

Teknik Doküman
(Technical Document)

ISO 7500-1 Standardına Göre Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi

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

Özet

Bu çalışmada, ISO 7500-1 standardına göre tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı kapsamında bilgilere yer verilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen ölçüm verileri kullanılarak tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonunun belirsizliği sayısal bir örnekle hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ISO 7500-1, Tek Eksenli Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu, Ölçüm Belirsizliği

An Investigation and Calculation of Uncertainty in Force Calibration of Uniaxial Static Material Testing Machines according to ISO 7500-1 Standard

Abstract

In this study, it has been focused on force calibration of uniaxial static material testing machines concerning to ISO 7500-1 standard. An investigation and calculation of uncertainty in force calibration of uniaxial static material testing machines has been analyzed by using real measurement data, in additionally; a numerical sample has been detailed for individuals who perform force calibration of uniaxial static material testing machines.

Keywords: ISO 7500-1, Force Calibration of Uniaxial Static Material Testing Machine, 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. Son zamanlarda üretim sonrası kalite kontrol yerine üretim aşamalarında süreçlerin kontrolünün sağlanması, imalatı gerçekleştirilen tüm ürünlerde kalitenin oluşturulmasını sağlayan çok önemli bir faktördür. Bunu başarmanın tek yolu ise;

Bu yayına atıf yapmak için

Dizdar H., Aydemir B., Vatan C., "ISO 7500-1 Standardına Göre Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonunda Belirsizlik Hesabı ve İrdelenmesi" Kuvvet Laboratuvarı Teknik Dokümanı, S.2, N.2, 2019 (12-24)

In order to cite this publication

Dizdar H., Aydemir B., Vatan C., "An Investigation and Calculation of Uncertainty in Force Calibration of Uniaxial Static Material Testing Machines according to ISO 7500-1 Standard" Force Laboratory Technical Document, S.2, N.2, 2019 (12-24)

üretim öncesi, üretim esnasında ve sonrasında kullanılan ölçme ve test cihazlarının doğruluğunun belirlenmesidir. Mekanik özellikleri doğru bilinen malzeme kullanmak dizayn aşamasından ürün aşamasına kadar tüm proseste ekonomik ve daha güvenilir ürünlerin geliştirilmesini ve imalini sağlar. Bu amaç çerçevesinde kullanılan tek eksenli statik malzeme test makinalarının doğruluğunun belirlenmesi ve iyileştirilmesi, doğrudan ürün kalitesine yansiyacaktır. Malzeme test makinalarının doğrulanma ölçümlerinde iki parametre kontrol edilir. Bunlardan birincisi, makinanın çalışma koşullarında kuvvet ölçme sisteminin doğrulanması, ikincisi ise uzama ölçerlerin (ekstansometre) doğrulanmasıdır.

Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet doğrulama işlemleri uluslararası norm ve standartlara göre yapılmalıdır. Doğru ölçüm yapmak için, kullanılan cihaz ve dönüştürücülerin düzenli aralıklarla kalibre edilmiş olması şarttır. Kalibrasyon ve ölçümlerin doğruluğu ve izlenebilirliği ülke içinde kurulmuş bir metroloji ağı ile sağlanır. Bu amaçla, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME) bünyesinde Kuvvet Laboratuvarı faaliyet göstermektedir. Kuvvet laboratuvarının temel görevi kuvvet metrolojisi alanında Türkiye'nin ulusal standartlarını (birincil ve ikincil seviye standartlarını) oluşturmak, muhafaza etmek ve Türkiye çapında referans kuvvet ölçme standartlarının izlenebilirliğini sağlamaktır. Bununla birlikte, kalibrasyon hizmetlerine ek olarak Türk endüstrisinin talepleri doğrultusunda kuvvet metrolojisi konusunda eğitim, danışmanlık ve cihaz yapımı gibi hizmetleride vermek laboratuvarımızın görevleri arasındadır.

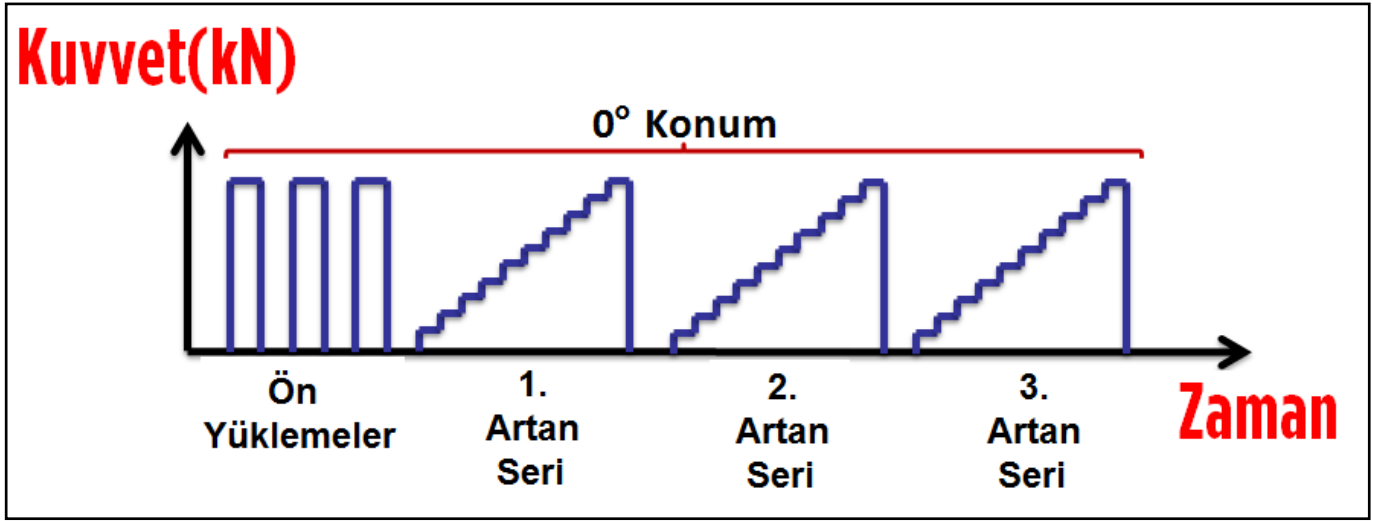
Bu çalışmada, ISO 7500-1 standardına göre tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı kapsamında bilgilere yer verilmiştir. Kalibrasyon sonucunda elde edilen ölçüm verileri kullanılarak tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonunun belirsizliği sayısal bir örnekle hesaplanmıştır [1,2].

2. TEK EKSENLİ STATİK MALZEME TEST MAKİNALARININ KUVVET KALİBRASYONU

Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu ISO 7500-1 standardının 2018 sürümüne göre yapılmaktadır. Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonu kısaca aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir.

Öncelikle, kalibrasyonu yapılacak malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin genel bir muayenesi gerçekleştirilir. Ardından, kalibrasyonda kuvvetin eksenel uygulanmasına imkân verecek ve çalışma güvenliğini bozmayacak bir şekilde, referans kuvvet ölçme cihazı, gerekli çekme veya basma aparatları kullanılarak tek eksenli statik malzeme test makinasına yerleştirilir. Kalibrasyon öncesi, referans kuvvet ölçme cihazının kararlı bir sıcaklığa ulaşabilmesi için yeterli bir sürenin geçmesi beklenir. ISO 376:2011 standardına göre bu süre 30 dakikadan az olmamalıdır. Kalibrasyon 10 °C ile 35 °C arasında bir sıcaklıkta yapılır. Kuvvet ölçme cihazının sıcaklığı her kalibrasyon işlemi sırasında en fazla ± 2 °C aralığında değişim gösterebilir. Referans kuvvet ölçme cihazını tek eksenli statik malzeme test makinasına yerleştirdikten sonra kalibrasyonu yapılacak malzeme test makinasının kuvvet ölçme sistemi kalibrasyonda çıkılacak en yüksek kuvvet değerine kadar yüklenir. Daha sonra yük kaldırılır ve bu işlem üç defa tekrarlanır. Ön yükleme olarak adlandırılan bu işlem kapsamında, maksimum kuvvet değerine yükleme yapmadan önce ve sonra göstergedeki sıfır değeri ve maksimum kuvvet değeri her seferinde birlikte okunup kaydedilir. Referans kuvvet ölçme cihazı üzerine çekme veya basma kuvveti uygulandığında, tüm ölçüm boyunca her ölçüm serisi için 10 kuvvet adımı olmak üzere 3 artan ölçüm serisi uygulanır. Eğer serilerde on kuvvet adımı uygulama imkân yoksa en az sekiz veya en az beş kuvvet adımı uygulaması yapılır. Ayrıca, gerekli olduğu durumlarda veya müşteri talep ediyorsa ilave bir artan azalan ölçüm serisi uygulanır. Tek eksenli statik malzeme test makinasının referans kuvvet ölçme cihazına her kuvvet uygulandığında (her kuvvet adımında) referans kuvvet dönüştürücüsüne bağlı gösterge elemanının kuvvet değeri (F) ve malzeme test makinasının göstergesinden okunan kuvvet değeri (F_i) aynı anda okunup kaydedilir. Her bir ölçüm adımı için, göstergelerden takip edilen ölçüm değerleri, aynı sürelerde alınır. Her ölçüm serisi başlangıcında

göstergelerden okunan sıfır değerleri en az 30 saniye beklemek suretiyle iki göstergeden de aynı anda kaydedilir. Sıfır değerleri her seri bitiminde kaydedilir. Aşağıda, Şekil 1.'de, ISO 7500-1 standardına göre çizilen tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonunda uygulanan kuvvet ile zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 1. ISO 7500-1 standardına uygun kuvvet-zaman grafiği

Tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu kapsamındaki belirsizlik hesaplaması, ISO 7500-1 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. TEK EKSENLİ STATİK MALZEME TEST MAKİNALARININ KUVVET KALİBRASYONUNDA BELİRSİZLİK HESABI

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyonu ISO 7500-1 standardına göre gerçekleştirilir ve kalibrasyon sonucunda ölçüm verileri elde edilir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, ölçüm belirsizlik bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli (tekrarlanabilirlik, çözünürlük, referans standart, sıcaklık, kayma, enterpolasyon denkleminde doğrusal yaklaşım) bileşenler hesaplanır. Aşağıda bu büyüklükler ve bunlara ait tahmini istatistiksel dağılım fonksiyonları verilmiştir. Bu dağılım fonksiyonlarının seçimi deneysel sonuçlara dayanmaktadır. Buna göre, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin kalibrasyonu ölçümünde bileşik belirsizlik aşağıdaki (1) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (1)$$

Genişletilmiş bağlı ölçüm belirsizliği aşağıdaki (2) numaralı formül ile hesaplanır.

$$U = k \times u_C \quad (2)$$

(1) numaralı formüldeki parametrelerin açıklamaları aşağıdadır:

u_i : bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni,

u_C : cihazın toplam bağlı ölçüm belirsizliği bileşeni,

Bu parametrelerin hesabına aşağıda detaylı olarak yer verilmiştir.

3.1 Kalibrasyonda Kullanılan Referans Kuvvet Ölçme Cihazından Kaynaklanan Bağlı Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{std}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının oluşturduğu bağlı belirsizlik bileşenleri (u_{std}) aşağıdaki (3) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2 + u_{approx}^2} \quad (3)$$

3.1.1 Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{cal}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının bağlı belirsizlik bileşeni (u_{cal}), cihazın kalibrasyon sertifikasında beyan edilen en büyük ölçüm belirsizliği değerinin yarısıdır. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{cal} = \frac{W_{ref}}{2} \quad (k = 1,0) \quad (4)$$

W_{ref} : Referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen en büyük bağlı ölçüm belirsizliği değeridir.

3.1.2 Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının kayma değişimi bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{drift}

Referans kuvvet ölçme cihazının gösterge değerinin kayması kapsamında bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{drift}), hesabı için cihazın son kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri (X_r) ile referans kuvvet ölçme cihazının bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalama değeri ($X_{r-önceki}$) arasındaki bağlı farka dikdörtgen dağılım uygulanır. Bu belirsizlik bileşeni aşağıdaki (5) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_{drift} = 100 \times \left| \left(\frac{X_{r-son} - X_{r-önceki}}{X_{r-önceki}} \right) \right| / 2\sqrt{3} \quad (5)$$

3.1.3 Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişimi bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{temp}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ile bu kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının kendi kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri arasındaki fark nedeniyle meydana gelen sıcaklık bağlı ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{temp}) hesabı aşağıdaki (6) numaralı formülün kullanılmasıyla gerçekleştirilir.

$$u_{temp} = |\alpha \times (T_{kal} - T_{sert})| / \sqrt{3} \quad (6)$$

T_{sert} : Referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeridir. (°C)

T_{kal} : Kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığıdır. (°C)

α : Referans kuvvet dönüştürücünün üreticisi tarafından verilen ısı genleşme katsayısıdır. (% · °C⁻¹)

3.1.4 Kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının enterpolasyon denklemine doğrusal yaklaşım bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin hesabı, u_{approx}

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının sertifikasında belirtilen 3. derece polinom eşitliğine doğrusal yaklaşım nedeniyle meydana gelen bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{approx}) aşağıdaki (7) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_{approx} = 100 \times \left| \left(\frac{X_r - X_a}{X_a} \right) \right| / \sqrt{3} \quad (7)$$

X_r : Referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması (mV/V),

X_a : Referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan hesapla (en küçük kareler yöntemi) belirlenmiş gösterge değerleri (mV/V),

3.2 Kalibrasyon Sonuçlarının Tekrarlanabilirliği Bağlı Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{rep}

Kalibrasyon sonuçlarının tekrarlanabilirliği bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{rep}) aşağıdaki (8) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n \times (n-1)} \times \sum_{i=1}^n (q_i - q)^2} \quad (8)$$

n : Kalibrasyondaki ölçüm serisi sayısıdır.

q_i : Kalibrasyondaki her bir ölçüm serisinin bağıl doğruluk hatasıdır.

q : Kalibrasyonda yer alan ölçüm serilerinin ortalama bağıl doğruluk hatasıdır.

3.3 Kalibrasyonu Yapılan Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinasının Kuvvet Gösterge Ekranının Çözünürlüğü Bağlı Ölçüm Belirsizliği Bileşeninin Hesabı, u_{res}

Bazı malzeme test makinalarının kuvvet gösterge ekranı iki veya daha fazla çözünürlük değerine sahiptir. Öyle ki, düşük kuvvet kapasitelerinde, malzeme test makinası yüksek çözünürlük değeriyle çalışırken, yüksek kuvvet kapasitelerinde ise makina gösterge ekranı daha düşük bir çözünürlük değeriyle çalışmaktadır. ISO 7500-1 standardı çözünürlük parametresi için bağıl ölçüm belirsizliğini tanımlarken bu durumu göz önünde bulundurmıştır. Kalibrasyonu yapılan malzeme test makinasının kuvvet gösterge ekranının çözünürlüğü bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni aşağıdaki (9) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_{res} = \sqrt{\left(\frac{a_F}{2\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{a_Z}{2\sqrt{3}} \right)^2} \quad (9)$$

a_F : Malzeme test makinası kuvvet göstergesinin uygulanan her bir yükteki bağıl çözünürlük hatası,

a_Z : Malzeme test makinası kuvvet göstergesinin sıfır yük değerindeki bağıl çözünürlük hatası,

3.4 Bileşik Bağlı Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, u_c :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm bağlı ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik bağlı ölçüm belirsizlik değeri aşağıdaki (10) numaralı formül ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} = \sqrt{u_{std}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2} \quad (10)$$

3.5 Genişletilmiş Bağlı Ölçüm Belirsizliğinin Hesabı, U :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, genişletilmiş bağlı ölçüm belirsizliğinin hesabı, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için ($k=2,0$) değerinde alınması ve kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi çerçevesinde, hesaplanan bileşik bağlı ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı olarak aşağıdaki (11) numaralı formül ile hesaplanır.

$$U = k \cdot u_c \quad (11)$$

3.6 Tahmini Ortalama Bağlı Hata Değerinin Hesabı, E :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu sonucu hesaplanan tahmini ortalama bağlı hata (E) değeri, aşağıdaki (12) numaralı formül ile hesaplanır.

$$E = q \pm U \quad (12)$$

q : Kalibrasyonda yer alan ölçüm serilerinin ortalama bağlı doğruluk hatasıdır.

U : Kalibrasyon ölçüm verilerinin değerlendirilmesi sonucu hesaplanan genişletilmiş bağlı ölçüm belirsizliğidir.

3.7 Azalan Kuvvetler Alındığında Tahmini Ortalama Bağlı Hata Değerinin Hesabı, E' :

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda müşterinin isteği doğrultusunda yada azalan yönde kuvvet okuması yapıldığı durumlarda bir seride (genellikle 3 seri sonunda) azalan yönde de kuvvet değerleri alınır. Azalan kuvvetler için, birleşik belirsizlik, u_c' , bağlı doğruluk (q) ve bağlı tersinebilirlik (v) hatası değerlerinin katkılarından hesaplanabilir. Bağlı tersinebilirlik (v) hatası değerinin belirsizlik katkısının, artan yöndeki doğruluk hatası q ile aynı olduğu varsayılır. ISO 7500-1 standardının Ek C.2.6 başlığı altında verildiği şekilde, birleşik belirsizlik u_c' formül (13)'de gösterildiği gibi tahmin edilmiştir:

$$u_c' = \sqrt{2} \cdot u_c \quad (13)$$

$$U' = k \cdot u_c' \quad (14)$$

Azalan yönde kuvvet değerleri alındığında hesaplanan tahmini ortalama bağlı hata (E') değeri, aşağıdaki (15) numaralı formül ile hesaplanır.

$$E' = (q + v) \pm U' \quad (15)$$

q: Kalibrasyonda yer alan ölçüm serilerinin ortalama bağıl doğruluk hatasıdır.

v: Kalibrasyonda yer alan azalan ölçüm serisinin bağıl tersinebilirlik hatasıdır

U': Kalibrasyon ölçüm verilerinin değerlendirilmesi sonucu azalan kuvvet değerleri dikkate alınarak hesaplanan genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğidir.

3.8 Kalibrasyon Sonucu Hesaplanan Bağıl Ölçüm Belirsizliğinin Raporlanması

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazlarının ISO 7500-1 standardına göre gerçekleştirilen kalibrasyon işleminin değerlendirmesi sürecinde, bu teknik dokümanda yer alan (1) ile (12) arasındaki formüller kullanılarak belirsizlik bileşenleri ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği hesaplanır. Ölçüm aralığı, aksi belirtilmediği sürece genel olarak tek eksenli statik malzeme test makinasının 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 bağıl ölçüm belirsizliği olarak beyan edilir.

4. TEK EKSENLİ STATİK MALZEME TEST MAKİNALARININ KUVVET KALİBRASYONUNDA BELİRSİZLİK ÖRNEK HESABI

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme sisteminin, ISO 7500-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen kalibrasyonu sonucunda elde edilen ölçüm verileri Tablo 1.'de verilmiştir [1].

Tablo 1. Örnek kalibrasyon ölçüm verileri

Kuvvet Değerleri kN	1. Seri (Artan)		2. Seri (Artan)		3. Seri (Artan)	
	F_1 kN	X_1 mV/V	F_2 kN	X_2 mV/V	F_3 kN	X_3 mV/V
0,0	0,000	0,00000	0,000	0,00000	0,000	0,00000
1,0	1,000	0,10532	1,000	0,10538	1,002	0,10563
2,0	2,004	0,21112	2,000	0,21085	2,000	0,21083
3,0	3,000	0,31613	3,001	0,31635	3,003	0,31647
4,0	4,001	0,42152	4,001	0,42163	4,001	0,42170
5,0	4,999	0,52668	5,000	0,52700	5,002	0,52721
6,0	6,000	0,63221	6,004	0,63272	6,049	0,63750
7,0	7,001	0,73774	7,001	0,73779	7,001	0,73776
8,0	8,001	0,84302	8,001	0,84323	8,000	0,84314
9,0	9,001	0,94847	9,001	0,94846	9,001	0,94860
10,0	10,001	1,05383	10,001	1,05402	10,000	1,05375
0,0	0,000	-0,00031	0,003	0,00023	0,001	0,00000

Tablo 1.'de yer alan 3 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, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonu sonucu, elde edilen bağıl ölçüm belirsizliği değeri olarak sertifikada beyan edilmelidir. Bu kapsamda öncelikle, Tablo 2.'de verilen enterpolasyon denklemi ve (a,b,c) enterpolasyon katsayıları kullanılarak referans kuvvet ölçme cihazından okunan gösterge değerleri (mV/V) biriminden (kN) birimine dönüştürülür.

Tablo 2. Referans kuvvet ölçme cihazının gösterge değerlerinin dönüştürülmesi için enterpolasyon denklemi ve enterpolasyon katsayıları

$F(kN)=a \cdot X(mV/V)+b \cdot X^2(mV/V)^2+c \cdot X^3(mV/V)^3$ 3. derece polinom eşitlik	
<i>a- enterpolasyon katsayısı</i>	9,47673891 kN/(mV/V)
<i>b- enterpolasyon katsayısı</i>	0,00418950 kN/(mV/V) ²
<i>c- enterpolasyon katsayısı</i>	-0,00438964 kN/(mV/V) ³

Referans kuvvet ölçme cihazından okunan her bir gösterge değerinin (X_1, X_2, X_3); (mV/V) biriminden (kN) birimine dönüşümü için, referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan enterpolasyon denklemi ve (a,b,c) enterpolasyon katsayıları kullanılır. Bu işlem aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$F_1 = a \cdot X_1 + b \cdot X_1^2 + c \cdot X_1^3$$

$$F_1 = 9,47673891 \times 0,31613 + 0,00418950 \times 0,31613^2 - 0,00438964 \times 0,31613^3$$

$$F_1 = 2,996 \text{ kN}$$

$$F_2 = a \cdot X_2 + b \cdot X_2^2 + c \cdot X_2^3$$

$$F_2 = 9,47673891 \times 0,31635 + 0,00418950 \times 0,31635^2 - 0,00438964 \times 0,31635^3$$

$$F_2 = 2,998 \text{ kN}$$

$$F_3 = a \cdot X_3 + b \cdot X_3^2 + c \cdot X_3^3$$

$$F_3 = 9,47673891 \times 0,31647 + 0,00418950 \times 0,31647^2 - 0,00438964 \times 0,31647^3$$

$$F_3 = 2,999 \text{ kN}$$

Yukarıdaki hesap yöntemi esas alınarak Tablo 1.'de yer alan tüm kuvvet değerleri için referans kuvvet ölçme cihazından okunan her bir gösterge değeri (kN) birimine dönüştürülür. Aşağıda Tablo 3.'te her bir nominal kuvvet değeri için, kalibrasyonu yapılacak malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazından okunan kuvvet değerleri ve birim dönüşümü yapılmış referans kuvvet ölçme cihazının gösterdiği değerler yer almaktadır.

Tablo 3. Her bir nominal kuvvet değeri için, kalibrasyonu yapılacak malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazından okunan kuvvet değerleri ve birim dönüşümü yapılmış referans kuvvet ölçme cihazının gösterdiği kuvvet değerleri

Kuvvet Değerleri kN	1. Seri (Artan)		2. Seri (Artan)		3. Seri (Artan)	
	F_{1i} kN	F_1 kN	F_{2i} kN	F_2 kN	F_{3i} kN	F_3 kN
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	1,000	0,998	1,000	0,999	1,002	1,001
2,0	2,004	2,001	2,000	1,998	2,000	1,998
3,0	3,000	2,996	3,001	2,998	3,003	2,999
4,0	4,001	3,995	4,001	3,996	4,001	3,997
5,0	4,999	4,992	5,000	4,995	5,002	4,997
6,0	6,000	5,992	6,004	5,997	6,049	6,042
7,0	7,001	6,992	7,001	6,992	7,001	6,992
8,0	8,001	7,989	8,001	7,991	8,000	7,991
9,0	9,001	8,988	9,001	8,988	9,001	8,990
10,0	10,001	9,986	10,001	9,988	10,000	9,986
0,0	0,000	-0,003	0,003	0,002	0,001	0,000

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{cal}), cihazın kalibrasyon sertifikasında beyan edilen en büyük belirsizlik değerinin yarısıdır. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{cal} = \frac{0,045}{2} = \%0,023 \quad (k = 1,0)$$

$$u_{cal} = \% 0,023$$

Referans kuvvet ölçme cihazının gösterge değerinin kayması kapsamında bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{drift}) hesabı için, cihazın son kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması (X_r) ile referans kuvvet ölçme cihazının bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması (X_r) arasındaki bağıl farka dikdörtgen dağılım uygulanır. Bu örnekte, referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması $X_{r-son} = 1,05591$ mV/V ve aynı cihazın bir önceki kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması $X_{r-önceki} = 1,05545$ mV/V olarak alınırsa, referans kuvvet ölçme cihazının dönümlü gösterge değerinin kayması kapsamında bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{drift}) hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

$$u_{drift} = 100 \times \left| \left(\frac{(X_{r-son} - X_{r-önceki})}{X_{r-önceki}} \right) \right| / 2\sqrt{3}$$

$$u_{drift} = 100 \times \left| \left(\frac{(1,05591 - 1,05545)}{1,05545} \right) \right| / 2\sqrt{3} = \%0,013$$

$$u_{drift} = \% 0,013$$

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ile bu kalibrasyonda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının kendi kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri arasındaki fark nedeniyle meydana gelen sıcaklık bağıl belirsizlik bileşeninin (u_{temp}) hesabı aşağıdaki gibidir.

Bu örnekte, referans kuvvet ölçme cihazının son kalibrasyon sertifikasında belirtilen sıcaklık değeri $T_{sert} = 21$ °C, kalibrasyonun gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı ise $T_{kal} = 25$ °C, referans kuvvet dönüştürücü malzemesinin ısı genleşme katsayısı $\alpha = \% 0,00150$ °C⁻¹ olarak alınmıştır.

$$u_{temp} = |\alpha \times (T_{kal} - T_{sert})| / \sqrt{3}$$

$$u_{temp} = |0,00150 \times (25 - 21)| / \sqrt{3} = \%0,003$$

$$u_{temp} = \% 0,003$$

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının sertifikasında belirtilen 3. derece polinom eşitliğine doğrusal yaklaşım nedeniyle oluşan bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{approx}) hesabı aşağıdaki gibidir.

Bu örnekte, referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer alan dönümlü gösterge değerlerinin ortalaması $X_r = 0,21100$ mV/V, referans kuvvet ölçme cihazının kalibrasyon sertifikasında yer

alan hesapla (en küçük kareler yöntemi) belirlenmiş gösterge değeri $X_a = 0,21103$ mV/V olarak alınmıştır. X_r ve X_a değerleri arasındaki en büyük bağıl fark, 1 kN ile 10 kN arasındaki kuvvet ölçüm aralığında seçilmiştir.

$$u_{approx} = 100 \times \left| \left(\frac{X_r - X_a}{X_a} \right) \right| / \sqrt{3} = 100 \times \left| \left(\frac{0,21100 - 0,21103}{0,21103} \right) \right| / \sqrt{3} = \%0,008$$

$$u_{approx} = \% 0,008$$

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda kullanılan referans kuvvet ölçme cihazının oluşturduğu bağıl belirsizlik bileşenleri (u_{std}) aşağıda gibi hesaplanır.

$$u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{temp}^2 + u_{approx}^2}$$

$$u_{std} = \sqrt{0,023^2 + 0,013^2 + 0,003^2 + 0,008^2} = \%0,027$$

$$u_{std} = \% 0,027$$

3 kN kuvvet basamağındaki her bir artan ölçüm serisi için, bağıl doğruluk hatası (q_1, q_2, q_3) değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$q_1 = 100 \times \left(\frac{F_{1i} - F_1}{F_1} \right) = 100 \times \left(\frac{3,000 - 2,996}{2,996} \right) = \%0,141$$

$$q_2 = 100 \times \left(\frac{F_{2i} - F_2}{F_2} \right) = 100 \times \left(\frac{3,001 - 2,998}{2,998} \right) = \%0,092$$

$$q_3 = 100 \times \left(\frac{F_{3i} - F_3}{F_3} \right) = 100 \times \left(\frac{3,003 - 2,999}{2,999} \right) = \%0,121$$

Her bir artan ölçüm serisi için, hesaplanan bağıl doğruluk hatası değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak ölçümün bağıl doğruluk hatası (q) aşağıda gösterildiği gibi belirlenir.

$$q = \frac{(q_1 + q_2 + q_3)}{3} = \frac{(0,141 + 0,092 + 0,121)}{3} = \%0,118$$

3 kN kuvvet basamağındaki 3 artan ölçüm serisi için, tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeninin (u_{rep}) hesabı aşağıdaki gibidir.

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n \times (n-1)} \times \sum_{i=1}^n (q_i - q)^2} = \sqrt{\frac{1}{3 \times (3-1)} \times [(q_1 - q)^2 + (q_2 - q)^2 + (q_3 - q)^2]}$$

$$u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{6} \times [(0,141 - 0,118)^2 + (0,092 - 0,118)^2 + (0,121 - 0,118)^2]} = \%0,014$$

n : Kalibrasyondaki seri sayısıdır, bu örnekte 3 artan ölçüm serisi vardır.

q_i : 3 kN kuvvet basamağında her bir serinin bağıl doğruluk hatasıdır.

q : 3 kN kuvvet basamağında yer alan üç artan serinin ortalama bağıl doğruluk hatasıdır.

$$u_{rep} = \% 0,014$$

Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşenini (u_{res}) hesaplamak için öncelikle tek eksenli statik malzeme test makinasının bağıl çözünürlük hatasının belirlenmesi gerekir. Bu örnekte, malzeme test makinasının çözünürlüğü (r), tüm kuvvet değerleri için 0,001 kN alınmıştır. Bu nedenle 3 kN'luk kuvvet değeri için, malzeme test makinasının kuvvet gösterge ekranının uygulanan her bir yükteki bağıl çözünürlük hatası (a_F) ve sıfır yük değerindeki bağıl çözünürlük hatası (a_Z), aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$a_F = 100 \times \frac{r}{F_i} = 100 \times \frac{0,001 \text{ kN}}{3,001 \text{ kN}} = \% 0,033$$

$$a_Z = 100 \times \frac{r}{F_i} = 100 \times \frac{0,001 \text{ kN}}{3,001 \text{ kN}} = \% 0,033$$

3 kN kuvvet değerinde tek eksenli statik malzeme test makinasının çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni (u_{res}) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$u_{res} = \sqrt{\left(\frac{a_F}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_Z}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,033}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,033}{2\sqrt{3}}\right)^2} = \% 0,013$$

$$u_{res} = \% 0,013$$

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonunda etkin olan tüm bağıl ölçüm belirsizliği bileşenleri kullanılarak, bileşik bağıl ölçüm belirsizliği değeri aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{res}^2 + u_{std}^2}$$

$$u_c = \sqrt{0,014^2 + 0,013^2 + 0,027^2} = \% 0,034$$

$$u_c = \% 0,034$$

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonunda, genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği, kapsam faktörünün tahmini istatistiksel dağılımın % 95 güvenilirlik seviyesi için ($k=2,0$) değerinde alınması ve bu örnekte hesaplanan bileşik bağıl ölçüm belirsizlik değerinin kapsam faktörü ile çarpımı sonucu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,034 = \% 0,067$$

$$U = \% 0,067$$

3 kN nominal kuvvet değeri için, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu sonucu hesaplanan tahmini ortalama bağıl hata (E) değeri, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E = q \pm U = \%(0,118 \pm 0,067)$$

$$E = \%(0,118 \pm 0,067)$$

3 kN nominal kuvvet değeri için, azalan kuvvet değeri alınmış olsa ve tersinebilirlik hatası değeri $v = \% 1,39$ olarak hesaplandığını kabul edersek, tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet kalibrasyonu sonucu azalan kuvvetler alındığında hesaplanan tahmini ortalama bağıl hata (E') değeri, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U' = k \cdot u_c' = k \cdot (\sqrt{2} \cdot u_c) = 2 \cdot (\sqrt{2} \cdot 0,034) = \% 0,096$$

$$E' = q + v \pm U' = \%(0,118 + 1,39 \pm 0,096) = \%(1,58 \pm 0,096)$$

Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının, ISO 7500-1 standardına uygun olarak gerçekleştirilen örnek kalibrasyon hesabı neticesinde bağıl belirsizlik bileşenleri, tahmini değer, olasılık dağılımı, duyarlılık katsayısı ve belirsizlik katkısı parametrelerinden oluşan bilgiler aşağıda Tablo 4.'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Referans kuvvet ölçme cihazı ile kalibre edilen tek eksenli statik malzeme test makinası kuvvet ölçme cihazı örnek hesabı sonucundaki belirsizlik bileşenleri ve katkıları

Girdi Büyüklüğü			Belirsizlik Bileşeni				Duyarlılık Katsayısı C_i	Belirsizliğe Katkısı $u_i(x_i)$
Sembol	Tanım	Tahmini Değeri x_i	Değeri	Olasılık Dağılımı	Çarpan	Standart Belirsizlik $u(x_i)$		
U_{cal}	Referans kuvvet ölçme cihazının bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni	0,118 %	0,0450 %	Normal dağılım	0,5	0,0225 %	1 %	0,0225 %
U_{drift}	Referans kuvvet ölçme cihazının kayma (drift) değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0225 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0130 %	1 %	0,0130 %
U_{temp}	Referans kuvvet ölçme cihazının sıcaklık değişimi bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0060 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0035 %	1 %	0,0035 %
U_{approx}	Referans kuvvet ölçme cihazının interpolasyon yaklaşımı bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0142 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0082 %	1 %	0,0082 %
U_{rep}	Tekrarlanabilirlik bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0140 %	Standart sapma	1	0,0140 %	1 %	0,0140 %
U_{res}	Çözünürlük bağıl ölçüm belirsizliği bileşeni		0,0233 %	Dikdörtgen dağılım	0,577	0,0135 %	1 %	0,0135 %
q		0,118 %			Bileşik Belirsizlik		u_c	0,0336 %
					Genişletilmiş Belirsizlik		U	0,0673 %

Kalibrasyon sertifikasında diğer basamaklarda benzer şekilde hesaplanmalı ve elde edilen en büyük değer cihazın belirsizlik değeri olarak sertifikada belirtilmelidir. Tek eksenli statik malzeme test makinasının kuvvet ölçme cihazının ölçüm aralığı, maksimum kapasitenin % 20'si ile % 100'ü arasında belirlenirse bu cihaz için 2 kN ile 10 kN ölçüm aralığında her kuvvet basamağı için hesaplanan en büyük belirsizlik değeri beyan edilir. Örneğin: 2 kN - 10 kN ölçüm aralığı için en büyük bağıl doğruluk ve en büyük bağıl ölçüm belirsizliği değeri 3 kN kuvvet adımıyla elde edildiği kabul edilirse, kalibrasyon sonucu tahmini ortalama bağıl hata beyanı aşağıdaki gibi yapılır.

$$E = \% (0,118 \pm 0,067)$$

Eğer azalan yönde kuvvet değerleri alınırsa, hesaplanan tahmini ortalama bağıl hata (E') değeri beyanı ise aşağıdaki gibi yapılır.

$$E' = \% (0,118 + 1,39 \pm 0,096)$$

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu teknik dokümanda, tek eksenli statik malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonu ve belirsizlik hesabı ISO 7500-1 standardına uygun olacak şekilde açıklanmıştır. Verilen sayısal örnek ile kalibrasyondaki bağıl ölçüm belirsizliği parametrelerinin hesaba nasıl dahil edildikleri gösterilmiştir. Bu çalışma, malzeme test makinalarının kuvvet kalibrasyonunu yapan, akredite veya akreditasyona hazırlanan laboratuvarların belirsizlik hesaplamasına yardımcı olmak amacıyla hazırlanmıştır. Böylece, konu ile ilgili kişilere belirsizlik hesabı hakkında detaylı ve doğru bir bilgi iletilmesi hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] ISO 7500-1:2018, Metallic Materials-Verification of Static Uniaxial Testing Machines Tension/Compression Testing Machines-Verification and Calibration of the Force-Measuring Systems.
- [2] Aydemir, B., Dizdar, H., Vatan, C., "Tek Eksenli Statik Malzeme Test Makinalarının Kuvvet Kalibrasyonu Eğitim Dokümanı", TÜBİTAK UME Gebze-Kocaeli, Mayıs 2018
- [3] ISO 376:2011, Metallic Materials-Calibration of Force-proving Instruments Used for the Static 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