad (9)$$

3.7 Sıcaklık bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_7 :

Sıcaklık bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (10) numaralı formül ile hesaplanır:

$$w_7 = 100 \times \frac{K \times \Delta T}{2\sqrt{3}} \quad (10)$$

K: Kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişim faktörü (üretici tarafından verilir),

ΔT : Kalibrasyondaki sıcaklık değişimi

K katsayısı, kuvvet ölçme cihazı üretici firmaları tarafından beyan edilen bir değer olup EN ISO 376 standardında bu katsayı $0,00027\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ alınmıştır.

3.8 Enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, w_8 :

Bu bileşen sapma metodu ile belirlenir, enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (11) numaralı formül ile hesaplanır:

$$w_8 = 100 \times \left| \frac{\overline{X_r} - X_a}{\overline{X_r}} \right| \quad (11)$$

3.9 Birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesabı, w_c :

Bağıl değerler kullanılarak birleştirilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki (12) numaralı formül ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (12)$$

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü ($k=2,0$) alınır, bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aşağıdaki (13) numaralı formül ile hesaplanır.

$$W = k \times w_c \quad (13)$$

Kuvvet biriminde belirsizlik ise aşağıdaki (14) numaralı formül ile hesaplanır;

$$U = W \times F \quad (14)$$

3.10 Belirsizliğin Raporlanması

Kuvvet ölçme cihazlarının EN ISO 376 standardına göre gerçekleştirilen kalibrasyon işleminin değerlendirmesi sürecinde, bu teknik dokümanda yer alan (1) ile (14) arasındaki formüller kullanılarak belirsizlik bileşenleri ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği hesaplanır. Hesaplanan belirsizlik değerleri ölçüm aralığına göre sertifikada raporlanır. Ölçüm aralığı, aksi belirtilmediği sürece genel olarak kuvvet ölçme cihazının maksimum kuvvet kapasitesi (F_N) değerinin % 20'si ile % 100'ü arasındaki bölgeyi kapsar. Ölçüm aralığı belirlendikten sonra bu bölgedeki en büyük belirsizlik değeri cihazın belirsizliği olarak beyan edilir. EURAMET CG-04, "Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik" rehber dokümanında kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan her bir bağıl belirsizlik ($w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_8$) bileşeninin ve kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunun yapılabileceği kuvvet standardı makinasının bağıl genişletilmiş ölçüm belirsizliği değerlerinin **üst sınırlarının**, EN ISO 376 standardının beyanı olan sınıflara göre değişimi aşağıda Tablo 1'de verilmiştir [4,5].

Tablo 1. Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonuna etki eden bağıl belirsizlik bileşenlerinin üst sınırının, EN ISO 376 standardının beyanı olan sınıflara göre değişimi

Sınıfı	w ₁ (%)	w ₂ (%)	w ₃ (%)	w ₄ (%)	w ₅ (%)	w ₆ (%)	w ₈ (%)	Bağıl Genişletilmiş Belirsizlik (%)
00	0,005	0,017	0,014	0,010	0,014	0,012	0,025	0,08
0,5	0,010	0,033	0,029	0,020	0,029	0,025	0,050	0,16
1	0,025	0,067	0,058	0,041	0,058	0,050	0,100	0,32
2	0,050	0,133	0,115	0,082	0,115	0,100	0,200	0,64

4. KUVVET ÖLÇME CİHAZLARINDA BELİRSİZLİK ÖRNEK HESABI

Kuvvet ölçme cihazının, EN ISO 376 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu neticesinde elde edilen ölçüm verileri aşağıda Tablo 2.'de verilmiştir [1].

Tablo 2. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Ön Yüklemeler	1. Seri Öncesi			Sürünme Testi*	3. Seri Öncesi	5. Seri Öncesi
F/kN	1.1/(mV/V)	1.2/(mV/V)	1.3/(mV/V)	i ₃₀ ve i ₃₀₀ /(mV/V)	3.1/(mV/V)	5.1/(mV/V)
Yüksüz (0)	0,00000	0,00000	0,00000	0,01942	0,00000	0,00000
Mak.Yük (20)	2,00205	2,00191	2,00192	2,00192	2,00191	2,00225
Yüksüz (0)	0,00022	-0,00001	0,00003	0,01930	-0,00005	0,00022

* 3. ön yüklemenin 60 s uygulanması sonrasında yüksüz durumda alınmıştır.

Ölçüm Adımları	0° Konum		120° Konum		240° Konum	
	1. Seri	2. Seri	3. Seri	4. Seri	5. Seri	6. Seri
F/kN	i / (mV/V)	i / (mV/V)	i / (mV/V)	i' / (mV/V)	i / (mV/V)	i' / (mV/V)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00004	0,00000	0,00004
2	0,20009	0,20013	0,20016	0,20020	0,20010	0,20017
4	<u>0,40028</u>	<u>0,40027</u>	<u>0,40035</u>	<u>0,40039</u>	<u>0,40029</u>	<u>0,40033</u>
6	0,60049	0,60046	0,60054	0,60063	0,60047	0,60062
8	0,80069	0,80067	0,80074	0,80084	0,80072	0,80086
10	1,00095	1,00092	1,00094	1,00107	1,00094	1,00109
12	1,20115	1,20114	1,20115	1,20132	1,20117	1,20125
14	1,40135	1,40136	1,40137	1,40156	1,40139	1,40147
16	1,60155	1,60155	1,60157	1,60174	1,60162	1,60168
18	1,80179	1,80177	1,80176	1,80189	1,80180	1,80186
20	2,00199	2,00197	2,00199	.-	2,00205	.-
0	0,00007	0,00008	.-	.-	.-	.-

Tablo 2.'de yer alan 4 kN kuvvet basamağı için bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması aşağıda detaylandırılmıştır. Bununla birlikte, diğer basamaklardaki kuvvet değerleri içinde benzer şekilde hesaplama yapılmalıdır ve hesaplamalar sonucu elde edilen en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir.

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, referans kuvveti uygulayan sistemin bağıl belirsizlik değeri (w_1), o cihazın sertifikasından alınır. Bu örnek için, TÜBİTAK UME Ölü Ağırlıklı Kuvvet Kalibrasyon Makinasının bağıl ölçüm belirsizliği % 0,002 ($k=2$ için) olarak alınmıştır. Bu durumda, kalibrasyon kuvvetinin bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_1), aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_1 = \% 0,002 / 2 = \% 0,0010$$

Tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_2) hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri ($\bar{X}_r$), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} = \frac{0,40028 + 0,40035 + 0,40029}{3} = 0,400310$$

Daha sonra, tekrar üretilebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_2) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_2 = 100 \times \frac{1}{|\bar{X}_r|} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{i=1,3,5} (X_i - \bar{X}_r)^2}$$

$$w_2 = 100 \times \frac{1}{0,40031} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times [(0,40028 - 0,40031)^2 + (0,40035 - 0,40031)^2 + (0,40029 - 0,40031)^2]}$$

$$w_2 = \% 0,0055$$

Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_3) hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_{wr}), aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$X_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} = \frac{0,40028 + 0,40027}{2} = 0,40028$$

Ardından, 4 kN kuvvet basamağı için dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası değeri (b') aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$b' = \frac{|X_2 - X_1|}{X_{wr}} \times 100 = \frac{|0,40027 - 0,40028|}{0,40028} \times 100 = 0,002$$

Böylece, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_3) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_3 = \frac{b'}{\sqrt{3}} = \frac{0,002}{\sqrt{3}}$$

$$w_3 = \% 0,0012$$

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_4) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_4 = 100 \times \frac{r}{\sqrt{6} \times X_r} = 100 \times \frac{0,00001 \text{ mV/V}}{\sqrt{6} \times 0,40031 \text{ mV/V}}$$

$$w_4 = \% 0,0010$$

Sürünme bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_5) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c = \left| \frac{i_{300} - i_{30}}{X_N} \right| \times 100 = \left| \frac{0,01930 - 0,01942}{2,00192} \right| \times 100 = 0,006$$

$$w_5 = \frac{c}{\sqrt{3}} = \frac{0,006}{\sqrt{3}}$$

$$w_5 = \% 0,0035$$

Tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_5) hesabı için, öncelikle 4 kN kuvvet basamağı için bağıl tersinebilirlik hatası (v_1, v_2, v) ifadelerinin, aşağıdaki gibi hesaplanması gerekmektedir.

$$v_1 = \left| \frac{X_4 - X_3}{X_3} \right| \times 100 = \left| \frac{0,40039 - 0,40035}{0,40035} \right| \times 100 = \% 0,010$$

$$v_2 = \left| \frac{X_6 - X_5}{X_5} \right| \times 100 = \left| \frac{0,40033 - 0,40029}{0,40029} \right| \times 100 = \% 0,010$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{0,010 + 0,010}{2} = \% 0,010$$

Bu kapsamda tersinebilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (w_5) hesabı için aşağıdaki işlemler yapılır;

$$w_5 = \frac{v}{3\sqrt{3}} = \% 0,0019$$

$$w_5 = \% 0,0019$$

Bu durumda elimizde iki adet w_5 ölçüm belirsizliği bileşeni değerinden birisini hesaplamamıza dahil etmemiz gerekecektir. Standartta hangisinin tercih edileceği yönde kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Herhangi birini kullanabilirsiniz. Bilindiği üzere, sınıflandırma tablosunda belirtilen farklı durumlar için farklı sınıflandırma kriterleri tanımlanmıştır. Her durum için sınıflandırma kriterlerinde dikkate alınan parametreleri hesaba katarak ayrı ayrı şekilde de belirsizlik beyanı da mümkündür.

Bu çalışmada, malzeme test makinalarında kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kuvvet standartları makinasıyla kalibrasyonunu esas alan EN ISO 376 standardının belirsizlik parametreleri örnekleme yöntemiyle detaylandırılmıştır. Eğer kullanıcı malzeme test makinalarının kalibrasyonunda artan ve azalan yönde kuvvet değerlerinde uygulamalar gerçekleştiriyorsa, belirsizlik modelinde tersinebilirlik bağıl belirsizlik bileşeninin kullanması daha doğru olacaktır. Aksi durumda, belirsizlik bileşenin değeri ne olursa olsun sürünme bağıl belirsizlik bileşeninin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada verilen örnek hesaplamada, (w_5) parametresi olarak tersinebilirlik bağıl belirsizlik değeri dikkate alınarak işlemlere devam edilmiştir.

Sıfır değeri kayma bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_6) hesabı için, sıfır değeri kayma hatasının maksimum ve minimumu hesaplanmalıdır. Bu kapsamda aşağıdaki işlemler yapılır;

$$\text{maksimum}(f_o) = \frac{i_f - i_o}{X_N} \times 100 = \frac{0,00008 - 0,00000}{2,00192} \times 100 = \% 0,004$$

$$\min imum (f_o) = \frac{i_f - i_o}{X_N} \times 100 = \frac{0,00004 - 0,00000}{2,00192} \times 100 = \% 0,002$$

$$w_6 = |maksimum(f_o) - \min imum(f_o)| = 0,004 - 0,002 = \% 0,002$$

$$w_6 = \% 0,0020$$

Sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_7) için, kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonundaki sıcaklık değişimi $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi aşmadığı ve K katsayısı da $0,00027\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ alındığında aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir.

$$w_7 = 100 \times \frac{K \times \Delta T}{2\sqrt{3}} = 100 \times \frac{0,00027 \times 0,2}{2\sqrt{3}} = \% 0,0016$$

$$w_7 = \% 0,0016$$

Kaynaklarda [6] ve [7] numaralı dokümanlarda künye bilgilerine yer verilen yayınlarda, hesapla bulunmuş cihaz gösterge değerinin (X_a) ayrıntılı olarak matematiksel çıkarımı ifade edilmektedir. Bu örnekte (X_a) değeri için $0,400315\text{ mV/V}$ kullanılarak enterpolasyon bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (w_8) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$w_8 = 100 \times \left| \frac{X_r - X_a}{X_r} \right| = 100 \times \left| \frac{0,400310 - 0,400315}{0,400310} \right|$$

$$w_8 = \% 0,0021$$

Kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak birleştirilmiş belirsizlik aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^9 w_i^2} = \sqrt{0,0010^2 + 0,0050^2 + 0,0014^2 + 0,0010^2 + 0,0019^2 + 0,0020^2 + 0,0016^2 + 0,0021^2}$$

$$w_c = \% 0,0069$$

% 95 güvenilirlik seviyesi için kapsam faktörü $k=2,0$ alınır ve bu durumda kuvvet ölçme cihazının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği ise;

$$W = k \times w_c$$

$$W = k \times w_c = 2 \times 0,0069 = 0,0139$$

$$W = \% 0,014 \text{ olarak alınır.}$$

Kuvvet ölçme cihazının, EN ISO 376 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu (örnek hesabı) neticesinde bağıl belirsizlik bileşenleri, tahmini değer, olasılık dağılımı, duyarlılık katsayısı ve belirsizlik katkısı parametrelerinden oluşan bilgiler aşağıda Tablo 3.'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Kuvvet standardı makinasında kalibre edilen kuvvet ölçme cihazı örnek hesabı sonucundaki belirsizlik bileşenleri ve katkıları

Girdi Büyüklüğü			Belirsizlik Bileşeni				Duyarlılık Katsayısı c_i	Belirsizliğe Katkısı $u_i(x_i)$
Sem bol	Tanım	Tahmini Değeri x_i	Değeri	Olasılık Dağılımı	Çarpan	Standart Belirsizlik $u(x_i)$		
w_1	Referans kalibrasyon kuvvetinin bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni	4,0 kN	0,0020 %	Normal dağılım	0,5	0,0010 %	1	0,0010 %
w_2	Tekrar üretilebilirlik bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0055 %	Standart sapma	1	0,0055 %	1	0,0055 %
w_3	Tekrarlanabilir-lik bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0020 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0012 %	1	0,0012 %
w_4	Çözünürlük bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0024 %	Üçgen dağılım	0,408	0,0010 %	1	0,0010 %
w_5	Tersinebilirlik bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0033 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0019 %	1	0,0019 %
w_6	Sıfır değeri kayma bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0020 %	Standart sapma	1	0,0020 %	1	0,0020 %
w_7	Sıcaklık değişimi bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0028 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0016 %	1	0,0016 %
w_8	Enterpolasyon bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0021 %	Standart sapma	1	0,0021 %	1	0,0021 %
F		4,0 kN			Bileşik Belirsizlik		w_c	0,0069 %
					Genişletilmiş Belirsizlik		W	0,0139 %
					Beyan Edilen Belirsizlik (k=2)	$W(y)$	0,014 %	
							4kN ± 0,014 %	

Kalibrasyon sertifikasında diğer basamaklarda benzer şekilde hesaplanmalı ve en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Kuvvet ölçme cihazının ölçüm aralığı, maksimum kapasitenin % 20'si ile % 100'ü arasında belirlenirse bu cihaz için 4 kN ile 20 kN ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri beyan edilir.

Örneğin: 4 kN - 20 kN ölçüm aralığı için ± % 0,014 ölçüm belirsizliğidir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı EN ISO 376 standardına uygun olacak şekilde açıklanmış ve hesapta etkili parametreler verilmiştir. Verilen sayısal örnek ile de hesaplamalarda belirsizlik parametrelerin hesaba nasıl dahil edildikleri gösterilmiştir. Kuvvet ölçme cihazı kalibrasyonu yapan, akredite veya akreditasyona hazırlanan laboratuvarların belirsizlik hesaplamasına yardımcı olmak amacıyla bu çalışma hazırlanmıştır. Bu sayede, konu ile ilgili kişilere belirsizlik hesabı hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] EN ISO 376:2011, Metallic Materials-Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static Verification of Uniaxial Testing Machines.
- [2] Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan,C., 2017, “Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı”, TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2018
- [3] EN 10002-3, 1994, Metallic materials-Tensile Test-Part 3: Calibration of force proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines
- [4] EURAMET CG-04, Uncertainty of Force Measurements Version 2.0, 2011.
- [5] Dizdar, H., Aydemir, B., Vatan, C., 2015, EURAMET CG-04, Kalibrasyon Rehberi, “Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik” TÜBİTAK UME, Şubat 2015
- [6] Dizdar, H., Vatan, C., Aydemir, B., 2015, “Bağıl Enterpolasyon Hatasının Farklı Matematiksel Yöntemlerle Hesaplanması ve Sayısal Örneklenmesi Teknik Raporu”, TÜBİTAK UME, Ocak 2015
- [7] Dizdar, H., Vatan, C., Aydemir, B., 2016, “Kuvvet Ölçümlerinde Bağıl Enterpolasyon Hatasının Farklı Matematiksel Yöntemlerle Hesaplanması ve Sayısal Örneklenmesi”, IMSTEC 2016, October 26-28, 2016, Adana/TURKEY, p.197-205