

67080

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

100 kN KAPASİTELİ, BASMA TİPİ, GERİNİM ÖLÇERLİ

KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Hakan Özgür ÖZBAY

Ana Bilim Dalı : MAKİNA

Programı : KONSTRÜKSİYON

ŞUBAT 1997

100 kN KAPASİTELİ, BASMA TİPİ, GERİNİM ÖLÇERLİ
KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ TASARIMI


YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Hakan Özgür ÖZBAY

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Ocak 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Şubat 1997

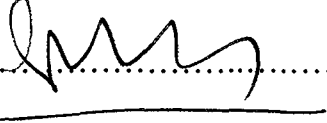
Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr.Kenan URAL

()

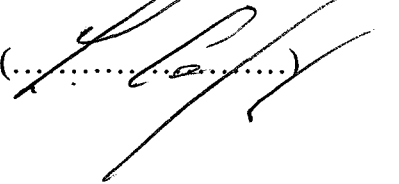
Üye

Prof.Dr.Kutsal TÜLBENTÇİ

()

Üye

Prof.Dr.Levon ÇAPAN

()

ŞUBAT 1997

100 kN KAPASİTELİ BASMA TİPİ GERİNİM ÖLÇERLİ KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ TASARIMI

Hakan Özgür ÖZBAY

Anahtar Kelimeler : Kuvvet Dönüştürücüsü, Kuvvet Transduseri, Dinamometre, Kuvvet Standardı Makinası, Ölü Ağırlık, Wheatstone Köprüsü, Gerinim Ölçer

Özet : Bu çalışmada, kuvvet dönüştürücüsü tasarımı için teorik bir yaklaşımda bulunulmuştur. Hassas kuvvet ölçümleri ve kalibrasyonu için gerekli koşullara dair açıklamalar yapıldıktan sonra kuvvet ölçüm cihazları ve kuvvet oluşturan sistemler incelenmiştir. Ardından gerinim ölçerler ve Wheatstone köprüsünün teorisi açıklanarak; yüklemeyi algılayacak olan yay elemanının, yükleme koşullarına göre genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. İyi bir kuvvet dönüştürücüsü performansı elde edebilmek için Wheatstone köprüsünde yapılması gereken düzeltmelerin açıklanmasından önce, bir kuvvet dönüştürücüsünde kullanılacak gerinim ölçerlerin seçiminde göz önünde bulundurulacak kriterler değerlendirilmiştir. Son safha olarak, toplanan tüm bu bilgiler ışığında basmaya çalışan basit bir kuvvet dönüştürücüsünün tasarım aşamaları, 100 kN kapasite örneği üzerinde verilmiştir.

DESIGN OF A COMPRESSION TYPE STRAIN GAGE FORCE TRANSDUCER WITH A CAPACITY OF 100 kN

Hakan Özgür ÖZBAY

Key Words : Force Transducer, Load Cell, Dynamometer, Force Standard Machine, Dead Weight, Wheatstone Bridge, Strain Gage

Abstract : In this study, a theoretical approach to the design of a force transducer is applied. After analyzing essentials of a precise force measurement and of a calibration, a quick review of devices for force measuring and exact force realization is made. Then, theory of strain gages and of required circuitry are discussed. After that, spring element to be used as response device against loading was analyzed, in general, with respect to type of loading. Before outlining circuit refinement procedure of Wheatstone bridge for a well performance of transducer, strain gage selection criteria for a transducer application is generalized. At the last step, a conceptual approach to a simple force transducer design is given on the example of a compression type force transducer having a capacity of 100 kN.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Gerinim ölçerli kuvvet dönüştürücüleri, günümüz endüstriyel uygulamalarında yaygın olarak kullanılan kuvvet ve yük ölçme sensörleridir. Kullanıldıkları alanlara göre yük hücresi, kuvvet transdüseri, kuvvet dönüştürücüsü, dinamometre, yük reseptörü gibi farklı isimler almaktadır. Küçük terazilerden kantarlara kadar uzanan yük ölçümlerinde ve çok hassas sonuçların beklendiği metrolojik çalışmalarda yoğunlukla kullanılırlar. Bu tür dönüştürücüler, kapasitelerine bağlı olarak bir takım konstrüktif özellikleri değişen; ancak, değişmez prensip olarak kuvvet ölçüm büyüklüğünü, ölçülebilir bir başka büyüklük olan elektriksel dirence dönüştüren ölçme elemanlarıdır.

TÜBİTAK-UME, Ulusal kuvvet standardı ve kuvvet ölçüm laboratuvarının kısa dönemli projeleri arasında uluslararası metrolojik çalışmalarda transfer standardı olarak kullanılacak çok yüksek doğruluklu kuvvet dönüştürücülerinin geliştirilmesi ve üretilmesi yer almaktadır. Bu yüksek lisans çalışması kapsamında, gerinim ölçerli bir dönüştürücü imalatı ve performans değerlendirmesi için gerekli bilgi birikiminin oluşturulmasına çalışılmıştır. Bu aşamada elde edilen teorik birikim uygulamaya dönüştürülerek; seramik bazlı yay elemanlarının kullanıldığı kuvvet dönüştürücüleri üzerinde çalışmalara devam edilecektir.

Bu çalışmamda değerli yardımlarını gördüğüm danışmanım Makina Mühendisliği Bölüm Başkan Yardımcısı Yrd.Doç.Dr.Kenan URAL'a (KO.Ü.M.F.), Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. İbrahim UZMAN'a (KO.Ü.M.F.), bana bu konuda çalışma olanağı veren TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü Müdürü Doç.Dr.Hüseyin UĞUR'a, Ulusal Kuvvet Standardı ve Kuvvet Ölçüm Laboratuvarı Sorumlusu Yük.Müh.Sinan FANK'a, dökümantasyon ve literatür taraması aşamasında yardımlarını gördüğüm Müh.Çetin DOĞAN'a (TÜBİTAK-UME), çalışmalarımın her aşamasında beni destekleyen Dr.Şakir BAYTAROĞLU'na (TAI) teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 1. KUVVET ÖLÇÜMÜ.....	4
1.1. Kuvvet Ölçümlerinin Kısa Tarihçesi	4
1.2. Kuvvet Ölçüm Birimleri.....	6
1.3. Kuvvet Biriminin Gerçekleştirilmesi	11
1.3.1. Genel	11
1.3.2. Ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinaları	13
1.3.3. Kuvvetin büyütüldüğü sistemler	15
1.3.3.1. Manivelalı tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinaları	15
1.3.3.2. Hidrolik tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinaları	18
1.3.4.Referans kuvvet ölçme cihazları yardımıyla kuvvet oluşturulması..	18
1.4. Konvansiyonel Kuvvet Ölçme Cihazları	20
1.4.1. Kuvvet ölçümünde kullanılan konvansiyonel yöntemler	20
1.4.2. Mekanik kuvvet ölçme cihazları	21
1.4.2.1. Martens aynalı kuvvet ölçme cihazları	21
1.4.2.2. Ölçme halkaları.....	23
1.4.2.3. Hidrolik kuvvet ölçme cihazı.....	27
1.4.3. Elektrik kuvvet ölçme cihazları.....	29
1.4.3.1. Gerinim ölçerli kuvvet ölçme cihazları.....	29
1.4.3.2. Kapasitif kuvvet ölçme cihazları.....	30
1.4.3.3. Magnetoelastik kuvvet ölçme cihazları.....	31
1.4.3.4. Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları	32
1.5. Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu	32
1.5.1.Kalibrasyon yöntemi.....	32
1.5.2. Kalibrasyon prosedürü	33
1.5.2.1. Ön yükleme	33
1.5.2.2. İşlem	35
1.5.2.3. Yükleme koşulları.....	35
1.5.2.4. Sehimin belirlenmesi	35
1.5.3. Kuvvet ölçme cihazının dğerlendirilmesi	35

1.5.3.1. Bağlı tekrarlanabilirlik hatası, b ve b'	35
1.5.3.2. Bağlı enterpolasyon hatası, f_c	36
1.5.3.3. Bağlı sıfır hatası, f_0	37
1.5.3.4. Bağlı tersinebilirlik hatası, u	37
1.5.4 Kuvvet ölçme cihazlarının sınıflandırılması	37
BÖLÜM 2. GERİNİM ÖLÇERLER VE WHEATSTONE KÖPRÜSÜNE TEORİK YAKLAŞIM	39
2.1. Gerinim Ölçerler ve Yapı Tarzları	39
2.2. Direnç Değişimi ile Birim şekil Değişimi Arasındaki İlişki	41
2.3. Ölçme Köprüleri ve k-Faktörü	44
2.4. Basit Gerinim Ölçer Köprüleri ve Ölçme Esasları	49
2.4.1. Çekme çubuğunda ölçümler	50
2.4.2. Eğilme çubuğunda ölçümler	54
2.4.3. Burulma çubuğunda ölçümler	56
2.5. Birden Fazla Gerilmenin Analiz ve Dengelendirilmesi	57
2.6. Kablo Hatalarının Arıtılması	60
2.6.1. Tam köprü devresinde kablo dirençleri	61
2.6.2. Yarım köprü devresinde kablo dirençleri	62
2.6.3. Çeyrek köprü devresinde kablo dirençleri	63
2.7. Çeşitli Bağlantı Olanaklarının Uygulama İçin Özetlenmesi	64
2.8. Wheatstone Köprüsünde Doğrusallıktan Sapma	68
2.8.1. Çeyrek köprüde doğrusallıktan sapma	68
2.8.2. Yarım köprüde doğrusallıktan sapma	71
2.8.3. Tam köprüde doğrusallıktan sapma	73
BÖLÜM 3. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ YAY ELEMANI TASARIM KRİTERLERİ	74
3.1. Yay Elemanı Tasarımında Temel Kriterler	74
3.2. Yay Elemanlarının Yükleme Türüne Göre Analizi	79
3.2.1. Eğilmeye çalışan yay elemanları	79
3.2.1.1. Basit ankastre giriş tipi yay elemanları	79
3.2.1.2. Çoklu eğilmeye çalışan yay elemanları	82
3.2.1.3. Ölçme halkaları	86
3.2.2. Kesmeye çalışan yay elemanları	88
3.2.3. Tek eksenli yüklemeye çalışan kolon tipi yay elemanları	93
3.3. Yay Elemanlarında Malzeme Analizi	98
3.3.1. Mekanik özellikler	99
3.3.2. Isıl özellikler	100
3.3.3. İmalat özellikleri	102
3.3.4. Yüksek ve düşük elastikiyet modüllü malzemelerin karşılaştırılması	103
3.3.5. Malzeme seçimi	105
BÖLÜM 4. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ İÇİN GERİNİM ÖLÇER SEÇİM KRİTERLERİ	109
4.1. Gerinim Ölçer Boyu	110

4.2. Gerinim Ölçer Izgara Geometrisi.....	111
4.2.1. Izgara genişliği.....	111
4.2.2. Çoklu ızgaralar.....	111
4.2.3. Lehim plakaları	113
4.3. Gerinim Ölçer Serisi	114
4.3.1. Gerinim ölçer ızgara taşıyıcısı	114
4.3.2. Izgara alaşımları	116
4.4. Gerinim Ölçer Izgara Direnci	118
4.5. Öz Sıcaklık Kompanzasyon (S-T-C) Sayısı	119
4.6. Diğer Özellikler	119
4.7. Gerinim Ölçer İçin Yapıştırıcı Seçimi	119
4.7.1. Cıyanoakrileyt yapıştırıcı	121
4.7.2. Epoksi yapıştırıcı.....	122
4.7.3. Yüksek performanslı yapıştırıcılar.....	123
BÖLÜM 5. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜNÜN ELEKTRİK DEVRESİNİN TAMAMLANMASI.....	124
5.1. Kablo Bağlantılarının Yapılması	124
5.2. Elektrik Devresinin Performansının İyileştirilmesi.....	125
5.2.1. Sıfır sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması	126
5.2.2. Sıfır sinyalinin başlangıç değeri.....	127
5.2.3. Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin sıcaklık ile kayması	127
5.2.4. Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin başlangıç değeri	128
5.3. İlave Dirençler ile Çıkış Sinyalinin Ayarlanması ve Kompanzasyon ..	128
5.4. Sıfır Sinyalinde Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu	131
5.5. Sıfır Sinyalinin Başlangıç Ayarının Yapılması	133
5.6. Maksimum Çıkış Sinyalindeki Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu	134
5.7. Maksimum Çıkış Sinyalinin Ayarlanması	137
5.8. Ortamdaki Zararlı Etkilerden Koruma	138
BÖLÜM 6. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜNÜN TASARIMI.....	143
6.1. Kapasite	143
6.2. Yükleme Modu.....	143
6.3. Dönüştürücünün Öngörülen Çalışma Sıcaklığı.....	143
6.4. Yay Elemanı Malzemesinin Seçilmesi.....	143
6.5. Yay elemanı Seçimi.....	144
6.6. Gerinim Ölçer Seçimi.....	144
6.7. Yapıştırıcı Seçimi.....	145
6.8. Dış Ortama Karşı Koruyucu Sistemi.....	146
6.9. Dönüştürücünün Toplam Boyutlarının tayini	146
6.10. Elektrik Devresinin Uygulanması ve Ayarlar	147
SONUÇLAR ve TARTIŞMA	148
KAYNAKLAR.....	149
ÖZGEÇMİŞ	152

SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR

\vec{a}	İvme vektörü
A	Kesit alanı
b	Dönümlü bağıl tekrarlanabilirlik hatası
b'	Dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası
B	Prizma genişliği,
c	Malzeme sabiti
d	Ölçme halkasının çapının yük yönündeki değişimi
E	Malzemenin elastiklik modülü
f_0	Bağıl sıfır hatası
f_c	Bağıl enterpolasyon hatası
F	Kuvvet
F_N	Ölçüm bölgesinin maksimum kapasitesi
F_f	Kuvvet dönüştürücülerinin maksimum kapasitesi
g	Yerçekimi ivmesi
\vec{G}	Ağırlık vektörü
h	Rakım
H	Bağıl atmosferik nem
i	Gösterge elemanının artan test kuvvetlerindeki gösterge değeri
i'	Gösterge elemanının azalan test kuvvetlerindeki gösterge değeri
i_0	Gösterge elemanın kuvvet uygulanmadan önceki gösterge değeri
i_f	Gösterge elemanın kuvvet uygulandıktan sonraki gösterge değeri
k	Gerinim ölçer k faktörü
K	Oran katsayısı
l	Kesit genişliği
L	Ayna yüzeyi ile cetvel arasındaki mesafe,
m	Kütle
n	Optik aktarım oranı,
p	Atmosferik basınç
P	Uygulanan yük
r	Gösterge elemanının çözünürlüğü

R	Elektriki direnç
r	Ölçme halkasının yarıçapı
t	Ölçme halkası kesitinin kalınlığı
T	Ortam sıcaklığı
u	Kuvvet ölçme cihazının bağıl tersinebilirlik hatası
U	Potansiyel farkı, elektriki gerilim
V	Hacim
X	Artan test kuvvetlerindeki seğim
X'	Azalan test kuvvetlerindeki seğim
\bar{X}_r	Dönümlü, seğimlerin ortalama değeri
\bar{X}_{wr}	Dönümsüz, seğimlerin ortalama değeri
X_{max}	Maksimum seğim
X_{min}	Minimum seğim
X_a	Seğimin hesaplanmış değeri
X_N	Maksimum kapasiteye karşılık gelen seğim
α	Dönüm açısı.
ϵ	Birim şekil değışimi, gerinim
ρ	Yoğunluk
λ	Özgül direnç
ϕ	Coğrafi enlem
σ^2	Varyans
$\Delta\alpha$	Cetvelde okunan değeri,
Δl	Prizma ile ölçüm raylarının elastik gövdeye temas etdiği nokta arasında elastik gövdenin uzunluk değışimi,

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. SI Birimler Ağacında Kuvvet Birimi Newton'un Yeri.....	7
Şekil 1.2. Türkiye'nin Ulusal Kuvvet Skalasında İzlenebilirlik.....	12
Şekil 1.3. 11 kN Kapasiteli Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası	13
Şekil 1.4. 110 kN/1.1 MN Kapasiteli Manivelalı Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası	16
Şekil 1.5. 100kN/1MN Kapasiteli Konvansiyonel Tip Eş Kollu Terazî ile Birleştirilmiş Manivelalı Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası	17
Şekil 1.6. 1Mp Kapasiteli Hidrolik Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası	19
Şekil 1.7. Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazı	21
Şekil 1.8. Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazının Ölçme Prensibi.....	22
Şekil 1.9. Komparatörlü Ölçme Halkası.....	25
Şekil 1.10. Spiral Mikroskoplu Ölçme Halkası.....	26
Şekil 1.11. Sarkaçlı Ölçme Halkası.....	27
Şekil 1.12. Hidrolik Ölçme Cihazı	28
Şekil 1.13. Gerinim Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları	29
Şekil 1.14. Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları.	30
Şekil 1.15. Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazları.	31
Şekil 1.16. Kuvvet Ölçme Cihazının Kalibrasyon Sürecindeki Konumları.....	34
Şekil 2.1. Bir Gerinim Ölçer Elemanının Yapısı	39
Şekil 2.2. Ölçüm Izgarası Metal Folye Olan Bir Gerinim Ölçer	40
Şekil 2.3. Örtü Folyesi Bulunmayan Bir Gerinim Ölçer	41
Şekil 2.4. Wheatstone Köprüsünde Renk ve Sayı Kodlaması	45

Şekil 2.5. Gerinim Ölçerlerden Oluşmuş Bir Köprüde İşaretleme	48
Şekil 2.6. Tam, Yarım ve Çeyrek Wheatstone Köprüleri.....	50
Şekil 2.7. Tam Köprü devresinde Gerinim Ölçer Dirençlerindeki Değişimin Çıkışa Etkisi	51
Şekil 2.8. Yarım Köprü devresinde Gerinim Ölçer Dirençlerindeki Değişimin Çıkışa Etkisi	52
Şekil 2.9. Çekme Çubuğunda Gerinim Ölçerlerin Konumu.....	53
Şekil 2.10. Eğilme Çubuğunda Gerinim Ölçerlerin Konumu.....	55
Şekil 2.11. Burulma Çubuğunda Gerinim Ölçerlerin Konumu	56
Şekil 2.12. Eğilmeye Yüklenmiş Çekme Çubuğu	57
Şekil 2.13. Grafikselleştirilmiş Gerilme Analizi.....	59
Şekil 2.14. Gerinim Ölçer Köprüleri ile Ölçme Cihazı İçindeki Dirençlerin Bağlantısı.....	61
Şekil 2.15. Çekme-Basma Gerilmelerinin Ölçülmesi.....	65
Şekil 2.16. Eğilme Gerilmelerinin Ölçülmesi	66
Şekil 2.17. Burulma Gerilmelerinin Ölçülmesi.....	67
Şekil 2.18. Çeyrek Köprüde Doğrusallık Hatası.....	69
Şekil 2.19. Yarım ve Tam Köprüde Doğrusallık Hatası.....	72
Şekil 3.1. Yay Elemanında Temel Yükleme Şekilleri.....	75
Şekil 3.2. Sabit Kesitli Basit Ankastre Kirişte Yükleme	80
Şekil 3.3. Kalınlığı Azaltılmış Basit Ankastre Kirişte Yükleme	81
Şekil 3.4. İçinde Silindirik Bir Delik Olan Basit Ankastre Kirişte Yükleme.....	81

Şekil 3.5. Kesiti Doğrusal Olarak Azalan Basit Ankastre Kirişte Yükleme	82
Şekil 3.6. İki Ucundan Sabitlenmiş Kirişte Moment ve Deformasyon Diyagramları ..	83
Şekil 3.7. Çift Kirişli Eğilme Yay Elemanı	83
Şekil 3.8. Çift Kirişli Eğilme Yay Elemanı	84
Şekil 3.9. Çift Kirişli Yay Elemanı	85
Şekil 3.10. Çift Kirişli Yay Elemanı	85
Şekil 3.11. Çift Kirişli Yay Eleman Örneği.....	85
Şekil 3.12. Çift Kirişli Yay Eleman Örneği.....	86
Şekil 3.13. Çember Tipi Yay Elemanı Örneği	86
Şekil 3.14. Perfore Lam Yay Eleman Örneği	86
Şekil 3.15. Halka Tipi Yay Elemanı.....	87
Şekil 3.16. Halka Tipi Yay Elemanı Örneği	87
Şekil 3.17. Halka Tipi Yay Elemanı Örneği	87
Şekil 3.18. Dürbün Tipi Yay Eleman Örneği.....	88
Şekil 3.19. Kesme Tipi Yay Eleman Örneği.....	89
Şekil 3.20 Kesme Tipi Yay Elemanında Gerilmeler	89
Şekil 3.21. Kesme Tipi Yay Elemanında Gerinim Ölçer Konumları	90
Şekil 3.22. Kesme Tipi Yay Elemanında Eğilme Momentinin Sıfırlanması	91
Şekil 3.23. Kesme Tipi Yay Elemanı Örneği	91
Şekil 3.24. Kesme Tipi Yay Elemanı Örneği	92

Şekil 3.25. Kesme Tipi Yay Elemanı Örneği.....	92
Şekil 3.26. Kolon Tipi Yay Elemanlarının Çalışma Prensibi.....	93
Şekil 3.27. Kolon Tipi Yay Elemanına Sahip Kuvvet Dönüştürücüsü Örneği	94
Şekil 3.28. Dört adet Kolon Tipi Yay Elemanı Olan Dönüştürücü.....	96
Şekil 3.29. Silindirik Delikli Kolon Tipi Yay Elemanı.....	96
Şekil 3.30. Küçük Ebatlı, Yüksek Kapasiteli Kolon Tipi Yay Elemanı.....	97
Şekil 3.31. Büyük Atalet Momentli Kolon Tipi Yay Elemanı	97
Şekil 4.1. Dürbün Tipi Yay Elemanında Gerinim Ölçer Uygulaması	110
Şekil 4.2. Dar ve Geniş Gerinim Ölçer Izgaraları	112
Şekil 4.3. Çoklu Izgaraların Eğilme Elemanı Üzerinde Uygulaması	112
Şekil 4.4. Çoklu Izgaraların Eğilme Elemanı Üzerinde Uygulama Örneği.....	113
Şekil 4.5. Çoklu Izgara Örnekleri	114
Şekil 5.1. Ayarlanabilir Tip Üç Ayrı Formda Yapıştırılabilir Direnç.....	129
Şekil 5.2. Sıfır Sinyalindeki Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu	132
Şekil 5.3. Sıfır Sinyalinin Başlangıçtaki Ayarı	133
Şekil 5.4. Maksimum Çıkış Sinyalindeki Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu	134
Şekil 5.5. Maksimum Çıkış Sinyalinin Sıcaklıkla Değişimini Sıcaklıkla Kompanzasyonu İçin Hesaplanmış Balko Direnci.....	137
Şekil 5.6. Maksimum Çıkış Sinyalinin Başlangıçtaki Ayarı	138

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Newton'un İkinci Kanununda Çeşitli Birimler İçin K-Sabiti	8
Tablo 1.2. Çeşitli Birim Sistemlerinde Temel Birimlerle Kuvvet Birimi Arasındaki İlişki	10
Tablo 1.3. Kuvvet Ölçme Cihazının Değerlendirilmesinde Kullanılan Semboller	36
Tablo 1.4. Kuvvet Ölçme Cihazının Sınıflandırılma Kriterleri	38
Tablo 3.1. Dönüştürücü Yay Elemanları İçin Malzeme Seçim Tablosu.....	106
Tablo 4.1. Bazı Malzemelerin Öz Sıcaklık Kompanzasyon Numaraları.....	120
Tablo 5.1. Çeşitli Malzemelerin Direnç Işıl Değişim Katsayıları	136
Tablo 6.1. Basma Tipi Kuvvet Dönüştürücülerinin Toplam Yüksekliği	147

GİRİŞ

Hemen hemen tüm teknolojik uygulamalarda, emniyetli çalışma şartlarını gerçekleştirebilmek ve uzun dönemde kararlı ve ekonomik tasarımlara sahip olabilmek için, sistem üzerine etkiyen tüm kuvvetlerin önceden belirlenmiş doğruluk sınırları içinde bilinmesi gerekmektedir. Statik ve dinamik olarak yüklenen makina ve yapı elemanlarının konstrüktif özellikleri her zaman teorik hesaplamalarla saptanamaz. Özellikleri bilinen elemanların değişen işletme koşulları altında nasıl yüklendikleri, özellikle etmenlerin kontrol edilemediği durumlarda, çoğu kez hesaplanamaz. Daha ekonomik yapıların oluşturulabilmesi ve makina etkinlik derecelerinin yükseltilebilmesi için, yüklenmenin doğru olarak ölçülmesi önde gelen koşullardandır. Aynı ölçüm konusu, yarı ve tam otomatik çalışan makinaların kontrol zincirinin oluşmasında büyük önem taşımaktadır.

Kontrol ve tartım teknolojilerinde, kuvvet ölçme cihazları her geçen gün daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Modern haddanelerde, merdane kuvvetlerinin kontrolü ve bu sistemlerin optimum işletilebilmeleri için, elektriki ölçüm yapan kuvvet ölçme cihazları monte edilmektedir. Yük hücreleri silolarda kullanılmakta; doldurma ve paketleme işlemlerini kontrol etmektedirler. Kimya sanayiinde ve diğer sanayi kollarında dikkatle kullanılan yük hücreleri vasıtasıyla; işçilik, malzeme ve zamanda dikkate değer tasarruf sağlanmakta; ürün kalitesi iyileştirilebilmektedir. Havacılık ve uzay sanayinin gelişmesinde kuvvet ölçümlerinde sağlanan gelişmelerin etkisi görülmektedir. Dört motorlu bir Jumbo Jet Uçağının toplam 1 MN'luk itme kuvvetine, Satürn V ay roketinin ise 30 MN'luk itme kuvvetine sahip olduğunun deneysel yollarla belirlenebilmesi bu konudaki gelişmelere verilebilecek örneklerdir. İmalatın çeşitli aşamalarında kullanılan makina ve teçhizatın korunması ve iş emniyeti açısından her türlü kaldırma ve taşıma makinalarında aşırı yüke karşı koruma da, bu konunun yaygınlığı açısından verilebilecek örneklerdir.

Malzemelerde oluşan mekanik gerilmenin saptanmasında, değişen fiziksel özelliklerden faydalanılmaktadır. Gerilme ile malzemenin şekil değiştirmesi, optik ve manyetik geçirgenliğinin farklılaşması, histerezis kayıplarının değişmesi, uygulamada önem kazanmış fiziksel özellik değişimleridir. Günümüzde, sağladığı üstünlükler nedeniyle, malzemenin mekanik gerilme ile şekil değiştirmesi esassından hareketle yapılan ölçümler büyük uygulama alanı bulmaktadır.

Genel bir yaklaşım ile dönüştürücü, bir enerji formunu bir başka forma çeviren cihaz olarak tanımlanabilir. Bu yaklaşımla kimyasal enerjiyi elektriksel enerjiye çeviren piller ve ısı enerjisini bir sıvı kolonunda yer değişimine çeviren sıradan bir cam termometre de birer dönüştürücüdür.

Dönüştürücüler farklı bir çok çalışma prensibine uygun olarak üretilebilmektedirler; elektrik direnç, indüktans, kapasitans, piezoelektrik, vs. Çok geniş bir aralıkta dinamik kuvvet ölçümünde kullanılan minyatür akselerometreler, boyutlarının küçük, ağırlığının hafif ve kendinden elektrik çıktısı üretebilmesi sebebi ile, genellikle piezoelektrik elemanlarla donatılmışlardır. Benzer şekilde, eğer şartlar gerektiriyor ise, kapasitif veya indüktif elemanlar da kullanılmaktadır. Buna karşın, yüzeye yapıştırılan elektrik direnç tipi gerinim ölçerler, uygun kullanım özellikleri nedeni ile dönüştürücü imalatı ve kullanımı alanında son 20 yıla ağırlığını koymuştur.

Gerinim ölçerli kuvvet dönüştürücüleri, mekanik enerji girdisini, girdi büyüklüğünü ölçmek ve/veya kontrol etmek için, ona karşılık gelen elektrik sinyallerine çeviren cihazlardır. Elektromekanik dönüştürücülerin bu tipleri genellikle kuvvet veya enerjinin uygulandığı kaynak noktaya yerleştirilirler ve ölçüm büyüklüğündeki değişimlere reaksiyon gösterirler. Gösterge veya kontrol cihazı dönüştürücüdenden ayrı uygun bir yere yerleştirilerek dönüştürücü ile kablo bağlantısı yapılır.

Elektrik dirençli gerinim ölçerli dönüştürücülerin gerçek kökeni (aynı şekilde elektrik dirençli gerinim ölçerlerinde) tarih içinde kaybolmuştur. 1800'lü yıllarda Lord Kelvin elektrik tellerinde mekanik birim şekil değişiminden dolayı tellerde direnç değişimi olduğunu makalelerinde belirtmiştir. 1908 yılında Almanya Charltonburg'dan Dr.St.Lindeck ilk gerinim ölçerli basınç dönüştürücüsünün nasıl olabileceğine dair

önerilerde bulunmuştur. O zamanlar, ince cidarlı bronz tüp üzerine sarılmış ince manganin tellerden yapılmış hassas dirençler ile çalışmaktaydı. Burada ele alınmış olan konstrüksiyon yöntemi, tellerin vernikle kaplandıktan sonra tüp yüzeyine yapışmaları için fırınlanmasından ibarettir. Bu tip dirençlerin kararlılığını etkileyen faktörlerin incelenmesi sırasında St. Lindeck tüpün uçlarını kapattıktan sonra, iç basıncı yaklaşık 5.5 MPa'a yükseltmiş, ve bobin direncinin basınçla doğru orantılı olarak değiştiğini gözlemiştir.

E.E.Simmons ve A.C. Ruge genellikle elektrik dirençli gerinim ölçerlerin ikinci mucitleri olarak kabul edilirler. Özellikle Ruge bu tip gerinim ölçerlerin uygulamada kullanılabilen bir çok farklı şeklini geliştirmiş ve bunları kullanarak dönüştürücüler imal etmiş ilk kişidir. Yüzeye yapıştırılmadan kullanılan gerinim ölçerler, bu tip gerinim ölçerlerin geliştirilmesinden önce de, sonra da biliniyor ve kullanılıyordu. Ancak bunlar daha az problemsiz ve daha az doğruluklu ölçümler yapabilmekteydiler.

1950'li yıllarda metalik plaka gerinim ölçerlerin geliştirilmesiyle, dönüştürücülerin sürünme özellikleri geliştirilmiş; karmaşık geometriye sahip dönüştürücülere uygulanabilecek çeşitli formları sayesinde dönüştürücü tasarımında büyük gelişmeler kaydedilmiştir.

Bugün gerinim ölçer imalatında elde edilen gelişmeler ve yay elemanı olarak kullanılacak yeni alaşımların geliştirilmesiyle beraber, bilgisayar teknolojisinin gerek teorik hesaplamalarda, gerekse imalat teknolojilerinde yer almasıyla çok daha yüksek doğruluklu, çok daha küçük ebatlı ve çok daha düşük maliyetli kuvvet dönüştürücüleri mümkün olan hemen her türlü konstrüksiyona uygun olarak tasarlanmakta ve üretilmektedir.

BÖLÜM 1 KUVVET ÖLÇÜMÜ

1.1. Kuvvet Ölçümlerinin Kısa Tarihçesi

Kuvvet konusunun kapsamı, çeşitli fiziksel büyüklük kavramları ile ilgili analogide ölçüm yöntemlerinin gelişimi ve ölçüm doğruluğundaki artış ile beraber gelişmiştir. Bununla beraber, hem günlük yaşantımızda hem de teorik araştırmalarda sık kullanılan bir büyüklük olan kuvvetin teorik (Jammer, 1957) ve uygulamalı (Timoshenko, 1953) alandaki tarihçesi, değerlendirilmeleri münferiden yapıldığında daha rahat anlaşılacaktır. Çünkü bu iki uygulama, kuvvet çalışmalarının statik ve dinamik olarak adlandırılan iki ayrı formunu büyük oranda etkilemiştir.

Bu iki alan, ölçmeye bakış açılarından da kolayca ayrılabilir. Denge durumunun uygulandığı statikte, çeşitli kuvvet formları (ağırlık, elastik, manyetik, elektrostatik) karşılıklı olarak mukayese edilmekte ve bunlardan bir tanesi, diğerlerini ölçmek üzere referans olarak seçilmektedir. Kuvvet etkilerinin cismin hareket koşullarında kendisini açıkça gösterdiği dinamikte ise kuvvet, kütle, uzunluk ve zaman büyüklükleri cinsinden ölçülmek durumundadır.

Tarihi açıdan, statik kavramın ilk olarak gelişme gösterdiği veya yüzyıllar içinde daha kolay aktarılabilmiş olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni ise tarih boyunca dinamiktekinden daha çok pratik uygulamalarının olmasındandır.

Kuvvet ve ona bağlı olarak kuvvetin oluşturduğu moment bilgisi, İ.Ö. 2 Milyonuncu yıllara kadar uzanmaktadır. Bu yüzyıllarda kuvvet ve moment kavramlarını kullanan cihazlar olarak manivela ve teraziler kullanılmaktaydı. Daha sonraki yüzyıllarda kuvvet ve moment, bileşenlerine ayrılabilmesi ve tekrar toplanabilmesine olanak veren vektörel notasyon olarak ifade edilmişlerdir. Ancak, vektör kavramının Mısır, Grek ve Roman uygarlıklarında da kullanıldığı bilinmektedir.

Uygulamadaki temel sorun, yapının gerilim altındaki elemanının zarar görmeden dayanacağı ya da kırılacağı veya bir başka ifade ile test edilen eleman içerisindeki kuvvet dağılımının ve malzemenin dayanabileceği gerilim miktarının belirlenmesine dayanmaktadır. Antik uygarlıklardaki binalar incelendiğinde bu problemin pratik çözümlerinin bulunduğu, ancak yazılı kaynakların günümüze ulaşmadığı anlaşılmaktadır. Malzeme mukavemeti üzerine yapılan yeni çalışmalarla ilgili olarak Leonardo da Vinci'ye ait olanlardan daha öncesine giden yazılı bir kaynak yoktur. Bu konudaki deneysel çalışmalar Galileo (1638) ve Mariotte'nin (1740) çalışmalarında da yer almaktadır. Ancak bu çalışmaların büyük çoğunluğunda, malzeme ve uygulanan kuvvet değişkenlerinin iyi tanımlanamamasından dolayı, tüm bu etkilerin göstergesi olarak sadece malzemenin kopma noktası alınmıştır.

Bugün artık çok iyi bilindiği gibi, kopma kanunları, çeşitli malzeme tiplerine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir ve hepsi uygulanan mekanik gerilime aynı şekilde bağlı değildir. Yapıların içindeki kuvvet dağılımı, 17. yy.'da Hooke tarafından formüle edilmiş olan malzemelerin elastik davranımları kanunu ile geometrik-analitik yolla incelenebilmektedir. Malzemelerin dayanımları ile ilgili çalışmalar, kopma noktasının araştırılması aşamasından, Hooke kanunu ile doğruluğu belirlenebilecek olan elastik bölgenin belirlenmesi aşamasına ulaşmıştır.

Büyük ölçüde 19. yy.'da geliştirilmiş olan elastisite teorisinin, mekanik gerilim analizi için uygulanan deneysel teknikler aracılığı ile (Fotoelastisite veya Gerilim Ölçer-Strain Gauge Tekniği) doğruluğu bugün kontrol edilebilmektedir. Bu deneysel teknikler, elastisite teorisinin analitik yöntemlerinin sadece basit şekilli; düzgün parça ve yapılara uygulanabilmesi nedeniyle, bir kaç yıl öncesine kadar karmaşık yapıların gerilim analizindeki yegane olanak olarak gözükmekteydi. Oysa günümüzde bilgisayarların çok yüksek hesap yapabilme kabiliyetleri, Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Elements Method-FEM) kullanımını mümkün kılmıştır. Sonlu Eleman Analizinde herhangi bir yapı, denge ve birbirlerine uyum koşullarını sağlayan çok küçük elemanlara ayrılmakta ve sınır koşulları tanımlanmaktadır. Bu yolla karmaşık yapıların gerilim ve deformasyon durumları hesaplanmakta ve yapı içinde gerilime yol açan "kuvvet akımı" bu sayısal yöntemlerle hesaplanabilmektedir [6].

1.2. Kuvvet Ölçüm Birimleri

Mekaniğin temel büyüklüğü olan kuvvet, türetilmiş vektörel bir ölçüm büyüklüğüdür. Newton'un ikinci kanununa göre kuvvet, bir cismin kütlesi [m] ile o cisme etkiyen kuvvetin yarattığı ivmenin [\vec{a}] çarpımı olarak (1.1) no'lu formül ile ifade edilmektedir.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1.1)$$

Burada, kütle'nin skalar, ivmenin vektörel birer büyüklük oldukları unutulmamalıdır.

Kuvvet vektörünün büyüklüğü ise (1.2) no'lu formül ile ifade edilir.

$$|\vec{F}| = m \cdot |\vec{a}| \quad (1.2)$$

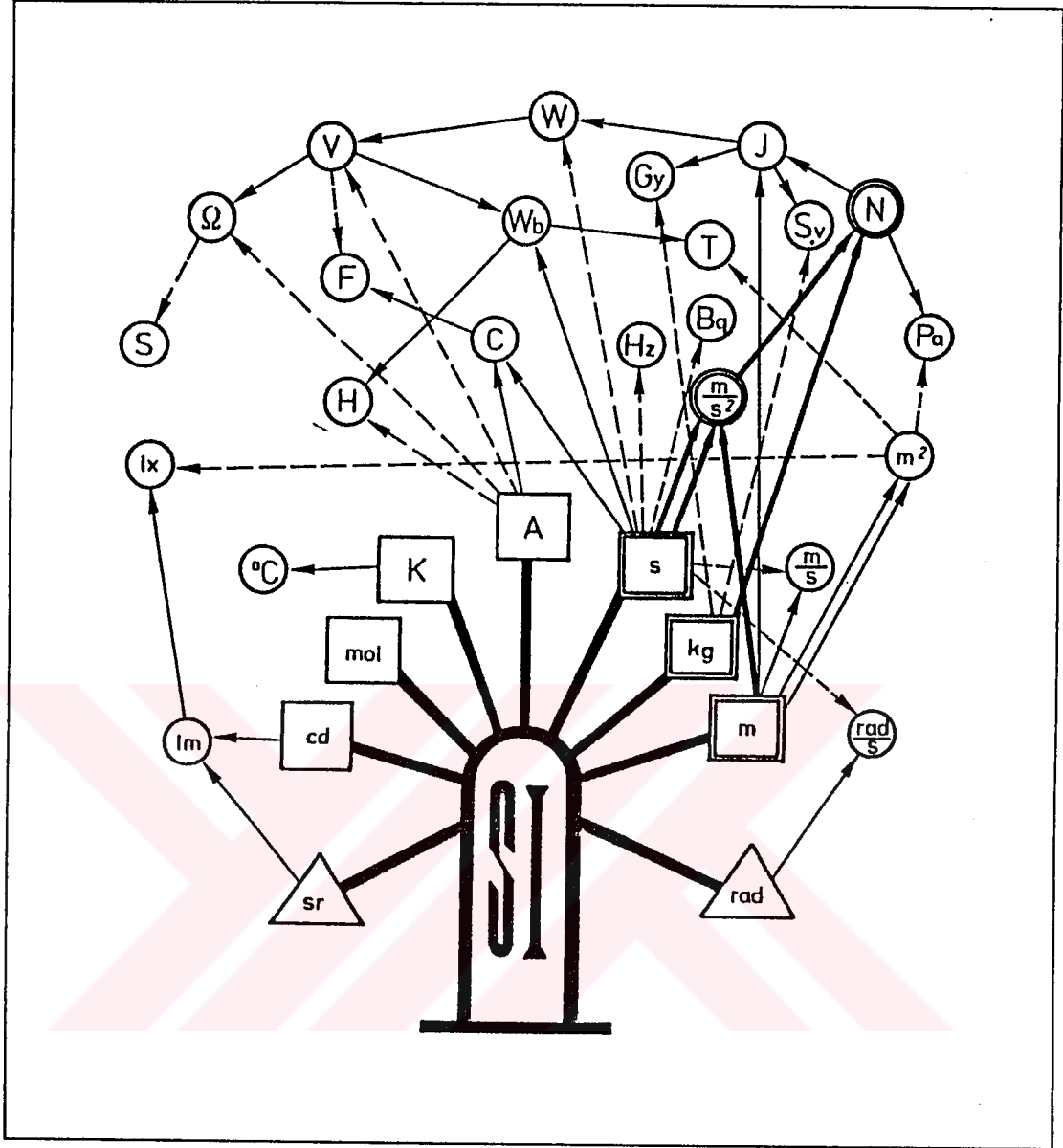
Uluslararası Birimler Sistemi, SI'daki kuvvet birimi Newton' dur ve sembolü [N]'dir. Bir Newton, 1 kg'lık kütle'ye 1 m/s² 'lik ivme veren kuvvettir.

$$1 \text{ N} = [1 \text{ kg}] \cdot [1 \text{ m/s}^2] = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2 \quad (1.3)$$

Burada açıkça görüldüğü gibi Newton, Uluslararası Birimler Sistemi, SI'da tümleşik (koherent) ölçüm birimidir [5].

Şekil 1.1'de SI-Birimler ağacında kuvvet birimi Newton ve diğer birimlerle ilişkisi gösterilmiştir. Burada temel birimler kare, bütünleyici birimler üçgen, türetilmiş birimler ise dairesel birer çerçeve içine alınmışlardır [34].

Bütün dillerde kısaca SI olarak gösterilen Uluslararası Birimler Sistemi (Système International d'Unités), 1960 yılında yapılan 11'inci Ölçü ve Ağırlıklar Genel Konferansı'nda (11.CGPM) kabul edilmiştir. Dönemin Türkiye Cumhuriyeti Hükümeti de SI-Birimler Sistemini bir kanunla aynen kabul etmiş ve bu kanun üzerindeki en son değişiklik 7 Aralık 1990 tarih ve 20718 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanmıştır [31].



Şekil 1.1. SI-Birimler Ağacında Kuvvet Birimi Newton'un Yeri

Kuvvetin özel bir türevidir olan ağırlık \vec{G} , kütle üzerindeki yerçekimi ivmesinin etkisi olarak tanımlanır ve (1.1) no'lu formülün benzeri olarak vakum ortamında (1.4) no'lu formül ile ifade edilir.

$$\vec{G} = m \cdot \vec{g} \quad (1.4)$$

Herhangi bir ortamda, yerçekimi ivmesinin bir kütle üzerindeki etkisinin büyüklüğü ise Arşimed etkisi gözönünde bulundurularak (1.5) no'lu formül ile belirlenir:

$$W = K \cdot g_{yerel} \cdot (m - V \cdot \rho_{hava}) \quad (1.5)$$

$$W = K \cdot m \cdot g_{yerel} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{hava}}{\rho_{k\u00fctle}}\right) \quad (1.6)$$

K : Oran katsayısı,

m : Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin kütlesi,

g_{yerel} : Yerel yerçekimi ivmesi,

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu,

V : Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin hacmi,

$\rho_{hava} \cdot V$: V hacmine sahip kütle üzerinde ρ_{hava} yoğunluğuna sahip havanın kaldırma etkisi

$\rho_{k\u00fctle}$: Yerçekimi ivmesinin etkidiği cismin yoğunluğu'dur

(1.6) no'lu formülde belirtilmiş olan K katsayısının, kullanılan birimlerle ilişkisi Tablo 1.1'de verilmiştir [27],[31].

Tablo 1.1. Newton'un İkinci Kanununda Çeşitli Birimler İçin K-Sabiti

W	m	g_s veya g_{yerel}	K
N	kg	m/s^2	1
Dyn	g	cm/s^2	1
Poundal	lb	$feet/s^2$	1
lbf	lb	$feet/s^2$	1/32.17405
lbf	lb	cm/s^2	1/980.665
kgf	kg	m/s^2	1/9.80665

Havanın yoğunluğunun belirlenmesinde (1.7) no'lu ampirik formül kullanılabilir:

$$\rho_{\text{hava}} = \frac{0.348444 \cdot P - (0.00252 \cdot T - 0.02052) \cdot H}{273.15 + T} \quad (1.7)$$

ρ_{hava} : Havanın yoğunluğu, [kg/m³]

P : Atmosferik basınç, [hPa], [mbar]

H : Bağıl atmosferik nem, [%]

T : Ortam sıcaklığı, [°C]

Yerçekimi ivmesinin yerel değeri temel olarak dünya üzerindeki koordinatlar ve yükseklik ile değişmektedir. Bundan başka mevsimler ve ayın konumu ile de küçük değişiklikler gözlenmektedir. Standart yerçekimi ivmesi deniz seviyesi ve 45° enlemdeki değere karşılık gelmekte olup; değeri (1.8) no'lu bağıntı ile verilmiştir :

$$g_{\text{standart}} = 9.80665 \text{ m/s}^2 \quad (1.8)$$

Herhangi bir enlemdeki [°] yerel yerçekimi ivmesi [m/s²] (1.9) no'lu formül ile belirlenebilir :

$$g_{\text{yerel}} = 9.78049 \cdot (1 + 0.0052884 \cdot \sin^2\phi - 0.0000059 \cdot \sin^2 2\phi) \quad (1.9)$$

O enlemdeki yerçekimi ivmesi için ise rakım [m] düzeltmesi [m/s²] (1.10) no'lu formül kullanılarak yapılabilir:

$$\text{Düzeltilme} = -(0.00030855 + 0.00000022 \cdot \cos 2\phi) \cdot h + 0.000072 \cdot \left(\frac{h}{1000}\right)^2 \quad (1.10)$$

Ağırlık, cismin ağırlık merkezinden yeryüzünün merkezine doğru yönelmiştir. Yerçekiminden dolayı oluşan kuvvetlere yaygın olarak “yük” denilmektedir. Bir noktaya kuvvet uygulamak, o noktayı yüklemek şeklinde de ifade edilebilir. Konuşma dilinde kullanılan kuvvet ve yük tanımları aynı fiziksel büyüklüğü ifade etmektedirler [2].

Uluslararası Birimler Sistemi SI'dan önce kuvvet birimi olarak kilopond [kp] veya kilogramkuvvet [kgf] kullanılmaktaydı. 1 kgf, standard yerçekimi ivmesinin vakum ortamında 1 kg'lık kütle üzerinde oluşturduğu etki olarak tanımlanmıştır.

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kp} = 9.80665 \text{ N} \quad (1.11)$$

Sanayide halen yaygın olarak kullanılmakta olan bu birim, çoğu zaman kısaca kilogram olarak ifade edilmektedir. Bu durumda, kg'ın kütle birimi olduğu, ancak kastedilenin kgf olduğu unutulmamalıdır.

Benzer şekilde ABD'de kuvvet için bir başka birim olan librekuvvet [lbf] kullanılmaktadır. Librekuvvet'in Newton'a dönüşümü (1.12) no'lu bağıntı ile verilmiştir.

$$1 \text{ N} = 0.22481 \text{ lbf} \quad (1.12)$$

$$1 \text{ lbf} = 4.448194 \text{ N} \quad (1.13)$$

Tablo 1.2'de yaygın olarak kullanılan diğer birim sistemlerindeki kuvvet birimleri ve birbirlerine dönüşüm katsayıları verilmiştir [31].

Tablo 1.2. Çeşitli Birim Sistemlerinde Temel Birimlerle Kuvvet Birimi Arasındaki İlişki

	SI Birimler Sistemi	CGS Birimler Sistemi	MKS Birimler Sistemi
Uzunluk	m	cm	m
Kütle	kg	g	--
Zaman	s	s	s
Kuvvet	kg·m/s ² (Newton)	g·cm/s ² (dyne)	kgf (kilogramkuvvet)
Dönüşüm Oranı	9.80665 N	9.80665 x 10 ⁵ dyn	1 kgf

Tablo 1.2'de dikkati çeken bir nokta da, kgf'un MKS-Birimler Sisteminde temel birim olduğudur.

1.3. Kuvvet Biriminin Gerçekleştirilmesi

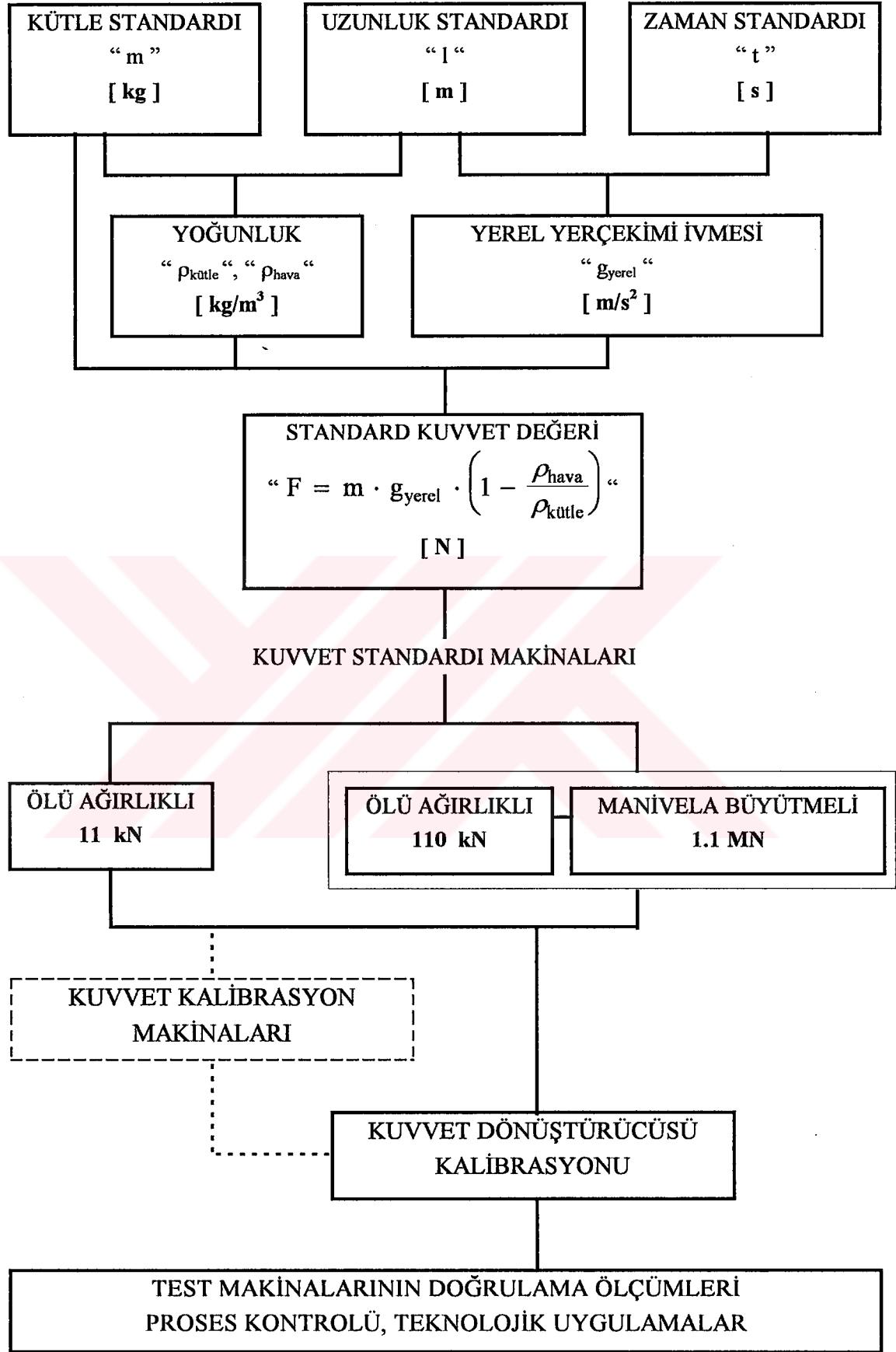
1.3.1. Genel

“1 Newton’un 1 kg’lık kütleyle 1 m/s^2 ivme veren etki” şeklindeki dinamik çağrışimli tanımı, birimin gerçekleştirilmesinde kullanılmayan bir yaklaşımdır. Kuvvet biriminin pratik olarak gerçekleştirilmesinde kütleler üzerindeki yer çekimi etkisi prensip olarak kullanılır. En küçük belirsizlik değerine de ancak bu prensibi kullanan sistemlerle ulaşılır. Fakat büyük kapasiteli sistemler inşaa edildiğinde ortaya çıkan hacimsel ve konstrüktif zorluklardan dolayı büyük kuvvet değerleri mekanik veya hidrolik ara sistem ve mekanizmalar aracılığı ile oluşturulur. Burada kullanılan ara mekanizmaların beraberinde taşıdıkları hatalar ve diğer harici etkilerden dolayı sistemin toplam belirsizliği, doğrudan kütlelerin kullanıldığı sistemlerin sahip olduğu belirsizlik değerinden daha büyüktür. Ulusal kuvvet skalasında temel birimlerden kullanıcı seviyesine kadar olan akış Şekil 1.2’de gösterilmiştir [26].

Temel olarak kuvvetin yüksek doğrulukla oluşturulmasında kullanılan makina tipleri şunlardır:

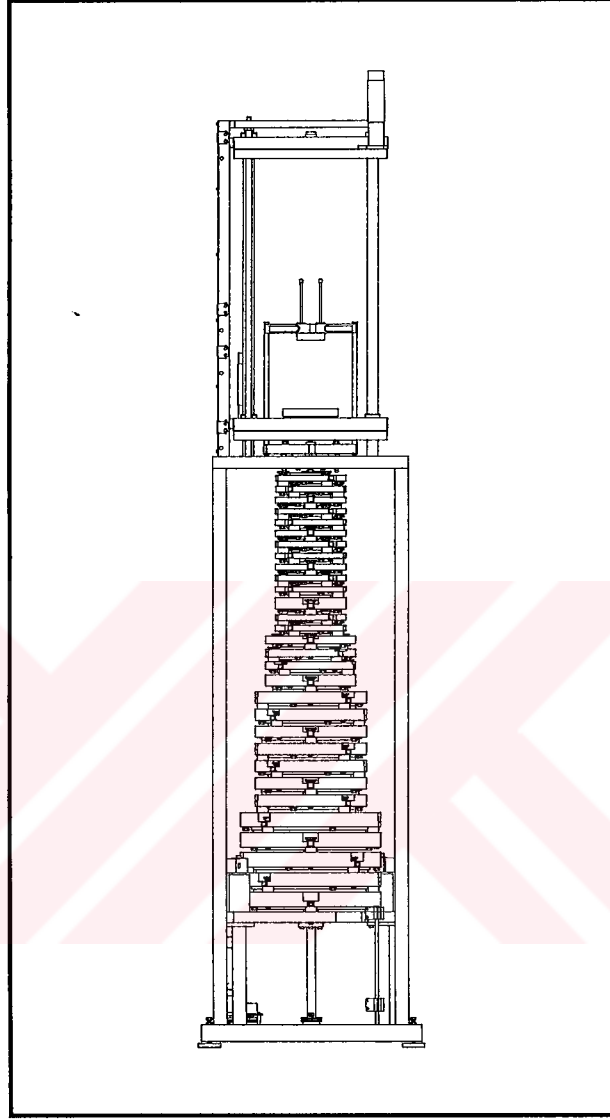
- ◆ Ölü ağırlıklı makineler : Bunlar yerçekimi etkisi altındaki kütlelerin oluşturduğu kuvveti doğrudan kullanan makinelerdir.
- ◆ Kuvvetin bir ara sistem ile büyütüldüğü makineler : Bu makineler yerçekimi etkisi altındaki kütlelerin oluşturduğu kuvvetin bir veya daha fazla sayıda manivela kullanılarak; ya da bir piston silindir bileşimi ile büyütüldüğü makinelerdir.
- ◆ Toplama usulünü uygulayan makineler : Bu makineler de birbirlerine paralel olarak bağlanmış referans kuvvet dönüştürücülerini kullanan sistemlerdir.

Eğer bahsi geçen bu makineler, Ulusal Metroloji Enstitüsü’nde, ülkedeki tüm kuvvet ölçümlerine referans teşkil etmek üzere kullanılıyor ise, Kuvvet Standardı Makinası (KSM) olarak adlandırılırlar. Ancak bu makineler çeşitli imalat ve test noktalarında kullanılıyorlar ve metrolojik karakteristikleri ülkenin Ulusal Metroloji Enstitüsü tarafından belirlenmiş ise, Kuvvet Kalibrasyon Makinası (KKM) olarak anılırlar [6].



Şekil 1.2. Türkiye'nin Ulusal Kuvvet Skalasında İzlenebilirlik

1.3.2. Ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinaları



Şekil 1.3. 11 kN Kapasiteli Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası

Bu bölümde ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinalarının detayları, TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Ulusal Metroloji Enstitüsü bünyesindeki Kuvvet Ölçüm Laboratuvarı'nda kurulu 11 kN kapasiteli makina örnek verilerek açıklanacaktır. Şekil 1.3'de genel görünüşü verilmiş olan bu makina 11 kN nominal kapasiteye sahiptir. Artık standartlaşmış olan 1 kN, 2 kN, 5 kN ve 10 kN kuvvet aralıklarını % 10'luk artımlarla 10 adımda ve gerektiği taktirde % 10'luk aşırı yükleme yapabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Disk şeklinde 13 adet 100 N, 4

adet 200 N, 1 adet 300 N, 7 adet 500 N ve 5 adet 1 kN olmak üzere toplam 30 adet ölü ağırlık bir taşıyıcı tabla üzerine oturtulmuştur. Bu taşıyıcı tabla bir servo motor tahrikli sonsuz vida mekanizması yardımıyla aşağı yukarı hareket edebilmektedir. Tablanın aşağı hareketi esnasında ilk kütle değerini oluşturan boyunduruk kuvvet ölçme cihazının üzerine asılmakta onu takip eden diğer kütleler ise öncelikle bu boyunduruğa ve sırasıyla da birbirlerine asılmaktadırlar. Boyunduruktan bağımsız çalışabilen iki ara plaka, basma durumunda kuvvet dönüştürücüsünün oturduğu, çekme durumunda ise kuvvet dönüştürücüsünün asıldığı elemanlar olup; dönüştürücünün boyutlarına göre serbestçe hareket ederek ayar yapılmasını ve aynı zamanda da şok yükleme-boşaltmaların yapılabilmesine imkan sağlamaktadırlar. Makinanın nominal yüksekliği yaklaşık olarak 3.5 m ve taban alanı ise yaklaşık olarak $(70 \times 70) \text{ cm}^2$ 'dir.

Bu standart makinaların ürettikleri birimin değeri kütle metrolojisinde kullanılan konvansiyonel tartım değeri üzerinden belirlenmekte olup (1.14) no'lu formül ile hesaplanabilmektedir:

$$F = m_c \cdot g_{yerel} \cdot \left(1 - \frac{1.2}{8000} + \frac{(1.2 - \rho_{hava})}{\rho_{kulle}} \right) \quad (1.14)$$

Kütle kalibrasyonu ve ayar silsilesi neticesinde elde edilen kuvvet değerinin belirsizliği teorik olarak (1.15) no'lu formülle belirlenmekte olup; bugün için, oluşturulan kuvvette deneysel belirsizliği verebilecek metrolojik karakteristiğe sahip bir kuvvet ölçüm cihazı imal edilememiştir [21].

$$\left(\frac{\sigma_F}{F} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{m_c}}{m_c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{g} \right)^2 + \left(\frac{1.2 - \rho_{hava}}{\rho_{kulle}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{\rho_{kulle}}}{\rho_{kulle}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_{hava}}}{\rho_{hava}} \right)^2 \quad (1.15)$$

(1.15) no'lu formülde, σ^2 herbir terimin varyansdır [21].

Dünyada kapasiteleri 10 N'dan 4.4 MN'a kadar değişen çeşitli tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinaları mevcuttur. Bunların belirsizlikleri ise 1 ila 5×10^{-5} arasında değişmektedir. Ancak verilen bu değerler laboratuvarların beyanına dayanmaktadır ve bazı laboratuvarların bu belirsizlik değerlerini tam kapasite üzerinden verdikleri bilinmektedir. Dolayısıyla tam kapasitenin küçük değerlerinde bu belirsizlik değerleri büyümektedir. Türkiye'nin ulusal kuvvet standardının 11 kN'a kadar olan kısmını oluşturan bu makinanın belirsizlik seviyesinin bulunması ve uluslararası skaladaki yerinin ilanı için Almanya'nın Ulusal Metroloji Enstitüsü olan PTB-Physikalisch-Teknisches Bundesanstalt ile yapılan uluslararası mukayeseli ölçüm neticesinde elde edilen sonuçlarla bugün için dünyada ulaşılabilen en iyi değer olan 2×10^{-5} elde edilmiştir. Bu belirsizlik değeri tam kapasite üzerinden olmayıp uygulanan her kuvvet değeri için maksimumu vermektedir [6], [10], [12].

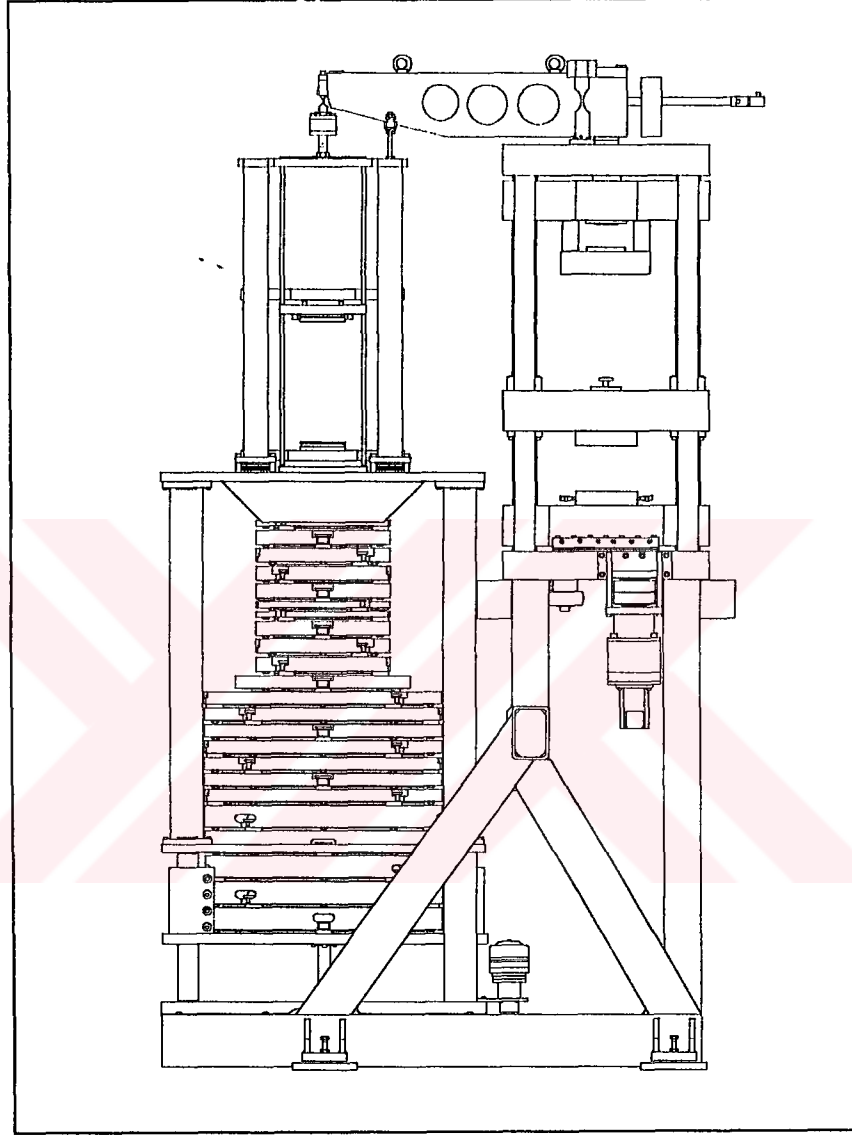
1.3.3. Kuvvetin büyütüldüğü sistemler

1.3.3.1. Manivelalı tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinaları

Ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinalarının detayları, TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi, Ulusal Metroloji Enstitüsü bünyesindeki Kuvvet Ölçüm Laboratuvarı'nda kurulu 110 kN /1.1 MN kapasiteli makina örnek verilerek açıklanacaktır. Şekil 1.4'de genel görünüşü verilmiş olan bu makina iki kısımdan oluşmakta olup; ölü ağırlıklı kısımda 110 kN, manivela aktarımlı kısımda 1.1 MN nominal kapasiteye sahiptir. Ölü ağırlıklı kısımda artık standartlaşmış olan 20 kN, 50 kN, 100 kN kuvvet aralıklarını % 10'luk artımlarla 10 adımda ve gerektiği taktirde %10'luk aşırı yükleme yapabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Makinanın bu kısmının çalışma prensibi 11 kN kapasiteli makinanınki ile aynıdır.

Makinanın ikinci kısmı ise; birinci kısımda ölü ağırlıklarla üretilen kuvvet değerlerini bir manivela yardımı ile on (10) kat büyütmektedir. Manivelalı kısımda artık standartlaşmış olan 200 kN, 500 kN, 1 MN kuvvet aralıkları % 10'luk artımlarla 10 adımda ve gerektiği taktirde % 10'luk aşırı yükleme yapabilecek kabiliyettedir. Makinada, 110 kN'a kadar olan kuvvetler ölü ağırlıklar yardımıyla üretildiği ve manivelalı kısımdan bağımsız çalışabildiği için ayrı bir kuvvet standardı makinası

olarak ele alınabilir. Fakat manivelalı kısım tek başına kuvvet üretememekte, ölü ağırlıklara ihtiyaç duymaktadır.

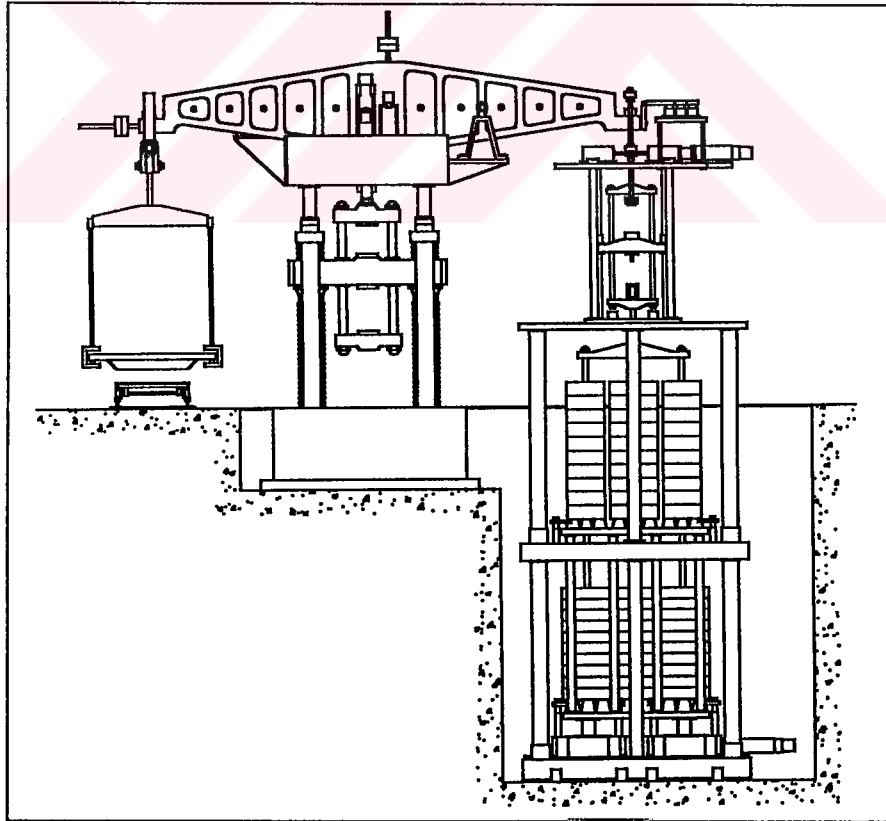


Şekil 1.4. 110 kN / 1.1 MN Kapasiteli Manivelalı Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası

Dünyada kapasiteleri 1.96 N'dan 2.4 MN'a kadar değişen çeşitli tip manivelalı ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinaları mevcuttur. Bunların belirsizlikleri ise 5×10^{-5} ila 2×10^{-4} arasında değişmektedir. Ancak verilen bu değerler laboratuvarların beyanına dayanmaktadır ve bazı laboratuvarların bu belirsizlik değerlerini tam kapasite üzerinden verdikleri bilinmektedir. Dolayısıyla tam kapasitenin küçük değerlerinde bu belirsizlik değerleri büyümektedir. Ayrıca bazı makina tiplerinde ölü ağırlıklı kısım

kullanılmamakta, dolayısıyla manivelanın değişik yüklerde gösterdiği sehime bağlı olarak kütle ayarlaması yoluna gidilmiştir. Türkiye'nin ulusal kuvvet standardının 1.1 MN'a kadar olan kısmını oluşturan bu makinenin belirsizlik seviyesinin bulunması ve uluslararası skaladaki yerinin ilanı için Almanya'nın Ulusal Metroloji Enstitüsü olan PTB-Physikalisch-Teknishe Bundesanstalt ile yapılan uluslararası mukayeseli ölçüm neticesinde elde edilen sonuçlarla bugün için dünyada ulaşılabilen en iyi değerler olan ölü ağırlıklı kısım için 2×10^{-5} , manivelalı kısım içinse 1×10^{-4} olarak elde edilmiştir. Bu belirsizlik değeri tam kapasite üzerinden olmayıp uygulanan her kuvvet değeri için maksimumu vermektedir [6], [10], [12].

Şekil 1.5.'de Çin Halk Cumhuriyeti'nde Primer Kuvvet Standardı olarak kullanılmakta olan konvansiyonel tip bıçak sırtı yatak ile donatılmış ve bir eş kollu terazi kolu ile akuple edilmiş manivelalı tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasına ait bir şema verilmiştir. Burada kuvvet ve kütle büyüklüklerinin ölçüm uygulamaları içiçe geçmiş iki büyüklük oldukları örneklenmektedir [25].



Şekil 1.5. 100 kN/1 MN Kapasiteli, Konvansiyonel Tip Eş kollu Terazi (1 tonf) ile Birleştirilmiş Manivelalı Tip Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası

1.3.3.2. Hidrolik tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı/kalibrasyon makinaları

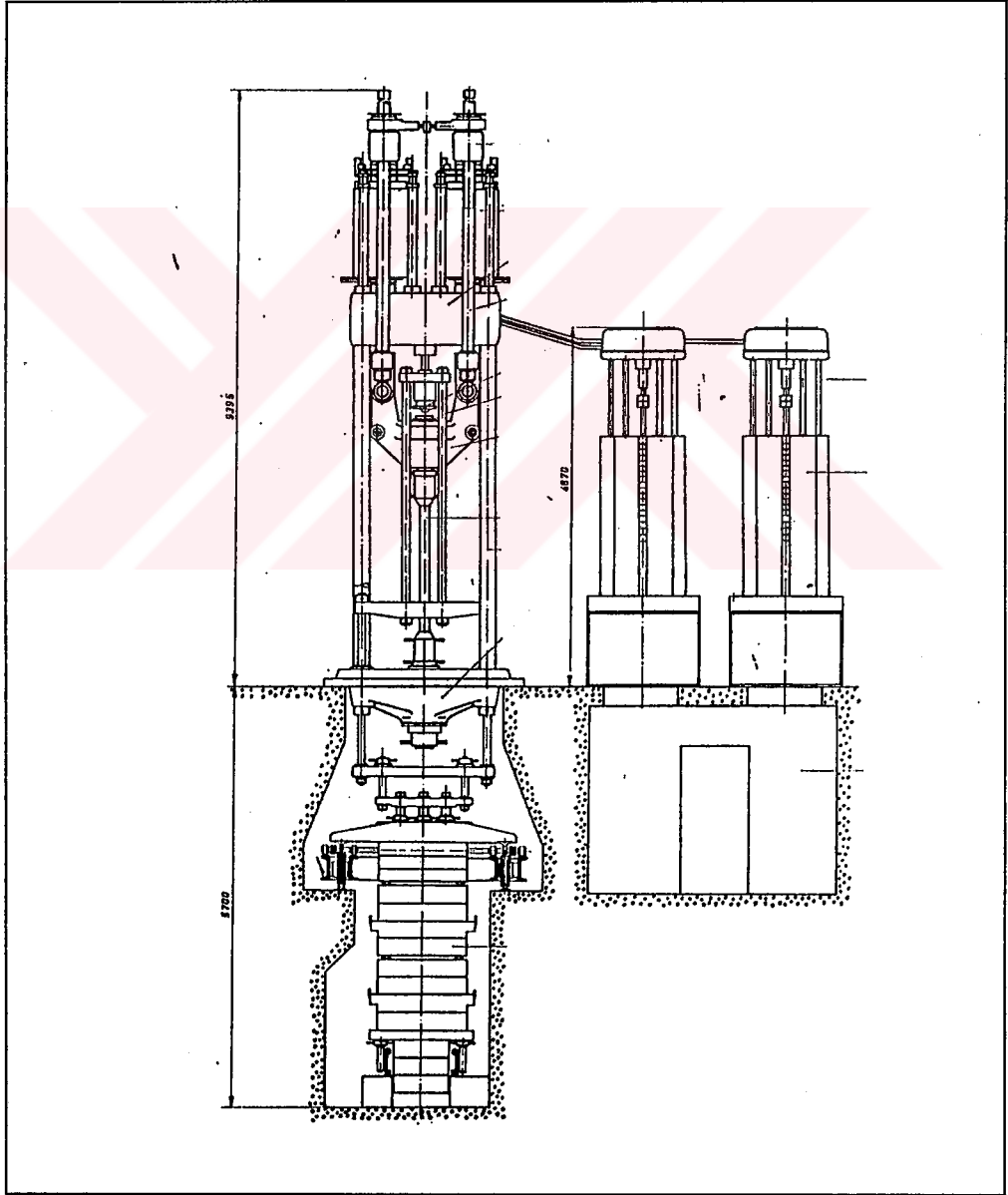
Ölü ağırlıklı makinaların kapasitelerini arttırmanın bir diğer yolu da hidrolik olarak büyütme prensibinin kullanılmasıdır. Temel olarak oluşan basıncın denge konumunda olduğu anda piston yüzeyleri arasındaki oranın uygulanan kuvvet ile elde edilen kuvvet arasındaki oranı sağladığı prensibinden hareket edilerek geliştirilmiştir. Manivelalı sistemlerde olduğu gibi yerçekimi etkisindeki kütlelerin yarattığı kuvvet bir piston silindir ünitesi üzerine uygulanır. Oluşan basınç tamamen ayrı bir noktada yerleştirilmiş olan büyütme makinasının piston silindir ünitesine aktarılır. En büyük üstünlüğü bir tek ölü ağırlık piston silindir primer kombinasyonuna, birden fazla büyütme amaçlı piston silindir ünitesinin paralel bağlanabilmesidir. Böylelikle mevcut sistemin daha büyük kapasitelere çıkartılabilmesi için yapılması gereken tek şey yeni piston silindir ünitesinin sisteme dahil edilmesidir.

Şekil 1.6'da Doğu Almanya'da uzun süreler kullanılmış 1 Mp kapasiteli hidrolik tip ölü ağırlıklı kuvvet standardı makinasına ait bir genel görünüş verilmiştir. Dünyada kapasiteleri 600 kN'dan 20 MN'a kadar değişen çeşitli tipte hidrolik makinalar mevcuttur ve belirsizlik değerleri de 1×10^{-4} ile 5×10^{-4} arasında değişmektedir. Ancak verilen bu değerler laboratuvarların beyanına dayanmaktadır ve bazı laboratuvarların bu belirsizlik değerlerini tam kapasite üzerinden verdikleri bilinmektedir. Dolayısıyla tam kapasitenin küçük değerlerinde bu belirsizlik değerleri büyümektedir. Hidrolik sistemlerin kendilerine özgü problemlerinden dolayı bütün dünyada her geçen gün daha az tercih edilir duruma gelmişlerdir [6].

1.3.4. Referans kuvvet ölçme cihazları yardımıyla kuvvet oluşturulması

Gerek maliyet gerekse kapasite probleminin çok belirgin olduğu durumlarda kuvvetin ölü ağırlıklarla oluşturulması yerine, üstün nitelikli bir mekanik veya hidrolik pres ve yüksek vasıflı bir kuvvet ölçme cihazının biraraya getirildiği sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle nispeten daha büyük belirsizlik değerlerinin kabul edilebildiği uygulamalar için çok uygun bir çözüm olan bu sistemler için dünyada 100 kN ile 6 MN arasında değişen kapasitelere sahip çok sayıda makina mevcuttur. Bunların belirsizlik değerleri 2×10^{-4} ile 8×10^{-4} arasında değişmektedir. Ancak

verilen bu değerler laboratuvarların beyanına dayanmaktadır ve bazı laboratuvarların bu belirsizlik değerlerini tam kapasite üzerinden verdikleri bilinmektedir. Dolayısıyla tam kapasitenin küçük değerlerinde bu belirsizlik değerleri büyümektedir. Ayrıca oluşturulan kuvvetin belirlenmesinde kullanılan kuvvet ölçme cihazının sıklıkla bir primer standart ile kalibre edilmesi zorunluluğu ve kuvvet ölçme cihazlarının zaman içindeki davranışlarının tam olarak bilinemesinden dolayı bu sistemler yüksek doğruluğun arandığı teknolojilerde ve primer seviyedeki laboratuvarlarda pek tercih edilmemektedirler [6].



Şekil 1.6. 1 Mp Kapasiteli Hidrolik Tıp Ölü Ağırlıklı Kuvvet Standardı Makinası

1.4. Konvansiyonel Kuvvet Ölçme Cihazları

1.4.1. Kuvvet ölçümünde kullanılan konvansiyonel yöntemler

Kuvvet ölçüm büyüklüğünün intensiv bir büyüklük olmasından veya bir başka ifade ile doğrudan kendisinin değil onunla bağlantılı diğer büyüklüklerin ölçülebilmesinden dolayı insanoğlu, kuvvet ölçümünde bu güne kadar çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Bunlar kaba bir grupta ile bilinen bir yük ile dengeleme, esnek bir gövde üzerinde kuvvetin etkisiyle oluşan şekil değişiminden faydalanma ve malzemelerin kuvvet etkisiyle bir takım fiziksel özelliklerini değiştirmeleridir.

Bilinen bir yük ile dengeleme çoğu zaman ya bir eşkollü terazi ile doğrudan bir kütle ağırlığını dengeleme ya da manyetik kuvvetin, ölçülen kuvvet ile standart ağırlık üzerindeki yerçekimi kuvveti arasındaki farkı dengelediği sistemler olarak uygulanmaktadır. Bunlar prensip olarak son derece basit sistemler olmasına rağmen uygulamada son derece hassas ve özenli kullanılması gereken sistemlerdir.

Esnek bir gövde üzerinde oluşan deformasyon ya doğrudan boyut değişiminin ölçüldüğü ya da açılma veya hacimsel değişimlerin gözlemlendiği sistemler olarak ortaya çıkmışlardır.

Malzemenin kuvvet altında tabii elektrik frekansını değiştirmesi, manyetik vektörünün değişimi, piezo elektrik sistemlerde olduğu gibi elektrik ile yüklenmesi gibi birtakım fiziksel özelliklerini değiştirmesi yine kuvvet ölçümünde kullanılan prensiplerdir.

Bu yöntemlerden ikincisi uzun süreler hakim metod olarak kullanıldıysa da; elektrikli ölçümlerde elde edilen büyük gelişmeler ve teknolojinin otomasyondan bağımsız düşünülmesinin doğal sonucu olarak her geçen gün elektrikli sistemlere doğru bir yönelme olmuştur. Bu sistemler mekanik ağırlıklı sistemlere oranla daha küçük ve kullanımı daha kolay olacak şekilde tasarlanmışlardır. Bundan sonraki bölümlerde mekanik ve elektrikli kuvvet ölçme cihazları olarak iki ayrı başlık altında bu tür cihazlar incelenecektir [2].

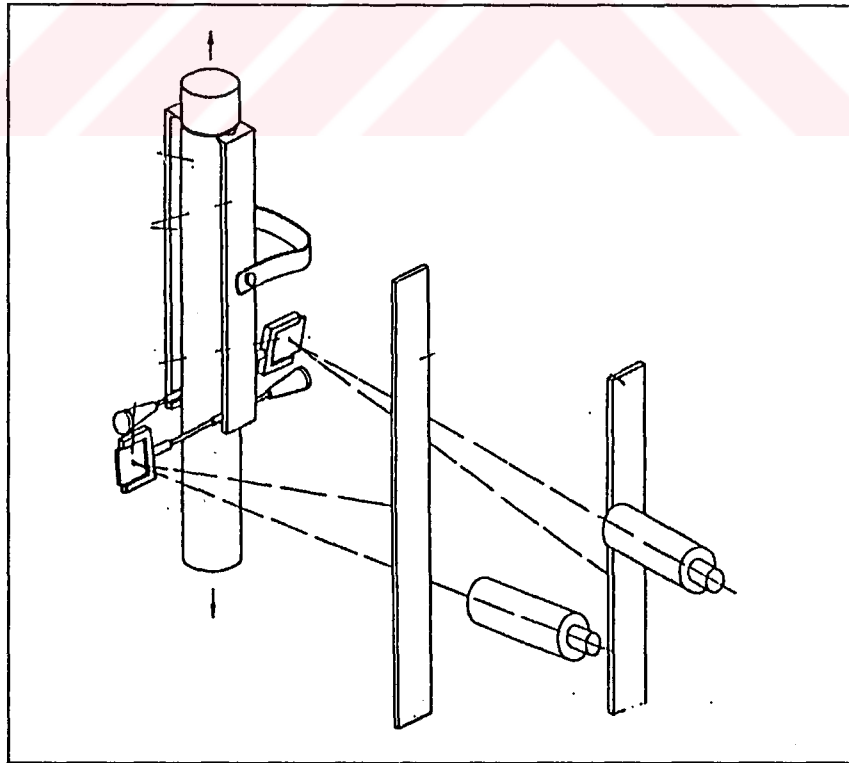
1.4.2. Mekanik kuvvet ölçme cihazları

1.4.2.1. Martens aynalı kuvvet ölçme cihazları

Kullanımı günümüzde tamamen ortadan kalkmış olan bu tip cihazlara, literatürde dahi güçlükle rastlanmaktadır. Konunun tarihi gelişiminin izlenebilmesi amacıyla; bu aşamada cihazla ilgili temel bilgiler verilecektir.

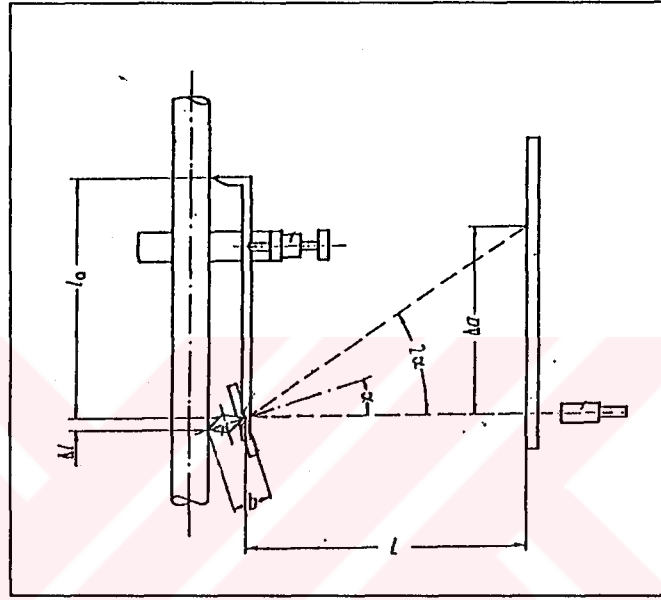
Martens aynalı kuvvet ölçme cihazının çekme kuvvetlerinin ölçümünde kullanılan tipi, ölçülen kuvvetin küresel tabanlı somunlar ve somun yatakları vasıtasıyla iletiildiği basit bir silindirik çubuğa sahiptir. Elastik gövde olarak basma çubuğu, çekme veya basma tipi elastik halkaların da kullanılabilirdiği bu tür cihazlarda, yükü taşıyan elastik gövdenin uzunluğunun, cihaza uygulanan kuvvet ile orantılı olarak değişimi Martens aynaları yardımı ile optomekanik olarak büyütüldükten sonra ölçülür (Bkz. Şekil 1.7).

Genel olarak 6 Mp'dan 1000 Mp'a kadar olan kuvvetlerin ölçümü bu cihazlar ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 1.7. Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazı

Ölçüm prensibi Şekil 1.8’de verilmiş olan bu tip cihazlarda, iki veya dört adet baklava kesitli prizma, ölçüm rayları ile yükü taşıyan elastik gövde üzerindeki çentikler arasına, elastik gövde eksenine 180° veya 90° aralıklarla, ray kısıkaçları yardımıyla yerleştirilir. Elastik gövdenin uzunluğunun değişimine bağlı olarak açisal dönüş yapan aynalar, bu prizmalara sabitlenmiştir. Okuma dürbünleri kullanılarak, cetvel üzerinden aynaların dönüşüne karşılık gelen gösterge değeri okunur [2].



Şekil 1.8. Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazının Ölçüm Prensibi

Bu ölçüm yönteminin optik aktarım oranı (1.16) no’lu formül ile verilmiştir;

$$n = \frac{\Delta l}{\Delta a} = \frac{b \cdot \sin \alpha}{L \cdot \tan 2\alpha} \quad (1.16)$$

n optik aktarım oranı,

Δl prizma ile ölçüm raylarının elastik gövdeye temas ettiği nokta arasında elastik gövdenin uzunluk değişimi,

Δa cetvelde okunan değer,

b prizmanın genişliği,

L ayna yüzeyi ile cetvel arasındaki mesafe,

α aynaların dönüş açısı.

$\alpha \ll 5^\circ$ olduğu durumlarda, daha da basitleştirilmiş olarak,

$$n \approx \frac{b}{2 \cdot L} \quad (1.17)$$

(1.17) no'lu formül kullanılabilir.

Klasik olarak 1/500'lük büyütme oranını elde etmek için, $L = 250 \cdot b$ olarak seçilir. Prizmanın genişliği, "b" prensip olarak 4.5 ila 4.6 mm arasındadır. Ölçüm raylarının uzunluğu, elastik gövdenin uzunluğuna bağlı olarak 100 mm, 150 mm, 200 mm veya 300 mm olarak seçilir. Bu cihazların çekme tipi için 200 mm, basma tipi için 150 mm boyunda ölçüm raylarının kullanılması önerilmektedir.

Bu yöntemde, elastik gövde üzerinde karşılıklı olarak yerleştirilmiş iki adet prizma kullanıldığında; her iki cetvelden okunan değerlerin toplamı, uzunluk değişiminin 10^3 katına eşittir. Elastik gövde eksenine 90° aralıkla yerleştirilmiş dört adet prizma kullanılması durumunda; karşılıklı olarak yerleştirilmiş olan her bir çift ayna için elde edilen toplamaların ortalaması alınır.

Bu ölçüm yönteminin duyarlılığı, yaklaşık olarak 500 ölçek taksimatı ile sınırlıdır [34].

1.4.2.2. Ölçme halkaları

Elektrikli tip kuvvet ölçme cihazlarının geliştirilmesinden önce en yaygın olarak kullanılan kuvvet ölçme cihazları, "Ölçme Halkaları" dır. Bugün halen sanayinin çeşitli alanlarında, özellikle malzeme test makinalarının kurum içi gerçekleştirilen periyodik doğruluk kontrollerinde kullanılmaktadır.

Daire veya elips formu verilmiş olan ölçme halkaları, uygulanan yükün etkisi ile kuvvetin uygulandığı yönde bir boyutsal değişime uğrarlar. Ölçme halkaları, maksimum kapasiteyle yüklendiklerinde 1.27 mm ila 2.54 mm sehim yapacak şekilde tasarlanırlar. Ölçme halkasının ölçme kapasitesi arttıkça boyutlarının büyümesi ve aynı zamanda ağırlığının da artması en büyük dezavantajdır.

Dairesel formülü ve dikdörtgen kesitli bir ölçme halkasının uygulanan kuvvetle göstereceği sehimin tasarım aşamasındaki hesaplamalarında Timoshenko'nun verdiği (1.18) ve (1.19) no'lu formüller kullanılabilir :

$$d = \frac{P \cdot r^2}{e \cdot E \cdot l \cdot t} \cdot \left\{ \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{2 \cdot e}{r} \cdot \left[\frac{2}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{e}{r} \right) \right] \right\} \quad (1.18)$$

$$e = r - \frac{t}{\log_n \left(\frac{1 + \frac{t}{2 \cdot r}}{1 - \frac{t}{2 \cdot r}} \right)} \quad (1.19)$$

d : Ölçme halkasının çapının yük yönündeki değişimi [mm],

P : Uygulanan yük [N],

r : Ölçme halkasının yarıçapı [mm],

E : Ölçme halkasının malzemesinin elastiklik modülü [N/mm²],

l : Ölçme halkası kesitinin genişliği [mm],

t : Ölçme halkası kesitinin kalınlığı [mm]

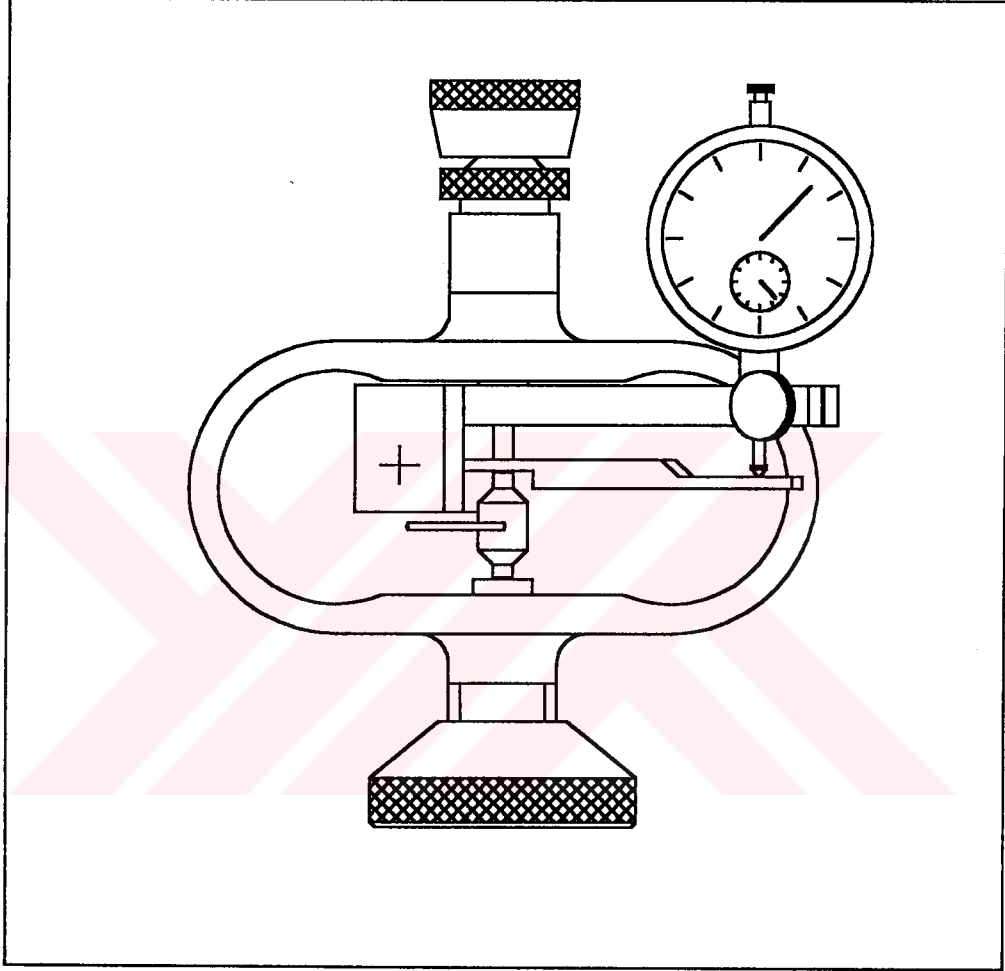
Uygulanan kuvvete karşılık gelen bir sehim elde edildikten sonra bunun ölçülmesinde sıklıkla kullanılan temel yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

◆ Komparatörlü ölçme halkaları

Daire veya elips gibi farklı şekiller verilmiş olan elastik gövdenin deformasyonu, bir manivela sistemi veya bir yardımcı köprü aracılığı ile büyütülerek bir komparatör (Dial gauge, ölçme saati) yardımıyla ölçülür (Bkz. Şekil 1.9). Genel olarak kullanılan büyütme oranı 1 : 5'dir.

Bu tür ölçme halkalarında gösterge elemanı olarak kullanılan komparatörlerin metrolojik özelliklerinin yetersiz olması nedeniyle günümüzde kullanım alanı oldukça sınırlıdır. Komparatörün bu yetersizliği, özellikle tek bir seri ölçümde hem artan hem

de azalan yönde ölçümler yapılacağı zaman belirgin bir histerisiz hatasının oluşmasına neden olur. Bu tür bir cihaz kullanılacaksa; bu cihazın sıfır noktası dikkatle takip edilmelidir. Genel olarak kullanılan komparatörler enterpolasyona izin vermediğinden, cihaz kalibre edildiği basamak değerlerde kullanılır [20], [29].

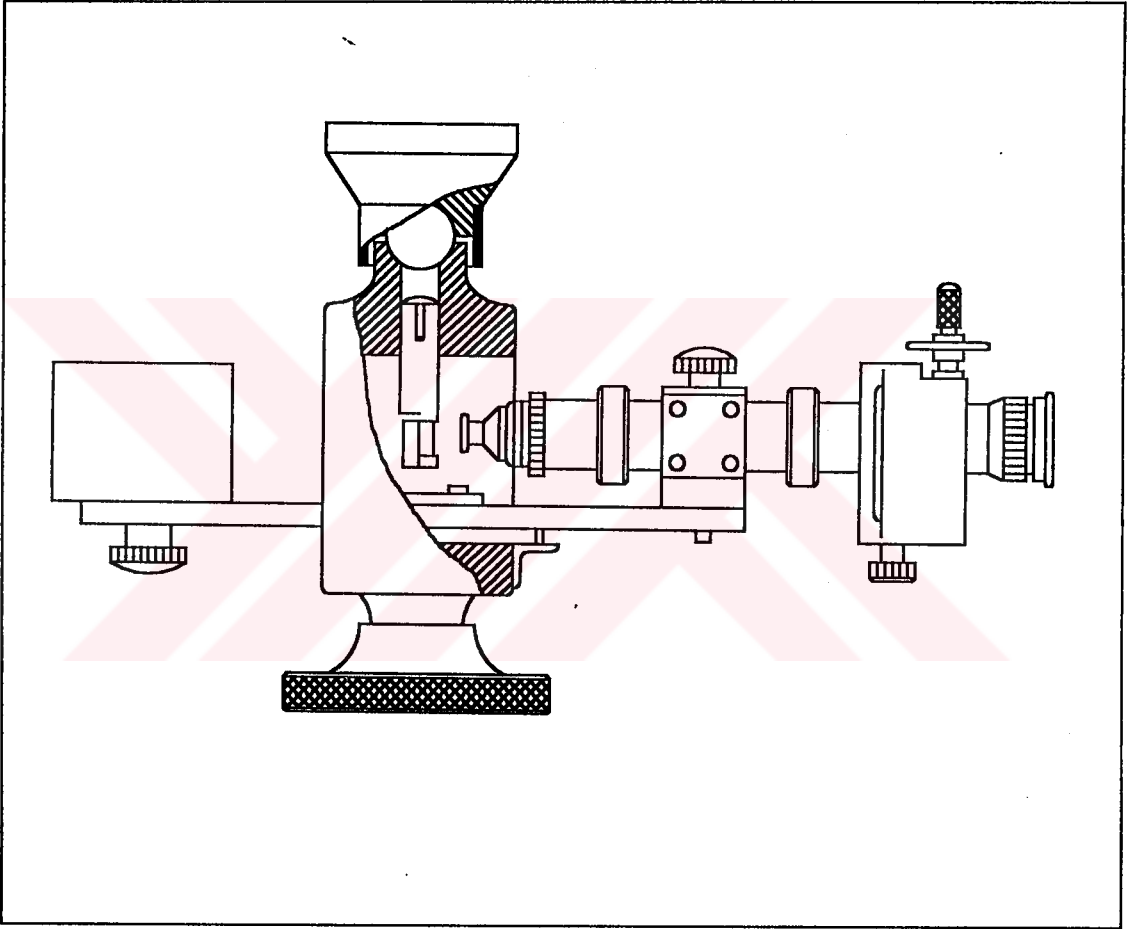


Şekil 1.9. Komparatörlü Ölçme Halkası

◆ Spiral mikroskoplu ölçme halkası

Bir manivela sistemi ve ona monte edilmiş bir ölçme saati yerine, bu tip cihazlarda elastik gövdenin ana deformasyon eksenine oturutulmuş bir cetvel mevcuttur (Bkz. Şekil 1.10). Ölçme halkasının üst yüzeyine sabitlenmiş olan bu cetvelin uygulanan yüküyle oluşan deformasyona bağlı hareketi, konstrüksüyona dahil edilerek ölçme halkasının tabanına sabitlenmiş olan bir spiral mikroskop yardımıyla ölçülür.

Bu tip cihazlarda ölçme halkasının eni, manivela sistemi ve ölçme saati kullanılan tiplerindekinden bir miktar daha geniş tutularak; mikroskobun ağırlığının yarattığı eğme momentine karşı mukavemeti artırılmıştır. Bir başka tipinde ise, mikroskobun ağırlığını dengelemek amacı ile bir karşı ağırlık kullanılmıştır. Bazı türlerinde ise şeffaf olarak seçilmiş cetvelin rahatça okunabilmesi için bir ışık kaynağı kullanılmaktadır ve bu kaynak aynı zamanda karşı ağırlık görevini de üstlenmektedir [20].

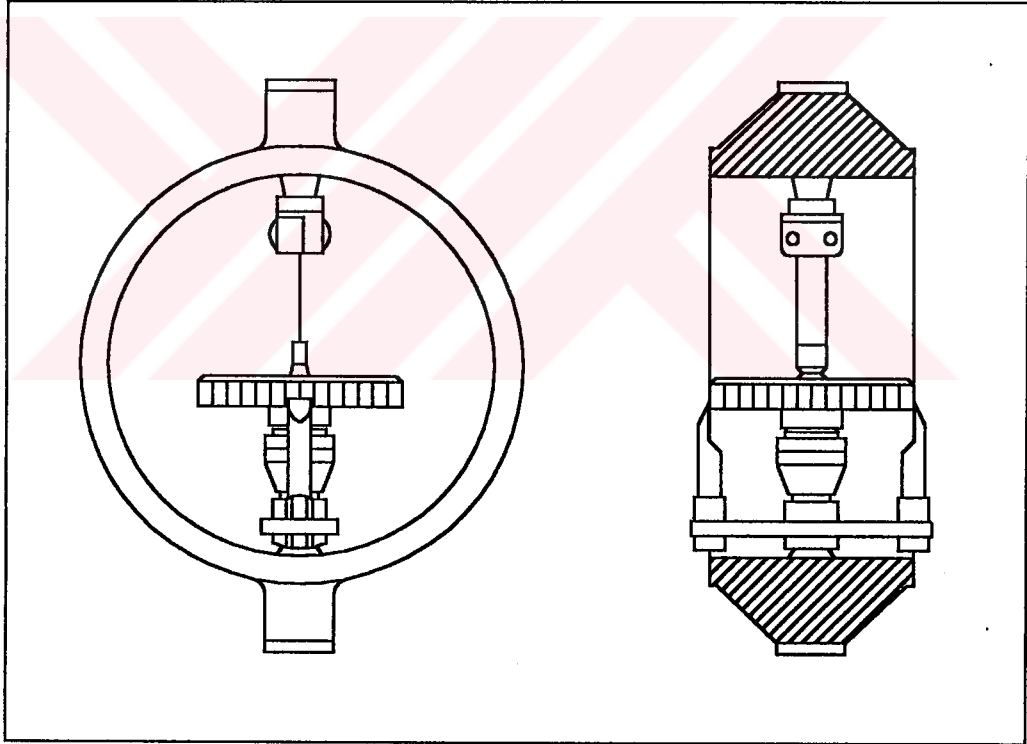


Şekil 1.10. Spiral Mikroskoplu Ölçme Halkası

Bu yöntemin temel avantajı, ölçümün herhangi bir büyütme veya aktarım sistemi olmaksızın yapılmasıdır. Elastik halkanın doğrusal deformasyonu maksimum 2.5 mm civarındadır. Spiral mikroskobun ölçek taksimatı 0.001 mm'dir. Uygun bir mikroskop kullanımı ile 5000 ölçek taksimatına ulaşmak mümkündür. Göstergenin hatası, ölçme saatindekinden daha küçüktür [2].

◆ Sarkaçlı ölçme halkaları

Bu tür ölçme halkaları, daha çok Anglosakson ülkelerinde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ölçme halkasında oluşan deformasyonun ölçümü için Şekil 1.11’de şematik olarak gösterilmiş olan bu tip cihazlarda, sarkaç görevi yapan bir tel veya bir ince şerite, uygun bir cisim kullanılarak salınım hareketi verilir ve mikrometrik vida döndürülerek, ucun aşağı-yukarı hareketiyle tekrar durdurulur. Ölçülen yükte mikrometrede okunan değerden, yüksüz durumdayken kaydedilen değer çıkartıldığında, ölçülen yüke karşılık gelen ölçüm değeri elde edilmiş olur. Her ne kadar farklı kullanıcılar aynı halkayı kullanarak farklı sıfır noktaları bulsalar da; kullanıcıdan kaynaklanan hatalar küçük olduğundan, tekrarlanabilirliği yüksek sonuçlar elde edilir [34].

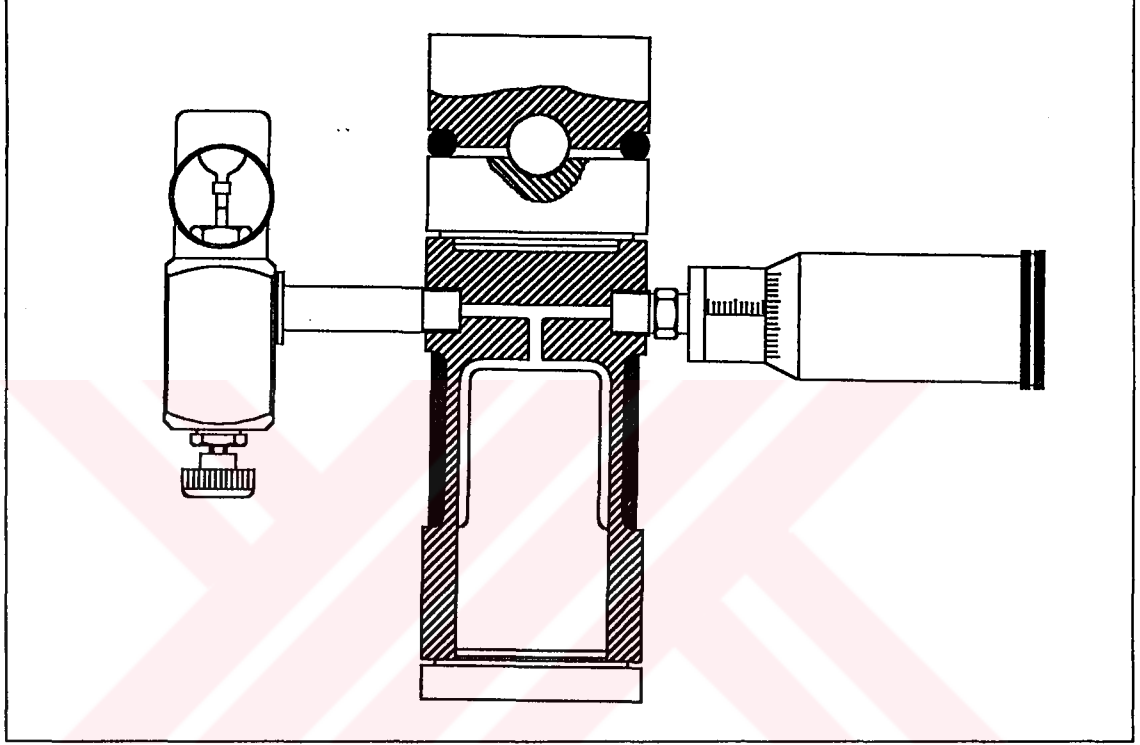


Şekil 1.11. Sarkaçlı Ölçme Halkası

1.4.2.3. Hidrolik kuvvet ölçme cihazı

Günümüzde artık hemen hemen hiç kullanılmayan hidrolik tip kuvvet ölçme cihazları, daha çok metroloji müzelerinde teşhir edilmektedir. Uygulanan yükün etkisi altında oluşan elastik deformasyonun gözlenmesi prensibinin enterasan bir uygulaması olan bu

tip cihazlarda, uzunluk değişimi yerine yük altındaki ölçme cihazında meydana gelen hacim değişimin gözlenmesi ölçüm prensibi olarak kullanılmaktadır.Şekil 1.12’de de açıkça görüldüğü üzere, yükü taşıyan elastik gövdenin içinde silindirik bir boşluk bulunmaktadır. Alttaki parça ise, yükü taşıyan elastik gövde içindeki boşluğu belirli bir hacim oluşturacak şekilde tamamlayacak boyutlara sahiptir [22].



Şekil 1.12. Hidrolik Kuvvet Ölçme Cihazı

Yükün ölçümü sıfır yöntemine göre yapıldığından, ölçüme başlanmadan önce sıfır ayarlayıcısı ile civa seviyesi cam tüp üzerindeki ölçek işaretine ayarlanır. Uygulanan yükün etkisiyle içi civa ile doldurulmuş olan boşluğun hacmi değişir; hacmi sabit olan civanın artan kısmı ise sol taraftaki cam tüp boyunca taşar. Basma kuvvetinin etkisi ile taşarak cam tüpün içine dolan civa, konstrüksüyona dahil edilmiş olan bir mikrometre aracılığı ile tüp üzerindeki ölçek işaretine kadar geri çekilir. Mikrometre üzerindeki sayısal değer ile uygulanan kuvvet arasında bir ilişki kurulmuş olur.

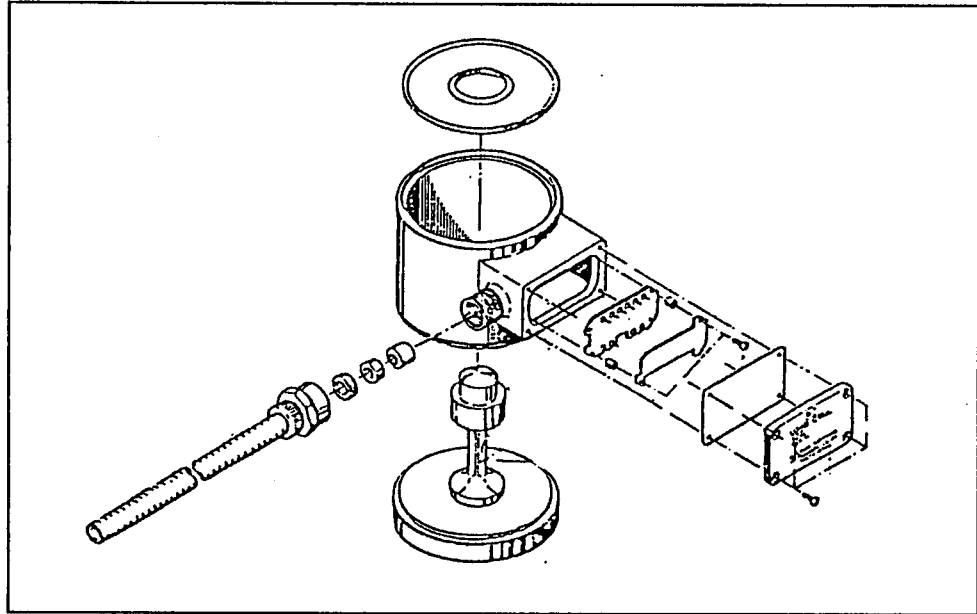
Bu tip cihazlar maksimum 1000 Mp’a kadar üretilmişlerdir. En eski tiplerinde kendinden sıcaklık düzeltmesi olmadığından, gösterge değerinin sıcaklık değişimlerine olan bağımlılığı büyük olmuştur. Daha sonraları tüm gövde invar çeliğinden imal

edilmiş, civanın doldurulacağı hacimi belirleyen alttaki parçanın boyutları ve civa hacmi uygun seçilerek bu sorun nispeten ortadan kaldırılmıştır. Bu cihazların imalatı ve montajı esnasında civanın doldurulduğu rezervuarda hiç hava kalmamasına özen gösterilmesi gerekmektedir [2].

1.4.3. Elektriki kuvvet ölçme cihazları

1.4.3.1. Gerinim ölçerli kuvvet ölçme cihazları

Gerinim ölçerli kuvvet dönüştürücüleri bugün en yaygın olarak kullanılan kuvvet ve yük ölçme cihazları olup, mekanik deformasyonun elektriksel çıktıya dönüştürülmesinde gerinim ölçerler (Strain Gages - DMS Dehnungmeßstreifen) kullanıldığından bu ismi almışlardır. Şekil 1.13'de şematik olarak gösterilmiş olan bu cihazlarda, gerinim ölçerler elastik sınırlar içinde deformasyon gösterecek olan çelikten imal kiriş veya halka tipi elemanlara sıcak veya soğuk olarak yapıştırılırlar. Uygulanan yüke bağlı olarak oluşan gerinim, gerinim ölçer tarafından hissedilerek bir direnç değişimi üretilir. Direnç değişimi, besleme gerilimi, gerinim ölçerin k-faktörü ve malzemenin elastiklik modülü gibi veriler değerlendirilerek uygulanan yüke karşılık gelen gösterge değeri elde edilir.



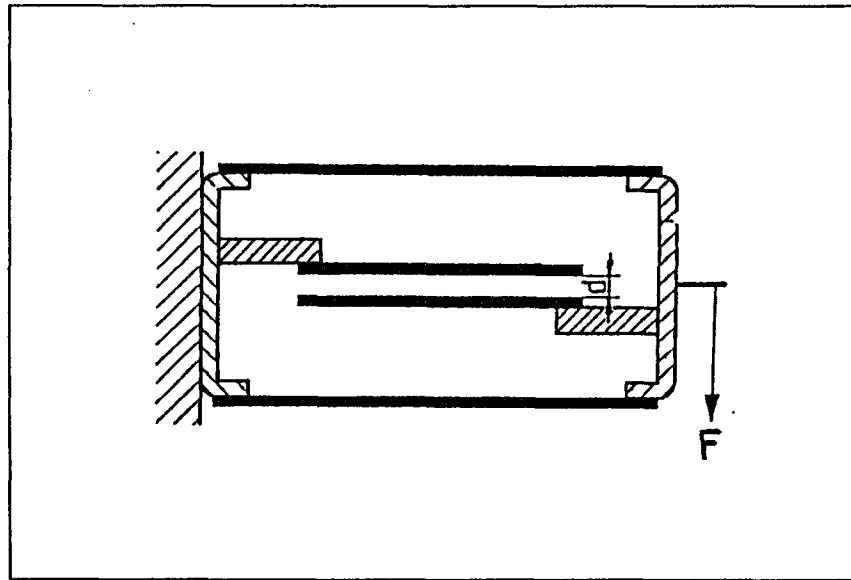
Şekil 1.13. Gerinim Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları

Bu tip cihazlardan yüksek doğruluklu sonuçlar elde edebilmek için dijital bir voltmetre veya potansiyometre ile beraber yüksek kararlılığa sahip bir DC güç kaynağına ihtiyaç vardır. Genellikle sıcaklık, nem, korozyon gibi harici etkilere karşı yalıtılmış olduklarından uzun süreli olarak kullanılabilirler [27].

İleriki bölümlerde, bu tip cihazların üretimi ve tasarımı ile ilgili daha geniş bilgi verilecektir.

1.4.3.2. Kapasitif kuvvet ölçme cihazları

Kapasitör veya kondansör denilen eleman, temel olarak yalıtkan bir malzeme ile birbirinden ayrılmış iki plakadan oluşur. Kondansatörün kapasitesi, plakalar arasındaki mesafe ile ters, plakaların yüzey alanı ile doğru orantılı olarak değişir. Plakaların yüzey alanını değiştirmenin güçlüğünden dolayı plakaların arasındaki mesafe değiştirilerek ölçüm yapılır. Bunun için plakalardan bir tanesi sabit, diğeri ise uygulanan yüke bağlı olarak hareketlidir. Yükün uygulanmasıyla plakalar arasındaki mesafe değişir; bu da kapasitenin değişmesine neden olur. Bir elektrikli titreşim devresinin elemanı olarak yerleştirilmiş bulunan bu kondansatörün kapasitesinin değişmesi bir akım değişimi meydana getirir. Ayrıca devrenin rezonans frekansı ve geçen akımın fazı da değişir [27].

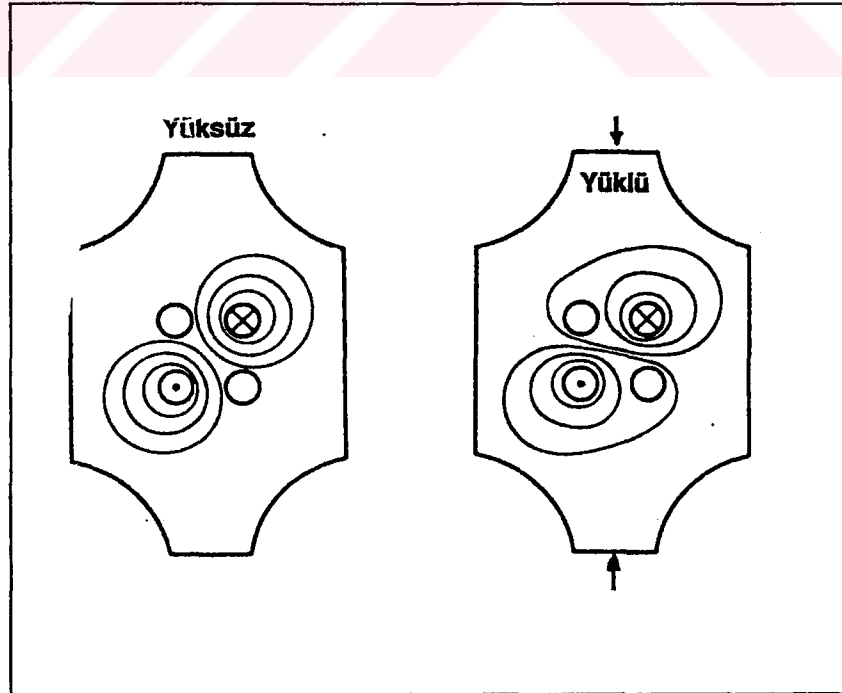


Şekil 1.14. Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları

Şekil 1.14'te gösterilmiş olan bu tip yük hücreleri dinamik kuvvet ölçümleri için tasarlanmış olup; geniş bir frekans çıkışına ihtiyaç vardır. Sıcaklığa karşı hassas olması ve elektrik devresinin karmaşıklığı ise en büyük dezavantajlarıdır.

1.4.3.3. Magnetoelastik kuvvet ölçme cihazları

Bu tip kuvvet ölçme cihazları uygulanan kuvvetle manyetik özelliklerinin değişmesinden faydalanarak ölçüm yaparlar. Temel olarak iki özelliklerinden faydalanılır. Bunlardan ilki manyetik anizotropi, diğeri ise manyetik geçirgenlikteki değişimdir. Yük hücrelerinde daha çok manyetik geçirgenlik özelliği kullanılıp, silisyumlu çelik yapraklar üstüste konularak elastik cismin şekli oluşturulur. Primer ve sekonder sargılar birbirleri ile dik açı oluşturacak şekilde plakalara monte edilir. Şekil 1.15'de görüldüğü gibi, elastik cisme kuvvet uygulanması manyetik geçirgenliğin yönlü karakteristiğini değiştirir ve sekonder sargıda çıkış voltajı oluşturur. Yumuşak çelik ve ferroalüminyum gibi magneto elastik malzemeler, manyetik geçirgenliğin değişimini belirleyecek şekilde tasarlanmışlardır. Bu tip yük hücreleri, yüksek AC voltajı verdiklerinden yüksek bir kullanılabilirliğe sahiptirler [22].



Şekil 1.15. Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazı

1.4.3.4. Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları

Bazı kristallerin basınç, kuvvet ve burulma tesiri ile elektriksel olarak yüklendikleri CURIE tarafından 1880 yılında belirlenmiştir. Teknolojide yaygın olarak kullanılan kristallere örnek olarak kuartz, turmalin ve senyet gösterilebilir. Özellikle kuartz kristali, sıcaklığa mukavemeti ve basınca dayanıklılığı sayesinde piezoelektrik sistemlerin vazgeçilmez elemanı olmuştur.

Turmalin ve senyet, nem ve sıcaklığa karşı çok hassas olduklarından ancak normal ortam koşulları altında kullanılırlar. Piezoelektrik sistemler uygulanan kuvvete tek başlarına yüksek seviyede elektriksel sinyal ürettiklerinden, ayrıca bir güç kaynağına ihtiyaç göstermezler. Kırılgan bir yapıya sahip olup, statik yüklemde elektrik şarjını tutamadıklarından, yalnızca dinamik yük ölçümlerinde kullanılırlar. Kuartz kristali ölçülecek yükün şekline ve yönüne göre çeşitli açılarda kesilerek herbir özel uygulamaya uygun yük hücreleri yapılabilir [22].

1.5. Kuvvet Ölçme Cihazlarının Kalibrasyonu

1.5.1. Kalibrasyon yöntemi

Kuvvet ölçme cihazlarının en yüksek doğrulukla kullanılacakları noktalar istisnai durumlar dışında “Tek Eksenli Test Makinaları”nın kalibrasyonudur. Bir diğer yaygın kullanım noktası ise sertlik ölçme makinalarının kuvvet ölçme kısımlarının kalibrasyonudur. Bu amaçla Avrupa Birliği ve Gümrük Birliği kavramlarının oluşmasından önce ülkeler kendi belirledikleri yöntemlerle kalibrasyon yaparlarken; globalleşen dünyada ölçmenin mutlak gerekliliğinin yanında en temel şart olan ölçümlerin mukayese edilebilirliği koşulunu sağlamak amacıyla “Euronorms” olarak tüm dillerde ifade edilen Avrupa Standartları geliştirilmiştir. Bu kapsamda tek eksenli test makinalarının statik olarak doğruluklarının kontrolü için kullanılan kuvvet ölçme cihazlarının kalibrasyonunu düzenleyen EN 10002-3 no’lu norm Mayıs 1994’de yürürlüğe girmiştir. Türkiye Cumhuriyeti’nin de Gümrük Birliği içinde yer alması ile T.C. sınırları içinde bu normların uygulanması koşulu oluşmuştur [4], [8],[11], [13].

Bu normda tarif olarak kalibrasyonun, değerleri kesin olarak bilinen kuvvetlerin yükü taşıyan elemana uygulanması ve kuvvet lme cihazının ayrılmaz bir parçası olarak kabul edilen sehim-lme sisteminde verilerin kaydedilmesinden ibaret olduğu belirtilmiştir.

Elbetteki, elektriki ölçümler yapılması durumunda; gösterge elemanı, en azından aynı ölçüm belirsizliğine sahip olduğu gösterilebilen bir başka gösterge elemanı ile değiştirilebilir.

1.5.2. Kalibrasyon Prosedürü

1.5.2.1. n yükleme

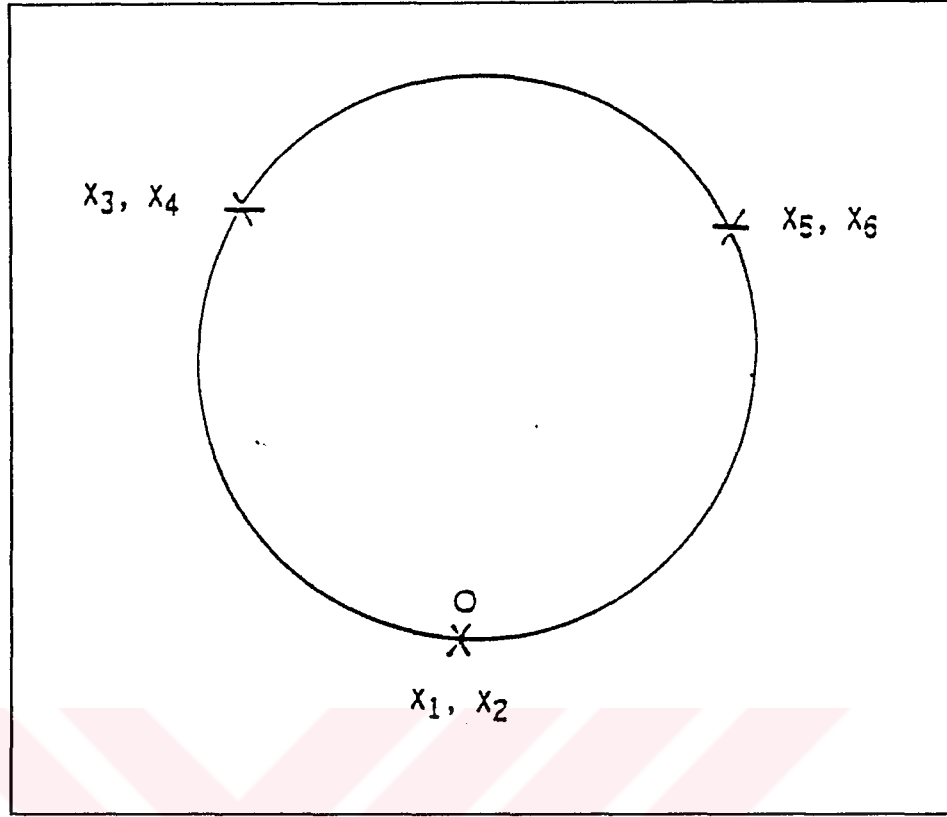
Kalibrasyon kuvvetleri uygulanmadan önce, maksimum kuvvet cihaza belirtilen yönde (ekme veya basma)  defa uygulanır. Her bir n yükün uygulanma süresi 1 ila 1.5 dakika arasındadır.

1.5.2.2. İşlem

Kalibrasyon, lme cihazına artan değerlerde iki seri kalibrasyon kuvvetinin cihazı zedelemeyen uygulanmasıyla yapılır. Bu esnada kuvvet lme cihazının pozisyonu değiştirilmez.

Ardından, en az iki ilave seri artan ve azalan değerlerde uygulanır. Herbir ilave kuvvet serisi arasında, lme cihazı kendi ekseni etrafında simetrik olarak, 360° 'ye eşit olarak dağıtılmış konumlara (rnek, 0° , 120° , 240°) döndürülür. Bunun mümkün olmadığı durumlarda, şu üç konumun uygulanması kabul edilebilir : 0° , 180° , 360° (Bkz. şekil 1.16).

Enterpolasyon eğrisinin belirlenebilmesi için, kuvvet basamak sayısı 8'den az olmamalı ve bu kuvvetler kalibrasyon bölgesi üzerinde mümkün olduğunca düzgün bir şekilde dağılmış olmalıdır.



Şekil 1.16. Kuvvet Ölçme Cihazının Kalibrasyon Sürecindeki Konumları

Kuvvet ölçme cihazına, maksimum kuvvet ile ardıl kuvvetlerin uygulanacağı yönde (basma veya çekme) üç defa ön yükleme yapılır; aynı şekilde, yükleme yönünün değişmesi durumunda, maksimum kuvvet yeni yönde üç defa uygulanır.

Yüklemeler arasında, yüksüz duruma karşılık gelen gösterge değerleri, sıfır yüke dönülmesinin ardından en az 30 saniye beklendikten sonra kaydedilir.

Kalibrasyon esnasında, en az bir defa, cihaz paketlenip gönderilecekmiş gibi parçalarına ayrılır. Genel olarak, bu işlem kalibrasyon kuvvetlerinin ikinci ve üçüncü serileri arasında yapılır. Kuvvet ölçme cihazına, bir sonraki kalibrasyon kuvvet serileri uygulanmadan önce, maksimum kuvvet üç kez uygulanır.

Elektrikli kuvvet ölçme cihazının kalibrasyonuna başlanmadan önce, sıfır sinyali kaydedilir.

1.5.2.3 Yükleme koşulları

Birbirini izleyen iki yükleme arasındaki zaman aralığı, mümkün olduğunca düzgün olmalı ve kuvvet değişiminin başlangıcından itibaren minimum 30 saniye geçmeden gösterge değeri alınmamalıdır. Kalibrasyon, $\pm 1^\circ\text{C}$ kararlılığı olan bir sıcaklıkta gerçekleştirilmeli, bu sıcaklık 18 ila 28°C aralığında olmalı ve kaydedilmelidir. Kuvvet ölçme cihazının kararlı bir sıcaklığa ulaşması için yeterli zaman geçmelidir. Gerinim ölçerli dönüştürücüler, kalibrasyon öncesinde 30 dakikadan az olmamak kaydıyla, enerji kaynağına bağlanmalıdır.

1.5.2.4. Sehimin belirlenmesi

Sehim, kuvvet uygulandığı durumdaki gösterge değeri ile yüksüz durumdaki gösterge değeri arasındaki fark olarak tanımlanır.

Sehimin bu tanımı, çıkış sinyaline ait uzunluk birimindeki gösterge için olduğu kadar, çıkış sinyaline ait elektrik birimindeki gösterge için de uygulanır.

1.5.3. Kuvvet ölçme cihazının değerlendirilmesi

Bu başlığın altında kullanılan semboller ve açıklamaları Tablo 1.3'te verilmiştir.

1.5.3.1. Bağlı tekrarlanabilirlik hatası, b ve b'

Bu hata, her bir kalibrasyon kuvveti için (1.20) ... (1.23) no'lu formüller kullanılarak ölçme cihazının döndürüldüğü ve döndürülmediği konumlar da ayrı ayrı hesaplanır:

$$b = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_r} \times 100 \quad (1.20)$$

burada,

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3} \quad (1.21)$$

Tablo 1.3. Kuvvet Ölçme Cihazının Değerlendirilmesinde Kullanılan Seboller

Sembol	Birim	Açıklama
F_N	N	Ölçüm bölgesinin maksimum kapasitesi
F_f	N	Kuvvet dönüştürücülerinin maksimum kapasitesi
i	-	Gösterge elemanının artan test kuvvetlerindeki gösterge değeri ⁽¹⁾
i'	-	Gösterge elemanının azalan test kuvvetlerindeki gösterge değeri ⁽¹⁾
i_0	-	Gösterge elemanın kuvvet uygulanmadan önceki gösterge değeri ⁽¹⁾
i_f	-	Gösterge elemanın kuvvet uygulandıktan sonraki gösterge değeri ⁽¹⁾
X	-	Artan test kuvvetlerindeki sehim
X'	-	Azalan test kuvvetlerindeki sehim
\bar{X}_r	-	Dönümlü, sehimlerin ortalama değeri
\bar{X}_{wr}	-	Dönümsüz, sehimlerin ortalama değeri
X_{max}	-	Maksimum sehim
X_{min}	-	Minimum sehim
X_a	-	Sehimin hesaplanmış değeri
X_N	-	Maksimum kapasiteye karşılık gelen sehim
b	%	Dönümlü bağıl tekrarlanabilirlik hatası
b'	%	Dönümsüz bağıl tekrarlanabilirlik hatası
f_0	%	Bağıl sıfır hatası
f_c	%	Bağıl enterpolasyon hatası
r	-	Gösterge elemanının çözünürlüğü
u	%	Kuvvet ölçme cihazının bağıl tersinebilirlik hatası

⁽¹⁾ Sehime karşılık gelen gösterge değeri.

$$b' = \frac{|X_2 - X_1|}{\bar{X}_{wr}} \times 100 \quad (1.22)$$

burada

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (1.23)$$

1.5.3.2. Bağıl enterpolasyon hatası, f_c

Bu hata, sehim kalibrasyon kuvvetinin bir bağıntısı olarak veren birinci, ikinci veya üçüncü derece bir eşitlik kullanılarak belirlenir. Kullanılan bu eşitlik kalibrasyon raporunda belirtilir:

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \times 100 \quad (1.24)$$

1.5.3.3. Bağıl sıfır hatası, f_0

Sıfır değeri, testin her bir serisinden önce ayarlanır ve seri sonrasında kaydedilir. Sıfır gösterge değeri, yük tamamen kaldırıldıktan yaklaşık 30 saniye sonra alınır.

Bağıl sıfır hatası (1.25) no'lu formül ile hesaplanır:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \quad (1.25)$$

1.5.3.4. Bağıl tersinebilirlik hatası, u

Bağıl tersinebilirlik hatası, doğruluğun kontrolünün artan ve azalan kuvvetlerle yapıldığı her bir kalibrasyonda belirlenir [3].

Artan ve azalan kuvvetlerde elde edilen değerler arasındaki fark, aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanacak bağıl tersinebilirlik hatasını verir:

$$u = \frac{i' - i}{i} \times 100 \quad (1.26)$$

1.5.4. Kuvvet ölçme cihazının sınıflandırılması

Kuvvet ölçme cihazlarının sınıflandırılacağı bölge, her bir kalibrasyon kuvvetinin maksimum kuvvetten başlayarak birbirini takip ettiği ve bu kuvvetten en düşük kuvvete kadar azaldığı değerlendirilerek belirlenir. Sınıflandırma bölgesi, sınıflandırılma koşullarının yerine getirildiği en son kuvvet değerinde sona erer.

Kuvvet ölçme cihazı,

- ya belirli kuvvetler için,

- ya da enterpolasyon için

sınıflandırılır.

Kuvvet ölçme cihazının sınıflandırılma bölgesi, F_N değerinin en azından %50'si ile %100'ü arasındaki bölgeyi kapsar.

Sadece belirli kuvvetler için sınıflandırılan cihazlar için, dikkate alınması gereken kriterler şunlardır:

- bağıl tekrarlanabilirlik hatası;
- bağıl sıfır hatası;
- bağıl tersinebilirlik hatası.

Enterpolasyon için sınıflandırılacak cihazlar için, aşağıdaki kriterler dikkate alınır:

- bağıl tekrarlanabilirlik hatası;
- bağıl enterpolasyon hatası;
- bağıl sıfır hatası;
- bağıl tersinebilirlik hatası.

Kalibrasyon kuvvetlerinin belirsizliğine ve kuvvet ölçme cihazının sınıfına uygun olarak Tablo 1.4'te bu değişik parametrelerin değerleri verilmiştir.

Tablo 1.4 : Kuvvet Ölçme Cihazının Sınıflandırılma Kriterleri

Sınıf	Kuvvet ölçme cihazının bağıl hataları, %					Kalibrasyon kuvveti Belirsizlik %
	Tekrarlanabilirlik		Enterpolasyon f_c	Sıfır f_0	Tersinebilirlik u	
	b	b'				
00	0.05	0.025	± 0.025	± 0.012	0.07	± 0.01
0.5	0.10	0.05	± 0.05	± 0.025	0.15	± 0.02
1	0.20	0.10	± 0.10	± 0.050	0.30	± 0.05
2	0.40	0.20	± 0.20	± 0.10	0.50	± 0.10

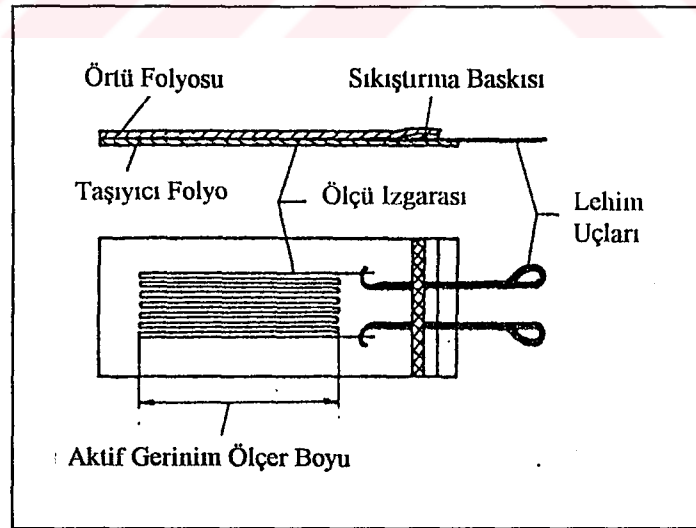
¹⁾ Kalibrasyon kuvvetlerinin belirsizliği, kuvvet kalibrasyon makinasına ait sistematik ve rasgele hataların toplanmasıyla elde edilir.

BÖLÜM 2. GERİNİM ÖLÇERLER VE WHEATSTONE KÖPRÜSÜNE TEORİK YAKLAŞIM

2.1. Gerinim Ölçerler ve Yapı Tarzları

Elektrik dirençli gerinim ölçerlerin çalışma prensibi, 1856 yılında Lord Kelvin tarafından ifade edilmiş olan şu temele dayanmaktadır: “Elektriki iletkenler mekanik olarak bir gerilime tabi tutulduklarında oluşan birim şekil değişimi ile orantılı olarak, elektrik direnç değerlerini değiştirirler. Genel olarak uzama yönünde birim şekil değişimleri elektrik direnç değerinde artışa, kısalma yönünde birim şekil değişimleri ise elektrik direnç değerinde azalmaya yol açar.”

Mekanik gerilmelerin elektriksel büyüklüğe dönüştürülmesinde kullanılan elektrik dirençli gerinim ölçerler amaca göre çok değişik şekil ve karakteristikte imal edilmektedir. Bir gerinim ölçer elemanı incelendiğinde temel olarak üç kısımdan oluştuğu görülür [9], [14], [23].



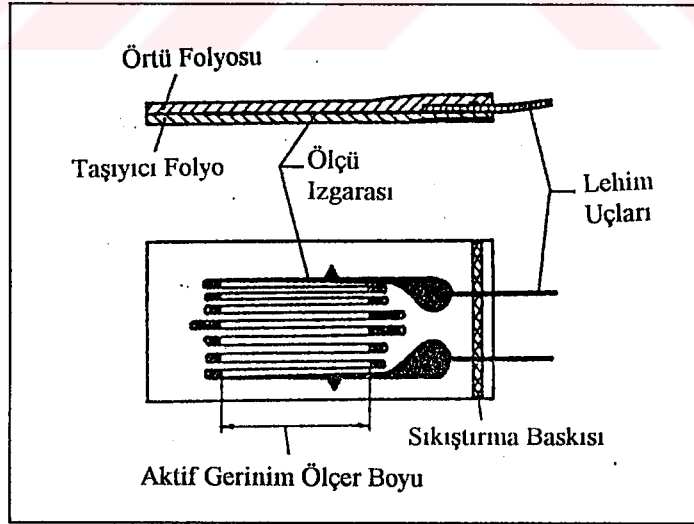
Şekil 2.1. Bir Gerinim Ölçer Elemanının Yapısı

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, ölçme yapılan malzeme ile birlikte şekil değiştirerek ΔR direnç farkını yaratan madeni uzama teli, iki izole folyo arasında yer alır. Uzama telinin

çapı $18 - 25 \times 10^{-3}$ mm'dir. Bir kısım uzama telleri ise $3 - 5 \times 10^{-3}$ mm kalınlığında direnç malzemesinden kesilmiş madeni folyodan yapılmaktadır. En yaygın tel malzemeleri konstantan (Cu - Ni) veya isoelastik (Fe - Ni) alaşımlarıdır. Bu malzemelerin sıcaklıkla dirençleri çok az değişir. Özgül dirençleri yüksektir ve uzayabilme yetenekleri vardır.

Yüksek sıcaklıklardaki ölçümlerde Pt - Ir alaşımından yapılmış teller kullanılır. 150°C ye kadar olan çalışmalarda, çok küçük şekil değişikliklerine karşın daha büyük ölçüde direnç değiştiren P ve N tipi silisyum da kullanılmaktadır. Transistör ve diot yapımında kullanılan P ve N silisyum aslında bir iletken olmamakla beraber, içine $1/10^8$ oranında, dış yörüngesinde 3 veya 5 elektron bulunduran Bor, Galyum, İndiyum, Fosfor, Arsenik gibi elementlerin katılmasıyla, iletkenliğinin yaklaşık onaltı defa artırarak bu amaca hizmet edebilecek duruma getirilmektedir.

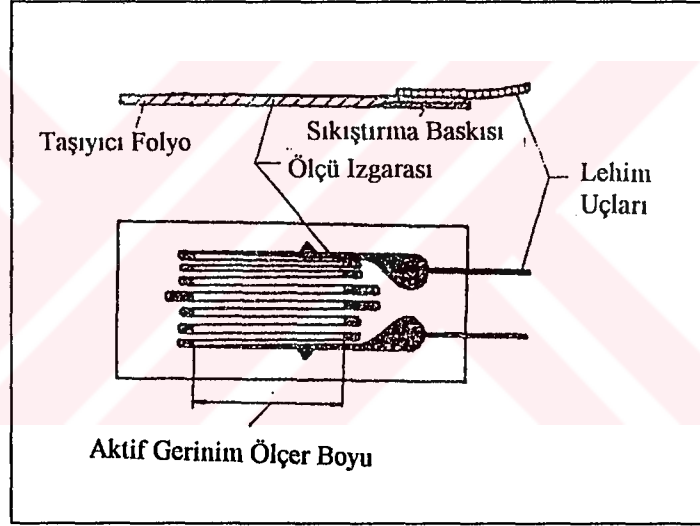
İkinci kısım; değişik şekillere sahip olabilen, uzama telini içine alan, elektriksel yönden izole, örtü ve taşıyıcı folyodan oluşmaktadır. Üçüncü kısım ise, uzama telinin dış devrelere bağlanmasını sağlayan, daha kalın lehim uçlarından meydana gelmiş olup; bunlar folyo içindeki uzama teline kaynak edilmişlerdir.



Şekil 2.2. Ölçüm Izgarası Metal Folyo Olan Bir Gerinim Ölçer

Şekil 2.2'de metal folyodan yapılmış ölçü ızgarasına sahip bir gerinim ölçer ve şekil 2.3'te plastik ve benzeri gibi küçük elastikiyet modülüne sahip ince malzemelerin

ölçülmesinde kullanılan ve örtü folyosu bulunmayan çok ince bir gerinim ölçer görülmektedir. Bunlardan başka, çeşitli ölçme amaçlarına uygun, iki veya üç gerinim ölçer ızgarasını bir arada bulunduran rozet gerinim ölçerler ve zincir gerinim ölçerler de yapılmaktadır. -200°C ve altındaki sıcaklıklardan, + 1000°C 'yi aşan sıcaklıklara kadar ölçüm yapılabilecek serbest ölçü ızgaralı gerinim ölçerler özel kılıf içinde hazırlanmaktadır. Serbest ızgaralı gerinim ölçerlerin örtü ve taşıyıcı folyolarının bulunmaması, ölçüm noktasına çok yakın küçük termokupulların uygulanmasına olanak vermiştir. Böylece, sıcaklık değişiminin etkilerini gidermek kolaylaşmıştır. Sadece madeni malzemelerin (örneğin çelik ve temper döküm) ölçülmesinde kullanılmak üzere, çok ince çelik lameller üzerine yapıştırılmış, nokta kaynağı ile tutturulabilen gerinim ölçer tipleri de uygulamaya aktarılmış durumdadır [32].



Şekil 2.3. Örtü Folyosu Bulunmayan Bir Gerinim Ölçer

2.2. Direnç Değişimi ile Birim Şekil Değişimi Arasındaki İlişki

Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki, üzerinden akım geçen bir telin mekanik gerilme neticesinde uzatılması durumu ele alınarak incelendiğinde, aşağıdaki şekilde analiz edilebilir:

$$R = \lambda \cdot \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

R : Telin direnci

λ : Tel malzemesinin özgül direnci

L : Telin uzunluğu

A : Telin kesit alanı,

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2.2)$$

Logaritma alındığında,

$$\log R = \log \lambda + \log L - 2 \cdot \log A \quad (2.3)$$

$$\log A = \log \pi + 2 \cdot \log r \quad (2.4)$$

Türevi alındığında;

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} - 2 \cdot \frac{dr}{r} \quad (2.5)$$

Silindirik bir telde aksenal birim şekil değişimi,

$$\epsilon_l = dl/l \quad (2.6)$$

yatay eksende,

$$\epsilon_r = dr/r = \nu \cdot dl/l \quad (2.7)$$

birim şekil değişimini doğurur.

$$\epsilon_r = \frac{dr}{r} = -\nu \frac{dl}{l} \quad (2.8)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\lambda}{\lambda} + \frac{dL}{L} \cdot (1 + 2 \cdot \nu) \quad (2.9)$$

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = \frac{\frac{d\lambda}{\lambda}}{\frac{dL}{L}} + (1 + 2 \cdot \nu) \quad (2.10)$$

Bridgman'a göre (1929), hidrostatik basınç altındaki metaller için, c : malzeme sabiti ise aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = c \cdot \left(\frac{dV}{V} \right) \quad (2.11)$$

Bu koşulun mekanik gerilme altındaki metaller içinde uygulanabileceği kabul edilirse;

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = c \cdot \frac{dV}{V} = c \cdot \left(\frac{dL}{L} + \frac{dA}{A} \right) = c \cdot \frac{dL}{L} \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \quad (2.12)$$

Dolayısı ile

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = (1 + 2 \cdot \nu) + c \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \quad (2.13)$$

(2.13) no'lu eşitliğin sağ tarafı, bir gerinim ölçerin, ölçme cihazı olarak hassasiyetinin ölçüsünü vermektedir ve yaygın olarak k harfi ile gösterilmekte olup; "k-faktörü" olarak anılmaktadır.

Böylelikle temel eşitlik;

$$\frac{dR}{R} = k \cdot \frac{dL}{L} \quad (2.14)$$

$$k = (1 + 2 \cdot \nu) + c \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \quad (2.15)$$

şeklini almaktadır [15].

2.3. Ölçme Köprüleri ve k-Faktörü

İngiliz fizikçilerinden Charles Wheatstone, 1843 yılında kendi adıyla anılan ve bilinen dirençlerin karşılaştırılmasıyla bilinmeyen direncin bulunmasına olanak veren köprü devresini bulmuştur. Wheatstone köprüsü ile bütün koşullarda bir direncin değişimi ölçülebilir. Köprü elemanı olarak kullanılan gerinim ölçerlerin ölçüm yapılacak yerlere iyi bir şekilde yapıştırılmalarıyla, fiziksel boyutlarda meydana gelen değişimleri elektriki direnç değişimine dönüştürmek ve bu değişimi saptamak konunun özünü oluşturur [33].

Direnç değişimi ile boyutsal değişim arasındaki ifade matematiksel olarak,

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.16)$$

eşitliği ile gösterilebilir.

R : Gerinim ölçerin gerilmeden önceki direnci

ΔR : Gerilmenin yarattığı direnç farkı

L_0 : Malzemenin ilk boyutu

ΔL : Gerilmenin yarattığı uzama

k : Gerinim ölçerin orantı faktörü

$\Delta L/L_0$ oranı ε ile ifade edilir ve gerinim ölçerin birim uzaması olarak adlandırılır. Malzemeye uygulanan gerilme, gerinim ölçer tarafından direnç değişimine dönüştürülürken, önceden her gerinim ölçer için deneysel olarak bulunan k orantı faktörü dikkate alınır. Gerinim ölçerin saptanan direnç değişiminin k'ya bölünmesi ile malzemedeki birim uzama bulunur. Ölçüm yapılan malzemenin E elastikiyet modülü biliniyorsa (bu değer her malzeme için deneysel olarak saptanmıştır) malzemedeki tek eksenli gerilme hali için,

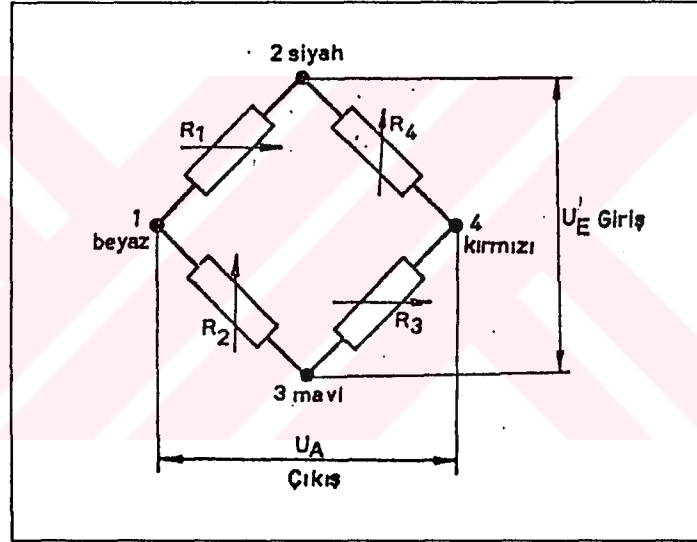
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.17)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Aynı eşitlik,

$$\sigma = E \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil 2.4'te her zaman kullanılan bir gerinim ölçer tam köprüsü şematize edilmiştir. 4 kolu bulunan köprü R_1 , R_2 , R_3 , R_4 gerinim ölçer elemanlarından oluşmaktadır. Çeşitli firmalar köprü köşelerini belirli sayılar ve renklerle kodlayarak kullanma kolaylığı sağlamıştır. Böylece, hazır alınan bir köprü devresinin giriş ve çıkış uçları kolayca saptanabilmektedir.



Şekil 2.4. Wheatstone Köprüsünde Renk ve Sayı Kodlaması

Bu uygulamada 2 - 3 köşeleri giriş köşegeni , 1 - 4 köşeleri çıkış köşegeni üzerinde bulunmaktadır. Çıkış köşegeni bazan ölçüm köşegeni olarak da adlandırılır. Giriş köşegenine uygulanan gerilim giriş gerilimi veya besleme gerilimi olarak bilinir.

Çıkış geriliminin değeri, giriş gerilimine ve R_1/R_2 , R_4/R_3 dirençlerinin oranlarına bağlıdır. Genel olarak,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (2.19)$$

eşitlikleri geçerlidir. Özel bir hal olarak $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ veya $R_1/R_2 = R_4/R_3$ koşulu varsa $U_A/U_E = 0$ (Sıfır) olur.

Uygulamada sağladığı yararlar yönünden U_A/U_E oranı başlangıçta daima sıfır yapılmaya çalışılır.

R_1, \dots, R_4 dirençlerinden bir veya birkaçının değerinin değişmesi, U_A çıkış geriliminin değişmesi ile sonuçlanır.

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ve R_1 direncinde meydana gelen bağıl direnç değişiminin ΔR_1 olması koşuluyla; (2.19) nolu eşitlikten,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R + \Delta R_1}{R + \Delta R_1 + R} - \frac{R}{R + R} = \frac{R + \Delta R_1}{2 \cdot R + \Delta R_1} - \frac{R}{2 \cdot R} \quad (2.20)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{2 \cdot R^2 + 2 \cdot R \cdot \Delta R_1 - 2 \cdot R^2 - R \cdot \Delta R_1}{4 \cdot R^2 + 2 \cdot R \cdot \Delta R_1} = \frac{R \cdot \Delta R_1}{R \cdot (4 \cdot R + 2 \cdot \Delta R_1)} \quad (2.21)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{\Delta R_1}{4 \cdot R + 2 \cdot \Delta R_1} \quad (2.22)$$

bulunur. Paydada bulunan $2 \cdot \Delta R_1$ 'in ihmal edilmesi ile (bu değer R ye göre çok küçüktür),

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (2.23)$$

şeklinde yazılabilir.

Direnç değişiminin bir eleman yerine bütün köprü elemanlarında meydana gelmesi ve başlangıçta $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ olmak koşulu ile

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R + \Delta R_1}{R + \Delta R_1 + R + \Delta R_2} - \frac{R + \Delta R_4}{R + \Delta R_4 + R + \Delta R_3} \quad (2.24)$$

yazılabilir.

Eşitliğin sağ tarafı kısaltılırken $\Delta^2 R$ ve $\Delta R/2$ değerleri paydada ve çok küçük olmaları nedeniyle ihmal edilirse,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.25)$$

elde edilir. Bu son eşitlikte $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ olduğundan,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.26)$$

eşitliğine ulaşılır. Uygulamada büyük bir çoğunlukla tam köprü devrelerinde köprü elemanlarının dirençleri aynı alınır. Dolayısıyla çok küçük bir farkla U_A/U_E değeri (2.26) no'lu eşitlikle hesaplanabilir. Köprü girişinde 2' ye (-) 3 'e (+) gerilim uygulanmışsa ve $R_1 > R_2 > R_3 > R_4$ ise 1 (+), 4(-) çıkış yapar. $R_1 < R_2$, $R_3 < R_4$ olduğunda çıkış ters döner, yani 1 (-), 4 (+) çıkış yapar. Alternatif gerilim uygulanmasında, U_E yön değiştirdikçe, U_A yukarıdaki açıklamalara uygun olarak yön değiştirecektir.

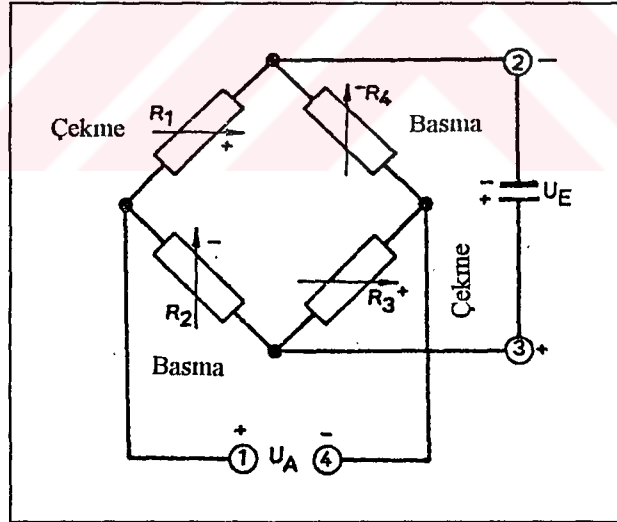
Gerinim ölçerlerde meydana gelen gerilmeler köprü devresinden geçecek akımı etkiler. Bunun için kabul edilen genel kural şöyledir: bir gerinim ölçer köprüsünde komşu gerinim ölçerlerin gerilmeleri aynı ise, her bir gerinim ölçerde meydana gelen direnç değişmelerin değerleri birbirlerinden çıkarılır. Gerilmeler birbirine ters ise, direnç değişmeleri toplanır. Buna göre çekmeye çalışan gerinim ölçerlerde meydana gelen direnç değişmeleri (+) işaretli, basmaya çalışanlarında (-) işaretli oldukları varsayılır. Karşılıklı köprü kollarında yer alan gerinim ölçerler aynı işaretle yüklenirlerse saptadıkları direnç değişmeleri toplanır, ayrı işaretli iseler birbirlerinden çıkartılır.

Ölçümlerde gerinim ölçer eksenlerinin yük eksenine çakışması istenir. Aksi halde gerinim ölçer, yükün sadece kendi eksenindeki izdüşümünü ölçebilir. Ekstrem bir örnek olarak, bir köşegeninden yüklenmiş tam köprünün çıkış geriliminin sıfır olması gösterilebilir.

Gerinim ölçerlerin ölçme eksenine tam paralel ve tam dik olacak şekilde yapıştırılmamaları halinde ölçme yapacak gerinim ölçer eksenleri ile ölçme eksenleri arasında kalan açı α ise, ölçülmek istenen P çekme veya basma kuvveti

$$P' = P \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha) \quad (2.27)$$

kadar ölçülecektir. Gerinim ölçerler ölçme yerine yapıştırılırken bu etmen göz önüne alınmalı ve doğru bir ölçüm için gerinim ölçer elemanı tam yük yönüne paralel olarak, mümkünse yük eksenine üzerine veya bu eksene dik yönde yapıştırılmalıdır. Şekil 2.5'te gerinim ölçer elemanları ile oluşturulan bir köprünün işaretlenmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Gerinim Ölçerlerden Oluşmuş Bir Köprüde İşaretleme

Eğer $\epsilon_1 > \epsilon_2$ ve (veya) $\epsilon_3 > \epsilon_4$, 2 (-), 3 (+) ise çıkışta 1 (+), 4 (-) olacaktır. Eğer $\epsilon_1 < \epsilon_2$ ve (veya) $\epsilon_3 < \epsilon_4$ ise çıkışta 1 (-), 4 (+) olacaktır. Burada ϵ ile ifade edilen $\Delta L/L$ bağıl uzama değerlerinin büyüklüğü ve küçüklüğü cebirseldir. Örneğin $+ 10 \mu\text{m}/\text{m} > + 5 \mu\text{m}/\text{m}$; $+ 2 \mu\text{m}/\text{m} > - 20 \mu\text{m}/\text{m}$ ve $- 5 \mu\text{m}/\text{m} > - 50 \mu\text{m}/\text{m}$ gibi.

Köprü kollarında bulunan bir veya daha fazla gerinim ölçer elemanının direnç değiştirmesi sonucu, (2.19) ve (2.25) numaralı eşitlikler uyarınca, köprü çıkışında girişe göre bir farklılık oluşmaktadır. Yapılan bir ölçüm neticesinde elde edilen sonuç (U_A/U_E) , uzamanın fonksiyonudur. Bu nedenle, her zaman kullanılan ölçme cihazlarının skalaları, uzamayı esas alan bir yöntemle kalibre edilmektedir. Genel olarak cihazlarda uzama birimi olarak $1 \mu\text{m}/\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{m}$ kullanılmaktadır. Bazı eski cihazlarda mikro uzama ifadesine de rastlanmaktadır. Bazı özel ölçü aletlerinde skalada okunan ε değeri, o andaki gerçekte değeri $(\Delta L/L)$ gösterir. Bu tip cihazlar gerinim ölçerin k faktörü dikkate alınarak kalibre edilmişlerdir. Çok yüksek doğruluklu ölçümler yapılması amacı ile geliştirilmiş cihazlarda ise doğrudan mV/V cinsinden gösterge değeri elde edilmektedir. Köprü kollarında 2, 3 ve 4'ün pasif gerinim ölçerlerle donatılmış olması sonucu, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0$ değerini almaktadır.

Bir kısım ölçme cihazları $k=2$ için kalibre edilmişlerdir. Bazı cihazlarda ise, kademeli bir şalter aracılığı ile değişik sabit k değerlerini seçme olanağı da vardır. Böylece cihaza ait k faktörünü gerinim ölçerin k faktörünü eşitleyerek $\varepsilon^* = \varepsilon_1$ elde edilebilmektedir. Cihaz sadece $k=2$ için kalibre edilmişse bu defa ε^* ölçüm değerinin (2.28) no'lu eşitliğe uygun olarak düzeltilmesi gerekir.

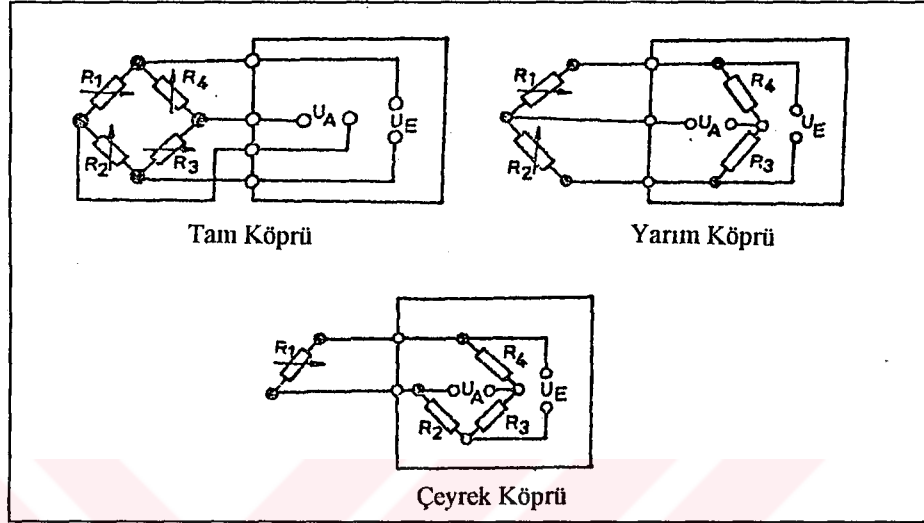
$$\varepsilon_1 = \varepsilon^* \cdot \frac{2}{k} \quad (2.28)$$

Böylesi bir durumda daha fazla bilgi edinmek için, cihazın kullanma kitabına başvurulmalıdır [17], [18].

2.4. Basit Gerinim Ölçer Köprüleri ve Ölçme Esasları

Gerinim ölçerlerin başlıca kullanılma alanları; deneysel gerilme analizi, ölçme cihazları ve ölçü büyüklüklerini dönüştürme konularını kapsar. Her bir ölçüm problemi, ihtiyaç duyulan bir veya daha çok uygun gerinim ölçerden oluşmuş devrelerle çözümlenebilir. Gerinim ölçerlerin oluşturduğu köprüler, aslında her zaman bir "tam köprü" dür. Ancak ölçüm yapılan aktif gerinim ölçer sayısı köprüleri adlandırma da esas alınmıştır. Buna göre köprüler, ölçme yerinde 4 elemanı varsa " tam köprü", 2 elemanı varsa

"yarım köprü", 1 elemanı varsa "çeyrek köprü" adı ile anılırlar. Ölçme yerinde bulunmayan gerinim ölçerlere, elektriksel yönden eşdeğer dirençler ölçü aleti içinden devreye sokularak bir tam köprü oluşması sağlanır. Şekil 2.6'da, adı geçen üç köprüye ait şematik bağlantılar verilmiştir.



Şekil 2.6. Tam, Yarım ve Çeyrek Wheatstone Köprüleri

Uygulamada genel olarak ölçüm büyüklüklerini dönüştüren düzenler, gerilme analiz düzenlerinden daha duyarlı çalışmaktadır. Bu nedenle ölçüm dönüştürücüsü olarak kullanıldığında, gerinim ölçerler tam köprü devresine sahip olmak zorundadır. Gerilim analizleri için yarım veya tam köprü devreleri başarıyla kullanılabilir. Bunlardan meydana gelebilecek zararlı etkiler uygun yöntemlerle giderilebilir. Çekme (basma), eğilme ve kesme (burulma) yüklenmelerinin gerilme yerinin doğru saptanması ve yükleme koşullarının bilinmesi ölçüm sonucunu etkilemektedir. Şekil 2.7'de tam ve şekil 2.8'de yarım köprü oluşturmuş gerinim ölçerlerin, gerilmeler sonucu değer değiştirmeleri halinde, köprü çıkışındaki değişiklikleri çeşitli olasılıklar için gösterilmiştir.

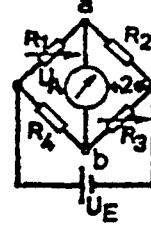
2.4.1. Çekme çubuğunda ölçümler

Çekme kuvveti ile zorlanan, şekil 2.9'da gösterilen çubukta gerilme yönündeki birim uzama $\epsilon_1 = \sigma/E$ gerilme yönüne dik yönde birim uzama ise $\epsilon_2 = \mu \cdot \epsilon_1$ kadar olmaktadır. Şu halde 1 no'lu gerinim ölçerlerin direnç değişimi $\Delta R_1 = \epsilon_1 \cdot k \cdot R_1$ ve 2 no'lu gerinim

Karşılıklı iki gerinim ölçerde direnç artması:

$$R_1 = R_0 + \Delta R ; R_3 = R_0 + \Delta R ; R_2 = R_4 = R_0$$

$$\frac{U_A}{U_E} = + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Karşılıklı diğer iki gerinim ölçerde direnç artması:

$$R_2 = R_0 + \Delta R ; R_4 = R_0 + \Delta R ; R_1 = R_3 = R_0$$

$$\frac{U_A}{U_E} = - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Karşılıklı iki gerinim ölçerde direnç azalması:

$$R_1 = R_0 - \Delta R ; R_3 = R_0 - \Delta R ; R_2 = R_4 = R_0$$

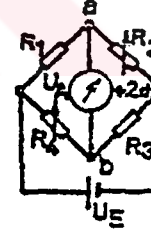
$$\frac{U_A}{U_E} = - \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Karşılıklı diğer iki gerinim ölçerde direnç azalması:

$$R_2 = R_0 - \Delta R ; R_4 = R_0 - \Delta R ; R_1 = R_3 = R_0$$

$$\frac{U_A}{U_E} = + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Karşılıklı iki gerinim ölçerde direnç azalması ve diğer iki gerinim ölçerde aynı miktarda direnç azalması:

$$R_1 = R_0 + \Delta R ; R_3 = R_0 + \Delta R ; R_2 = R_0 - \Delta R ; R_4 = R_0 - \Delta R$$

$$\frac{U_A}{U_E} = + \frac{\Delta R}{R}$$

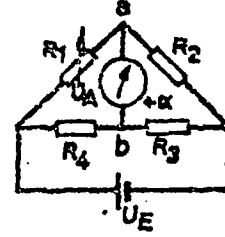


Şekil 2.7. Tam Köprü Devresinde Gerinim Ölçer Dirençlerindeki Değişimin Çıkışı Etkisi

Bir gerinim ölçerde direnç artması:

$$R_1 = R_0 + \Delta R$$

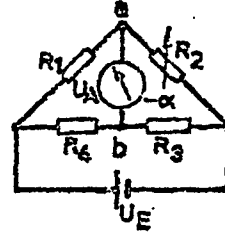
$$\frac{U_A}{U_E} = +\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Diğer bir gerinim ölçerde direnç artması:

$$R_2 = R_0 + \Delta R$$

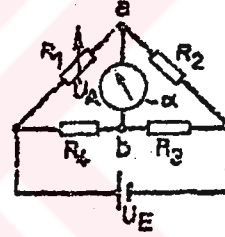
$$\frac{U_A}{U_E} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Bir gerinim ölçerde direnç azalması:

$$R_1 = R_0 - \Delta R$$

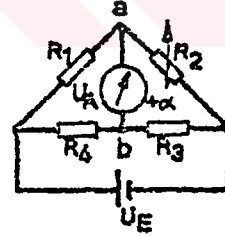
$$\frac{U_A}{U_E} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Diğer bir gerinim ölçerde direnç azalması:

$$R_2 = R_0 - \Delta R$$

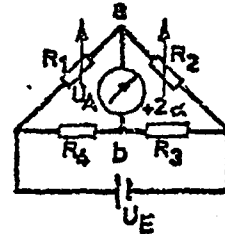
$$\frac{U_A}{U_E} = +\frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Bir gerinim ölçerde direnç azalması ve diğer bir gerinim ölçerde aynı miktarda direnç azalması:

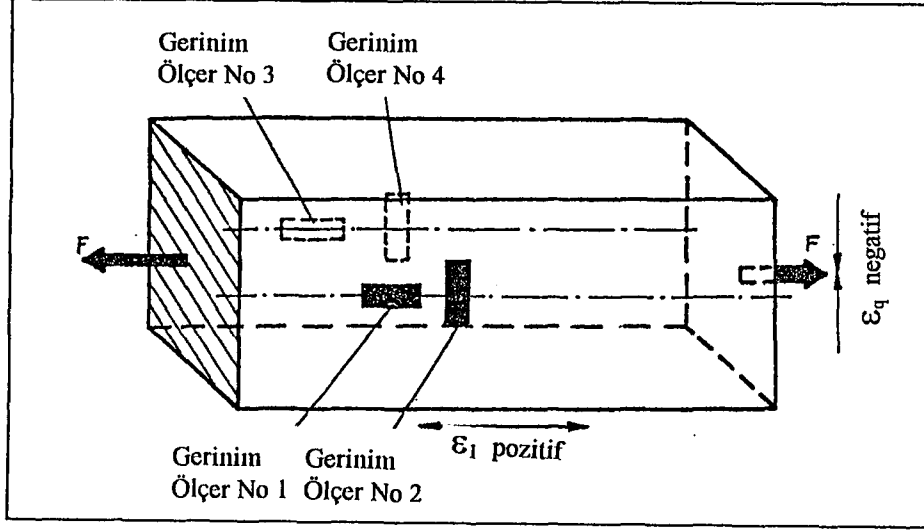
$$R_1 = R_0 + \Delta R ; R_2 = R_0 - \Delta R$$

$$\frac{U_A}{U_E} = +\frac{2}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$



Şekil 2.8. Yarım Köprü Devresinde Gerinim Ölçer Dirençlerindeki Değişimin Çıkışı Etkisi

ölçerin direnç değişimi $\Delta R_2 = \mu \cdot \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_2$ kadar olacaktır. Aynı eşitlikler 3 ve 4 no'lu gerinim ölçerler için de yazılabilir [7].



Şekil 2.9. Çekme Çubuğunda Gerinim Ölçerlerin Konumu

Burada μ , Poisson sayısı adı ile bilinen ve katı maddelerin elastik uzamaları için geçerli, yaklaşık değeri 0,3 civarında olan bir sayıdır. Gerçek değeri önceden hazırlanmış cetveller aracılığıyla veya deneysel olarak saptanır. Şekil 2.9'da gösterilen dört gerinim ölçer şekil 2.5'deki gibi indislenir ve bir tam köprü yapacak şekilde bağlanırsa, ölçme sonunda 2.26 no'lu eşitliğe uygun olarak;

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.29)$$

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_1 - (-\mu\varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\mu\varepsilon_3)] \quad (2.30)$$

eşitliği yazılabilir.

$$\mu = 0.3, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_3 \quad \text{ve} \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_4 \cong 0.3 \cdot \varepsilon_1$$

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} \cdot 2.6 \cdot \varepsilon_1 \quad (2.31)$$

elde edilir. 4 aktif gerinim ölçer tarafından oluşturulan köprü devresinden alınacak sinyal ε_1 uzamasının 2,6 katıdır. Bu nedenle, zorlanma yönündeki bu katsayı bazen köprü faktörü = (B) adı ile bilinir. Köprü faktörü B'ninde (2.31) no'lu eşitliğe alınmasıyla bu eşitlik;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot \varepsilon_1 \quad (2.32)$$

şeklinde yazılabilir. Çubukta basma gerilmesi olursa ε_1 den ε_4 'e kadar olan birim uzamaların sadece işareti değişecektir. Uygulamada esas gerilme yönündeki ε_1 uzaması araştırılıyorsa, (2.31) nolu eşitlik ε_1 için düzenlenerek;

$$\varepsilon_1 = \frac{4}{2.6 \cdot k} \cdot \frac{U_A}{U_E} \quad (2.33)$$

veya genel anlatım olarak;

$$\varepsilon_1 = \frac{4}{B \cdot k} \cdot \frac{U_A}{U_E} \quad (2.34)$$

elde edilir.

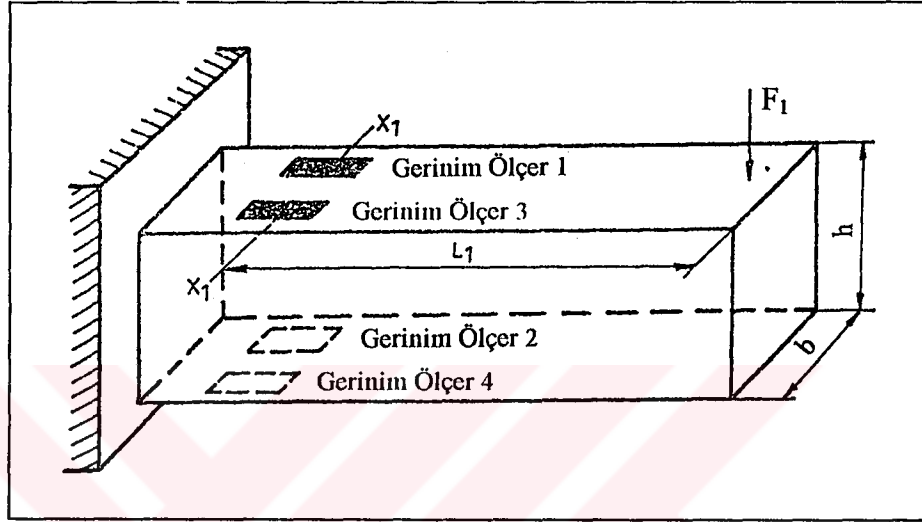
Yarım köprü ile yapılacak çalışmalarda 1 ve 2 no'lu gerinim ölçerlerin yüklenmesiyle B köprü faktörü 1,3'e (yarıya) inecektir. 1 ve 3 no'lu gerinim ölçerler yüklenir ve, 2 ve 4 no'lu gerinim ölçerlere eşdeğer sabit dirençlerle köprü oluşturulursa, bu durumda sıcaklık ve diğer etkenlerden doğacak hataların otomatik kompanzasyonu ortadan kalkar. Ayrıca, yaklaşık değeri 0,3 olan μ , Poisson sayısı' da hesaba girmeyeceğinden $B = 2$ alınır. Şüphesiz, bu durumda eğilmeden meydana gelecek gerilmeler kompanse edilmektedir.

2.4.2. Eğilme çubuğunda ölçümler

Eğilme için şekil 2.10'da verilen basit bağlantıdaki gerilmeler incelenecek olursa görülür ki, çubuğun üst yüzeyinde çekmeden doğan gerilme, çubuğun alt yüzeyinde

basmadan doğan gerilmeye denktir. Bu durumda, mutlak değerce bütün uzamalar birbirinin aynıdır ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4$). Uzamalar sadece işaret yönünden farklıdır. Dolayısıyla (2.26) no'lu eşitlik;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) + \varepsilon_3 - (-\varepsilon_4)] \quad (2.35)$$



Şekil 2.10. Eğilme Çubuğunda Gerinim Ölçerlerin Konumu

olur. İşaretlerin değişmesi sonucu $B = 4$ olduğuna göre;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot |\varepsilon| = k \cdot \varepsilon \quad (2.36)$$

yazılır. Sonuçta, meydana gelen uzamanın mutlak değeri;

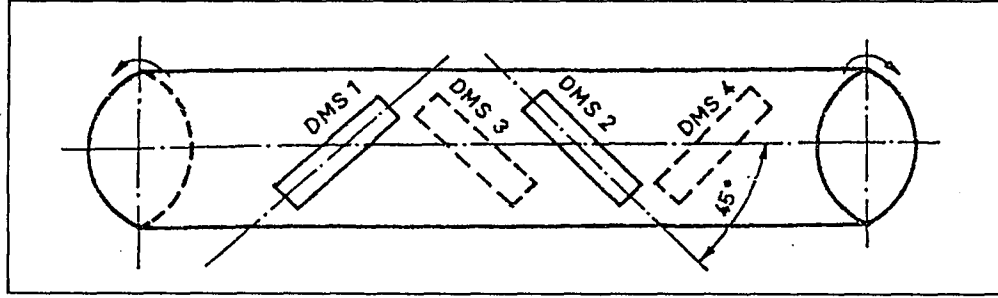
$$|\varepsilon| = \frac{U_A / U_E}{k} \quad (2.37)$$

olarak elde edilir. Hesaplanan ε değeri, çekme tarafı için (+), basma tarafı için (-) işaretli olacaktır.

Yarım köprü uygulamalarında 1 ve 2 no'lu gerinim ölçerler kullanılmalı ve $B = 2$ alınmalıdır.

2.4.3. Burulma çubuğunda ölçümler

Burulma çubuğundaki ilişkiler eğilme çubuğundaki ilişkilere oldukça benzerdir. Burada en büyük gerilme yönü çubuk eksenine $\pm 45^\circ$ lik açı yaptığından, gerinim ölçer elemanları şekil 2.11'deki gibi yapıştırılmalıdır.



Şekil 2.11. Burulma Çubuğunda Gerinim Ölçerlerin Konumu

Sağa doğru uygulanan döndürme momenti 1 ve 3 no'lu gerinim ölçerlerle uzama ve, 2 ve 4 no'lu gerinim ölçerlerle kısalma yaratır. Bu durum (2.25) no'lu eşitlik uyarınca, her bir uzama yada kısalma değerinin toplanmasıyla, (2.32) no'lu eşitlikte $B = 4$ için ifade edilirse,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot \varepsilon = k \cdot \varepsilon \quad (2.38)$$

yazılır. Buradan mutlak değerce uzama,

$$|\varepsilon| = \frac{U_A / U_E}{k} \quad (2.39)$$

elde edilir.

Dönme yönü belli değilse gerinim ölçerlere ait işaretler 2.3 no'lu kısımda anlatıldığı gibi bulunur.

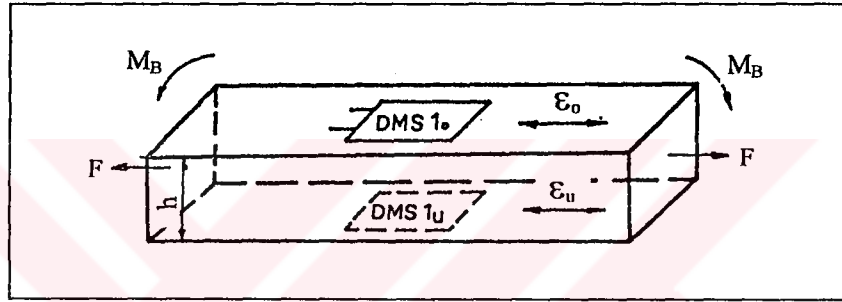
Burulma çubuğunda 1 ve 2 no'lu dirençler kullanılarak yarım köprü de yapılabilir. Kuşkusuz böyle bir uygulamada $B = 2$ olacaktır. Ölçüm dönen millerden sürtünme

bilezikleri yardımı ile yapılıyorsa, taşıma kablolarındaki kayıpların küçültülebilmesi için tam köprü gerinim ölçer bağlantılarına öncelik verilir.

2.5. Birden Fazla Gerilmenin Analiz ve Dengelendirilmesi

Uygulamada çoğu kez ölçme bölgesinde çekme, eğilme ve burulma gerilmeleri bir arada bulunabilir.

Böyle bir gerilmeye örnek Şekil 2.12'de verilmiştir. Şekildeki çubuk çekme gerilmesiyle birlikte eğilme momentinin de etkisi altındadır.



Şekil 2.12. Eğilmeye Yüklenmiş Çekme Çubuğu

Bu çubukta aşağıdaki uzamalar meydana gelir.

ϵ_o : Çubuğun üst tarafındaki toplam uzama,

ϵ_u : Çubuğun alt tarafındaki toplam uzama

ϵ_N : Çubuğun simetri ekseninden geçen çekme kuvvetinin yarattığı uzama,

ϵ_B : Eğilme momentinin yarattığı uzama.

ϵ_o ve ϵ_u toplam uzama (veya kısalma) şekil 2.12'de gösterildiği biçimde yapıştırılacak gerinim ölçerlerle ölçülebilir. Burada her gerinim ölçer şekil 2.5'te verilen çeyrek köprü bağlantısına sahip olup bağımsız ölçüm yapmaktadır. Üstteki gerinim ölçer

$$\epsilon_o = \epsilon_N + \epsilon_B \quad (2.40)$$

alttaki gerinim ölçer

$$\varepsilon_U = \varepsilon_N - \varepsilon_B \quad (2.41)$$

uyarımını verir. Bu iki ölçme uyarımından;

$$\varepsilon_N = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_U) \quad (2.42)$$

$$\varepsilon_B = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_U) \quad (2.43)$$

değerleri bulunur. Böylece çekme gerilmesinin yarattığı ε_N birim uzaması ve eğilme momentinin yarattığı ε_B birim uzaması bilindiğine göre, her iki uzamayı meydana getiren gerilme (2.17) no'lu eşitlikle hesaplanabilir.

Birlikte etki eden eğilme momenti ve çekme (basma) gerilmelerinin çubukta yarattığı değişim, grafik olarak şekil 2.13'de gösterilmiştir. $\varepsilon_N < |\varepsilon_B|$ koşulunda çekme ve basma gerilmelerinin eşit olduğu eksen (x) ayrıca belirtilmiştir.

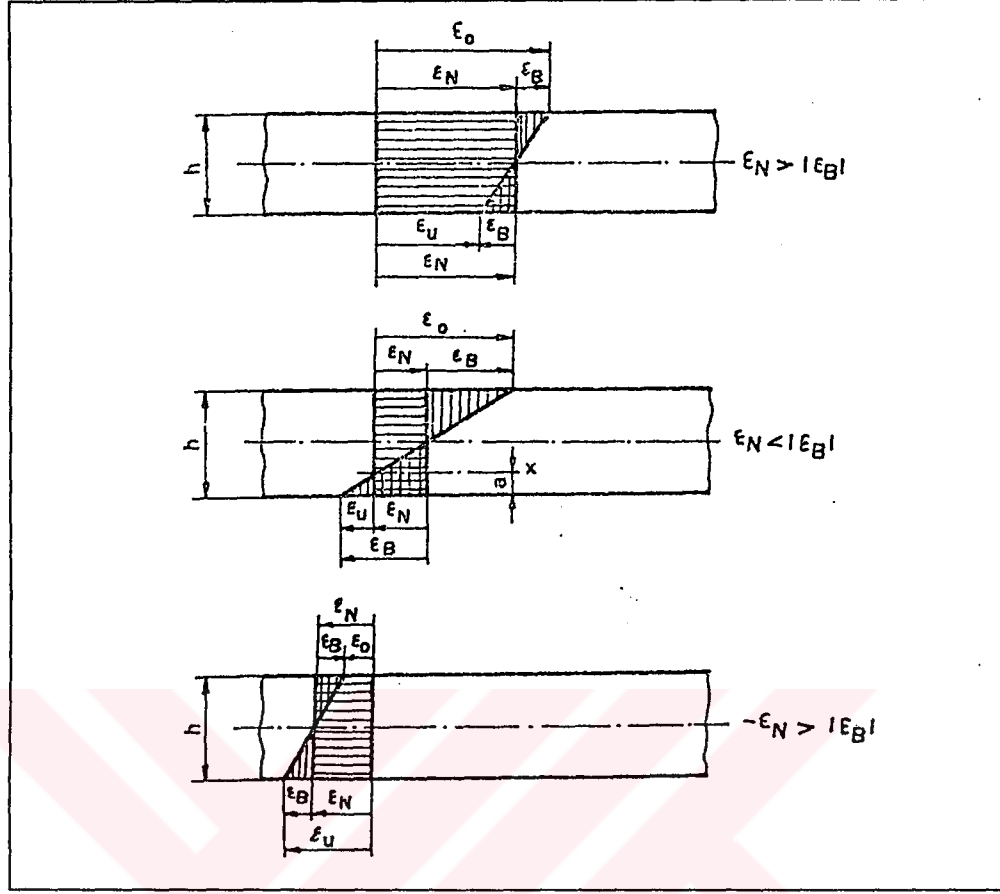
Ölçümlerde, sıcaklığın etkisini dengelemek için, sıcaklık dengeleyen gerinim ölçerler kullanılabileceği gibi, olanak bulunamazsa, gerilmeye dik yönde birer gerinim ölçer ilavesiyle de amaca ulaşılır. Burada gene üst ve alt gerinim ölçer grupları iki ayrı yarım köprünün aktif dirençleri olarak alınacaktır. Son durumdaki birim uzamalar,

$$\varepsilon'_0 = (1 + \mu) \cdot \varepsilon_0 = (1 + \mu) \cdot (\varepsilon_N + \varepsilon_B) \quad (2.44)$$

$$\varepsilon'_U = (1 + \mu) \cdot \varepsilon_U = (1 + \mu) \cdot (\varepsilon_N - \varepsilon_B) \quad (2.45)$$

olacaktır.

Ölçmede sadece eksenel yönde etki eden kuvvet bulunmak isteniyorsa, eğilme, burulma ve diğer yan kuvvetleri ortadan kaldırabilmek için eksenel ölçü yapan gerinim ölçerler kullanılır. Uygulamada şekil 1.9'daki sistem kullanılıyorsa, bağlantının



Şekil 2.13. Grafiksel Yöntemle Gerilme Analizi

simetrikliğinden yararlanır. Örneğin, böyle bir çubukta eğer bir de kağıt düzlemine dik yönde etkiyen bir eğme momenti varsa, bu durumda gerinim ölçer 1 çekmeye ve gerinim ölçer 3 basmaya çalışır. Birinin yarattığı direnç artışını diğeri ortadan kaldırır. Çünkü,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + (-\varepsilon_3) - (-\varepsilon_4)] \quad (2.46)$$

bağıntısı geçerlidir. Birim uzamalardan ε_1 çekme gerilmesi (+) ve ε_3 basma gerilmesi (-) değere sahip olacağından toplamları sıfır olur. Çubuğa bir burulma momenti uygulanırsa, ölçü köşegeninden yükleme yapıldığından U_A / U_E değeri sıfır olur. Eğilme momentinin etkisiyle gerinim ölçerler aşağıdaki uyarımları üretirler. Gerinim ölçer 1 : $+\varepsilon_B$, gerinim ölçer 2 : $-\mu\varepsilon_B$, gerinim ölçer 3 : $-\varepsilon_B$, gerinim ölçer 4 : $-\mu\varepsilon_B$. Bu şekilde, çıkıştan alınacak ölçüm değeri eğilme ve burulmadan arınmış olacaktır.

2.6. Kablo Hatalarının Arıtılması

Elektrik kabloları, tüm iletkenler gibi belirli ohmik dirence sahiptirler. Bu direnç, iletken cinsi, kesiti, uzunluğu ve sıcaklığı ile değişir. Uzunluğu, kesiti ve malzemesi bilinen bir iletkenin toplam direnci,

$$R = \frac{l \cdot \lambda}{q} = \frac{l}{q \cdot \chi} \quad (2.47)$$

eşitliği ile bulunur.

R : İletkenin direnci [ohm = Ω]

λ : İletkenin öz direnci [$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$]

χ : $1/\lambda$ [$\text{m} / \Omega \cdot \text{mm}^2$]

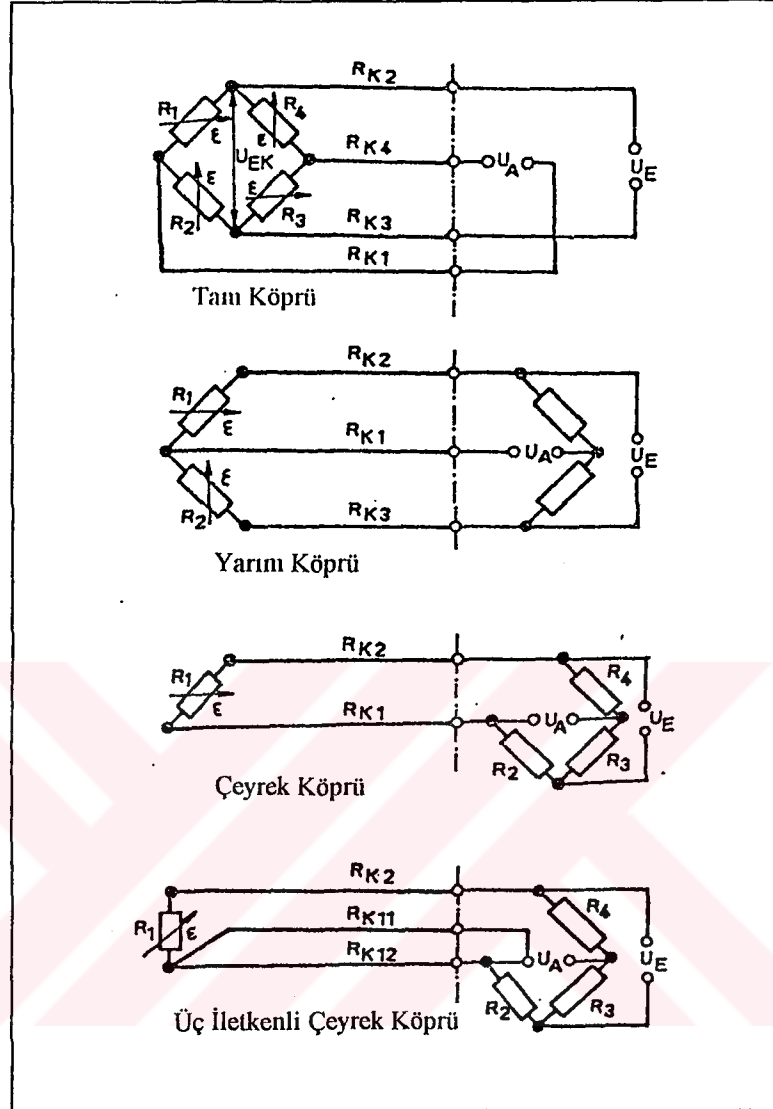
l : İletkenin boyu [m]

q : İletkenin kesiti [mm^2]

Bu eşitlik oda sıcaklığı (20°C) için geçerli olup, sıcaklığın değişmesi halinde, öz direnç değişeceğinden, toplam direnç de değişir. Her malzeme için sıcaklıkla öz direnç değişimi saptanmıştır. Örneğin bakır (Cu) için bu sıcaklık katsayısı $\alpha_{\text{RCU}} = 0.004 / ^\circ\text{C}$ 'dir.

Gerinim ölçer elemanları ile ölçümde, gerinim ölçer elemanlarında doğal direnç değişmelerinin hiç bozulmadan ölçme cihazına ulaşabilmesi için, bağlantıyı yapan iletkenlerin dirençleri ve bunların da sıcaklıkla değişmeleri dikkate alınmalıdır. Bu sakıncayı belirli oranda azaltmak amacıyla, iletken kesitleri kalın ve boyları kısa olmalıdır. Direnç ne kadar az olursa, direnç değişimide o kadar az olacak ve doğru bir ölçüme olanak verilecektir.

Tam köprü de taşıyıcı kablolar köprü kollarının dışında, yarım ve çeyrek köprü devrelerinde ise içinde yer alır. (Şekil 2.14). Bunların etkinlikleri uygulamada kullanılan köprü tipleri için ayrı ayrı incelenmiştir [33].



Şekil 2.14. Gerilim Ölçer Köprüleri ile Ölçme Cihazı İçindeki Dirençlerin Bağlantısı

2.6.1. Tam köprü devresinde kablo dirençleri

Tam köprü devrelerinde, köprü kollarında kullanılan kabloların dirençleri, boylarının birkaç cm olması nedeniyle dikkate alınmayacak kadar küçüktür. Burada R_{K2} ve R_{K3} iletkenleri köprü besleme devresi üzerindedir. Köprü ve uygulanan gerilim bu iletken dirençlerinin gerektirdiği kadar düşerek köprüye ulaşır. Köprüde etkili olan ve biraz düşmüş olan gerilim U_{EK} olursa

$$U_{EK} = U_E \cdot \frac{R_B}{R_B + R_{K2} + R_{K3}} \quad (2.48)$$

eşitliği ile gösterilir. Buradan çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki ilişki yazılırsa, köprü girişindeki etkin gerilim U_{EK} olduğuna göre;

$$\frac{U_A}{U_E \cdot \frac{R_B}{R_B + R_{K2} + R_{K3}}} = \frac{1}{k} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.49)$$

yazılır ve buradan ;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{k} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot \frac{R_B}{R_B + R_{K2} + R_{K3}} \quad (2.50)$$

eşitliği elde edilir. (2.50) no'lu eşitlikteki $R_B/(R_B+R_{K2}+R_{K3})$ ifadesi düzeltme faktörü olarak adlandırılır. R_B direnci köprünün 2 ve 3 köşeleri arasındaki olup değeri,

$$R_B = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (2.51)$$

eşitliğinden hesaplanır. R_{K2} ve R_{K3} dirençleri ise K_2 ve K_3 kablolarının dirençleri olup, kullanılan kabloda yazılı değilse, (2.47) no'lu eşitlikten hesaplanır. Bu kabloların normal olarak sıcaklıkla gösterecekleri direnç değişimleri ihmal edilecek kadar azdır.

Tam köprü devrelerinde, aygıtın giriş empedansının çok büyük olması nedeniyle; köprü çıkışını ölçü aygıtına götüren iletkenlerdeki direncin ve değişimin ölçü sonucuna etkisi minimumdur.

2.6.2. Yarım köprü devresinde kablo dirençleri

Yarım köprü uygulamalarında iletkenler gerinim ölçerlerle seri bağlı duruma geçtiğinden, gerinim ölçerlere ait duyarlılık değişecektir. Böyle bir uygulamada (Şekil

2.14) R_{K2} kablo direnci 1 nolu gerinim ölçere R_{K3} kablo direnci de 2 no'lu gerinim ölçere seri bağlanmış olacağından, gerinim ölçere ait yeni K faktörü K' ile gösterilirse,

$$K' = K \cdot \frac{R_{\text{Gerinimölçer}}}{R_{\text{Gerinimölçer}} + R_K} \quad (2.52)$$

eşitliği ile hesaplanacaktır. Gerinim ölçerin duyarlılığının değişmesi bağıl köprü çıkış gerilimini de etkiler. Bu etki;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot \left(\varepsilon_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{K2}} - \varepsilon_2 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{K3}} \right) \quad (2.53)$$

şeklinde bir değişimi doğurur. Gerinim ölçer dirençleri olan R_1 ve R_2 birbirine eşitse ve bir R direnci ile ifade edilirse, K_2 ve K_3 kablolarının R_{K2} ve R_{K3} dirençleride aynı ise ve ortak R_K değerine uyuyorsa;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{R}{R + R_K} \quad (2.54)$$

ifadesi elde edilir.

Gerinim ölçer ile seri bağlanmış kablo direncinin her değişimi, ölçüm devresini, gerinim ölçerin direnci değişiyormuş gibi etkiler. Yarım köprü devrelerinde sıcaklığın değişmesi, iletken dirençlerini de değiştireceğinden, bu değişimin aynı olabilmesi için her iki iletkenin de aynı uzunlukta, aynı kesitte ve aynı malzemedan yapılmış olması gerekir. Bu ölçümde, ölçüm aletinin giriş empendansının çok büyük olması, K_1 kablosunun R_{K1} direncinin değişimini etkisiz kılmaktadır.

2.6.3. Çeyrek köprü devresinde kablo dirençleri

Çeyrek köprü devreleri, zararlı etmenler nedeniyle, ancak özel koşullar altında ve bu etmenlerin tümüyle bilindiği durumlarda kullanılabilir. Böyle uygulamalarda, iletken dirençlerinin değişmesiyle ortaya çıkacak duyarlılık değişmesi aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$k' = k \cdot \frac{R_{\text{Gerinimölçer}}}{R_{\text{Gerinimölçer}} + R_{K1} + R_{K2}} \quad (2.55)$$

Köprü devresinin çıkış ve giriş gerilimleri arasındaki ilişki de;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{K1} + R_{K2}} \quad (2.56)$$

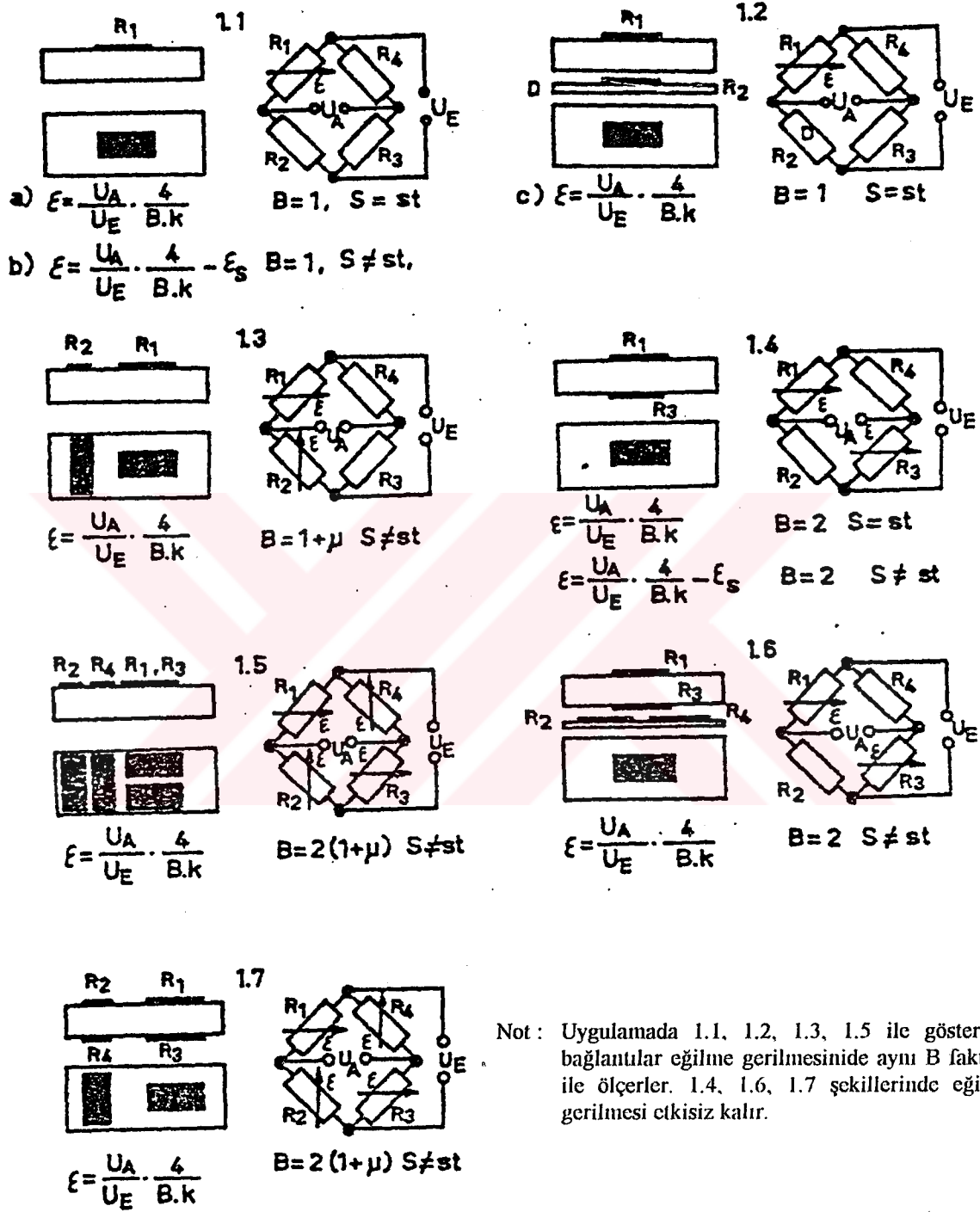
eşitliği ile belirlenebilir. Şekil 2.14 'de çeyrek köprü uygulaması için yapılacak bağlantı şematize edilmiştir. Aslında , çeyrek köprü devreleri sabit sıcaklık koşulları için uygundur. Değişen sıcaklık koşullarında, sıcaklığı dengeleyen gerinim ölçer tipleri kullanılmalıdır. Bu durumda bile dengelemenin bozulmaması için şekil 2.14'de gösterilen K_{11} çıkış kablosuna gereksinme vardır. Oluşturulan üç iletkenli ölçü sisteminde K_2 ve K_{12} kabloları her bakımdan bir birinin aynı olmak zorundadır. K_{11} kablosu ölçü aygıtının giriş empedansının büyük olması nedeniyle bu devrede büyük bir önem taşımaz. Bu bağlantı sisteminde önemli olan K_2 iletkeni R_{K2} direncinin gerinim ölçer 1'le ve K_{12} iletkeni R_{K12} direncinin tamamlayıcı direnç R_2 ile seri bağlı bulunmasıdır. Böylece sıcaklık değişimlerinin bu iki iletkende yaratacağı direnç değişimleri de aynı olacağından, sonuçta sıcaklıktan etkilenme yarım köprü devresindeki gibi olacaktır. Gerinim ölçerde meydana gelecek duyarlık kaybı;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{K2}} \quad (2.57)$$

eşitliği ile gösterilebilir. Bu eşitlikte $R_1 / (R_1 + R_{K2})$ düzeltme faktörü olarak adlandırılır.

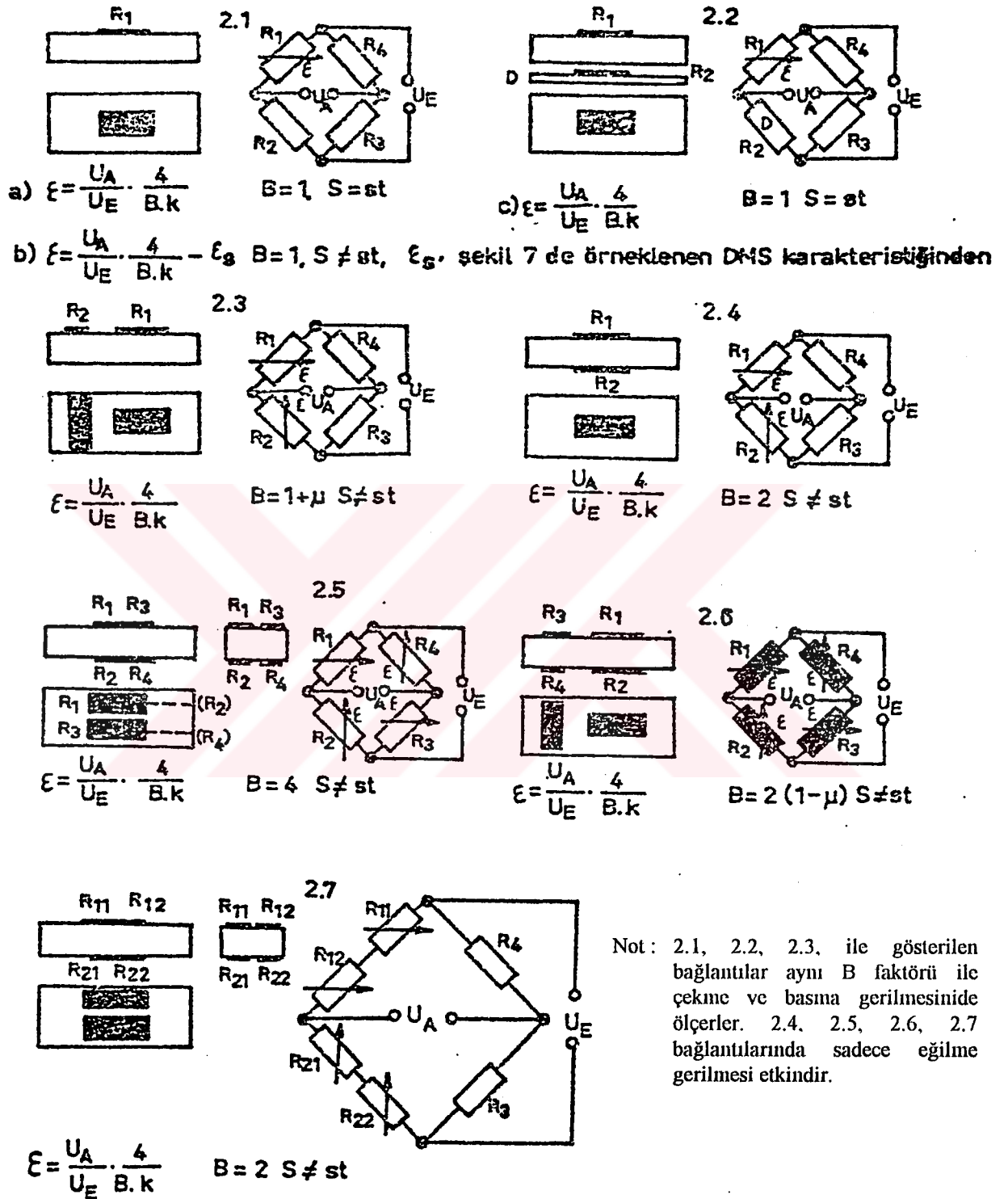
2.7. Çeşitli Bağlantı Olanaklarının Uygulama İçin Özetlenmesi

Buraya kadar açıklanan bilgilerin ışığı altında çekme-basma, eğilme ve burulma gerilmelerinin gerinim ölçerler aracılığıyla ölçülmesine ilişkin bağlantılar ve şemalar üç grup altında toplanmıştır. Şekil 2.15'de çekme-basma gerilmelerinin, şekil 2.16'da eğilme gerilmelerinin, şekil 2.17'de burulma gerilmelerinin ölçümleri için gerinim ölçer

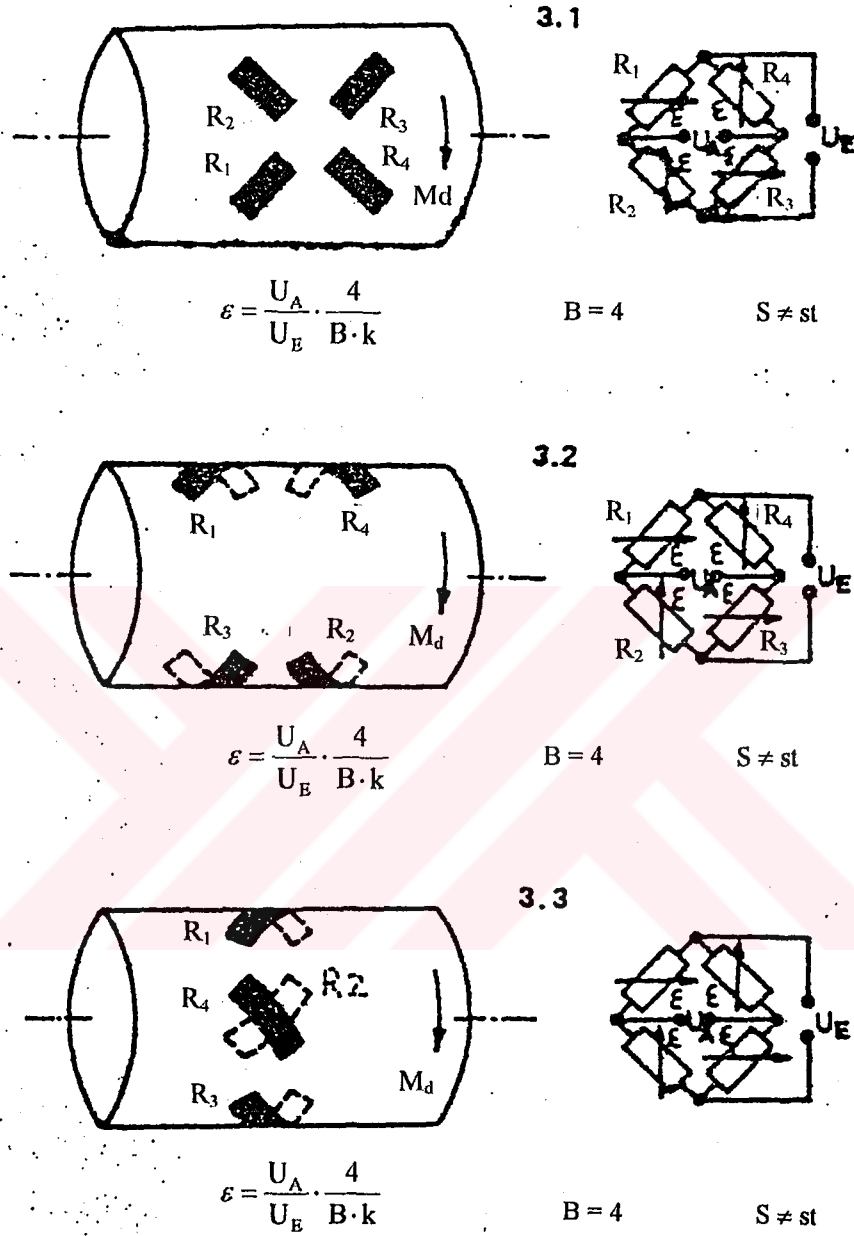


S=st sıcaklık sabit, S ≠ st sıcaklık değişken

Şekil 2.15. Çekme - Basma Gerilmelerinin Ölçülmesi



Şekil 2.16. Eğilme Gerilmelerinin Ölçülmesi



Not: 3.1, 3.2, 3.3, ile gösterilen bağlantılar yalnızca burulma momenti M_d 'nin yarattığı burulma gerilmesini ölçer, diğer gerilmeler etkisizdir. Gerinin ölçer eksenleri mil (aks) eksenine 45° açı yapmalıdır.

Şekil 2.17. Burulma Gerilmelerinin Ölçülmesi

bağlantıları ve ε uzama miktarına ilişkin eşitlikler verilmiştir. Tüm ilişkilerde U_E , köprüye uygulanan ve U_A çıkışından alınan gerilim değerleridir. U_E giriş gerilimi, doğrudan köprü üzerinde ölçülebileceği gibi, kullanılan kaynak karakteristiğinden de alınabilir. k-faktörü kullanılmakta olan gerinim ölçer katalogundan bulunup, kablo dirençlerinin etkisiz hale getirilmesi gerektiğinde, düzeltme faktörleri göz önüne alınır. Şekil 2.15 ve 2.16'daki uygulamalarda köprü faktörü B dikdörtgen kesitli bir çubuk için geçerlidir. Değişik profil ve kesitlerin kullanılması halinde, simetriklik bozulacağından B faktörü de değişecektir.

2.8. Wheatstone Köprüsünde Doğrusallıktan Sapma

Gerinim ölçer tekniğinde, (2.25) no'lu eşitlikte belirtildiği gibi gerinim ölçerin bağıl direnç değişimi ile Wheatstone köprüsünün çıkış gerilimi arasında yaklaşık doğrusal bir ilişki vardır. Ancak bu eşitliğin elde edilmesinde paydada yer alan $2 \cdot \Delta R$ değerlerinin normal gerilmeler için ihmal edilebilecek küçüklükte oldukları kabul edilmiştir. Gerinim ölçerin bağıl direnç değişmesi büyük değerler alır ya da çok duyarlı ölçümler yapılacağına, (2.25) no'lu eşitlikteki bu ihmalleri yapmak doğru olmaz. Bu durumda gerçek değişmeler için;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \quad (2.58)$$

eşitliği olduğu gibi kullanılmalıdır.

Doğrusallık hatasına köprü tipi ve bağıl direnç değişmesinin olduğu köprü kolu etkilidir. Bu durumda (2.58) no'lu eşitlikten elde edilecek U_A/U_E değişimi farklı olacaktır.(şekil 2.18, şekil 2.19).

2.8.1. Çeyrek köprüde doğrusallıktan sapma

Çeyrek köprü devrelerinde doğrusallık hatası A nolu eşitlikte $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ için;

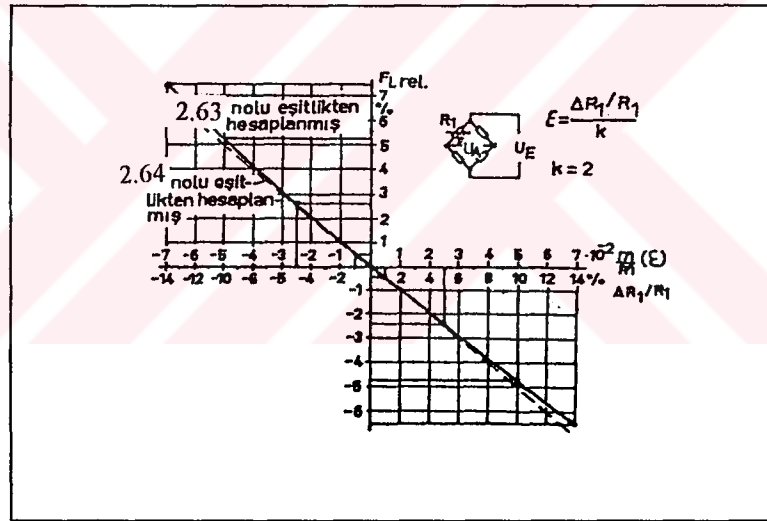
$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R + \Delta R_1}{2 \cdot R + \Delta R_1} - \frac{R}{2 \cdot R} \quad (2.59)$$

elde edilir. Direnç değişimi sadece bir kolla meydana gelmiş ve bu değişim ile gösterilmiştir. Buradan paydalar eşitlenerek işlem yapılır ve sonuç kısaltılırsa;

$$\frac{U_A^*}{U_E} = \frac{\Delta R_1}{2 \cdot (2 \cdot R + \Delta R_1)} \quad (2.60)$$

eşitliği elde edilir. Aynı işlemler (2.25) no'lu eşitlik için yapılırsa

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{\Delta R_1}{4 \cdot R} \quad (2.61)$$



Şekil 2.18. Çeyrek Köprüde Doğrusallık Hatası

bulunur. (2.59) ve (2.61) no'lu eşitliklerden de görüleceği gibi, aynı R_1 direnç değişmesi için elde edilecek U_A/U_E değerleri farklıdır. (2.59) no'lu eşitlikte paydada bulunan R_1 , U_A/U_E değerinin ΔR ile artışıdaki doğrusallığını bozmaktadır. Buna karşın (2.61) no'lu eşitlikte ΔR ile U_A/U_E çıkışı arasındaki ilişki tam doğrusal niteliktedir. Ancak, bu doğrusallığa bir takım ihmallere sonucunda ulaşılmıştır. O halde bu ihmallere yarattığı hata ;

$$\% F_{Lrel} = \frac{\frac{U_A^* - U_A}{U_E} - \frac{U_A}{U_E}}{\frac{U_A}{U_E}} \times 100 \quad (2.62)$$

kadar olacaktır. Öte yandan, bu hatayı direnç değişimi olarak ifade edersek U_A^*/U_E yerine (2.59) no'lu eşitlikteki karşılığı ve U_A/U_E yerine (2.61) no'lu eşitlikteki karşılığı yazılarak,

$$\% F_{Lrel} = -\frac{\Delta R}{2 \cdot R + \Delta R} \times 100 \quad (2.63)$$

veya yaklaşık olarak paydadaki R'nin ihmalıyla,

$$\% F_{Lrel} \cong -\frac{\Delta R}{2 \cdot R} \times 100 \quad (2.64)$$

elde edilir. Bu eşitliklerden (2.63) no'lusunu U_A/U_E nin hesaplanmasında ΔR 'nin ihmal sonucu ortaya çıkan hatayı tam olarak, (2.64) no'lusunu ise yaklaşık olarak vermektedir. Yaklaşık, (2.63) no'lu eşitliğin paydasındaki ΔR 'nin ihmal sonucu ortaya çıkmıştır. Böylece (2.59) no'lu eşitliğin (2.61) no'lu eşitlikteki gibi kullanılması sonucu yapılan hata doğrusal bir hale dönüştürülmüştür. Şekil 2.18'de ΔR 'ye dolayısıyla ϵ 'na bağlı olarak ΔR 'nin ihmal sonucu yapılacak hata miktarları (2.63) ve (2.64) no'lu eşitlikler için gösterilmiştir.

Şekil 2.18'e göre, (2.59) no'lu eşitlik yerine (2.61) no'lu eşitliğin kullanılması sonucu, örneğin $\epsilon = 5$ için (2.63) no'lu eşitliğe göre çizilen eğriden bulunacak hata % -4.7, buna karşın aynı hata (2.62) no'lu eşitliğe göre % -5 olmaktadır.

$\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ eşitliğinden $\varepsilon = (1/k) \cdot (\Delta R/R)$ yazılır ve $k = 2$ alınırsa $\varepsilon = \Delta R/2R$ elde edilir. (2.64) no'lu eşitlikte $\Delta R/2R$ yerine ε yazılırsa, % F_{Lrel} yaklaşık doğrusallıktan sapma hatası (-1. ε) olarak yazılabilir.

2.8.2. Yarım köprüde doğrusallıktan sapma

Yarım köprünün doğrusallıktan sapmasının saptanmasında şekil 2.6'da verilen devre esas alınmış ve R_1, R_2 köprü kollarının aktif gerinim ölçerleri taşıdığı kabul edilmiştir. Burada da gerekli kısaltmaları yapabilmek için $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ yazılır ve (2.58) no'lu eşitlikte yerine konursa,

$$\frac{U_A^*}{U_E} = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2}{2 \cdot (2 \cdot R + \Delta R_1 + \Delta R_2)} \quad (2.65)$$

elde edilir.

Yarım köprü devrelerinde komşu gerinim ölçerlerin gerilmeleri aynı yönde ise birbirlerinden çıkarılarak, gerilmeleri ters yönde ise birbirleriyle toplanarak devrenin toplam direnç değişim miktarı bulunur. Buna göre karşılıklı köprü kollarının gerilmeleri aynı yönde ise gerinim ölçerlerde meydana gelen direnç değişimlerini toplamak, ters yönde ise çıkarmak gerekmektedir. Gerçekten, karşılıklı köprü kollarının yüklenmesi, yani R_1 ve R_3 'ün aktif gerinim ölçer olarak çalıştırılması halinde (2.58) no'lu eşitlik çözümlenirse;

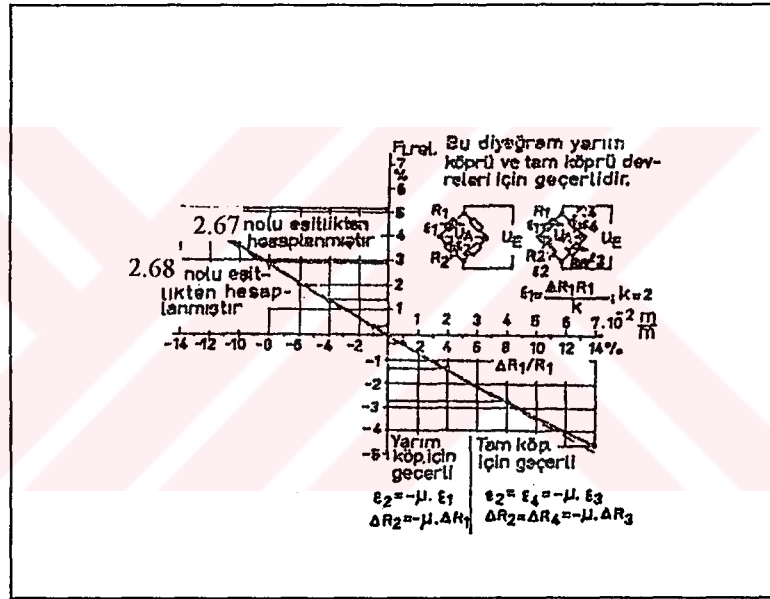
$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{\Delta R_1 - \Delta R_3}{2 \cdot (2 \cdot R + \Delta R_1 + \Delta R_3)} \quad (2.66)$$

elde edilmektedir.

(2.65) no'lu eşitliğin geçerli olduğu durumda eğilme yükünde (şekil 2.10) 1 no'lu gerinim ölçer çekmeye, komşusu bulunan 2 no'lu gerinim ölçer basmaya çalışacak, 1 no'lu gerinim ölçer (+), 2 no'lu gerinim ölçer (-) işarete sahip olacaktır. ε 'un değişmesiyle her ikisinin yaratacağı doğrusallıktan sapma birbirine ters yönde ve $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ için

aynı olacağına göre bu durumda herhangi bir sapma söz konusu olmayacaktır. Aynı koşullar şekil 2.11'deki 1 ve 2 no'lu gerinim ölçerler için de geçerlidir.

Gerçekten, ters işaretli ve komşu gerinim ölçerlerin ölçüm değerlerinin toplanması gereği, hataya neden olan direnç değişimlerini $\Delta R_1 + (-\Delta R_2)$ yapmaktadır. Ancak ikinci durumda yani 1 ve 3 no'lu gerinim ölçerlerin aktif olarak yüklenmesi halinde, her iki gerinim ölçerinin ölçüm değerlerinin toplanması gerektiğinden ve işaretlerinde aynı olması sonucu, bir doğrusallıktan sapma hatası doğmaktadır. Benzer bir durum şekil 2.9'da verilen çekme çubuğunda $\varepsilon_2 = \Delta R_1 / \Delta R_2$ ve $\Delta R_2 = \mu \cdot \Delta R_1$ den dolayı doğrusallıktan sapma hatası vardır.



Şekil 2.19. Yarım ve Tam Köprüde Doğrusallık Hatası

Yarım köprü devrelerinde doğrusallıktan sapma hatası;

$$\% F_{Lrel} = -\frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2 \cdot R + \Delta R_1 + \Delta R_2} \times 100 \quad (2.67)$$

veya yaklaşık olarak;

$$\% F_{Lrel} = -\frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2 \cdot R} \times 100 \quad (2.68)$$

yazılabilir. $\Delta R/R = k \cdot \varepsilon$ 'un geçerliliği kabul edilerek ve $k=2$ için bu hata, $\% F_{\text{rel}} \cong -1 \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ şeklinde de gösterilebilir.

2.8.3. Tam köprüde doğrusallıktan sapma

Tam köprü devrelerinde R_1 'den R_4 'e kadar olan tüm dirençler aktiftir. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ kabul edilerek (2.58) no'lu eşitlikten,

$$\frac{U_A^*}{U_E} = \frac{R - \Delta R_1}{(2 \cdot R + \Delta R_1 + \Delta R_2)} - \frac{R - \Delta R_4}{(2 \cdot R + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \quad (2.69)$$

yazılabilir. Komşu gerinim ölçerleri ters işaretli yüklenmiş yarım gerinim ölçer köprülerindeki nedenlerden dolayı tam köprülerde doğrusallıktan sapma hatası olmaz.

BÖLÜM 3. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ YAY ELEMANI TASARIM KRİTERLERİ

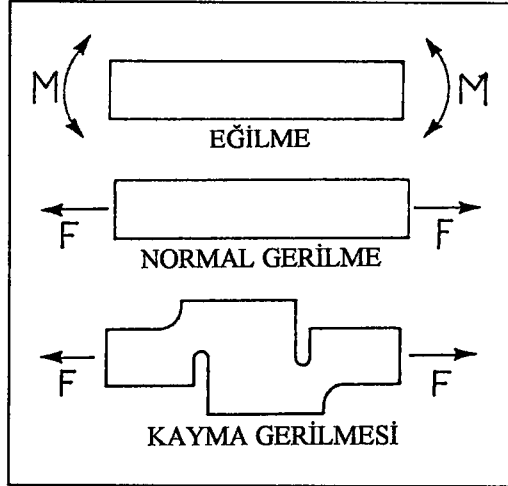
Bir kuvvet dönüştürücüsünün en kritik mekanik parçası elbetteki yay elemanıdır. Genel olarak ifade edildiği şekliyle, yay elemanının fonksiyonu, uygulanan yüke reaksiyon göstermek, ve bunu yaparken yükün etkilerini, yük ölçümü amacı ile yerleştirilmiş olan gerinim ölçerler vasıtasıyla düzgün bir şekil değişimi bölgesi üzerinde göstermektir.

Bu tanımlamada açıkça ifade edilmemiş olan nokta, yay elemanının ölçüm alanındaki birim şekil değişimi seviyesinin, uygulanan yükü doğrusal ve elastik bir ilişki içinde olduğudur. Bir başka deyişle, ideal bir kuvvet dönüştürücüsü, uygulanan yükü, oluşan birim şekil değişimi arasında doğrusal bir orana sahiptir. Bu kulağa son derece basit gelen ancak tüm tasarımcıların elde etmeye çalıştıkları bir sonuçtur. Konunun bu kadar zorlaşmasının nedeni, çok çeşitli işlevsel ve ekonomik parametrelerin eşzamanlı olarak gerçekleştirilmesi zorlunluluğundandır. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da, normal mühendislik uygulamalarında ikinci veya üçüncü derecede öneme sahip etkenlerin bir anda birinci dereceden öneme sahip olmalarıdır.

Bu çalışmada, kuvvet dönüştürücüsü yay elemanları, öngörülen şekil değişimi türüne bağlı olarak şekil 3.1' deki üç ayrı gruba ayrılmaktadır: a) eğilme elemanları, b) tek eksenli gerilmeye tabi elemanlar ve c) kayma gerilmesine tabi elemanlar. Bu üç tip yay elemanının çeşitli tipleri, ticari dönüştürücülerde kullanılmaktaysa da en yaygın ve en çok çeşitliliğe sahip olanlar, eğilme türü olarak sınıflandırılanlardır [16].

3.1. Yay Elemanı Tasarımında Temel Kriterler

Aşağıdaki kriterler genel olarak tüm kuvvet dönüştürücüsü yay elemanlarına aynı derecede uygulanabilir. Sıralanışları önem sırasına göre yapılmamıştır. Herbirinin önemi değerlendirilen dönüştürücünün kullanım amacı ve türüne bağlı olarak



Şekil 3.1. Yay Elemanında Temel Yükleme Şekilleri

değişmektedir. Tüm bu kriterler birbirlerinden bağımsız değil; aksine birbirleriyle çok yakın ilişkiye sahiptir.

◆ Doğal frekans

Yük hücresi için belirlenmiş hassasiyet ve diğer işlevsel gereksinimlerin sonucu, yay elemanının doğal frekansı olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu, normal olarak gereksiz kütlesi olmayan, rijit ve düşük elastikiyetli bir tasarımı gerektirmektedir.

◆ Azami yükleme durumunda ölçme bölgesinde uygun bir birim şekil değişimi seviyesi

Yay elemanı tasarımının ilk aşamasında, eleman boyutları oranlarının, cihaz azami yükteyken, ölçüm bölgesinde önceden belirlenmiş olan birim şekil değişimi oluşacak şekilde seçilmesi gereklidir. Yay malzemesinin doğrusal birim şekil değişimi göstermemesi, gerinim ölçerlerin yorulma ömrü, cihaz uygunluğu gibi çeşitli sınırlayıcı etkenlerden dolayı, birim şekil değişimi seviyesi genellikle 1000 - 1700 $\mu\text{m}/\text{m}$ arasında tutulmaktadır. k-Faktörleri 2 olan dört adet aktif gerinim ölçerden oluşan tam köprü devresinde 1500 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik birim şekil değişimi nominal değeri, 3 mV/V olan köprü çıkış sinyali üretir.

◆ Ölçme bölgesinde, düzgün birim şekil değişimi dağılımı

Kuvvet dönüştürücüsünün elektrik çıkışı, ölçme bölgesindeki müsaade edilebilir azami birim şekil değişimi seviyesi ile sınırlanmış olduğundan; bu birim şekil değişimi seviyesi ölçüm sinyalinin en büyük değerine ulaşabilmesi için; gerinim ölçer ızgaralarının bulunduğu tüm alan üzerinde düzgün şekilde yayılmış olmalıdır. Eğer uygulanabiliyorsa; gerinim ölçerin lehim plakalarının en düşük birim şekil değişiminin olduğu alanda yer alması da gerinim ölçerin yorulma ömrünü genellikle olumlu yönde geliştirmektedir.

◆ Gerinim ölçerin yapıştırıldığı alan dışında, yay elemanının diğer kısımlarında daha düşük birim şekil değişimi seviyesi

Yay elemanının ölçme bölgesindeki birim şekil değişimi miktarı, tam yükleme anında istenen çıkış sinyalini sağlayacak uygun bir büyüklükte ve düzgün bir şekilde yayılmış olmalı; aynı zamanda da tüm yay elemanı boyunca en büyük birim şekil değişiminin olduğu noktada yer almalıdır. Genellikle, yorulma ömrü, doğrusallık, sürünme ve histerisizden uzak olma gibi kuvvet dönüştürücüsünün performansını belirleyen özellikler, yay elemanının tümünde etkin olan gerilim seviyesinin düşürülmesi ile iyileştirilebilir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, en iyi yay elemanı malzemeleri de dahil olmak üzere tüm katılar, mekanik gerilim altında belirli derecelerde mikroplastik davranımlar göstermektedir. Dolayısıyla, düşük seviyeli mekanik gerilimler, ideal doğrusal elastik davranıştan daha düşük sapmalar anlamına gelmektedir. Aynı zamanda da daha rijit ve doğal frekansı daha büyük yay elemanlarını şart koşmaktadır.

◆ Tek parçalı konstrüksüyon

Tekrarlanabilirlik, doğrusallık, histerisizden uzak olma gibi tüm değerlendirme parametreleri yay elemanının, tek bir kütükten tek parça olarak işlendiği kuvvet dönüştürücülerinde en iyi değerlerine ulaşmaktadır. Yük altında yay elemanının şekil değiştirmesi çok küçük ve gözle görülemez olmasına rağmen, gerçek ve sonlu bir büyüklüktür. Bu koşullar altında, her türlü çok parçalı mekanik bağlantı, hareket ve sürtünmeye, dolayısıyla doğrusallıktan sapma ve histerisize neden olmaktadır.

Kaynaklı bağlantılar da yorulma ömrüne ve mikroplastik davranıma olumsuz etki eden kalıntı gerilmeler ve metalürjik etkileri nedeniyle tercih edilmemektedir.

- ◆ Yay elemanının gerinim ölçer rahat yapıştırılacak ve kolay imal edilebilecek şekilde tasarlanması

Pazar koşullarında rekabet edebilmesi için kuvvet dönüştürücüleri uygun bir fiyata sahip olmalıdır. İşlevsel koşullar dahilinde bu koşulu elde etmek için yay elemanı tasarımında yeterli düşünce emeği gerekmektedir. Şu ana kadar gerekli tüm koşulları yerine getirmek, eğer açıklanan bu ekonomik koşul yerine getirilemiyorsa; yani yay elemanının imalatı karmaşık ve pahalı ise önemini yitirmektedir. Gerinim ölçerin ölçme noktasına ekonomik çözümlerle yerleştirilebilmesi de aynı derecede önemlidir. Bir dönüştürücünün gerektirdiği kalitede gerinim ölçer uygulaması, ideal koşullar altında bir gerinim ölçerin fiyatından çok daha pahalıdır. Bu nedenle yay elemanı tasarlanırken daima gerinim ölçerin en rahat şekilde yapıştırılabileceği şekilde düşünülmelidir. Hızlı ve kolay gerinim ölçer uygulamaları mümkün olduğu için en cazip olanı tek başına yer alan düzgün ve dış yüzeyli yay elemanlarıdır. Diğer koşullar izin verdiği sürece yüzey hazırlıkları, yapıştırıcı uygulanması, gerinim ölçer uygulaması, sıkıştırma, daha sonraki onarımı, kablo bağlantılarının yapılması gibi işlemlerin ne şekilde gerçekleştirileceği önceden planlanmalıdır.

- ◆ Aşırı yüklemelere karşı koruma

Dönüştürücü imalatçıların deneyimleri göstermiştir ki; dönüştürücülerin hatalı değerler vermelerinin temel sebebi kullanıldıkları noktada aşırı bir yüke maruz kalmalarıdır. Bazı dönüştürücü tasarımları aşırı yükleme anında bir mekanik stopun devreye gireceği şekilde gerçekleştirilmektedir. Bazılarında ise yay elemanı içinde taşıyan gövde aşırı yüklemeyi üzerine almaktadır. Ancak genel bir kural olarak ticari tip kuvvet dönüştürücüleri, nominal yük kapasitelerinin % 150 - 200'ü kadar bir aşırı yüke hasarsız dayanabilme, % 300 - 500'ü kadarlık bir aşırı yüklemeye ise hasar başlangıcı olacak şekilde boyutlandırılmaktadır.

◆ Ölçüm eksenini dışındaki yüklere karşı seçicilik

İdeal bir kuvvet dönüştürücüsü yalnızca tek bir eksenindeki kuvvet bileşenlerine cevap vermeli; diğer yönlerden gelen kuvvet ve momentlere karşı tepkisiz kalabilmelidir. Aynı zamanda da kuvvet dönüştürücüsünün tepkisi, yükün uygulandığı noktadan en azından belirli bir alanda bağımsız olmalıdır. Her ne kadar ideal kuvvet dönüştürücüsü tanımına ulaşmak mümkün değilse de; dikkatli tasarım çalışmaları ile ideale yakın neticeler elde edilebilir. Bu durum, yalnızca yay elemanı ile değil aynı zamanda da gerinim ölçerin uygulandığı nokta ve şekil, destek ve muhafaza parçalarının da doğru seçilmesi ile oluşabilir.

◆ Yay elemanının şekil değişimi

Uygulanan yük altında ölçülebilir seviyede birim şekil değişiminin yay elemanında oluşabilmesi için, elemanın yeterli ve sonlu miktarda deforme olması gerekmektedir. Yükün uygulanması ile yay elemanının geometrisinde de bir takım değişiklikler olur ve yükün uygulandığı nokta, yük vektörü yönünde sehim yapar. Yay elemanının geometrisinde oluşacak olan her türlü değişim, ölçümün doğrusallığından da bir sapma anlamına gelmektedir. Yay elemanının rijitliği yalnızca doğal frekansı açısından değil aynı zamanda da geometri değişiminin yarattığı doğrusallıktan sapmaları da en aza indirmektedir. Bundan başka, kuvvet ölçme cihazı yüklendiğinde sadece yük vektörünün etkidiği cihaz ekseninde doğrusal bir sehim söz konusu ise kuvvetin uygulandığı noktanın sehiminin ölçüm performansı üzerindeki olumsuz etkisi minimumdur.

◆ Sıcaklığın etkileri

İlk bakışta optimum bir yay elemanı bileşimine ulaşmanın yolu yalnızca başarılı bir mekanik tasarımın sonucu imiş gibi gözükebilir. Ancak gerçekte durum bu değildir. Sıcaklıktan kaynaklanan etkiler de titizlikle değerlendirilmeli ve mekanik koşullarla birlikte ele alınmalıdır. İlk olarak, gerinim ölçer bir ısı kaynağıdır ve bu ısı tüm yay elemanına tesir etmektedir. Sıcaklığın, yay elemanı ve gerinim ölçer performansının her ikisi üzerindeki etkilerinin bastırılabilmesi için yay elemanı, gerinim ölçerlerin

konumu itibari ile simetrik olmalıdır. Bunun ötesinde, bir çok kuvvet ölçme cihazı, kullandıkları noktalarda alt ve üst veya sağ ile sol taraf arasında sıcaklık farkına tabidir. Kuvvet dönüştürücüsünün muhafazası ile yay elemanı arasındaki ısı akış yollarının dikkatle incelenmesi şarttır. Özellikle aynı köprü üzerinde yer alan ve birbirinin ardı sıra gelen iki gerinim ölçer arasındaki sıcaklık farkının enaz olacağı oluşumlar üzerinde çalışılmalıdır [24], [30].

3.2. Yay Elemanlarının Yüklenme Türüne Göre Analizi

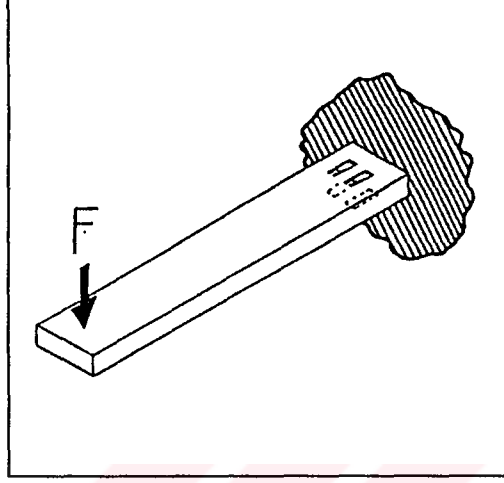
3.2.1. Eğilmeye Çalışan Yay Elemanları

Eğilme momentine maruz kalan kiriş veya kiriş benzeri yapıların seçildiği yay elemanları ticari amaçlı dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğilmeye çalışan yay elemanlarının bu kadar popüler olmasının çeşitli nedenleri vardır. Bunlar kirişin yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bir eğilme elemanının karakteristik özelliği, özellikle aynı kesit alanına sahip kolon tipi bir yay elemanı ile mukayese edildiğinde düşük kuvvetlerde yüksek şekil değişimine sahip olmasıdır. Bundan başka eğilme eksenine göre simetrik kesit alanına sahip olan bir kirişte, karşılıklı olarak ters işaretlere fakat eşit büyüklüklere sahip şekil değişimlerinin olduğu iki yüzey vardır. Bu durum, karşılıklı yüzeylere ikişer gerinim ölçer uygulanmasıyla tam köprü devresinin kurulabilmesi için çok uygun bir vasat oluşturmaktadır. Eğer kirişin kalınlığı çok ince seçilebilirse; gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı çok düşük olacağından iyi bir sıcaklık kompanzasyonu elde edilebilir. İlave bir avantaj olarak da; kiriş elemanları gerinim ölçerlerin rahatça yapıştırılabileceği düzgün ve açık yüzeylere sahip olacak şekilde tasarlanabilirler [19].

3.2.1.1. Basit Ankastre Kiriş Tipi Yay Elemanları

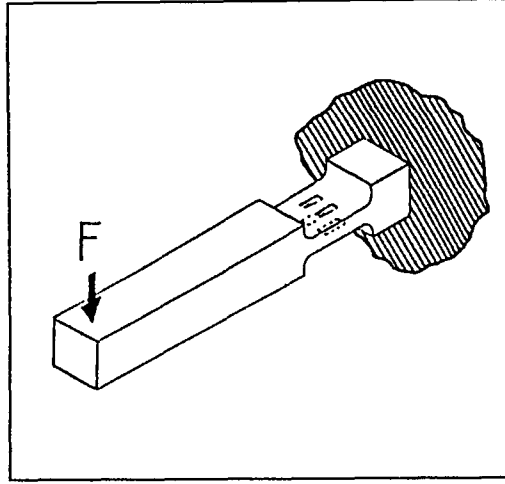
Eğilmeye çalışan bir yay elemanı için en basit, ancak genellikle en iyi çözümün olmadığı kiriş tipi şekil 3.2'de gösterilmiş olan basit ankastre kiriştir. Boyuna yerleştirilmiş gerinim ölçer çiftleri kirişin dip noktasına yakın alt ve üst yüzeylere yerleştirilmişlerdir. Her ne kadar imalat maliyetleri düşük ve gerinim ölçerlerin rahatça uygulanacağı bir yapıya sahip olsalarda, bu tip yay elemanları daha önceki

kısımlarda açıklanmış olan yay tasarımındaki temel kriterlerin bir çoğunu yerine getirememektedir. Aşağıda da açıklanacağı üzere, bu uygunsuzlukların bir çoğu yay elemanı tasarımında yapılacak değişikliklerle ortadan kaldırılabılır. Diğerleri ise ankastre yay elemanının yapısal sorunlarıdır.



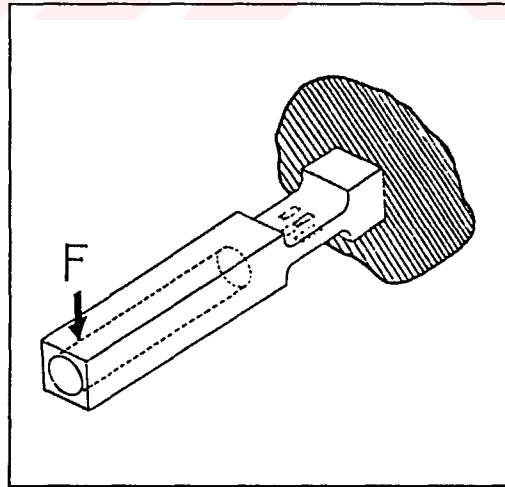
Şekil 3.2. Sabit Kesitli Basit Ankastre Kirişte Yükleme

Ankastre yay elemanında kiriş uzunluğunun çoğu zaman tek işlevi uygulanan yükü gerinim ölçerlerin yapıştırılmış olduğu ölçme bölgesinde eğilme momentine çevirmektir. Ancak, kiriş boyu aynı zamanda yükün uygulandığı noktanın sehimini, dolayısıyla da yer değiştiren kütle miktarını belirlemektedir. Sonuç olarak yay elemanı düşük bir doğal frekansa sahip olma eğilimindedir. Yay elemanının tasarımı, Şekil 3.3’de gösterildiği gibi, şekil değişiminin ağırlıklı olarak gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri noktada olacağı şekilde düşünülebilir. Böylece, ölçme bölgesinde aynı miktarda şekil değişimi elde edilirken; sehim miktarı azaltılmış, buna karşın kütle miktarı artırılmıştır. Kiriş uzantısının kütesinin azaltılması ile ilave bir gelişme elde edilebilir. Bu durum, Şekil 3.4’de verilmiş örnekte olduğu gibi kiriş uzantısının içinden silindirik bir kütle çıkartılması ile elde edilebilir. Kiriş malzemesi olarak çelik yerine alüminyum alaşımlarının kullanımı da gerinim ölçerlerin yapıştırılmış olduğu ölçme bölgesinde aynı miktarda şekil değişimi için daha yüksek doğal frekans, ancak daha düşük seviyeli sehim sağlamaktadır.



Şekil 3.3. Kalınlığı Azaltılmış Basit Ankastre Kirişte Yükleme

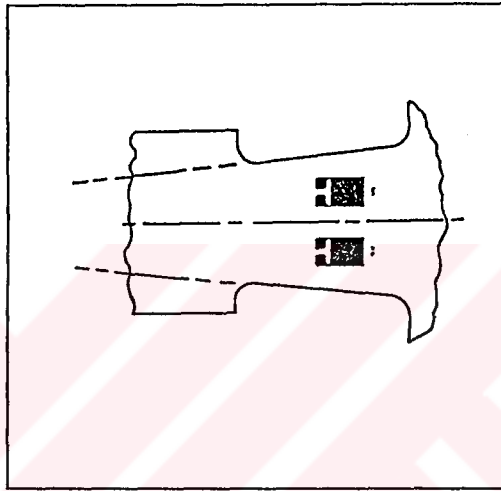
Tasarım aşamasında daha fazla değişiklik yapmak, basit bir ankastre yay elemanında üretim açısından daha karmaşık ve daha pahalı çözümlere yönelecektir. Ancak ne yazık ki; optimum bir yay elemanında aranan özelliklerin bir kısmı hala daha eksiktir. Çünkü, yükün uygulandığı noktanın hareket hattı doğrusal değil eğriseldir, ve bu nokta sehim gerçekleştikçe yanal hareket eder. Ayrıca, yük bu koşullar altında giriş eksenine dik olarak uygulanamaz. Bu etkiler ortadan kaldırılmadığı sürece dönüştürücünün doğrusallığı ve ölçüm doğruluğu sınırlanacaktır.



Şekil 3.4. İçinde Silindirik Bir Delik Olan Basit Ankastre Kirişte Yükleme

Bu tip yay elemanı tasarımında istenmeyen bir diğer durum da; şekil değişimi dağılımının gerinim ölçer ızgaraları boyunca düzgün dağılmamış olmasıdır. Birim şekil

değişimi kirişin dip noktasında en yüksek değerine sahip olup; gerinim ölçerlerin yapıştırılmış olduğu ölçme bölgesi boyunca doğrusal olarak azalmaktadır. Bu sakıncanın etkileri özellikle kısa kirişlerde daha da belirgindir. Bu uygunsuzluk, kiriş genişliğinin gerinim ölçerlerin yapıştırılmış olduğu ölçme bölgesinde sabit mekanik gerilim oluşacak şekilde değiştirilmesiyle ortadan kaldırılabılır. Sabit gerilim koşulu, Şekil 3.5’de gösterildiği şekilde kirişin her iki tarafında doğrusal olarak daralma ile kolayca elde edilebilir. İstenen bu sonucun elde edilebilmesi için bu daralma hattının kesişim noktası ile yükün uygulandığı noktanın kesişmesi şarttır.



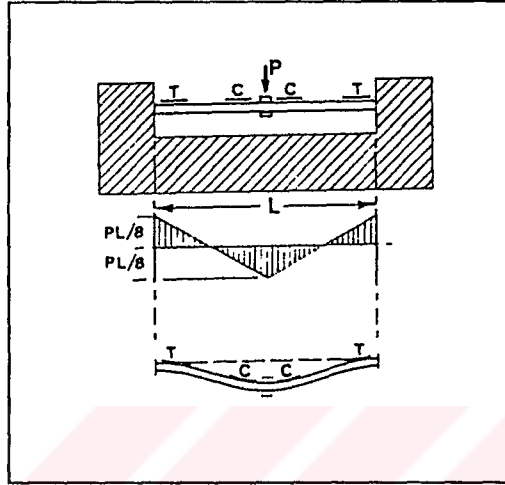
Şekil 3.5. Kesciti Doğrusal Olarak Daralan Basit Ankastr Kirişte Yükleme

3.2.1.2. Çoklu Eğilmeye Çalışan Yay Elemanları

Belirli tip uygulamalarda, 3.2.1.1’de açıklanmış olan düz ankastr kirişlerin sahip oldukları özellikler, kiriş elemanına çoklu eğilme uygulandığı tasarımlarla daha da geliştirilebilirler. İki uçundan sabitlendikten sonra orta noktasından yüklenen bir kiriş Şekil 3.6’da örnek olarak verilmiştir. Bu şemada ayrıca moment ve büyüklüklerin abartılmış olduğu sehim diyagramları da gösterilmiştir.

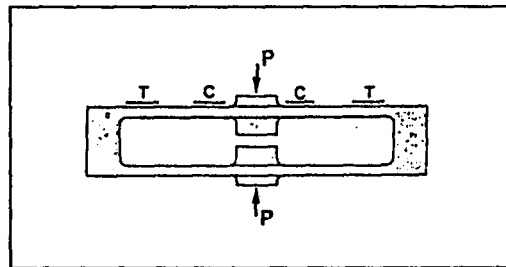
Her ne kadar bu yapı ticari amaçlı kuvvet dönüştürücülerinde kullanılmıyorsa da; inceleme aşamasında rahat analiz edilebilir bir örnektir. Bu tür bir tasarımın temel üstünlüğü yay sabitinin büyük olması ve yükün uygulandığı noktanın kiriş deforme oldukça doğrusal tek eksenli hareket etmesidir. Böylesi bir yapıda tam köprü devresini oluşturacak olan gerinim ölçerlerin uygulanmalarında kirişin üst yüzeyinde

oldukça rahat olmaktadır. Çıkış sinyalinde doğrusallıktan bir miktar sapma, rijit olarak yerleştirilmiş iki uç nokta arasında yüklenen kirişin diyafram gerilmelerine tabi olması nedeniyle beklenebilir. Ek olarak, esnek yay elemanlarının bir çoğunda olduğu gibi, eğer gerinim ölçerlerin düzgün bir şekil değişimi bölgesinde yer almaları isteniyor ise; kirişin uzunluğu boyunca kesit modülünün değiştirilmesi gerekmektedir.



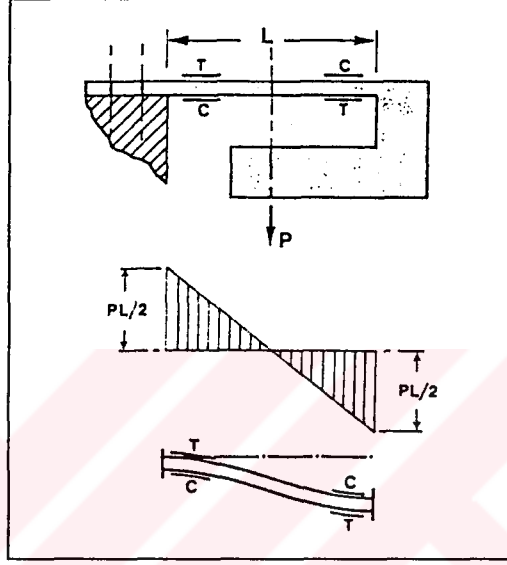
Şekil 3.6. İki Uçundan Sabitlenmiş Kirişte Moment ve Deformasyon Diyagramları

Alternatif bir yaklaşımla, ticari tip dönüştürücülere daha yakın bir örnek Şekil 3.7'de verilmiştir. Yay elemanı genel olarak Şekil 3.6'da açıklanmış olan eğme momenti dağılımı ve sehim özelliklerine sahiptir. Eğer boyutlar değiştirilmez ise; sehim miktarı bir öncekinin iki katı olacaktır. Alt ve üst kirişler sehim yaptıkça; dıştaki sabit kısım yatayda serbestçe hareket edebildiği için diyafram gerilmeleri ortadan kalkmaktadır. Ancak, böylesi bir hareket ise; moment kolunun değişmesine neden olmakta, bunun doğal sonucu olarakta dönüştürücü çıkış sinyalinde doğrusal olmayan sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 3.7. Çift Kirişli Eğilme Yay Elemanı

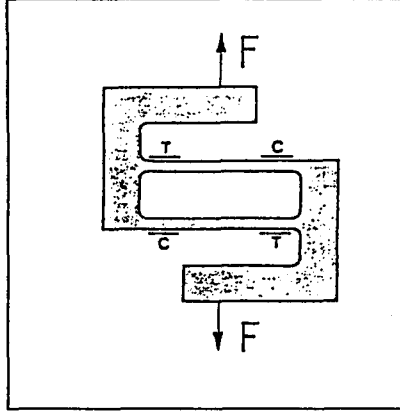
Şekil 3.8'de çift eğilmenin yaratacağı aynı etkiyi yaratan oldukça basit bir yapı gösterilmiştir. Bu durumda gerinim ölçerler ya aynı yüzey üzerinde arka arkaya ya da karşılıklı yüzeyler üzerinde yerleştirilerek tam köprü devresi oluşturulur. Gösterilen bu örnek yükün uygulandığı nokta ve eksene karşı son derece hassastır. Böylesi bir yapı kullanılacağı zaman, tasarım aşamasında belirlenmiş noktada ve eksen üzerinde yükleme yapılmasının sağlanması için gerekli önlemler alınmalıdır.



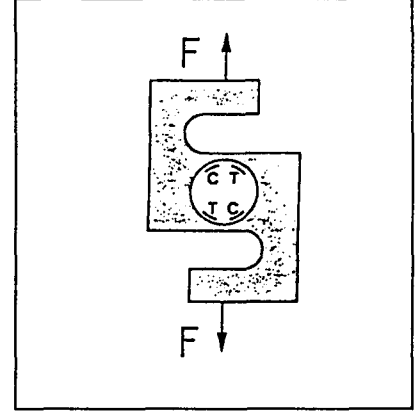
Şekil 3.8. Çift Kirişli Eğilme Yay Elemanı

Şekil 3.8'de verilmiş olan örneğin bir aşama geliştirilmiş hali, Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Burada yükün hissedilişi ölçme amaçlı iki kiriş ve bunlara oranla çok daha büyük kütleli iki parça ile birleştirilmiş bir yapı ile gerçekleştirilmektedir. Eksenel yükleme neticesinde ara kirişler eğilme momentine maruz kalırlar. Bu tür tasarımlar eksenden kaçık yüklemelere karşı daha az hassastır. Ancak temel sakıncası çok esnek bir yapıya sahip olmalarıdır. Gerinim ölçerlerin yerleştirildiği noktalar arasında kalan kiriş parçasının sehimli, sadece yay elemanının tümünü esnekliğine etkimeyip; aynı zamanda da doğrusallıkta kayıplara da neden olmaktadır. Bu sakınca da gerinim ölçerlerin yerleştirildiği noktalar arasında kalan kiriş parçasının kesit alanının büyütülmesi veya bu parçanın boyunun kısaltılmasıyla ortadan kaldırılabilir. Şekil 3.10'da yaygın olarak kullanılan ticari bir dönüştürücü gösterilmiştir. Her ne kadar gerinim ölçerlerin yapıştırılması ve kablo bağlantıları bu deliklerin içinde

oldukça sıkıntılı olsada, gerinim ölçerlerin ortam koşullarından korunabilmeleri için oldukça uygun bir yapıya sahiptirler.

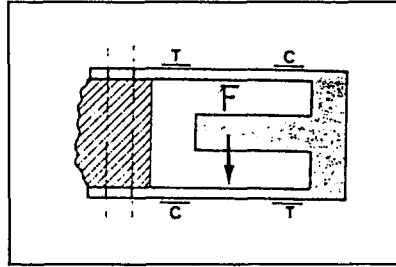


Şekil 3.9. Çift Kirişli Yay Elemanı



Şekil 3.10. Çift Kirişli Yay Elemanı

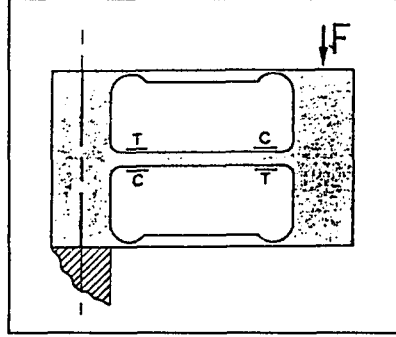
Şekil 3.11'de bir örneği verilmiş olan çift kirişli yapılar bir çok kuvvet dönüştürücüsü imalatında tercih edilmektedir. Algılayıcı kirişler üzerindeki eğme momentleri yükün uygulandığı noktadan bağımsızdır. Aynı zamanda da kiriş üzerindeki aksel kuvvetleri elimine etme özelliğine sahiptir. Yük şekle göre sağ merkezden uygulanırsa üst kiriş çekmeye, alt kiriş ise basmaya çalışır. Eğer yük şekle göre sol merkezden uygulanırsa; oluşan gerilmelerin işareti değişir. Merkezden uygulanan kuvvetler kirişte hiç bir aksel yüklenme yaratmaz.



Şekil 3.11. Çift Kirişli Yay Eleman Örneği

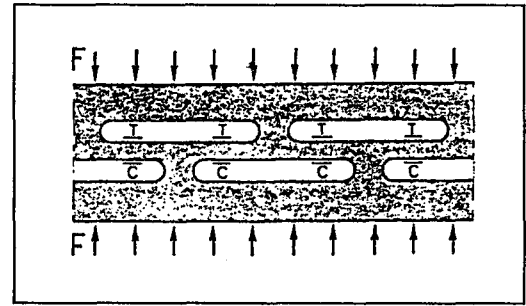
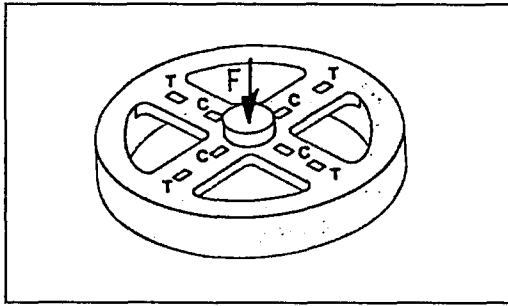
Bir diğer konfigürasyonda Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Bu durumda alt ve üst elemanlar dışarıdan gelen yüklemelere reaksiyon göstermekte aynı zamanda da birer mafsalsal görevi görmektedirler. Yükün dikey bileşeninden kaynaklanan eğme momenti ortadaki algılayıcı kiriş tarafından ölçülmektedir. Alt ve üst kirişlerin uçları bölgesel

olarak inceltilerek eğilme dirençleri en aza indirilirken, aynı zamanda da eksenel kuvvetlere karşı yeterli kesit alanına sahip olmalarına dikkat edilmiştir.



Şekil 3.12. Çift Kirişli Yay Eleman Örneği

Yüksek kapasiteli ve küçük ebatlı bir yay elemanı gerektiğinde, şu ana kadar açıklanmış olan tüm kriterler dairesel bir konfigürasyon içinde uygulanabilir. Örneğin, şekil 3.13'de ara bağlantı kollarının yük algı elemanı olarak hizmet ettikleri çember tipi bir yay elemanı örnek olarak verilmiştir. Bu tasarım işlevsel olarak Şekil 3.6'da açıklanan yapı ile aynıdır. Bu tür yapılarda çeşitlilik çok fazla olup bir diğer örnek de şekil 3.14'de verilmiştir. Kısmi görüntüsü verilmiş olan bu yapı da, perfore edilmiş bir lama çevresel olarak yerleştirildiği dairesel konfigürasyonda çoklu eğilmeye çalışan yay elemanı olarak kullanılmaktadır.



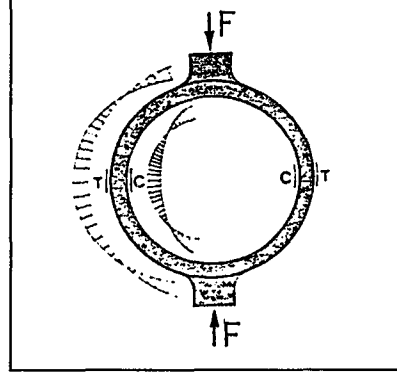
Şekil 3.13. Çember Tipi Yay Elemanı Örneği

Şekil 3.14. Perfore Lama Yay Eleman Örneği

3.2.1.3. Halkalar

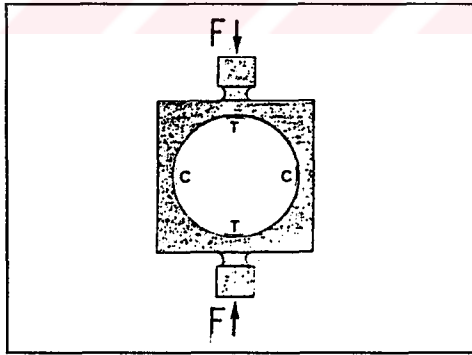
Eğilmeye çalışan yay elemanlarının bir diğer türü de, uygulama alanında görülen sayı ve tasarım çeşitliliği ile halkalardır. Halka şeklindeki yay elemanları, ölçme teknolojilerinin geçmişine bakıldığında oldukça eskiye dayanmaktadırlar. Yaygın

olarak malzeme test makinalarının kalibrasyonunda kullanılmışlardır. Halka şeklindeki yay elemanları, her zaman eğilme momentine tabi olduklarından; her iki deformasyon modu, bu tip elemanların karakteristik özellikleridir.

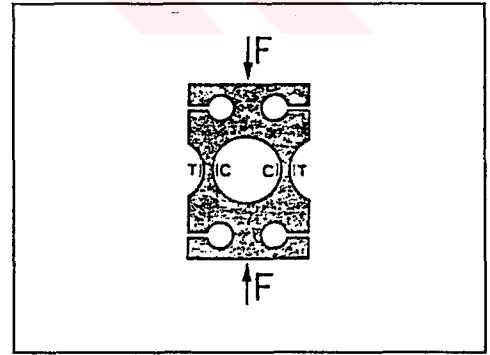


Şekil 3.15. Halka Tipi Yay Elemanı

En basit halka tasarımı, şekil 3.15’de gösterilmiştir. Halkadaki şekil değişimi dağılımı, geometrisinin kompleks bir fonksiyonu olup; alıta ve üstte yerleştirilmiş olan yük algı ve reaksiyon çıkıntılarının boyutlarından etkilenmektedir. Ancak şekilde gösterilen dağılım, sabit kesitli bir halka için oldukça gerçekçidir. Eğilme momenti yatay çap ekseninde belirgin olarak değişmediğinden, şekil değişimi dağılımı bu alanda oldukça düzgündür.



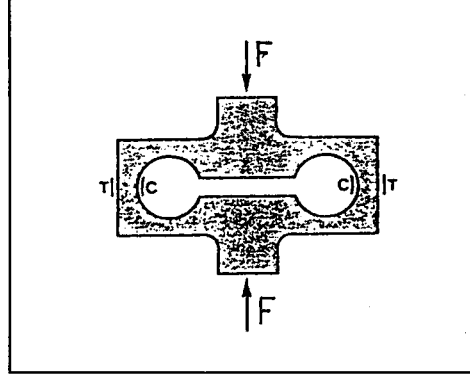
Şekil 3.16. Halka Tipi Yay Elemanı Örneği



Şekil 3.17. Halka Tipi Yay Elemanı Örneği

Şekil 3.16’da gösterilen halka tasarımı, klasik yapıya oranla çeşitli üstünlüklere sahiptir. Görüldüğü üzere imalatı oldukça kolay ve maliyeti düşüktür. Kare halkalar yay elemanının esnekliğini azaltmakta, dolayısıyla doğrusallık özelliğini geliştirmektedir. Halkanın ve çıkıntılarının halkaya bağlandığı noktaların yay sabiti, eksenden kaçık yük bileşenlerine karşı hassasiyetini düşürmek için küçük tutulmuştur.

Eksenel yüklenmiş bir elemanda gerilimin yoğunlaştığı bir delik ve/veya yatay çentikli tasarımlara ait sayısız örnek mevcuttur. Şekil 3.17’de buna ait bir örnek verilmiştir.

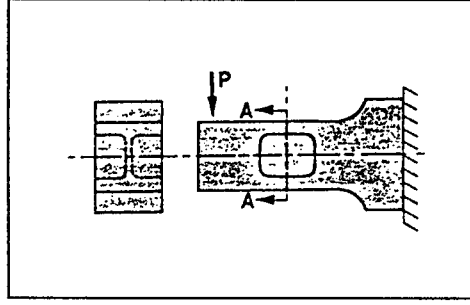


Şekil 3.18. Dürbün Tipi Yay Eleman Örneği

Halka konusunun kapasite, fiziki boyutlar, vs gibi çeşitli sınırlamalar altındaki uygulamaları neticesinde ortaya çıkan tasarımlar, çoğu zaman konvansiyonel tip halka görüntüsünün dışına çıkmakta ve bu tür elemanların sınıflandırılmalarında ciddi tartışmalara neden olmaktadır. Örneğin şekil 3.18’de verilmiş olan yapı, yay elemanında gerinim ölçerlerin yapıştırılarak ölçümün yapıldığı bölgede, halka benzeri bir davranış gösterdiği için yer almıştır. Yüke duyarlı birim şekil değişimi ölçümleri eğilme momenti ve normal gerilmelerin birlikte olduğu ve gerinim ölçerlerin yapıştırılarak ölçümün yapıldığı bölgede düzgün bir eğilme momenti dağılımı ile gerçekleştirilir.

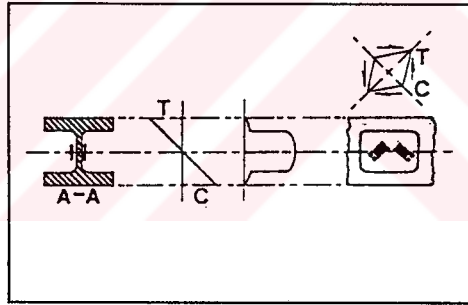
3.2.2. Kesmeye Çalışan Yay Elemanları

Kesmeye çalışan yay elemanlarının çalışma prensibi şekil 3.19’da gösterilmiştir. Burada yapı ankastre kiriş olarak seçilmiş ancak sehimini en aza indirmek için abartılı bir kesit kullanılmıştır. Bu koşullarda kirişin altında ve üstünde oluşan yüzey şekil değişimleri bir dönüştürücüden beklenen 2 mV/V çıkış sinyalini üretmek için çok küçüktür. Ancak kirişin AA-kesitinde her iki tarafta malzeme oyularak asal ekseninde bir kanat bırakılmıştır. Uygulanan yük neticesinde oluşan kayma gerilmesinin büyük bir kısmı I profili görünümündeki bu kesit tarafından taşınırken eğilme momenti temel olarak buradaki flanşlar tarafından karşılanır.



Şekil 3.19. Kesme Tipi Yay Eleman Örneği

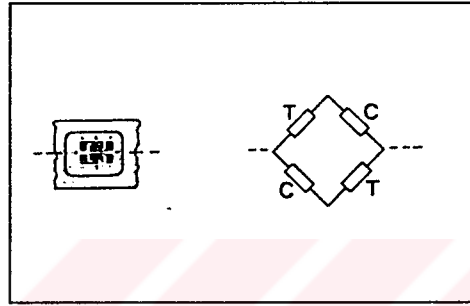
Şekil 3.20’de AA kesiti boyunca kayma ve eğme gerilmeleri dağılımı gösterilmiştir. Eğme gerilmesinin sıfır olduğu tarafsız ekseninde yatay ve dikey eksenlerde etkiyen sadece kayma gerilmeleridir. Sonuç olarak asal eksenler kiriş eksenine $\pm 45^\circ$ yapmaktadırlar ve eşit büyüklükte ters işaretli asal birim şekil değişimleri oluşmaktadır. Izgara eksenleri bu asal eksenler üzerine oturtulmuş gerinim ölçer çiftleri, kanadın her iki tarafına yerleştirilmiş ve ölçüm için tam köprü devresi oluşturacak şekilde bağlanmışlardır.



Şekil 3.20. Kesme Tipi Yay Elemanında Gerilmeler

Kesmeye çalışan yay elemanlarının bir avantajı da yükün uygulandığı noktada oluşabilecek küçük sapmalara karşı hassasiyetinin fazla olmamasıdır. Şekil 3.19 için statik denge koşulları değerlendirildiğinde, yükün sağ tarafında kalan kirişin her kesitindeki dikey kesme kuvveti, uygulanan yük ile aynı ve tam olarak eşit büyüklükte olacaktır. Dolayısıyla, yük kanadın sol tarafında kaldığı sürece kanattaki kayma gerilmesi kiriş eksenini üzerindeki yükün uygulanma noktasından bağımsız olacaktır. Eğer gerinim ölçerler yalnızca kayma gerilmesinden kaynaklanan birim şekil değişimini algılayorsa köprü çıkış sinyali yükün konumundan veya dikey yüzeyde oluşan diğer eğme momentlerinden etkilenmezler.

Gerinim ölçer ızgaralarının boylarının sınırlı olması ve şekil 3.20’de gösterildiği gibi tarafsız eksenin altında ve üstünde kalan kısımları ile ölçüm yapılması nedeniyle kanat üzerindeki eğilme momentinin yarattığı şekil değişimlerinden olumsuz yönde etkilenmektedirler. Tarafsız eksen üzerine merkezlenmiş gerinim ölçer ızgaraları ile, bu eksenin altında ve üstünde çekme ve basma eğilme gerilmelerinden doğan şekil değişimleri karşılıklı olarak birbirlerini sıfırlarlar. Ancak bu sıfırlama genellikle ideal koşullarda gerçekleşmemektedir. Yay elemanında ve gerinim ölçerin konumundaki en küçük asimetri bu sıfırlamayı olumsuz yönde etkilemektedir.

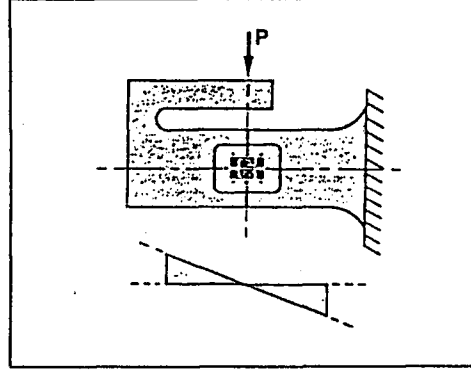


Şekil 3.21. Kesme Tipi Yay Elemanında Gerinim Ölçer Konumları

Alternatif bir gerinim ölçer konfigürasyonu şekil 3.21’de verilmiştir. Kanadın ön yüzündeki ızgara ekseni ile arka yüzündeki ızgara ekseni birbirlerine 90° yapacak şekilde yerleştirilirse ve gerinim ölçerler gösterildiği şekilde bağlanırsa, eğilme momentinin etkileri köprü devresinde sıfırlanabilir. Bu düzenleme ile köprü çıkış sinyali teorik olarak eğilme momenti ve dolayısı ile yükleme konumundan bağımsız olmaktadır. Aynı düzenleme kirişe etkiyen yanal yüklerden kaynaklanabilen her türlü eğilmeye dayalı birim şekil değişimini ortadan kaldırmaktadır.

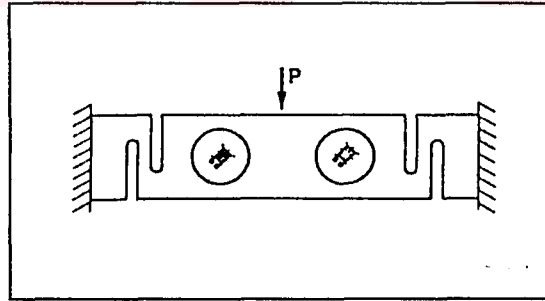
Kayma ve eğilmeden kaynaklanan şekil değişimlerini biraraya gelmeye iten yüksek dereceli etkilerden dolayı, kirişin kanat üzerinde mümkün olan en küçük eğilme momentine maruz kalacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu mümkün olduğunca kısa kirişler, yükün uygulandığı noktanın mümkün olduğunca kanattan uzak olması anlamına gelmektedir. Böylelikle kanat davranımı ideale yakın olacaktır. Eğilme momentinin kesme kanatçığı üzerindeki etkisinin en aza indirilmesi için uygulanacak olan yol Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Bu durumda belirli bir kiriş boyu ve

nominal kapasitede eğilme momenti kanat merkezinde sıfır olacak ve tüm kiriş boyunca eğilme momenti yarıya indirilmiş olacaktır.



Şekil 3.22. Kesme Tipi Yay Elemanında Eğilme Momentinin Sıfırlanması

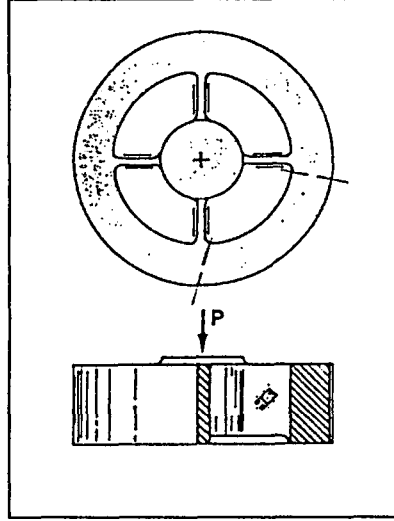
Kesmeye çalışan yay elemanları elbetteki ankastre kiriş konfigürasyonu ile sınırlı değildir ve bir çok farklı yaklaşım ticari tip dönüştürücülerde kullanılmaktadır. Şekil 3.23’de her iki ucunda esnek yapılar oluşturulmuş bir eleman görülmektedir. Bu yaklaşımda herbir kanadın bir tarafında yalnızca birer adet olmak kaydıyla dört adet gerinim ölçer, tam köprü devresi oluşturmaktadırlar. Gerinim ölçerlerin konumları ve devre düzenlemeleri sayesinde yanal yükler ve eksenden kaçık yüklerden kaynaklanan eğme momentinin etkileri yok edilebilir.



Şekil 3.23. Kesme Tipi Yay Elemanı Örneği

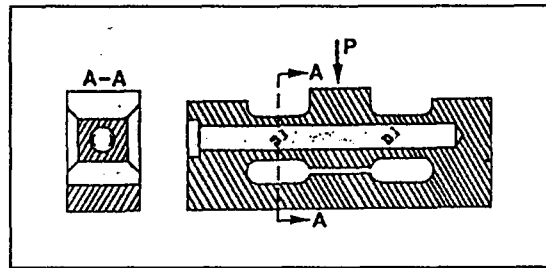
Kesmeye çalışan yay elemanlarının bir diğer türü de şekil 3.24’de gösterilmiştir. Bu ve benzeri tasarımlarda aksenal yüklemeye kayma gerilmelerine maruz kalan kanatların ve deliklerin tek bir metal bloktan işlendiği elemanlar kullanılır. Şekil 3.25’de ise bir kirişin içine yatay ekseninde bir delik delinmesi ile hazırlanmış bir kayma yüzeyi

kullanılmaktadır. Kiriş eksenine $\pm 45^\circ$ ile delik içine yerleştirilmiş olan gerinim ölçerler kayma gerilmesini algırlarlar.



Şekil 3.24. Kesme Tipi Yay Elemanı Örneği

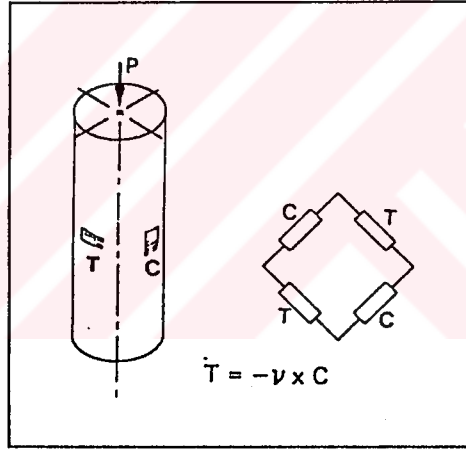
Hatalı yüklemelere karşı düşük hassasiyet özelliğinin yanında, kesmeye çalışan yay elemanları, kuvvet dönüştürücüsü tasarımcılarına bir çok avantaj sağlamaktadırlar. Genellikle belirli yük kapasitesi için toplam yükseklikleri oldukça küçüktür. Gerinim ölçerler başlangıçta yapıştırılmaları zor olan noktalara konularsa dahi daha sonraki kullanımları esnasında, ortam şartlarından ve çevreden rahatça korunabilecekleri noktalara yapıştırılırlar. Bunlardan başka düşük esneklik ve başarılı doğrusalık özellikleri ile yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücüleri için cazip birer yay elemanıdırlar. Ancak düşük kapasiteli dönüştürücüler için pek uygun değildir. Buradaki sınırlama, genellikle kanadın azami yükleme altında istenen seviyede birim şekil değişimine uğrayabilmesi için sahip olması gereken kalınlığın elastik stabilite açısından da çok ince olmasındandır [27].



Şekil 3.25. Kesme Tipi Yay Elemanı Örneği

3.2.3. Tek Eksenli Yüklemeye Çalışan Kolon Tipi Yay Elemanları

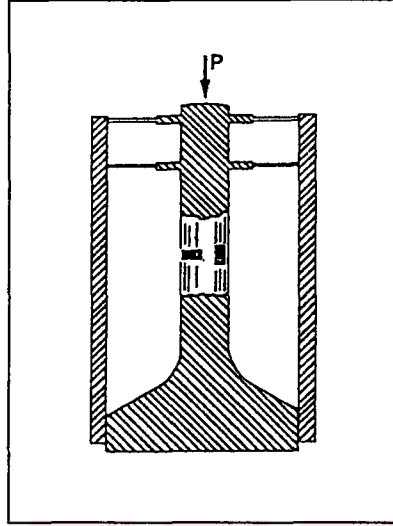
Kolon tipi kuvvet dönüştürücüleri, ilk gerinim ölçerli dönüştürücü tipleridir. Kolon tipi yay elemanları, genel formu şekil 3.26'da verilmiş olan bir veya daha fazla silindirik elemandan oluşmaktadır. Yay elemanı eksenel yükler için tasarlanmış olup; dairesel kesitte olması bir zorunluluk değildir. Genellikle en az dört adet gerinim ölçere sahip olup; bunlardan iki tanesi eksenel yöndeki şekil değişimini hissetmek üzere boyuna, diğer ikisi ise Poisson şekil değişimini hissetmek için enlemesine yerleştirilirler. Gerinim ölçerler, tam köprü devresi oluşturacak şekilde bağlanırlar. Ancak dört adet aktif köprü bacağı kullanılmaz. Çünkü, Poisson şekil değişimi, eksenel şekil değişiminden çok daha küçüktür. Gerekli dayanak ve muhafaza parçaları ve yük aktarım elemanları uygun şekilde tasarlanarak boyutlandırıldığında, bu tip elemanlar hem çekme hem de basma yüklemesi veya her ikisi için düşünülebilir.



Şekil 3.26. Kolon Tipi Yay Elemanlarının Çalışma Prensibi

Kavram olarak basit olmasına rağmen; yüksek doğruluğa sahip bir kuvvet dönüştürücüsü elde etmek amaçlandığında; ele alınması gereken bir çok parametreyi de bünyelerine toplamışlardır. Örneğin, kolonun boyu tercihan kesitine oranla yeterince uzun tutularak gerinim ölçerler yapılandırıldığı ölçme bölgesinde uç koşullarından etkilenmeyen düzgün bir birim şekil değişimi alanı yaratılır. Bu koşul normal olarak kolon boyunun, en büyük kolon kesit köşegeninden asgari beş kat daha büyük olmasını gerektirir. Kolon yapısı eksantrik yüklerin ikinci dereceden etkilerine tabi olduğundan eksenel yüklerin çıkış sinyallerine etkisi engellenmelidir. Şekil

3.27’de bu tip bir kuvvet dönüştürücüsüne ait bir kesit görünüşü verilmiştir. Kolonun üst tarafındaki iki adet diyafram yüklemeye anında oluşabilecek vektörel sapmaları ve momentleri üzerine almaktadır.



Şekil 3.27. Kolon Tipi Yay Elemanına Sahip Kuvvet Dönüştürücüsü Örneği

Haklı veya haksız, kolon tipi kuvvet dönüştürücülerinin doğrusal olmayan özelliğe yapısal olarak sahip oldukları bilinir. Doğrusal davranımdan sapma, çoğunlukla kolon elemanının kesit alanında yük altındaki deformasyonla oluşan değişime dayandırılır. Bu etkiden dolayı, yay elemanının yay sabiti basma yönünde yüklendikçe devamlı olarak artar, çekme yönünde yüklendikçe devamlı olarak azalır. Aslında son cümle şu kabulü anlatır : “Elastisite sabiti sabittir ve meydana gelen yoğunluk değişiminden bağımsızdır.” Benzer şekilde, Young sabiti, çekme yüklemesi ile azalma, basma yüklemesi ile artma eğilimindedir. Her ne kadar Young sabitindeki bu küçük değişimler, sıradan malzeme özelliklerinin analizi için son derece küçük olmasına rağmen; modern gerinim ölçerli dönüştürücülerde aranan hassasiyet için hala daha belirleyici olmaktadır. Young sabitindeki değişimler üzerine daha kesin bilgilerin mevcudiyeti tartışılırken, en azından alan değişimi neticesinde ortaya çıkan doğrusallıktan sapma belirlenebilir. Dairesel kesitli bir kolon elemanı ele alındığında, kolondaki her bir 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik dikey birim şekil değişimi için alan değişiminden kaynaklanan doğrusallıktan sapmanın, yaklaşık olarak % 0.003 olduğu hesaplanabilir.

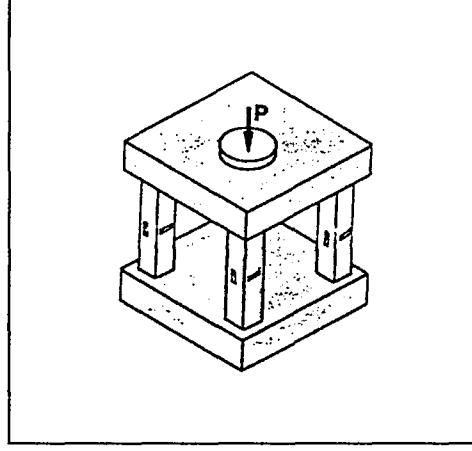
Gerçekten de, yukarıda açıklanan alan ve Young sabiti etkileri, bir kolonda asimetrik gerilim dağılımından dolayı, doğrudan veya dolaylı olarak ortaya çıkması beklenen etkilerden sadece iki tanesidir. Buna karşın eğilmeye ve kesmeye çalışan yay elemanlarının her ikisi ile de sayısal olarak eşit çekme ve basma gerilmesine maruz kalan eşit hacimde metal vardır. Dolayısı ile doğrusallıktan sapmayı kendi içinde yok edecek çeşitli mekanizmaları geliştirmektedir. Ancak bu durum kolon tipi yay elemanları için geçerli değildir.

Kolon tipi yay elemanının sahip olduğu doğrusallıktan sapma hatası incelendiğinde bunun tam köprü devresini oluşturan dört gerinim ölçerin aynı derecede aktif olmamasından kaynaklandığı görülmektedir. Bu hata, köprü devresinin bir bacağındaki direnç değişimi, kendisini takip eden dirençte aynı miktarda ve ters yönde olmadığı zaman derhal ortaya çıkmaktadır. Kolon tipi bir yay elemanında da yük eksenine yapıştırılmış olan gerinim ölçerler ile Poisson eksenine yapıştırılmış gerinim ölçerlerin sinyalleri arasında 0.3 oranı olduğu için köprü çıkış sinyali daima doğrusallıktan sapacaktır. Bu hatanın büyüklüğü ise kolon eksenindeki her bir 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik birim şekil değişimi için % 0.007'dir. Hatanın işareti ise doğrusallıktan sapmanın üzerinde belirlendiği alanın değişiminin ters yönündedir.

Her türlü kuvvet dönüştürücüsüne uygulanmak üzere geliştirilen bir teknik ile dönüştürücünün doğrusallıktan sapması kompanse edilebilmektedir. Uygulanan bu teknikte yay elemanı üzerine ilave bir gerinim ölçer yapıştırılmakta ve tam köprü devresi yerine enerji kaynağı ile köprü devresi arasına seri bağlanmaktadır. Böylelikle bu gerinim ölçer, doğrusallıktan sapma hatasını azaltacak yönde köprü besleme gerilimini ayarlamak için geri besleme olarak hizmet etmektedir. Gerinim ölçer ızgara malzemesine ve gerinim ölçerin yay elemanı üzerindeki konumuna bağlı olarak; monoton olarak değişen bir doğrusallıktan sapma hatası için yaklaşık bir kompanzasyon elde edilmektedir.

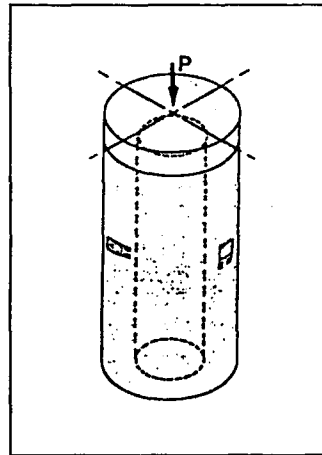
Kolon tipi yay elemanları, imalat ve performans kriterleri üzerinde çalışan her bir tasarımcının yaklaşımı ile büyük değişiklikler göstermiş ve çok çeşitlilik kazanmışlardır. Kolon kesit alanı örneğin dairesel değil kare olabilir veya gerinim

ölçerlerin yapıştırılacağı alanda dört tarafından işlenerek kare kesite dönüştürülmüş olabilir.

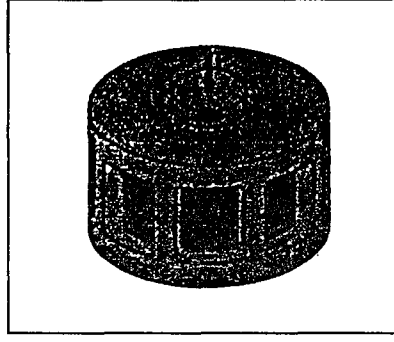


Şekil 3.28. Dört Adet Kolon Tipi Yay Elemanı Olan Dönüştürücü

Her ne kadar kolon tipi yay elemanları genellikle enine yönde küçük boyutlu iselerde büyük kapasiteler için çok uzun ve ağır olabilirler. Küçük ebatlı ve yüksek kapasiteli kolon tipi bir yay elemanı elde etmek için uygulanabilecek bir yaklaşım Şekil 3.28’de gösterilmiştir. Bu tür bir tasarımda yük, dört veya daha fazla sayıda herbirini üzerinde kendi gerinim ölçerleri bulunan küçük kolonlar tarafından taşınır. Tüm bu kolonlarda birbirlerine karşılık gelen gerinim ölçerler uygun köprü bacaklarında seri bağlanırlar. Sonuçta elde edilen yalnızca küçük ebatlı bir yay elemanı olmayıp aynı zamanda da eksentrik yüklere karşı daha az hassas bir yay elemanıdır.

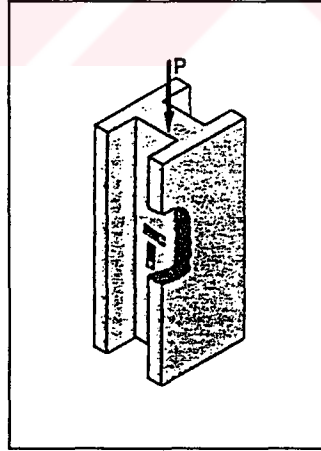


Şekil 3.29. Silindirik Delikli Kolon Tipi Yay Elemanı



Şekil 3.30. Küçük Ebatlı, Yüksek Kapasiteli Kolon Tipi Yay Elemanı

Kolon tipi yay elemanı şekil 3.29'da da gösterildiği gibi içi boş olarak üretilebilir. Aynı net kesit alanı için (dolayısı ile tek eksenli yüklemde aynı esneklik için) içi boş silindirler daha büyük atalet momentine sahip olduklarından eğilme momentine karşı daha mukavimdirler. Bu kavram şekil 3.30'da gösterilmiş küçük ebatlı çok kolonlu bir konfigürasyona da uygulanabilir. Şekil 3.31'de ise belirli bir kesit alanı için atalet momentinin büyütülmesine bir örnek verilmiştir. H-kesitli bir kolonda gerinim ölçerlerin kolonun tarafsız eksenine daha yakın olarak yapıştırılabilme olanakları vardır. Böylesi bir konumda ise, yay elemanı üzerinde oluşabilecek herhangi bir eğilme momentinin yaratacağı şekil değişimlerine karşı daha az hassas olunacaktır.



Şekil 3.31. Büyük Atalet Momentli Kolon Tipi Yay Elemanı

Her ne kadar kolon tipi yay elemanları halen daha yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinde kullanılmaktaysa da popolariteleri her geçen gün azalmaktadır. Bir çok durumda kesmeye çalışan yay elemanları daha büyük çıkış sinyali, daha iyi

doğrusallık özellikleri, daha düşük histerisiz ve daha çabuk cevap verme özellikleri ile kolon tipi yay elemanlarının yerini almaktadır [28].

3.3. Yay Elemanlarında Malzeme Analizi

Daha önce de belirtildiği üzere gerinim ölçerli bir kuvvet dönüştürücüsünün en kritik mekanik parçası yay elemanıdır. Yüke reaksiyon gösteren eleman çok yüksek vasıflı yayların özelliklerini göstermek zorunda olduğu için çoğu zaman konfigürasyonundan bağımsız “yay” olarak adlandırılır. Bu özellikler, sehim-kuvvet ilişkisinde, doğrusallık, düşük histerisiz, küçük sürünme ve düşük gevşeme olarak sıralanabilir. Bir dönüştürücü yay elemanını tanımlayan sıradışı özellikler dışında, onları konvansiyonel yaylardan ayıran temel özellik; sehim miktarıdır. Sıradan bir yay, yük altında oldukça büyük sehimler verir. Oysa tipik bir dönüştürücü yay elemanının sehimi, dönüştürücünün ebatları ne olursa olsun, yalnızca 0.1 mm civarındadır. Bu nedenle dönüştürücü elemanları, düşük elastikiyetli, yüksek hassasiyete sahip özel yaylardır.

Dönüştürücü yay elemanı bir çok açıdan hassas bir yay gibi davranış göstermesine rağmen, gerinim ölçerlerin yerleştirileceği alanda, birim şekil değişiminin yeterince büyük ve düzgün olduğu yüzeylere sahip fiziksel yapıya sahip olmak zorundadır. Genellikle dönüştürücünün toplam sehiminin en aza indirilmesi gerektiğinden; gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı alan hariç; tüm yapı içinde gerilme seviyesinin mümkün olan en düşük seviyeye indirebilmek için yay elemanı tasarımına titiz ve yoğun ilgi gösterilir.

Yay elemanının sehiminin en aza indirilmesinin esas nedeni daha önce açıklanmış olan dönüştürücünün doğal frekansının en yüksek olması koşuludur. Bir diğer neden ise yüklenme anında yükü ileten ve yükü taşıyan tüm konstrüksiyonun da yay ile seri bağlanmış olmasıdır. Bir çok uygulamada, kuvvet dönüştürücüsü ve üzerindeki yük bileşiminin doğal frekansı en büyük yapılmaya çalışılır [30].

Dönüştürücü yay elemanının seçiminde büyük titizlik gösterilmesi şarttır. Çünkü, malzemenin özellikleri, imal edilecek olan dönüştürücünün performansını ve de maliyetini etkileyecektir. Bu seçim işlemi üç aşamalı olarak değerlendirilecektir : mekanik özellikler, ısı özellikler ve imalat özellikleri.

3.3.1. Mekanik Özellikler

Dönüştürücü doğruluğunun belirlenmesindeki en önemli mekanik özelliklerden birisi malzemenin elastik alanda doğrusallığıdır. İdeali, dönüştürücünün nominal kapasitesine karşılık gelen yüke kadar olan alanda, yay malzemesinin mekanik gerilim ile birim şekil değişimi arasında tam doğrusal ilişkiye sahip olmasıdır. Ayrıca, bir çok dönüştürücü tasarımı için, gerilme/birim şekil değişimi ilişkisinde eğimin çekme yönünde olduğu kadar basma yönünde de aynı olması aranan bir özelliktir. Bir dönüştürücü çıkış sinyalinin doğrusallıktan sapması, malzeme davranımı yanında bir çok başka nedene de bağlı olabilir. Ancak, en yüksek doğruluğa ulaşabilmek için öncelikle doğrusal mekanik özelliklere sahip bir yay elemanı malzemesi ile tasarıma başlanmalıdır.

Yay malzemesi, çalışılan tüm gerilme aralığı boyunca tam elastik davranış göstermelidir. Örneğin, histerisiz düşük olmalıdır. Böylelikle, her hangi bir ölçüm serisinde, hem artan hem de azalan ölçümler yapıldığında aynı gerilim için aynı birim şekil değişimini üretmelidir. Benzer şekilde, belirli bir yük uygulanıp zamanla sabit tutulduğunda, şekil değişimi de zamanla sabit kalmalıdır. Yani bir başka deyişle malzeme sürünme özelliği göstermemelidir. Malzeme, sabit deformasyon altında üzerindeki gerilimi de sabit tutabilmelidir. Bir diğer seçim kriteri ise ele alınan mekanik özelliklerin ardıl yüklemelerde zamanla kendisini tekrarlayabilmesidir.

Metallerin, Young sabiti, akma mukavemeti ve maksimum çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini veren konvansiyonel tablolar, dönüştürücü yay elemanı olarak kullanılacak olan malzemelerin performansının tayininde doğrudan kullanılamazlar. Burada görülen değerler azami yükleme altında dönüştürücüde oluşan şekil değişimi seviyesinin çok ötesindeki değerler için geçerlidir. Özellikle aşırı yükleme esnasında göstereceği davranış ele alındığında, yay malzemesinin yapısal özellikleri çok önemli olabilir. Kuvvet dönüştürücülerinin, belirli bir hasar oluşmadan önce tam kapasitesinin üzerindeki yüklerde de dayanması beklenmektedir. Bu tür beklentiler akma mukavemeti ve ilgili özelliklerin titizlikle değerlendirilmesini gerektirir. Eğer öngörülen aşırı yükleme altında herhangi bir hasar oluşumu engellenmek isteniyorsa;

malzeme, dişli bağlantılar gibi gerilme yoğunluğunun bulunduğu bölgelerde hasar oluşumunu önlemek için yeterince sünek olmalıdır. Bu nedenle, sertliği HRc 50'nin üzerinde olan çelikten mamul yay elemanları çok nadirdir. Daha sert alaşımlar biraz daha iyi yay elemanı malzemesi olabilirler; ancak, bunun kırılğan bir yapı oluşturacağı da unutulmamalıdır.

Bir kuvvet dönüştürücüsünün çok büyük sıklıkla kullanılması öngörülmesine rağmen, iyi tasarlanmış bir yay elemanında yorulma mukavemeti ikinci değerlendirme parametresi olarak yer almaktadır. Çünkü, bir gerinim ölçerin yorulmaya karşı olan hassasiyeti sınırlayıcı bir parametredir. Yay elemanında, gerinim ölçerin yerleştirildiği bölgede oluşan en büyük şekil değişimine bağlı olarak (ki bu şekil değişimi gerinim ölçerin kullanım ömrünü belirler) elemanda yorulma riski olmamalıdır. Bu genel prensibin bir istisnası, çift modlu kuvvet dönüştürücüleridir. Bunlar hem çekme hem de basma yüklemesinde kullanılmak üzere imal edilmişlerdir. Çok sayıda ardıl ve ters yönlü yüklemeler yapılması öngörülüyor ise yay elemanını yorulmadan kaynaklanan hasara karşı korumak için mekanik tasarım ve malzeme seçimi aşamasında özenli olarak tasarlamak gereklidir.

Şu ana kadar anılmamış olan, yay malzemesinin Young sabitidir. Bu sabit, temel olarak tasarlanan dönüştürücünün yüklenme sıklığının yoğun veya seyrek olmasına bağlı olarak belirli koşullar altında malzeme seçiminde en önemli parametredir.

3.3.2. Isıl Özellikler

Bir önceki kısımda açıklanmış olan mekanik özellikler, bir dönüştürücü için tipik çalışma koşullarında, yani oda sıcaklığı olarak tanımlanan $\pm 40^{\circ}\text{C}$ 'de geçerlidir. Bu sınırların dışına çıkıldığında, mekanik özellikler genellikle malzeme seçimini etkileyecek kadar değişim göstermezler. Bir dönüştürücü çok yüksek veya çok düşük sıcaklıklarda kullanılmak üzere tasarlandığında, malzemenin çalışma sıcaklığındaki mekanik özellikleri değerlendirilmelidir. Çok aşırı sıcaklıklar seçilebilecek malzeme sayısını sınırlandıracaktır.

Bunların dışında, dönüştürücünün performansını büyük ölçüde etkileyebilecek yay malzemesinin sıcaklığa bağlı özellikleri vardır. Bunların en önemlileri ısı özellikleri olarak tanımlanmıştır.

Yay elemanının ısı transfer özellikleri, dönüştürücünün doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini belirleyen en önemli etkenlerdir. Yay elemanında oluşabilecek sıcaklık farklılıkları dönüştürücü çıkış sinyalinde düzensiz ve tekrar gerçekleştirilemeyen rahatsızlıklara sebebiyet verebilir. Sonuç olarak yay elemanı, mekanik özellikleri kadar sahip olduğu ısı transfer özellikleri de hatırlanarak tasarlanmalıdır. Herhangi bir tasarımda, içeriden veya dışarıdan etkiyen ısı girdilerin etkisi altında eleman içindeki sıcaklık farklılıkları, malzemenin ısı iletkenliği ile ters orantılı olarak değişir. Dolayısı ile, ısı iletkenlik yay malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir.

Malzemenin ısı genleşme katsayısı, her ne kadar yaygın olarak abaklarda yer alıyorsa da yay malzemesi seçiminde birinci dereceden etkin değildir. Dönüştürücü çıkış sinyali üzerinde, ısı genleşmenin birinci dereceden etkileri, normal olarak tam köprü devresinde kendinden sıcaklık kompanzasyonlu gerinim ölçerler kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Kesit alanlarında, moment kollarında ve benzer geometrik parametrelerdeki boyutsal değişimlerin yol açtığı daha üst seviyeli etkiler vardır. Bunlar 60°C'lik bir değişimde % 0.1 ila 0.2 mertebesinde etkiye sahiptir. Bunların dönüştürücü çıkış sinyali üzerindeki etkilerinin sıcaklık değişiminden kaynaklanan diğer saplardan ayrılması mümkün değildir. Bu nedenle sıcaklık değişiminden kaynaklanan tüm etkileri içeren bir düzeltme önlemi uygulanmalıdır.

Bir çok malzemenin Young sabiti sıcaklık ile değişim gösterir. Metaller için her 60°C'lik değişim için bu sabitteki azalma % 1-3 mertebesinde dir. Bu etki, sıcaklık yükseldikçe dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalini de artmasına neden olur. Dönüştürücülerde kullanılmak üzere sıcaklıkla değişim göstermeyen Young sabitine sahip özel alaşımlar düşünülürse de; soruna tam bir çözüm olmamıştır. Bunun nedeni ise gerinim ölçerin k-sabitinin de sıcaklıkla değişmesidir. Bu da dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalini doğrudan etkilemektedir. Sıcaklıktan

kaynaklanan dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalindeki değişimleri kontrol etmek için çeşitli pratik ve oldukça etkin yöntemler geliştirilmiştir. İleriki kısımlarda açıklanacak olan bu yöntemlerle, dönüştürücünün toplam kalibrasyonu oldukça geniş bir sıcaklık aralığında korunabilmektedir.

3.3.3. İmalat Özellikleri

Yay malzemesinin mekanik ve ısı özelliklerine ilaveten seçim aşamasında ele alınması gereken imalatla ilgili çeşitli özellikler mevcuttur. Bunlardan en önemlisi işlenebilirliktir. Günümüz dönüştürücülerinin bir çoğu oldukça karmaşık şekillerde yay elemanlarına sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Yay elemanı tercihan tek parça malzemedен işlendiğinden girintili çıkıntılı hassas işleme gerekmektedir. Bir çok durumda alaşımın işlenebilirliği, dönüştürücünün nihai performansını ve maliyetini belirlemektedir.

Sertleştirme işlemi esnasında herhangi bir çarpılma veya bozulmaya uğramama, bir alışımda aranan temel işlenebilirlik özelliğidir. Potansiyel olarak yay malzemesi olmaya uygun bir çok alaşım yalnızca sertleştirilmeden önce işlenebilir. İstenilen mekanik özelliklerin oluşması için yüksek sıcaklıkta bir ısı işlem gerekiyor ise; orijinal şekil üzerinde ciddi çarpılmalar ve bozulmalar oluşabilir. Bu ihtimal özellikle yüksek ısı işlem sıcaklıklarından sonra suya veya yağa daldırılan alaşımlar için geçerlidir. Böylesi alaşımlar, eğer eleman konfigürasyonu hem kalın hemde ince kesitler içeriyorsa nadiren kullanılırlar.

Bazı dönüştürücü tasarımlarında kaynak veya lehim yoluyla birden fazla elemanın yay elemanına bağlanması, veya yay elemanının birden fazla parçadan imal edilmesi gerekebilir. Böylesi bir durumda malzeme özellikleri doğal olarak uygulamaya uygunluğu etkileyecektir. Yay malzemesinin seçimine etkiyen bir diğer etken de malzemenin öngörülen imalat koşullarına uygun miktar, şekil ve ebatla ticari olarak mevcut olup olmadığıdır. Her ne kadar ikincil olarak değerlendirilse de, malzeme maliyetleri yapılacak olan seçimi etkileyebilir.

Hiç bir yay elemanı tek başına her türlü uygulama için uygun olamayacağından, mekanik, ısı ve imalat özelliklerini birarada değerlendirerek malzeme seçimi yapılmalıdır. Belirli bir uygulama için en uygun yay malzemesi, dönüştürücünün başarısını belirleyen çeşitli kriterlerle uygulamaya özel öncelikleri karşılıklı olarak değerlendirilerek belirlenir. Buradaki sınırlamalar, yük kapasitesi, aranan doğruluk seviyesi, şekil ve boyut, işletme koşulları, öngörülen imalat miktarı ve maliyettir.

3.3.4. Yüksek ve Düşük Elastikiyet Modüllü Malzemelerin Karşılaştırılması

Dönüştürücü yay elemanında özel olarak aranan özellikler, malzeme seçimi işleminde Young modülüne özel bir önem kazandırmaktadır. Bu amaçla, yay elemanı olarak uygun olabilecek çeşitli malzemeleri yüksek veya düşük elastikiyet modüllü malzemeler olarak sınıflandırmak uygun bir yaklaşımdır. Uygulamaları birbirinden ayıran kesin bir çizgi olmadığından yüksek elastik modüllü malzemeler (çelik) genel olarak büyük kuvvet dönüştürücüleri için, düşük elastik modüllü malzemeler (Alüminyum ve ferritik olmayan malzemeler) ise küçük kuvvet dönüştürücülerinde kullanılır. Bu temel üzerinden malzeme seçiminin çeşitli nedenleri vardır.

Dönüştürücü yay elemanının çok küçük esnekliğe sahip olması gerektiği daha önce belirtilmişti. Aynı zamanda da gerinim ölçerlerin yerleştirileceği yerlerde yeterince yüksek (1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ - 1500 $\mu\text{m}/\text{m}$) birim şekil değişimleri olmalıdır. Yüksek kapasiteli dönüştürücülerde boyutları uygun oranlarda seçilmiş çelik elemanlarla bu koşulları yerine getirmekte bir sorun yoktur. Ancak kapasite azaldıkça gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda malzeme kalınlığı azaltılarak; gerekli birim şekil değişimi seviyesine ulaşılır. Gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri kısımlarda çok ince kesitlerin varlığı, dönüştürücü performansını olumsuz yönde etkileyen çeşitli etkilere yol açmaktadır.

İnce malzeme kesitlerinde gerinim ölçer, yapıştırıldığı bölgede yay elemanının ciddi oranda mukavemetinin artmasına neden olur. Bu durum özellikle eğmeye çalışan yay elemanlarında görülür. Kiriş kalınlığı azaldıkça gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri tüm kesitlerdeki kalınlığın büyük kısmı gerinim ölçere ait olur ve bu durumda gerinim ölçer ızgaraları kiriş yüzeyinden nispeten uzaklaşmışlardır. Gerinim ölçer ızgaraları ile yay

elemanı yüzeyi arasındaki malzeme plastik matrisdir. Sonuçta dönüştürücü elemanı plastik bir yapı ile bölgesel olarak güçlendirilmiş olup; bu kompozit yapı, uygulanan kuvvet ile gerinim ölçer çıkış sinyali arasındaki zamana bağlı ilişkinin olduğu sürünme göstermektedir.

Gerinim ölçerlerin yerleştirildikleri ince kesitler, eleman içerisinde ısı transferini olumsuz yönde etkilerler. Gerinim ölçer tarafından üretilen ısının büyük bir kısmı gerinim ölçer ızgaralarından yay elemanı yüzeyine ve buradan da elemanın içine doğru yayılır. Gerinim ölçer yerleştirildiği bölgedeki uygunsuz ince kesitlerde bu ısı akışı belirli bir sıcaklık farkı yaratabilir ve bu fark gerinim ölçer bulunduğu noktada daha da büyüktür. Böylesi bir durum sadece gerinim ölçer çıkış sinyalini değil, aynı zamanda da, kesitte ısıl gerilmeler yaratarak; bölgesel bir şekil değişimi alanı da yaratabilir. Bu oluşum çözümü oldukça sorunlu olan performans problemlerine yol açar.

İnce kesitle ilgili olarak diğer sorunlar yay elemanının imalatında ortaya çıkabilir. Bir çok karmaşık eleman tasarımları girintili çıkıntılı hassas imal usulleri gerektirmektedir ve kesitte kalıntı gerilmeler veya bölgesel deformasyonlar yaratmadan çok ince kanatların imali kolay değildir. İmalattan kaynaklanan deformasyonların doğru olarak ölçülmesi oldukça güçtür ve bunlar fark edildiğinde parçayı hurdaya atmaktan başka çare yoktur. Kesitlerde oluşan kalıntı gerilmelerin tahribatsız muayene usulleri ile belirlenmesi hemen hemen imkansızdır. Yapıda kalıntı gerilmeler mevcut ise; bu durumdan dönüştürücünün performansı olumsuz yönde etkilenmektedir. Seri imalata geçildiğinde kalıntı gerilmeler her bir dönüştürücüde farklı sonuçlara yol açabilmektedir.

Düşük kapasiteli yay elemanlarında daha kalın kesitler elde etmenin en etkili yollarından birisi, alüminyum alaşımları gibi düşük elastisite modülüne sahip malzeme kullanımıdır. Alüminyum alaşımları genellikle karakteristik yay elemanı olarak düşünülmeseler de; yay elemanı uygun olarak boyutlandırıldığında, bu konumdaki işlevlerini başarı ile yerine getirmektedir. Sonuç olarak alüminyum alaşımli yay elemanları yaygın olarak düşük kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinde kullanılmaktadır.

3.3.5. Malzeme Seçimi

Dönüştürücü yay elemanı malzemesi seçiminde kullanılmak üzere genel amaçlı Tablo 3.1 hazırlanmıştır. Tablodaki malzemeler üç ayrı gruba ayrılmışlardır : Yüksek elastikiyet modüllü malzemeler, düşük elastikiyet modüllü malzemeler ve diğerleri. Malzemelerin ilk olarak mekanik özellikleri, ardından ise doğrusallık, histerisiz, sürünme gibi özellikleri için 1 den 10'a kadar puanlanmış performans değerlendirilmeleri yer almaktadır. Bu puanların yüksekliği o özelliğin de istenen seviyeye yakınlığının göstergesidir.

Tabloda yer alan tüm değerler normal koşullar altında kullanılan malzemeler için nominal, oda sıcaklığı değerleridir. Burada verilen tablo hazırlanırken bir çok kaynağa başvurulmuş, zaman zaman aynı malzeme için çelişkili değerlere rastlanmıştır. Dolayısıyla; bu tablo, öncelikle malzeme seçiminde kullanılmalı, ardından o malzemenin mekanik özellikleri imalatçı firmadan güncel değerler olarak alınmalıdır. Hatta imkan varsa tüm bu değerler akredite laboratuvarlar tarafından sertifikalandırılmalıdırlar. Tabloda yer alan değerler SI olmayıp dönüşüm katsayıları dip not olarak verilmiştir. Malzemelerin birbirlerine göre göreceli değerlendirmelerindeki puanlama daha çok imalatçı ve tasarımcıların tecrübelerine dayanmakta olup, genel bir fikir vermesi amaçlanmıştır [30].

◆ Yüksek elastikiyet modüllü alaşımlar

4140 ve E4340 takım çelikleri yıllardır yüksek kapasiteli kuvvet dönüştürücülerinin yay elemanlarında kullanılmaktadır. Dönüştürücünün boyutlarının büyük olduğu ve sertleştirme ısıl işlemi gerektiğinde herhangi bir çarpılma oluşmayan bu çelikler oldukça iyi birer çözümdürler. Marajin çelikleri de bugün için kullanılmakta olan en popüler yüksek elastisite modüllü yay malzemeleridir. Bunlar sertleştirilmeden önce rahatça işlenebilir, ardından düşük sıcaklıkta ısıl işlemler ile çok küçük çarpılmalarla nihai özelliklerine kavuşurlar. Bu çeliklerin oksidasyona karşı dirençleri de, bir çok dönüştürücü tasarımındaki en önemli üstünlüklerinden birisidir. Ancak bu çeliklerin en önemli sakıncası düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları ve imalatdan çıkan her bir kütüğün farklı değere sahip olmasıdır.

MALZEME	MEKANİK ÖZELLİKLER										PERFORMANS ÖZELLİKLERİ								NOTLAR
	Elastisite Modülü psi x 10 ⁴	Akma Mukavemeti psi x 10 ³	Islıl Genleşme Katsayısı ppm/°F	Yoğunluk lb/ft ³	Önerilen Azami Sıcaklık, °F	Islıl İletkenlik BTU / (hr · ft ² · °F/in)	Uzama, %	Sertlik HRC	Islıl İletkenlik	Doğrusallık	Histerisiz	Sürtünme	Malzeme Maliyeti	İşlenebilirlik	Sertleştime	Çarpılması	Korozyon Direnci	Kaynağa Uygunluk	
Yüksek Elastisite Modüllü Alaşımlar																			
4140	30	200	6.5	0.283	+400	270	12	42-45	3	8	7	9	5	3	1	5	6	6	Cok iyi
E4340	30	210	6.3	0.283	+500	260	12	43-46	3	8	8	8	5	3	1	5	8	8	Mükemmel
18 Ni (250), marajin	27	245	5.6	0.289	+600	140	7-10	48-49	2	8	7	4	5	8	2	8	5	5	İyi, ama nadiren kullanılan
410 pasli.	29	140	6.0	0.280	+400	170	15	39	2	7	6	7	4	2	6	2	6	6	Nadiren kullanılan
630 pasli. (17-4 PH)	28.5	185	6.0	0.280	+400	135	14	41-44	2	7	7	6	6	8	7	7	7	3-4	Yaygın kullanılan
631 pasli. (17-7 PH)	29	220	5.7	0.276	+400	130	6-7	46-48	2	8	8	7	6	8	7	7	5	5	Yaygın kullanılan
632 pasli. (PH 15-7 Mo)	29	220	5.0	0.277	+500	110	6	47	2	8	8	4	6	8	7	7	5	5	Mükemmel, amaçlanılmadık
S15500 pasli. (15-5 PH)	28.5	185	6.0	0.280	+400	135	14	41-44	2	7	7	6	6	8	7	7	5-6	5-6	630'un gelişmiş şekli
Düşük Elastisite Modüllü Alaşımlar																			
2014-T6 Al	10.6	60	12.4	0.101	+200	1075	10	B 135	8	6	6	5	8	9	3	3	6	6	İyi
2024-T6/T351 Al	10.6	46	12.6	0.101	+200	840	18	B 120	7	6	6	5	8	9	3	3	6	6	İyi, yaygın kullanılan
2024-T81 Al	10.6	65	12.6	0.101	+250	1040	8	B 128	8	7	8	5	8	9	3	3	6	6	En iyisi
6061-T6 Al	10.0	40	12.9	0.098	+150	1160	14	B 95	8	5	4	4	6	7	8	4	5	5	Fena değil
7075-T6 Al	10.4	70	12.9	0.101	+100	840	10	B 150	7	7	6	6	5	8	3	2	5	5	Yüksek sıcaklıklarda zayıf
Be-Cu 25	17	170	9.3	0.298	+250	750	2-3	40-42	7	8	8	2	5	9	3	4	7	7	Mükemmel, ama maliyeti
6 Al 4V Ti	16.5	165	4.9	0.160	+300	50	12	40	1	7	7	2	3	2	8	4	4	5	Sadece özel uygulamalarda
Diğer Malzemeler																			
AlSi 304 Pasli Çelik	28	150	9.6	0.290	+250	110	4-5	39	2	5	4	4	3	8	8	5	6	6	Zayıf yay malzemesi
Ni-Span-C alaşım	28	180	4.3	0.294	+250	90	9	37-38	1	8	8	3	3	4	3	5	7	7	Çok iyi, ama maliyeti
AZ31B Mg	6.5	32	14.5	0.064	+100	650	1.5	B 73	6	3	2	2	6	8	1	7	5	5	Çok zayıf yay malzemesi
Seramik, Al ₂ O ₃ (99+%)	55	60-70	3.3	0.141	+500	260	Moht: 9	—	3	7	8	1-3	1	10	7	7	7	7	Sadece özel uygulamalarda
Lamine Epoksi-Cam	5-7	70-100	5-8	0.06-	100-	2	—	—	0	5	4	3	3	4	4	—	—	3	Sadece özel düşük-doğruluk uygulamalarında

Tablo 3.1. Dönüştürücü Yay Elemanları İçin Malzeme Seçim Tablosu

◆ Düşük elastikiyet modüllü alaşımlar

Günümüzde en yaygın kullanılan düşük elastisite modüllü malzemeler alüminyum alaşımlarıdır. Diğerleri içinde en yaygın olarak kullanılanları 2024-T6 ve 2024-T351 kodlu alaşımlardır. Ancak tümü içinde en iyi özelliklere, temel olarak 2024-T4'dün 190°C civarında yaşlandırıldığı 2024-T81 kodlu alaşım sahiptir.

Toplam performans değerlendirildiğinde Be-Cu 25 düşük elastisite modüllü malzemeler içinde en iyisidir. Malzemenin pahalı olması yanında, işlenirken de sıcaklığın Berilyum üzerindeki olumsuz etkileri olduğu düşünülerek gerekli önlemler alınmalıdır. Çeşitli Titanyum alaşımlarının da yay malzemesi olarak iyi sonuç vermelerine rağmen, fiyatlarının yüksekliği ve ısı işlemden sonra belirgin çarpılmaların oluşması en büyük sakıncalarıdır. Ayrıca tüm bu olumlu özellikleri, çok düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olmaları nedeniyle bir anda önemini yitirmektedir.

◆ Diğer malzemeler

Mg alaşımları düşük elastisite modüllü uygulamalar için çeşitli imkanlar sunmaktadır. Ancak, şu an için mevcut Mg-alaşımları, çok zayıf yay özellikleri göstermeleri ve mekanik özelliklerinin zamanla değişmesi sebebiyle nadiren kullanılmaktadırlar.

18-8 kodlu paslanmaz çelik mükemmel oksidasyon direncine sahip olmasına rağmen ısı işlemlerle sertleştirilemediğinden çok sınırlı bir uygulama alanı bulmuştur.

Ni-Span-C alaşımı özellikle hassas yaylar için geliştirilmiştir. Uygun bir ısı işleme elastisite modülü geniş bir sıcaklık aralığında değişmez duruma gelebilmektedir. Ancak bu özelliği gerinim ölçer uygulamalarında çok büyük öneme sahip değildir. İlk değerlendirmede mekanik özellikleri açısından iyi bir yay malzemesi imiş gibi gözükse de yüksek maliyet ve işlenmesinin zorluğu nedeniyle pek tercih edilmemektedir.

Fiber esaslı kompozit malzemeler, her ne kadar yapılarındaki plastik zamana bağılı değişimler yaratsa da; günümüz yapısal uygulamalarında hergeçen gün daha fazla yer almaktadır. Bu alanda elde edilen gelişmelerle, başlangıçta küçük kuvvet dönüştürücülerinin düşük ve orta sınıfta doğruluğa sahip olanları için kullanılabilirlerdir [21].



BÖLÜM 4. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ İÇİN GERİNİM ÖLÇER SEÇİM KRİTERLERİ

Bu bölümde kuvvet dönüştürücüleri için gerinim ölçer seçimi ve uygulaması ile ilgili temel bilgiler verilecektir. Literatürde yer alan bilgilerin büyük çoğunluğu deneysel gerilme analizine dönük olarak hazırlanmışlar; ancak, kuvvet dönüştürücülerine özel kriterler göz önünde bulundurularak, bu bilgiler ışığında bir değerlendirme yapılacaktır.

Deneysel gerilme analizi koşullarının aksine, bir dönüştürücüye uygulanan gerinim ölçer, referans ölçüm standardına göre kalibre edilebilir. Bu referans standart, bir kuvvet standardı/kalibrasyon makinası veya kalibreli bir başka kuvvet dönüştürücüsü olabilir. Çok hassas ölçüm standartlarının ve elektronik cihazların gelişmesi ile imalatçılar ve araştırmacılar çok yüksek performanslı dönüştürücüler geliştirebilmektedir. Gerçekte, bir dönüştürücünün davranımı, 5 ppm (1,000,000'da 5) çözünürlükle incelenebilmektedir. Bu yay elemanının yüzeyindeki birim şekil değişiminin 0.005 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik bir çözünürlükle analizi anlamına gelmektedir. Böylesi küçük boyutsal değişimlerin sıhhatli analizinde doğal olarak titiz bir gerinim ölçer seçimi ve uygulamasını gerektirmektedir.

Bir dönüştürücü için gerinim ölçer seçim işlemi şu aşamaları içermektedir:

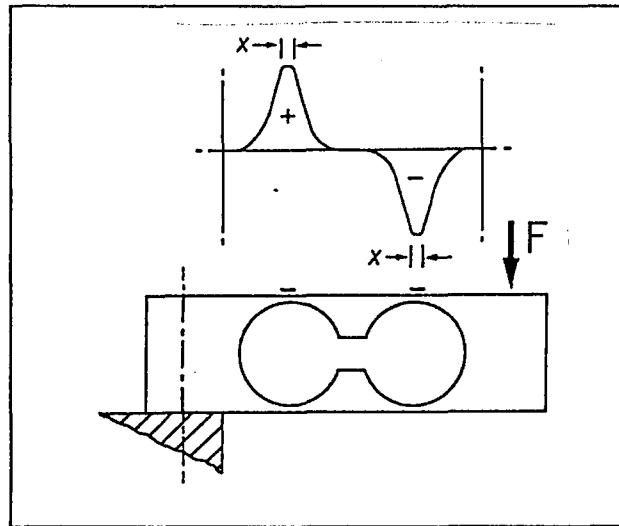
- a) Gerinim ölçer ölçü boyu
- b) Gerinim ölçer ızgara geometrisi
- c) Gerinim ölçer serisi
- d) Gerinim ölçer ızgara direnci
- e) Öz sıcaklık kompanzasyon (S-T-C) sayısı
- f) Diğer özellikler

Bir kuvvet dönüştürücüsünün performansında, gerinim ölçer seçimi ve uygulamasının olduğu kadar yapıştırıcı seçiminin de büyük önemi vardır. Dolayısıyla bu konu başlığı altında, yapıştırıcı türlerinden de kısaca söz edilecektir [14], [30].

4.1. Gerinim Ölçer Ölçü Boyu

Uygulamaya dönük dönüştürücü tasarımı ele alındığında; gerinim ölçerlerin, maksimum şekil değişimi olan bölgeye yerleştirilmeleri gerekmektedir. Böylece yay elemanı malzemesine uygun olarak, müsaade edilen en büyük çıkış sinyali elde edilir. Aynı zamanda, gerinim ölçerlerin yapıştırılarak ölçüm yapılmasıyla ön görülen alanda gerilim yoğunlaşması engellenip; yorulmadan kaynaklanan hasarlara karşı tehlikeler de bertaraf edilir. Birim şekil değişimini gerinim ölçerlerin yapıştırılacağı bölgede en büyük değerine çıkartıp, aynı zamanda yay elemanının toplam sehimini azaltarak; bu durumun doğrusallık ve doğal frekans üzerindeki etkileri iyileştirilmiş olur.

Şekil 4.1'de gösterilmiş olan dürbün tipi yükleme elemanı değerlendirildiğinde, iki deliğin kirişe, deliksiz kirişin sahip olamayacağı seviyede bir esneklik verdiği görülür. Delikler gerinim ölçerlerin yapıştırıldıkları yüzeylerde bölgesel şekil değişimi yoğunlaşması sağlamaktadır. X boyutu azami ve normal olarak düzgün birim şekil değişimi alanının boyunu vermektedir. Dolayısı ile gerinim ölçerlerin ızgara boyu X uzunluğundan daha uzun olmamalıdır.



Şekil 4.1. Dürbün Tipi Yay Elemanında Gerinim Ölçer Uygulaması

Bu ve benzer bir çok dönüştürücü tasarımında genel kural olarak, gerinim ölçerin yapıştığı belirli alandaki birim şekil değişimi % 10 ila 15'den fazla değişmemelidir. Bu koşul, gerinim ölçer ızgaraları altında düzgün bir şekil değişimi dağılımını muhafaza ederek elde edilebilecek mümkün olan en büyük çıkış sinyalinin verir. Gerinim ölçer ızgaraları altında düzgün bir şekil değişimi dağılımı, gerinim ölçerin yorulma ömrünü olumlu yönde etkilemekte ve sabit yük altında dönüştürücü çıkış sinyalindeki sürünmeyi iyileştirmektedir. Düzgün birim şekil değişiminin olduğu alanın geniş olduğu tek eksenli yüklemeye tabi kolon tip elemanlar ile, kesmeye çalışan yay elemanlarında, gerinim ölçerin boyutunu, yapıştırma yüzeyinin boyutları, ısı yayılım şartları ve maliyet belirler. Tüm bu faktörler gerinim ölçer ızgara boyunun 1.5 - 3.2 mm arasında seçilmesiyle optimize edilebilir [23], [24].

4.2. Gerinim Ölçer Izgara Geometrisi

İlk olarak gerinim ölçer ızgara boyu seçildikten sonra, ikinci aşama üretici kataloglarından ızgara tipinin seçilmesidir. 1.5 mm'lik ızgara uzunluğu için, ızgara tipi seçiminde uygulanabilecek genel kriterler şunlardır :

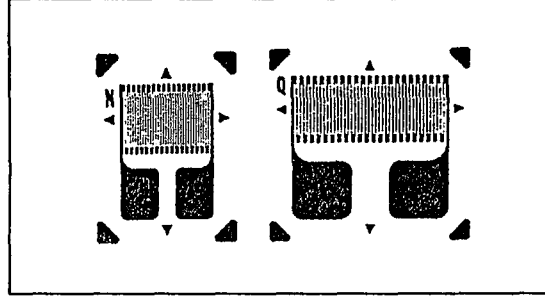
4.2.1. Izgara genişliği

Genellikle geniş ızgaralar, geniş alanların daha iyi güç tutma kabiliyeti olmasından dolayı, dar ızgaralara oranla daha fazla tercih edilirler. (Bkz. Şekil 4.2) Bu olumlu özellikleri değerlendirilirken maliyetlerde göz önünde bulundurulmalıdır. Dar ızgaralı gerinim ölçerlerin fiyatları nispeten düşüktür. Ancak teknolojik olarak her ikisi de kuvvet dönüştürücü tasarımında aynı derecede başarılı olarak kullanılabilirler. Bununla ilgili özel durumlar ileriki kısımlarda açıklanacaktır.

4.2.2. Çoklu ızgaralar

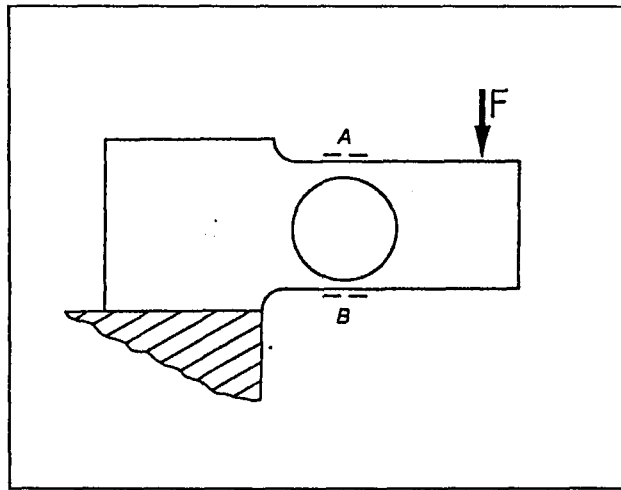
Bir çok dönüştürücü türünde gerinim ölçerlerin yapıştırıldıkları noktalar birbirlerine çok yakındır. Şekil 4.3'de gösterildiği üzere iki ardıl Wheatstone köprüsü bacağı tek bir rozet üzerine yerleştirilerek A ve B noktalarına ayrı ayrı gerinim ölçerler

yapıştırmak yerine her ikisini de kapsayacak şekilde tek bir gerinim ölçer uygulanabilir. Bu tür uygulamaların temel üstünlükleri şunlardır:



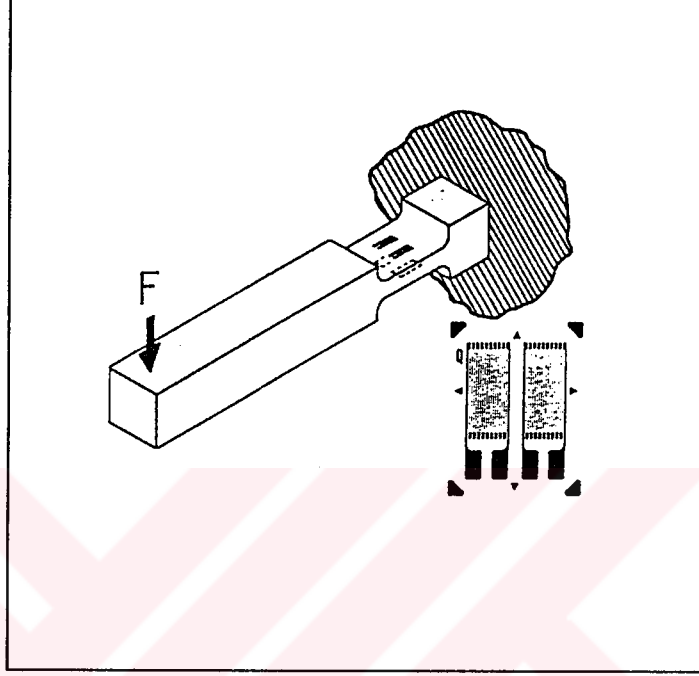
Şekil 4.2. Dar ve Geniş Gerinim Ölçer Izgaraları

- Gerinim ölçerlerin pozisyonlarının ayarlanması ve yapıştırılması, çok daha çabuk ve çok daha az hatalı olarak gerçekleştirilebilir.
- Her bir gerinim ölçer çifti yarım köprü oluşturduklarından ve biri çekmeye diğeri basmaya çalışan yüklemeler altında kaldıklarından, bileşim noktasında tek bir lehim plakasını paylaşabilirler. Böylece, kablolama zamanını azaltırlar.
- İki izgara da, imalatları esnasında aynı plakadan üretildiklerinden, hemen hemen birebir eşit ısıl özellikler gösterirler. Sonuçta sıcaklık değişiminden kaynaklanabilecek hatalar en aza indirilebilir. Bu durum özellikle birbirini takip eden ardıl iki köprü bacağında büyük öneme sahiptir.



Şekil 4.3. Çoklu Izgaraların Eğilme Elemanı Üzerinde Uygulaması

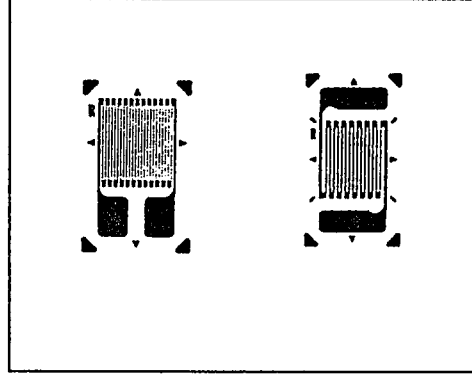
Çoklu ızgaralara ait bir diğer uygulama da şekil 4.4’de bir eğilme elemanı üzerinde gösterilmiştir. Genel olarak biraz önce açıklanan avantajlara sahiptir. Ancak, yan yana duran iki gerinim ölçer, Wheatstone köprüsünün karşılıklı bacaklarını oluşturduğundan sıcaklıkla sıfır sapmasındaki iyileşme burada elde edilemez.



Şekil 4.4. Çoklu Izgaraların Eğilme Elemanı Üzerinde Uygulama Örneği

4.2.3. Lehim plakaları

Bazı gerinim ölçer tipleri birden fazla lehim plakası konfigürasyonuna sahiptir. Şekil 4.5’de gösterilen örnekte olduğu gibi bazıları yanyana iki lehim plakasına sahipken, bazılarıda karşılıklı olarak yerleştirilmişlerdir. Böylesi bir yaklaşımın yegane nedeni konstrüktif sınırlamalara bir ölçüde de olsa serbestiyet getirmektir. Ancak; karşılıklı yerleştirilmiş lehim plakalarına sahip bir gerinim ölçerin yerleştirildiği alanda bir sıcaklık gradyanı varsa; iki uç arasında ısıl EMF (elektromotor kuvvet) oluşacağından; ölçme aşamasında sorunlar ortaya çıkacaktır. Bu durum özellikle DC cihazlar kullanıldığında ve gerinim ölçer alaşımı yüksek EMF değerine sahip olduğunda çok önemli olmaktadır [14].



Şekil 4.5. Çoklu Izgara Örnekleri

4.3. Gerinim Ölçer Serisi

Gerinim ölçer serisi ifadesi kullanıldığında kastedilen, ızgara alaşımı ve ızgarayı üzerinde bulunduran taşıyıcıdır. Bu aşamada her ikisinin de değerlendirilmesi ayrı ayrı yapılacaktır. Ancak; seçim yapılırken, bu bilgiler ışığında üretici kataloglarından seri olarak seçilecektir.

4.3.1. Gerinim ölçer ızgara taşıyıcısı

Gerinim ölçer taşıyıcısı aşağıda sıralanan çeşitli işlevleri birlikte yerine getirmektedir:

- Son derece hassas olan gerinim ölçer ızgaralarının, gerinim ölçer taşınırken veya yapıştırılırken zarar görmemesi için taşıyıcı özelliği vardır.
- Yay elemanı malzemesi ile ızgara malzemesi arasında elektrik yalıtımı yapar.
- En önemlisi de, yay elemanında oluşan birim şekil değişimini, gerinim ölçer ızgarasına aktarmasıdır. Taşıyıcının, öngörülen sıcaklık ve birim şekil değişimi seviyesinde doğru ve tekrarlanabilir olarak; bu transfer fonksiyonunu yerine getirmesi, taşıyıcı seçimindeki temel kriterlerden birisidir. Şekil değişimi transfer kapasitesi, taşıyıcının yay sabiti veya rijitliği ile ilintilidir. Plastik malzemelerin kayma modülü, sıcaklık yükseldikçe düştüğü için; yüksek sıcaklıklar için büyük modüllere sahip taşıyıcı malzemeleri tercih edilmektedir. Yüksek kayma modüllü malzemelerin daha az esnek ve daha kırılğan oldukları unutulmamalıdır.

Dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılan üç tip gerinim ölçer taşıyıcısı vardır: polimidler, epoksiler ve güçlendirilmiş epoksiler. Halen kullanılmakta olan en kaba ve en esnek olan taşıyıcı malzemesi polimidtir. Bu özellikleri yanında polimidler epoksilerden daha viskoelastik davranış göstermektedir. Ortaya çıkabilecek olan sürünme kusuru, özellikle oda sıcaklığının üzerindeki uygulamalarda polimid kullanımını sınırlandırmıştır. Böylesi sürünme sınırlamaları düşük doğruluklu dönüştürücülerde ve dinamik ölçümlerde kullanılan dönüştürücülerde ihmal edilebilir. Genel bir yaklaşımla statik kalibrasyon doğruluğu tam yük üzerinden % 0.25 ve daha iyi olması isteniyorsa; epoksi veya güçlendirilmiş epoksi kullanılmalıdır [15].

Hassas dönüştürücüler için en yaygın olarak kullanılan taşıyıcılar özel olarak hazırlanmış saf epoksilerdir. Bunlar oldukça büyük kayma modülü değerlerine sahip olup; soğuk-akış eğilimleri düşüktür. Tipik bir değer olarak 0.023 mm kalınlığında taşıyıcı filmler üretilmektedir. Bu bileşimin düşük sürünme özelliğine sahip boyutsal kararlılığı vardır. Uygun bir ızgara seçimi ile, tam yük değeri üzerinden oda sıcaklığında \pm %0.02 veya daha iyi sürünme değerleri elde edilmektedir. Genellikle katkısız plastik reçinelerin tamamının sıcaklıkla sürünme kusurları büyür. Bu nedenle bu tür taşıyıcıların kullanıldığı hassas dönüştürücü uygulamalarında sıcaklık 95°C'nin altında tutulmalıdır.

Yüksek sıcaklıktaki kararlılık ve sürünme performansı, epoksiye cam fiber ilavesi ile üretilen taşıyıcılarda geliştirilebilmektedir. Fiber matrisleri, esneklik ve mukavemeti arttırırken; katkısız formda kullanımı için son derece kırılğan olan rijit bağlayıcı reçinelere olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Gerinim ölçerin etkin elastisite modülü cam fiber katkısı ile belirgin şekilde arttırılabilir. Ancak bu durumda yay elemanında yapıştırılan gerinim ölçerden dolayı yapısal bir mukavemet artışına neden olacağından sürünme kusuruna olumsuz yönde katkıda bulunur. Bu etki, özellikle alüminyum alaşımı gibi düşük elastisite sabitine sahip malzemeler kullanıldığında ve eğilmeye çalışan yay elemanının ince kesitlerinde kendini gösterir. Yay elemanının eğilme momentinin büyük bir kısmı gerinim ölçer tarafından taşınmaya başlanınca, bu etki belirginleşir [27].

4.3.2. Izgara alaşımları

Modern dönüştürücülerde kullanılan dört ayrı alaşım şunlardır: Konstantan, Karma, Izoelastik, Platinyum-Tungsten. Her birinin diğerlerine göre olumlu ve olumsuz yönleri olduğundan; uygulamaya bağlı olarak üretici katalogları incelenmelidir.

Bir Bakır ve Nikel alaşımı (Cu-Ni) olan konstantan gerinim ölçerli dönüştürücülerde kullanılan en popüler alaşımdır. Büyük bir şekil değişimi aralığında şaşırtıcı bir doğrusallığa sahiptir ve çok çeşitli ızgara konfigürasyonlarında üretilebilmektedir. Kolayca lehim tutması ve Wheatstone köprüsü ile kullanıldığında sıcaklık kompanzasyonu sağlaması diğer özellikleridir. Hassas kuvvet dönüştürücülerinde kullanımı açısından en büyük sakıncası, 75°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ızgara direncinde geri dönüşü olmayan değişimler olmasıdır. Tam köprü devresi kullanıldığında her bir gerinim ölçerde aynı sıcaklık değişimi olduğu ve bu değişimlerin aynı etkileri yarattığı kabulü ile çıkış sinyalinde değişim yaratmayacağı düşünülebilir. Bu sapma, sıcaklıkla logaritmik olarak arttığından hassas kuvvet dönüştürücülerinin 95°C'nin üzerinde devamlı olarak kullanılmaması tavsiye edilmektedir. Düşük sıcaklıklardaki sapması, dönüştürücünün performansında ciddi sorunlar yaratmamaktadır. Konstantan küçük sıfır sapmalarının kompanse edilebildiği her türlü uygulamada rahatça kullanılabilir. Ancak, bakır ile doğrudan temas ettiğinde yüksek ısı EMF'ler oluşması, konstantanın kullanımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Karma, bir Nikel Krom alaşımı (Ni-Cr) olup; şekil değişimi ölçümleri için düzenlenmiş bir çok formda kullanılmaktadır. Konstantan gibi o da büyük bir şekil değişimi aralığında şaşırtıcı bir doğrusallığa sahiptir. Ancak elektrik direnci, konstantandan daha büyüktür. Gerektiğinde daha büyük ızgara direncine sahip gerinim ölçer imaline imkan vermektedir. Bu alaşımda sıcaklık kompanzasyonuna sahiptir; ancak, bu özelliği konstantan kadar başarılı değildir. Karma alaşımının en büyük üstünlüğü yüksek sıcaklıklarda dahi direnç kararlılığını koruyabilmesidir. Yorulma ömrü konstantanın sahip olduğundan çok daha uzun olup; bu özelliği ile dinamik ölçümler için önemli imkanlar sağlamaktadır [14].

Özel olarak iyileştirilmiş belirli karma alaşımları, dönüştürücünün tam yükteki çıkış sinyalinin sıcaklıkla değişimini kompanse etme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, kontrollü bir alaşım tekniği ile kazandırılmış olan sıcaklıkla, k-sabitinde negatif değişim gösterme özelliği ile elde edilmektedir. Test aşamasında, sıcaklık azaldıkça dönüştürücü yay elemanının elastisite sabitindeki düşüş k-faktöründeki azalma ile telafi edilir. Sonuçta, tam yükteki çıkış sinyali sıcaklıkla değişmeyen bir dönüştürücü elde edilmiş olur. Bu yöntemin uygulaması, uzun süreli testler ve homojen alaşım malzemeleri gerektirdiğinden, ticari amaçlı dönüştürücülerde sınırlıdır.

Tüm bunların yanında karma alaşımları ile ızgara imalatı son derece pahalı olup, Nikel Krom alaşımlarının (Ni-Cr) lehimlenmesi oldukça sorunludur. Genellikle özel katkı maddeleri ve destekleyiciler ile lehim yapılabilir. Konstantan yerine karma alaşımının tercihi ancak imalatçısı tarafından çeşitli garantiler sunulduğunda mümkün olmaktadır.

İzoelastik alaşımlar oldukça uzun bir yorulma ömrüne sahip olup; konstantan ve karma alaşımı ile mukayese edildiğinde yaklaşık % 50 daha büyük bir k-faktörüne sahiptir. Sıcaklık kompanzasyonuna sahip olmadıklarından dönüştürücülerde kullanımları son derece sınırlıdır. Sıcaklık değişimine karşı sıfır sinyalinin kararlılığı son derece zayıf olduğundan; normal olarak çoğunlukla dinamik ölçümlerde kullanılabilirler. Lehimlenmeleri çok güç olup; karma alaşımlarında uygulananlara benzer bir takım önlemler gerektirir [24].

Platinyum-Tungsten alaşımları izoelastik malzemelerde olduğu gibi temel olarak dinamik kuvvet ölçümünde kullanılırlar. Tam köprü devresi kullanılsa dahi bu alaşımlar kolayca sıcaklığa karşı kompanse edilemezler. Konstantan ve karma alaşımlarının sahip olduğu k-faktörünün yaklaşık iki katına ve uzun bir yorulma ömrüne sahip olan Platinyum-Tungsten gerinim ölçerler, genellikle yorulmaya karşı üretilmiş dinamik kuvvet dönüştürücülerinde kullanılırlar. Böylesi bir uygulamada yay elemanının birim şekil değişimi, çıkış sinyalinde herhangi bir sorun yaratmayacak şekilde ve uzun bir dönüştürücü ömrü elde etmek amacıyla mümkün olduğunca düşük tutulur. Platinyum-tungsten alaşımları gerinim ölçer ızgaralarının imalatı için oldukça sıkıntılı olduklarından, gerinim ölçer çeşitlerinin sayısı oldukça sınırlı ve pahalıdır.

4.4. Gerinim Ölçer Izgara Direnci

Gerinim ölçer elektrik direnci, başarılı bir dönüştürücü tasarımında önemli bir kriterdir. Çünkü, hem çıkış sinyal genliği hem de enerji dağılımı açısından etkindir. Dönüştürücüler genellikle tam yükteki mV/V cinsinden çıkış sinyallarına göre değerlendirilirler. Burada mV/V, her bir voltluk köprü besleme gerilimine karşılık gelen milivoltluk çıkış sinyalinin değeridir. Örneğin 2 mV/V'luk bir dönüştürücüde, 10 V'luk besleme gerilimi tam yük altında 20 mV'luk çıkış sinyali üretir. Çıkış sinyalinin elektriksel gürültüye karşı korunması amacı ile besleme gerilimi 15 V'a veya 20 V'a çıkartılabilir.

Sinyal kalitesini iyileştirirken; besleme gerilimini arttırmakta çok özgür olunamaz. Çünkü, besleme gerilimi arttıkça, karesi ile orantılı olarak gerinim ölçerin yaydığı güçte artacaktır. Böylesi bir durum, batarya ile beslenen sistemlerde, ki bu sistemlerde enerji sarfiyatı son derece önemli bir parametredir, çeşitli sorunlara yol açabilir. Ayrıca; ısı etkilerden dolayı, dönüştürücünün kararlılığını ve doğruluğunu da olumsuz yönde etkileyebilir. Gerinim ölçerin sarf ettiği enerjinin tamamı ısıya dönüşerek; yay elemanı üzerinden tüm yapının içine yayılır. Yay elemanının malzemesine ve boyutlarına bağlı olarak, ve aynı zamanda gerinim ölçerin büyüklüğü ve konumu dağöz önünde bulundurularak, müsaade edilen en büyük güç yayını, dönüştürücüde aranan doğruluk seviyesi ile sınırlanmıştır.

Uygulamada, bir dönüştürücü için geçerli olan mekanik tasarım parametrelerinin bir çoğu uygulamadan kaynaklanan sınırlamalarla belirlenmiştir. İlave bir güç yayını olmaksızın çıkış sinyalinin arttırılması için bir alternatifte, yüksek besleme gerilimi ile birlikte yüksek dirençli gerinim ölçerler kullanmaktır. Bu yaklaşım kabul edildiğinde uygulamada en yüksek dirence sahip gerinim ölçerlerle çalışmak avantajlıdır. Gerinim ölçerlerin büyük bir çoğunluğu hem 120 ohm hemde 350 ohm olarak mevcuttur. Bazı Özel durumlar için 1000 ohm'luk gerinim ölçerlerde zaman zaman kullanılmaktadır. Bazı üreticilerin (1.3 x 1.5) mm² ebadında 5000 ohm'luk gerinim ölçerleri vardır.

4.5. Öz Sıcaklık Kompanzasyon (S-T-C) Sayısı

Dönüştürücülerde kullanılan, tam ve yarım köprü devreleri sıcaklıktan kaynaklanan şekil değişimlerini, yapıları gereği kompanse ederler. Ancak buradaki temel yaklaşım köprü devresindeki tüm gerinim ölçerlerin tıpatıp aynı özelliklere sahip olduğu ve aynı ısı etkilere maruz kaldığıdır. Bu koşullar asla elde edilemeyeceğinden, en yüksek dönüştürücü doğruluğunu yakalayabilmek için yay elemanı malzemesinin ısı genleşme katsayısına karşılık gelen öz sıcaklık kompanzasyon sayısına (Bkz. Tablo 4.1) sahip gerinim ölçerler kullanılır [24].

Bu kuralın bir istisnası, dönüştürücü, krayojenik uygulamalarda olduğu gibi özel ve sınırlı sıcaklıklarda kullanılıyorsa geçerlidir. Bir diğer istisnası da yay elemanının elastisite modülündeki sıcaklıktan kaynaklanan değişimlerini kendisi kompanse eden karma alaşımlarının kullanımınıdır.

4.6. Diğer Özellikler

Ticari olarak üretilen standart gerinim ölçerlere ait seçeneklerin bir çoğu deneysel gerilme analizinde uygulanmak üzere düşünülmüştür. Bu seçenekler her zaman dönüştürücülerin ihtiyaçlarını karşılamaz. Karma alaşımından imal gerinim ölçerlere lehim zorluğundan dolayı opsiyonel olarak lehim plakalarına bakır tohumlanır. Benzer uygulamalar izoelastik alaşımlar içinde geçerlidir. Burada her üreticinin uyguladığı seçeneklerin açıklanması mümkün değildir. Ancak ihtiyaca uygun olarak üretici katalogları itina ile incelenmeli ve seçim ardından yapılmalıdır.

4.7. Gerinim Ölçer İçin Yapıştırıcı Seçimi

Kuvvet dönüştürücüsü imalatında şu ana kadar açıklanmış olan aşamaların hiç birisi gerinim ölçer yapıştırılması işlemi kadar dönüştürücünün performansı ve ömründe etkili değildir. Buradaki en önemli aşama uygun bir yapıştırıcı seçimidir. Yanlış seçilmiş bir gerinim ölçer yapıştırıcısı, yay elemanı ve gerinim ölçer kalitesi ne olursa olsun dönüştürücünün performansını olumsuz yönde etkileyecektir.

Tablo 4.1. Bazı Malzemelerin Öz Sıcaklık Kompanzasyon Numaraları

S-T-C No	Uzama Katsayısı	
	$\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (0-100°C)	Malzeme
00	1.4	Invar (Fe-Ni Alaşımı)
	0.5	Eritilmiş Kuvartz
	0.03	Titansilikat (*)
03	5.4	Pişirilmiş Alümina
	4.0	Molibdanyum (*)
	4.3	Wolfram
	5.6	Zirkonyum
05	9.2	Soda Kireçli Cam
	9.0	Çelik, 15-7 Mo. PH.
	9.9	Çelik, 410 S.S.
	8.6	Saf Titanyum
	8.8	Titanyum, 6 AL-4V (*)
06	11.5	Berilyum
	12.6	Inconel
	12.1	Inconel X
	10.8	Kurşuni Döküm Demir
	13.5	Monel
	11.9	Nikel A
	12.1	Çelik, 1008, 1018 (*)
	11.3	Çelik, 4340
	10.8	Çelik, 17-4 PH
	10.3	Çelik, 17-7 PH
09	16.7	Berilyum-Bakır 25
	18.4	Bronz-Fosfor (P %10)
	16.7	Bakır
	17.3	Çelik, 304 S.S. (*)
	14.4	Çelik, 310 S.S.
	16.0	Çelik, 316 S.S.
13	23.2	Alüminyum 2024-T4 (*), 7075-T6
	20.0	Pirinç, 30-70
	23.0	Saf Kalay
15	26.1	Magnezyum, AZ-31B (*)

(*) Isıl çıkış eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan malzeme tipini belirtir.

Yapıştırıcı seçiminde ele alınacak olan kriterler, gerinim ölçer taşıyıcısı için geçerli olanlara benzemektedir. Çünkü, yapıştırıcı, yay elemanı yüzeyi ile gerinim ölçer arasındaki bir ara katmandır. İdeali, gerinim ölçer ile yay elemanının birbirinden ayrılmaz iki parça haline gelmeleridir. Ancak; gerinim ölçerin bu bileşimde hiç bir

özellik değişimine neden olmaması gerekmektedir. Kaliteli bir yapıştırıcı aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- a) Hazırlanması ve karşılıklı yüzeylere uygulanması kolaydır.
- b) İşleme ve kuruma aşamaları çok sorun yaratmayan güçlü ve kalıcı bir bağ oluşturma kabiliyetine sahiptir.
- c) Kayma gerilmesine karşı yüksek mukavemete sahip ince bir tabaka oluşturup; altındaki şekil değişimini herhangi bir sürünme etkisi katmaksızın, üstündeki gerinim ölçere aktarabilir.
- d) Sahip olduğu özellikleri, dönüştürücü için öngörülen ömür ve sıcaklık aralığında devamlı olarak muhafaza eder.

Uygulamada tüm bu özelliklerin belirli bir dönüştürücü tasarımı aşamasında öncelikli ve belirleyici olanları seçilir, ardından buna uygun yapıştırıcı ürün kataloglarından belirlenir.

Gerinim ölçer yapıştırıcıları olarak; polimer maddeler iki başlık altında sınıflandırılabilir:

- a) Eriyik bağlayıcı maddeler
- b) Kimyasal reaksiyonlu maddeler

Eriyik bağlayıcı maddelere örnek olarak selülöz nitrati verilebilir. Penolik, epoksi, Cıyanoakrileyt kimyasal reaksiyonlu maddelerin çeşitli tipleridir. Bunlar polimerizasyonla sıvı halden katı hale geçerler.

4.7.1. Cıyanoakrileyt yapıştırıcı

Üzerine baskı uygulandığında yapışma yüzeyi ile gerinim ölçer arasında ince bir film tabakası oluşturarak; sıvı halden katı hale geçen tek bileşenli bir yapıştırıcıdır. Çabuk kuruduğu ve extra bir basınç gereksinimi olmadığından, deneysel gerilme analizi uygulamalarında yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Normal olarak bir insanın parmak

baskı kuvveti altında 1-2 dakika içinde sertleşmektedir. Bu tip yapıştırıcılar zaman zaman yüksek ölçüm doğruluğunun aranmadığı kuvvet dönüştürücülerinin amatörler tarafından yapılan imalatlarında da kullanılır. Kullanıldığında, belirli çözücülere ve rutubete karşı çok hassas olduğu, uzun dönemde de kırılganlaştığı unutulmamalıdır. Bu nedenle dönüştürücünün birkaç aydan fazla kullanılması söz konusu olduğunda bu tür bir yapıştırıcı kullanımından kaçınılmalıdır. Sürünme etkileri ise; önceden tahmin edilemez, tesadüfidir.

4.7.2. Epoksi yapıştırıcı

Epoksiler, uygun bir formülasyon ile çok geniş bir aralıkta elde edilebilir özelliklere sahip olmaları sebebi ile gerinim ölçerlerin yapıştırılmasında kullanılan en yaygın yapıştırıcı grubudur. Katkılı ve katkısız olarak ikiye ayrılan epoksi yapıştırıcıların katkısız olanları da “% 100 katı” ve “çözücüyle inceltile” olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Epoksilerin bir kısmı tek bileşenli üretilirken; diğerleride iki bileşenli olarak üretilirler.

Toz alüminyum oksit ve silika gibi katkı maddeleri içeren epoksi yapıştırıcılar, yapısal uygulamalar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Katkı maddelerinin mevcudiyeti, yapıştırıcının ısı genleşme ve büzüşme özelliğini kontrol etmektedir. Gerinim ölçer uygulamalarında, katkı maddeleri yapıştırıcı tabakasının kalınlığını 0.05 mm'ye çıkartmaktadır. Bazen daha da kalınlaştırdıkları için dönüştürücü uygulamaları için uygun değildir. Bazı özel koşullar dışında dönüştürücülerde uygulanacak olan gerinim ölçerler, çok ince bir yapıştırıcı tabakasının üzerinde yer alırlar. Bu tabakanın kalınlığı 0.003 ila 0.013 mm arasındadır. Böylelikle şekil değişimi aktarımı iyileştirilerek sürünme azaltılabilir ve eğilmeye çalışan yay elemanlarındaki ince kanatların suni olarak güçlenmesi engellenir.

Katkısız epoksi yapıştırıcılar son derece ince bir tabaka oluşturma yeteneğine sahiptirler ve bu özellikleri nedeni ile dönüştürücü uygulamaları için en iyi çözümdürler. Yukarıda da belirtildiği üzere, epoksi yapıştırıcıların katkısız olanları “% 100 katı” ve “çözücüyle inceltile” olmak üzere iki alt gruba ayrılır. % 100 katı olarak tabir edilen epoksiler yapıştırıcı uygulanmadan önce eklenmesi gereken herhangi bir

çözücüye sahip değildirler. Çözücüyle inceltilecek epoksi yapıştırıcılar “yüksek performanslı yapıştırıcılar” başlığı altında ele alınacaktır.

4.7.3. Yüksek performanslı yapıştırıcılar

Bunlar yüksek hassasiyetli dönüştürücülerde kullanılan epoksi ve epoksifenolik yapıştırıcılardır. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek şekilde geliştirilmiş ince bir film tabakası oluşturan yapıştırıcılardır. Tipik olarak % 75 civarında çözücü ihtiva ederler. Bu kadar fazla miktarda çözücüye sahip olmaları çok ince ve çok sert bir yapıştırıcı tabakasının oluşmasını sağlar. Uygun şekilde yapıştırıldığında yapıştırıcı kalınlığı yaklaşık 0.005 mm 'dir. Bu kadar ince bir tabakanın oluşabilmesi için tabiki üretici firmanın belirlediği çok katı kurallar dizisinin titizlikle takip edilmesi şarttır. Özellikle kuruma sıcaklığı (istenen sıcaklığa yükselme zamanı ve o sıcaklıkta tutulma süresi), baskı basıncı, kuruma sonrası periyod bunların en önemlileridir.

Dönüştürücü uygulamaları için en yüksek performansı epoksifenolik yapıştırıcılar vermektedir ve dolayısı ile çözücüyle inceltilecek epoksi yapıştırıcılar içinde en çok kullanılanıdır. Yüksek reaksiyonel özelliği ile düşük sıcaklık rejimlerinde kurutulabilir. Bu özelliği ile kullanımdan önce bekleme süresi de kısadır. Genellikle iki hafta içinde dönüştürücü kullanılabilir [17].

BÖLÜM 5. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜNÜN ELEKTRİK DEVRESİNİN TAMAMLANMASI

5.1. Kablo Bağlantılarının Yapılması

Günümüz gerinim ölçerli dönüştürücüleri, Wheatstone köprüsü oluşturmak üzere bağlantıları yapılan dört adet aktif gerinim ölçere sahiptir. Dönüştürücü tasarımına bağlı olarak, aranan sonuçların elde edilebilmesi için bu devrede kullanılan gerinim ölçer sayısı 8, 16 ,32 veya daha fazla olabilir. Dört adet aktif bacağı olan en basit tam köprü devresinde minimum 12 elektrik bağlantısı vardır. Daha karmaşık tasarımlarda bu sayı 30 ve üzerinde olabilir. Bu bağlantıların büyük bir kısmı köprü devresi dahilinde olduğundan dirençlerdeki en küçük dalgalanma tüm dönüştürücünün performansını önemli derecede etkileyebilmektedir [18].

Gerinim ölçerlerin köprü bağlantılarının oluşturulmasında kullanılan en genel yöntem yumuşak lehimlemedir. Konvansiyonel yöntemin temel elemanları bir havye, bir miktar lehim ve pasta tabir edilen kimyasaldır. Çeşitli uygulamalarda otomatize edilmiş ultrasonik ve lazer lehimleme yöntemleri kullanılmasına rağmen; dönüştürücü imalat sanayiinde kullanılmakta olan en yaygın yöntem elle lehimlemedir. Bir dönüştürücü imalatı esnasında yapılacak olan lehimleme işleminin en önemli noktaları şunlardır:

- a) Lehimlenen elemanlar temiz olmalıdır. Yani her türlü oksidasyondan, yapıştırıcıdan ve erimiş lehimden sonra yüzeyde kalabilecek olan her türlü maddeden temizlenmiş olmalıdır.
- b) Normal olarak, saf veya zenginleştirilmiş reçine pastalar tavsiye edilir. Karma alaşımli gerinim ölçerlerin lehim plakalarına doğrudan bir bağlantı yapılacaksa; su bazlı asit pastalar gerekebilir. Her halükarda pasta kalıntıları, kullanılan pasta türüne bağlı olarak temizlenmelidir. Herhangi bir mağazada kolayca bulunabilecek olan petrol bazlı pastalar asla kullanılmamalıdır. Bu tür pastaların kalıntıları hiç bir zaman tam olarak temizlenememektedir.

- c) Termostatlı havye kullanılmalıdır. Lehimin eriyerek rahatça akacağı sıcaklık ayarlanmalıdır.
- d) Bağlantı kablosu gerinim ölçer lehim plakasına lehimlenmeden önce her ikisinde boşa lehimlenir. Bu yapılırken; havyenin ucu lehim yüzeylere bulaşınca kadar; yani, bir iki saniye temas ettirilir. Daha uzun süre tutulmaz.
- e) Bağlantı kablosu gerinim ölçer lehim plakasına gerektiği takdirde bir miktar pasta kullanılarak lehimlenir. Bağlantılar düzgün ve uygun büyüklükte lehimle yapılır. Dağınık ve aşırı büyük lehimler uygun değildir. Bu işlem yapılırken havye ucunun gerinim ölçer lehim plakaları ile temas süresi en aza indirilir.
- f) Köprü devresindeki gerinim ölçerlerin birbirleri ile bağlantıları mutlaka simetrik olmalı, ara bağlantı kablolarının boyları eşit olacak şekilde düzenlenmelidir. Mümkün olduğu takdirde bu kablolar yay elemanı yüzeyine uygun bir yumuşak yapıştırıcı ile sabitlenmelidir. Böylelikle kablolar ve gerinim ölçerler aynı sıcaklıkta tutulabilecektir.
- g) Kullanılan gerinim ölçer lehim plakasının ebatları göz önünde bulundurularak; uygun kesitte bir kablo seçilmelidir. Bu tip uygulamalarda kullanılan en yaygın kablo, çapı ϕ 0.16 mm olan poliüretan kaplı bakır teldir. Köprü devresini oluşturan gerinim ölçerler arasındaki mesafe fazla ise (>75-100 mm) kablo kesiti daha büyük seçilir. Elektriksel gürültü yaratma eğilimlerinden dolayı çoklu kablolar mümkün olduğunca kullanılmamalıdır.
- h) Lehim işleminin ardından kalıntı tabir edilen pasta tamamen temizlenmelidir. Böylelikle bir kirlilik ve muhtemel bir korozyon ihtimali ortadan kaldırılır.

5.2. Elektrik Devresinin Performansının İyileştirilmesi

Şekil 2.4'de gösterilmiş olan en basit gerinim ölçerli köprü devresi, genellikle düşük doğruluk seviyesine sahip amatör uygulamalar için yeterlidir. Bunlar, otomatik ayar, düzeltme ve çıkış sinyali oranlarının kendiliğinden düzenlendiği gelişmiş elektronik cihazlarla kullanıldıklarında nispeten başarılı sonuçlar verebilir [24]. Ancak, bu koşul yüksek doğruluğun arandığı hassas dönüştürücü uygulamaları için geçerli değildir. Böylesi dönüştürücülerde aranan doğruluğun elde edilebilmesi için, sıcaklık

değişimlerinin etkilerini kompanse etmek ve köprü çıkış sinyalini düzenlemek için köprü devresine ilave dirençlerin yerleştirilmesi gereklidir. Dönüştürücülerde bu tür ince ayarlar gerektiren dört temel nokta vardır:

- a) Sıfır sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması
- b) Sıfır sinyalinin başlangıç değeri
- c) Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması
- d) Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin başlangıç değeri

5.2.1. Sıfır sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması

Gerinim ölçerlerin yalnızca birim şekil değişimine değil, aynı zamanda da sıcaklık değişimlerine karşı reaksiyonel oldukları iyi bilinen bir gerçektir. Sıcaklıkla, gerinim ölçer çıkış sinyalinde veya direncinde bir değişim olması, bu etkinin sıcaklık temelli zahiri gerinim veya kısaca “zahiri gerinim” olarak adlandırılmasına neden olmuştur. Sıcaklıkla gerinim ölçer direncindeki değişim hem gerinim ölçer ızgara malzemesinin ısıl genişleme katsayısından, hem de ızgara malzemesi ile yay elemanı malzemesinin sahip oldukları ısıl genişleme katsayıları arasındaki farktan kaynaklanır. Öz sıcaklık kompanzasyonuna (S-T-C) sahip günümüz gerinim ölçerleri ile bu etkinin büyük bir kısmı telafi edilebilse de; kayda değer sıcaklık değişimlerinin olduğu tüm bir aralıkta tam olarak ortadan kaldırılamazlar.

Gerçek bir dönüştürücü uygulamasında olduğu gibi, gerinim ölçerler aktif yarım veya tam köprü olarak düzenlendiklerinde, ardıl köprü bacaklarında yer alan gerinim ölçerlerin zahiri gerinimlerinin çıkartma işlemi neticesinde teorik olarak sıfırlanmaları gerekir. Çünkü, bunlar büyüklük olarakta işaret olarakta aynı değere sahiptir. Dolayısı ile yüksüz durumda dönüştürücünün sıfır çıkış sinyali başlangıçta sıfırlanırsa; sıcaklık değişimlerinden bağımsız olarak bu değerini koruması gerekir. Ancak, uygulamada aynı üretim hattından alınmış olsalar dahi, ne karakteristik özellikleri açısından ne de yay yüzeyine uygulanmaları açısından bire bir denk iki gerinim ölçer mümkün değildir. Sonuç olarak, dönüştürücüde oluşabilecek sıcaklık değişimleri “sıfır sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması” olarak bilinen değişimlere neden olur.

5.2.2. Sıfır sinyalinin başlangıç değeri

Bir gerinim ölçerden diğerine normal olarak var olan direnç farklılıkları ve gerinim ölçerin yay yüzeyine yapıştırılarak devrenin kurulması esnasında oluşan direnç değişimleri nedeni ile köprü devresi ilk kurulduğunda direnç açısından dengelenmemiş konumdadır. Gösterge cihazı olmaksızın tek başına kullanılan dönüştürücüler için, farklı cihazlarla da kullanılabilmesi bakımından köprü devresinin sıfır sinyali ayarının başlangıçta yapılması gerekmektedir. Bu tip sıradan bir dönüştürücü, yüksüz haldeki elektrik çıkış sinyalinin, tam yük çıkış sinyalinin $\pm \%1$ 'inden fazla değişmeyeceği şekilde ayarlanır.

5.2.3. Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması

Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyali, birim mekanik girişe elektriksel çıkış sinyalinin oranıdır ve genellikle tam yük üzerinden mV/V olarak verilir. Gerekli önlemlerin alınmaması halinde, bu değer genellikle sıcaklık ile değişir. Bu değişim gerinim ölçerin k-faktörünün ve yay elemanı elastisite modülünün her ikisinin de sıcaklığın fonksiyonu olmalarındandır. Çelikten mamül bir yay elemanı üzerine uygulanmış konstantan gerinim ölçerler incelendiğinde; 55°C'lik bir pozitif değişim için k-faktöründe % 0.5'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu durumda çeliğin elastisite modülü ise % 2 mertebesinde azalmaktadır. Sonuç olarak dönüştürücünün tam yüke karşılık gelen çıkış sinyali yaklaşık olarak % 2.5 artmıştır.

Buna karşılık Karma alaşımlı gerinim ölçerler kullanıldığında, sıcaklık arttıkça gerinim ölçerin k-faktörü azalmakta, böylelikle azalmakta olan malzeme elastisite modülünün etkisini kısmen ortadan kaldırmaktadır. Dolayısı ile tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması azalmaktadır. Gerinim ölçer ızgaraları için özel malzemelerin seçimi ve bir takım işlemlerin ardından belirli yay elemanı malzemeleri için tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması problemini en aza indirebilen çözümler üretici firmalarca geliştirilmektedir.

5.2.4. Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin başlangıç değeri

Bir dönüştürücünün tam yüke karşılık gelen çıkış sinyali daha tasarım aşamasında belirlenen parametrelerden birisidir. Dönüştürücünün imalat aşamasında ise, kullanılan mekanik ve elektrikli bileşenlerin sahip oldukları toleranslar nedeniyle her bir dönüştürücünün tam yüke karşılık gelen çıkış sinyali prensip olarak eşdeğer olmasına rağmen, gerçekte farklılıklar gösterir. Gösterge cihazı olmaksızın tek başına kullanılan dönüştürücüler için, farklı cihazlarla da kullanılabilmesi bakımından köprü devresinin tam yüke karşılık gelen çıkış sinyali önceden belirlenmiş bir değere tam olarak ayarlanmalıdır. Bunu sağlayabilmek içinse; tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalini önceden belirlenmiş değere getirecek yardımcı dirençler Wheatstone köprüsüne dahil edilirler.

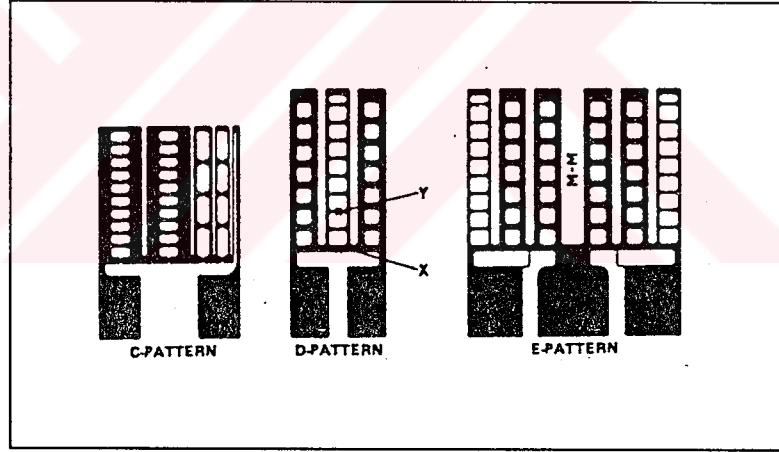
5.3. İlave Dirençler ile Çıkış Sinyalinin Ayarlanması ve Kompanzasyon

Gösterge cihazı olmaksızın tek başına kullanılan dönüştürücüler için, farklı cihazlarla da kullanılabilmesi bakımından dönüştürücü türüne uygun olarak gerekli ayarlama ve kompanzasyon devreleri köprü devresine dahil edilmiş olmalıdır. Bu da, dönüştürücü devresinin uygun yerlerine farklı türde özel dirençlerin çeşitli noktalarda daimi olarak yerleştirilmesi ile mümkündür. Belirli ohm değerlerine sahip bu bileşenlerin direnç değerleri ve direnç ısıl değişim katsayıları titizlikle belirlenmiş olup; bunlar, bobin veya kısa boylu tel dirençler, ayarlanabilir veya sabit değerli yapılandırılabilir dirençler veya küçük metal veya plastik muhafazalar içinde münferit dirençler olabilir.

Tel tipi direnç elemanlarının en büyük avantajları, düşük maliyetli olmaları veya tel boylarının değiştirilmesi yada tel çaplarının değiştirilmesi yoluyla direnç değerlerinin çok geniş bir aralıkta seçilebilmesi özellikleridir. Yapıştırılabilir türdeki direnç elemanları, yay elemanı üzerinde yer aldıklarından dönüştürücünün sıcaklık konumunu çok yakından izleyebilmektedirler. Kullanılan direnç elemanının konstrüktif özelliklerinden bağımsız olarak, doğrudan sıcaklığa duyarlı dirençler ve nispeten sıcaklığa duyarlılık gösteren dirençler olmak üzere iki temel yapı aranmaktadır. Bunlar zaman zaman yüksek ısıl değişim katsayılı dirençler ve düşük ısıl değişim katsayılı dirençler olarak adlandırılırlar. Düşük ısıl değişim katsayılı dirençler sıfır

sinyalinin başlangıç ayarı ve dönüştürücünün tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin istenilen seviyeye getirilmesinde kullanılırlar. Sıfır sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması ve tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin sıcaklık değişimi ile kayması, yüksek ısı değişim katsayılı dirençler kullanılarak kompanse edilir. Düşük ısı değişim katsayılı dirençler için kullanılan direnç alaşım malzemeleri Konstantan, Karma ve Manganin'dir. Buna karşın Bakır, saf Nikel ve Balco yüksek direnç ısı değişim katsayılı dirençlerde kullanılan direnç malzemesi seçenekleridir.

Tam yüke karşılık gelen çıkış sinyalinin değişimi dışındaki tüm ayar ve kompanzasyon işlemleri deneysel olarak değerleri belirlenmiş dirençler ile gerçekleştirilir ve bu değerler her bir dönüştürücüde farklılıklar göstermektedir. Seri imalat yapılan uygulamalarda farklı değerlere sahip dirençlerden oluşan çok büyük bir stok varken, bir iki uygulaması olan amatör veya özel imalatlar için dönüştürücü özelliklerinin iyileştirilmesinde ayarlanabilir dirençler kullanılmaktadır.



Şekil 5.1. Ayarlanabilir Tip Üç Ayrı Formda Yapıştırılabilir Direnç

Şekil 5.1'de ayarlanabilir tip üç ayrı formda yapıştırılabilir direnç örneği verilmiştir. Bunların üçüde basamakların kolayca kesilerek istenilen direnç değerine ulaşmanın mümkün olduğu merdiven formundadır. Bir falçata veya kesici bir alet kullanılarak yatay bağlantılar kesildiğinde iletim hattı uzadığından dirençte bir artış görülür.

D-formundaki dirençte, X ara bağlantısının kesilmesi ile, elde edilebilir en yüksek direnç değerinin % 6'sı kadar bir artış meydana gelir. Bu ara bağlantılarının en üstteki

yerinde kalmak kaydıyla, aşağıdan yukarıya doğru sırasıyla kesilmeleri, her seferinde % 6'lık bir direnç artışı sağlar. D-formundaki direncin sağında ve solunda yer alan merdivenlerdeki her bir ara bağlantının kesilmesi de % 3'lük bir direnç artışına sebep olarak ince ayar yapılmasına imkan vermektedir. Bu basamakların bilinçli olarak atlanarak kesilmesi ile çok daha küçük direnç artışları sağlanır. Bu özelliği ile dönüştürücülerde aranan özelliklere ulaşırken aranan direnç değerine çok daha yakın değerler elde edilebilir. Şekil 5.1'de gösterilmiş olan E-formundaki direnç ortak lehim plakasında biraraya getirilmiş iki adet D-formundaki dirençten ibarettir. Özellikle köprü devrelerinin köşelerinde iki ardıl köprü bacağı için kullanılmak üzere tasarlanmış ve üretilmişlerdir.

Şekil 5.1'de gösterilmiş olan C-formundaki direnç bir çok açıdan D ve E formundaki dirençlerden farklılıklar göstermektedir. En sağda tekli bir bağlantı yer almakta ve geometrik olarak farklılıklar göstermektedir. Bu konfigürasyon ile sağdaki merdiven % 20'lik değişim sağlayan dört basamağa, onun yanındaki ikinci ince merdivende % 10'luk değişim sağlayan dört basamağa sahiptir. Geri kalan iki merdivende ise % 1 değişim yaratan 20 adet basamak vardır. D ve E tiplerinde olduğu gibi, merdivenin üst taraflarındaki bir ara bağlantının kesilmesi, alt taraftaki bir ara bağlantının kesilmesinden daha küçük bir direnç artışı sağlar. Gerekli olan minimum direnç değeri, tamamı kesilmiş haldeki direncin yarısı mertebesinde ise, C-formunda dirençler kullanılır. Gerekli direnç miktarı bilinmiyorsa; D-formundaki dirençler, kesilmemiş halde çok küçük direnç değerine sahip olduklarından tercih edilir.

Ayarlanabilir tip yapıştırılabilir dirençler, yay elemanı üzerine yapıştırılırlar, kablo bağlantıları yapılır ve gerinim ölçerlere uygulanan yöntemler ile ortam koşullarından korunurlar. Sıcaklık değişimlerinin optimum seviyede takibi için, yüksek ısı değişim katsayılı dirençler, gerinim ölçerlere mümkün olduğunca yakın yerleştirilmeli; ancak bu yapılırken birim şekil değişiminin en az olduğu bölgeler seçilmelidir. Köprü devresine bağlantıyı sağlayan kabloların uzunlukları ve yerleşimleri simetrik olmalı; yay elemanı ile ısı dengede kalabilecek şekilde iyi temas sağlanmalıdır [27].

5.4. Sıfır Sinyalindeki Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu

Aynı imalat hattından alınmış ve aynı tip dört adet gerinim ölçer, bir yay elemanına yapıştırılıp, tam köprü oluşturacak şekilde bağlantıları yapıldıktan sonra besleme gerilimi uygulandığında; çıkış sinyalinin sıfır olmadığı görülür. Ancak bu değer in dönüştürücülerle beraber kullanılan gösterge cihazlarının çalışma aralıkları içinde kalacak kadarda küçük olması gerekmektedir. Gerinim ölçerin sıcaklığı azaltılıp veya yükseltilep; bir başka sıcaklıkta denge konumuna getirildiğinde çıkış sinyali de doğal olarak değişecektir. Kompanze edilmemiş dönüştürücülerin bu karakteristik davranımı deneysel olarak gözlenebilir. Bu amaçla farklı sıcaklıklardaki çıkış sinyalinin kaydedilmesi yeterli olacaktır.

Sıcaklıkla çıkış sinyalindeki değişim dikkatle ölçüldükten sonra, düşük ısıl değişim katsayılı kompanzasyon direncinin nominal değeri doğrudan hesaplanabilir. k-Faktörü 2 olan 350 Ω 'luk dört adet gerinim ölçerden kurulu bir köprüde 55°C'lik sıcaklık artışı köprü çıkışında tek bir gerinim ölçer üzerinden 35 $\mu\text{m}/\text{m}$ 'lik bir değişime yol açıyorsa; buna karşılık gelen direnç değişimi (5.1) no'lu formül ile hesaplanabilir.

$$\Delta R = k \cdot \varepsilon \cdot R_{\text{köprü}} \quad (5.1)$$

ΔR : Direnç değişimi, [Ω]

k : Gerinim ölçerin k-faktörü

ε : Birim şekil değişimi

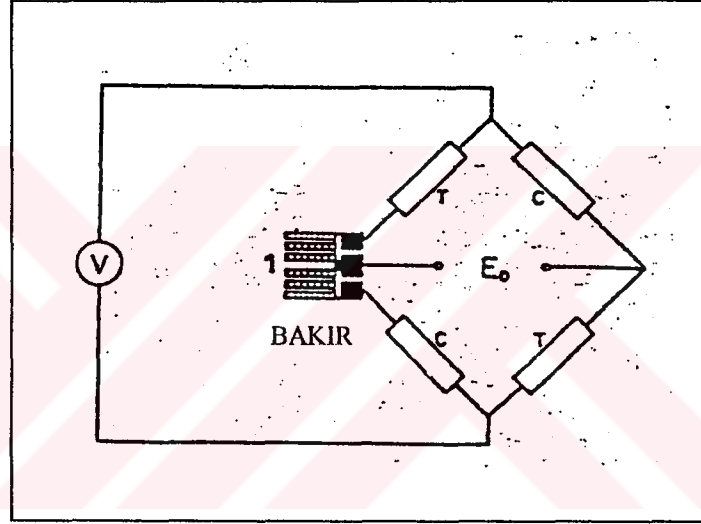
$R_{\text{köprü}}$: Köprü direnci

(5.1) no'lu formül uygulandığında bu değerler için direnç değişimi 0.0245 $\Omega/55^\circ\text{C}$ olarak hesaplanır. 55°C'de % 22 ısıl değişim katsayısına sahip bakır (Cu) bu durumda kompanzasyon direnci olarak seçilebilir. Gerekli kompanzasyon direnç değişimi ve direncin ısıl değişim katsayısı aynı sıcaklık aralığında ifade edildiğinde; bakır (Cu) direnci (5.2) no'lu formül aracılığı ile 0.11 ohm olarak belirlenir.

$$R = \frac{\Delta R}{TC} \quad (5.2)$$

TC : Isıl değişim katsayısı

Bu nedenle, köprü bacaklarından birindeki gerinim ölçere seri bağlı 0.11 ohm'luk bakır direnç, sıfır sinyalindeki sıcaklıkla sapmayı rahatça kompanze edecektir. Gerekli olan direnç genellikle çok küçük olduğundan uygun bir direncin seçilerek, yerine lehimlenmesi oldukça zor olabilir. Örneğin 0.11 ohm'luk direnci yaratacak olan ϕ 0.08 mm çaplı bakır telin boyu 32 mm olacaktır.



Şekil 5.2. Sıfır Sinyalindeki Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu

Yukarıdaki paragraftaki bakır tel kullanımı yerine, şekil 5.2'deki gibi köprü devresinin bir köşesine yerleştirmek üzere E-formunda çift basamaklı bakır direnç seçiminin çeşitli avantajları vardır. Başlangıçtaki kesilmemiş dirençleri çok düşüktür ve şekil 5.2'de gösterilmiş olan düzenleme, köprünün ihtiyaç duyulan bacağında ayarlama yapma imkanı verir. Buna ilaveten, basamakların bir tarafındaki direnç kazayla büyütülürse; diğer basamaktaki direnci arttırarak; köprü devresinin ayarı yapılabilir.

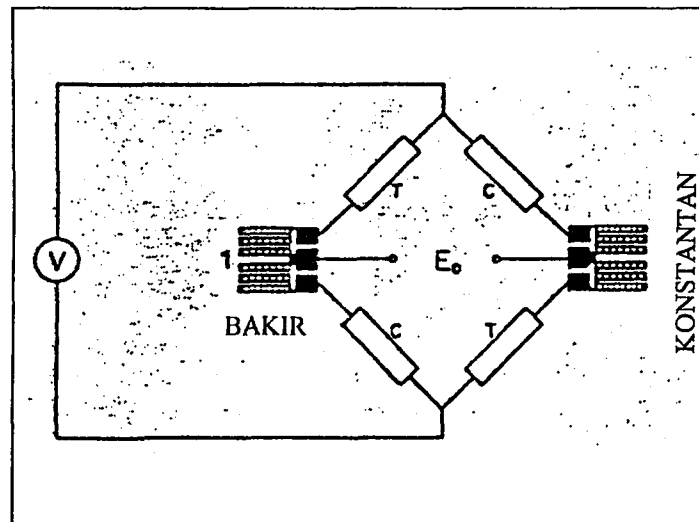
Yay elemanı üzerine gerinim ölçerler yapıştırılıp, kompanzasyon direncinin de köprü bağlantıları yapıldıktan sonra ilk köprü çıkış sinyali ölçülebilir. Ardından eleman bir

fırına veya sıcaklık kontrollü bir ortama yerleştirilerek ikinci bir sıcaklıktaki çıkış sinyali belirlenir.

Çıkıştaki değişimin sıcaklık değişimine göre yönü, ardıl köprü bacaklarından hangisinin, ilave sıcaklık duyarlılığına ihtiyacı olduğunu gösterir. Deneme-yanılma yolu ve çeşitli tecrübelerin ardından, o köprü bacağındaki merdivenin direnci, sıfır sinyalindeki sıcaklıkla sapma kabul edilen sınırlar içine girinceye kadar artırılır [18], [27].

5.5. Sıfır Sinyalinin Başlangıç Ayarının Yapılması

Sıfır sinyalinin başlangıç ayarının yapılmasında kullanılan yöntem, sıfır sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyonunda kullanılan yöntemle aynıdır. Ancak, farklı olarak burada konstantan gibi düşük ısıl değişim katsayılı dirençler kullanılır. Sıfır sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyonu tamamlandıktan sonra; köprü çıkışında tek bir gerinim ölçer üzerinden $100 \mu\text{m/m}$ 'lik bir değişim ölçüldüğünde; (5.1) no'lu formülden köprü çıkışının sıfırlanması için bir köprü bacağındaki direnç artışı 0.07 ohm olduğu hesaplanabilir. $\phi 0.08 \text{ mm}$ çaplı konstantan tel kullanılıyorsa; 0.17 ohm 'luk direnci yaratacak olan tel boyu 40 mm olacaktır. Çıkıştaki sıfırdan sapmanın yönüne bağlı olarak, yaklaşık sıfır noktasını elde etmek için köprünün bir bacağındaki gerinim ölçere küçük bir tel seri bağlanır.

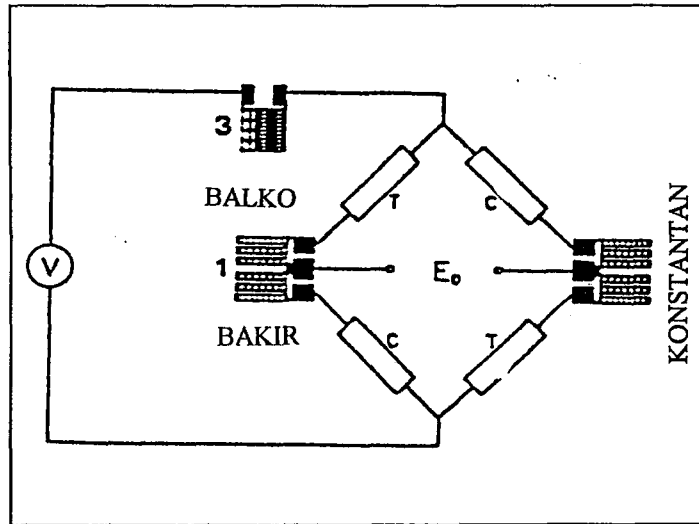


Şekil 5.3. Sıfır Sinyalinin Başlangıçtaki Ayarı

Basamaklı bakır kompanzasyon direncinin karşı köşesine E-formunda çift basamaklı bir direnç yerleştirilmesi de alternatif bir yöntemdir. Şekil 5.3'de gösterilmiş olan bu düzenleme sıfır sinyalinin başlangıçtaki ayarının hızlı ve hassas olarak yapılmasını sağlar. Köprü devresinde kullanılan gerinim ölçerler konstantandan imal edilmişlerse; E-formundaki kompanzasyon dirençlerinin malzemeside sıfır sinyalindeki sıcaklığa bağlı sapmanın en aza indirilebilmesi için Konstantan olmalıdır. Benzer şekilde, Karma alaşımlı dirençlerde, Karma alaşımlı gerinim ölçerlerle birlikte kullanılmak üzere seçilirler.

5.6. Maksimum Çıkış Sinyalindeki Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu

Maksimum çıkış sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyonu, şekil 5.4'de gösterildiği gibi yüksek ısıl değişim katsayılı bir direncin köprü besleme kaynağına seri bağlanması ile sağlanabilir. Direnç, uygun boyut ve sıcaklık hassasiyetine sahip ise; köprü besleme gerilimini, köprü çıkış sinyalindeki sıcaklığa bağlı değişimleri telafi edecek şekilde değiştirir. Örneğin sıcaklık yükseldikçe, belirli bir yükteki çıkış sinyalinde yükselme eğilimindedir. Bu durum, besleme hattı üzerinde yer alan ve besleme geriliminde de buna karşılık azalma yaratan bir direnç varsa kompanse edilebilir. Maksimum çıkış sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyonu, diğerleri içinde en sorunlu olanıdır. Hassas bir ayarlama yapabilmek için çok yüksek doğruluklu yüklemelerin farklı sıcaklıklarda yapılabilmesi gereklidir.



Şekil 5.4. Maksimum Çıkış Sinyalindeki Sıcaklıkla Sapmanın Kompanzasyonu

Maksimum çıkış sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyonu için Nikel (Ni) dirençler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, son zamanlarda nikelin yerini, oldukça yüksek ısıl değişim katsayısına sahip bir nikel demir alaşımı olan Balko almaktadır. Saf nikel oranla Balko'nun bir çok üstünlüğü vardır. Çok pahalı değildir, imalatı kolaydır ve direnci nikelin sahip olduğunun yaklaşık 2.5 katıdır. Tek kusuru ise, normal bir dönüştürücü çalışma koşullarında nikelin sahip olduğundan biraz daha küçük bir direnç ısıl değişim katsayısına sahip olmasıdır.

Nikel veya Balko direnç malzemesinin ısıl değişim katsayısı ve dönüştürücü çıkış sinyalinin sıcaklıkla değişim oranı verildiğinde, maksimum çıkış sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyon direncinin nominal değeri (5.3) no'lu formül yardımıyla hesaplanabilir.

$$R_m = \frac{\Delta S \cdot R_B}{\alpha_m - \Delta S} \quad (5.3)$$

R_m : Maksimum çıkış sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyon direnci

ΔS : Dönüştürücü çıkış sinyalinin sıcaklıkla değişim oranı

R_B : Köprü direnci

α_m : Kompanzasyon direnç malzemesinin ısıl değişim katsayısı

Gerekli direnç miktarının bir ön değerini tahmin ederken, maksimum çıkış sinyali üzerindeki testlere başlamadan önce, maksimum çıkış sinyalindeki sıcaklıkla değişim için (5.4) no'lu formül kullanılabilir.

$$\Delta S = -\Delta E + \Delta k \quad (5.4)$$

ΔE : Yay elemanının birim sıcaklık değişimine karşılık gelen elastisite modülündeki yüzde değişim

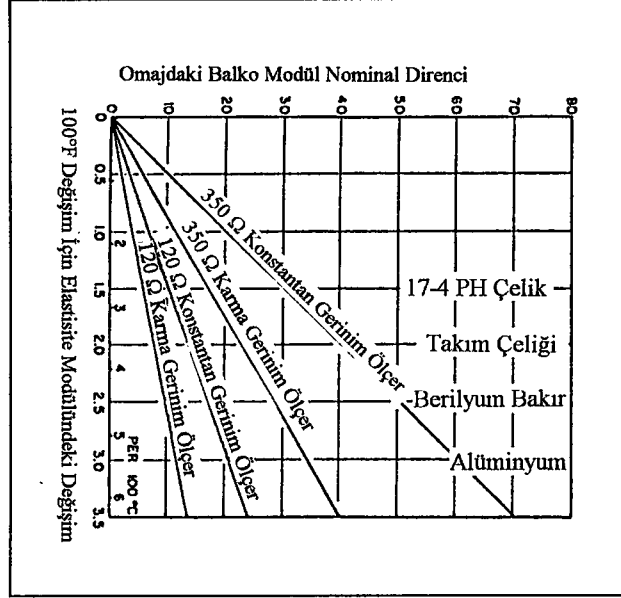
Δk : Birim sıcaklık değişimi ile gerinim ölçer k-faktöründeki yüzde değişim

Tablo 5.1. Çeşitli Malzemelerin Direnç Isıl Değişim Katsayıları

ΔE Yay Elemanı	Katsayı
17-4 PH Paslanmaz Çelik	- % 0.027 /°C
Takım Çeliği	- % 0.036 /°C
Berilyum-Bakır	- % 0.045 /°C
Alüminyum	- % 0.054 /°C
Δk Gerinim Ölçer Alaşımı	Katsayı
Konstantan	+ % 0.0090 /°C
Karma Alaşımı (6 Bileşenli)	- % 0.0103 /°C
Karma Alaşımı (13 Bileşenli)	- % 0.0149 /°C
$\Delta \alpha_m$ Direnç Malzemesi	Katsayı
Nikel	+ % 0.59 /°C
Balko	+ % 0.43 /°C
Bakır	+ % 0.40 /°C

Tablo 5.1'de kompanzasyon direncinin tahmini değerinin hesaplanmasında (5.3) ve (5.4) no'lu formüllerle kullanılacak ΔE , Δk ve α_m ait nominal değerler yer almaktadır. Belirli bir gerinim ölçer türü ve yay malzemesinin direnç ısıl değişim katsayısına bağlı olarak, gerekli olan direnç Şekil 5.5'de verilmiş olan grafikten elde edilebilir. Bu grafik, (5.3) ve (5.4) no'lu formüllerin grafik ifadesidir. Nikel direnç olarak bunun karşılığının bulunması gerektiğinde, Balko direncinin 0.8 ile çarpılması yeterlidir [28].

Yay elemanı, gerinim ölçerler ve direnç alaşımlarının hesaplamalarda kullanılan değerlerinin ve Şekil 5.5'deki değerlerin yaklaşık olmasından dolayı, buraya kadar açıklanmış olan yöntem, maksimum çıkış sinyalindeki sıcaklıkla sapmanın kompanzasyonunda çok kesin sonuçlar vermez. Bundan başka, 5.7 no'lu kısımda açıklanan ayar dirençlerinin yerleştirilmesinden sonra, ikinci kompanzasyon dirençlerinin uygulanması gerekir. Bu durumda uygulanabilecek en pratik yöntem Şekil 5.5'den nominal direncin belirlenerek; kesilmemiş direnci bu değer altında, tam kesilmiş direnci de bu değer üstünde olan C-formunda bir direncin seçilmesidir. Maksimum çıkış sinyalinin sıcaklıkla sapsınının detaylı testleri neticesinde; dirençler, maksimum çıkış sinyali değişimlerinin minimum olacağı seviyede ayarlanabilir.



Şekil 5.5. Maksimum Çıkış Sinyalinin Sıcaklıkla Değişiminin Sıcaklıkla Kompanzasyonu İçin Hesaplanmış Balko Direnci

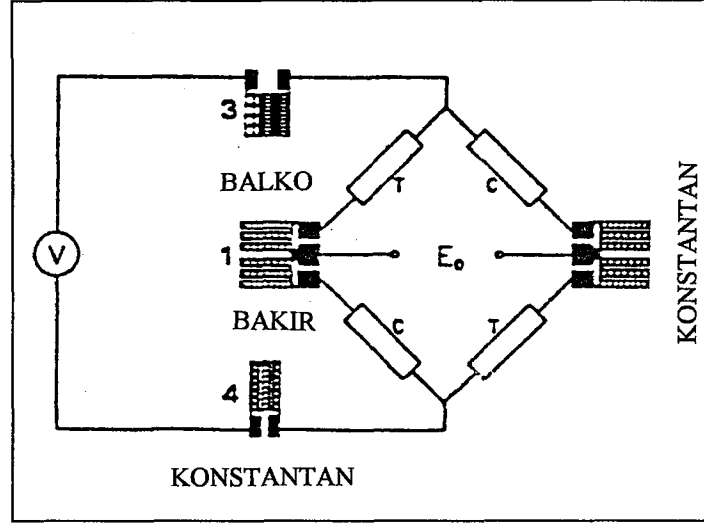
Bu yöntemi kullanarak, maksimum çıkış sinyalinin sıcaklıkla sapmasını, sinyalin % 0.0045 /°C altında tutmak mümkündür.

5.7. Maksimum Çıkış Sinyalinin Ayarlanması

Elektrik devresi performansının iyileştirilmesinde uygulanacak olan son yöntem maksimum çıkış sinyalinin önceden belirlenmiş bir değere getirilmesidir. Bu da Şekil 5.6'da gösterildiği gibi düşük ısıl değişim katsayılı bir direncin köprü besleme kaynağına seri bağlanması ile sağlanabilir. Bu amaca uygun direnç konfigürasyonu gerinim ölçer alaşımına uygun olarak seçilmiş bir alaşıma sahip D-formunda bir dirençtir. Direncin nominal değeri, Şekil 5.4'deki devrenin toplam impedansını ölçtükten ve ardından da köprü çıkışını istenilen maksimum çıkış sinyali seviyesine getirmek için gerekli direnç hesaplandıktan sonra belirlenebilir. Şekil 5.6'da 4 numara ile gösterilmiş olan maksimum yük çıkış sinyali ayar direnci yerleştirildikten sonra ardıl testler ve direnç ayarlamaları ile istenilen seviyeye yaklaşılabilir.

Gerçek uygulamalarda, şekil 5.6'da 3 numara ile gösterilmiş olan maksimum çıkış sinyalinin sıcaklıkla sapma ayar direnci ve 4 numara ile gösterilmiş olan maksimum yük çıkış sinyali ayar direncinin yaklaşık değerleri hesaplandıktan sonra gerinim

ölçerlerle birlikte yay elemanına bu dirençlerde yapıştırılır. İstenilen dönüştürücü performansını elde etmek için bir önceki paragrafta açıklanan yöntem uygulanır.



Şekil 5.6. Maksimum Çıkış Sinyalinin Başlangıçtaki Ayarı

Kompanzasyon ve çıkış sinyalinin ayarı için uygulanan bu yöntemler, dönüştürücü performansına birinci dereceden etki etmektedirler. Çok daha hassas ayarlamalar yapmak için köprü devresine ilave edilmesi gereken dirençler vardır. Maksimum çıkış sinyalinin sıcaklıkla sapma ayar direncinin devreye yerleştirilmesi çıkış sinyaline bir miktar doğrusallıktan sapma kusuru katmaktadır. Bu etkini azaltılması için ilave doğrusallık dirençleri devreye yerleştirilmelidir.

5.8. Ortamdaki Zararlı Etkilerden Koruma

Hassas gerinim ölçer devrelerinin, dönüştürücülerin kullanıldıkları ortamların bir çoğundan korunmaları gerekmektedir. Kapalı mekanlarda kullanılsalar dahi, havadaki rutubet ve az miktarda dahi olsa bir takım gazlardan, uzun dönem kararlılıkları olumsuz yönde etkilenir. Daha az korunmuş uygulama alanlarında kullanılmaları için, anlık su temasına veya daldırmasına rağmen doğruluğunda bir azalma olmayacağına dair sertifikalandırılırlar. Belirli bir dönüştürücü tipi için en uygun korunma sisteminin seçimi, çeşitli faktörlerin değerlendirilmesini gerektirir. Uygulanan bu sistemin köprü devresi elemanları ile ortamdaki zararlı etkenler arasında bariyer olma etkinliği doğal olarak temel değerlendirme kriteridir. Koruyucu sistemin, dönüştürücünün

performansını olumsuz yönde etkilememesi konusunda oldukça kritiktir. Bunlarında ötesinde maliyet ve üretilebilirlik de uygulamaya dönük temel noktalardır.

Dış ortamla ilişkiyi kesme açısından değerlendirildiğinde, hermetik sistemler bu yönden çok başarılıdır. Gerinim ölçer devresinin tamamının üzerini örten organik koruyucu kaplamalar, düşük maliyetli olmaları nedeni ile çok sayıda üretilen ucuz dönüştürücülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerinim ölçer devresi iyice temizlenmeden önce koruyucu uygulamasının yapılmasının hiç bir önemi yoktur. Gerinim ölçerler ve/veya kompanzasyon ve ayar dirençleri üzerinde olası kalıntılar yavaş ve geri dönüşü olmayan bir takım kimyasal reaksiyonları başlatarak; dönüştürücü performansında düşüşe neden olabilecek gerinim ölçer üzerinde bir takım aşınmalara yol açabilir.

Artık ve kirliliğe karşı en hassas gerinim ölçer uygulamaları açık yüzeyli ızgaralara sahip olanlardır. Çünkü gerinim ölçer ızgarası yavaş seyreden korozyona karşı en hassas bölgedir. Yüzey kaplaması yapılmış gerinim ölçerler bu tür bir olasılığa karşı nispeten korunmuşlardır. Ancak bu özellikleri, koruyucu muhafaza uygulanmadan önce titiz bir temizlik yapılması gereğini ortadan kaldırmamaktadır. Belirli bir uygulama için açık yüzeyli gerinim ölçerler en iyi seçeneği oluşturuyorlar ise, temizlik işleminde extra bir titizliğe ihtiyaç vardır.

Daha öncede belirtildiği üzere, gerinim ölçerler lehimlendikten hemen sonra temizlenmelidir. Asit bazlı lehim pastaları kullanılıyor ise, yüzeyin özenle temizlenerek nötrale edilmesi ayrıca bir önem kazanır. Lehim işlemi için reçine bazlı pasta kullanılsa bile, çeşitli reaktif ürünler ve aşırı miktarda pastadan oluşan kalıntılar tamamen temizlenerek; gerinim ölçerler üzerinde iyonik pisliklerin kalması engellenmelidir. Her halükarda, temizlik işlemi kullanılan lehim pastasının türüne uygun olarak yapılmalıdır. Çünkü, lehim pastası imalatında kullanılan kimyasallar lehimleme sıcaklığında çok farklı reaksiyonlar vermektedir.

Asit bazlı bir lehim pastası kullanılmış ise; % 2 hidroklorik asit içeren bir çözelti ile lehimleme işlemi esnasında oluşan kompleks tuzları çözmek için tüm eleman dikkatlice yıkanabilir. Asit çözeltisi ile yıkandıktan sonra su bazlı bir nötralizer ile

durulanmalıdır. Reçine bazlı bir lehim pastasının kullanılması durumunda; tüm eleman bir reçine çözücü ile temizlenmelidir. Ancak, reçine çözücüler yalnız başlarına kullanıldıklarında eleman üzerinde ince bir reçine bağlayıcı tabakası bırakmaktadırlar. Bu durumda etkili bir temizlik için, reçine çözücülerden sonra su bazlı yarı çözücülerle eleman bir kez daha yıkanmalı, ardından da su bazlı bir nötralizer ile durulanmalıdır.

Gerinim ölçerlerin uygulanmasını takiben yapılmış olan ilk temizlik işleminden bağımsız olarak; çevre koşullarından koruma önlemlerinin uygulanmasından hemen önce ayrıntılı bir temizlik operasyonunun yapılması mutlaka gereklidir. Hermetik muhafazalar veya koruyucu kaplamalar ayrımı yapılmaksızın; uygulama işleminden önce eleman, dönüştürücünün ısıtılması yoluyla tamamen kurutulmalıdır. Organik bileşimler kullanıldığında dönüştürücünün hem kuru hemde sıcak olması koruyucu kaplama uygulamalarında özellikle aranan bir koşuldur.

◆ Hermetik muhafazalar

Maliyetleri karşılanabildiğinde hermetik muhafazalar, gerinim ölçerler ile dış ortam arasında mutlak koruma oluştururlar. Genellikle metal malzemeden imal edilen bu tür muhafazalar, yay elemanının yük altındaki deformasyonuna direnç göstermeyecek şekilde tasarlanırlar. Metal muhafazaların en etkili sızdırmazlık yöntemi kaynaktır. Böylece tam sızdırmazlık sağlanarak; muhafazanın içine, koruyucu atmosfer yaratmak amacıyla kuru Azot (N) veya Argon (Ar) gazı doldurulabilir.

Muhafazanın yarattığı hacim, kimi zaman silikon yağı veya muadili bir yağ ile doldurulmaktadır. Ancak, muhafazanın sızdırmazlığı tam olarak sağlanmış ise; bunların hiç birisinin korumaya bir katkısı yoktur. Yağın buradaki temel işlevi, ısı dengeleri koruyarak bir amortisör görevi yapmaktır. Bu tür yağlar kullanıldığında, temiz ve rutubetten arındırılmış olduklarından emin olunması şarttır. Örneğin silikon yağlar, dönüştürücünün kararlılığına ve gerinim ölçerlere zarar veren, kayda değer miktarda çözünmemiş su içermektedirler. Yağ ile doldurulmuş muhafazalarda, sıcaklığın yükselmesiyle oluşacak sıvı genleşmesi ve yay elemanının deformasyonundan dolayı akışkan hareketleri için gerekli önlemler alınmalıdır. Gerinim ölçerlerin atmosfere açık yüzeyli yağ banyosuna daldırılmaları, çevre

koşullarına karşı uzun ömürlü bir koruma sağlayamamaktadır. Yapılan denemelerde özellikle silikon yağ, atmosferdeki nemi bünyesinde toplayarak gerinim ölçerler üzerinde olumsuz etkiler yaratması sebebi ile kötü sonuçlar vermiştir.

Kauçuktan imal diyafram ve körük tipi muhafazalar, hava ve neme karşı % 100 koruma sağlamamalarına rağmen; zaman zaman metallerin yerine kullanılmaktadırlar. Maliyetlerinin düşük olması ve ılımlı ortam koşullarında iyi sonuç vermeleri nedeni ile tercih edilebilmektedirler. Bağlantıları, ya mekanik kelepçelerle yada yapıştırıcılar ile yapılabilmektedir.

◆ Mum

Koşullar kullanımına müsaade ettiğinde mikrokristalli mum, gerinim ölçerlerin rutubete karşı korunmaları için mevcut en etkili organik malzemedir. En büyük dezavantajı, düşük sıcaklıklarda kırılğan bir yapıya sahip olup; çatlak eğiliminde olmasıdır. Erime sınırının başlaması dolayısıyla, kullanılacakları en yüksek sıcaklık 80°C'dir. Mekanik özellikleri de çok düşüktür.

Dönüştürücüde gerinim ölçer koruması olarak mikrokristalli mum kullanıldığında; aşağıdaki noktalar göz önünde bulundurulmalıdır:

- a) Mum uygulanırken, dönüştürücü 50°C'ye ısıtılmalı ve bu işlem esnasında tamamen kuru olduğundan emin olunmalıdır.
- b) Yay elemanının gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı noktadaki mukavemeti, mum tabakasının varlığından dönüştürücü özelliklerinin etkilenmeyeceği kadar büyük olmalıdır.
- c) Tüm kablo bağlantıları mum tabakası uygulanmadan önce sabitlenerek; titreşim ve küçük kablo hareketlerinden dolayı tabakadaki çatlak ve kırılma riski enaza indirilmelidir.
- d) Dönüştürücü gövdesi mum tabakası için mekanik bir muhafaza görevi yapacak şekilde tasarlanmış olmalıdır.

◆ Butil kauçuk

Butil kauçuklar ve çözücü katkılı butil kauçuklar, dönüştürücülerde gerinim ölçerlerin korunmaları için yaygın olarak kullanılan kaplama malzemeleridir. Rutubete karşı iyi bir koruma sağlarlar. Düşük elastisite modülüne sahip olmaları, yay elemanının mukavemet özelliklerine katkılarını en aza indirmektedir. Doğal haldeyken yeni çiğnenmiş bir çikletin yapışkanlığına ve kıvamına sahiptirler. Yumuşaklıkları sayesinde gerinim ölçerlerin bulunduğu bölgeye rahatça uygulanırlar. Çözücü katkılı butil kauçuklar sıvı halde temin edilerek bir fırça yardımıyla uygulanırlar. Dönüştürücü kullanılmaya başlanmadan önce bir kurutma işleminden geçirilirler. Butil kauçuğun her iki türünde yumuşak yapılarından dolayı mekanik bir koruma sağlayamazlar.

◆ Silikon kauçuk

Rutubet ile uzun süreli temasın sorun yaratmadığı bir çok dönüştürücü uygulamalarında; gerinim ölçerlerin üzerine koruyucu bir tabaka olarak RTV silikon kauçuk kullanıldığında olumlu sonuçlar alınmaktadır. Açıklanan diğer üç koruyucu ile karşılaştırıldığında neme karşı koruma özelliği en düşük olmasına rağmen; mumdan çok daha iyi mekanik mukavemete sahip olup; uygulanması oldukça basittir. Yay elemanı ile kaplama arasındaki adhesyon kuvvetleri büyütülmek istendiğinde, genellikle RTV primeri kullanılır.

Bazı silikon kauçuklar, kurutma işlemi esnasında asetik asit salgılamaktadırlar. Asetik asit gerinim ölçer rozetine zarar verebileceği için, kullanımında fırın ortamının kontrol edilebildiği kurutma işlemi tercih edilmelidir. Asetik asit içeren silikon kauçuklar, sıvı halde yaydıkları yoğun ekşimsi kokularıyla tanınırlar [30].

BÖLÜM 6. KUVVET DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜNÜN TASARIMI

6.1. Kapasite

Kuvvet dönüştürücüsü tasarımındaki temel parametrelerin başında, kapasitenin nominal değeri gelir. Gerek kuvvet ölçümlerinde, gerekse kantar uygulamalarında en sık kullanılan değer olduğu için, bu örnek için 100 kN (~10 tonf) kapasite seçilmiştir.

6.2. Yükleme Modu

Yükleme modu, kuvvet dönüştürücüsü tasarımında belirleyici olan bir diğer parametredir. Yay elemanının yükleme tipinin seçiminde olduğu kadar, boyutlarda da etkisi vardır. Bu örnek çalışmada yükleme modu, BASMA YÖNÜNDE STATİK YÜKLEME seçilmiştir.

6.3. Dönüştürücünün Öngörülen Çalışma Sıcaklığı

Gerek yay malzemesi seçiminde gerekse gerinim ölçerlerle ilgili seçimlerde belirleyici olan bir parametre de, dönüştürücünün kullanılması planlanan çalışma sıcaklığıdır. Bu örnekte, dönüştürücünün ODA SICAKLIĞINDA kullanılacağı öngörülmüştür.

6.4. Yay Elemanı Malzemesinin Seçilmesi

Dönüştürücü yay malzemesi seçiminde kullanılmak üzere genel amaçlı Tablo 3.1 hazırlanmıştır. Bu tablonun karar aşamasında kullanılmak üzere hazırlanmış olduğu; ancak tasarım aşamasında kullanılmak üzere malzeme özelliklerinin imalatçı firmadan temin edilmesi gerektiği 3.3.5. no'lu kısımda açıklanmıştır. Marmara bölgesinde yapılan genel bir pazar araştırması neticesinde, tabloda yer alan 4140 ve E4340 çeliklerinin mevcut olduğu görülmüştür. E4340 çeliği için 3.1 no'lu tablodaki

değerlendirme “mükemmel takım çeliği” şeklindedir. Bu nedenle malzeme olarak E4340 seçilmiştir. Bu malzemeye ait özellikler aşağıdadır:

Kimyasal kompozisyonu	: Fe-0.4C-1.8Ni-0.8Cr-0.25Mo
Elastisite modülü	: 207 GN/m ²
Akma mukavemeti	: 1.449 x 10 ⁶ N/m ²
Isıl genleşme katsayısı	: 11.34 x 10 ⁻⁶ /°C
Yoğunluk	: 7.8391 g/cm ³
Tavsiye edilen en yüksek çalışma sıcaklığı	: 260°C
Uzama yüzdesi	: % 12 (2” lik numune üzerinde)
Sertlik	: 43-46 HRc

6.5. Yay Elemanı Seçimi

Dönüştürücünün kapasitesi, yükleme modu ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak yay elemanı tipi seçilir. Bu örnekte, şekil 3.27’de gösterilmiş olan KOLON TİPİ YAY ELEMANI seçilmiştir.

6.6. Gerinim Ölçer Seçimi

Bu aşamada HBM - Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH. firmasının ürünlerinden seçim yapılacaktır. K serisi gerinim ölçerlerin, dönüştürücü konstrüksiyonunda kullanılmak üzere geliştirildiği üretici firma tarafından belirtilmiştir. Alüminyum ve çelik için iki ayrı seri hazırlanmıştır. Gerinim ölçer taşıyıcı malzemesi cam lifleri ile güçlendirilmiş fenolik reçinedir. Yapıştırıcı uygulandıktan sonra soğuk ve sıcak kurutma yapılabilir. Bu seriye özel kompanzasyon ve ayar dirençlerinin taşıyıcı malzemesi polimid olup, ayar dirençleri konstantandan, kompanzasyon dirençleri Nikel’den üretilmişlerdir. Çelik için üretilen gerinim ölçerlerin sıcaklık karakteristiği standart olarak 10.8 x 10⁻⁶ /°C , alüminyum için ise 23 x 10⁻⁶ /°C olarak verilmiştir.

Yay elemanının malzemesinin ve yüklenme şeklinin seçimi gerinim ölçerin ızgara şeklini ve serisini belirleyen değişkenlerdendir. Bu örnek uygulama için LK 11G 6/350 kod'lu gerinim ölçer seçilmiştir. Teknik özellikleri şunlardır:

Tasarım	: Kendinden bağlantı telli
Uygulanacağı malzeme	: Çelik
Ölçüm ızgaralarının malzemesi	: Konstantan
Ölçüm ızgaralarının kalınlığı	: 5 µm
Bağlantı tellerinin malzemesi	: Nikel (Ni) kaplanmış Bakır (Cu)
Bağlantı tellerinin uzunluğu	: 30 mm.
Ölçme ızgaralarının uzunluğu	: 6 mm
Ölçme ızgaralarının genişliği	: 3 mm
Taşıyıcı uzunluğu	: 12.5 mm
Taşıyıcı genişliği	: 5 mm
Direnç değeri	: 350 Ω
Direnç değerinin toleransı	: ± % 0.35
Müsaade edilen max besleme gerilimi	: 15 V
k-faktörü	: ~ 2
k-faktörünün toleransı	: ± %0.7
k-faktörünün sıcaklık katsayısı	: 115 x 10 ⁻⁶ /K
Referans sıcaklık	: 23°C
Statik çalışma sıcaklık aralığı	: - 70°C / +200°C
Dinamik çalışma sıcaklık aralığı	: - 200°C / + 200°C

6.7. Yapıştırıcı Seçimi

Seçilen gerinim ölçere ve öngörülen çalışma koşullarına uygun yapıştırıcılar içinde kuvvet dönüştürücüsü imalatçılarının tecrübe ve tavsiyelerine dayanılarak HBM firmasının EP 310 kodlu ürünü seçilmiştir. Bu yapıştırıcıya ait özellikler aşağıda verilmiştir:

Kurutma şekli	: sıcak (fırınlanarak)
Optimum yapıştırıcı kalınlığı	: $(10 \pm 5) \mu\text{m}$
Yapıştırma basıncı	: $0.1-0.5 \text{ N/mm}^2$
Kuruma süresi	: 30 dakika / 5 saat
Çalışma sıcaklık aralığı	: $-269^\circ\text{C} / +310^\circ\text{C}$

6.8. Dış Ortama Karşı Koruyucu Seçimi

Şekil 3.27’de gösterilmiş olan konstrüksiyon kendisini mekanik etkilere karşı koruyabildiğinden; HBM firmasının, havadaki rutubet, yağ ve kimyasal çözücülere karşı geliştirmiş olduğu SL450 kodlu çözücü katkısız, saydam silikon reçinesi, koruyucu olarak seçilmiştir. Bu koruyucu küçük bir fırça ile uygulanabilmekte ve 93°C ’den 315°C ’ye kadar olan aralıkta basamaklı olarak sıcaklığın arttırıldığı fırınlarda kurutulabilmektedir.

6.9. Dönüştürücünün Toplam Boyutlarının Tayini

Birim şekil değişiminin, gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı noktada $1500 \mu\text{m/m}$ olması gerektiği daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Seçilen konfigürasyona ve malzeme tipine göre çeşitli mukavemet hesaplama teknikleri kullanılarak gerekli boyutlar belirlenmektedir. Bugün kuvvet dönüştürücüleri imalçılarını kullandıkları en yaygın yöntem Sonlu Eleman Analizi’dir. Sınır koşullarının tanımlanmasıyla çeşitli bölgelerdeki sehimler gerçeğe büyük yakınlıkla belirlenebilmektedir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen bu hesaplamaların ardından yük elemanı üretilerek ilk testler yapılmaktadır.

EN normu kapsamında kullanılacak basma tipi kuvvet dönüştürücülerine ait maksimum boyutlar Tablo 6.1’de verilmiştir. 100 kN kapasiteye sahip basma tipi bir kuvvet dönüştürücüsünün yükleme plakası dahil maksimum yüksekliği, doğruluk sınıfı 1 olan makinalar için 220 mm, doğruluk sınıfı 2 ve 3 olan test makinaları için 145 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutlarda, boyutsal analiz aşamasında ele alınması gereken sınırlayıcılarıdır.

Tablo 6.1: Basma Tipi Kuvvet Dönüştürücülerinin Toplam Yüksekliği

Kuvvet ölçme cihazının maksimum (anma) kuvveti	1, 2 ve 3 Sınıfı malzeme test makinalarının doğruluklarının kontrolü için kullanılan cihazların maksimum toplam yüksekliği ¹⁾	
	Sınıf 1 ²⁾	Sınıf 2 ²⁾ ve 3 ²⁾
F ≤ 40 kN	145	115
60 kN	170	145
100 kN	220	145
200 kN	220	190
400 kN	290	205
600 kN	310	205
1 MN	310	205
2 MN	310	205
3 MN	330	205
4 MN	410	205
5 MN	450	350
6 MN	450	400
10 MN	550	400
15 MN	670	-

1) Malzeme test makinasının mevcut yerleştirme aralığı imkan verdiği takdirde daha büyük toplam yüksekliğe sahip dönüştürücülerin kullanımında mümkündür

2) EN 10002-2'ye göre.

6.10. Elektrik Devresinin Uygulanması ve Ayarlar

Gerinim ölçer devresinin kurulmasının ardından ilk testler yapılmakta ve bölüm 5'de açıklanan yöntemler uygulanarak dönüştürücü karakteristiği iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu aşamada uygulanan yöntem iteratif bir yöntemdir. Gerekli birim şekil değişiminin elde edilip edilmediği öncelikle köprü çıkış sinyalinin tam yükteki değerinden gözlenir. Ardından gerekli düzeltmeler hem elektrik devresinde hem de yay elemanının boyutlarında yapılır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, endüstriyel uygulamaları her geçen gün daha da artan kuvvet dönüştürücülerinin tasarım aşamaları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Yüksek nitelikli bir dönüştürücü imalatının aşamalarını teşkil eden malzeme seçimi, konstrüksiyon tayini, gerinim ölçer seçimi, köprü devresinin kurulması ve devrenin performansının iyileştirilmesi için gerekli kriterler açıklanmıştır. 100 kN kapasiteli basma tipi kuvvet dönüştürücüsü örneğinde tasarımın aşamaları ve seçimlerde izlenen yol tanımlanmıştır.

Bir kuvvet dönüştürücüsünün performansının belirlenmesinde kullanılan parametreler, ölçüm cihazının olduğu kadar, daha geniş anlamda bir malzeme özelliği olarak da karşımıza çıkmıştır. Yapılan teorik hesaplamalar neticesinde elde edilen boyutsal özelliklerin, beklenen birim şekil değişimini vermesinin, hesaplamalar da kullanılan yöntemlere ve hesaplamalara esas teşkil eden malzeme özelliklerine bağlı olduğu görülmüştür. Malzeme özelliklerindeki değişimler, kendilerini doğrudan dönüştürücü performansında göstermektedirler. Dönüştürücülerin beklenen sinyali üretmeleri doğru gerinim ölçerlerin seçilmesi ve doğru uygulanmasıyla da ilgilidir. Dönüştürücü devrelerinin şartlarını yerine getirerek yapılan bir devre çalışması performans artışı ile sonuçlanmaktadır.

Bu çalışma neticesinde, dönüştürücü tasarımı ve imalatının iteratif bir çalışma olduğu görülmüştür. Gerek yay elemanı tasarımı ve imalatında gerekse köprü devresinin kurulması ve performansının iyileştirilmesinde; bu iterasyon yöntemi, tasarım ve imalat aşamalarının iç içe girmesine neden olmaktadır. Prototip çalışması olmaksızın dönüştürücü tasarımı ve imalatının mümkün olmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] BAUMANN, E., 1976. Elektrische Kraftmeßtechnik, VEB Verlag Technik Berlin, Germany
- [2] BAUSCHKE, H., 1968. Kraftmeßtechnik, Deutsches Amt für Meßwesen und Warenprüfung, Berlin-Bereich Metrologie, DDR
- [3] BAYTAROĞLU, Ş., ÖZBAY, H.Ö. 1995. Metre Konvansiyonu ve Ulusal Kütle Prototipinin Geçmişi. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir
- [4] BAYTAROĞLU, Ş., ÖZBAY, H.Ö. 1995. Sertlik Birimleri ve Sertlik Metrolojisi. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir
- [5] BAYTAROĞLU, Ş., ÖZBAY, H.Ö., KESİKOĞLU, H., 1994. Metrolojide Kullanılan Temel ve Genel Terimler Sözlüğü. UME 94-003.
- [6] BRAY, A., BARBATO, G., LEVI, R., 1990. Theory and Practice of Force Measurement, Academic Press, ISBN 0-12-128453-0
- [7] DALLY, J.W. and RILEY, W.F., 1965. Experimental Stress Analysis, McGrawHill Book Company
- [8] EN 10002-3, Metallic Materials - Tensile Testing - Part 3 - Calibration of Force Proving Instruments Used for the Verification System of the Uniaxial Testing Machine, May 1994
- [9] ERDİLLER, B. and SARAL, A., 1982. DMS (Uzayabilir Ölçü Şeridi) ile Ölçme Esasları, Ankara Üniversitesi Ziraat fakültesi yayınları : 819, Derlemeler : 43
- [10] FANK, S., SAWLA, A., ÖZBAY, H.Ö., GABMANN, H., 1996. Establishment of National Force Scale at UME and Results of Intercomparison Measurements Between UME and PTB, Proceedings of the 15th International Conference "Accuracy, Assurance in Force, Torque and Mass Measurements, Basic Metrology to Industrial Applications", IMEKO TC3, Madrid, Spain
- [11] FANK, S., ÖZBAY, H.Ö., BAYTAROĞLU, Ş. 1995. Çekme-Basma Test Makinalarında Kalibrasyonun Önemi. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir
- [12] FANK, S., ÖZBAY, H.Ö., BAYTAROĞLU, Ş. 1995. Kuvvet Standardının Oluşturulması ve Sanayiye Transferi. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir
- [13] FANK, S., ÖZBAY, H.Ö., BAYTAROĞLU, Ş. 1995. Kuvvet Dönüştürücüleri Kalibrasyon Prosedürü. 1.Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildirileri, Eskişehir

- [14] HBM- Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH.-Germany. Ürün Katalogları, 1995
- [15] HOLISTER, G.S., 1967. Experimental Stress Analysis, Cambridge University Press
- [16] HOLMAN, J.P., 1994. Experimental Methods for Engineers, McGrawHill Book Company, ISBN 0-07-029666-9
- [17] HOFFMAN, K. 1976. An Introduction to Strain Gage Techniques by Practical Experiments. HBM Publication, VD 76004e, Germany
- [18] HOFFMAN, K. 1976. Applying the Wheatstone Bridge Circuit. HBM Publication, VD 72001e, Germany
- [19] HOFFMAN, K. 1973. Measuring Elementary Load Cases With Strain Gages. HBM Publication, VD 73002e, Germany
- [20] Instrucțiuni Pentru Verificarea Masurilor Şi Aparatelor De Masurat, Forte (6), 1961. Editie Oficiala - Bucureşti, Romania
- [21] KNOTT, A.J., 1995. The Accuracy of the NPL 1.2 MN Deadweight Force Standard Machine, Proceedings of the 14th International Conference "State of the Art in Force and Mass Measurement", IMEKO TC3, Warszawa, Poland
- [22] Measurement of Force, (Group Training Course in Metrology and Measurement Standards), 1989. Japan National Research Laboratory of Metrology, Japan
- [23] Measurements Group -Vishay-U.S.A. Ürün Katalogları, 1995
- [24] Measurements Group -Vishay-U.S.A. Technotes, 1988-1989
- [25] Mechanics Measurements, (The 3rd training workshop on measurement technology for developing countries), 1996. Chine National Institute of Metrology, Beijing, P.R.of China
- [26] Mekanik Metroloji Laboratuvarlarının Mevcut Kalibrasyon İmkanları ve Kısa Dönem Amaçları, 1993. Mekanik Metroloji Grubu, UME 93-007
- [27] Modern Strain Gage Transducers, 1981-1984. Epsilonics, Measuremen Group Inc., U.S.A.
- [28] PERRY, C.C. and LISSNER, H.R.,1962. The Strain Gage Primer, McGrawHill Book Company

- [29] RATIU, M and POPESCU, P., 1961. Tehnica Măsurării Fortelor, Manual Pentru Școlile Tehnice de Metrologie, Anul II. Ditura de Stat Didactica și Pedagogica, București, Romania
- [30] Strain Gage Based Transducers, Their Design and Construction, 1988, Measurement Group Inc., ISBN 0-9619057-0-0 (pbk)
- [31] TOK, T., ÖZBAY, H.Ö., 1994. SI-Uluslararası Birimler Sistemi, UME 94-007
- [32] TOPUZ, A., 1993. Malzeme Muayenesinde Özel Konular, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, Sayı 280
- [33] VAUGHAN, J., 1975. Application of B & K Equipment to Strain Measurements, ISBN 87-87355-08-6
- [34] WEILER, W., 1994. Handbuch der Physikalischen-Technischen Kraftmessung, Verlag, ISBN 3-528-08945-8



ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimlerini İstanbul'da tamamladı. 1984 yılında girdiği Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1991 yılında Makina Mühendisi olarak mezun oldu. Eylül 1995 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

Halen, TÜBİTAK, Marmara Araştırma Merkezi (MAM), Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), "Ulusal Kuvvet Standardı ve Kuvvet Ölçümleri Laboratuvarı" nda araştırmacı olarak görev yapmaktadır.