KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TORK DÖNÜŞTÜRÜCÜ KALİBRASYONU VE ÇEVRESEL KOŞULLARIN ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

MAHMUT BARIŞ TUĞCU

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TORK DÖNÜŞTÜRÜCÜ KALİBRASYONU VE ÇEVRESEL KOŞULLARIN ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

MAHMUT BARIŞ TUĞCU

Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof. Dr. Sedat KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Dr. Öğr. Üyesi İlknur KOÇAŞ KOZBE
Jüri Üyesi, Gedik Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlamamda yardımcı olan başta hocam Prof. Dr. Erol FEYZULLAHOĞLU'na, metroloji, matematiksel modelleme, ölçüm belirsizliği ve tork kalibrasyonu konusunda bilgi ve tecrübesini benimle paylaşmaktan çekinmeyen ve pek çok konuda ufkumu aydınlatan TÜBİTAK UME'den Mak. Yük. Müh. Çetin DOĞAN'a, her daim destekte bulunan eşim, annem, babam ve abime çok teşekkür ederim.

Mayıs – 2018 Mahmut Barış TUĞCU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vi
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Metroloji 4
1.1.1. Metrolojinin sınıflandırılması 4
1.1.2. Ölçüm standartları 4
1.1.3. İzlenebilirlik 5
2. TORK DÖNÜŞTÜRÜCÜLER 7
2.1. Tork Dönüştürücülerin Tanımı ve Kullanım Alanları 7
2.2. Tork Dönüştürücülerin Çalışma Prensibi 9
2.3. Gerinim Ölçerler Üzerinde Sıcaklık Değişiminin Etkisi 11
2.4. Gerinim Ölçerler Üzerinde Nem Değişiminin Etkisi 13
3. TORK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN KALİBRASYONU 15
3.1. Kalibrasyon Yöntemleri 15
3.2. Statik Tork Kalibrasyon Yöntemleri ve Makineleri 16
3.2.1. Ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makineleri 16
3.2.2. Referans tork dönüştürücülü tork kalibrasyon makineleri 18
3.3. Kalibrasyon Kademeleri 19
3.3.1. Tork ölçüm cihazlarının tanımlanması 19
3.3.2. Aşırı yüklenme testi 20
3.3.3. Gösterge cihazının çözünürlüğü 20
3.3.4. Sıcaklık dengelenmesi 20
3.3.5. Dönüştürücüye ait sıfır sinyali 20
3.3.6. Dönüştürücünün kalibrasyon makinesine montajı 21
3.3.7. Hizalama 21
3.4. Kalibrasyonun Yapılması 21
3.4.1. Ön yükleme 21
3.4.2. Montaj pozisyonu 22
3.4.3. Kalibrasyonun yapılacağı ölçüm aralığı 22
3.4.4. Yükleme koşulları ve çevre şartları 23
3.4.5. Sıfır değeri için düzeltilmiş gösterge değeri Xj (M_K) 23
3.4.6. Tork ölçüm cihazının sınıflandırılması 23
3.4.7. Belirsizlik kriterlerinin hesaplanması 24
3.4.7.1. Ortalama değerler $Y_h(M_K)$, $Y(M_K)$ 25
3.4.7.2. Yeniden üretilebilirlik hatası b(MK) ve tekrarlanabilirlik hatası b'(MK) 26
3.4.7.3. Sıfır hatası f_0 27

3.4.7.4. Tersinirlik hatası h(MK) ... 27
3.4.7.5. Enterpolasyon hatası f_a(MK) ... 27
3.4.7.6. Gösterge hatası f_q(MK) ... 28
3.4.7.7. Kısa dönem kayma ... 28
3.4.8. Tork dönüştürücülerin genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması ... 28
3.4.8.1. Matematiksel model ... 28
3.4.8.2. Ölçüm belirsizliği bütçesi ... 29
3.4.8.3. Durum I için genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması W(M_K) ... 30
3.4.8.4. Durum II için bağıl belirsizlik aralığının hesaplanması W´(M_K) ... 31
3.4.9. Kalibrasyon sertifikası ... 32
3.5. Yüksek Lisans Tezinin Amacı ... 33
3.6. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar ... 35
4. DENEYSEL ÇALIŞMA ... 40
4.1. Ölçümlerde Kullanılan Ekipmanlar ve Test Prosedürü ... 40
4.1.1. Referans cihaz (ölü ağırlıklı tork ölçüm makinesi) ... 41
4.1.2. Test cihazı (tork dönüştürücü ve gösterge ekipmanı) ... 41
4.1.3. Ortam şartları ölçüm ve kontrolü ... 42
4.1.4. Bağlantı ekipmanları (kaplinler ve flanşlar) ... 43
4.1.5. Ölçümler esnasında kullanılan yazılım ... 45
4.2. Ölçümler Üzerinde Etkisi İncelenen Çalışma Şartları ve Ortam Koşulları ... 46
4.3. Uygulama ... 47
4.4. Kalibrasyon adımları ... 47
4.5. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi ... 48
5. BULGULAR VE TARTIŞMA ... 50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ... 56
6.1. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar ... 58
KAYNAKLAR ... 60
EKLER ... 63
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER ... 91
ÖZGEÇMİŞ ... 92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Torkun oluşumu 3
Şekil 1.2. İzlenebilirlik piramidi 5
Şekil 1.3. Tork ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri 6
Şekil 2.1. Tork ve güç ölçümünde kullanılan cihazların şematik sıralanışı 8
Şekil 2.2. Ölçümlerde kullanılan tork dönüştürücünün sisteme bağlanmış hali 9
Şekil 2.3. Çeşitli şekil ve tiplerde gerinim ölçerler 9
Şekil 2.4. Wheatstone köprüsüne bağlanmış bir gerinim ölçer 10
Şekil 2.5. Hassasiyet ve nominal tork arasındaki ilişki 11
Şekil 3.1. Ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makinesinin çalışma prensibi 16
Şekil 3.2. TKM II Ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makinesi 17
Şekil 3.3. TKM III Referans tork dönüştürücülü tork kalibrasyon makinesi 19
Şekil 3.4. 22 °C sabit sıcaklık ve değişken nem durumunda sinyal değişimi 38
Şekil 3.5. 31 °C sabit sıcaklık ve değişken nem durumunda sinyal değişimi 38
Şekil 3.6. % 50 sabit nem değerinde sıcaklık artışının sinyal değişimindeki etkisi 39
Şekil 3.7. % 80 sabit nem değerinde sıcaklık artışının sinyal değişimindeki etkisi 39
Şekil 4.1. Ölçümler esnasında kullanılan gösterge ekipmanı ve tork dönüştürücü 42
Şekil 4.2. TKM II, tork dönüştürücü ve sıcaklık problarının genel görünüşü 43
Şekil 4.3. Ölçümlerde kullanılan kaplin 44
Şekil 4.4. Ölçümlerde kullanılan ETP-Techno model flanşlar 45
Şekil 4.5. Ölçümlerin kaydedilmesinde kullanılan TKM II yazılımı 46
Şekil 4.6. Farklı montaj pozisyonları için kalibrasyon gidişat örnekleri 48
Şekil 5.1. % 45 nem değerinde sıcaklık - ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-A) 50
Şekil 5.2. % 45 nem değerinde sıcaklık - ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-B) 51
Şekil 5.3. % 45 nem değerinde sıcaklık – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum II) 51
Şekil 5.4. 21 °C sıcaklık değerinde nem – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-A) 52
Şekil 5.5. 21 °C sıcaklık değerinde nem – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-B) 52
Şekil 5.6. 21 °C sıcaklık değerinde nem – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum II) 53

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Tork dönüştürücü kalibrasyonunda gerekli minimum ölçüm serisi sayıları 22
Tablo 3.2. Cihaz sınıfına göre kalibrasyon adım sayıları..... 23
Tablo 3.3. Tork ölçüm cihazları için sınıflandırma kriterleri..... 24
Tablo 3.4. Belirsizlik kriterlerinin hesaplanabilmesi için kullanılan dağılım fonksiyonları..... 30
Tablo 4.1. TSE GKM'de bulunan tork kalibrasyon makineleri 41
Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan TKM II referans cihazı..... 41
Tablo 4.3. Kalibrasyonu yapılan tork dönüştürücü ve gösterge cihazı 42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

M	:	Tork, (N·m)
M_{nom}	:	Nominal tork, (N·m)
M_A	:	Ölçüm aralığının altı sınırı, (N·m)
M_E	:	Ölçüm aralığının üst sınırı, (N·m)
M_K	:	Kalibrasyonun yapıldığı tork adımı, (N·m)
ÇS	:	Gösterge cihazından okunan çıkış sinyali (örn. N·m, mV/V, V, Hz)
I	:	Gösterge elemanından okunan sıfır düzeltmesi yapılmamış değer (ÇS)
I_s	:	Laboratuvara gelmeden önce ve yatay pozisyonda cihaza ait gösterge değeri (dönüştürücünün sıfır sinyali), (ÇS)
$I_{0,j}$	:	j montaj pozisyonunda yükleme öncesi okunan değer (sıfır sinyali), (ÇS)
$I_{f,j}$	:	j montaj pozisyonu sonrası okunan değer, (ÇS)
$I_j(M_K)$	:	j montaj pozisyonunda artan yönde, kalibrasyonun yapıldığı tork değeri M_K'ya ait gösterge değeri, (ÇS)
$I'_j(M_K)$	:	j montaj pozisyonunda azalan yönde, kalibrasyonun yapıldığı tork değeri M_K'ya ait gösterge değeri, (ÇS)
X	:	Gösterge elemanından okunan sıfır düzeltmesi yapılmış değer, (ÇS)
$X_j(M_K)$	:	j montaj pozisyonunda artan yönde, kalibrasyonun yapıldığı tork değeri M_K'ya ait sıfır düzeltmesi yapılmış gösterge değeri, (ÇS)
$X'_j(M_K)$	:	j montaj pozisyonunda azalan yönde, kalibrasyonun yapıldığı tork değeri M_K'ya ait sıfır düzeltmesi yapılmış gösterge değeri, (ÇS)
Y	:	Ortalama değer (kalibrasyon sonucu), (ÇS)
$Y(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'da tersinirlik dahil edilmemiş ortalama değer (durum I), (ÇS)
$Y_h(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'da tersinirlik dahil edilmiş ortalama değer (durum II), (ÇS)
Y_E	:	Ölçüm aralığının üst limiti M_E'deki ortalama değer, (ÇS)
$Y_a(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'da tersinirlik dahil edilmeden hesaplanmış enterpolasyon değeri (durum I), (ÇS)
$Y_{ah}(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'da tersinirlik dahil edilerek hesaplanmış enterpolasyon değeri (durum II), (ÇS)
$b(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait yeniden üretilebilirlik (kesinlik), (ÇS)
$b'(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait tekrarlanabilirlik, (ÇS)
$f_a(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait enterpolasyon hatası, (ÇS)
$f_q(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait gösterge değeri hatası, (ÇS)
f_0	:	Sıfır hatası, (ÇS)
$h(M_K)$	:	Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait tersinirlik hatası, (ÇS)
r	:	Gösterge cihazının çözünürlüğü, (ÇS)

$w_{ref}(M_K)$: Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait kalibrasyon laboratuvarının standart bağıl ölçüm belirsizliği, (%)

$W_{ref}(M_K)$: Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait kalibrasyon laboratuvarının genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği, (%)

$w(M_K)$: Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait enterpole edilmiş değerlerin standart bağıl ölçüm belirsizliği, (%)

$W(M_K)$: Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait enterpole edilmiş değerlerin genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği, (%)

$W'(M_K)$: Herhangi bir kalibrasyon adımı M_K'ya ait enterpole edilmiş değerlerin bağıl ölçüm belirsizliği aralığı, (%)

Kısaltmalar

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)

DIN : Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)

PTB : Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü)

TSE Türk Standardları Enstitüsü

TORK DÖNÜŞTÜRÜCÜ KALİBRASYONU VE ÇEVRESEL KOŞULLARIN ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Otomotiv, havacılık, taşıma, güç aktarımı ve türbin gibi dönel hareketin söz konusu olduğu pek çok alanda, tork dönüştürücüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde üretimi yapılan ve kullanım alanı en geniş dönüştürücüler, gerinim ölçerler yardımı ile ölçüm işlemini gerçekleştirmektedirler. Bu ölçüm işlemi, dönüştürücülerin yüksek maliyet ve düşük bakım gerektiren alanlarda kullanılması sebebiyle önem arz eden ve belirli periyotlarda kontrol edilmesi gereken bir husustur. Tork dönüştürücüler de bu sebeple ölü ağırlıklı kalibrasyon makineleri ve referans tork dönüştürücü sistemler gibi test makineleri yardımıyla kalibre edilmektedirler.

Tork dönüştürücüler, üzerinde barındıkları gerinim ölçerler sebebiyle sıcaklık ve nem gibi çeşitli ortam şartlarından etkilenme ve ölçüm sonuçlarında beklenen değerlerden sapma riski altındadırlar. Bu sebeple, bu etkenlerin kontrol altında tutulması, eğer bu mümkün değilse etkilerin ölçüm sonuçlarına olan katkısı dikkate alınmalıdır.

Türk Standardları Enstitüsü Tork Kalibrasyon Laboratuvarı'nda, tork dönüştürücüler üzerindeki sıcaklık ve nem değişimin ölçüm belirsizliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla bu deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca ölçümler DIN 51309 standardına göre yapılmış, sıcaklık ve nem değerleri sırasıyla sabit tutularak diğer etkenin değişiminin ölçüm belirsizliğine olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, test ortamındaki optimum sıcaklık ve nem değerleri belirlenerek kalibrasyondaki ölçüm belirsizliklerinin azaltılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, en düşük ölçüm belirsizliğinin 21 °C'de ve % 50 nem değerinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan uzaklaşıldıkça, ölçüm belirsizliği değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çevresel Şartlar, Kalibrasyon, Ölçüm Belirsizliği, Ölü-Ağırlık, Tork Dönüştürücü.

TORQUE TRANSDUCER CALIBRATION AND ANALYSIS OF THE EFFECTS OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON MEASUREMENT UNCERTAINTY

ABSTRACT

Torque transducers are mostly used in industry, such as automotive, aerospace, transport, power transmission and rotary motion. A transducer is a mechanical device that converts an energy form to another energy form. This measurement process is crucial because of the high cost and low maintenance aimed areas, and should be checked at certain intervals. Therefore torque transducers are calibrated by using machines such as dead weight calibration machines and reference torque transducer systems.

Torque transducers are at risk of being affected by various environmental conditions such as temperature and humidity, and deviating from expected measurement results due to strain gauges on them. For this reason, these factors should be kept under control, if this is not possible, the contribution of the effects to the measurement results should be taken into consideration.

This experimental study has been carried out in the Turkish Standards Institute Gebze Torque Calibration Laboratory to examine the effects of temperature and humidity change on torque transducers' measurement uncertainty. In this study, the measurements were made according to DIN 51309, and the effect of other parameter changes on measurement uncertainty, while temperature and humidity kept constant in turn, was investigated. In this study, the goal was to reduce measurement uncertainty of the calibration by determining optimum temperature and humidity values in the test environment. From the results obtained, the lowest measurement uncertainty was found at 21 ° C temperature and 50% humidity. As the distance from these results deteriorated, the measurement uncertainty values increased.

Keywords: Enviromental Conditions, Calibration, Measurement Uncertainty, Dead-Weight, Torque Transducer.

GİRİŞ

İnsanın doğayı anlama ve dönüştürme mücadelesinin en önemli aşamalarından birisi, nesnel büyüklüklerin ölçebilmesi ve bu ölçümün ne kadar doğru olduğudur. Ölçüm işlemi kimi zaman ıslak bir parmak yardımıyla havanın akış yönü veya sıcaklığının tespiti gibi basit bir çaba gerektirse de, hassas ve görece doğruya yakın yapılabilmesi için karmaşık ve ileri düzey teknoloji barındıran cihazlara ihtiyaç duymaktadır. Bu cihazlar bazen analog bir barometre gibi oldukça basit bir mekanizmaya sahip olabilirken, kimileri de birkaç futbol sahası büyüklüğüne erişecek kadar bileşik yapıda bulunabilirler.

Bilindiği gibi SI olarak adlandırılan ve bugün itibariyle tanımlanmış bulunan yedi adet temel birim (kütle birimi olan kg hariç), fiziksel olmaktan ziyade teorik tanımlara sahip olmakla birlikte pratikte de gerçekleştirilebilir büyüklüklerdir. Kütle birimi ise tanımlandığı yıl olan 1889'dan bu yana değişmeden devam etmektedir. Son yıllarda yapılan kimi çalışmalar neticesinde, bu birimin de yakın bir zamanda yeniden tanımlanması beklenmektedir. Bu konuyla ilgili NPL (İngiltere Ulusal Fizik Laboratuvarı) ve PTB (Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü) gibi gelişmiş ülkelere ait fizik ve metroloj laboratuvarlarında çalışmalar hala devam etmektedir [1, 2].

Yedi temel birim dışında kullanılan birimler türetilmiş büyüklük olarak adlandırılırlar. Her ne kadar tork birimi olan $N \cdot m$ veya $kg \cdot m/s^2$ üç temel birimin bileşkesi olarak tanımlansa da günümüzde faaliyet gösteren temel metroloji laboratuvarları, bu birimin kütle başlığı altında incelenmesi yönünde bir eğilim sergilemektedir.

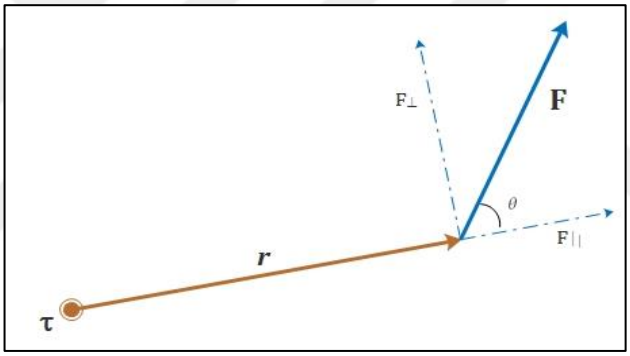
Kütle tabanlı bir büyüklük olan tork, bilinçli veya bilinçsiz olarak günlük yaşamımızda gerçekleştirdiğimiz pek çok eylem dâhilinde yer almaktadır [3]. Bir cevizi kırmak için kullandığımız ceviz kıracağı veya bir kapıyı açmak için kullanılan kapı kolu, aslen ilgili bölgelere, uygulanan kuvveti ileten ve kuvveti, kuvvet kolu yardımıyla döndürme yani torka dönüştüren basit cihazlardan başka bir şey değildir. Bu iki örnekte uygulanan torkun büyüklüğü veya ne kadar bir torkun uygulanması gerektiği önemli

değildir. Önemli olan cevizin kırılması ve kapının açılmasıdır. Ancak bir somunun sıkılması veya gevşetilmesi durumunda veya Formula 1 yarışlarında kullanılan araçların test edildiği düzeneklerde, torka ait veriler (büyüklük, yön vs.) önemli hale gelmektedir.

Sanayide kullanılan tork el aletlerinden veya bir gaz türbini gibi çalışan bir sistemden elde edilecek sonuçlar, insan hayatı başta olmak üzere zaman ve maliyeti önemli ölçüde etkilediği için tork ölçümleri mümkün olduğunca doğru olmalı ve bu doğruluk emniyet altına alınmalıdır. Bu ihtiyaçtan dolayı, metrolojik izlenebilirlik adı verilen ve "ölçüm sonuçlarının güvencesinin başka bir referans cihaz yardımıyla kayıt altına alınmış bir kalibrasyon zinciri ile sağlanabileceği" şeklinde tanımlanan kavram ortaya çıkmıştır. Tork ölçümlerinde kullanılan tork dönüştürücüler bu izlenebilirlik zinciri bünyesinde yer alan ve ölü ağırlık (dead-weight) prensibine göre çalışan ölçüm düzeneklerinin ardından doğruluğu en yüksek ölçüm cihazlarından birisidir. Bu tip cihazlardan elde edilen veriler, çoğunlukla cihazın üretildiği malzemeye, gösterge cihazına, metoda (standarda) ve ortam şartlarına bağlıdır. Sıcaklık ve nem ise ortam şartları içerisinde en fazla değişim gösteren bileşenler olup kalibrasyon ve test esnasında mutlaka dikkate alınmalıdır. Bilimsel çalışmaların yüksek maliyet ve hassasiyet gerektirdiği günümüzde, ölçüm sonuçlarının yalnızca hızlı ve doğru olması yeterli olmayıp ölçüm belirsizliğinin mümkün olduğunca düşük tutulması da istenmektedir. Bu sebeple ortam şartlarının kontrolü ve takibi titiz bir şekilde yapılmalıdır.

1. GENEL BİLGİLER

Newton'un ikinci kanununa göre m kütleli bir cisme net bir kuvvet uygulandığında, cisim ivmeli bir harekete maruz kalır. Bu a ivmesi kuvvetle aynı yönde ve büyüklük olarak kuvvetin büyüklüğüyle doğru, kütlenin büyüklüğüyle ters orantılıdır. Bu durum F=m·a denklemi ile ifade edilir. Bu kuvvet, cisme doğrusal bir ivme ve doğrusal bir hareket veya dairesel ivme ve dairesel bir hareket kazandırır. Dairesel olanda, sürekli yön değiştirerek cismin dairesel hareketini sağlayan fiziksel olguya tork denir. Tork, kuvvetin, cismi dönme noktasında kendi eksenleri etrafında döndürücü etkisine olarak tanımlanır. Şekil 1.1.'de bir noktaya uygulanan tork görülmektedir.



Şekil 1.1. Torkun oluşumu

Tork vektörel bir büyüklüktür. Mesafe vektörü $\vec{r}$ ile kuvvet vektörü $\vec{F}$ ve ikisi arasındaki θ açısı ile oluşmaktadır. Tork, τ sembolü ile ifade edilmekte olup Denklem (1.1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\vec{\tau}=\vec{r}\times\vec{F} \rightarrow \tau=r\times F\times\sin\theta \qquad (1.1)$$

SI birim sisteminde torkun birimi "N·m"dir.[1] Tork biriminin enerji birimiyle aynı olmasına karşın aralarındaki fark enerjinin skaler, torkun ise vektörel bir büyüklük olmasıdır.

[1] SI birim sistemiyle ilgili kapsamlı bilgi için (Bureau International des Poids et Mesures – BIPM) tarafından yayımlanan doküman incelenebilir.
Bkz. http://www.bipm.org/utils/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf

1.1. Metroloji

Metroloji, Yunanca ölçüm (metron) ve uygulama, bilim (logos) kelimelerinden türemiş olup günümüzde ölçüm belirsizliği ve uygulama alanına bakılmaksızın, ölçüm ile ilgili bütün teorik ve uygulamaya yönelik unsurları içeren bilim dalı olarak adlandırılmaktadır [3, 4]. Bir bilim dalı olarak 20 Mayıs 1875'te Paris'te imzalanmış Metre Konvansiyonu'nun ardından ortaya çıkmıştır (20 Mayıs aynı zamanda her yıl "Dünya Metroloji Günü" olarak kutlanmaktadır) [4]. Metroloji, yapısı gereği çok geniş bir faaliyet alanına sahip bir bilim dalı olsa da çeşitli iç içelikler barındırmakla beraber üç temel alt başlıkta incelenebilir [3]:

- Uluslararası düzeyde kabul edilmiş ölçüm birimlerinin tanımı, örneğin, metre.
- Ölçüm birimlerinin bilimsel yöntemlerle gerçekleştirilmesi, örneğin, metrenin lazerler kullanılarak elde edilmesi.
- İzlenebilirlik zincirinin, bir ölçümün değeri ve kesinliğinin belirlenmesi, belgelenmesi ve bu bilginin yayılması ile kurulması, örneğin, hassas mühendislik atölyesindeki mikrometre vida ile birincil seviye optik uzunluk metrolojisi laboratuvarı arasındaki belgelenmiş ilişki.

1.1.1. Metrolojinin sınıflandırılması

Metroloji, karmaşıklık ve doğruluk derecesine göre üç kategoride ele alınır [3]:

1. Bilimsel metroloji, ölçüm standartlarının düzenlenmesi, geliştirilmesi ve muhafazası ile ilgilenir (en üst seviyede).
2. Endüstriyel metroloji, sanayide, üretimde ve testlerde kullanılan ölçüm cihazlarının, insanların hayat kalitesini korumak ve akademik araştırmalarda kullanılmak için yeterli seviyede çalışmalarını güvence altına almaya yöneliktir.
3. Yasal metroloji, ekonomik işlemlerin şeffaflığını etkileyen, özellikle ölçüm cihazlarının yasal olarak doğrulanma zorunluluğunun bulunduğu durumlardaki ölçümlerle ilgilenir.

1.1.2. Ölçüm standartları

Ölçüm standardı veya etalon, bir birimin veya referans olabilmesi için bir büyüklüğün, bir veya birden fazla değerinin tanımlanması, gerçekleştirilmesi, muhafaza edilmesi

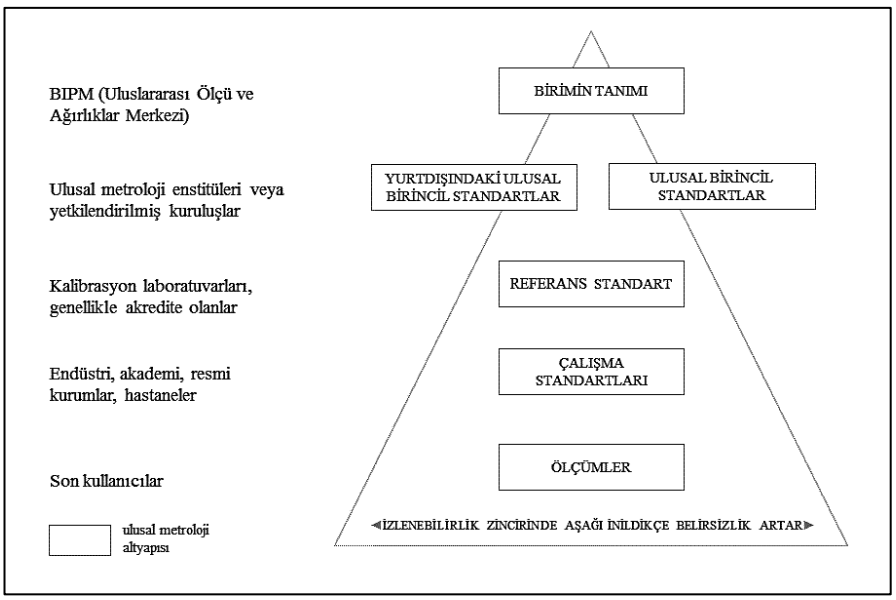
veya yeniden oluşturulması için bir maddi ölçüt, ölçüm cihazı, referans malzeme veya ölçüm sistemidir [5].

Örneğin, metre, ışığın boşlukta, saniyenin 1/299 792 458'i kadar bir zaman aralığında kat ettiği mesafenin uzunluğu olarak tanımlanmıştır. Birincil seviye metre standardı, iyotla kararlı hale getirilmiş helyum-neon lazerinin dalga boyundan sağlanır. Alt seviyelerde, mastar blokları gibi maddi ölçütler kullanılır ve izlenebilirlik, yukarıda bahsedilen lazer dalga boyu referans alınarak, mastar bloklarının uzunluklarının optik enterferometre ile belirlenmesi ile sağlanır [3, 6].

1.1.3. İzlenebilirlik

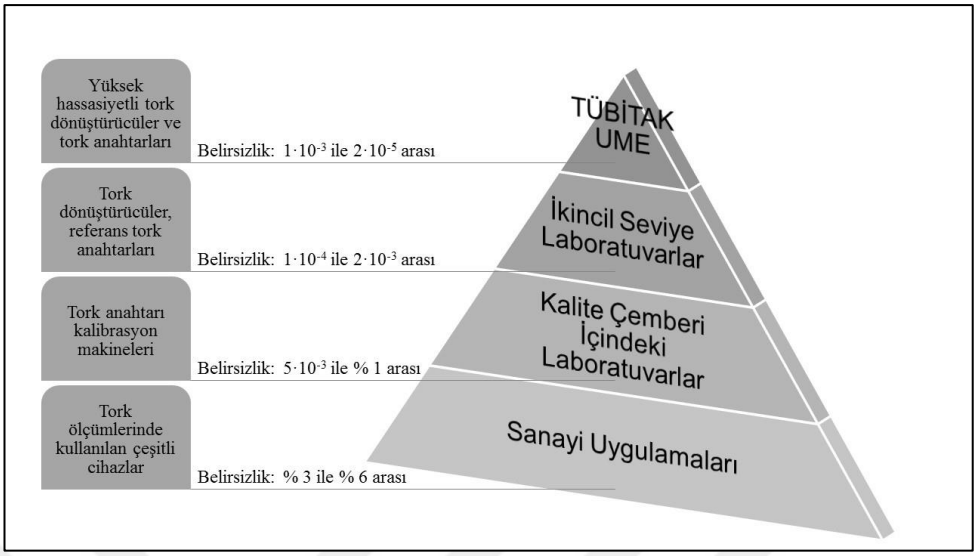
İzlenebilirlik zinciri, Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi her birinin belirsizliği ifade edilmiş kesintisiz bir karşılaştırmalar zinciridir. Bu, bir ölçüm sonucunun veya bir standardın değerini daha yüksek seviyedeki referanslarla ilişkilendirilmesini sağlar. En üst seviyede birincil standart bulunur [3].

Son kullanıcı, en yüksek uluslararası izlenebilirliği ya doğrudan bir Ulusal Metroloji Enstitüsü'nden ya da genellikle akredite olan ikincil seviye bir kalibrasyon laboratuvarından elde edebilir. Çeşitli karşılıklı tanıma anlaşmalarının sonucu olarak, uluslararası seviyede tanınan izlenebilirlik, kullanıcının kendi ülkesi dışındaki laboratuvarlardan sağlanabilir [7].



Şekil 1.2. İzlenebilirlik piramidi

Tork ölçümleri özelinde izlenebilirlik zinciri ise Şekil 1.3.'te gösterildiği gibidir.



Şekil 1.3. Tork ölçümlerinde izlenebilirlik zinciri

Günlük hayatta sıkça kullanılan tork anahtarı, tornavida vb. cihazların ölçüm belirsizlikleri oldukça yüksektir ve kullanıcıya kaba bir ölçüm sonucu sunmaktadır. Ancak kullanılan cihaz hassaslaştıkça ölçüm sonuçlarına ait belirsizlik değeri küçülmekte, elde edilen sonuçların kalitesi iyileşmekte, bununla birlikte ilgili cihaza ait kalibrasyon maliyeti artmakta ve süresi uzamaktadır. Bu sebeple cihazın kullanımına verilmesi gereken önem de artmaktadır.

2. TORK DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

2.1. Tork Dönüştürücülerin Tanımı ve Kullanım Alanları

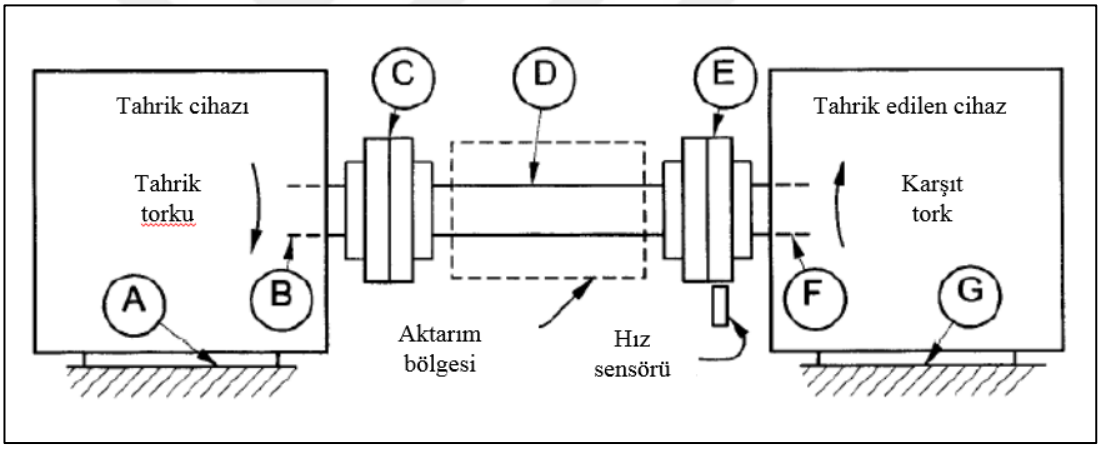
Dönüştürücü, bir enerji türünü başka bir enerji türüne çeviren cihazdır. Bu çevrim elektrik, elektromekanik, elektromanyetik, fotonik, fotovoltaik, veya mekanik gibi enerji formları arasında gerçekleşebilir. Tork dönüştürücü ise, elektriksel giriş sinyalini, frekansı ve voltajı uygulanan tork değeriyle orantılı elektriksel bir çıkış sinyaline dönüştürür.

Tork dönüştürücüler, motor, krank mili, dişli kutusu veya başka bir tork cihazının kalibrasyonu gibi dönme hareketi yapan sistemlerde torkun ölçülmesi ve kaydedilmesi amacıyla kullanılır. Tork dönüştürücü seçiminde ölçümün yapıldığı sisteme fiziksel bir zarar verilmemesi ve istenilen hassasiyette referans cihazın belirlenmesi dikkat edilmesi gereken iki önemli husustur. Tork dönüştürücü, doğru ölçüm için hayati önem taşıyan ve tasarım açısından mekanik bir sigorta işlevi gören bir ekipmandır. Yürüyen aksamların en zayıf yanı, aksama bağlı bulunan dönüştürücü olduğu için mekanik bir arızanın önlenmesi amacıyla tork dönüştürücü tipi ve şeklinin düzgün belirlenmesi gerekmektedir. Zira tork dönüştürücülerde doğru ölçümün yapılabilmesi için gerinimin tek bir noktaya uygulanması ve bu noktanın gerinim ölçerin bağlı olduğu nokta olması gerekmektedir. Tork dönüştürücü seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da elde edilen verilere ait belirsizlik değerinin sınırlandırılmasıdır. Diğer bir ifadeyle uygun hassasiyet ve belirsizlik değerine sahip olan tork dönüştürücünün ölçümler öncesi tespitinin yapılması gerekmektedir [8].

Dönüştürücü tipleri, kullanım amacı, çevresel şartlar, dinamik etkenler, fiziksel gereksinimler ve uygulama bütçesi, dönüştürücü seçimini etkileyen belli başlı nedenlerdir. Bu kriterlere bağlı olarak tepkisel, dairesel şaft, analog veya dijital telemetri ve çift aralıklı sensör gibi dönüştürücü tiplerinden birisi seçilerek ölçümler gerçekleştirilmelidir.

Tork, hız ve güç, dönen makinelerin fonksiyonel performansı ile ilişkili tanımlayıcı mekanik değişkenlerdir. Bu büyüklüklerin doğru bir şekilde ölçülmesi, bir makinenin verimliliğini belirlemek, uzun ömürlü, güvenilir ve kararlı bir ölçüm sistemi oluşturmak için çok önemlidir. Bu miktarların anlık bir şekilde ölçümleri gerçek zamanlı kontrol sağlar, ürün kalitesinde tutarlılık sağlamaya yardımcı olur ve yaklaşmakta olan problemlerin erken belirtilerini sağlayabilir [9]

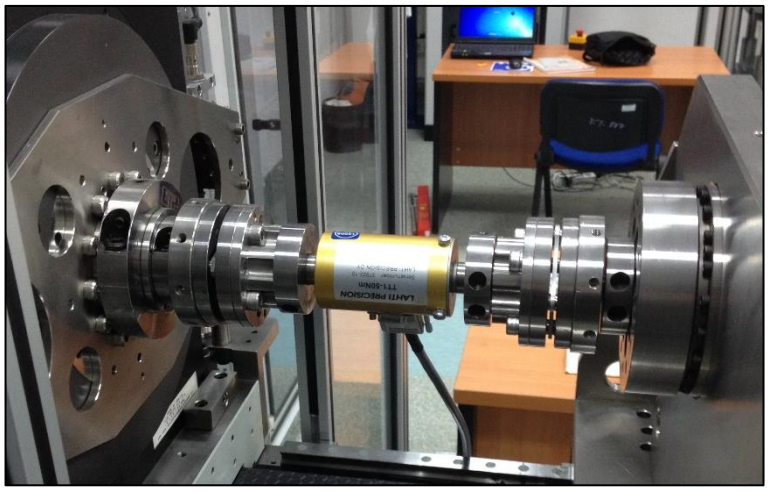
Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi genel olarak, cihazın bir noktasında üretilen tahrik torku (B), başka bir noktada (F) farklı bir cihaz tarafından geliştirilen bir karşıt torkla karşılanır. Sürüş momenti (örneğin, bir elektrik motoru, bir benzin motoru, bir buhar türbini, kas çalışması, vs.), bağlantı elemanlarına (C), verici bölgeye (D) ve tahrik edilen cihaza (E) ek olarak bağlanır. (Dirençli torkun F'de karşılandığı bir elektrik jeneratörü, bir pompa, bir takım tezgahı, çift dişli bağlantı elemanları vs.) [10].



Şekil 2.1. Tork ve güç ölçümünde kullanılan cihazların şematik sıralanışı

B veya F'deki tork, ölçülecek olan miktardır. Bu torklar, dolaylı olarak, tahrik eden veya tahrik edilen cihazın çalışmasıyla ilişkili bir elektrik akımı veya akışkan basıncı veya A veya G'deki tepkime torkunun ya da iletilen dönme momentinin ölçümüyle doğrudan doğruya ilişkili bir fiziksel miktardan dolaylı olarak belirlenebilir. D. A veya G'deki tepkime torku, genellikle, aparat tarafından sabitlenmiş bilinen mesafelerde hareket eden kuvvetlerin ölçümlerinden belirlenir [10].

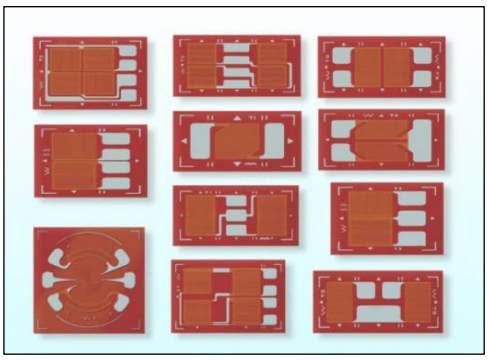
Bu çalışmada, ölçüm ve çalışma prensibi Şekil 2.1.'de gösterilmiş reaktif tip bir tork dönüştürücü kullanılmıştır. Bu tork dönüştürücü, Şekil 2.2.'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Ölçümlerde kullanılan tork dönüştürücünün sisteme bağlanmış hali

2.2. Tork Dönüştürücülerin Çalışma Prensibi

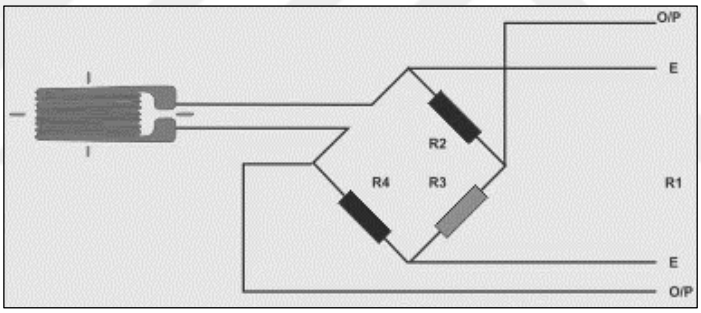
Tork dönüştürücüler, yaygın olarak gerinim-ölçer (strain gage) yardımıyla ölçüm işlemini gerçekleştirirler. Gerinim-ölçer, üzerine bağlandığı metalin genleşmesi sonucu oluşan uzama miktarını ölçmek için kullanılır. Bu ölçüm işlemi yapılırken gerinim-ölçer malzemesinin direnç değişimi hesaplanarak malzemenin uzama katsayısı ortaya çıkartılır. Gerilmeye bağlı olarak gerinim-ölçer üzerinde bir kaç milivoltluk değişim gözlenir. İyi bir ölçüm için gerinim-ölçer sensörü genleşen malzemeye çok iyi bir şekilde sabitlenmelidir. Bu yüzden folyo kağıdı kadar çok ince bir yapıda imal edilir. İnceliği yaklaşık olarak 1/1000 inç yani 25,4 mikron seviyelerindedir. Gerinim-ölçer yapı olarak, bakır ve nikel karışımı metalik tellerin üzerinin yalıtkan bir madde ile kapatılması işlemidir.Şekil 2.3.'te çeşitli boy ve tiplerde gerinim-ölçerler görülmektedir [11].



Şekil 2.3. Çeşitli şekil ve tipte gerinim ölçerler

Gerinim-ölçerdeki direnç değişimini ortaya çıkarabilmek için "Wheatstone köprüsü" adı verilen elektrik devresi kullanılır. Bu devre dört adet direncin kare oluşturacak şekilde birbirine bağlanmasıyla oluşur. Oluşturulan Wheatstone köprüsüne bağlanan gerinim-ölçer üzerindeki direnç, gerilime bağlı olarak meydana gelen basıncın etkisi ile değişir, gerinim-ölçerin kullanıldığı cihaza bağlı olarak (kuvvet dönüştürücü, tork dönüştürücü, basınç dönüştürücü vb.) yüzeye uygulanan kuvvet hesaplanır [11].

Wheatstone köprüsü dört direnç ile oluşturulmaktadır. Bu dirençlerin bağlantı şekli ise köprü diyot ile bire bir aynıdır. Wheatstone köprüsünün dört düğüm noktasından iki tanesi bir ikaz voltajı ile beslenirken diğer iki noktadan ise köprüde deformasyona bağlı oluşan direnç değişimleri ölçülür. Tam köprü ölçüm yapılabilmesi için dört adet gerinim-ölçere ihtiyaç vardır. Fakat ölçüm yapılacak yüzeye ve ölçüm hassasiyetine göre gerinim ölçer hücresi azaltılabilir.Şekil 2.4.'te gerinim-ölçere bağlanmış bir Wheatstone köprüsüne ait devre görülmektedir [11, 12].



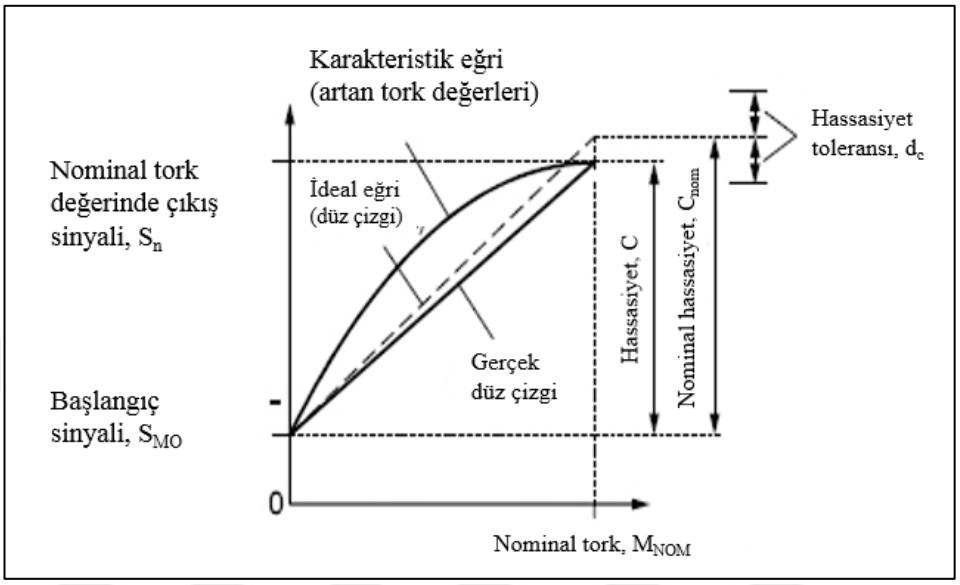
Şekil 2.4. Wheatstone köprüsüne bağlanmış bir gerinim ölçer

Uzama esnasında gerinim-ölçer telinin boyu uzayarak kesiti azalır. İletkenlerin kesiti azaldıkça dirençleri artacağı için uygulanan kuvvete bağlı olarak iletkenin direncinde artma ya da azalma meydana gelecektir. Bu meydana gelen direnç değişimine bağlı olarak ise uygulanan kuvvetin miktarı tespit edilebilir.

Gerinim = Kuvvet / Yüzey denklemi ile gerinim-ölçer üzerinde meydana gelen gerinim miktarı tespit edilerek bu gerilmeye bağlı olarak elektriksel bir direnç çıkışı meydana getirilir [11].

2.3. Gerinim Ölçerler Üzerinde Sıcaklık Değişiminin Etkisi

Hassasiyet, nominal ve sıfır tork noktalarında çıkış sinyal değerleri arasındaki açıklıktır. Hassasiyet saat yönü ve tersi için genellikle ayrı ayrı hesaplanır. Hassasiyet ve nominal tork değeri arasındaki ilişki Şekil 2.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Hassasiyet ve nominal tork arasındaki ilişki

C hassasiyeti, hassasiyet ve nominal tork değeri arasındaki ilişkiye ait eğrinin eğimini karakterize eder. Bu eğri, boşaltılan tork dönüştürücüyle (başlangıç tork sinyali) belirlenen çıkış sinyalini (S_{M0}) ve artan torkta belirlenen nominal torktaki çıkış sinyalini (Sn) bağlayan düz çizgi olarak seçilir. Bu durumda C hassasiyeti, Denklem (2.1)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$C=S_n-S_{M0} \tag{2.1}$$

Hassasiyet ve nominal tork, belirli bir torku ve çıkış sinyalinin ilgili açıklığını birleştiren bilinen bir çift değer oluşturur. Böyle iki değer çifti bilinirse, amplifikatörü ayarlamak için kullanılabilirler. Genellikle, ikinci değer çifti sıfır tork ve sıfır çıkış sinyal aralığıdır (yani çıkış sinyali = başlangıç tork sinyali). Tork dönüştürücülerde sıcaklık değişiminin ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi, nominal torkta belirlenen sıcaklıkta 10 K'lik bir değişime ve duyarlılığa bağlı olarak gerçek çıkış sinyalinin değişmesi şeklinde ifade edilir. Belirtilen değer, nominal sıcaklık aralığında meydana gelen maksimum değişimdir.

Hassasiyet üzerindeki sıcaklık etkisi (sıcaklık hassasiyeti katsayısı olarak da adlandırılır), dönüştürücüye uygulanan bir yük ile çıkış sinyali üzerindeki sıcaklık etkisinin bir ölçüsüdür. Bu değeri belirlerken, ilgili sıcaklıkta başlangıç tork sinyali değerinin çıkış sinyalinden çıkarılarak düzeltilmesi gerekir. Dolayısıyla sabit bir sıcaklık durumu oluşturulmalıdır. Sıcaklık değişimi ile kastedilen, dönüştürücüye ait sıcaklık değeridir. Sabit bir sıcaklık durumu genellikle, 15 dakikalık bir sürede maksimum sıcaklık değişiminin 0,1 °C'yi aşmadığı durum olarak ifade edilir.

Gerinim ölçerler yardımıyla ölçüm yapılırken sıcaklık değişimi söz konusuysa, mekanik uzama neticesinde oluşan ölçüm sinyali, gerinim ölçerin direncinde değişiklik meydana gelmesine yol açar. Sıcaklık değişimi aynı zamanda sıfır noktasına ait sinyali de bozar. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, sıcaklık nedeniyle dirençte meydana gelen değişimlerin, gerinimden bağımsız olduğudur. Gerinim ölçerlerin termal çıkışına ait karakteristik, sıcaklık ve gerinim değişimine ait verilerin bir grafik yardımıyla elde edilmesi sonucu belirlenir [13].

Bir tork dönüştürücü kullanımı esnasında termal koşullar hesaplanırken, dış ortamdaki koşullar (dış hava sıcaklığı veya oda sıcaklığı) tamamen dikkate alınmalıdır. Yani sadece ısı kaynakları değil aynı zamanda mevcut olabilecek herhangi bir soğutma mekanizması da dahil olmak üzere, uygulama çalışırken ortaya çıkan sıcaklık değişiklikleri de hesaba katılmalıdır. Ancak bu durum pratik uygulamada kolaylıkla belirlenememektedir. Bu sebeple dönüştürücü ve tartım ekipmanları gibi cihazların tip onay testlerinin yapılması ve bu testlerin şartlandırılmış bir ortamda (örneğin bir iklimlendirme kabini) gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Üreticiler tarafından beyan edilen genleşme katsayıları, sıcaklık değişim faktörü gibi bilgiler, bu testler sonucunda elde edilmektedir [14].

Gerinim ölçerlere dayalı sıradan bir ölçüm işlemi, torku dolaylı olarak gerinim ölçümü sonucu belirlediğinden, termal etkilerin hesaba katılması önemlidir. Elektronik bileşenler, ortam şarlatının kararlı olduğu koşullarda sağlıklı olarak kullanılabilir ve malzeme özelliklerinin değişkenliğini koruması yalnızca termal dengede mümkündür. Bu sebeple tork dönüştürücülerin kullanıma izin verilebilen sıcaklık aralığı yukarıda bahsi geçen tip onay testleri sonucunda elde edilebilir ve bu aralıklar kullanım hassasiyetine göre çeşitli alt aralıklara ayrılır.

2.4. Gerinim Ölçerler Üzerinde Nem Değişiminin Etkisi

Nem, suyun damlacık halinden ziyade havada çözünmüş olan su buharını ifade etmektedir. Bu sebeple nem dikkate alınırken bağıl olarak incelenir ve %100 bağıl nem doygunluk noktası olarak kabul edilir. Doyma noktasına ulaşıldığında su buharı daha fazla çözünemez ve yoğuşmaya başlar. Tork dönüştürücü ile yapılan ölçümlerde kritik nokta bu andan itibaren başlar çünkü çiğ ile kaplanmış olan elektronik bileşenler şönt tehlikesi altındadır. Nem aynı zamanda elektriksel bileşenler ve plastikler üzerinde de etkili olabilir. Donma noktası altında yoğunlaşma meydana gelmesi halinde mekaniksel kuvvet şöntü veya tork şöntü de ortaya çıkabilir. Her iki durumda da ölçüm sonuçları hatalı olacaktır [15].

Nem etkisi, gerinim ölçerlerin ve onları elastik elemana bağlayan yapışkan tabakanın higroskopik davranışından kaynaklanmaktadır. Mekanik özelliklerinin değiştirilmesi, gerinim ölçer köprülerinin hassasiyetini ve tepkilerinin zaman sabitlerini etkileyebilir ve sıcaklık kompanzasyonu için ilave gerinim ölçerlerde bir değişiklik, sinyal kaymasına neden olabilir.

Kademeli bir nem değişimi, köprü üzerinde anlık olarak değil üstel bir şekilde hareket edecektir. Köprüdeki nem F'nin efektif zaman davranışı Denklem (2.2)'de gösterildiği gibi tanımlanabilir [16].

$$F(t)=F_0+A_F\left(1-e^{\left(-\frac{t}{\tau_F}\right)}\right) \tag{2.2}$$

Burada, t: zaman,

F_0: başlangıçtaki nem miktarı,

A_F: nemdeki değişim,

τ_F: nemin zaman sabitidir.

Bu, dönüştürücü duyarlılığı S'nin Denklem (2.3)'deki gösterildiği gibi zamana bağlı davranmasına sebep olur [16].

$$S(t)=S_0+S(F)=S_0+A_S\left(1-e^{\left(-\frac{t}{\tau_F}\right)}\right) \tag{2.3}$$

Burada, t: zaman,

S_0: başlangıç hassasiyet katsayısı,

A_S: hassasiyet katsayısındaki değişim,

τ_S: hassasiyet katsayısının zaman sabitidir.

Duyarlılık, tork ölçümü alanında olağan olduğu gibi, dönüştürücünün mV / V cinsinden nominal değerdeki sinyalidir.

Nem değişimi, dönüştürücünün algılama elemanının tüm unsurlarına aynı hızda nüfuz etmezse, hassasiyet üzerindeki geçici etkiler hesaba katılmalı ve Denklem (2.4)'teki gibi hesaplanmalıdır.

$$T(t)=-A_T\left(e^{\left(-\frac{t}{\tau_T}\right)}\right) \tag{2.4}$$

Burada, T: geçiş etkisinin katkısı,

t: başlangıç hassasiyet katsayısı,

A_T: geçiş sinyalindeki değişim,

τ_T: geçiş etkisinin zaman sabitidir.

S ve T katkılarının toplam tepkime için ayrılması ancak, dönüştürücünün nem basamağının başlamasından önce geçerli ilk duyarlılığın bilinmesi durumunda mümkündür. Bu hassasiyeti etkileyen etkiler nem değişiminin uygulanma metoduna bağlıdır ve bu nedenle bir yöntem önerilmesi gerektiğinde dikkate alınmalıdır.

Dönüştürücü hassasiyetine etki eden neme ait bağıl katsayı c_h, Denklem (2.5)'te ifade edildiği gibi tanımlanabilir [16].

$$c_h=\frac{S(t_2)-S(t_1)}{\bar{S}(t_2,t_1)\left(F(t_2)-F(t_1)\right)} \tag{2.5}$$

Negatif katsayısı, nemin azaltılmasında artan bir hassasiyet anlamına gelir ve bunun tersi de geçerlidir. Bağıl nem katsayısının birimi, "bağıl nem yüzdesi" anlamına gelen % 1 RH'dir. Bu çalışmada, bağıl nemin değeri yüzde olarak (%) ve nispi nem oranının farklı yüzdeleri (% RH) yüzdesi olarak verilmiştir.

3. TORK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN KALİBRASYONU

Kalibrasyon, belirli koşullarda, ilk aşamada ölçüm standartları tarafından sağlanan büyüklük değerleri ve ölçüm belirsizlikleri ile bunlara karşılık gelen gösterge değerleri ve ilgili ölçüm belirsizlikleri arasında bir ilişkinin oluşturulduğu, ikinci aşamada ise bu bilginin ölçüm sonucunun göstergeden elde edilmesinde kullanıldığı işlemler dizisidir [5]. Daha basit ifade edilecek olursa kalibrasyon, doğruluğu bilinen bir ölçüm büyüklüğüyle doğruluğu bilinmeyen başka bir ölçüm büyüklüğünün belirlenmiş koşullar altında karşılaştırılması işlemidir. Kalibrasyon işleminin sıradan bir ölçme faaliyetinden farkı, ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek çevre şartlarının dikkate alınması, bir standarda göre gerçekleştirilmesi, ölçüm belirsizliği hesaplanması, kullanılan referansların izlenebilirliğe sahip olması ve sonuçların bir rapor halinde sunulmasıdır.

Ölçüm cihazlarının doğruluklarından emin olmak, olası hataları azaltmak, kaliteyi artırıp maliyeti düşürmek için belirli periyotlarla kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir.

3.1. Kalibrasyon Yöntemleri

Tork dönüştürücülerin kalibrasyonunda yaygın olarak kullanılan yöntem, statik kalibrasyondur. Tork değeri, sistem dengede ve zamana bağlı bir durum söz konusu değilken ölçülmektedir. Bu durum endüstriyel tork dönüştürücülerin gerçek kullanım şekline zıttır [17].

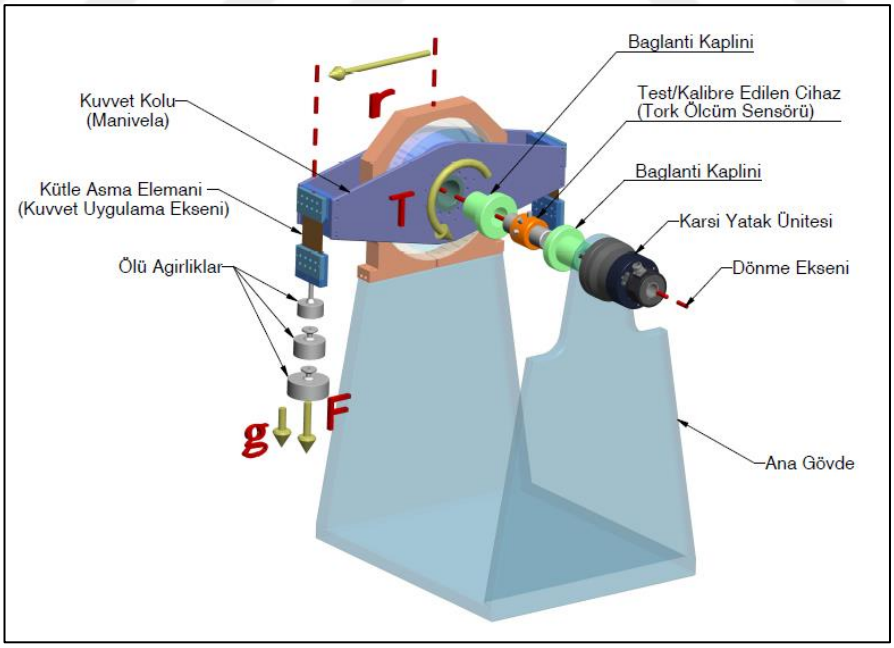
Dinamik kalibrasyonda ise tork dönüştürücü, bir kalibrasyon düzeneğine sabit olarak bağlanmalı ve tork değerleri kuvvet değişimi esnasında anlık olarak ölçülmektedir. Motorların güç testi, dişli kutuları ve güç iletimi gibi çeşitli otomotiv uygulama alanlarında tork üretimi, hem döner halde hem de dinamiktir. Dinamik tork ölçümleri konusunda son yıllarda yapılan çalışmalar, tork dönüştürücülerin sabit bir yük altındaki dinamik performanslarının, statik performanslarından ciddi biçimde farklı olabileceğini göstermiştir [18].

Tork dönüştürücülerin dönme esnasında ölçüm sonuçlarında farklılık yaratması, merkezkaç kuvvetlerden kaynaklanmaktır. Bu kuvvetler iki ayrı bileşen tarafından oluşturulmaktadır. Birincisi, merkezkaç kuvvetlerin sıfır sinyali, ikincisi ise hassasiyet üzerindeki etkisidir. Dönmenin sıfır sinyali üzerindeki etkisi, döndürme testiyle incelenebilir. Bu testte, uygulanan tork değeri sıfırdır. Hassasiyetin etkisini incelemek ise daha zor bir iştir [19].

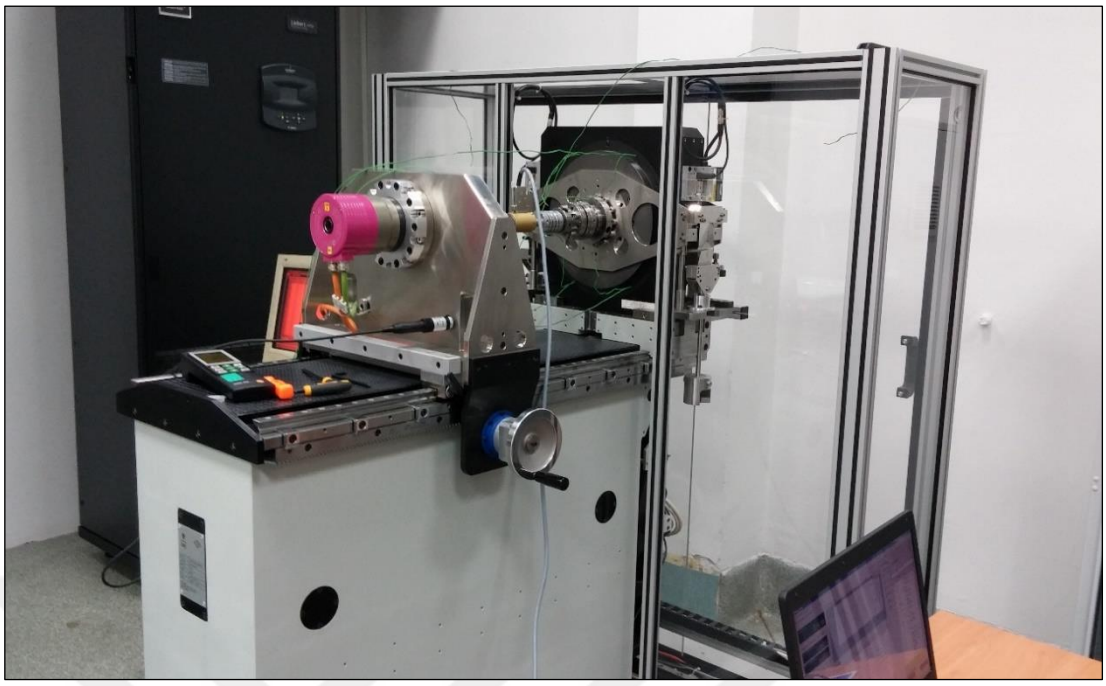
3.2. Statik Tork Kalibrasyon Yöntemleri ve Makineleri

3.2.1. Ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makineleri

Bu yöntemde kalibrasyonu yapılmış ağırlıklar, kalibrasyonu yapılmış bir manivela kolu yardımıyla tork dönüştürücü üzerinde bir moment oluşturur. Tork biriminin tanımlanması, doğrudan kütle ve uzunluk birimine izlenebilir olarak sağlanmaktadır. Bu tip cihazlar, özellikle birincil (primer) seviye tork ölçümleri için uygundur ve tercih edilmektedir. Basit bir ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makinesinin çalışma prensibi Şekil 3.1.'de gösterildiği gibidir. Şekil 3.2.'de ise TSE Gebze Tork Laboratuvarında bulunan TKM II ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makinesi görülmektedir.



Şekil 3.1. Ölü ağırlıklı tork makinesinin çalışma prensibi



Şekil 3.2. TKM II Ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makinesi

Bu makinelerde havalı bir yatak üzerine oturtulmuş bir manivela ile ona asılmış, yerçekimi ve havanın kaldırma kuvveti etkisi altındaki ağırlıklardan yararlanılmaktadır. Kuvvet oluşturmak için kullanılan ağırlıklar, birbirlerine sıralı olarak asılmaktadır. Ağırlıklar, hem sağ yönlü (saat yönünün tersi) hem de sol yönlü (saat yönü) torkları oluşturabilmek için manivelanın her iki yanına da konuşlandırılmıştır. Kimi makinelerde ise tek bir ağırlık seti, ek bir motor yardımıyla ölçümün yapılacağı yöne göre hareket ettirilebilmekte ve kullanılan ağırlık seti tek grup halinde bulunmaktadır [20].

Manivela, ağırlıkların oluşturduğu kuvveti en düşük kayıpla tork dönüştürücüye iletebilmek için yatay olarak pozisyonlanmalıdır (yere paralel olmalıdır). Bu sebeple ağırlıkların manivelaya bağlı pozisyonları (diklikleri), bir lazer sistemi yardımıyla kontrol edilir. Bu metotta çok düşük belirsizlikler elde etmek mümkündür [20].

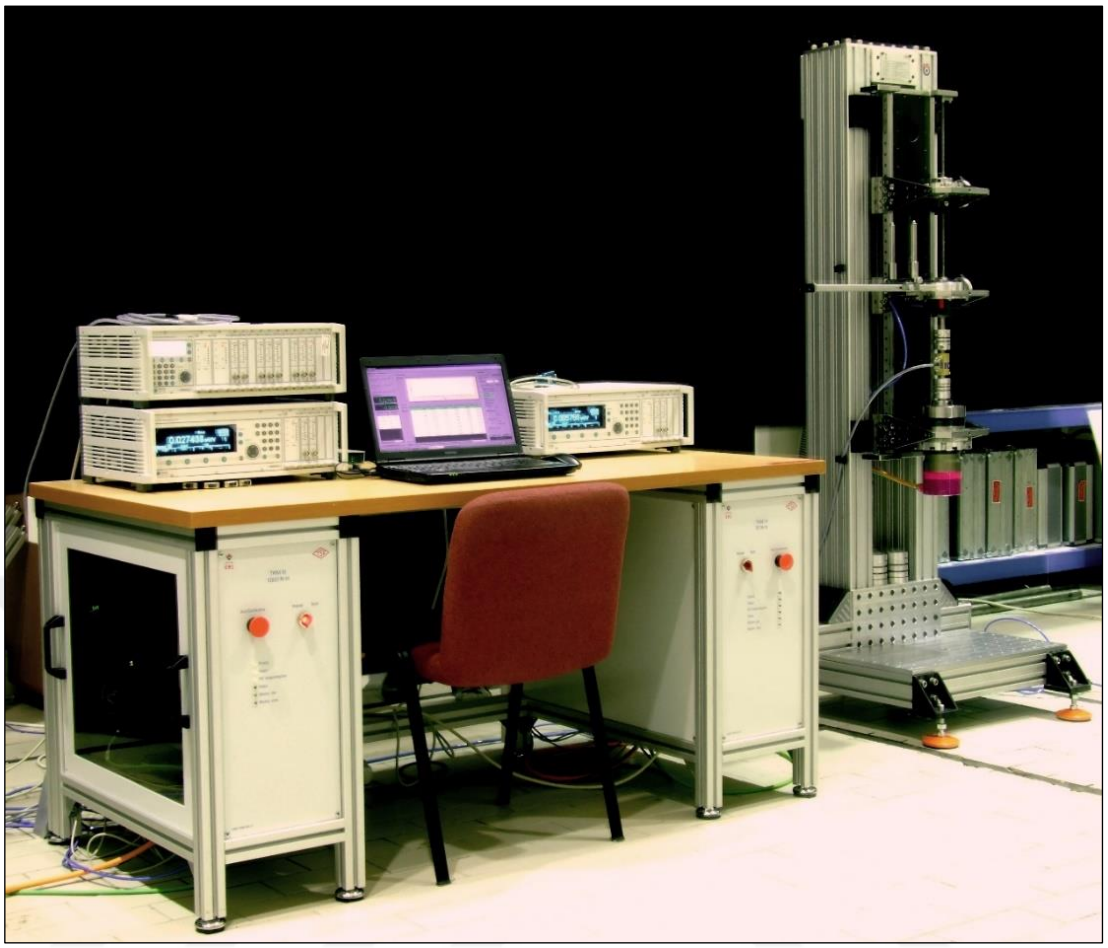
Referans olarak kullanılan makinede, kalibre edilen tork dönüştürücüsüne etki eden yükün yalnızca torkun kendisinin olmasını sağlamak önemlidir. Ancak, tork üretimi çoğu zaman yanal kuvvetler de içerdiğinden, bu yanal kuvvetlerin, eksenel kuvvetlerin ve eğilme momentlerinin dönüştürücü üzerinde etki geçmeden desteklenmesini (karşılanmasını) sağlamak için uygun yatakların kullanılması gereklidir.

Referans kalibrasyon makinesi ile tork dönüştürücüsü arasındaki yatak, neden olduğu sürtünme nedeniyle ölçüm sonuçlarını bozabilir. Bu nedenle kalibrasyon ekipmanlarındaki yatakların mümkün olduğunca sürtünme olmaksızın çalıştığından emin olunmalıdır. Bu durum, yüksek sermaye ve işletme maliyetlerine rağmen havalı yatak kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Ölü ağırlıklı kalibrasyon makineleri, özellikle makinenin tasarımından kaynaklı zorluklar barındırır. Bu zorlukların ilki, ağırlıkların yerçekimine bağlı olmasıdır. Ancak bu etken bölgelere göre farklılık gösterdiğinden, kalibrasyon laboratuvarlarında yerçekimine bağlı yerel ivme ölçülmelidir. İkinci zorluk ise, manivela kolunun uzunluğunun doğru bir şekilde ölçülmesidir. Bu durum da kuvvetin uygulandığı manivela kolun için son derece özel tasarımların gerekli olduğu anlamına gelir. Ancak, manivela kolunun etkin uzunluğu, aynı zamanda, kolun tam olarak yatay hizalanıp hizalanmadığına da bağlıdır [21].

3.2.2. Referans tork dönüştürücülü tork kalibrasyon makineleri

Bu makineler esas olarak, yüksek doğruluklu tork anahtarlarının statik kalibrasyonun için tasarlanmış olup, bunun yanında tork ölçme cihazlarının ve tork el aletlerinin kalibrasyonlarının da yapılmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle ikincil seviye ve/ veya endüstriyel uygulamalar için uygundur ve tork cihazlarının kalibrasyonunda kullanılan ulusal ve uluslararası tork standartlarına göre kalibrasyon hizmeti sunabilmektedir. Tork birimini, referans tork dönüştürücüsü üzerinden sağlamaktadır. Torku oluşturmak için yüksek redüksiyonlu bir elektrik servo motoru kullanılmaktadır. Tork anahtarlarının kalibrasyonu için sabit bir tork kolu üzerinde kayan hareketli bir destek noktasından yararlanılmıştır. Yüksek doğruluklu tork anahtarlarının kalibrasyonu için sistemde bir havalı yatak mevcuttur. Bu sistemlerin dezavantajı, referans cihazdan dolayı tork belirsizliğinin yüksek olmasıdır. Şekil 3.3'te TSE Gebze Tork Kalibrasyon Laboratuvarında bulunan TKM III referans tork dönüştürücülü tork kalibrasyon makinesi görülmektedir.



Şekil 3.3. TKM III Referans tork dönüştürücülü tork kalibrasyon makinesi

3.3. Kalibrasyon Kademeleri

Tork dönüştürücülerin kalibrasyonunda karşılaştırılan büyüklük, tork değeridir. Dolayısıyla kullanılan referans cihaz ve ölçülen test cihazına ait çıktı büyüklükleri ne olursa olsun en son adımda tork birimi cinsinden ifade edilebilmeli veya bu birime dönüştürülebilmelidir. Kullanılan referans cihaz veya dönüştürücü izlenebilir olmalıdır. İzlenebilirlik veya metrolojik izlenebilirlik, bir ölçüm sonucunun, her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan kalibrasyonlardan oluşan belgelendirilmiş kesintisiz bir zincir aracılığı ile belirli bir referansa ilişkilendirilebilme özelliği olarak tanımlanmaktadır [5]. Kalibrasyon kademeleri aşağıda sıralanmıştır.

3.3.1. Tork ölçüm cihazlarının tanımlanması

Statik tork ölçüm cihazı veya tork dönüştürücü denildiğinde ölçüm için gerekli olan bütün ölçüm cihazları ve montajda kullanılan ekipmanlar anlaşılmalı, elektrik ve veri

bağlantı kabloları ayrı ayrı tanımlanmalıdır (örn. imalatçı adı, tipi, seri numarası ve dörtlü veya ikili iletken devre). Kullanılan gösterge cihazına (indikatör) ait çözünürlükteki salınımlar, cihazın sınıfını değiştirebilecek bir bant aralığında olmamalıdır. Kalibrasyona başlamadan evvel gösterge cihazına ait bütün fonksiyonlar mutlaka kontrol edilmeli, ölçüm sonuçlarını değiştirici bir durum meydana gelmemelidir. Eğer bir ayarlama (filtre tipi, frekans değeri vb.) işlemi yapıldıysa ayar öncesi ve sonrası değerler kalibrasyon öncesinde ve sonrasında kaydedilmelidir [22].

3.3.2. Aşırı yüklenme testi

İlk kalibrasyon öncesinde, bağlantı elemanlarıyla birlikte tork dönüştürücü, nominal tork değerini % 8 - % 12 aralığında aşacak kadar bir değerde aşırı yüklemeye iki defa maruz bırakılmalı ve bu tork değerinde 60 ile 90 saniye aralığında bekletilmelidir. Bu sayede kalibrasyon esnasında dönüştürücü ve kalibrasyon sistemi üzerinde meydana gelebilecek olası hatalar ve deformasyon riskleri önlenmiş olur [22].

3.3.3. Gösterge cihazının çözünürlüğü

Çözünürlük, gösterge üzerinden okunan değerdeki minimum artıştır. Tork dönüştürücü yüksüz konumda iken göstergedeki değişim miktarı "bir çözünürlük artımını" geçmemelidir. Eğer değişim miktarı bir çözünürlük artım miktarından fazla ise yeni çözünürlük dalgalanma miktarının yarısı olacak şekilde alınmalıdır [22].

3.3.4. Sıcaklık dengelenmesi

Kalibrasyona başlamadan önce dönüştürücü ve laboratuvar sıcaklığının dengeye gelmesi beklenmelidir. Her bir çevrim başında ve sonunda ortam sıcaklığı kaydedilmelidir. Laboratuvardaki ek unsurlar (örn. basınçlı hava sistemi), ölçüm belirsizliğini değiştirecek miktarda bir sıcaklık dalgalanması meydana getirmemelidir. Kalibrasyon boyunca sıcaklık değişimi ± 1 °C'den fazla olmamalıdır [22].

3.3.5. Dönüştürücüye ait sıfır sinyali

Kalibrasyon öncesinde tork dönüştürücü dikey konuma getirilmeli, yüksüz halde iken oluşturduğu sıfır sinyali kaydedilmelidir. Bu değer raporda belirtildiği gibi uzun dönemde cihazın kararlılığıyla ilgili fikir vermesi amacıyla da kullanılır [22].

3.3.6. Dönüştürücünün kalibrasyon makinesine montajı

Dönüştürücü, kalibrasyon makinesine üretici firmanın beyan ettiği ve sağ yönlü tork uygulanması durumunda gösterge cihazından pozitif değer okunacak şekilde monte edilmelidir. Bağlantı aparatları (örn. kaplinler) dönüştürücüyü mümkün olduğunca rijit bir şekilde tutmalı, nominal tork değerinin 1,5 katına kadar esnek hale gelmemelidir [22].

3.3.7. Hizalama

Tork dönüştürücünün kalibrasyon makinesine mükemmel bir şekilde hizalanarak montelenmesi pratikte mümkün değildir. Hizalamanın kusursuz olmaması radyal, açısal veya eksenel veya bunların kombinasyonu olacak şekilde hizalama hatalarına yol açmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için esnek kaplinler kullanılmalıdır.

3.4. Kalibrasyonun Yapılması

Kalibrasyon sol ve sağ yönlü tork değerleri için ayrı ayrı yapılmalıdır. Kalibrasyon işlemi ölü ağırlıklı tork kalibrasyon makineleri ile aralıklı tork değerleri ölçülerek veya başka bir referans tork dönüştürücü kullanılarak karşılaştırma yoluyla yarı statik yöntemle akan değerler yardımıyla yapılmaktadır.

3.4.1. Ön yükleme

Tork dönüştürücü kalibrasyon sistemine takıldıktan sonra üç defa maksimum tork değerinde ön yüklemeye tâbi tutulmalıdır. Ön yükleme dönüştürücünün daha önceki kullanımlarında cihaz üzerinde biriken statik birikimi (zorlanmayı) ortadan kaldırmak için yapılmaktadır.

Her bir yükleme sonrasında sıfır sinyali kaydedilmelidir, zira bu sinyal cihazın performansının belirlenmesinde kullanılacak bir değişkendir. Uygulanan her bir ön yüklemede en az 30 saniye beklenilmelidir. Ön yükleme sona erdiğinde 180 saniyeyi geçmeyecek kadar yüksüz konumda beklenilmeli ve bu süre sonunda okunan sıfır sinyali kaydedilmelidir.

3.4.2. Montaj pozisyonu

Kullanılan kaplinlere bağlı olmakla birlikte tork dönüştürücünün iki farklı, üç farklı veya dört farklı montaj pozisyonunda kalibrasyonu yapılmalıdır. Bu çalışmada kullanılan tork dönüştürücü ve kaplinler dairesel bağlantı tipine sahip oldukları için üç farklı montaj poziyonu kullanılmış, açılar 0°, 120° ve 240° olacak şekilde belirlenmiştir. Dönüştürücü sınıfına göre montaj pozisyonları sayısı Tablo 3.1.'de görülmektedir [22].

Tablo 3.1. Tork dönüştürücü kalibrasyonunda gerekli minimum ölçüm serisi sayıları

Cihazın sınıfı	Ölçüm serileri sayısı			
	aynı montaj pozisyonunda		her bir montaj pozisyonunda	
	artan	azalan	artan	azalan
0.05 0.2 0.2 0.5	2	1	1	1
1 2 5	1			

3.4.3. Kalibrasyonun yapılacağı ölçüm aralığı

Tavsiye edilen kalibrasyon adımları dönüştürücünün nominal tork değerinin %20'si ile %100'ü arasında eşit şekilde dağıtılmış en az 5 noktada olmakla beraber daha hassas ölçümlerde (≤ % 0,1 ölçüm belirsizliği için) ve bu çalışmada 8 nokta olarak belirlenmiştir. Bu durumda seçilen ölçüm noktaları, nominal tork değerinin %10, %20, %30, %40, %50, %60, %80 ve %100'üdür. Farklı olasılık ve sınıf değerleri için seçilebilecek kalibrasyon adımları Tablo 3.2.'de görülmektedir. [22].

Tablo 3.2. Cihaz sınıfına göre kalibrasyon adım sayıları

Cihaz sınıfı	Kalibrasyon adım sayısı
0.05 ve 0.1	8 (yaklaşık olarak eşit değilde dağıtılmış) nominal tork değeri M_E'nin %10, %20, %30, %40, %50, %60, %80 ve %100'ü nominal tork değeri M_E'nin %2, %5, %10, %20, %40, %60, %80 ve %100'ü
0.2 ve 0.5	5 (nominal tork değeri M_E'nin %20, %40, %60, %80 ve %100'ü)
1, 2 ve 5	3 (nominal tork değeri M_E'nin %20, %60 ve %100'ü)

3.4.4. Yükleme koşulları ve çevre şartları

Ardışık ölçüm serileri arasındaki süre mümkün olduğunca birbirine yakın olmalıdır. Aksi halde farklı aralıklarda ölçüm alınması halinde ölçüm sonuçlarında sürünme adı verilen zamansal değişimler meydana gelir.

Kalibrasyon işlemi genellikle ±1 °C hassasiyette ölçülecek şekilde 18 °C ile 28 °C (genellikle 22 °C) sıcaklık aralığında kalmalıdır.

Nem için standartta tanımlanmış bir değer veya aralık mevcut değildir. Ancak referans sistem ve genel ölçüm mantığı dikkate alınarak optimum değer olarak % 45 RH seçilmektedir.

3.4.5. Sıfır değeri için düzeltilmiş gösterge değeri Xj (M_K)

Düzeltilmiş gösterge değeri X_j (M_K), yüklü konumdaki gösterge değeri I_j (M_K) ile yüksüz konumdaki gösterge değeri $I_{0,j}$ (M_K) arasındaki farktır. Her bir ölçüm serisi öncesi kaydedilmiş gösterge değeri yükleme yapıldıktan sonra okunan gösterge değerlerinden çıkarılmalı yani gösterge değerinin darası alınmalı veya hesaplamalara dahil edilmelidir. Eğer gösterge cihazı üzerinde okunan birim N·m ise ölçümlere başlamadan önce ve her bir seri öncesi sıfırlama işlemi yapılmalıdır [22].

3.4.6. Tork ölçüm cihazının sınıflandırılması

Kalibrasyonun yapıldığı ölçüm aralığı için sınıflandırma, maksimum tork değerinden başlayarak minimum tork değerine kadar bütün adımlar için ayrı ayrı yapılmalıdır. Sınıflandırma için, ölçüm aralığının alt noktası M_A, sınıf 0.2, sınıf 0.5, sınıf 1, sınıf 2 ve sınıf 5 için ≤ % 20·M_E, sınıf 0.05 ve sınıf 0.1 için ≤ % 40·M_E olmalıdır.

Sınıflandırma işlemi, cihazın yapısı, kararlılığı ve elde edilecek sonuçların önceden tahmin edilebilir olmasını sağlaması açısından önemli bir veridir. Tork ölçümünün yapılacağı alana ait istenilen hassasiyete uygun cihaz, sınıf değerleri sayesinde belirlenebilmektedir. Sınıflandırma amacıyla mutlak büyüklükler olarak olan aşağıdaki kriterler bağıl hale çevrilmelidir.

- Bağıl yeniden üretilebilirlik,
- Bağıl tekrarlanabilirlik,
- Bağıl sıfır hatası,
- Bağıl tersinirlik hatası (yalnızca Durum II için),
- Bağıl gösterge veya enterpolasyon hatası,
- Gösterge cihazının ölçüm aralığı M_A'ya ait alt sınırdaki çözünürlüğü.

Tablo 3.3.'te tork ölçüm cihazının sınıfını belirleyen kriterlere ait kabul edilebilir sınır ve genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği değerleri verilmiştir [22].

Tablo 3.3. Tork ölçüm cihazları için sınıflandırma kriterleri

Sınıf	Kriterler için bağıl olarak izin verilebilen hata miktarları						Referans cihazın belirsizliği
	$\frac{b}{Y}$	$\frac{b'}{Y}$	$\frac{f_0}{Y_E}$	$\frac{h}{Y}$	$\frac{f_q}{Y}$ veya $\frac{f_a}{Y}$	M_A	$W_{ref}=k\cdot w_{ref}$
0.05	0,050	0,025	0,0125	0,063	± 0,025	≥ 4000 r	0,010
0.1	0,10	0,05	0,025	0,125	± 0,05	≥ 2000 r	0,020
0.2	0,20	0,10	0,050	0,250	± 0,10	≥ 1000 r	0,040
0.5	0,50	0,25	0,125	0,63	± 0,25	≥ 400 r	0,10
1	1,0	-	0,25	1,25	± 0,5	≥ 200 r	0,20
2	2,0	-	0,50	2,50	±1,0	≥ 100 r	0,40
5	5,0	-	1,25	6,25	± 2,5	≥ 40 r	1,0

[a] Referans cihazın genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği, çift sigmadır (*k=2*) ve tork kalibrasyon makinesinin rastgele ve sistematik hatalarına ait belirsizliklerinin bileşkesidir.

3.4.7. Belirsizlik kriterlerinin hesaplanması

Bu bölümde tork dönüştürücüler ve tork ölçüm cihazlarına ait standart ve toplam ölçüm belirsizliklerinin hesaplanmasında kullanılan belirsizlik kriterleri açıklanmıştır.

Tork dönüştürücüye ait ölçüm sonuçları değerlendirilirken ve ölçüm belirsizliği hesaplanırken, cihazın kullanım şekline göre iki farklı durum göz önüne alınmaktadır:

- Durum I: Bu durumda cihazın yalnızca artan yönde kullanıldığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla hesaplanacak ortalama değerlerde yalnızca, sıfır düzeltmesi yapılmış farklı montaj pozisyonlarına ait artan serilerdeki veriler dikkate alınır. Sıfır noktası (orijin) başlangıç kabul edilerek enterpolasyon hatalarına göre birinci dereceden (doğrusal) veya üçüncü dereceden (kübik) eğilim fonksiyonları oluşturulur. Tersinirlik hatası, sınıflandırma kriterleri (Tablo 3.3.) arasında kullanılmadığı gibi Bölüm 3.4.8'de bahsedildiği gibi standart bağıl ölçüm belirsizliği $w(M_K)$ hesaplamasında da dikkate alınmaz.
- Durum II: Bu durumda cihazın kullanım şeklinin nasıl olduğu (artan ve/veya azalan yönde) bilinmemekte veya cihaz artan ve azalan yönlerde beraber kullanılmaktadır. Dolayısıyla hesaplanacak ortalama değerlerde sıfır düzeltmesi yapılmış farklı montaj pozisyonlarına ait artan ve azalan seriler beraber dikkate alınır. Sıfır noktasına (orijin) ve enterpolasyon hatalarına göre birinci dereceden (doğrusal) eğilim fonksiyonu oluşturulur. Tersinirlik ve enterpolasyon/gösterge hataları, sınıflandırma kriterleri (Tablo 3.3.) içinde değerlendirilir ve Bölüm 3.4.8'de bahsedildiği gibi bağıl ölçüm belirsizliği aralığı $W'(M_K)$ hesaplamasında dikkate alınır.

3.4.7.1. Ortalama değerler $Y_h(M_K)$, $Y(M_K)$

Durum I için ortalama değer $Y(M_K)$, kalibrasyonun yapıldığı her bir ölçüm noktası için aşağıdaki eşitlik yardımıyla, sıfır düzeltmesi yapıldıktan sonra her bir artan seriye ait ölçüm sonuçları kullanılarak Denklem (3.1)'e göre hesaplanır [22].

$$Y(M_K)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(I_j(M_K)-I_{0,j}\right)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}X_j(M_K) \tag{3.1}$$

Durum II için ortalama değer $Y_h(M_K)$, kalibrasyonun yapıldığı her bir ölçüm noktası için aşağıdaki eşitlik yardımıyla, sıfır düzeltmesi yapıldıktan sonra her bir artan ve azalan seriye ait ölçüm sonuçları kullanılarak Denklem (3.2)'ye göre hesaplanır [22].

$$Y_h(M_K)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{I_j(M_K)+I'_j(M_K)}{2}-I_{0,j}\right)=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{X_j(M_K)+X'_j(M_K)}{2}\right) \quad (3.2)$$

Her iki durumda da n, farklı montaj pozisyonlarındaki artan ölçüm serilerini ifade etmektedir.

0° pozisyonunda artan serilerde elde edilen ölçüm sonuçları ortalama değerlerin ($Y_h(M_K)$ ve $Y(M_K)$) hesaplanmasında kullanılmamaktadır.

Kalibrasyonu yapılan bir tork dönüştürücü, yalnızca ölçümün yapıldığı adımlarda kullanılmak zorunda değildir. Çalışma şartlarına ve isteğine bağlı olarak ölçüm aralığındaki herhangi bir nokta da kullanılabilir. Bu sebeple Durum I ve Durum II'de elde edilen ortalama değerlere göre bir eğilim fonksiyonu oluşturulmalı ve sertifikada bu fonksiyon belirtilmelidir.

3.4.7.2. Yeniden üretilebilirlik hatası b(MK) ve tekrarlanabilirlik hatası b'(MK)

Yeniden üretilebilirlike ilişkin hesaplama yapılırken bütün çevrimlerde artan serilerde elde edilen ölçümler sıfır düzeltmesi yapıldıktan sonra dikkate alınır ve Denklem (3.3)'e göre hesaplanır [22].

$$b(M_K)=X_{mak}(M_K)-X_{min}(M_K) \quad (3.3)$$

Burada $X_{mak}(M_K)$ farklı montaj pozisyonlarında bir ölçüm adımına ait sıfır düzeltmesi yapılmış en küçük ölçüm değerini, $X_{mak}(M_K)$ ise en büyük ölçüm değerini ifade etmektedir.

Tekrarlanabilirlikte ise yalnızca aynı montaj pozisyonunda bir ölçüm adımında okunan değerler sıfır düzeltmesi yapıldıktan sonra dikkate alınır ve Denklem (3.4)'e göre hesaplanır [22].

$$b'(M_K)=|X_1(M_K)-X_2(M_K)| \quad (3.4)$$

Burada $X_1(M_K)$ ve $X_2(M_K)$ aynı montaj pozisyonunda sıfır düzeltesi yapılmış ölçüm değerleridir.

0° pozisyonunda alınmış ikinci seriye ait veriler $b(M_K)$ hesaplamasında kullanılmamalıdır.

3.4.7.3. Sıfır hatası f0

Her artan ölçüme artan serilerin ($I_{0,j}$) başındaki sıfır değeri ve azalan serilerin ($I_{0,f}$) sonundaki sıfır değeri kaydedilmelidir. Dönüştürücü üzerindeki yük kaldırıldıktan yaklaşık 30 saniye sonra ölçüm yapılmalıdır. Sıfır hatası f_0 bütün montaj pozisyonlarında okunan sıfır değerlerinin farkının mutlak değeridir ve Denklem (3.5)'e göre hesaplanır [22].

$$f_0=mak_j\left|I_{f,j}-I_{0,f}\right| \tag{3.5}$$

0° pozisyonunda alınmış ikinci seriye ait sıfır değerleri azalan seri eksikliğinden dolayı f_0 hatasında kullanılmamalıdır.

3.4.7.4. Tersinirlik hatası h(MK)

Tersinirlik hatası, artan ve azalan ölçümleri barındıran bütün serilerde artan ve azalan değerlerin farkının mutlak değeri olarak Denklem (3.6)'ya göre hesaplanır [22].

$$h(M_K)=mak_j\left(\left|I_j(M_K)-I'_j(M_K)\right|\right)=mak_j\left(\left|X_j(M_K)-X'_j(M_K)\right|\right) \tag{3.6}$$

3.4.7.5. Enterpolasyon hatası fa(MK)

Enterpolasyon hatası, ölçümler sonucu elde edilen ortalama değerlerin kalibrasyonun yapıldığı adımlara göre üçüncü dereceden eğilim fonksiyonu (sınıf 0.05, sınıf 0.1, sınıf 0.2 ve sınıf 0.5 için) veya birinci dereceden eğilim fonksiyonu (sınıf 1, sınıf 2 ve sınıf 5 için) yardımıyla belirlenir. Kullanılan denklem, kalibrasyon sertifikasında mutlaka belirtilmelidir.

Enterpolasyon denklemi matematiksel olarak genellikle en küçük kareler yöntemi ile belirlenir. Bu yöntemde, ölçüm adımları boyunca elde edilmiş verilere ait mutlak değerler ile enterpole edilmiş verilerin ($Y_a(M_K)$ ve $Y(M_K)$) farkı hesaplanarak enterpolasyon hatası Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) yardımıyla belirlenir.

$$f_a(M_K)=Y(M_K)-Y_a(M_K) \rightarrow \text{Durum I için} \quad (3.7)$$

$$f_a(M_K)=Y_h(M_K)-Y_{ah}(M_K) \rightarrow \text{Durum II için} \quad (3.8)$$

3.4.7.6. Gösterge hatası $f_q(MK)$

Gösterge hatası, gösterge cihazından yalnızca tork birimi okunması durumunda hesaplanmaktadır. Ortalama değer $Y(M_K)$ ve kalibrasyonun yapıldığı tork adımı M_K arasındaki fark kullanılarak Denklem (3.9) yardımıyla belirlenir.

$$f_q(M_K)=Y(M_K)-M_K \quad (3.9)$$

3.4.7.7. Kısa dönem kayma

"Kısa dönem kayma", ilk montaj pozisyonunda ölçüm serilerine başlamadan önce kaydedilmiş sıfır değeri ile üçüncü ön yükleme sonrası kaydedilmiş sıfır değeri arasındaki farkın, maksimum ölçüm noktasına (M_E) bölümü olarak ifade edilir ve hesaplanır.

3.4.8. Tork dönüştürücülerin genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması

Tork dönüştürücülere ait ölçüm belirsizliği hesaplamasında kullanılan denklem ve kabuller, Avrupa Akreditasyon Kurumu (EA) ve Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu (BIPM) tarafından yayımlanmış rehber dokümanlar temel alınarak oluşturulmuştur [15, 23].

3.4.8.1. Matematiksel model

Ölçüm sonucu Y, referans cihaz ve gösterge cihazından okunan değerler X_i'yi belirleyen pek çok etki büyüklüğüne bağlıdır ve Denklem (3.10)'daki gibi ifade edilir. Ölçüm biriminin tork biriminden (örn. N·m) farklı olması durumunda bir hassasiyet katsayısı C söz konusu olmaktadır [22].

$$Y(M_K)=C\cdot M_K\cdot\prod_{i=1}^{n}K_i=C\cdot M_K\cdot\prod_{i=1}^{n}(1-\delta X_i) \tag{3.10}$$

Sonucu etkileyen etki büyüklükleri şu şekilde sıralanabilir:

- δX_1 yüksüz durumda gösterge cihazının çözünürlük etkisi r,
- δX_2 yüklü durumda gösterge cihazının çözünürlük etkisi r,
- δX_3 yeniden üretilebilirlik etkisi b,
- δX_4 tekrarlanabilirlik etkisi b',
- δX_5 sıfır hatası etkisi $f_{0,}$
- δX_6 gösterge hatası etkisi f_q veya enterpolasyon hatası etkisi f_a,
- δX_7 tersinirlik hatası h,
- δX_8 kalibrasyon esnasındaki sıcaklık etkisi t.

3.4.8.2. Ölçüm belirsizliği bütçesi

Birbirinden bağımsız girdi büyüklükleri (belirsizlik kriterleri) için bağıl standart ölçüm belirsizliği Denklem (3.11) ve Denklem (3.12)'de gösterildiği gibi hesaplanır [22]:

$$w(M_K)=\sqrt{w_{ref}^2(M_K)+w^2(\delta X_1)+w^2(\delta X_2)+\sum_{i=3}^{6}w^2(\delta X_i)}$$
$$=\sqrt{\begin{matrix}w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+w_b^2(M_K)+w_{b'}^2(M_K)\\+w_0^2(M_E)+w_{fa}^2(M_K)\end{matrix}} \tag{3.11}$$

→Durum I için

$$w(M_K)=\sqrt{w_{ref}^2(M_K)+w^2(\delta X_1)+w^2(\delta X_2)+\sum_{i=3}^{5}w^2(\delta X_i)}$$
$$=\sqrt{w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+w_b^2(M_K)+w_{b'}^2(M_K)+w_0^2(M_K)} \tag{3.12}$$

→Durum II için

Tablo 3.4. Belirsizlik kriterlerinin hesaplanabilmesi için kullanılan dağılım fonksiyonları

Parametre	Dağılım fonksiyonu	Bağıl standart sapma w
Çözünürlük r	B Tipi Normal dağılım	$w_r=\frac{\left(\frac{r}{2}\right)}{\sqrt{3}}\cdot\frac{100}{M_K}$
Yeniden üretilebilirlik b	B Tipi Normal dağılım	$w_b=\frac{\left(\frac{b(M_K)}{2}\right)}{\sqrt{3}}\cdot\frac{100}{Y(M_K)}$
Tekrarlanabilirlik b’	B Tipi Normal dağılım	$w_r=\frac{\left(\frac{b'(M_K)}{2}\right)}{\sqrt{3}}\cdot\frac{100}{Y(M_K)}$
Sıfır hatası f_0	B Tipi Normal dağılım	$w_r=\frac{\left(\frac{f_0}{2}\right)}{\sqrt{3}}\cdot\frac{100}{Y(M_E)}$
Enterpolasyon sapması f_a	B Tipi Üçgen dağılım	$w_r=\frac{\left(\frac{f_a(M_K)}{2}\right)}{\sqrt{6}}\cdot\frac{100}{Y(M_K)}$

3.4.8.3. Durum I için genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliğinin hesaplanması W(M_K)

Durum I yalnızca ölçüm skalası bilinmeyen cihazlar için söz konusudur. Sınıf 0.05 ve 0.5 cihazlar ve kübik eğilim fonksiyonlar için genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği $W(M_K)$, (2.11)’deki denkleme göre standart bağıl ölçüm belirsizliği $w(M_K)$ yardımıyla her bir eğilim fonksiyonu için Denklem (3.13) ve Denklem (3.14)’e göre belirlenir. Kübik eğilim fonksiyonu dikkate alındığı için bu durum, Durum I-A olarak tanımlanmaktadır [22]:

$$W(M_K)=k\cdot w(M_K) \rightarrow k=2 \text{ için} \tag{3.13}$$

$$W(M_K)=2\cdot\sqrt{\begin{matrix}w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+w_b^2(M_K)\\+w_b^{2'}(M_K)+w_0^2(M_K)+w_{fa}^2(M_K)\end{matrix}} \rightarrow \text{(Durum I-A)} \tag{3.14}$$

Benzer şekilde lineer eğilim fonksiyonu uygulandığında, enterpolasyon hatasının sistematik yapısından dolayı bağıl standart sapma w_{fa} yerine kalibrasyon sonucuna

bağlı enterpolasyon hatası f_a kullanılır ve Denklem (3.15)'e göre hesaplanır. Bu durum ise Durum I-B olarak tanımlanmaktadır [22].

$$W(M_K)=2\cdot\sqrt{\begin{matrix} w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+w_b^2(M_K) \\ +w_{b'}^2(M_K)+w_0^2(M_K)+\left(\frac{f_a(M_K)}{Y(M_K)}\cdot\%100\right)^2 \end{matrix}} \rightarrow(\text{Durum I-B}) \tag{3.15}$$

Sınıf 1, sınıf 2 ve sınıf 5 cihazlar ve lineer eğilim fonksiyonu kullanılması halinde Durum I-B eşitliğinde verilen b′, b'ye eşit kabul ediliği genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği $W(M_K)$ Denklem (3.16)'da gösterildiği gibi hesaplanır [22].

$$W(M_K)=2\cdot\sqrt{\begin{matrix} w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+2\cdot w_b^2(M_K) \\ +w_0^2(M_E)+\left(\frac{f_a(M_K)}{Y(M_K)}\cdot\%100\right)^2 \end{matrix}} \tag{3.16}$$

3.4.8.4. Durum II için bağıl belirsizlik aralığının hesaplanması W′(M_K)

Durum II için yapılan hesaplamalarda yalnızca doğrusal eğilim fonksiyonu kullanılır. Ölçüm skalası bilinmeyen cihazlarda (Durum II-A), tersinirlik h ve enterpolasyon hatası f_a'nın sistematik yapısından dolayı genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği yerine bağıl belirsizlik aralığı $W'(M_K)$, Denklem (3.17) ve Denklem (3.18)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$W'^{(M_K)}=\left|\frac{f_a(M_K)}{Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+\left|\frac{h(M_K)}{2\cdot Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+k\cdot w(M_K) \tag{3.17}$$

$\rightarrow k=2$ için (Durum II-A)

$$W'(M_K)=\left|\frac{f_a(M_K)}{Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+\left|\frac{h(M_K)}{2\cdot Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100 +2\cdot\sqrt{w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+w_b^2(M_K)+w_{b'}^2(M_K)+w_0^2(M_E)} \tag{3.18}$$

Sınıf 1, sınıf 2 ve sınıf 5 cihazlarda $w_{b'} = w_b$ olduğu için bağıl belirsizlik aralığı Denklem (3.19)'da gösterildiği şekilde hesaplanır [22].

$$W'(M_K)=\left|\frac{f_a(M_K)}{Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+\left|\frac{h(M_K)}{2\cdot Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100 +2\cdot\sqrt{w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+2\cdot w_b^2(M_K)+w_0^2(M_E)} \quad (3.19)$$

Tanımlı bir büyüklük söz konusuysa (Durum II-b), tersinirlik ve gösterge hatasının sistematik yapısından dolayı genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği $W(M_K)$ yerine bağıl ölçüm aralığı $W'(M_K)$, Denklem (3.20) ve Denklem (3.21)'deki gibi hesaplanır [22].

$$W'(M_K)=\left|\frac{f_q(M_K)}{Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+\left|\frac{h(M_K)}{2\cdot Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+k\cdot w(M_K) \quad (3.20)$$

$\rightarrow k=2$ için (Durum II-B)

$$W'(M_K)=\left|\frac{f_q(M_K)}{Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+\left|\frac{h(M_K)}{2\cdot Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100 +2\cdot\sqrt{w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+w_b^2(M_K)+w_{b'}^2(M_K)+w_0^2(M_E)} \quad (3.21)$$

Sınıf 1, sınıf 2 ve sınıf 5 cihazlarda $w_{b'} = w_b$ olduğu için bağıl belirsizlik aralığı Denklem (3.22)'de gösterildiği gibi hesaplanır [22].

$$W'(M_K)=\left|\frac{f_q(M_K)}{Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100+\left|\frac{h(M_K)}{2\cdot Y_h(M_K)}\right|\cdot\%100 +2\cdot\sqrt{w_{ref}^2(M_K)+2\cdot w_r^2(M_K)+2\cdot w_b^2(M_K)+w_0^2(M_E)} \quad (3.22)$$

3.4.9. Kalibrasyon sertifikası

Eğer tork ölçüm cihazı, kalibrasyon sonuçlarına göre istenilen şartları sağlıyorsa ve yukarıda sıralanan kriterler dikkate alınarak, kalibrasyonu yapan laboratuvar tarafından aşağıda belirtilen bilgileri içerecek şekilde rapor hazırlanır:

a) Tork ölçüm cihazına ait ve montaj esnasında kullanılan bütün parçaların tanımlanması,

b) Ölçüm yönünün (sağ ve/veya sol) belirlenmesi,

c) Kalibrasyon esnasında kaydedilen ortam sıcaklığı,

d) Kalibrasyon tarihi,

e) Kalibrasyon laboratuvarı ve kullanılan standart hakkında bilgi,

f) İlgili standarda atıf,

g) Ölçüm aralığına göre sınıflandırma sonucu,

h) Kalibrasyon sonuçları,

i) Kısa dönemli sürünme.

Bunlara ek olarak kalibrasyon sertifikasında aşağıdaki bilgilerin de bulunmasında yarar vardır:

j) Ham verilere ilişkin tablo ve hesaplanmış kriterlere ilişkin sonuçlar,

k) Okunan değerlere ait sapmaların kübik (Durum I için) veya lineer (Durum II için) sapma grafikleri,

l) Enterpole edilmiş kalibrasyon sonuçlarına göre bağıl ölçüm belirsizliği veya bağıl belirsizlik aralığı grafikleri.

Ek-C'de örnek bir kalibrasyon sertifikası gösterilmiştir. Hazırlanan kalibrasyon sertifikası, test cihazının kullanım alanına bağlı olarak farklı şekillerde değerlendirilebilmektedir.

Kalibrasyonu yapılan test cihazı (tork dönüştürücü) izlenebilirlik piramidinde daha alt seviyede bulunan bir cihaza izlenebilirlik sağlama amaçlı yani bir transfer standardı olarak kullanılacak ise, farklı durumlara ait belirsizlik değerleri ve aralıkları, enterpolasyon katsayıları ve belirsizlik bileşenlerine erişim imkanı sunmaktadır. Bu sayede yalnızca kalibrasyon adımları değil, cihazın bütün çalışma aralığına ait enterpole edilmiş ortalama ve belirsizlik değerleri hesaplanabilmektedir.

Diğer taraftan kalibrasyonu yapılan test cihazı (tork dönüştürücü), otomotiv sektöründe motordan diğer bileşenlere aktarılan döndürme gücü test sistemleri gibi bir deney düzeneğinin bir unsuru ise, sertifikadan elde edilen sapma ve ölçüm belirsizliği değerleri, test düzeneğinin toplam sapma ve belirsizlik değerlerinin hesaplanmasında, gerektiği durumda düzeltme katsayısının belirlenmesinde kullanılabilmektedir.

3.5. Yüksek Lisans Tezinin Amacı

Tork dönüştürücüler üzerine daha önce genel anlamda kimi araştırmalar ve çalışmalar yapılmış olsa da bu çalışmalar çoğunlukla sistem kurulumu, ikili karşılaştırma sonuçlarının incelenmesi ve ölçüm belirsizliğin iyileştirilmesine yöneliktir. Ölçüm

sonuçlarını etkileyen sıcaklık, nem ve basınç başta olmak çevresel faktörlerin çeşitli varyasyonlarda nasıl bir eğilim gösterdiği ve standart dışı yaklaşımlarda maliyet-süre ilişkisini nasıl değiştirdiği ise birkaç araştırmacı dışında –sistem bazında– araştırılmamıştır [24].

Özellikleri Bölüm 4.1'de belirtildiği üzere bu çalışmada kullanılan tork dönüştürücüye ait nominal değerden her 10 °K sıcaklık farkı için çıkış sinyali değişimi, cihaza ait teknik şartname kılavuzunda % 0,03 olarak belirtilmiştir.

Bir laboratuvar ölçümü göz önüne alındığında, ± 5 °C, yeterince büyük bir sıcaklık farkı olacaktır. Aynı tork dönüştürücüye ait 20 N·m'deki sinyal çıkışı ~1,350 mV/V'tur. Bu durumda ölçümler esnasında sıcaklık değerinin başlangıç ve bitiş değerleri arasında 5 °C değişmesi durumunda ve bu değişimin çıkış sinyalini maksimum düzeyde (% 0,03) değiştirmesi dikkate alındığında, hata miktarı bağıl olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Hata miktarı (mV/V)} \rightarrow 1{,}35 \text{ mV/V} \times \frac{0{,}03}{100 \times 2} = 0{,}000203 \text{ mV/V}$$

$$\text{Sapma (\%)} = \frac{\text{Hata miktarı (mV/V)}}{\text{Nominal sinyal (mV/V)}} = \frac{0{,}000203 \text{ mV/V}}{1{,}350 \text{ mV/V}} \times 100 = \% \ 0{,}015$$

Görüldüğü gibi oluşan sapma miktarı, Bölüm 3.2.1'de özellikleri verilen TKM II kalibrasyon makinesinin tork dönüştürücülere verebileceği en iyi ölçüm belirsizliği olan % 0,01 değerinden büyüktür. Dolayısıyla sıcaklık değerinin kontrolü, tork ölçümlerinde çok önemlidir.

Bu çalışma ile, kontrol altında tutulan farklı çevresel şartlar altında ölçümler gerçekleştirilmiş ve farklı veri işleme yöntemleri aracılığıyla başta ölçüm belirsizliği ve ölçüm sonuçları olmak üzere "ölçümün kalitesi"nin nasıl değiştiği gözlenmiş ve olası kalibrasyon metotları hakkında önerilerde bulunulmuştur. Elde edilecek sonuçlar, etkiyen parametrelerin çok olması (dönüştürücünün kendisi, ölü ağırlıklar, manivela kolu düzeneği, lazerle hizalama, havalı yatak sistemi, kullanılan flanşlar ve kaplinler, veri alma sistemi, filtreleme yöntemleri, kalibrasyon makinesinin üretim malzemeleri, gösterge cihazı, kullanılan kablolar, ölçüm ve çevrim sayıları, hizalama hataları vb.) ve büyük bir kısmının bağımsız olarak kontrol edilememesi nedeniyle

evrensel bir bağıntı elde etmeye yetmeyecektir. Zira bütün bu etkenlerin zaten referans kalibrasyon makinesine ait ölçüm belirsizliği değerleri içerisinde olduğu kabul edilmektedir. Ancak bu çalışmada, ölçümlerin yapıldığı alan özelinde de olsa tork dönüştürücü kalibrasyonunda ortam şartlarının ölçüm belirsizliği ve ölçüm kalitesini ne yönde etkileyeceği, yeniden hesaplanmış belirsizlik aralığı ve standart dışı uygulamalarda istenilen sınırlar içerisinde kalınıp kalınamayacağı gibi konularda cevap bulmak hedeflenmektedir.

3.6. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Tork dönüştürücüler üzerinde sıcaklık ve nem değişiminin, gerçek ve tam bir kalibrasyon esnasında ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi bu güne kadar kapsamlı bir şekilde pek fazla incelenmemiş olup genellikle ölçümlerin bir bölümü veya farklı tip dönüştürücülerin davranışları temel alınarak bazı çalışmalar yapılmıştır.

İngiltere Ulusal Fizik Laboratuvarı'nın (NPL), tork dönüştürücü kalibrasyonu rehberinde sıcaklık etkisinin yüksüz ve yüklü durumlarda nasıl incelenmesi gerektiği açıklanmıştır. Tork değerindeki değişim miktarının tespit edilebilmesi için sıcaklık çalışma limitleri ve sıcaklık hassasiyeti çeşitli eşitlikler yardımıyla belirlenmiştir. Bu yöntemde dönüştürücüye ait sıcaklık değişimi yalnızca yüksüz ve tek bir yük değeri altında (genellikle maksimum tork değeri) incelenmektedir. Kalibrasyon süreci boyunca ortaya çıkan tekrarlanabilirlik, tersinirlik, yeniden üretilebilirlik, çözünürlük gibi parametrelerin herhangi bir katkısı bulunmamakta, referans ve test cihazlarının mekanik ve yazılımsal davranışları dikkate alınmamaktadır. Dolayısıyla cihazın yalnızca statik durum altındaki davranışı, seçilmiş tork değerlerinde belirlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar, bir kalibrasyon prosedüründe ortaya çıkabilecek değişimlerin yönü, büyüklüğü ve etkisini detaylı bir şekilde ortaya koyamamaktadır. Zaten uygulamanın amacı da bu etkiyi görmek değil, sinyal değişimini tespit etmektir. Ancak gerçek bir kalibrasyon esnasında sıcaklık ve nem değişimleri, bir sonraki adımı etkileyebilecek parametreler olup cihaz özelinde inceleme yapılmak istenmesi halinde mutlaka dikkate alınmalıdır [25].

HBM ve Lahti Oy Precision gibi tork dönüştürücü üreten firmalar, İngiliz Ölçüm ve Kontrol Enstitüsü ve Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü gibi kuruluşların yayınlarında, genel bir çalışmadan ziyade sıcaklığın ölçüm sonuçları üzerindeki

etkisinin ortadan kaldırılmasına yönelik eşitlikler, polinom eğrileri ve bunlardan elde edilen düzeltme faktörleri yer almaktadır. Bu düzeltme faktörleri kimi zaman yazılımlar vasıtasıyla kullanıcıya yansıtılmamakta veya etkisi çok düşük seviyelere indirilmektedir. Sıcaklık (veya varsa nem) düzeltme katsayılarının kullanılması, hata payını bir noktaya kadar azaltabilmektedir. Bu hatanın belirgin olacağı değerler ise standardın belirlediği nominal değer olan 21 °C sıcaklık değerinden ciddi miktarlarda uzaklaşılması durumunda ortaya çıkacaktır. Örneğin, bir yüksek sıcaklık fırını (sabit nem, değişken sıcaklık), iklimlendirme kabini (değişken sıcaklık, değişken nem) veya bir soğuk oda (sabit nem, değişken sıcaklık) içerisinde tork ölçümü yapılması durumunda, sıcaklık düzeltme katsayısı uygulanması, gerinim-ölçerlerin çalışma prensibi ve üretildiği malzeme gereği zorunludur. Zira böyle bir çalışma ortamında sapma ve belirsizlik değerleri önemli ölçüde değişecektir. Ancak bu durum, tork dönüştürücünün yalnızca bir dönme kuvveti yaratıcı makine veya sisteme bağlı olması ve ölçüm gerçekleştirmesi durumunda meydana çıkacaktır. Hava sürtünmesi, yataklama sistemi, kaplinlerin seçimi vb. durumlarda ortaya çıkabilecek kayıplar, zaten baskın bileşenler olup sıcaklığın etkisinin ihmal edilmesine sebep olabilir [21, 26, 27].

Kimi çalışmalarda ise yalnızca gerinim ölçerler incelenmiş ve sıcaklık davranışları ortaya konmuştur. Ancak bu çalışmalarda da ölçüm boyunca ortaya çıkabilecek sinyal bozucu etkenler dikkate alınmamakta, gerinim ölçerin sıcaklık değişimiyle birlikte davranışı yalın bir şekilde ele alınmaktadır [13, 28, 29].

Kalibrasyon anlamında tork ölçümü ise –işin doğası gereği– hata kaynaklarını tespit etmek ve ölçüm belirsizliği değerini en alt seviyeye indirmek amacıyla yapıldığı için, yukarıda bahsi geçen hava sürtünmesi, yataklama vb. bileşenleri en başta ortadan kaldırmak durumundadır. Bunun sonucu olarak ortam sıcaklığı ve nemi, lazerleme hassasiyeti, ölü ağırlıkların hata toleransları, manivela kolu gibi unsurların kontrol altına alınması önem arz etmektedir. Bu çalışmada da incelenen, esas olarak kontrol edilebilme imkanı olan sıcaklık ve nem değerlerinin ölçüm sonuçları üzerindeki etkisidir.

Tork ölçümlerinde dış etkenlerin etkisi ile ilgili Tayland Metroloji Enstitüsü tarafından yapılmış bir başka çalışmada, bir iklimlendirme kabini içerisine yerleştirilmiş olan tork

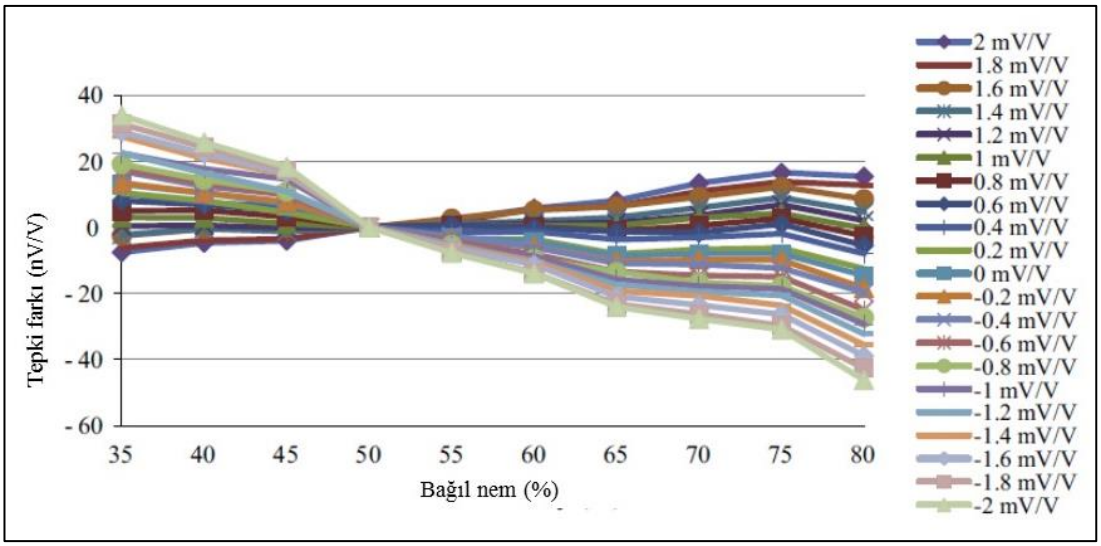
kalibrasyon düzeneğine bağlanmış tork dönüştürücü ve tork anahtarları, farklı sıcaklık ve nem değerleri altında incelenmiştir. Ölçümler yüksüz, nominal değerin %50'si ve %100'üne karşılık gelen tork değerlerinde yapılmış ve farklı dönüştürücü tiplerinin sıcaklık ve nem hassasiyetleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, sıcaklık ve uygulanan kuvvet artışının sıcaklık hassasiyetini artırdığı ve dolayısıyla ölçüm sonuçlarının hedeflenen değerden saptığı tespit edilmiştir [30].

Sıcaklığın ölçüm sonuçları üzerindeki asıl etkisi, dönüştürücünün gerinim-ölçer ve referans makinenin üretildiği malzemeye ait elastisite modülünün sıcaklık katsayılarından kaynaklanmaktadır. Gerinim ölçerdeki sıcaklık kompanzasyon devresinin bu etkiyi 10 kata kadar azalttığı tespit edilmiş olsa da elde edilen sonuçlar ikincil seviye bir laboratuvar ve karşılaştırma ölçümleri için hala yeterli değildir. Dolayısıyla sıcaklık etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Nem değişimi ise sonuçlar üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmamaktadır. Dönüştürücülere ait nem hassasiyeti yalnızca veri alışı esnasında güç kaynağının frekansında dalgalanmalara yol açmaktadır [30].

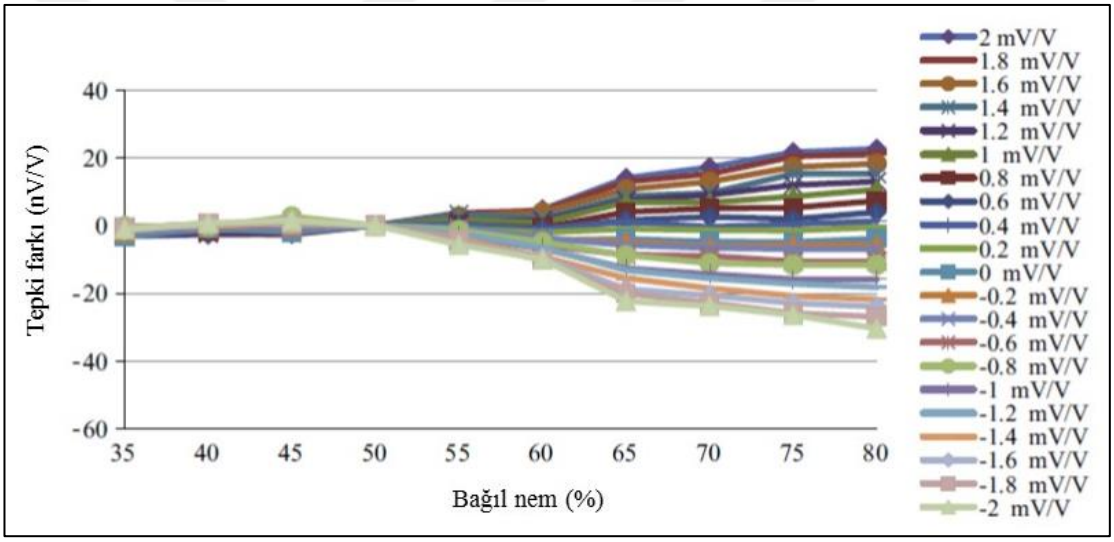
Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü PTB'nin Katı Mekaniği Departmanında ise, değişken bir sıcaklığın ölçümler üzerindeki etkisi incelenmiş ve sadece sensörlerin yanı sıra izlenebilirlik zincirinin diğer kısımları, ölçme amplifikatörleri ve kalibrasyon için uygulanan köprü standartları da kullanılmıştır. Bağıl nem ve sıcaklığın DMP40 gösterge ekipmanı ve BN100A köprü kalibrasyon ünitesi (bu çalışmadaki karşığı tork dönüştürücü) üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ölçüm değerlerinin artan bağıl nem ile doğru orantılı olduğu görülmüş, bağıl nemden kaynaklanan değişimin sıcaklık ile de bağlantılı olduğu tespit edilmiştir [14, 31].

Khaled ve diğerleri, tork dönüştürücülerin kalibrasyonu üzerine sıcaklık ve nemin etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmaya ait sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır.

Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'te görüldüğü gibi sıcaklığın 22 °C'den 31 °C'ye artırılması durumunda % 50 nem ve üzerinde belirgin bir sinyal değişimi (nV/V birimli) değişim meydana gelmediği görülmüştür. Nem değerinin %50'nin altına düşmesi durumunda ise bir miktar dalgalanma ve saçılmalar meydana gelmediği görülmüştür [31].

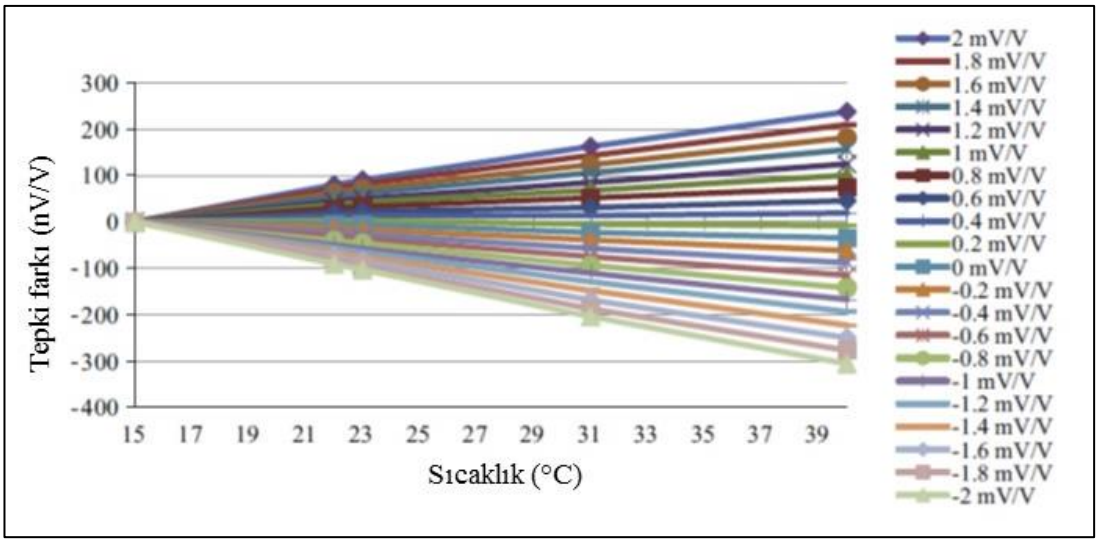


Şekil 3.4. 22 °C sabit sıcaklık ve değişken nem durumunda sinyal değişimi

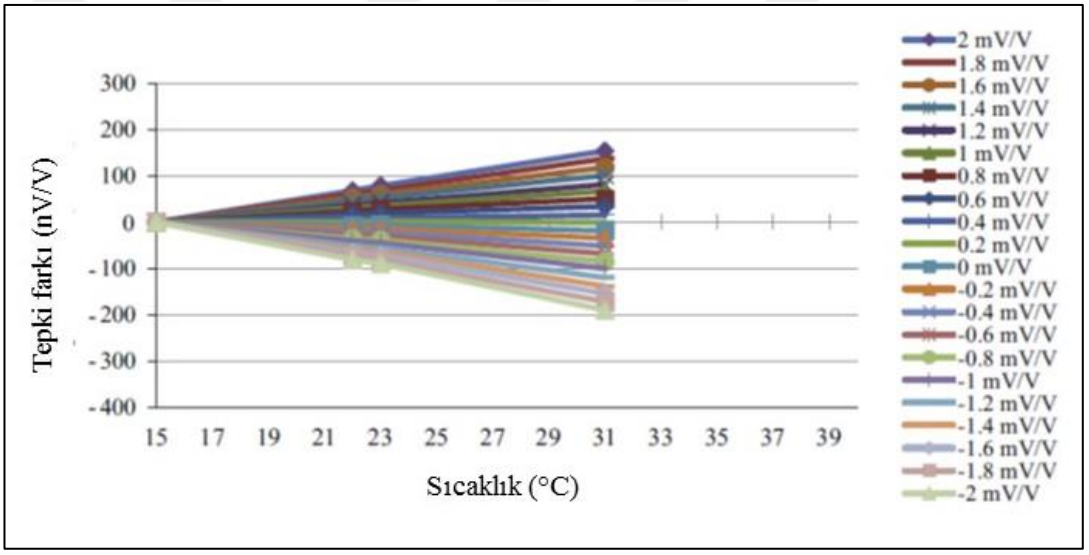


Şekil 3.5. 31 °C sabit sıcaklık ve değişken nem durumunda sinyal değişimi

Khaled ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalarda sıcaklığa ilişkin değişim grafikleri, sırasıyla Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'de gösterilmektedir [31].



Şekil 3.6. % 50 sabit nem değerinde sıcaklık artışının sinyal değişimindeki etkisi



Şekil 3.7. % 80 sabit nem değerinde sıcaklık artışının sinyal değişimindeki etkisi

Bu grafiklere göre sıcaklık değişimi sonucu elde edilen ölçüm sonuçlarının bağıl neme bağlı olmadığı görülmüştür. Bu değişim, sapma miktarının maksimum olduğu ve her iki grafikte yer alan 31 °C için ve 2mV/V sinyalinde incelenecek olursa sırasıyla $\Delta I_{\%50} \cong 100 \times \frac{0{,}000180}{2} = 0{,}009$ mV/V ve $\Delta I_{\%80} \cong 100 \times \frac{0{,}000170}{2} = 0{,}0085$ mV/V seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yani arada 0,0005 mV/V gibi oldukça düşük ve maksimum tork değerinde ulaşılan 2 mV/V sinyal değeri için ihmal edilebilir bir değer ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık azaldıkça bu fark da azalmaktadır. Dolayısıyla sabit nem altında ve sıcaklığın artması halinde, ölçüm sinyallerindeki değişim artı yönlü olmakta ve doğrusal bir eğilim sergilediği tespit edilmiştir [31].

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tork dönüştürücülerin farklı sıcaklık ve nem değerlerinde kalibrasyonlarının yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi üzerine kurulu bu deneysel çalışmada, ölçüm sonuçlarının güvenilir bir şekilde ve birbirleriyle kıyaslanmaları esnasında mümkün olduğunca bozucu etkilerden uzak tutulabilmesi amacıyla oldukça katı kurallar benimsenmiştir.

Kullanılan referans ve test ekipmanları en hassas ve birincil seviye cihazlardan seçilmiş, bu sayede cihazların kararsız davranışlarının sonuçlar üzerinde etkisinin çok düşük olması hedeflenmiştir.

Laboratuvarı şartlandırmak için kullanılan klimanın sıcaklık ve nem değerlerini stabil ve istenilen sapma sınırları içerisinde tutabildiğinden emin olmak için bir hafta boyunca yalnızca sıcaklık ve nem değerlerinin dalgalanmaları izlenmiş, istenilen sınırlar içerisinde kalındığı tespit edildikten sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Ölçümlerin gerçekleştirilmesi ve sonuçların kaydedilmesi esnasında kullanıcıdan kaynaklı hata ve belirsizliklerinin önüne geçebilmek amacıyla referans tork kalibrasyon makinelerine entegre yazılım kullanılmış, her bir kalibrasyon prosedürü yaklaşık bir gün sürecek şekilde bütün ölçümler kullanıcı etkisi olmadan otomatik olarak kaydedilmiştir.

4.1. Ölçümlerde Kullanılan Ekipmanlar ve Test Prosedürü

Bu çalışma boyunca bahsedilmiş, atıfta bulunulmuş bütün ölçüm sonuçları, Türk Standardları Enstitüsü'ne ait Gebze Kalite Kampüsü sınırları içerisindeki Gebze Kalibrasyon Müdürlüğü – Tork Kalibrasyon Laboratuvarı'nda elde edilmiştir. DIN 51309: Malzeme test makineleri – Statik tork ölçüm cihazlarının kalibrasyonu standardında belirtildiği üzere ölçümler, toplam dört farklı montaj pozisyonunda ve sekiz ölçüm noktasında yapılmıştır.

4.1.1. Referans cihaz (ölü ağırlıklı tork ölçüm makinesi)

Laboratuvar bünyesinde tork cihazlarının kalibrasyonu amacıyla kurulmuş dört adet makine bulunmaktadır. Bu makinelere ait bilgiler Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. TSE GKM'de bulunan tork kalibrasyon makineleri

Cihaz adı	Kullanılan Referans Sistem	Kalibrasyonunda Kullanıldığı Ölçüm Cihazları	Ölçüm Aralığı
TKM I	Ölü ağırlık	Tork dönüştürücüler, tork kalibratörleri	(2 – 1000) N·m
TKM II	Ölü ağırlık	Tork dönüştürücüler, tork kalibratörleri	(0,2 – 50) N·m
TKM III	Referans tork dönüştürücü	Tork el aletleri, tork dönüştürücüler, yüksek doğruluklu tork anahtarları	(2 – 1000) N·m
TKM IV	Referans tork dönüştürücü	Tork el aletleri, tork dönüştürücüler, yüksek doğruluklu tork anahtarları	(0,2 – 50) N·m

Bu çalışma boyunca bütün ölçümler TKM II adlı referans makinede yapılmıştır. İlgili cihaza ait bilgiler ve özellikleri Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Çalışmada kullanılan TKM II referans cihazı

Cihaz Adı	Kullanılan Referans Sistem	Ölçüm Yöntemi	Kalibrasyon ve Ölçüm Yeteneği (Genişletilmiş Ölç. Bel., k=2 için) (%)	İzlenebilirlik
TKM II	Ölü ağırlıklar	Otomatik, montaj yönü değişiklikleri kullanıcı vasıtasıyla ayarlanabilen	0,01	TÜBİTAK UME

4.1.2. Test cihazı (tork dönüştürücü ve gösterge ekipmanı)

Ölçüme etkiyen parametrelerin incelenebilmesi için TKM II makinesine, kalibrasyonu yapılacak test cihazı olarak bir tork dönüştürücü bağlanmıştır. Tork dönüştürücüden sinyal okunabilmesi için de HBM marka gösterge cihazı kullanılmıştır. Tork dönüştürücü ve gösterge cihazına ait bilgiler Tablo 4.3.'te, fotoğrafları ise Şekil 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Kalibrasyonu yapılan tork dönüştürücü ve gösterge cihazı

Cihaz Adı	Marka, Model	Ölçüm Aralığı	Çözünürlük	Kesinlik Sınıfı[a]
Tork dönüştürücü	Lahti Precision Oy, TT1	(0 – 20) N·m	-	0,05
Gösterge cihazı	HBM, DMP40	± 2,5 mV/V	0,000001 mV/V	0,005

[a] Kesinlik sınıfı, ölçüm belirsizliğini oluşturan parametrelerin ilgili kalibrasyon standartlarında verilmiş sınıflandırma tablolarında bulunduğu aralığı, dolayısıyla cihazın sınıfını ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Ölçümler esnasında kullanılan gösterge ekipmanı ve tork dönüştürücü

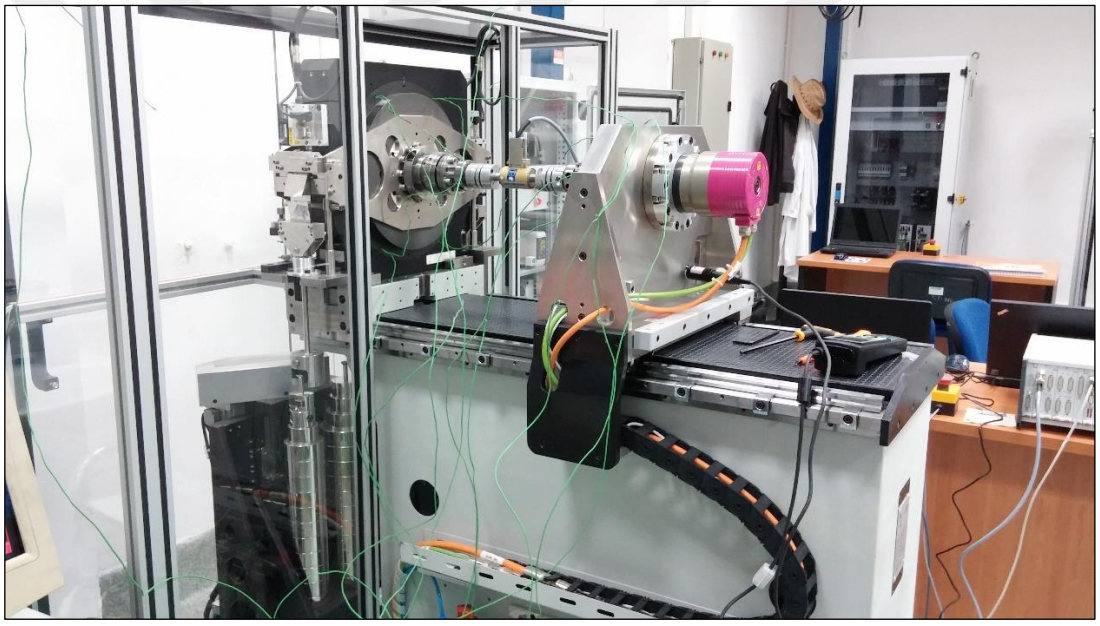
Günümüzde kullanılan yüksek hassasiyetli gösterge ekipmanlarında Bessel, Butterworth gibi çeşitli filtreleme yöntemleri ile veri işlenmektedir. Butterworth filtreleme yönteminde giriş sinyaline karşılık elde edilen çıkış sinyalinde elektriksel bozunumlar gösterge ekipmanı üzerinde daha kolay tespit edilebilirken Bessel filtreleme yönteminde bu tip bozunumlar sönümlenmekte ve kullanıcıya daha az değişim yansıtılmaktadır. Bu çalışmada birincil etken sıcaklık değişimi olduğu için çıkış sinyalindeki dalgalanmaların mümkün olduğunca az olması istenmiş ve bu sebeple gösterge cihazına ait filtreleme yöntemi olarak Bessel seçilmiştir. Butterworth filtreleme yöntemi seçilmiş olsaydı rasgele dalgalanmaların daha fazla olması ve standart sapma değerlerinin büyümesi beklenecekti.

4.1.3. Ortam şartları ölçüm ve kontrolü

Laboratuvarın klimatize edilebilmesi için Emerson Liebert HPM marka ve S10KA001VBG0020F0 modele sahip 0,1 °C ve % 1 RH çözünürlüğe sahip klima kullanılmıştır. Ortamdaki sıcaklık ve nem değerlerinin mümkün olduğunca sabit tutulabilmesi amacıyla ölçümlerden bir gün önce klima istenilen değerlere ayarlanmış ve ölçümler takip eden günde gerçekleştirilmiştir. Bu süre boyunca laboratuvar kilitli

tutulmuş, giriş ve çıkışlar engellenmiştir. Gece boyunca sıcaklık ve nem değişiminin takibi amacıyla hassas bir termohigrometre kullanılmış ve ölçümlere başlamadan en az 2 saat önce ortamın dengeye geldiğinden emin olunmuştur.

Referans makine TKM II ve test cihazı çevresindeki sıcaklık değişiminin homojen olup olmadığının incelenebilmesi amacıyla sistem çevresine 10 adet sıcaklık ve nem probu bağlanmıştır (Şekil 4.2.'de yer alan yeşil kablolar). Bu problar Solatron IMP 3595-1C veri toplama cihazına bağlanmış olup elde edilen veriler, 60 saniye aralıklarla kaydedilmiştir. Ölçüm işlemi, sıcaklık değişim aralığı ± 0,2 °C ve nem değişim aralığı ± % 2 RH olduğu sürece sürdürülmüş, bandın dışına çıkılması durumunda durdurulmuş ve tekrarlanmıştır.



Şekil 4.2. TKM II, tork dönüştürücü ve sıcaklık problarının genel görünüşü

4.1.4. Bağlantı ekipmanları (kaplinler ve flanşlar)

Kaplinler, iki şaft arasındaki torku iletmek veya tork dönüştürücüsünü tahrik ve/veya tahrik tertibatı miline bağlamak için kullanılırlar. Bağlantı türüne ve sistemin işletim tipine bağlı olarak farklı kaplin tipleri vardır. Sabit kaplinler, her iki eksende de katı bir şekilde birleşir. Eğer eksenler tam olarak aynı çizgide ise ve bükme veya eksenel hareket yoksa, tercih edilirler. Esnek kaplinler, miller arasında küçük bir fark varsa veya eksenler sıralı değilse kullanılırlar. Geniş bir ölçüm hızı aralığında kullanıma uygundurlar. Farklı üreticilerin ürünleri farklı özelliklere sahip olduğundan, açısal

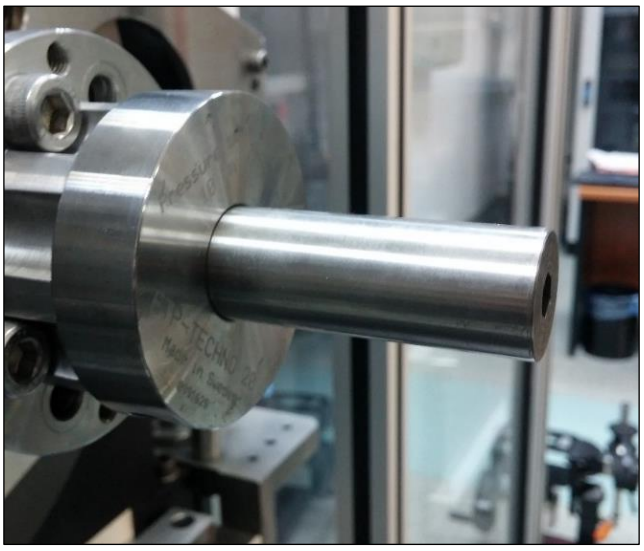
sapmayı ve izin verilen maksimum sapmayı belirtmek mümkün değildir. Çoğu durumda, dönüştürücüyü hasara karşı korumak için bu esnek kaplinlerin takılması tercih edilir. Kavisli dişli kaplinler, Bu kaplin, milleri çok küçük bir radyal boşluk ile birbirine bağlamak için kullanılan, sabit ve esnek kaplinlerin birleşimi olan bir bağlantı ekipmanıdır. Bu kaplinler, burulmadaki değişiklikleri ölçmek için kullanılan kavisli dişlere sahiptir. Bu kaplinler kullanıldığında burçlar bağlantısı, sensör milinin her iki tarafına vidalanmalıdır [9].

Flanşlar ise bir basınç ortam ile doldurulmuş çift cidarlı sertleştirilmiş bir çelik manşondan oluşur, bir sızdırmazlık işlevi olan bir vida ve piston, bir o-ring ve bir küresel bilye ile bir metalik contadan oluşan ve bir oturma yüzeyine karşı preslenmiş olan basınçlandırma mekanizmasını içerir. Bu ekipmanlar, güç ve tork iletimini çok düşük kayıplarla gerçekleştirebilmek amacıyla kullanılırlar [32].

Bu çalışmada, tork dönüştürücülerin TKM II Tork kalibrasyon makinesine bağlanabilmesi için sırasıyla Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de gösterilmiş RADEX-NC model kaplinler ve ETP-TECHNO model flanşlar kullanılmıştır. Kaplin ve flanşlar uygulanan torkun homojen bir şekilde dönüştürücüye aktarılması ve dönüştürücü ve referans makine arasında rijit bir bağlantı kurulabilmesi amacıyla kullanılmıştır. Her iki ekipmanın bağlantısı gerçekleştirilirken, teknik dokümanlarında yer alan sıkma değerleri dikkate alınmıştır [32].



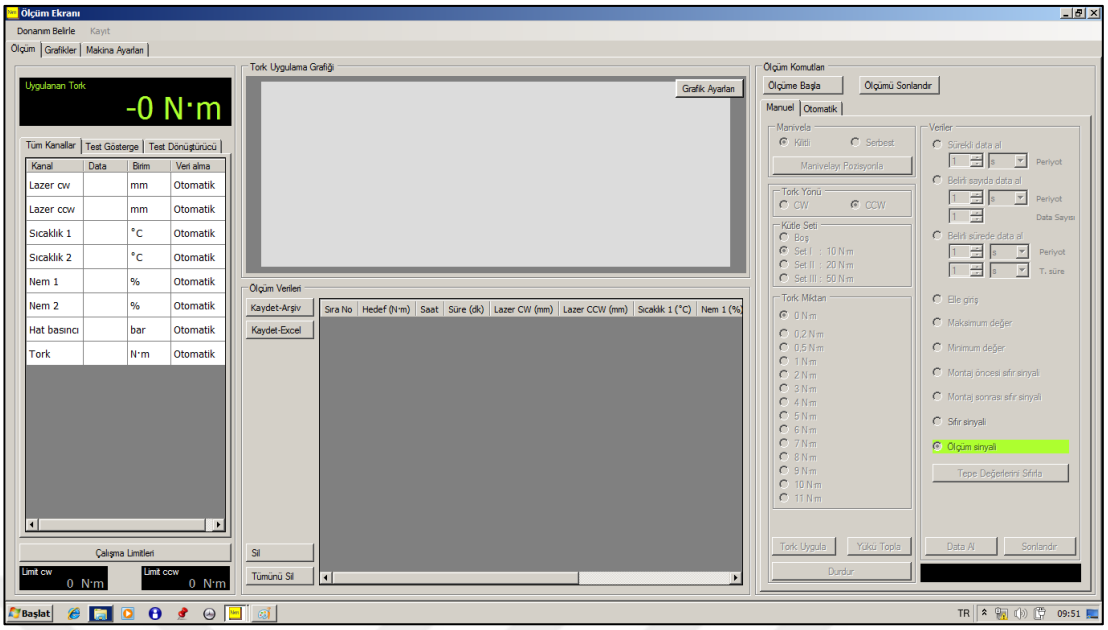
Şekil 4.3. Ölçümlerde kullanılan kaplin



Şekil 4.4. Ölçümlerde kullanılan ETP-Techno model flanşlar

4.1.5. Ölçümler esnasında kullanılan yazılım

Bu deneysel çalışmada gerçekleştirilen ölçümler sırasında kullanıcı yalnızca tork dönüştürücünün tork kalibrasyon makinesine monte edilip sökülmesi ve montaj pozisyonu değişikliği sırasında makine ile fiziksel temasta bulunmuştur. Kullanıcı ve cihaz arasında ısı transferi (dolayısıyla sıcaklık değişimi) gerçekleşmemesi, ölçüm sonuçlarının sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için dikkat edilmesi gereken oldukça önemli bir durumdur. Bu sebeple ölçümler, kullanıcıdan kaynaklı etkileri en aza indirmek için TKM II Yazılımı ile yapılmıştır. Bu yazılım vasıtasıyla ağırlıkların tork dönüştürücünün yeryüzüne paralel hizalanması, her bir ölü ağırlığın sırasıyla manivela koluna asılması ve oluşan momentin tork dönüştürücüye aktarılması, ölçüm sinyalinin okunması ve kaydedilmesi, kalibrasyon aşamalarının grafik yardımıyla takip edilmesi ve ölçümlere dahil bütün bilgi ve sonuçların raporlanması olmak üzere bütün bu aşamalar kullanıcı müdahalesi olmadan otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. TKM II Yazılımı'na ait ölçüm ekranı Şekil 4.5.'te görülmektedir. Bu programa ait genel bilgiler ve kullanım şekli, Ek-D'de detaylıca açıklanmıştır.



Şekil 4.5. Ölçümlerin kaydedilmesinde kullanılan TKM II yazılımı

4.2. Ölçümler Üzerinde Etkisi İncelenen Çalışma Şartları ve Ortam Koşulları

Ölçümler esnasında manivela kolunun paralellikten sapması ± 2 µm, havalı yatağa ait hava basıncı ise 5,8 bar ± 0,2 bar şeklinde ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu bileşenlere ait sonuçlar sertifikalarda belirtilen tolerans ve çalışma aralıklarının içerisinde olduğu için herhangi bir düzeltme işlemi yapılmamıştır. Değişkenliği incelenen sıcaklık birer derece arttırılarak (17–25) °C çalışma aralığı içerisinde gözlenmiştir. Benzer şekilde nem değeri %10 artırılarak % (30 – 60) RH bandı içerisinde gözlenmiştir. Bu sıcaklık ve nem aralıkları, kullanılan ekipmanın hassasiyeti, olası çalışma sıcaklık ve nem değerleri ve gerçek çalışma şartları dikkate alınarak belirlenmiştir. Çalışmanın başında %20 RH ve % 70 RH nem değerlerinde de ölçüm yapılması planlanmıştır ancak mevcut klimanın kapasitesi, laboratuvarın oldukça büyük bir hacme sahip olması ve deneme ölçümlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda çalışmadan çıkarılmışlardır. Her bir ölçüm öncesi klima istenilen sıcaklık ve değerine ayarlanmış ve 24 saat boyunca ortamın dengeye gelmesi için beklenmiştir. Sıcaklık değişimi incelenirken nem % 45 RH değerinde, nem değeri incelenirken de sıcaklık 21 °C'de sabit tutulmuş olup sonuçlar bu bağlamda incelenmiştir.

Tork dönüştürücüden gösterge cihazı yardımıyla veriler alınırken Bessel filtreleme yöntemi kullanılmış, frekans değeri ise 0,22 Hz olarak seçilmiştir.

4.3. Uygulama

Seçilen tork dönüştürücü ve gösterge cihazı, referans ekipman olan TKM II makinesine bağlanmış ve standart uyarınca saat yönünde 12 noktada (nominal tork değerinin %2, %5, %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90 ve %100' ü) ve 3 montaj pozisyonunda (0°, 120° ve 240°) ölçümler yapılmıştır. Ölçüm verileri kaydedilirken, uygulanan tork değeri dengeye geldiğinde (referans makineden dengede komutu alındığında) 60 saniye beklenmiş, ardıdnan kayıt işlemi yapılmıştır. Aslında, standart bir kalibrasyon işleminde bu süre 30 saniye olarak tavsiye edilmiştir. Ancak dalgalanma ve diğer etkenlerin en düşük seviyeye indirilmesi amacıyla bu çalışmada ölçümler 60 saniyede bir alınmıştır. Gerinim ölçer yardımıyla ölçüm yapan cihazlarda (kuvvet dönüştürücü, tork dönüştürücü, basınç dönüştürücü vb.) nominal değerin %10' unun altında elde edilen ölçümler, sapmanın bağıl hale çevrildiğinde büyümesi ve bu değerin toplam ölçüm belirsizliğini büyük oranda değiştirmesi sebebiyle 12 noktada yapılan ölçümlerden yalnızca 8 tanesi (nominal tork değerinin %10, %20, %30, %40, %50, %60, %80 ve %100' ü) seçilmiş ve dikkate alınmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları, Microsoft Excel programı yardımıyla hazırlanmış ve Ek-B'de açıklanmış olan programda incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

4.4. Kalibrasyon adımları

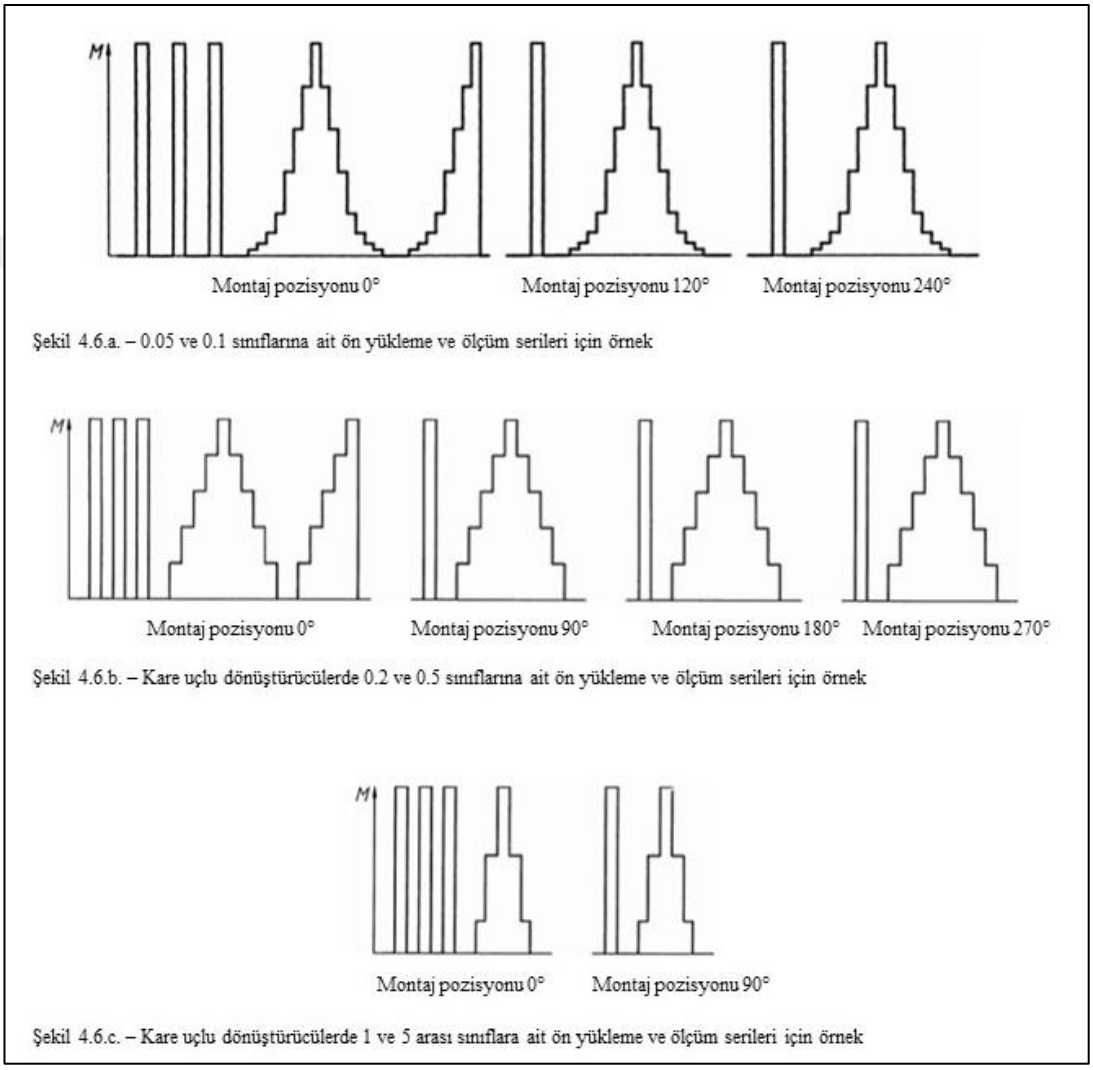
Tork dönüştürücülerinin kalibrasyonu sırasıyla aşağıdaki adımlarda yapılmıştır:

a) Tork ölçüm cihazının tanımlanması ve tanıtımı,
b) Aşırı yükleme testi (yalnızca ilk kalibrasyon öncesinde),
c) Kurulum,
d) Başlangıç sıfır sinyalinin kaydedilmesi,
e) Ön yükleme ve verilerin kaydedilmesi,
f) Belirlenen montaj pozisyonları ve çevrim sayısı doğrultusunda artan ve azalan yönlerde ölçüm yapılması,
g) Her bir montaj pozisyonu öncesi ön yüklemenin tekrarı ve ölçüme devam edilmesi,
h) Bitiş sıfır sinyalinin kaydedilmesi.

Bütün bu adımların tamamlanması ve verilerin kaydedilmesinin ardından tork dönüştürücünün tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik, tersinirlik, lineerite gibi

metrolojik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bütün bu bileşenlere ait hesaplamalar Ek-A'da açıklanmıştır. Bu adımların ardından bir sonraki kısımda bahsedilecek olan sınıflandırma işlemine geçilir.

Şekil 4.6.'da farklı montaj pozisyonlarına ait kalibrasyon gidişat örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Farklı montaj pozisyonları için kalibrasyon gidişat örnekleri

Kullanılan kaplin, ETP ve bağlantı ekipmanları kare uçlu olduğu için bu deneysel çalışmada Şekil 4.6.b.'de gösterilmiş olan kalibrasyon gidişatı kullanılmıştır [22].

4.5. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

DIN 51309 standardına göre tork dönüştürücü kalibrasyonunda ölçüm belirsizliği hesaplanırken, genişletilmiş ölçüm belirsizliği (k=2 için), cihazın kullanım yeri ve

amacı herhangi bir bilgi verilmemesi durumunda bilinemeyeceği için, matematiksel model kısmında bahsedilmiş belirsizlik bileşenlerinin farklı kombinasyonları kullanılır [33]. Bu kombinasyonlar şu şekildedir:

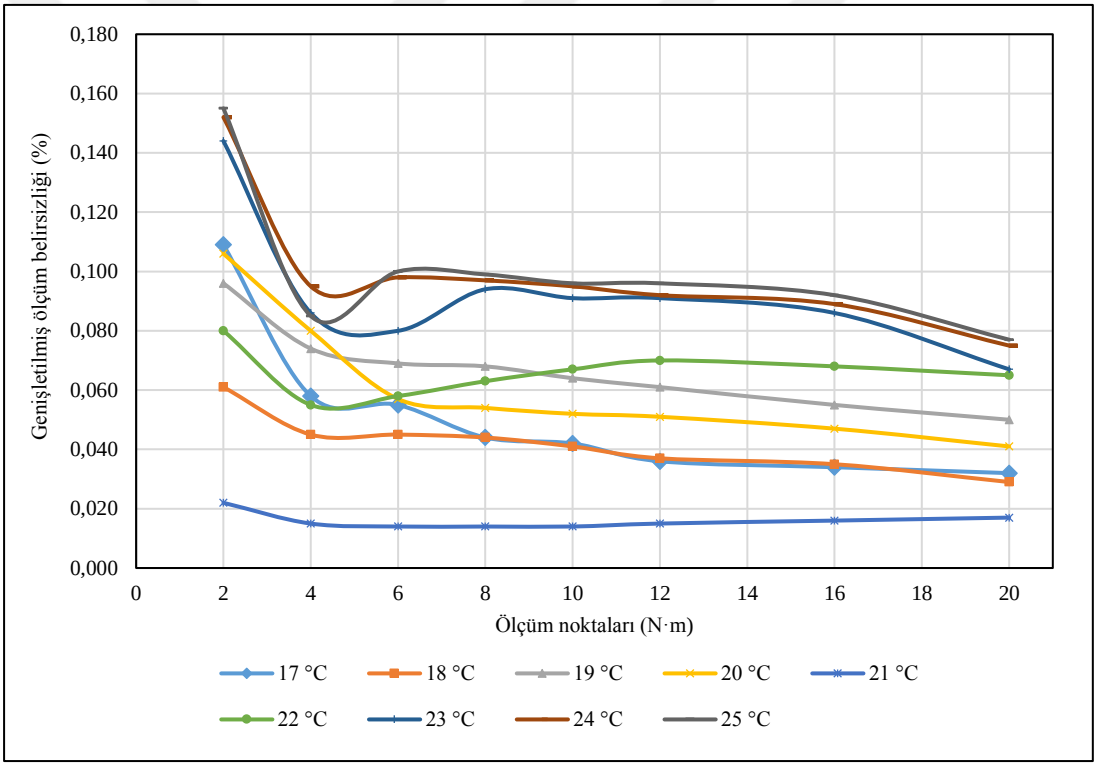
- Durum I-A: Ölçüm sonuçlarının bilinmeyen (tork birimi olmayan) bir birim cinsinden okunması (örn. mV/V) ve cihazın değerlerine eğilim çizgisi oluşturulurken üçüncü dereceden eşitlik (kübik enterpolasyon) kullanılması durumu,
- Durum I-B: Ölçüm sonuçlarının bilinmeyen (tork birimi olmayan) bir birim cinsinden okunması (örn. mV/V) ve cihazın değerlerine eğilim çizgisi oluşturulurken birinci dereceden eşitlik (lineer enterpolasyon) kullanılması durumu,
- Durum II-A: Ölçüm sonuçlarının bilinen (tork birimi olan) bir birim cinsinden okunması (örn. N·m) ve cihazın değerlerine eğilim çizgisi oluşturulurken birinci dereceden eşitlik (lineer enterpolasyon) kullanılması durumudur.

Uzun dönem kararlılık, manivela pozisyonu, basınçlı hava sistemi, motor dönme hızı ve dinamik tork etkileri genişletilmiş ölçüm belirsizliği hesaplamasında dikkate alınmamıştır. Zira bu etkenlerin incelenmesi hem bu çalışmayı asıl amacından saptıracak, hem de referans cihaza (TKM II) ait ölçüm belirsizliği değerinin yeniden tanımlanmasını zorunlu kılacaktır. Aynı zamanda TÜBİTAK UME tarafından sağlanan referans kalibrasyon makinesine ait ilk sertifika geçersiz olacaktır. Bu işlemleri elemek amacıyla bütün bu etkenlerin, TKM II tork kalibrasyon makinesine ait referans belirsizlik içerisinde oldukları varsayılmıştır.

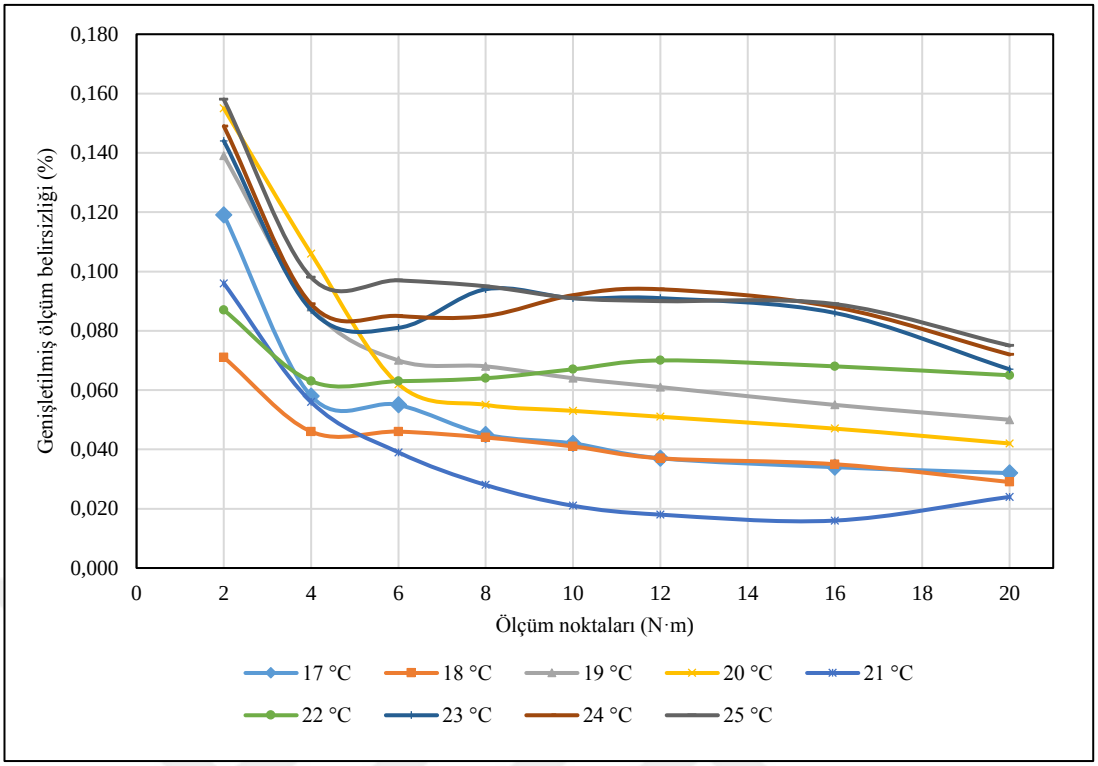
Çalışma esnasında kaydedilen verilere ait genişletilmiş ölçüm belirsizliği ve belirsizlik aralığı değerleri, ölçümün yapıldığı her bir sıcaklık değeri ve kalibrasyon adımı için Ek-A'da yer alan tablolarda verilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

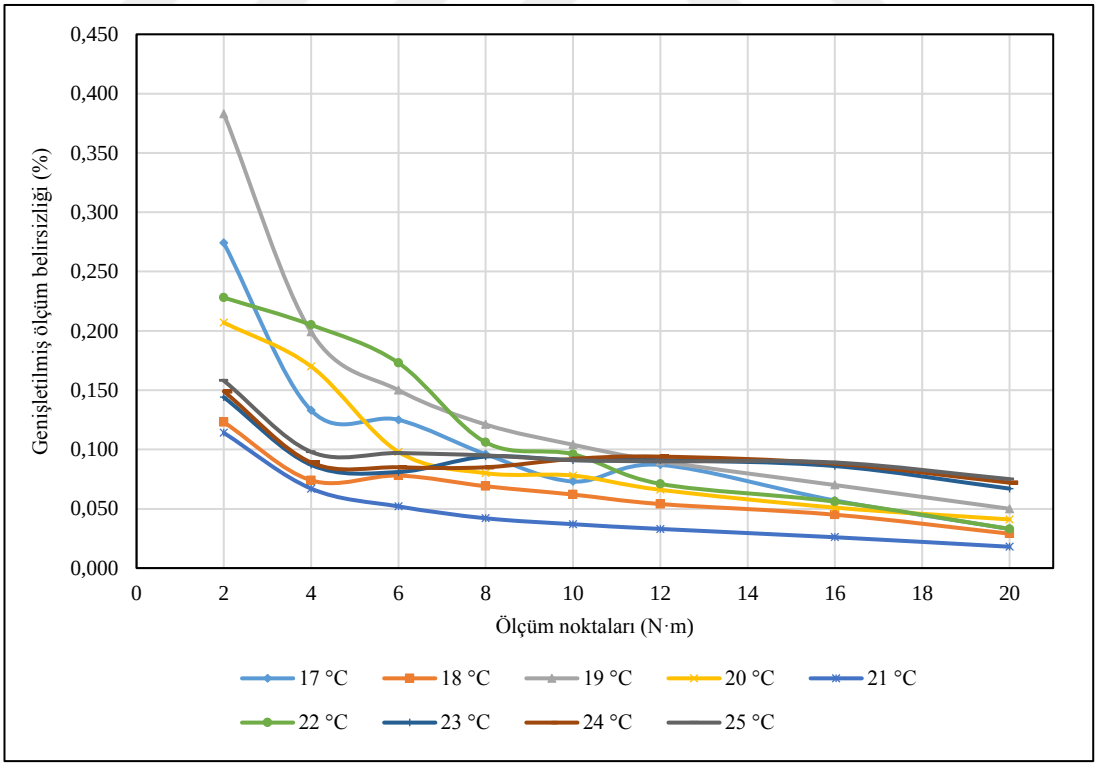
Bu çalışmada, sabit nem ve basınç altında, sıcaklık değişimi ve sabit sıcaklık ve basınç altında nem değişimlerinin, tam bir tork dönüştürücü kalibrasyonunda ölçüm belirsizliğine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre hesaplanmış genişletilmiş ölçüm belirsizliği, Durum I-A, Durum I-B ve Durum II yöntemleri kullanılarak belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 5.1., Şekil 5.2., Şekil 5.3.,Şekil 5.4., Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da gösterilmiştir.



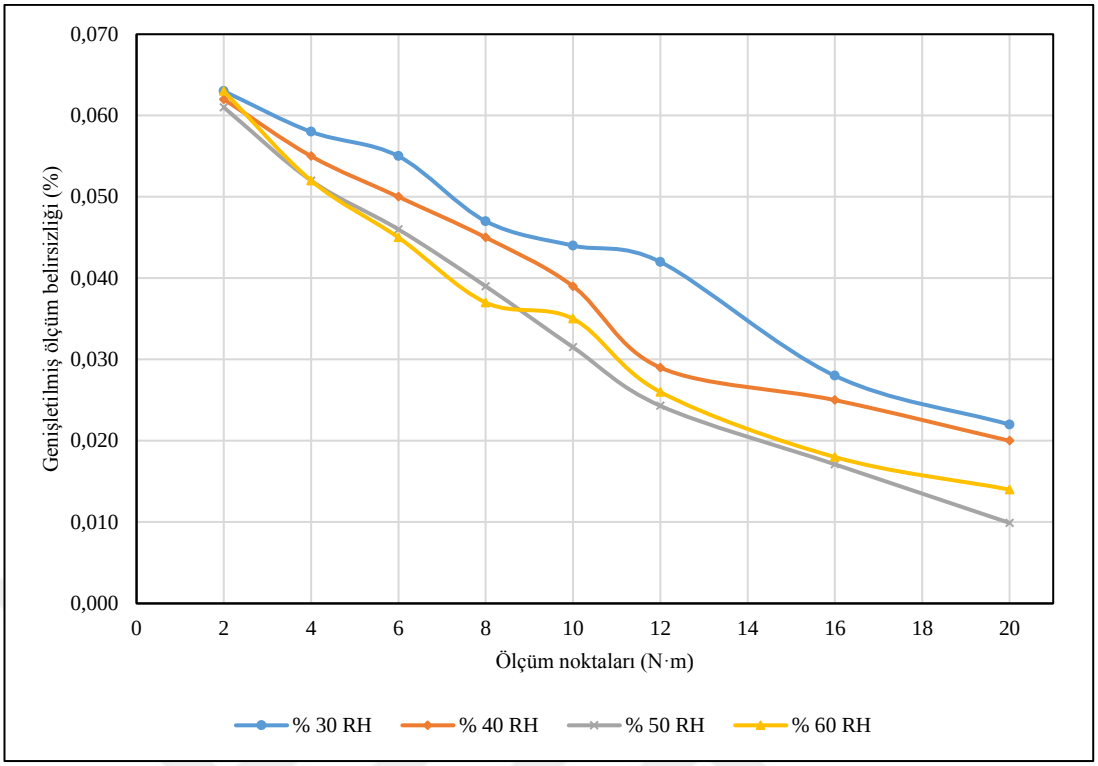
Şekil 5.1. % 45 nem değerinde sıcaklık - ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-A)



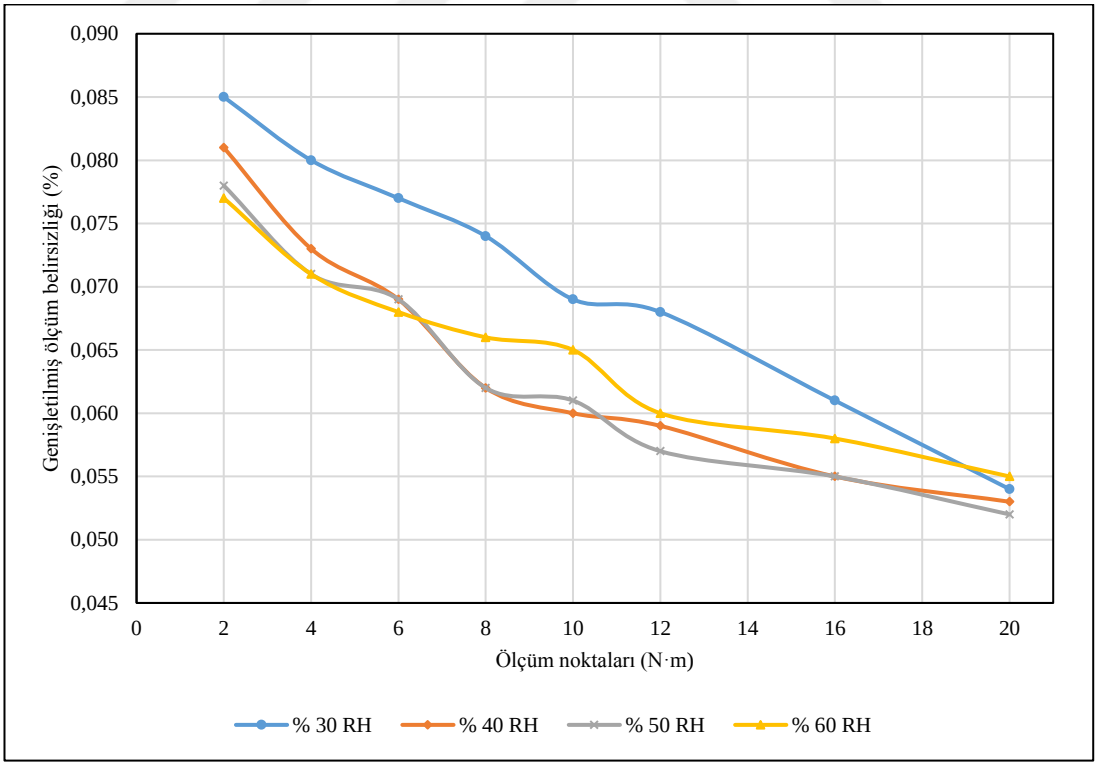
Şekil 5.2. % 45 nem değerinde sıcaklık - ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-B)



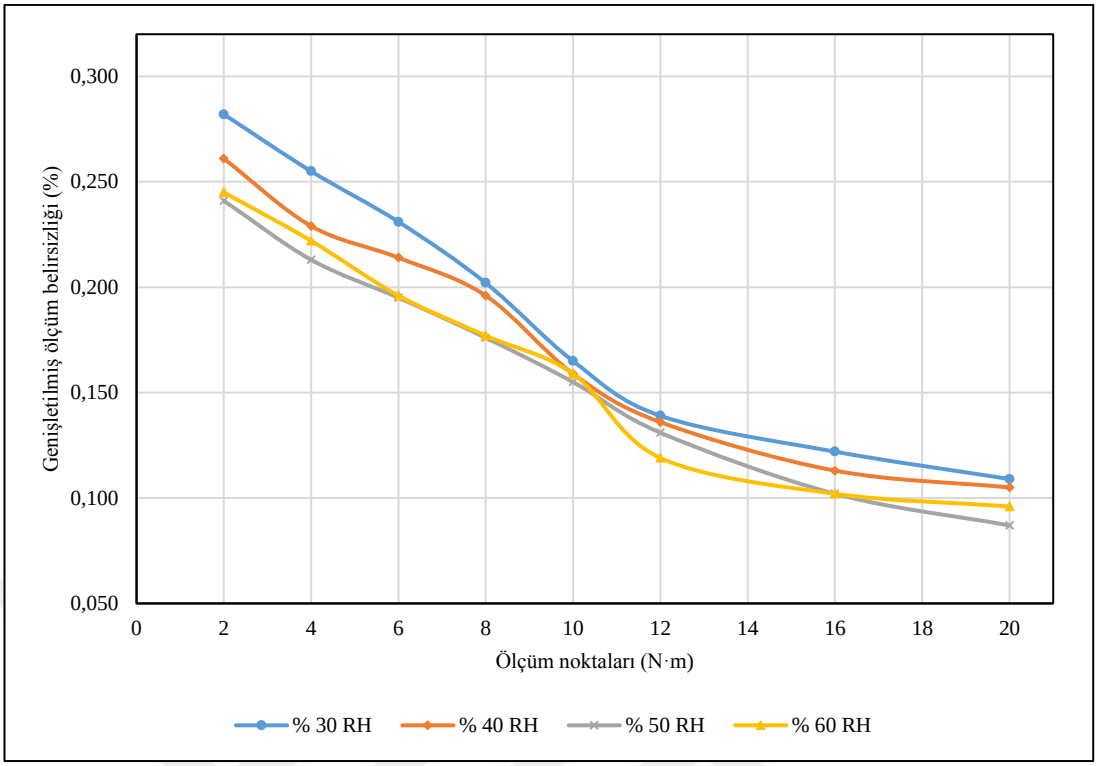
Şekil 5.3. % 45 nem değerinde sıcaklık – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum II)



Şekil 5.4. 21 °C sıcaklık değerinde nem – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-A)



Şekil 5.5. 21 °C sıcaklık değerinde nem – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum I-B)



Şekil 5.6. 21 °C sıcaklık değerinde nem – ölçüm belirsizliği dağılımı (Durum II)

Bu çalışmada gösterge birimi mV/V olmasına rağmen lineer enterpolasyon yöntemine göre de ölçüm belirsizliği hesaplanmıştır. Bunun sebebi ise kullanılan tork dönüştürücüye ait daha önceden hazırlanmış bir kalibrasyon sertifikası ve bu sertifikadaki mV/V değerlerinden N·m değerlerine geçiş için kullanılabilecek dönüşüm katsayılarının mevcut olmasıdır.

Beklendiği üzere sıcaklığın değiştiği bütün serilerde ve uygulanan tork değerinin küçük olduğu ölçüm noktalarında, belirsizlik değerleri diğer tork değerlerine kıyasla daha büyük tespit edilmiştir. Bu durum, hesaplamaların bağıl olarak gerçekleştirilmesi ve nominal değer ile yapılan kıyaslama işleminde dikkate alınan tork değerinin büyük olmasından kaynaklanmaktadır.

Durum I-A, Durum I-B ve Durum II için hesaplanan standart sapma değerleri (bütün seriler için) sırasıyla 0,0083, 0,0092 ve 0,0406 olarak hesaplanmıştır. Durum I-A ve Durum I-B için elektriksel çıkış mV/V olmasına rağmen enterpolasyon hataları hesabında üçüncü dereceden ve birinci dereceden denklemler kullanılmasına karşın standart sapma değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu durum, ölçüm belirsizliği hesapları genel olarak düşünüldüğünde tezat oluştursa da aslında oldukça normaldir.

Zira hem referans cihaz (TKM II) hem de test cihazı (TT1) oldukça kararlı yapıda ekipmanlardır ve her bir seri ölçüm kendi içerisinde düşünüldüğünde dalgalanmaya çok az miktarda maruz kalmıştır. Bu durum Şekil 5.1. ve Şekil 5.3.'de görülmektedir. Hassasiyeti çok yüksek olmayan bir tork dönüştürücü ile yapılan ölçümlerde bu farklılığın daha belirgin olacağı açıktır. Asıl dikkat çekici olan, ölçüm sinyalinin tork birimi olarak ele alındığı Durum II'de standart sapmanın oldukça büyük olmasıdır. Azalan serilere ait değerlerin de ortalama değer hesabında dikkate alınması, dalgalanma ve sapmaların artmasına yol açmıştır. Bölüm 3.4'te bahsedildiği gibi sinyal değerleri okunurken, sistemin dengeye gelmesi için 60 saniye beklenilmiştir. Bu süre alınan her bir ölçümü, tersinirlik hesabını ve dolayısıyla ortalama değer hesabını oldukça fazla etkilemektedir. Zira her veri kaydetme işlemi, referans ekipman, test cihazı ve çevresel etkiler sebebiyle mutlak bir kararlılığa sahip olamamaktadır. Bu durum artan yönde kaydedilen ölçüm değerlerinin kayıplar sebebiyle azalmasını, tersinirlik ölçümleri esnasında ise artması sonucunu doğurmaktadır. Dolayısıyla dalgalanmaların fazla olması, enterpolasyon hatasını büyütmekte, bu da ölçüm belirsizliği değerlerini kararsız hale getirmektedir.

Sıcaklığın 21 °C'de sabit, nem değerinin değişken olduğu Şekil 5.4., Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da, nominal tork değeri arttıkça ölçüm belirsizliği değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum değişken sıcaklığa ait ölçümler ile benzerdir zira sonuçların bağıl olarak değerlendirilmesi burada da mevcuttur.

Şekil 5.4.'te görüldüğü gibi ölçüm belirsizliğinin kübik enterpolasyon hatası katkısı ile hesaplanması durumunda 4 farklı nem değerinde de belirsizlik değerleri birbirine oldukça yakındır ve nemin etkisi oldukça sınırlıdır. Şekil 5.5.'te, optimum değere kıyasla nem değerinde düşüş oldukça, ölçüm belirsizliği değerlerinin çok düşük de olsa artma eğilimi sergilediği görülmüştür. Durum II'ye ait ilişkinin gösterildiği Şekil 5.6.'da ise bütün nem noktaları için ölçüm belirsizliği değerleri diğer iki duruma kıyasla çok daha yüksektir. Ancak bu durum yukarıda da değinildiği üzere Durum II'ye ait hesaplamalar ve belirsizlik bileşenlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun haricinde hem sıcaklığın hem de nemin sabit tutulduğu koşullar birbiri ile benzerlik göstermektedir.

Dikkat çekici son bir nokta da, nem değerinin sabit, sıcaklık değerinin değişken ve sıcaklık değerinin değişken ve nem değerinin sabit olduğu her üç grafik çiftinde, birbirine denk düşen ölçüm noktalarına ait ölçüm belirsizliği değerleri arasındaki ilişkidir. Şekil 5.1. – Şekil 5.4., Şekil 5.3. – Şekil 5.5. ve Şekil 5.2. – Şekil 5.6. ikili olarak incelendiğinde, 21 ° C ve % 45 nem değerlerine karşılık gelen ölçüm belirsizliği değerleri arasındaki farkın, kimi noktalarda % 0,02 kadar olduğu görülmüştür. Bu fark değeri, test cihazına atfedilen toplam ölçüm belirsizliği değeri içerisinde çoğu zamana ihmal edilebilir. Ancak referans makinenin hareketli aksam barındırması nedeniyle ortam sıcaklığından daha yüksek sıcaklık değerine ulaşması gibi sebepler ve ölçüm sonuçlarına olan etkisi tespit edilemeyen çeşitli mekaniksel etkenlerden dolayı sıcaklık ve nem homojen olarak dağıtılamadığından kaynaklandığı düşünülebilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elde edilen sonuçlara göre tork dönüştürücülerin kullanımında uygun sıcaklık ve nem değerlerinin seçilmesi konusunda dikkat edilmesi gereken hususular tespit edilmiştir.

DIN 51309 standardında, ölçümler için 22 °C, tavsiye edilmekle birlikte, tork dönüştürücüye ait sıcaklık düzeltmesi yapıldığı takdirde (18–28) °C aralığı içerisinde de ölçümlerin yapılabileceği belirtilmektedir. Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'e göre, Durum I-A ve Durum I-B yaklaşımları için en uygun sıcaklık değeri 21°C'dir. Bu fark, sıcaklığın laboratuvar içerisinde homojen olarak dağılmaması, kayıplar sebebiyle (pencere, kapı, duvar yalıtımı vb.) klimanın ayarlanan sıcaklık değerini sabit tutamaması ve sıcaklık değerlerinin kaydedilmesinde kullanılan cihazın ölçüm belirsizliği düşünüldüğünde ihmal edilebilir. Dolayısıyla optimum sıcaklık değerinin (21 – 23) °C aralığı arasında olduğu düşünülebilir. Durum II' de ise bu sıcaklık değerine ait ölçüm belirsizliği diğer sıcaklık değerlerinde elde edilmiş ölçüm belirsizliklerine göre yaklaşık % 0,2 sapma göstermiş, belirsizliğin bağıl hesaplanması nedeniyle 2 N·m ve 4 N·m gibi küçük tork değerlerinde bu fark daha da artmıştır.

En iyi sonuçların elde edildiği 21 °C sıcaklığından uzaklaştıkça değişimlerin artı ve eksi yönler için (21 °C altı ve üstü) simetrik olmadığı gözlenmiştir. Durum I-A yaklaşımında sıcaklık değerinin 21 °C'yi aştığında belirsizliğin artmış olduğu, sıcaklıktaki azalmanın ise belirgin bir değişime yol açmadığı tespit edilmiştir.

Durum II yaklaşımı ile hesaplanan belirsizlik değerlerinin, Durum I-A ve Durum I-B yaklaşımlarından elde edilen değerlere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, Durum II' de yapılan okumalara ait birimin N·m olması ve dolayısıyla hesaba katılan gösterge hatasının ölçüm belirsizliğini büyütmesidir.

Her üç durumda da ortaya çıkan farklılıklar yalnızca sıcaklığa bağlı olmayıp, nem, hava basıncı, ölü ağırlıklar, manivela kolu ve yataklama sistemine ait belirsizliklerin de bir bileşkesidir. Bu çalışmada bahsedilen bileşkeler mümkün olduğunca sabit tutulmuştur. Ancak elde edilen sonuçların güvenilirliğinin tam olarak sağlanabilmesi

için bahsi geçen etkenlerin de diğer bileşenler sabit tutularak incelenmesi faydalı olacaktır.

Ölçümler, klimanın ısıtma/soğutma kapasitesi ve deneme ölçümlerinde elde edilen sonuçlar sebebiyle (17 – 25) °C aralığında yapılmıştır. Başka bir çalışmada bu aralığın dışında, örneğin bir soğuk oda veya şartlandırılmış fırın gibi düşük ve yüksek sıcaklık uygulama alanları dikkate alınarak ölçümler yapılabilir. Bu durum özellikle otomotiv sektörü gibi büyük tork değerlerinin üretildiği ve sürtünmeden kaynaklı sıcaklık artışının yoğun yaşandığı alanlar dikkate alındığında gerçekçi bir çalışma konusu olacaktır.

Yapılan bu deneysel çalışmada, farklı ortam sıcaklıklarında yapılan tork dönüştürücü kalibrasyonunda, sıcaklığa bağlı olarak hatalı sonuçların elde edilebileceği görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde 21 °C'de optimum sonuçların elde edildiği ve kalibrasyon sonuçlarındaki hataların en düşük seviyeye indiği tespit edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli konu da göstergenin elektromanyetik özelliklerinden kaynaklı sinyal değişimlerinin, sıcaklık değişiminden etkilenip etkilenmediğinin belirlenmesidir. Bu amaçla yapılan kalibrasyonda, gösterge cihazındaki sinyallerde salınımın ve tekrarlanabilirlik ölçümlerinin ± % 0,005 bandı içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Dolayısıyla tork ölçümleri üzerinde ciddi bir etkisi bulunmamaktadır.

Sıcaklığın sabit, nem değerinin değişken tutulduğu koşullarda ise genel bir sonuç elde etmenin mevcut değerler karşısında oldukça güç olduğu görülmüştür. Üç durum da ayrı ayrı değerlendirildiğinde, farklı nem değerlerine ait sonuçlar birbiriyle uyumludur ve belirgin bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Grafiklere göre tork dönüştürücünün ölçüm aralığına ait medyan değerinden uzaklaştıkça (buradaki örnekte 10 N·m) farklı nem koşulları için ölçüm belirsizliği değerleri arasındaki farklılaşma azalmaktadır. Bu durum tersinirlik hesabında nemin katkısının diğer belirsizlik bileşenlerine kıyasla daha fazla olması ile açıklanabilir. Ancak yine de ölçüm belirsizliği değerlerinin birbirine oldukça yakın olması ve sınırlı veri setine sahip olunması sebebiyle bir çıkarım yapmak oldukça zordur.

Bu deneysel çalışmada gerçek bir kalibrasyon süresince sonuçlara etkiyen bütün parametreler hesaba katılmış, sıcaklık ve nem değişimleri bu şartlar altında incelenmiştir. Bölüm 5'te görüleceği gibi sıcaklığın sabit tutulup nemin değişken

olduğu ölçümlerde, optimum nem değerinden (% 45 RH ± % 10 RH) uzaklaştıkça ölçüm belirsizliği değerleri artma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Nem değerinin sabit tutulup sıcaklığın değişken olduğu koşullarda ise en büyük ölçüm belirsizliği değerleri % 30 neme ait ölçümlerde tespit edilmiştir. Diğer noktalara ait sonuçlar birbirine çok yakın olmakla birlikte % 30 nem değerine ait sonuçlardan da en fazla % 0,01 kadar bir sapma göstermiştir.

Her iki koşulda da elde edilen sonuçların, Tayland Metroloji Enstitüsü ve Almanya Ulusal Metroloji Enstitüsü'nün gerçekleştirmiş olduğu çalışmalar ile benzer olduğu görülmüş, tespit edilen optimum sıcaklık ve nem değerlerden uzaklaştıkça ölçüm belirsizliği değerlerinin arttığı gözlenmiştir [18, 19].

6.1. Gelecekte Yapılabilecek Çalışmalar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aslen bir örneklemdir. Ancak tork dönüştürücülerin sıcaklık ve nem değişimlerine karşın gösterdiği tepkiyi mutlak olarak yansıttığı söylenemez. Böyle bir iddiada bulunabilmek için ölçüm sayısının ve tekrarının oldukça fazla olması gerekmektedir. Ancak bu durum zaman ve maliyet açısından gerçekçi ve olası değildir.

Farklı bir çalışma ölçüm verilerinin her bir noktada birer adet değil, yeni geliştirilen yazılımlar vasıtasıyla çok sayıda kaydedilmesi yöntemiyle yapılabilir. Böyle bir çalışmada belirlenmiş bir tork değerinde 30 saniye bekleme sonrası tek bir değer yerine örneğin 100 adet veri alınabilir ve bu değerlerin ortalaması asıl ölçüm sinyali olarak kabul edilebilir. Bu durumda otuzuncu saniye sonunda elde edilen sinyalin elektriksel dalgalanma, manyetik etkiler ve fiziksel titreşim gibi çevresel bileşenlerin anlık etkileri bir nebze ortadan kaldırılabilir.

Tork dönüştürücülerin, yüksek devirde güç iletimi veya ölçümü yapan sistemlerdeki kullanımı, cihazların yapısı gereği yüksek ısı açığa çıkarabilmektedir. Bu sebeple, bu deneysel çalışmada üst limit olarak belirlenen 25 °C değeri bir sonuç elde etmek açısından yetersiz olacaktır.

Referans tork kalibrasyon makinesinin, daha yüksek sıcaklık değerlerinde şartlandırılabilmesine izin verecek şekilde bir iklimlendirme kabini veya fırın içerisine yerleştirilerek ölçümlerin bu şekilde yapılması, tork dönüştürücünün yukarda bahsi geçen durumdaki davranışı hakkında daha net bilgi verecektir. Ancak bu durum,

referans tork kalibrasyon makinesinin fiziksel büyüklüğü nedeniyle buna uygun iklimlendirme kabini temininin zor olmasına, temin edilse dahi aşırı enerji tüketimine yol açacaktır. Dolayısıyla böyle bir durumda üreticinin tork dönüştürücü için sağladığı sıcaklık (veya varsa nem) değeri için düzeltme katsayısı kullanılması fayda-maliyet analizi yapılması halinde daha avantajlı olabilir.

KAYNAKLAR

[1] Röttger A., Röttger S., Zimbal A., Keyser U., Prompt (n,gamma) mass measurements for the AVOGADRO project, *Hyperfine Interactions*, 2001, **132**, 189-194.

[2] Stock M., Watt balances and the future of the kilogram, *Simposio de Metrología*, Meksika, 25-27 Ekim 2006.

[3] EURAMET, *Metrology in short*, 3rd ed., EURAMET, Albertslund, 2008.

[4] BIPM, The meter convention, http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention/ (Ziyaret tarihi: 10 Eylül 2016).

[5] BIPM, TÜBİTAK UME, *Uluslararası metroloji sözlüğü - Temel ve genel kavramlar, ilgili terimler (VIM)*, BIPM, Sevr, 2008.

[6] BIPM, *The internation system of units*, 2nd ed., BIPM, Paris, 2006.

[7] BIPM, Metrological traceability, http://www.bipm.org/en/bipm-services/calibrations/traceability.html (Ziyaret tarihi: 11 Eylül 2017).

[8] Kumar A., Kumar H., Stability studies of torque transducers, *Measurement Science Review*, 2011, **11**, 41-44.

[9] Moreno I. G., Design of a test bench for static calibration of torque transducers, Doktora Tezi, Escuela Técnica Superior De Ingenieros Industriales Y De Telecomunicacion, Pomplano, 2011.

[10] Webster J. G., *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*, 1st ed., CRC Press, Florida, 1999.

[11] Bozkurt S., Gerinim ölçerler (strain-gage) ve çalışma prensipleri http://www.teknokoliker.com/2012/05/strain-gage-gerilim-olcer-sensorler.html (Ziyaret tarihi: 12 Temmuz 2014).

[12] Stefanescu D. M., *Handbook of force transducers: Principles and components*, 1st ed., Springer Science & Business Media, Budapeşte, 2011.

[13] Keil S., *The thermal output of a strain gage*, 1st ed., HBM, Darmstadt, 1988.

[14] Khaled K., Röske D., Abuelezz A., El-Sherbiny M., The influence of temperature and humidity on the sensitivity of torque, *Measurement,* 2016, **94**, 186-200.

[15] European co-operation of Accrediation, *EA-4/02 M: Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration,* EA, Paris, 2013.

[16] Bürge A., Simplified measurements of the humidity coefficient of torque transducers in calibration laboratories, *ACTA IMEKO 3rd,* Güney Afrika, 2014.

[17] Fang D, Xu Z., Research on sine dynamic torque measuring system, *Procedia Engineering,* 2012, **29**, 2677-2681.

[18] Oliveira R. S., Winter S., Herman L., Fröhlich T., Theska R., A new approach to test torque transducers under dynamic reference regimes, *Measurement,* 2014, **58**, 354-362.

[19] Wegener T. B. G., Traceability of torque transducers under rotating and dynamic operating conditions, *XVII IMEKO World Congress*, Torino, 2008.

[20] TSE Kalibrasyon Grup Başkanlığı, *Laboratuvar Tanıtım Kataloğu*, TSE Matbaası, Ankara, 2014.

[21] Schicker R., Wegener G., *Measuring torque correctly*, 1st ed., Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2002.

[22] Deutsches Institut für Normung (DIN), *Materials testing machines - Calibration of static torque measuring devices*, DIN - Standard Comittee on Materials Testing (NMP), Berlin, 2005.

[23] BIPM, *JCGM 100: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM, Sevr, 2008.

[24] Sanponpute T., Arksonnarong N., Temperature and humidity dependence on stability of torque measuring devices, *IMEKO 22nd TC,* Güney Afrika, 2014.

[25] Robinson, A, *Guide to the calibration and testing of torque transducers*, 1st ed., National Physical Laboratory, Teddington, 2008.

[26] Röske D., Torque measurement: From a screw to a turbine, *PTB Mitteilungen,* 2008, **118**, 48-55.

[27] Institute of Measurement and Control, *Guide to the measurement of force*, IMC & NPL, London, 2013.

[28] Boersch, J., *Temperature compensation for strain gauges: theory and practical implementation*, 1st ed., Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2006.

[29] Vishay Precision Group, *Strain gage thermal output and gage factor variation with temperature*, VPG Corporate, Malvern, 2007.

[30] Nappaton S., Nittaya A., Temperature and humidity dependence on stability of torque measuring devices, *IMEKO 22nd TC3*, Güney Afrika, 2014.

[31] Khaled K. M., Elsherbiny M., Röske D., Abuelezz A., Humidity and temperature effects on torque transducers, bridge calibration unit and amplifiers, *Measurement, 2014,* **74**, 31-42.

[32] E. T. AB, Power Transmission, Hydraulic hub-shaft connections, https://bit.ly/2uokw63. (Ziyaret tarihi: 24 Ocak 2018).

[33] Röske D., The new version of the German torque calibration standard DIN 51309:2005-12 a comparative overview, *IMEKO 20th TC3*, Meksika, 2007.

EKLER

EK-A

A.1 Deneysel Çalışma Esnasında Kaydedilmiş Verilere Ait Hesaplamalar ve Tablolar

Bu deneysel çalışma boyunca, sabit sıcaklık (21 °C) altında nem değişimi ve sabit nem (% rh 45) altında sıcaklık değişimi incelenmiştir. Sabit nem durumu için 9 adet tam kalibrasyon çevrimi, sabit sıcaklık için ise 4 adet tam kalibrasyon çevrimi yapılmıştır. Bu çevrimler esnasında elde edilen verilere ilişkin hesaplamalar, Microsoft Excel programı yardıyla ve Bölüm 5'te grafik olarak sunulmuştur.

Çalışmanın bu Ek A.1. kısmında % 45 bağıl nem altında sıcaklığın değişken olduğu, her bir kalibrasyon noktasına ait ölçüm belirsizliği hesaplamasında dikkate alınması gereken tekrarlanabilirlik, yeniden üretilebilirlik, sıfır hatası, kübik ve lineer enterpolasyon hataları, tersinirlik hatası ve çözünürlük hatası olmak üzere toplam 7 adet belirsizlik bileşeni hesaplanmıştırtır. Bu hesaplamalar, Bölüm 3.4.7'de verilen denklemler kullanılarak yapılmıştır.

Ek A.2'de ise, Bölüm 3.4.8'de bulunan denklemler kullanılarak ve Ek A.1.'de elde edilen belirsizlik bileşenleri yardımıyla, her üç Durum için (Durum I-A, Durum I-B ve Durum II) genişletilmiş ölçüm belirsizliği değerleri ve belirsizlik aralıkları hesaplanmıştır.

Tablo A.1. Elde edilen verilere ait işlenmiş değerler ve belirsizlik bileşenleri

	Mk	Durum I					Durum II					
		b	b'	f0	fa,küb	fa,lin	b	b'	f0	h	fa,lin	r
	N.m	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*N.m*
17 °C	20	0,050	0,004		0,000	-0,003	0,050	0,004		--	-0,006	0,000015
	16	0,053	0,008		0,001	0,001	0,053	0,008		0,023	0,001	0,000015
	12	0,058	0,013		0,000	0,003	0,058	0,013		0,049	0,007	0,000015
	10	0,066	0,017		0,000	0,003	0,066	0,017		0,031	0,004	0,000015
	8	0,072	0,015		0,003	0,005	0,072	0,015		0,050	0,009	0,000015
	6	0,090	0,019		0,001	0,002	0,090	0,019		0,069	0,008	0,000015
	4	0,096	0,021		0,000	-0,001	0,096	0,021		0,075	0,001	0,000015
	2	0,153	0,108		0,021	-0,024	0,153	0,108		0,165	0,003	0,000015
	0	--	--	0,014	--	--	--	--	0,014	--	--	--
18 °C	20	0,045	0,007		0,000	0,000	0,045	0,007		--	0,001	0,000015
	16	0,057	0,006		0,000	0,000	0,057	0,006		0,010	0,001	0,000015
	12	0,060	0,008		0,000	0,000	0,060	0,008		0,017	0,000	0,000015
	10	0,068	0,010		0,000	0,000	0,068	0,010		0,020	-0,001	0,000015
	8	0,072	0,012		0,002	0,000	0,072	0,012		0,025	-0,001	0,000015
	6	0,074	0,016		0,000	-0,002	0,074	0,016		0,031	-0,005	0,000015
	4	0,069	0,032		0,001	-0,005	0,069	0,032		0,026	-0,014	0,000015
	2	0,085	0,059		0,012	-0,018	0,085	0,059		0,054	-0,038	0,000015
	0	--	--	0,012	--	--	--	--	0,012	--	--	--
19 °C	20	0,080	0,000		0,001	0,001	0,080	0,000		--	-0,003	0,000015
	16	0,089	0,000		0,002	0,001	0,089	0,000		0,015	0,000	0,000015
	12	0,101	0,001		0,000	0,002	0,101	0,001		0,028	0,002	0,000015
	10	0,106	0,003		0,001	0,000	0,106	0,003		0,039	0,003	0,000015
	8	0,113	0,006		0,004	-0,001	0,113	0,006		0,052	0,004	0,000015
	6	0,115	0,004		0,004	-0,006	0,115	0,004		0,080	0,005	0,000015
	4	0,123	0,010		0,008	-0,024	0,123	0,010		0,125	0,002	0,000015
	2	0,159	0,036		0,027	-0,050	0,159	0,036		0,285	0,008	0,000015
	0	--	--	0,028	--	--	--	--	0,028	--	--	--
20 °C	20	0,066	0,003		0,000	0,004	0,066	0,003		--	0,001	0,000015
	16	0,077	0,005		0,001	0,004	0,077	0,005		0,004	0,003	0,000015
	12	0,085	0,010		0,001	-0,001	0,085	0,010		0,015	0,000	0,000015
	10	0,086	0,012		0,000	-0,005	0,086	0,012		0,025	-0,002	0,000015
	8	0,088	0,015		0,004	-0,007	0,088	0,015		0,026	-0,004	0,000015
	6	0,091	0,025		0,005	-0,013	0,091	0,025		0,040	-0,008	0,000015
	4	0,131	0,040		0,008	-0,035	0,131	0,040		0,085	-0,021	0,000015
	2	0,160	0,085		0,019	-0,057	0,160	0,085		0,093	-0,039	0,000015
	0	--	--	0,017	--	--	--	--	0,017	--	--	--

Tablo A.1. (devamı) Elde edilen verilere ait işlenmiş değerler ve belirsizlik bileşenleri

	Mk	Durum I					Durum II					
		b	b'	f0	fa,küb	fa,lin	b	b'	f0	h	fa,lin	r
	N.m	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*N.m*
21 °C	20	0,025	0,001		0,000	-0,008	0,025	0,001		--	-0,002	0,000015
	16	0,020	0,003		0,001	-0,001	0,020	0,003		0,010	-0,001	0,000015
	12	0,018	0,004		0,000	0,005	0,018	0,004		0,018	0,001	0,000015
	10	0,016	0,004		0,001	0,008	0,016	0,004		0,022	0,002	0,000015
	8	0,015	0,005		0,002	0,012	0,015	0,005		0,028	0,003	0,000015
	6	0,012	0,011		0,001	0,018	0,012	0,011		0,037	0,004	0,000015
	4	0,012	0,013		0,002	0,027	0,012	0,013		0,052	0,004	0,000015
	2	0,004	0,032		0,015	0,047	0,004	0,032		0,093	0,001	0,000015
	0	--	--	0,003	--	--	--	--	0,003	--	--	--
22 °C	20	0,066	0,001		0,000	0,004	0,066	0,001		--	-0,005	0,000015
	16	0,075	0,003		0,001	0,001	0,075	0,003		0,035	-0,002	0,000015
	12	0,080	0,006		0,001	-0,001	0,080	0,006		0,072	0,002	0,000015
	10	0,071	0,007		0,000	-0,004	0,071	0,007		0,100	0,004	0,000015
	8	0,059	0,008		0,000	-0,007	0,059	0,008		0,142	0,008	0,000015
	6	0,041	0,010		0,001	-0,012	0,041	0,010		0,212	0,016	0,000015
	4	0,019	0,019		0,001	-0,016	0,019	0,019		0,343	0,034	0,000015
	2	0,090	0,056		0,003	-0,016	0,090	0,056		0,728	0,097	0,000015
	0	--	--	0,089	--	--	--	--	0,089	--	--	--
23 °C	20	0,108	0,006		0,001	0,003	0,108	0,006		--	-0,007	0,000015
	16	0,141	0,015		-0,003	-0,004	0,141	0,015		0,046	-0,004	0,000015
	12	0,149	0,029		0,001	-0,001	0,149	0,029		0,067	0,003	0,000015
	10	0,147	0,038		0,003	0,000	0,147	0,038		0,078	0,008	0,000015
	8	0,148	0,053		0,005	0,003	0,148	0,053		0,094	0,015	0,000015
	6	0,109	0,075		-0,005	-0,007	0,109	0,075		0,121	0,019	0,000015
	4	0,086	0,114		-0,007	-0,007	0,086	0,114		0,165	0,037	0,000015
	2	0,070	0,235		-0,001	-0,001	0,071	0,235		0,300	0,083	0,000015
	0			0,038					0,038			

Tablo A.1. (devamı) Elde edilen verilere ait işlenmiş değerler ve belirsizlik bileşenleri

	Mk	Durum I					Durum II					
		b	b'	f0	fa,küb	fa,lin	b	b'	f0	h	fa,lin	r
	N.m	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*N.m*
24 °C	20	0,108	0,006		0,003	0,004	0,108	0,006		--	-0,007	0,000015
	16	0,141	0,015		0,002	0,005	0,141	0,015		0,046	-0,004	0,000015
	12	0,149	0,029		0,001	-0,001	0,149	0,029		0,067	0,003	0,000015
	10	0,147	0,038		0,003	0,000	0,147	0,038		0,078	0,008	0,000015
	8	0,148	0,053		0,006	0,003	0,148	0,053		0,094	0,015	0,000015
	6	0,109	0,075		0,007	-0,007	0,109	0,075		0,121	0,019	0,000015
	4	0,086	0,114		0,012	-0,007	0,086	0,114		0,165	0,037	0,000015
	2	0,070	0,235		0,013	-0,001	0,071	0,235		0,300	0,083	0,000015
	0			0,038					0,038			
25 °C	20	0,108	0,006		0,002	0,004	0,108	0,006		--	-0,007	0,000015
	16	0,141	0,015		0,002	0,005	0,141	0,015		0,046	-0,004	0,000015
	12	0,149	0,029		0,001	-0,001	0,149	0,029		0,067	0,003	0,000015
	10	0,147	0,038		0,000	0,000	0,147	0,038		0,078	0,008	0,000015
	8	0,148	0,053		0,005	0,003	0,148	0,053		0,094	0,015	0,000015
	6	0,109	0,075		0,008	-0,007	0,109	0,075		0,121	0,019	0,000015
	4	0,086	0,114		0,013	-0,007	0,086	0,114		0,165	0,037	0,000015
	2	0,070	0,235		0,015	-0,001	0,071	0,235		0,300	0,083	0,000015
	0			0,038					0,038			

Tablo A.2. Ara işlemlerde elde edilen sonuçlara göre ortalama değerler ve ölçüm belirsizliği değerleri

	Referans Tork Değerleri	Durum I			Durum II	
		Ortalama Değer	Genişletilmiş Bağıl Belirsizlik (k = 2)		Ortalama değer	Bağıl Belirsizlik Aralığı (k=2)
		N·m	*Kübik (D.1), %*	*Lineer (D.2), %*	*N·m*	*Lineer (D.3), %*
17 °C	2	0,134803	0,109	0,119	0,134762	0,274
	4	0,269542	0,058	0,058	0,269529	0,133
	6	0,404301	0,055	0,055	0,404264	0,125
	8	0,539053	0,044	0,045	0,539014	0,096
	10	0,673831	0,042	0,042	0,673803	0,073
	12	0,808598	0,036	0,037	0,808534	0,087
	16	1,078152	0,034	0,034	1,078114	0,057
	20	1,347743	0,032	0,032	1,347743	0,033
18 °C	2	0,134813	0,061	0,071	0,134841	0,123
	4	0,269591	0,045	0,046	0,269617	0,074
	6	0,404375	0,045	0,046	0,404389	0,078
	8	0,539154	0,044	0,044	0,539166	0,069
	10	0,673943	0,041	0,041	0,673952	0,062
	12	0,808734	0,037	0,037	0,808735	0,054
	16	1,078305	0,035	0,035	1,078307	0,045
	20	1,347883	0,029	0,029	1,347883	0,029
19 °C	2	0,134889	0,096	0,139	0,134806	0,383
	4	0,269709	0,074	0,088	0,269629	0,199
	6	0,404490	0,069	0,070	0,40443	0,150
	8	0,539298	0,068	0,068	0,539246	0,121
	10	0,674113	0,064	0,064	0,674068	0,104
	12	0,808921	0,061	0,061	0,808883	0,090
	16	1,078573	0,055	0,055	1,078535	0,070
	20	1,348209	0,050	0,050	1,348209	0,050

Tablo A.2 (devamı) Ara işlemlerde elde edilen sonuçlara göre ortalama değerler ve ölçüm belirsizliği değerleri

	Referans Tork Değerleri	Durum I			Durum II	
		Ortalama Değer	Genişletilmiş Bağıl Belirsizlik (k = 2)		Ortalama değer	Bağıl Belirsizlik Aralığı (k=2)
		N·m	*Kübik (D.1), %*	*Lineer (D.2), %*	*N·m*	*Lineer (D.3), %*
20 °C	2	0,134881	0,106	0,155	0,134852	0,207
	4	0,269702	0,080	0,106	0,269657	0,170
	6	0,404465	0,057	0,062	0,404435	0,098
	8	0,539253	0,054	0,055	0,539224	0,080
	10	0,674051	0,052	0,053	0,674017	0,078
	12	0,808828	0,051	0,051	0,808803	0,066
	16	1,078390	0,047	0,047	1,078372	0,051
	20	1,347987	0,041	0,042	1,347987	0,041
21 °C	2	0,134648	0,022	0,096	0,134717	0,114
	4	0,269349	0,015	0,056	0,269427	0,067
	6	0,404059	0,014	0,039	0,404143	0,052
	8	0,538776	0,014	0,028	0,538862	0,042
	10	0,673497	0,014	0,021	0,673582	0,037
	12	0,808223	0,015	0,018	0,808304	0,033
	16	1,077700	0,016	0,016	1,077760	0,026
	20	1,347213	0,017	0,024	1,347213	0,018
22 °C	2	0,134855	0,080	0,087	0,134692	0,228
	4	0,269712	0,055	0,063	0,269552	0,205
	6	0,404552	0,058	0,063	0,404402	0,173
	8	0,539376	0,063	0,064	0,539242	0,106
	10	0,674198	0,067	0,067	0,674082	0,096
	12	0,809012	0,070	0,070	0,808915	0,071
	16	1,078667	0,068	0,068	1,078598	0,056
	20	1,348292	0,065	0,065	1,348292	0,033

Tablo A.2. (devamı) Ara işlemlerde elde edilen sonuçlara göre ortalama değerler ve ölçüm belirsizliği değerleri

	Referans Tork Değerleri	Durum I			Durum II	
		Ortalama Değer	Genişletilmiş Bağıl Belirsizlik (k = 2)		Ortalama değer	Bağıl Belirsizlik Aralığı (k=2)
		N·m	*Kübik (D.1), %*	*Lineer (D.2), %*	*N·m*	*Lineer (D.3), %*
23 °C	2	0,134842	0,144	0,144	0,134716	0,461
	4	0,269703	0,086	0,087	0,269556	0,259
	6	0,404552	0,080	0,081	0,404405	0,205
	8	0,53935	0,094	0,094	0,539229	0,191
	10	0,674205	0,091	0,091	0,674081	0,171
	12	0,809056	0,091	0,091	0,808939	0,158
	16	1,078773	0,086	0,086	1,078665	0,132
	20	1,348371	0,067	0,067	1,348371	0,068
24 °C	2	0,134842	0,152	0,149	0,134716	0,511
	4	0,269703	0,095	0,089	0,269556	0,259
	6	0,404552	0,098	0,085	0,404405	0,228
	8	0,53935	0,097	0,085	0,539229	0,195
	10	0,674205	0,095	0,092	0,674081	0,176
	12	0,809056	0,092	0,094	0,808939	0,158
	16	1,078773	0,089	0,088	1,078665	0,134
	20	1,348371	0,075	0,072	1,348371	0,073
25 °C	2	0,134842	0,155	0,158	0,134716	0,524
	4	0,269703	0,085	0,098	0,269556	0,267
	6	0,404552	0,100	0,097	0,404405	0,233
	8	0,53935	0,099	0,095	0,539229	0,199
	10	0,674205	0,096	0,091	0,674081	0,179
	12	0,809056	0,096	0,090	0,808939	0,161
	16	1,078773	0,092	0,089	1,078665	0,138
	20	1,348371	0,077	0,075	1,348371	0,079

EK-B

B.1 Verilerin İşlenmesinde ve Ölçüm Belirsizliği Hesabında Kullanılan Excel Programı

Bu çalışma boyunca elde edilmiş bütün ölçüm sonuçları, Microsoft Excel programı ile hazırlanmış olan yazılım vasıtasıyla işlenmiştir. Bu yazılım sırasıyla, Şekil B.1.'de gösterildiği gibi "Ham veriler", "Form", "Grafikler", "Saat yönü için hesaplamalar", "Saat yönünün tersi için hesaplamalar" ve "Sertifika" sekmelerinden oluşmaktadır.

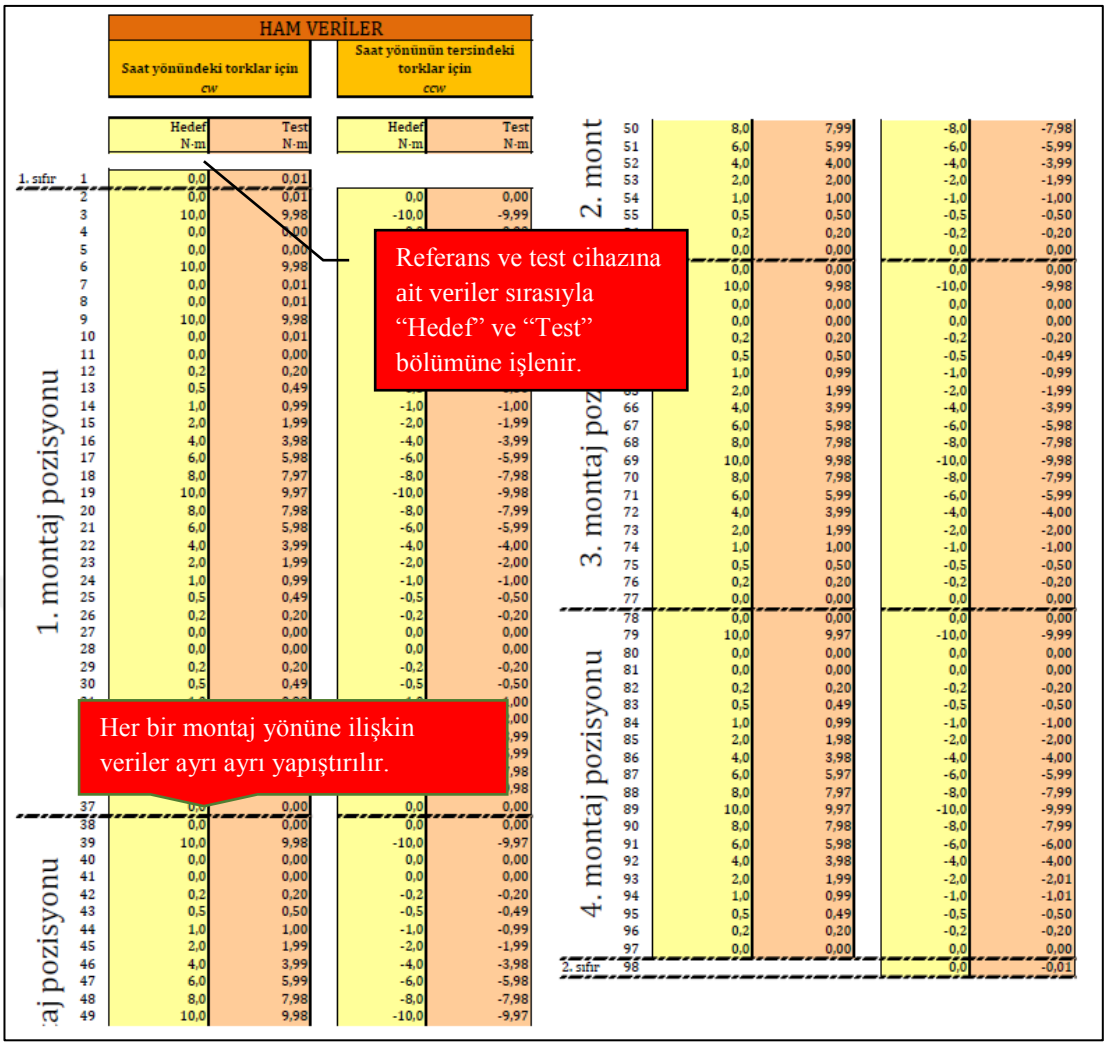


Şekil B.1. Ölçüm sonuçlarının hesaplanmasında kullanılan programa ait sekmeler

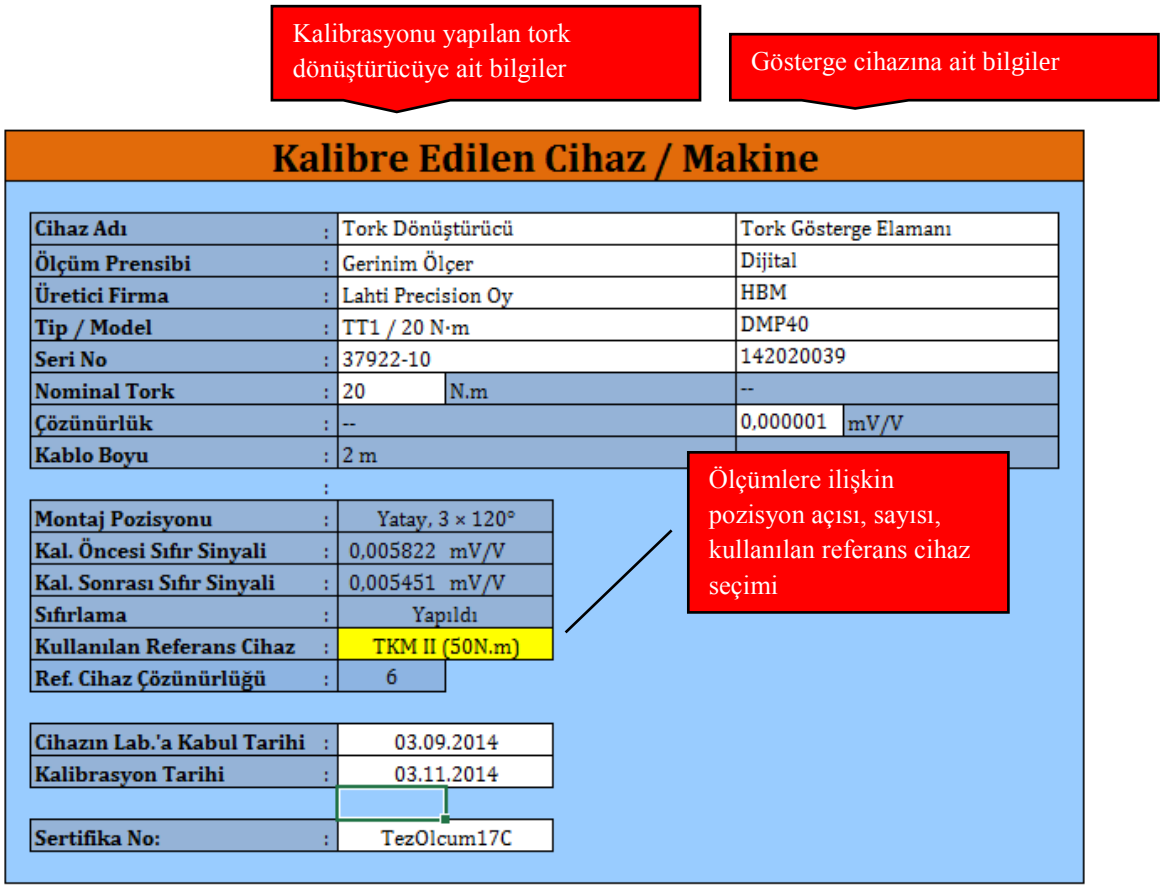
Herhangi bir sertifika hazırlanırken izlenen sıralama şu şekildedir.

1. TKM II makinesinde yapılmış ölçümlere ait Excel dosyasından veriler kopyalanır,
2. İlk sekme olan "ham_veriler" kısmına uygun şekilde yapıştırılır,
3. "form" sekmesinde uygun referans cihaz seçimi yapılır. Test cihazına ilişkin bilgiler girilir.
4. "sertifika" sekmesinde Sertifika hazırlanmış olur.

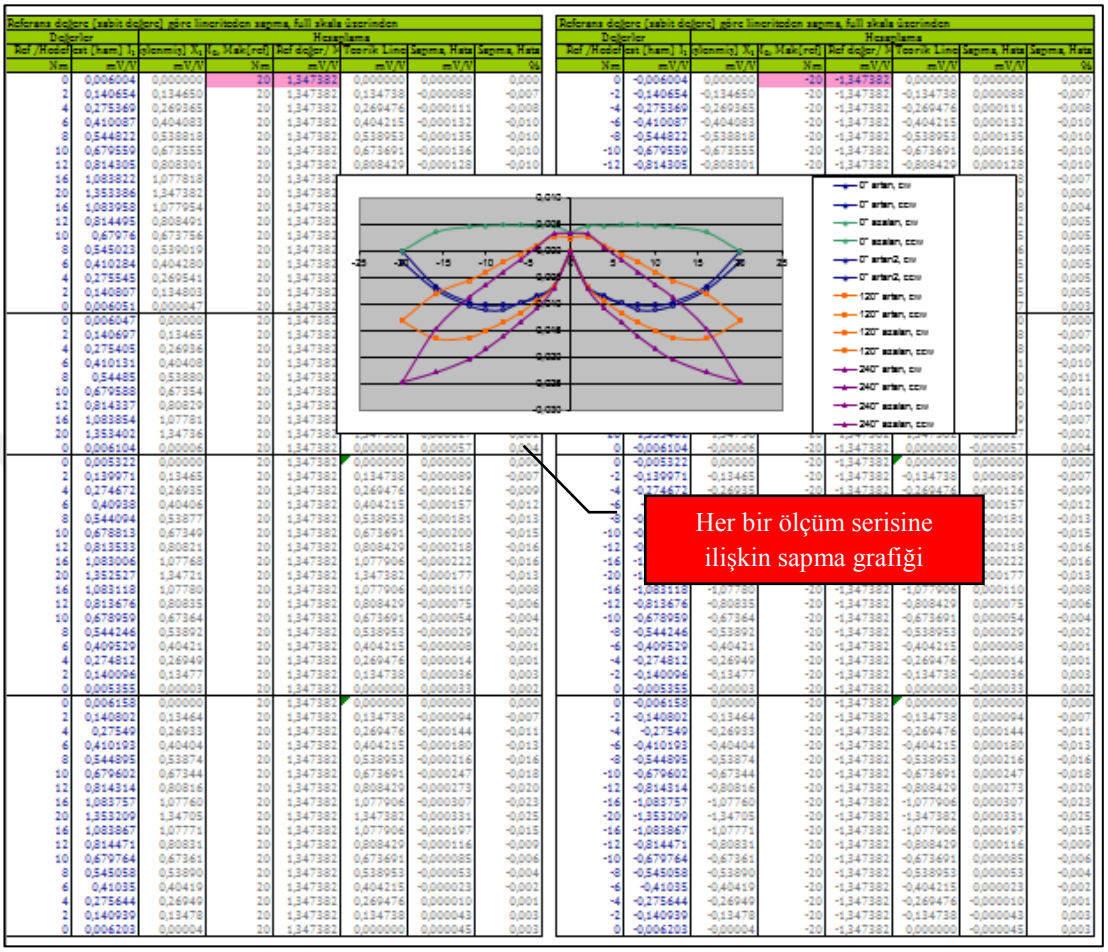
Sertifika sekmesi hariç diğer sekmelere ait görseller Şekil B.1-5. arasında verilmiştir. Sertifikaya ilişkin görseller ise Ek-C'de yer almaktadır.



Şekil B.2. Veri giriş sayfası

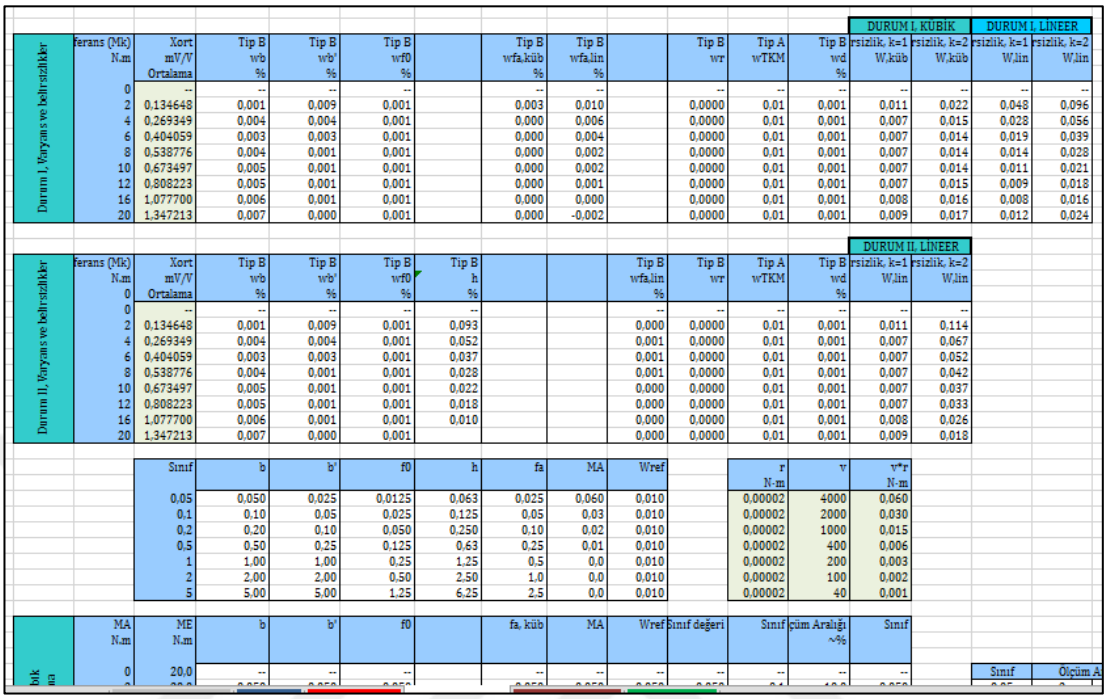


Şekil B.3. Test ve referans cihaza ait bilgilerin girildiği form sayfası



Şekil B.4. Enterpolasyon değerlerinin nominal değerden sapma hesaplama sayfası

Ek-A ve Ek-B'de açıklandığı şekilde, saat yönü ve tersine ait veriler için hata ve ölçüm belirsizliği hesabı



	Ferans (Mk) N.m	Xort mV/V Ortalama	Tip B wb %	Tip B wb' %	Tip B wf0 %		Tip B wfa.küb %	Tip B wfa.lin %		Tip B wr	Tip A wTKM	Tip B wd %	DURUM I, KÜBİK rsizlik, k=1 W,küb	rsizlik, k=2 W,küb	DURUM I, LİNEER rsizlik, k=1 W,lin	rsizlik, k=2 W,lin
Durum I, Varyans ve belirsizlikler	0	--	--	--	--		--	--		--	--	--	--	--	--	--
	2	0,134648	0,001	0,009	0,001		0,003	0,010		0,0000	0,01	0,001	0,011	0,022	0,048	0,096
	4	0,269349	0,004	0,004	0,001		0,000	0,006		0,0000	0,01	0,001	0,007	0,015	0,028	0,056
	6	0,404059	0,003	0,003	0,001		0,000	0,004		0,0000	0,01	0,001	0,007	0,014	0,019	0,039
	8	0,538776	0,004	0,001	0,001		0,000	0,002		0,0000	0,01	0,001	0,007	0,014	0,014	0,028
	10	0,673497	0,005	0,001	0,001		0,000	0,002		0,0000	0,01	0,001	0,007	0,014	0,011	0,021
	12	0,808223	0,005	0,001	0,001		0,000	0,001		0,0000	0,01	0,001	0,007	0,015	0,009	0,018
	16	1,077700	0,006	0,001	0,001		0,000	0,000		0,0000	0,01	0,001	0,008	0,016	0,008	0,016
	20	1,347213	0,007	0,000	0,001		0,000	-0,002		0,0000	0,01	0,001	0,009	0,017	0,012	0,024

	Ferans (Mk) N.m	Xort mV/V Ortalama	Tip B wb %	Tip B wb' %	Tip B wf0 %	Tip B h %			Tip B wfa.lin %	Tip B wr	Tip A wTKM	Tip B wd %	DURUM II, LİNEER rsizlik, k=1 W,lin	rsizlik, k=2 W,lin
Durum II, Varyans ve belirsizlikler	0													
	0	--	--	--	--	--			--	--	--	--	--	--
	2	0,134648	0,001	0,009	0,001	0,093			0,000	0,0000	0,01	0,001	0,011	0,114
	4	0,269349	0,004	0,004	0,001	0,052			0,001	0,0000	0,01	0,001	0,007	0,067
	6	0,404059	0,003	0,003	0,001	0,037			0,001	0,0000	0,01	0,001	0,007	0,052
	8	0,538776	0,004	0,001	0,001	0,028			0,001	0,0000	0,01	0,001	0,007	0,042
	10	0,673497	0,005	0,001	0,001	0,022			0,000	0,0000	0,01	0,001	0,007	0,037
	12	0,808223	0,005	0,001	0,001	0,018			0,000	0,0000	0,01	0,001	0,007	0,033
	16	1,077700	0,006	0,001	0,001	0,010			0,000	0,0000	0,01	0,001	0,008	0,026
	20	1,347213	0,007	0,000	0,001				0,000	0,0000	0,01	0,001	0,009	0,018

Sınıf	b	b'	f0	h	fa	MA	Wref		r N-m	v	v*r N-m
0,05	0.050	0.025	0.0125	0.063	0.025	0.060	0.010		0.00002	4000	0.060
0.1	0.10	0.05	0.025	0.125	0.05	0.03	0.010		0.00002	2000	0.030
0.2	0.20	0.10	0.050	0.250	0.10	0.02	0.010		0.00002	1000	0.015
0.5	0.50	0.25	0.125	0.63	0.25	0,01	0.010		0.00002	400	0,006
1	1,00	1,00	0,25	1,25	0.5	0.0	0.010		0.00002	200	0,003
2	2,00	2,00	0.50	2.50	1.0	0.0	0.010		0.00002	100	0,002
5	5.00	5.00	1.25	6.25	2.5	0.0	0.010		0.00002	40	0,001

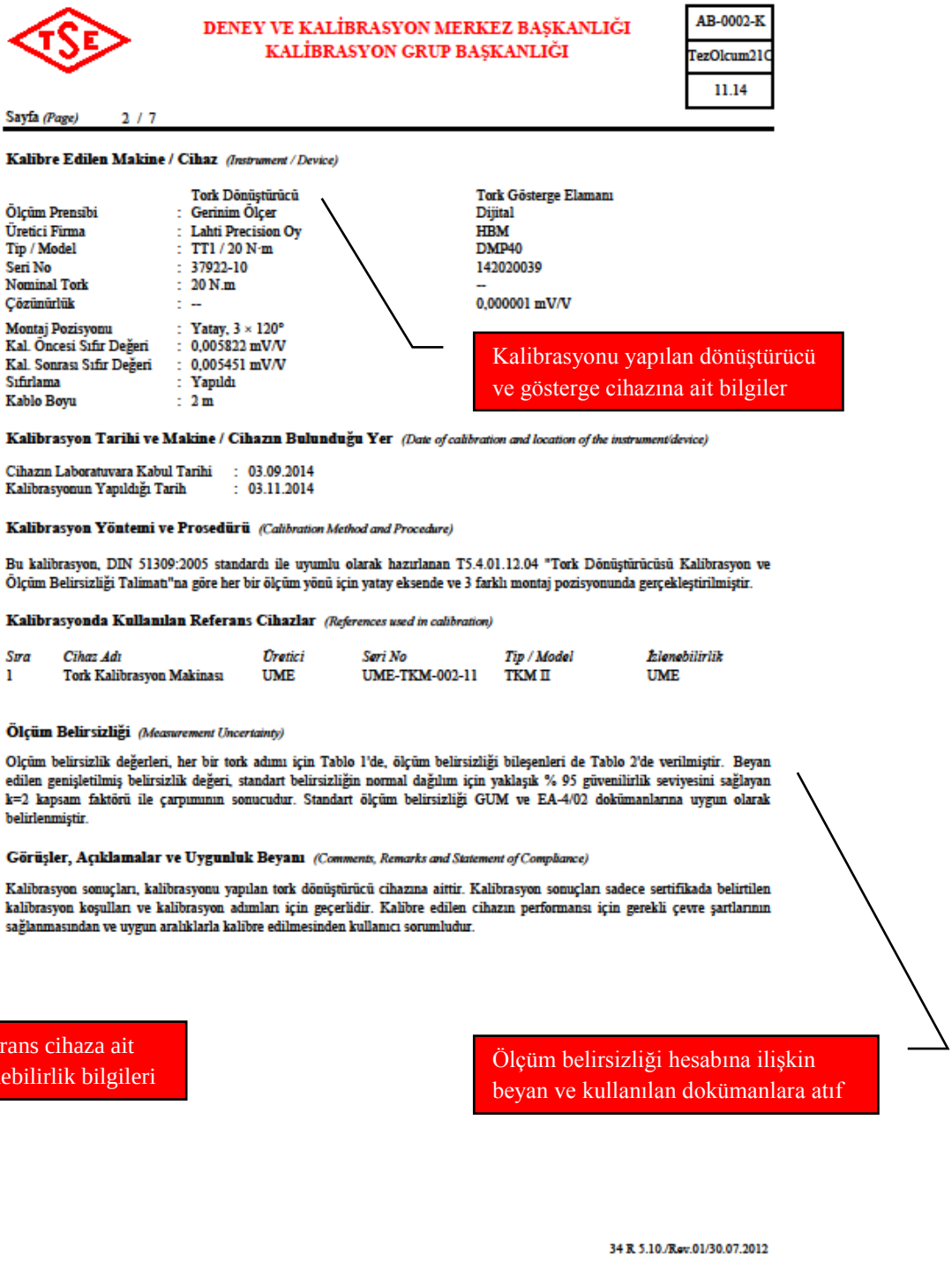
	MA N.m	ME N.m	b	b'	f0		fa, küb	MA	Wref	Sınıf değeri	Sınıf	çüm Aralığı ~%	Sınıf		
bik ma	0	20.0	--	--	--		--	--	--	--	--	--	--	Sınıf	Ölçüm A

EK-C

Herhangi bir deney veya kalibrasyon işlemi sonrası hazırlanan rapor veya sertifikanın, kullanıcının o cihaz ile gerçekleştirmek istediği bütün ölçüm işlemleri için gerekli olan bütün bilgileri içermesi, TS EN ISO 17025 Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarlarının Yeterliliği için Genel Şartlar Standardı gereği zorunludur. Bu zorunluluk, sertifikada Bölüm 3.4.9'da belirtilen asgari bütün bilgilerin yer almasını mecburi kılmaktadır. Diğer taraftan, asgari bilgilerin sertifikada sunulması çoğu zaman yeterli olmamakta, test cihazlarının çok geniş kullanım alanine sahip olmasında ötürü standardın zorunlu tuttuğu veya tutmadığı bütün kullanılabilir bilgilerin de belirtilmesi çoğu zaman tercih edilmektedir. Bu sebeple bu çalışmada, DIN 51309 standardında da atıf yapılmış her üç duruma ilişkin sınıflandırma ve belirsizlik değerleri verilmiştir. Ayrıca, her üç enterpolasyon durumuna ait denklemler ve grafikler sunulmuştur. Kullanım yeri ve amacına göre uygun durum ve enterpolasyon denklemi seçilerek ölçüm verileri dikkate alınmalıdır.

Bu Ek-C bölümünün devam eden sayfalarında, 21 °C ve % 45 nem değerinde gerçekleştirilen kalibrasyona ait sertifika örneği toplam 6 sayfa olarak sunulmuştur.

C.1 Örnek Kalibrasyon Sertifikası (21 °C'de elde edilmiş verilere göre)



DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

AB-0002-K
TezOlcum21C
11.14

Sayfa *(Page)* 2 / 7

Kalibre Edilen Makine / Cihaz *(Instrument / Device)*

		Tork Dönüştürücü	Tork Gösterge Elamanı
Ölçüm Prensibi	:	Gerinim Ölçer	Dijital
Üretici Firma	:	Lahti Precision Oy	HBM
Tip / Model	:	TT1 / 20 N·m	DMP40
Seri No	:	37922-10	142020039
Nominal Tork	:	20 N.m	--
Çözünürlük	:	--	0,000001 mV/V
Montaj Pozisyonu	:	Yatay, 3 × 120°	
Kal. Öncesi Sıfır Değeri	:	0,005822 mV/V	
Kal. Sonrası Sıfır Değeri	:	0,005451 mV/V	
Sıfırlama	:	Yapıldı	
Kablo Boyu	:	2 m	

Kalibrasyonu yapılan dönüştürücü ve gösterge cihazına ait bilgiler

Kalibrasyon Tarihi ve Makine / Cihazın Bulunduğu Yer *(Date of calibration and location of the instrument/device)*

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi : 03.09.2014
Kalibrasyonun Yapıldığı Tarih : 03.11.2014

Kalibrasyon Yöntemi ve Prosedürü *(Calibration Method and Procedure)*

Bu kalibrasyon, DIN 51309:2005 standardı ile uyumlu olarak hazırlanan T5.4.01.12.04 "Tork Dönüştürücüsü Kalibrasyon ve Ölçüm Belirsizliği Talimatı"na göre her bir ölçüm yönü için yatay eksende ve 3 farklı montaj pozisyonunda gerçekleştirilmiştir.

Kalibrasyonda Kullanılan Referans Cihazlar *(References used in calibration)*

Sıra	*Cihaz Adı*	*Üretici*	*Seri No*	*Tip / Model*	*İzlenebilirlik*
1	Tork Kalibrasyon Makinası	UME	UME-TKM-002-11	TKM II	UME

Ölçüm Belirsizliği *(Measurement Uncertainty)*

Ölçüm belirsizlik değerleri, her bir tork adımı için Tablo 1'de, ölçüm belirsizliği bileşenleri de Tablo 2'de verilmiştir. Beyan edilen genişletilmiş belirsizlik değeri, standart belirsizliğin normal dağılım için yaklaşık % 95 güvenilirlik seviyesini sağlayan k=2 kapsam faktörü ile çarpımının sonucudur. Standart ölçüm belirsizliği GUM ve EA-4/02 dokümanlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Görüşler, Açıklamalar ve Uygunluk Beyanı *(Comments, Remarks and Statement of Compliance)*

Kalibrasyon sonuçları, kalibrasyonu yapılan tork dönüştürücü cihazına aittir. Kalibrasyon sonuçları sadece sertifikada belirtilen kalibrasyon koşulları ve kalibrasyon adımları için geçerlidir. Kalibre edilen cihazın performansı için gerekli çevre şartlarının sağlanmasından ve uygun aralıklarla kalibre edilmesinden kullanıcı sorumludur.

Referans cihaza ait izlenebilirlik bilgileri

Ölçüm belirsizliği hesabına ilişkin beyan ve kullanılan dokümanlara atıf

34 R 5.10./Rev.01/30.07.2012

Çevre Şartları *(Environmental Conditions)*

Ortam Sıcaklığı : (21 ± 1) °C
Bağıl Nem : %Rh (45 ± 10)

Ortam şartları

Kalibrasyon Sonuçları *(Calibration Results)*

Durum I ve II için ortalama ve üç farklı ölçüm belirsizliği değerleri

Tablo 1 : Kalibrasyon Sonucu ve Ölçüm Belirsizliği *(Calibration Results and Measurement Uncertainty)*

Referans Tork Değerleri *N.m*	Durum I Ortalama Değer Xa *mV/V*	Durum I Genişletilmiş Bağıl Belirsizlik *(k = 2)* Enterpolasyon *Kübik (D.1), %*	Durum I Genişletilmiş Bağıl Belirsizlik *(k = 2)* Enterpolasyon *Lineer (D.2), %*	Durum II Ortalama Değer Xa *mV/V*	Durum II Bağıl Belirsizlik Aralığı *(k=2) Lineer (D.3), %*
Saat yönünde (cw)					
0	--	--	--	--	--
2	0,134648	0,022	0,096	0,134717	0,114
4	0,269349	0,015	0,056	0,269427	0,067
6	0,404059	0,014	0,039	0,404143	0,052
8	0,538776	0,014	0,028	0,538862	0,042
10	0,673497	0,014	0,021	0,673582	0,037
12	0,808223	0,015	0,018	0,808304	0,033
16	1,077700	0,016	0,016	1,077760	0,026
20	1,347213	0,017	0,024	1,347213	0,018
Saat yönünün tersinde (ccw)					
0	--	--	--	--	--
-2	-0,134648	0,014	0,096	-0,134717	0,140
-4	-0,269349	0,010	0,056	-0,269427	0,086
-6	-0,404059	0,010	0,039	-0,404143	0,070
-8	-0,538776	0,010	0,028	-0,538862	0,057
-10	-0,673497	0,010	0,021	-0,673582	0,051
-12	-0,808223	0,010	0,018	-0,808304	0,045
-16	-1,077700	0,010	0,016	-1,077760	0,034
-20	-1,347213	0,010	0,024	-1,347213	0,023

Tablo 2: Kalibre edilen cihazın DIN 51309'a göre sınıf değerleri *(Classification according to DIN 51309)*

Sınıf	Durum I Ölçüm Aralığı *Kübik Enterpolasyon (D.1)* *N.m*		Durum I Ölçüm Aralığı *Lineer Enterpolasyon (D.2)* *N.m*		Durum II Ölçüm Aralığı *Lineer Enterpolasyon (D.3)* *N.m*	
Saat yönünde (cw)						
0,05	2	20	2	20	2	20
0,1						
0,2						
0,5						
1						
2						
5						
Saat yönünün tersinde (ccw)						
0,05	-2	-20	-2	-20	-4	-20
0,1					-2	-20
0,2						
0,5						
1						
2						
5						

Ölçüm sonuçlarına göre her bir Durum için, saat yönü ve tersinde elde edilen sonuçların ölçüm aralığına göre sınıflandırma tabloları

Enterpolasyon Denklemleri *(Interpolation Equations)*

Denklem 1 (D.1): Kübik enterpolasyon denklemi *(Durum I)*

Saat yönü (cw)

$X_{ai} = 0{,}06732965 \cdot M_i + 2{,}357019E\text{-}06 \cdot M_i^2 + -4{,}08862E\text{-}08 \cdot M_i^3$

$M_{ai} = 14{,}85229601 \cdot X_i + -0{,}00771544 \cdot X_i^2 + 0{,}00198782 \cdot X_i^3$

Azalan mutlak değerler için saat yönü (cw)

$X_{ai} = 1{,}1157E\text{-}05 + 0{,}06735162 \cdot M_i + 6{,}7295E\text{-}07 \cdot M_i^2 + -1{,}2418E\text{-}08 \cdot M_i^3$

$M_{ai} = -0{,}0002 + 14{,}84745 \cdot X_i + -0{,}0022 \cdot X_i^2 + 0{,}0006 \cdot X_i^3$

Saat yönünün tersi (ccw)

$X_{ai} = 0{,}067329651 \cdot M_i + -2{,}35702E\text{-}06 \cdot M_i^2 + -4{,}08862E\text{-}08 \cdot M_i^3$

$M_{ai} = 14{,}8523 \cdot X_i + 0{,}0077 \cdot X_i^2 + 0{,}0020 \cdot X_i^3$

Azalan mutlak değerler için saat yönünün tersi (ccw)

$X_{ai} = -1{,}116E\text{-}05 + 0{,}06735162 \cdot M_i + -6{,}730E\text{-}07 \cdot M_i^2 + -1{,}242E\text{-}08 \cdot M_i^3$

$M_{ai} = 0{,}0002 + 14{,}8475 \cdot X_i + 0{,}0022 \cdot X_i^2 + 0{,}0006 \cdot X_i^3$

Denklem 2 (D.2): Lineer enterpolasyon denklemi *(Durum I)*

Saat yönü (cw)

$X_{ai} = 0{,}06735525 \cdot M_i$

$M_{ai} = 14{,}84665144 \cdot X_i$

Saat yönünün tersi (ccw)

$X_{ai} = 0{,}06735525 \cdot M_i$

$M_{ai} = 14{,}84665144 \cdot X_i$

Saat yönü ve tersi

$X_{ai} = 0{,}06735525 \cdot M_i$

$M_{ai} = 14{,}84665144 \cdot X_i$

Denklem 3 (D.3): Lineer enterpolasyon denklemi (beraber) *(Durum II)*

Saat yönü (cw)

$X_{ai} = 0{,}06735959 \cdot M_i$

$M_{ai} = 14{,}84569558 \cdot X_i$

Saat yönünün tersi (ccw)

$X_{ai} = 0{,}06735959 \cdot M_i$

$M_{ai} = 14{,}84569558 \cdot X_i$

Saat yönü ve tersi

$X_{ai} = 0{,}06735742 \cdot M_i$

$M_{ai} = 14{,}84617348 \cdot X_i$

Tablo 3: Sınıflandırma ve Belirsizlik Kriterleri *(Classification and Uncertainty Criterion)*

	Durum I					Durum II					
M_k	b	b'	f_0	$f_{a,kib}$	$f_{a,lin}$	b	b'	f_0	h	$f_{a,lin}$	r
N.m	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	*N.m*
20	0,025	0,001		0,000	-0,008	0,025	0,001		--	-0,002	0,000015
16	0,020	0,003		0,001	-0,001	0,020	0,003		0,010	-0,001	0,000015
12	0,018	0,004		0,000	0,005	0,018	0,004		0,018	0,001	0,000015
10	0,016	0,004		-0,001	0,008	0,016	0,004		0,022	0,002	0,000015
8	0,015	0,005		-0,002	0,012	0,015	0,005		0,028	0,003	0,000015
6	0,012	0,011		-0,001	0,018	0,012	0,011		0,037	0,004	0,000015
4	0,012	0,013		0,002	0,027	0,012	0,013		0,052	0,004	0,000015
2	0,004	0,032		0,015	0,047	0,004	0,032		0,093	0,001	0,000015
0	--	--	0,003	--	--	--	--	0,003	--	--	--
0	--	--	-0,002	--	--	--	--	-0,002	--	--	--
-2	-0,004	-0,032		0,015	0,047	-0,004	-0,032		0,114	0,001	0,000015
-4	-0,012	-0,013		0,002	0,027	-0,012	-0,013		0,065	0,004	0,000015
-6	-0,012	-0,011		-0,001	0,018	-0,012	-0,011		0,049	0,004	0,000015
-8	-0,015	-0,005		-0,002	0,012	-0,015	-0,005		0,037	0,003	0,000015
-10	-0,016	-0,004		-0,001	0,008	-0,016	-0,004		0,030	0,002	0,000015
-12	-0,018	-0,004		0,000	0,005	-0,018	-0,004		0,024	0,001	0,000015
-16	-0,020	-0,003		0,001	-0,001	-0,020	-0,003		0,013	-0,001	0,000015
-20	-0,025	-0,001		0,000	-0,008	-0,025	-0,001		--	-0,002	0,000015

Hedef değer ve ölçülen değer arasındaki ilişkiye göre hesaplanmış, farklı Durumlar için birinci ve üçüncü dereceden enterpolasyon denklemleri

Denklemlere ilişkin katsayılar mV/V > N·m ve N·m > mV/V çevrimleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır

Ölçüm belirsizliği hesabında ve sınıflandırmada dikkate alınan belirsizlik kriterleri

Saat yönü ve tersi için elde edilmiş ham veriler

DENEY VE KALİBRASYON MERKEZ BAŞKANLIĞI
KALİBRASYON GRUP BAŞKANLIĞI

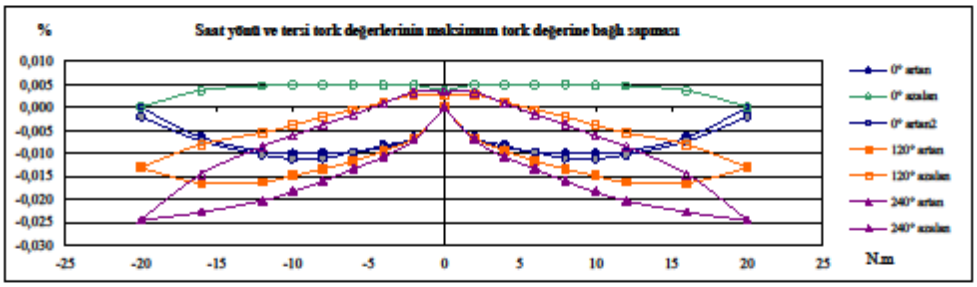
AB-0002-K
TezOlcum21C
11.14

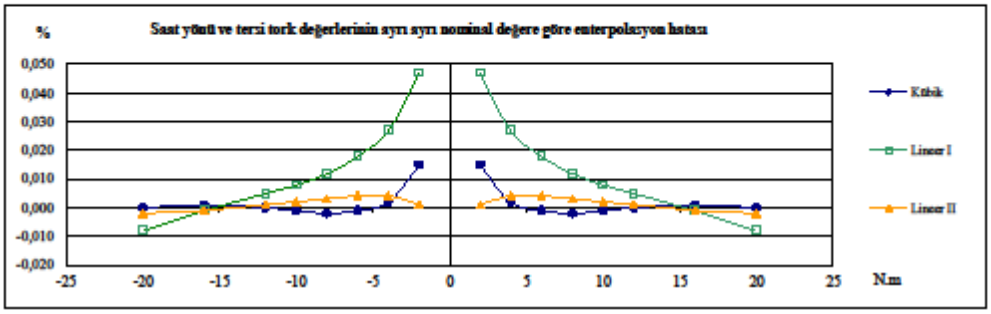
Tablo 4: Kalibre edilen cihaza ait ölçüm değerleri *(Measurement results)*

	Referans Tork Değerleri *N.m*	Ölçüm değerleri 1. pozisyon / 0° 1.1 seri mV/V	1.2 seri *mV/V*	2. poz / 120° 2. seri *mV/V*	3. poz / 240° 3. seri *mV/V*
Saat yönünde (cw)					
Ön Yük	0	0,005908			
	20	1,353308			
	0	0,006018			
Ön Yük	0	0,006001			
	20	1,353313			
	0	0,006027			
Ön Yük	0	0,006005		0,005309	0,006158
	20	1,353322		1,352441	1,353134
	0	0,006048		0,005380	0,006209
Veriler	0	0,006004	0,006047	0,005322	0,006158
	2	0,140654	0,140697	0,139971	0,140802
	4	0,275369	0,275405	0,274672	0,275490
	6	0,410087	0,410131	0,409380	0,410193
	8	0,544822	0,544850	0,544094	0,544895
	10	0,679559	0,679588	0,678813	0,679602
	12	0,814305	0,814337	0,813533	0,814314
	16	1,083822	1,083854	1,083006	1,083757
	20	1,353386	1,353402	1,352527	1,353209
	16	1,083958		1,083118	1,083867
	12	0,814495		0,813676	0,814471
	10	0,679760		0,678959	0,679764
	8	0,545023		0,544246	0,545058
	6	0,410284		0,409529	0,410350
	4	0,275545		0,274812	0,275644
	2	0,140807		0,140096	0,140939
	0	0,006051		0,005355	0,006203
Saat yönünün tersinde (ccw)					
Ön Yük	0	-0,005908			
	-20	-1,353308			
	0	-0,006018			
Ön Yük	0	-0,006001			
	-20	-1,353313			
	0	-0,006027			
Ön Yük	0	-0,006005		-0,005309	-0,006158
	-20	-1,353322		-1,352441	-1,353134
	0	-0,006048		-0,005380	-0,006209
Veriler	0	-0,006004	-0,006047	-0,005322	-0,006158
	-2	-0,140654	-0,140697	-0,139971	-0,140802
	-4	-0,275369	-0,275405	-0,274672	-0,275490
	-6	-0,410087	-0,410131	-0,409380	-0,410193
	-8	-0,544822	-0,544850	-0,544094	-0,544895
	-10	-0,679559	-0,679588	-0,678813	-0,679602
	-12	-0,814305	-0,814337	-0,813533	-0,814314
	-16	-1,083822	-1,083854	-1,083006	-1,083757
	-20	-1,353386	-1,353402	-1,352527	-1,353209
	-16	-1,083958		-1,083118	-1,083867
	-12	-0,814495		-0,813676	-0,814471
	-10	-0,679760		-0,678959	-0,679764
	-8	-0,545023		-0,544246	-0,545058
	-6	-0,410284		-0,409529	-0,410350
	-4	-0,275545		-0,274812	-0,275644
	-2	-0,140807		-0,140096	-0,140939
	0	-0,006051		-0,005355	-0,006203

Grafik: Ölçüm sonuçlarına ait grafikler

Referans Değer / Reference Value : 1,54/105 mV / V





Ölçüm sonuçlarının maksimum tork değerine göre sapma ve nominal değere göre enterpolasyon hataları grafikleri

Tablo 5: Belirsizliğe bağlı olmayan kübik enterpolasyon değerleri

Saat yönünde (cw)

N.m	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
0	0,000000	0,013466	0,026932	0,040399	0,053865	0,067332	0,080799	0,094266	0,107733	0,121201
2	0,134668	0,148136	0,161604	0,175072	0,188541	0,202009	0,215478	0,228946	0,242415	0,255884
4	0,269354	0,282823	0,296293	0,309762	0,323232	0,336702	0,350172	0,363642	0,377113	0,390583
6	0,404054	0,417525	0,430996	0,444467	0,457938	0,471409	0,484880	0,498352	0,511824	0,525295
8	0,538767	0,552239	0,565711	0,579183	0,592656	0,606128	0,619600	0,633073	0,646546	0,660018
10	0,673491	0,686964	0,700437	0,713910	0,727384	0,740857	0,754330	0,767804	0,781277	0,794751
12	0,808225	0,821698	0,835172	0,848646	0,862120	0,875594	0,889068	0,902542	0,916016	0,929491
14	0,942965	0,956439	0,969914	0,983388	0,996863	1,010337	1,023812	1,037286	1,050761	1,064236
16	1,077710	1,091185	1,104660	1,118135	1,131609	1,145084	1,158559	1,172034	1,185509	1,198984
18	1,212459	1,225934	1,239409	1,252884	1,266359	1,279834	1,293309	1,306784	1,320259	1,333734
20	1,347209									*mV/V*

Saat yönünün tersinde (ccw)

N.m	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1	-1,2	-1,4	-1,6	-1,8
0	0,000000	-0,013466	-0,026932	-0,040399	-0,053865	-0,067332	-0,080799	-0,094266	-0,107721	-0,121201
-2	-0,134668	-0,148137	-0,161604	-0,175072	-0,188541	-0,202009	-0,215478	-0,228946	-0,242354	-0,255884
-4	-0,269354	-0,282826	-0,296293	-0,309762	-0,323232	-0,336702	-0,350172	-0,363642	-0,376965	-0,390583
-6	-0,404054	-0,417534	-0,430996	-0,444467	-0,457938	-0,471409	-0,484880	-0,498352	-0,511551	-0,525295
-8	-0,538767	-0,552262	-0,565711	-0,579183	-0,592656	-0,606128	-0,619600	-0,633073	-0,646111	-0,660018
-10	-0,673491	-0,687008	-0,700437	-0,713910	-0,727384	-0,740857	-0,754330	-0,767804	-0,780643	-0,794751
-12	-0,808225	-0,821773	-0,835172	-0,848646	-0,862120	-0,875594	-0,889068	-0,902542	-0,915144	-0,929491
-14	-0,942965	-0,956556	-0,969914	-0,983388	-0,996863	-1,010337	-1,023812	-1,037286	-1,049614	-1,064236
-16	-1,077710	-1,091359	-1,104660	-1,118135	-1,131610	-1,145084	-1,158559	-1,172034	-1,184049	-1,198984
-18	-1,212459	-1,226180	-1,239409	-1,252884	-1,266359	-1,279834	-1,293309	-1,306784	-1,318448	-1,333734
-20	-1,347209									*mV/V*

Kübik enterpolasyon denklemi yardımıyla, ara değerlerin hesaplandığı tablo

Kalibrasyon Sertifikasında Kullanılan Tanımlar ve Açıklamaları

M_k	:	Kalibrasyonun yapıldığı tork adımları
Y (M_k)	:	Artan seriler için sıfır düzeltmesi yapılmış ortalama değer
Y_h (M_k)	:	Artan ve azalan seriler için sıfır düzeltmesi yapılmış ortalama değer
Durum I-B	:	Enterpolasyon hatasının dahil edildiği, histerisiz ve gösterge hatasının dahil edilmediği durum
Durum II-A	:	Histerisiz ve enterpolasyon hatasının dahil edildiği, gösterge hatasının dahil edilmediği durum
Durum II-B	:	Histerisiz ve gösterge hatasının dahil edildiği, enterpolasyon hatasının dahil edilmediği durum
b (M_k)	:	Artan serilerde sıfır düzeltmesi yapılmış farklı montaj pozisyonları için tekrarlanabilirlik hatası
b' (M_k)	:	Artan serilerde sıfır düzeltmesi yapılmış aynı montaj pozisyonu için tekrarlanabilirlik hatası
f_x (M_k)	:	Kalibrasyon adımları ve bunlara karşılık gelen ölçüm sonuçlarına göre birinci (Durum I: Sınıf 1 - 5 hariç) veya üçüncü dereceden (Durum I veya II: Sınıf 1 - 5) denklem oluşturularak hesaplanan enterpolasyon hatası
f_q (M_k)	:	Göstergesinde herhangi bir tork biriminin okunabildiği cihazlar için gösterge hatası
f_0	:	Serilerin başlangıç ve bitişlerinde ölçülen sıfır değerleri için hesaplanan maksimum sıfır hatası
h (M_k)	:	Her bir seri için referans değerlerde okunan artan ve azalan ölçümlerdeki histerisiz hatası
r	:	Gösterge cihazının çözünürlüğü
W_{KE} (M_k)	:	Kalibrasyonda kullanılan referans cihazın genişletilmiş ölçüm belirsizliği
W (M_k)	:	Genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği
W' (M_k)	:	Genişletilmiş bağıl ölçüm belirsizliği aralığı
X_{ai}	:	Kalibrasyonu yapılan test cihazının gerçek gösterge değeri (mV/V)
X_i	:	Kalibrasyonu yapılan test cihazından okunan gösterge değeri (mV/V)
M_{ai}	:	Kalibrasyonu yapılan test cihazının gerçek gösterge değeri (Tork birimi)
M_i	:	Kalibrasyonu yapılan test cihazının okunan gösterge değeri (Tork birimi)

Kalibrasyon seritifkasın içerisinde kullanılan tanımlar, kısaltmalar ve açıklamaları

EK-D

D.1 TKM II Kontrol Programı ve Yazılımı

Bu bölümde ölçümlerin yapıldığı TKM-II tork kalibrasyon makinesinin kontrolünü sağlamak için tasarlanmış olan TKM-II kontrol programının özellikleri ve kullanımı kısaca açıklanmıştır.

D.1.1 Program hakkında

TKM-II kontrol programı, kütle asma prensibine göre çalışan 50 N·m kapasiteli TKM-II tork kalibrasyon makinesini kullanarak kalibrasyon adımlarını gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Programda kalibrasyon işlemleri sırasında kullanılacak veri alma, tork uygulama ve ayar komutları mevcuttur. Testi gerçekleştiren kişi, bu komutları kullanarak kalibrasyonu adım adım kendi yapabileceği gibi, bu komutları kullanarak oluşturduğu kalibrasyon programlarını (makrolar) çalıştırarak otomatik kalibrasyon da yapabilir. Kalibrasyon işlemi sonunda alınan datalar tablo formunda Excel dosyası olarak kaydedilebileceği gibi, yapılan kalibrasyonlara ait bilgileri saklamak üzere oluşturulmuş olan kalibrasyon arşivinde de saklanabilmektedir.

D.1.2 Programın Yapısı

TKM-II kontrol programı dört temel kısımdan oluşmaktadır.

1. TKM-II Ölçüm Ekranı: Bu ekran kalibrasyon işlemi ile ilgili her türlü adımın gerçekleştirildiği kısımdır.
2. Kayıt İnceleme: Yapılmış olan kalibrasyonlara ait bilgilere bu kısımdan ulaşılır.
3. Makro Editör: Otomatik kalibrasyonda kullanılmak üzere, data alma, tork uygulama gibi adımlar kullanılarak kalibrasyon işleminin bir kalibrasyon dosyası formatında tanımlanmasına olanak verir.
4. Veri Tabanı: Kalibrasyonda kullanılacak ekipmanlara (gösterge cihazları, dönüştürücüler) ait bilgi kayıtlarına buradan ulaşılır.

D.1.3 Ekipmanlar ve Ölçüm Kanalları Bilgileri

Kullanıcı, kalibrasyonda kullanacağı ekipmanları seçtikten ve ilgili ayarları yaptıktan sonra veri almaya başlayabilir. Eğer seçilen ekipmanlardan otomatik veri alınacak ise bu cihazlarla önce bağlantı kurmak gerekir. Cihazla ilgili haberleşme parametreleri doğru ve fiziksel bağlantı var ise ölçüme başlanabilir. Gösterge cihazına ait ölçüm kanallarının en az birinin veri alma şekli otomatik olarak tanımlı ise, cihazla bağlantı kurulması gereklidir (Şekil D.1.). Tüm kanallardan elle giriş şeklinde veri alınacak ise cihazla bağlantı kurmaya gerek yoktur.



Şekil D.1. Test gösterge cihazı ve sıcaklık-nem ölçer için bağlantı ekranı

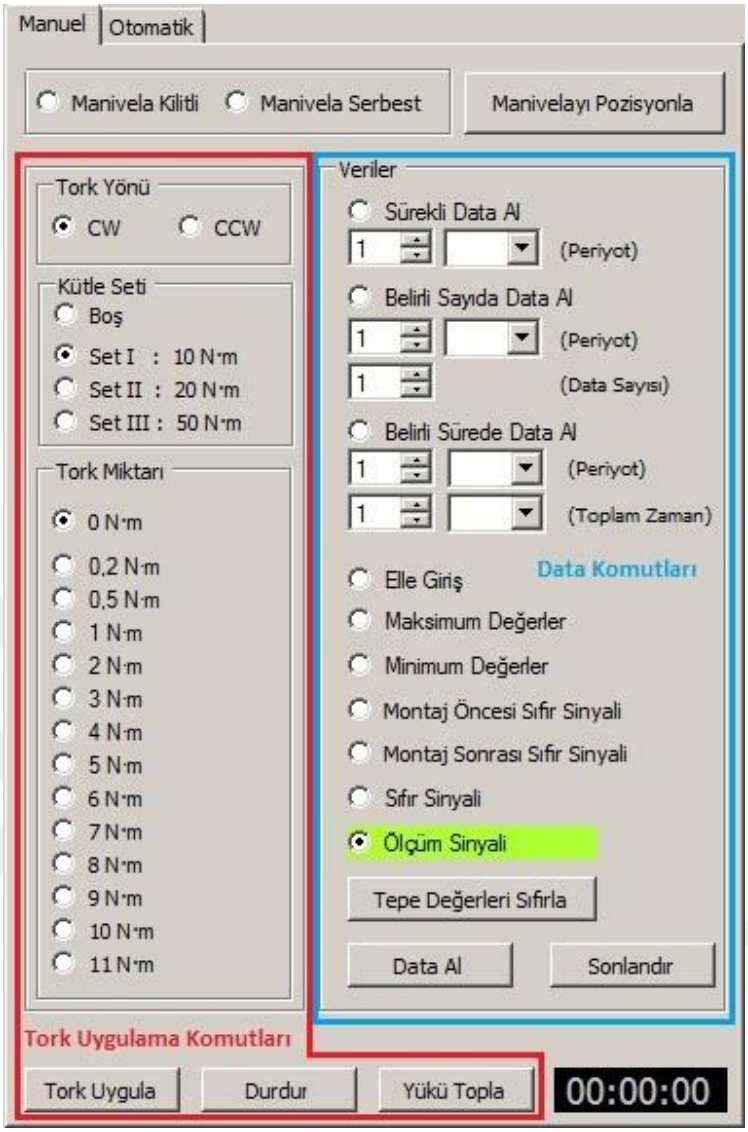
Test gösterge cihazının daha önceden tanımlanmış olması durumunda bağlantı sonrası bir takım bilgiler cihazdan sorgulanıp kullanıcıya gösterilir. Bunlar filtre bilgileri ve tork kanalının ölçüm sinyaline ait maksimum-minimum değerleridir. Filtre ayarları cihazın ölçüm hızını etkilediği için kullanıcı ölçüm sırasında bu ayarlara ihtiyaç duyabilir. Kullanıcı bu ekranı kullanarak otomatik kalibrasyonu açıp kapatabilir.

Test gösterge cihazının tork kanalına ait maksimum-minimum elektriksel ve fiziksel sinyaller anlık ve toplam olarak kullanıcıya gösterilir. Anlık maksimum-minimum değerleri "tepe değerlerini sıfırla" komutu kullanılarak o anki ölçüm değerine çekilebilir ancak toplam maksimum-minimum değerleri bu işlemden etkilenmez, böylece ölçüm boyunca ulaşılan maksimum-minimum değerler görüntülenebilir (Şekil D.2.).



Şekil D.2. Test gösterge cihazının tork kanalına ait maksimum-minimum sinyaller

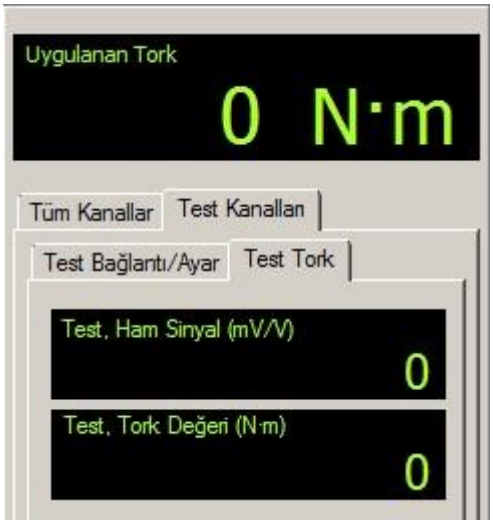
Ekipmanlarla bağlantı sağlandıktan sonra ölçüme başla butonu ile veri almaya başlanır. Ölçüme başla butonuna basıldığında kalibrasyonda kullanılacak olan otomatik veri alınacak ekipmanlardan, kontrol panosu üzerindeki ortam şartları sensörlerinden (sıcaklık, nem, hat basıncı) ve laser mesafe ölçerlerden ölçüm verileri okunmaya başlar. Alınan tüm ölçüm verileri ölçüm ekranındaki tüm kanallar sekmesinde görüntülenir. Ölçüm ekranı üzerindeki tork uygulama ve data alma komutları aktif hale gelir (Şekil D.3.).



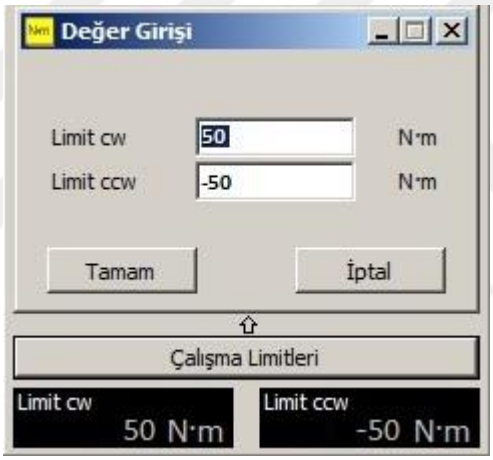
Şekil D.3. Tork uygulama ve data alma komutları

Ayrıca uygulanan tork değeri ve tork kanalı üzerinde oluşan tork değerleri ilgili göstergelerle kullanıcıya sunulur.

Herhangi bir tork uygulama işlemi yapmadan önce sistemin limit değerleri ayarlanmalıdır. Program saat yönü ve saat yönünün tersinde uygulanacak tork sınır değerleri için başlangıç değeri olarak sıfır atar. Kullanıcının sisteme bağladığı tork dönüştürücüsünün kapasitesine göre bu sınır değerlerini girmesi beklenmektedir. Bu şekilde küçük kapasiteli tork dönüştürücülerine fazla tork uygulanarak dönüştürücünün zarar görmesinin önüne geçilmiş olur. Şekil D.4. ve Şekil D.5.'te bu sınır değerlerin programa nasıl girildiğini göstermektedir.



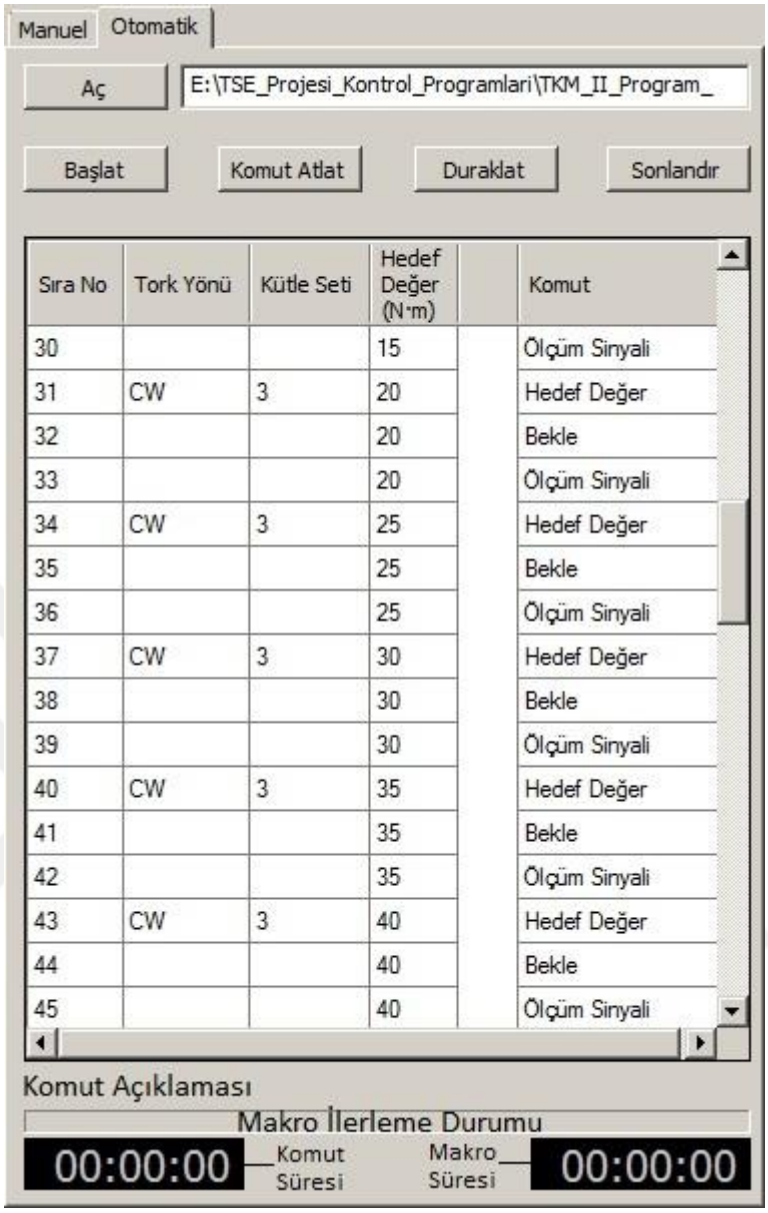
Şekil D.4. Uygulanan tork değeri ve tork kanalından okunan tork sinyalleri



Şekil D.5. TKM-II kontrol programı tork sınır değerlerinin programa girilmesi

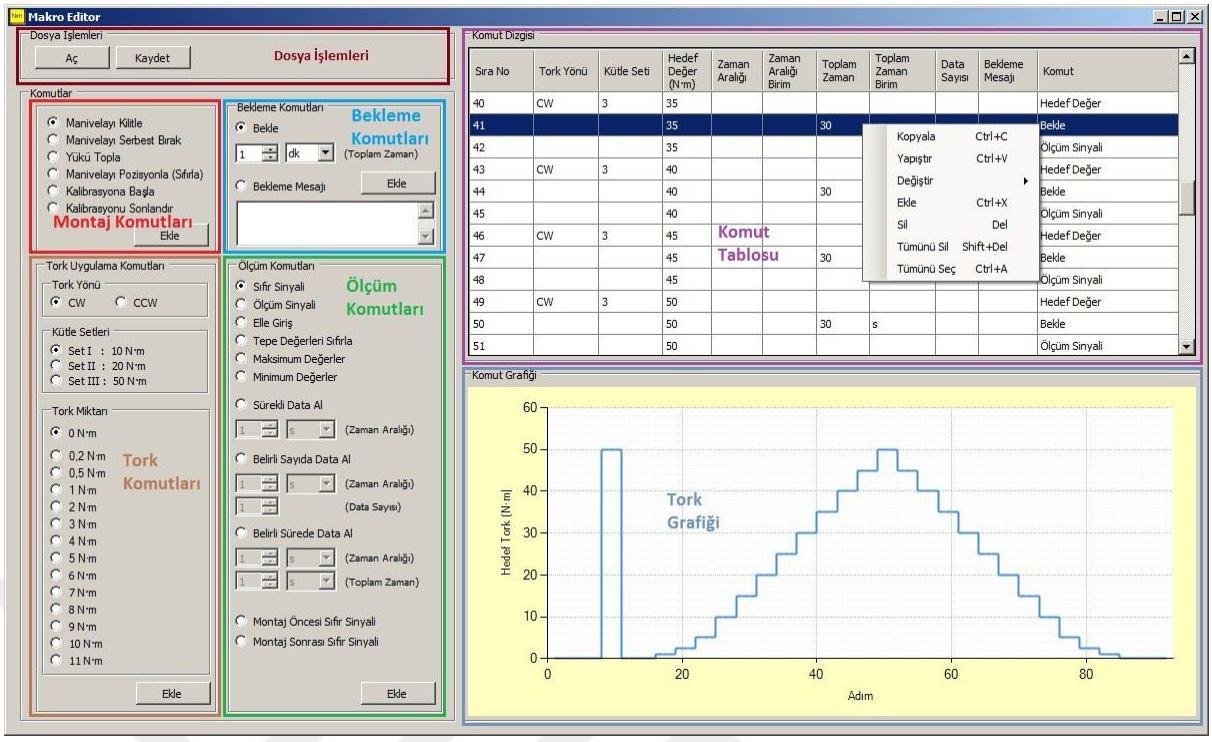
D.1.4 Otomatik Kalibrasyon

Daha önce bahsedilen tork uygulama ve ölçüm verisi alma komutları kullanılarak makrolar oluşturulabilir. Bu makrolar çalıştırıldığında komutlar adım adım yerine getirilir. Makro ekranı Şekil D.6.'da görülmektedir.



Şekil D.6. Makro ekranı

Makro Editöre ait genel bir görüntü Şekil D.7.'de verilmiştir.

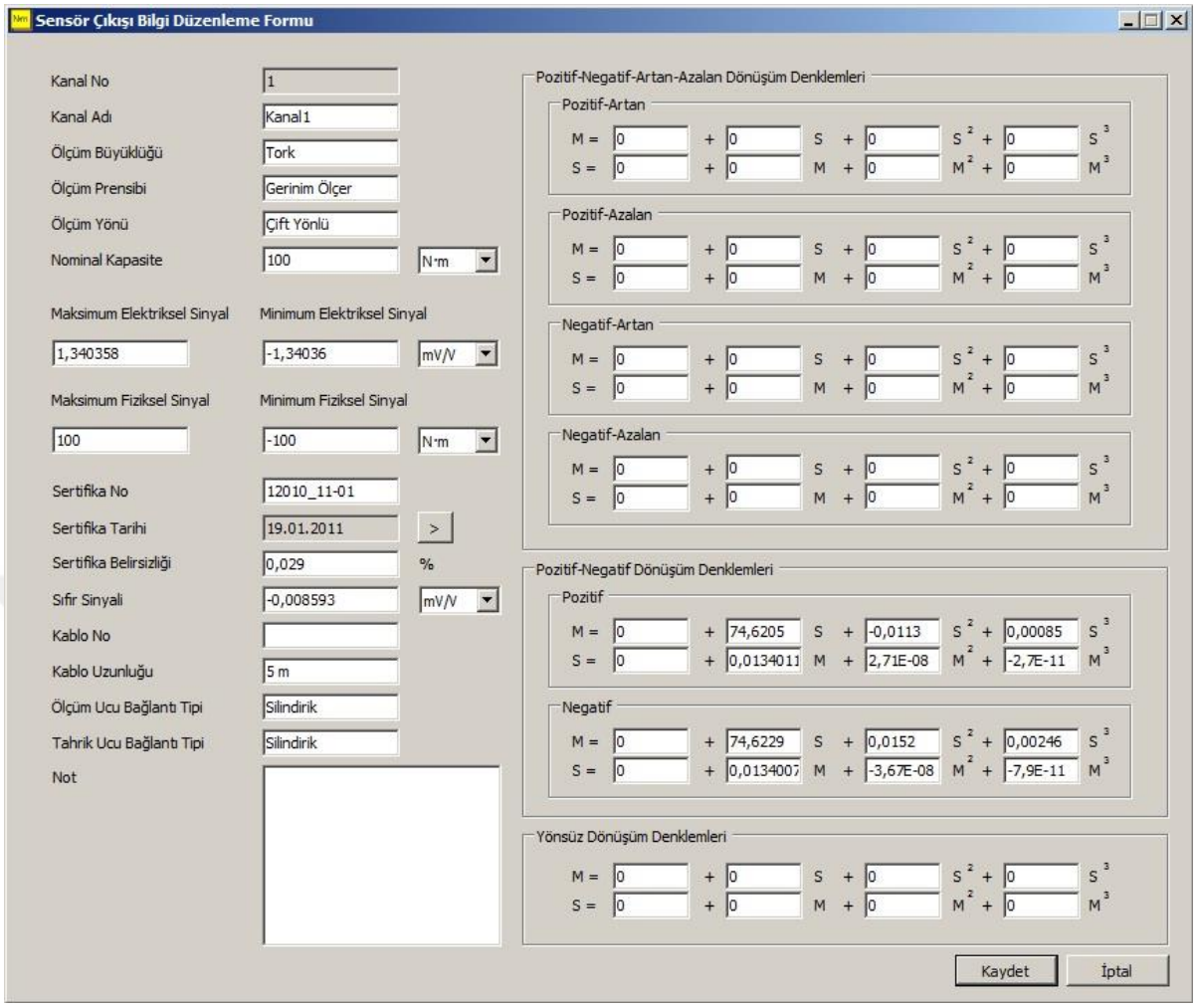


Şekil D.7. Makro Editör

D.1.5 Veri Tabanı

TKM-II kontrol programı, kullanılan ekipmanlara ait bilgileri saklamak ve kalibrasyon sonrası oluşan verileri kaydetmek amacıyla bir veri tabanı kullanır. Veri tabanında kullanılan tork sensörleri, tork gösterge cihazları ve müşterilere ait bilgiler görüntülenebilir, değiştirilebilir ya da silinebilir.

Genellikle yapı olarak tork dönüştürücüleri ve gösterge cihazları birden fazla ölçüm kanalı içerirler ve bu kanalların kendilerine ait farklı bilgileri olabilir. Bu sebeple dönüştürücü ve gösterge cihazlarına ilişkin bilgileri düzenleme formlarında, bu cihazlara ait ölçüm kanallarının bilgilerine ulaşabilmek için ayrı bir menü kullanılmaktadır. Şekil D.8.'de gösterilen bu menü ile cihaza ait kanallar listelenir ve kullanıcıya her kanalla ilişkili olarak işlem yapma imkânı sunulur.



Şekil D.8. Bir tork sensörü kanalına ait bilgiler

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Tuğcu, M. B.**, Feyzullahoğlu, E., Tork Dönüştürücü Kalibrasyonunda Sıcaklık Değişiminin Ölçüm Sonuçları Üzerindeki Etkisi, *8. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Çankaya Üniversitesi, Ankara, 14-15 Mayıs 2015.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Türk Standardları Enstitüsü Gebze Kalibrasyon Müdürlüğü'nde çalışmaya başladı. 2014 yılından bu yana bu müdürlüğe bağlı tork, mekanik ve kuvvet laboratuvarlarında laboratuvar sorumlusu olarak görev yapmaktadır.