


29112

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



NORMAL VE KESME KUVVETLERİNİ  
ÖLÇMEK İÇİN BİR DİNAMOMETRE  
DİZAYNI

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Koray KAVLAK  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
Konya, 1993

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NORMAL VE KESME KUVVETLERİNİ ÖLÇMEK İÇİN  
BİR DİNAMOMETRE DİZAYNI

Koray KAVLAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 6./9./ 1993 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.

İmza

Yrd.Doç.Dr. Osman YİĞİT  
(Danışman)




İmza

Yrd.Doç.Dr. Yaşar KALTAKÇI  
(Üye)



İmza

Yrd.Doç.Dr. Ahmet AVCI  
(Üye)



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi  
NORMAL VE KESME KUVVETLERİNİ  
ÖLÇMEK İÇİN BİR DİNAMOMETRE DİZAYNI

Koray KAVLAK

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Osman YIĞIT

1993, Sayfa : 63

Jüri : Yrd. Doç. Dr. O. YIĞIT

Yrd. Doç. Dr. Y. KALTAKÇI

Yrd. Doç. Dr. A. AVCI

Analitik yöntemlerin kullanılmadığı ve emniyet kavramının ön plana çıktığı mühendislik yapılarında, deneysel yöntemlere başvurulur. Deneylerin temelini ise, fiziksel büyüklüklerin ölçülmesi teşkil eder. Makina mühendisliği sahasında, kolayca ölçülebilmesi gereken büyüklüklerin en önemlilerinden birisi de kuvvettir. Kuvvetin ölçülebilmesi bazen çok kolaylıkla yapılabilmesine rağmen, bazen de büyük çabaları gerektirir.

Bu zorluk bilhassa, yapı içinde bulunan bir elemanda teşekkül eden iç kuvvetlerin ölçülmesinde ağırlığını hissettirir. İç kuvvetlerin ölçülmesinde daha önceleri ekstansometrelerden yararlanılmaktaydı. Günümüzde ise strain gage'ler, kuvvet ölçülmesinde geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır.

Bu çalışmada, normal ve kesme kuvvetlerinin ölçülebilmesi için bir dinamometre tasarlanmıştır. Tasarım safhasında, strain gage tekniğinin esasları etüd edilmiştir. Dinamometre imâl edilerek kalibrasyon denklemleri çıkarılmıştır. Bu kalibrasyon denklemleri yardımıyla da, normal ve kesme kuvvetlerinin değerleri hesaplanmıştır. Deneyler, S.Ü. Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nun İnşaat Bölümü Laboratuvarında bulunan strain gage cihazı ile yapılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Kuvvet ölçümü, dinamometre, strain gage.

## ABSTRACT

Masters Thesis

### DESIGN OF A DYNAMOMETER TO MEASURE NORMAL AND SHEAR FORCES

Koray KAVLAK

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Osman YIĞİT

1993, Page : 63

Jury : Assist. Prof. Dr. O. YIĞİT

Assist. Prof. Dr. Y. KALTAKÇI

Assist. Prof. Dr. A. AVCI

Experimental methods are used when analytical methods are not available to analyse the engineering structures for which safety factor is essential. The basis of any experiment is measurement of physical properties. In mechanical engineering, force is one of the most important property which should be measured easily. Although force is usually measured by simple methods, for some cases great efforts may be

required. The difficulty arises especially in measuring of internal forces developed in structural elements. Extensometers were widely used for internal force measurement, but recently strain gages have found a great field of application.

In the present work, a dynamometer is designed to measure normal and shear forces. The fundamentals of strain gage technique were analysed in the design phase. The dynamometer was manufactured and the calibration equations were obtained. Normal and shear forces were evaluated by using the calibration equations obtained. The experiments were performed by the strain indicators present in the Laboratories of Buildings Department of Technical Sciences College of Selçuk University.

**KEY WORDS :** Force measurement, dynamometer, strain gage.



## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimim süresince, büyük yardımlarını gördüğüm hocam  
Yrd. Doç. Dr. Osman YİĞİT'e teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SEMBOLLER .....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanıtılması .....	1
1.2. Literatür Araştırması.....	2
2. KUVVET ÖLÇÜLMESİ.....	4
2.1. Kuvvet Ölçülmesindeki Temel Metodlar .....	4
2.2. Genel Bir Ölçme Sisteminin Yapısı.....	8
2.3. Elektrik Transducer Elemanları.....	9
3. STRAİN GAGE TEKNİĞİ .....	11
3.1. Genel Bilgi.....	11
3.2. Birim Uzama.....	11
3.3. Strain Gage'in Yapısı.....	13
3.3.1. Strain gage çeşitleri ve özellikleri.....	14
3.3.1.1. Metal esaslı strain gage'ler.....	14
3.3.1.2. Metal esaslı olmayan yarı-iletken strain gage'ler.....	16
3.4. Gage Faktörü .....	17
3.5. Strain Gage'in Yüzeye Yapıştırılması.....	20
3.6. Strain Gage Seçimi.....	21
4. WHEATSTONE KÖPRÜ DEVRESİ.....	23
4.1. Genel Bilgi.....	23
4.2. Wheatstone Köprü Devresi İçin Denge Şartı.....	24



	<u>Sayfa</u>
4.3. Köprü Devresinin Kollarındaki Direnç Değişiklikleriyle Çıkış Gerilimi Arasındaki Bağını	25
4.4. Wheatstone Köprü Devresi Çeşitleri	26
5. DİNAMOMETRE TASARIMI	29
5.1. Strain Gage Tipi Temel Dinamometre Konstrüksiyonları	29
5.2. Normal ve Kesme Kuvvetlerini Birlikte Ölçebilecek Dinamometre Tasarımı	33
5.3. Dinamometre Üzerine Monte Edilen Kuvvet Uygulama Düzenegi	39
5.4. Dinamometrenin Kalibrasyonu	39
5.5. Kalibrasyon Eşitliklerinin Kontrolü	47
6. SONUÇ	49
7. KAYNAKLAR	51
EKLER	
EK-1 Dinamometreye Sadece Normal Kuvvet Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler	53
EK-2 Dinamometreye Sadece Kesme Kuvveti Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler	54
EK-3 Dinamometreye Normal Kuvvetin $e=10\text{mm}$ Mesafede Eksantrik Olarak Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler	55
EK-4 Dinamometreye $\alpha=30^\circ$ lik Açıda F Bileşke Kuvvetinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler	56
EK-5 Dinamometreye $\alpha=45^\circ$ lik Açıda F Bileşke Kuvvetinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler	57

	<u>Sayfa</u>
EK-6	Dinamometreye $\alpha=60^\circ$ 'lik Açıda F Bileşke Kuvvetinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler..... 58
EK-7	Dinamometreye Basma Halinde Uygulanan Normal Kuvvetlerin Ölçülmesinde Bulunan Kalibrasyon Eşitlikleri ve Bu Kalibrasyon Eşitliklerinin Kontrolü İçin Elde Edilen Veriler ..... 59
EK-8	Fotoğraf 1 ve Fotoğraf 2 ..... 60
EK-9	Fotoğraf 3 ve Fotoğraf 4 ..... 61
EK-10	Fotoğraf 5 ve Fotoğraf 6 ..... 62
EK-11	Fotoğraf 7..... 63



## SEMBOLLER

A	Kesit alanı
$\Delta A$	Kesit alanındaki değişme
b	Kesit genişliği
c	Tarafsız eksene göre kesitin yarı yüksekliği
D	Son çap
$D_0$	Başlangıçtaki çap
$\Delta D$	Çaptaki değişme
E	Elastisite modülü
e	Normal kuvvetin uygulama noktasının dinamometre merkezinden kaçıklığı (eksantrikliği)
F	Bileşke Kuvvet
G	Galvanometre
h	Kesit yüksekliği
I	Tarafsız eksene göre kesitin alan ikinci momenti
$I_1, I_2$	Wheatstone köprü devresi kollarındaki elektrik akımı
K	Gage faktörü
L	Son uzunluk, boy
$L_0$	Başlangıçtaki uzunluk
$\Delta L$	Uzunluktaki değişme
M	Moment
N	Normal kuvvet
R	Elektrik direnci
$\Delta R$	Direnç değişikliği
$\Delta R/R$	İzafi direnç değişikliği
S	Kesme (kayma) kuvveti
$U_G$	Giriş gerilimi
$U_Ç$	Çıkış gerilimi
$\Delta U_Ç$	Köprü devresinde çıkış gerilimleri arasındaki fark
W	Mukavemet modülü
$\alpha$	Eğim açısı
$\rho$	İletken malzemenin özdirenci
$\epsilon, \epsilon_1, \Delta L/L$	Eksenel veya boyuna birim uzama
$\epsilon_D$	Yanal veya enine birim uzama
$\sigma$	Normal gerilme
$\mu$	Poisson oranı

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Problemin Tanıtılması

Mühendislik problemlerinin çözümünde, hesap ve deney metodları olmak üzere iki imkân mevcuttur. Mühendislik hesaplarının yapılamadığı veya çok zaman alacağı durumlarda, emniyet kavramının ön plana çıktığı durumlarda deneye (ölçmeye) başvurulur. Ayrıca bir problem hesap yöntemiyle çözülmüşse, yapılan basitleştirici kabullerin doğruluk derecesi deneylerle kontrol edilebilir.

Ölçme, mühendislik araştırma ve geliştirme programlarının önemli bir safhasını oluşturur. Elektronik ölçme aletlerinin geliştirilerek, çeşitli mühendislik dallarında kullanılmaya başlanmasıyla, daha doğru ve hassas ölçme değerleri elde edilmektedir.

Makina ve inşaat mühendisliğindeki mekanik derslerinde, kuvvet ve moment kavramlarından bahsedilir. Bu kavramlar, hayali bir büyüklük olmayıp ölçülebilirler. Normal ve kesme kuvvetleri, sadece katı cisimlerin mekaniğinde rastlanılan büyüklükler değildir. Başka mühendislik sahalarında; meselâ akışkanlar mekaniğinde, akışkanın boru cidarına uyguladığı sürtünme kuvvetleri, kesme kuvveti ve boru cidarına uygulanan basınç kuvvetleri de, normal kuvvet olarak algılanabilir. Bu çalışma, çeşitli mühendislik sahalarında ortaya çıkan bu tip kuvvetlerin büyüklüklerinin bilinmek istenmesi durumunda, nasıl ölçülebileceğini ve ölçme sırasında ortaya çıkabilecek güçlükleri araştırmak amacıyla yapılmıştır.

Mühendisliğin deneysel kuvvet analizinde, yakın zamana kadar en önemli problemlerden birisi, bir ölçü aleti kullanarak makina parçalarına uygulanan yükten dolayı, parça üzerinde meydana gelen birim uzamaları<sup>1</sup> ölçebilmektir. Bu amaçla, çeşitli şekillerdeki ekstansometreler (mekanik, pnömatik, optik vb.) kullanıldı. Fakat bunlar,

---

1) İngilizce'deki strain kelimesinin karşılığı olarak birim uzama ifadesi kullanılmıştır.

büyük hacimli olduklarından küçük alanlarda uygulanamıyorlardı. Elektrik direncindeki değişikliği esas alan strain gage'lerin bulunmasından sonra, birim uzama değeri çok daha kolay tespit edilebilmektedir.

Mekanikte bahsedilen kavramlar, her ne kadar mantığa hitap ediyorsa da öğrencinin bu kavramları deneylerle gözlemesi öğrenmeyi çabuklaştıracaktır. Bu çalışmanın neticesinde mekanik laboratuvarı için, kuvvet ölçme konusunda bir deney seti kazanılması da hedeflenmiştir.

## 1.2. Literatür Araştırması

Bu araştırmaya, [1]'deki çalışmadan esinlenerek başlanmıştır. [1]'in konusu özet olarak şöyledir: Tahıl silolarında depolanan taneli malzemenin boşaltılması, silonun tabanına yerleştirilmiş bir tahliye bölümüyle yapılır. Tahliye bölümü ve silonun en iyi dizaynını yapabilmek için, silo tabanında ve duvarında oluşan gerilmelerin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu gerilmeler, strain gage prensibiyle çalışan bir gerilme ölçme hücresi ile deneysel olarak bulunur.

Bir gerilme ölçme hücresinin, sonlu elemanlar yöntemiyle optimum dizaynının nasıl yapılabileceği,[2]'de genel olarak anlatılmaktadır. Braunschweig Teknik Üniversitesi tarafından yürütülen bu çalışmada, hazır paket program kullanılmıştır.

Bu çalışma için, kuvvet ve gerilme ölçmelerini inceleyen temel yayınlar etüd edilmiştir. Bunlar [3, 4, 5, 6,7] numaralı kaynaklardır. Bu kaynaklarda, endüstriyel alet bilgisi; transducer esasları; temel elektrik teorisi; uzunluk,basınç, sıcaklık, yer-değiştirme, kuvvet, akış, tork, seviye ve titreşim ölçmeleri gibi konulardan bahsedilmektedir.

Dinamometrenin strain gage prensibi ile yapılmasına karar verildikten sonra [3, 4, 5, 6,7] numaralı kaynaklara ek olarak, strain gage tekniğini detaylı olarak inceleyen

[8, 9, 10,11] numaralı kaynaklar etüd edilmiştir. Bu kaynaklarda temel yükleme durumlarının ölçülmesi, Wheatstone köprü devresinin uygulamaları anlatılmaktadır.

Kaynak araştırması sırasında iki adet Türkçe yayına rastlanılmıştır. Bunlar [12, 13]' tür. [12]'de, strain gage'lerin genel uygulamasından bahsedilmektedir. [13]'de ise, bir tekniker gözüyle strain gage tekniği anlatılmıştır.

Dinamometrenin dizaynında, [14,15,16,17] numaralı kaynaklardan yararlanılmıştır.

Deneyler,başlangıçta S.Ü.Müh.Mim.Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan strain gage cihazı ile yapılmış ve cihazın kataloğundan yararlanılmıştır [18]. Ancak cihazın, zaman zaman aynı yük altında aynı uzama değerlerini göstermemesi üzerine, S.Ü. Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nun İnşaat Bölümü Laboratuvarında bulunan strain gage cihazı ve kataloğu kullanılmıştır [19]. Ayrıca 1991 Kasım ayında, Ankara ODTÜ 'de Amerikan Measurements Group firması tarafından düzenlenen, Strain Gage Ölçümleri İçin Modern Yöntemler konulu seminerde dağıtılan teknik notlar ve kataloglardan, strain gage seçiminde yararlanılmıştır [20].

## 2. KUVVET ÖLÇÜLMESİ

### 2.1. Kuvvet Ölçülmesindeki Temel Metodlar

Bilinmeyen bir kuvvet, aşağıdaki yöntemlerden birisiyle ölçülebilir:

1- Bilinmeyen kuvvetin, bilinen bir ağırlık kuvvetiyle ya doğrudan ya da kaldıraç sistemiyle dengelenmesiyle.

2- Cisme bilinmeyen kuvvetin uygulanması durumunda, kütlesi bilinen cismin ivmesinin ölçülmesiyle.

3- Bilinmeyen kuvvetin, bir mıknatıs ve bobinde oluşturulacak manyetik kuvvetle dengelenmesiyle.

4- Kuvveti hidrolik basınca dönüştürüp, bu basıncın ölçülmesiyle.

5- Kuvveti elastik bir elemana uygulayıp, bu elastik elemanda oluşan deformasyonun ölçülmesiyle.

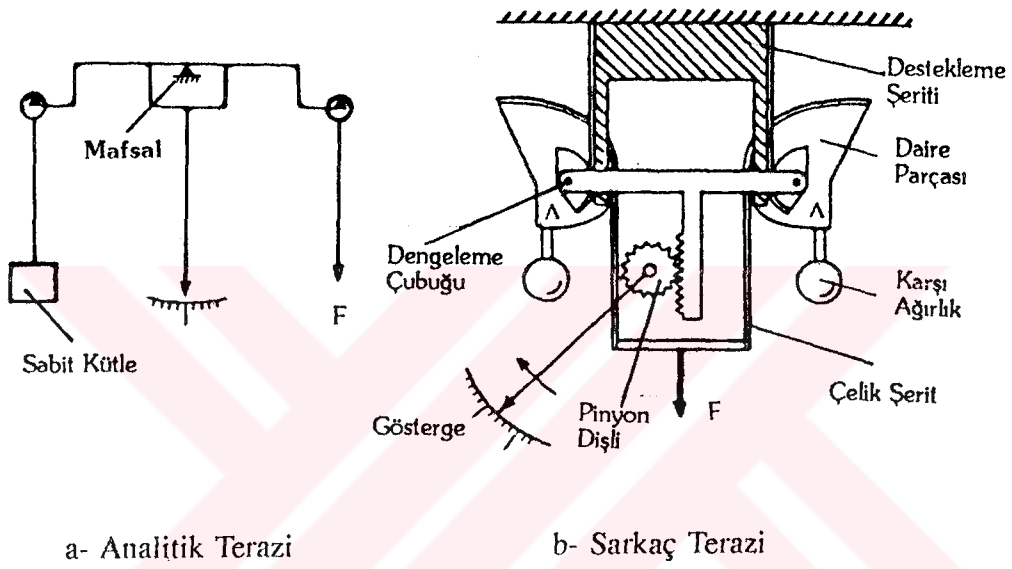
Birinci yöntem analitik terazi, sarkaç terazi ve baskül terazi örnek olarak verilebilir:

**a) Analitik Terazi:** En basit kuvvet ölçme sistemi, eşit kollu analitik terazidir (Şekil 2.1.a). Bu terazi, momentlerin karşılaştırılması prensibine göre çalışır. Bilinmeyen kuvvet  $F$ 'nin meydana getirdiği moment, bilinen kütlenin oluşturduğu momentle karşılaştırılır. Sıfır denge konumu sağlandığı zaman, iki kuvvet birbirine eşittir. Kol uzunlukları da aynıdır.

Terazinin hassas çalışabilmesi, çok dikkatli tasarlanmasına ve kullanılmasına bağlıdır. Terazinin hassas kullanılabilmesi için, mafsalın ağırlık merkezinden kaçıklığı, en fazla milimetrenin yüzde birleri mertebesinde olabilir [4,5,7,13].

**b) Sarkaç Terazi:** Kuvvet ölçümünde, momentlerin karşılaştırılması prensibine göre çalışır (Şekil 2.1.b). Bilinmeyen kuvvet  $F$ , doğrudan veya çalışma sınırlarını

genişletmek için,baskül terazisindeki kaldıraç sistemiyle uygulanır (şekil 2.1.c). Kuvvetin uygulanmasıyla daire parçası, A noktası etrafında döner ve karşı ağırlıklar doğru hareket ederler. Dengeleme çubuğu bu durumda hareket eder. Bilinmeyen kuvvetin meydana getirdiği moment ise, sabit kütlenin oluşturduğu moment ile dengelenir. Dengeleme çubuğunun hareketi pinyon dişli ile göstergeye iletilir [4,5].



c- Baskül Terazi

şekil 2.1 Terazilerin Çeşitleri



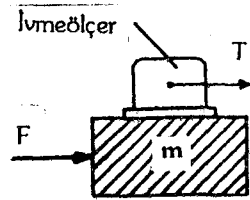
c) **Baskül Terazisi:** Büyük ağırlıkların ölçümünde kullanılan bu terazi, kaldıraç sistemine göre çalışır (Şekil 2.1.c). Kiriş, kalibre edilen ölçek boyunca dengeleme ağırlıklı kaldıraç kolunu ayarlamakla ve sabit kütlelerin uygun birleşimleriyle sıfır konumuna getirilir. Eğer  $a/b = c/d$  ise göstergeden okunan değer, basküldeki F'nin konumundan bağımsızdır. Ticari amaçla kullanılan teraziler bu özelliği sağlar [4, 5].

İkinci yöntemdeki ivme yardımıyla kuvvet ölçülmesi, sınırlı bir uygulanırlığa sahiptir. Zira ölçülen kuvvet bileşke kuvvettir. Cisme birden fazla kuvvet etki etmesi durumunda, kuvvetlerin büyüklükleri ayırt edilemez (Şekil 2.2), [5,7].

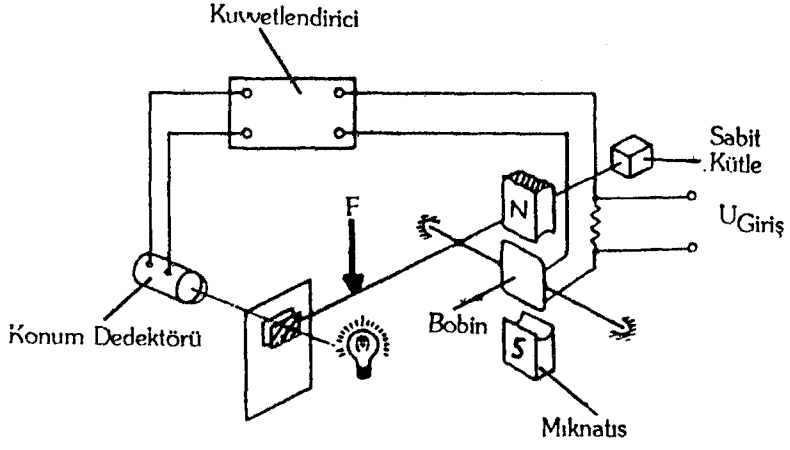
Üçüncü yöntemde bahsedilen elektromanyetik terazi, sabit kütlelerin ağırlığı ve bilinmeyen F kuvveti arasındaki farkı dengelemek için, konum dedektörü, kuvvetlendirici ve dönen bir bobin ihtiva eder. Bu terazinin boyutu küçüktür ve uzaktan kumanda edilebilir (Şekil 2.3), [5,7].

Dördüncü yöntemde, kuvvetin hidrolik basınca dönüştürüldüğü, içi tamamen akışkanla dolu hidrolik yük hücreleri kullanılır. Yük uygulanması sonucunda artan basınç, hassas cihazlardan okunur. Hidrolik yük hücrelerinin çok rijit olması gerekir (Şekil 2.4), [4,5,7,13].

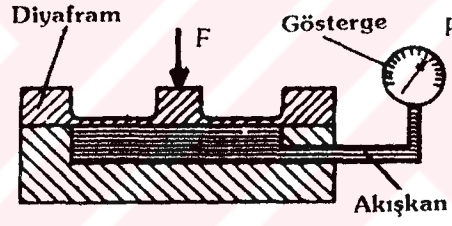
Beşinci yöntem, statik ve dinamik kuvvetlerin ölçülmesinde kullanılır. Bu amaçla kullanılan dinamometreler temel olarak, uygulanan elastik elemanın geometrik şekli ve burada ortaya çıkan yerdeğiştirmeyi ölçen transducer ile ayırt edilirler. Ölçülecek deformasyonlar büyükse ilave bir transducer kullanılmayabilir. Bu durumda, sadece yerdeğiştirme miktarının ölçülmesi ve buna tekabül eden kuvvetin kalibrasyon cetvellerinden alınması yeterlidir. Ancak deformasyonların küçük olması, strain gage kullanılmasını gerekli kılar (Şekil 2.5), [4,5,7].



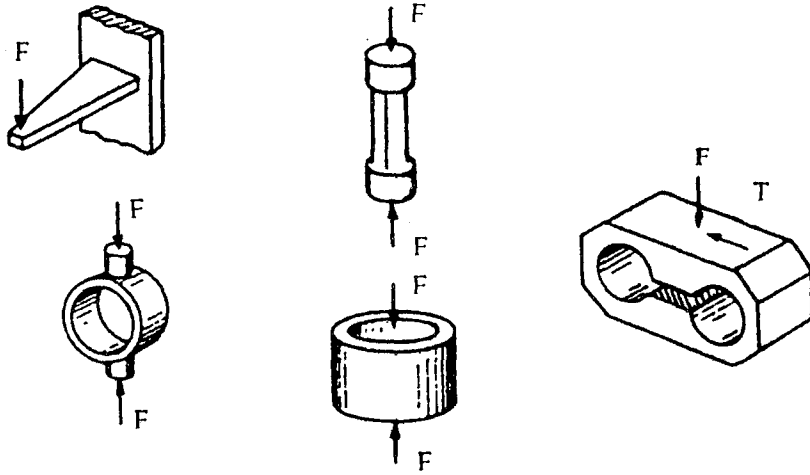
Şekil 2.2 İvmeölçer



Şekil 2.3 Elektromanyetik Terazi



Şekil 2.4 Hidrolik Yük Hücresi



Şekil 2.5 Çeşitli Elastik Eleman Şekilleri

Bu çalışmada beşinci yöntem kullanılmıştır. Buna sebep, yukarıda açıklanan yöntemlerin hepsinin de belirli bir bilgi ve tecrübe birikimini gerektirmesindedir. Halbuki üniversitemiz laboratuvarlarında strain gage cihazı mevcut olup, uzmanlaşmanın bu sahada olması düşünülmüştür.

Bir transducer'ın bir ölçme sistemine bağlanmasıyla, ölçme sistemi fonksiyonunu hemen yerine getirmez. Ölçme sisteminin hangi kısımlardan teşekkül etmesi gerektiği aşağıda anlatılmıştır.

## 2.2. Genel Bir Ölçme Sisteminin Yapısı

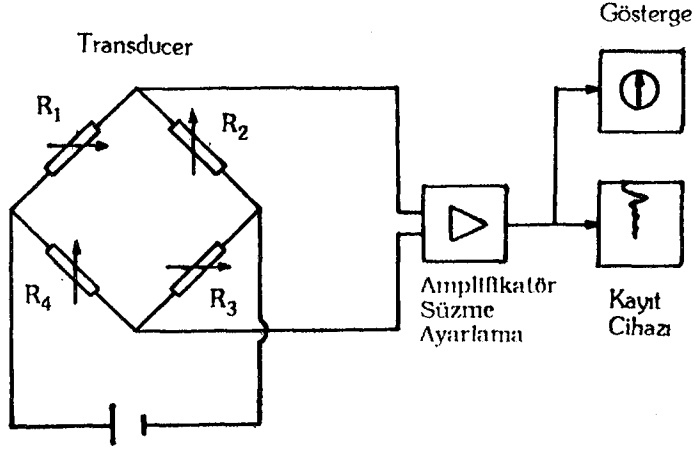
Bir ölçme sistemi, ölçüm yapmak ve sonucu kaydetmek için birlikte kullanılan çeşitli parçalardan oluşur. Şekil 2.6'da gösterilen genel bir ölçme sistemi, başlıca üç kısma bölünebilir [2,4,5,8] :

1) **Transducer:** Sinyal çevirici olarak da adlandırılır. Bu eleman, sıcaklık, basınç, ivme, hız, tork, kuvvet ve yerdeğiştirme gibi fiziksel bir büyüklüğü algılayarak, elektriksel bir dönüşümle, ölçü değeriyle orantılı bir sinyale çevirir.

2) **Düzenleyici Kısım:** Transducer'ın çıkış sinyali, bağlantı kablosu yardımıyla kayıt cihazına veya göstergeye iletilir. Çıkış sinyali, parazit (istenilmeyen sinyal) gibi çeşitli faktörlerden etkilenir ve bunun sonucunda sinyal zayıflar. Transducer ile kayıt cihazı veya transducer ile gösterge arasında sinyalin düzenlenmesi gerekir. Alınan sinyal aşağıdaki çeşitli düzenleme şekilleriyle daha kullanışlı bir hale getirilir:

a- **Kuvvetlendirme (Amplifikasyon) :** Küçük çıkış gerilimleri veya akımları amplifikatörün girişine bağlanır. Amplifikatörde, kayıt veya gösterme amacıyla daha kullanışlı olan kuvvetlendirilmiş çıkış sinyali elde edilir. Amplifikatör, ölçme sisteminin toplam hassasiyetini artırır.

b- **Süzme (Filtreleme):** Filtreleme, sistem içindeki diğer elemanlarda toplanan parazitleri azaltmak veya tamamen yok etmek için yapılır.



Şekil 2.6 Genel Bir Ölçme Sisteminin Yapısı

c- Ayarlama (Modülasyon) : Sinyal iletim devresinin uzun olduğu yerde kullanılır. Modülasyon, sinyal iletim devresindeki parazit ve zayıflama etkisini azaltır. Ayrıca birden fazla sinyal iletilmesini sağlar.

3) Değerlendirme Kısmı : Ölçülen fiziksel büyüklüğün kaydedilmesi, kontrol cihazına verilmesi, göstergeden okunması için gerekli teçhizatı ihtiva eder.

### 2.3. Elektrik Transducer Elemanları

Elektrik transducer elemanları genelde mekanik yerdeştirmeyi , gerilim veya akıma dönüştürürler. Elektrik transducer elemanları, gerilim veya akım değişikliğiyle sonuçlanan direnç, kapasitans ve endüktans gibi bazı elektrik parametrelerindeki değişmeyi meydana getirirler. Bu amaçla, en çok değişken direnç ve değişken endüktans tipi işletme şekilleri kullanılır. Ayrıca kapasitif, piezoelektrik , fotoelektrik ve fotokondüktif tipi işletme şekilleri vardır [4,5]. Fakat, bunların kullanımı sınırlıdır ve genellikle özel amaçlı uygulamalarda kullanılır. Genel bir ölçme sisteminde, elektrik transducer elemanlarının kullanılması şu avantajları sağlar:

a) Elektrik transducer elemanları hassas ve küçüktürler. Mekanik transducer elemanlarına göre, daha hızlı tepki ve daha doğru sonuç verirler. Bunun nedeni kısmen elektronik devrelerin hassaslığından, kısmen de gerekli elektriksel tepkiyi elde etmek için, çok küçük mekanik hareketlerin yeterli olmasındandır.

b) Sinyal kuvvetlendirme veya zayıflatma kolayca yapılabilir.

c) Uzak mesafeden ölçülen değeri gösterme veya kaydetme mümkündür.

d) Kontrol için yeterli güçte bir çıkış sinyali elde edilebilir.

e) Kütle-atalet etkileri azaltılır.

f) Diyafram, körük ve bourdan tüpü gibi mekanik transducer elemanlarına göre çok azaltılmış olan hareket miktarı, sürtünme ve titreşim etkilerini büyük ölçüde elimine eder.

### 3. STRAIN GAGE TEKNİĞİ

#### 3.1. Genel Bilgi

Strain gage, birim uzamayı ölçer. Strain gage'in

a) Yüklü eleman üzerinde herhangi bir yerdeki birim uzamayı ölçerek gerilme analizi yapmak,

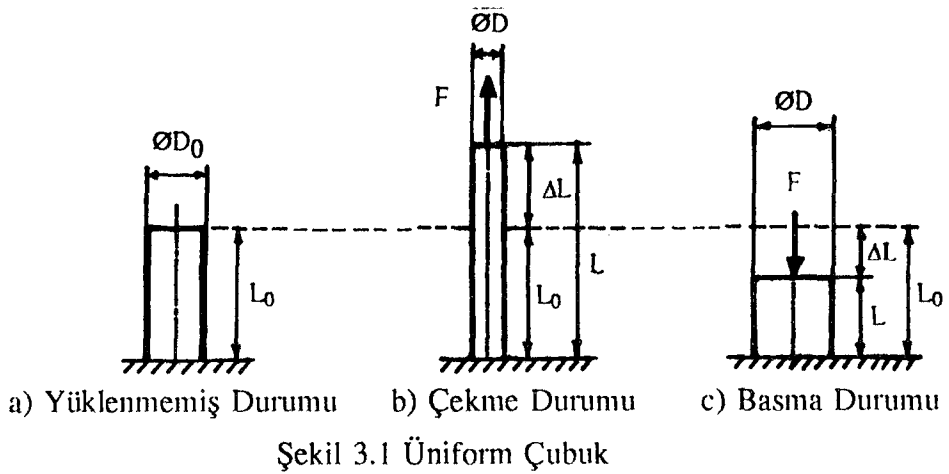
b) Basınç, kuvvet, hız, ivme, yerdeğiştirme ve tork gibi büyüklüklerin şiddetini bulmak için, transducer elemanı olarak kullanılması

gibi iki uygulama alanı mevcuttur.

Strain gage ile makina parçalarına zarar vermeden ve tahrip etmeden, geniş sınırlar içinde parçada meydana gelen gerilmeleri değerlendirmek mümkündür. Strain gage, doğrudan gerilmeleri ölçemez. Yalnızca parçada oluşan birim uzamaları ölçebilir. Belirli mukavemet formülleri yardımıyla parçadaki gerilmeler ve parçaya etki eden kuvvet değeri, ölçülen birim uzama değerinden hesaplanabilir.

#### 3.2. Birim Uzama

Birim uzamanın tanımlanabilmesi için, Şekil 3.1'de gösterilen uzunluğu  $L_0$ , çapı  $D_0$  olan,  $F$  kuvvetine maruz bir üniform çubuk gözönüne alınsın. Çubuk, Şekil 3.1.a'da yüklenmemiş durumdadır. Şekil 3.1.b' de çekme kuvveti, Şekil 3.1.c' de ise basma kuvveti etkisindedir. Kuvvetin uygulandığı eksen boyunca aksenal veya boyuna birim uzama ve bu eksene dik doğrultuda yanal veya enine birim uzama meydana gelir. Üniform çubuk, çekme durumunda daha uzun ve ince, basma durumunda ise daha kısa ve kalın olur.



Bu açıklamadan sonra boyuna birim uzama

$$\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0}$$

şeklinde, enine birim uzama ise

$$\epsilon_D = \frac{\Delta D}{D_0}$$

olarak ifade edilir. Burada  $\Delta L$

$$\Delta L = L - L_0$$

şeklinde uzunluktaki değişmeyi,  $\Delta D$  ise

$$\Delta D = D - D_0$$

olarak çaptaki değişmeyi ifade eder. Birim uzama, pozitif veya negatif olabilir. Strain gage'ler birim uzamayı işaretiyle ölçerler. Enine birim uzamanın, boyuna birim uzamaya oranına Poisson oranı denir. Bu oran pozitif olarak alınır ve

$$\mu = \frac{\epsilon_D}{\epsilon_L}$$

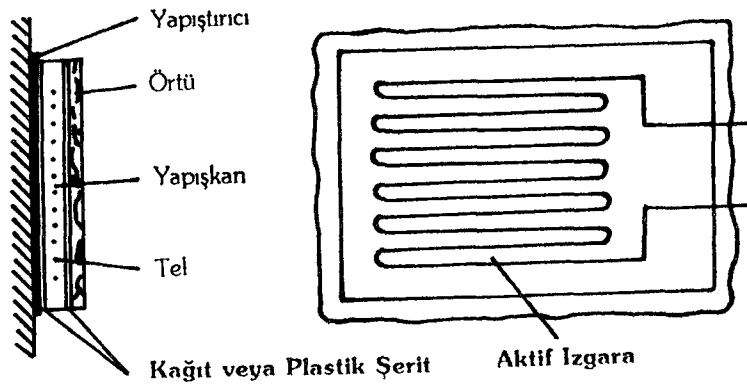
olarak ifade edilir. Metalik malzemede bu oran  $\mu = 0.3$  civarındadır [3,14].

Makina parçalarında  $\Delta L$  değeri,  $L_0$  değerine göre çok küçüktür. Bu sebeple, genellikle  $\Delta L$  büyüklüğü milimetre veya mikrometre birimiyle gösterilir. Pratik hesaplamaları kolaylaştırmak için  $\Delta L$  büyüklüğü mikrometre ve  $L_0$  büyüklüğü metre ile ifade edilir. Böylece birim uzama birimi  $\mu\text{m}/\text{m}$  (microstrain) olur. Birim uzamanın ölçümünde kullanılan strain gage cihazları, bu birime göre kalibre edilmiştir.

Herhangi bir parçanın uzamasına dış veya iç etkiler neden olur. Uzama; kuvvet, basınç, moment, sıcaklık etkileriyle veya malzemenin yapısındaki değişikliklerle meydana gelir.

### 3.3. Strain Gage'in Yapısı

Şekil 3.2'de strain gage'in temel yapısı gösterilmiştir. Strain gage'in uzamaya karşı duyarlı olup, ölçme işlemini yapan parçasına aktif ızgara denir. Aktif ızgara, küçük kesit alanlı iletkenin düzenlenmesiyle yapılır. Aktif ızgara, plastik yapışkan (bakalit veya selüloid cila) içine yerleştirildikten sonra, yalıtkan olan kâğıt veya plastik şeritler arasında sıkıştırılır. Bu şeritlere taşıyıcı levha denir. Plastik yapışkan, aktif ızgarayı taşıyıcı levha üzerinde rijit olarak tutar. Böylece uzama sırasında, aktif ızgaranın



Şekil 3.2 Strain Gage Konstrüksiyonu



çarpılması önlenir. Aktif ızgara, çok ince ve kırılımandır. Taşıyıcı levha, strain gage'in elle tutulabilmesini sağlar ve herhangi bir zarara karşı aktif ızgarayı korur. Ayrıca aktif ızgara ve numune arasında elektrik izolasyonunu sağlar. Taşıyıcı levha mümkün olduğu kadar ince, mukavemeti yüksek, esnek ve kolay yapışabilir olmalıdır. Polimid veya epoksi-fenolik maddeler, taşıyıcı levha imalatında kullanılır [20]. Strain gage'in imalatı çok hassastır ve yüksek teknoloji gerektirir [3,5,6,7,11,12].

### 3.3.1. Strain gage çeşitleri ve özellikleri

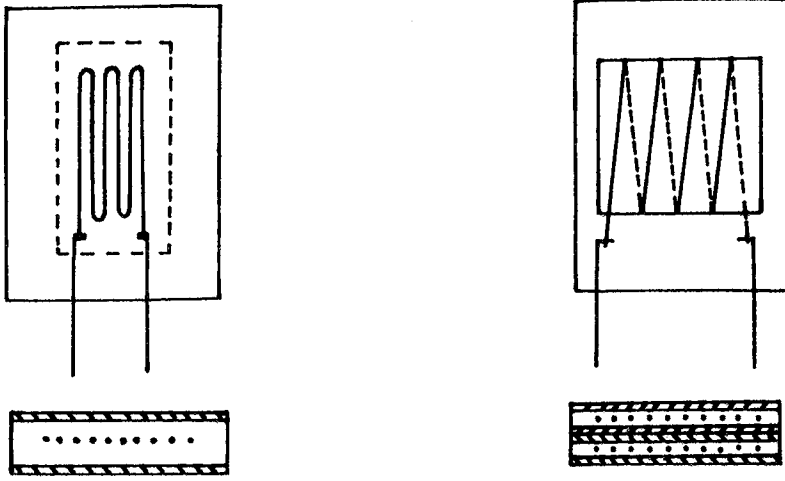
Elektrik direncindeki değişikliği esas alan strain gage'ler, yapıldıkları malzemeye göre iki gruba ayrılırlar:

#### 3.3.1.1. Metal esaslı strain gage'ler

Aktif ızgarayı oluşturan iletken, yuvarlak bir tel veya oyulmuş bir levha olabilir. Buna göre metal esaslı strain gage'ler, tel ve levha olarak iki şekilde imâl edilirler:

1) **Tel strain gage'ler:** Bu tip strain gage'in aktif ızgarası, 15-25 µm çapındaki telden yapılır. Aktif ızgara, düz ızgara (Şekil 3.3.a) ve helisel ızgara (Şekil 3.3.b) olmak üzere iki şekilde imâl edilir. Düz ızgara tipi, telin aynı yüzeyde ileri ve geri sarılmasıyla oluşturulmuştur. İmalâtı, düz ızgaraya göre daha kolay olan helisel ızgara tipinde ise tel, silindirik bir kâğıt çevresine helisel olarak sarılmış ve sonra yassılaştırılmıştır. Aktif ızgaranın üst kısmının, yapıştırılan yüzeyden uzakta kalması ölçme yönünden bir dezavantajdır. Helisel ızgara tipi tel strain gage'ler, özellikle ince bir parça yüzeyine yapıştırıldığında, hatalı ölçme değerleri elde edilir. Bu nedenle, genellikle düz ızgara tipi tercih edilir. 20 mm'nin üstündeki aktif ızgara uzunluğunda, tel strain gage'lerin imalatı daha kolay ve ekonomiktir. Tel strain gage'ler, uzamanın veya sıcaklığın yüksek olduğu yerlerdeki birim uzama ölçümlerinde kullanılırlar [3,5,6,7,11,12].

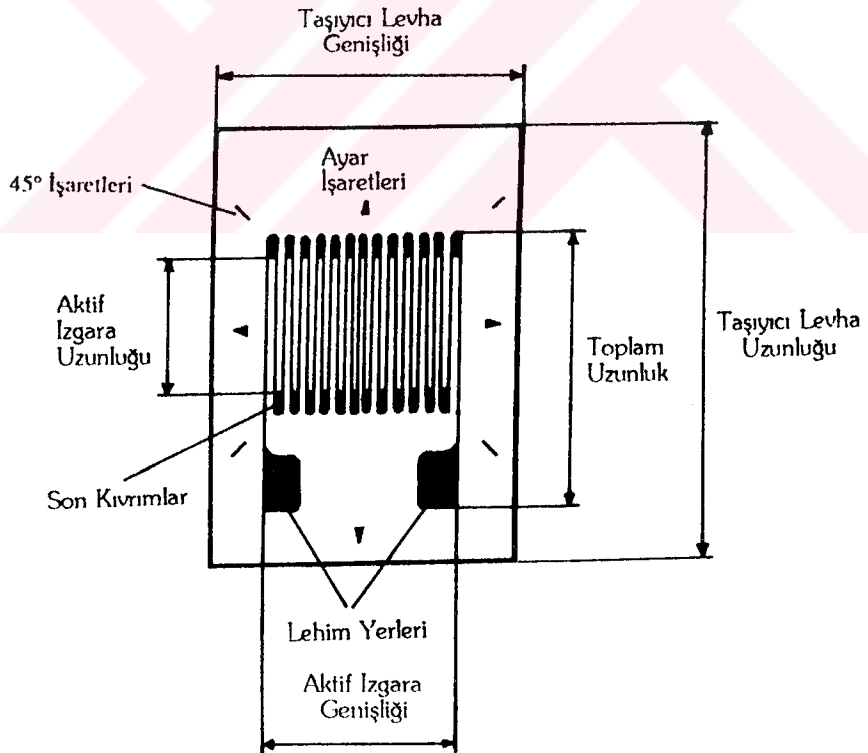
2) **Levha (folye) strain gage'ler :** Bu tip strain gage'ler, 3-5 µm kalınlığındaki levha şeklinde haddelenmiş alaşımların, basılı devre işleminden geçirilmesiyle üretilirler. Aktif ızgara, özel bir işlemle taşıyıcı levha üzerine yapıştırılır. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi levha strain gage'ler, her sarımın sonundaki uç kısımlarda fazladan metal bırakılarak



a- Düz Izgara

b- Helisel Izgara

Şekil 3.3 Tel Strain Gage Tipleri

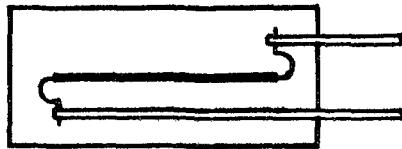


Şekil 3.4 Levha Strain Gage

imâl edilirler. Bu uç kısımlara son kıvrımlar denir. Son kıvrımlar, histerezis, sürtünme (sabit sıcaklık ve yükte, malzemede zamanla meydana gelen kalıcı deformasyon) ve çapraz duyarlılığı (strain gage eksenine dik uzamanın, eksene paralel uzamaya oranı) azaltmaktadır [3,4,6,20]. Aktif ızgaranın uçlarındaki daha büyük alanlara lehim yerleri denir. Lehim yerleri, bağlantı kablolarının lehimleme ile aktif ızgaraya daha kolay bağlanmasını sağlar. Ayrıca yorulma tehlikesini azaltır. Levha strain gage'lerin hassasiyetleri ve ömürleri, tel strain gage'lere göre daha fazladır. Levha strain gage'lere, imalât sırasında herhangi bir şekil kolaylıkla verilebilir. Tel strain gage'lere göre daha incedirler. Levha strain gage'lerin yüzey alanı daha büyük olduğundan, ısı kolay bir şekilde dağılır. 6 mm'nin aşağısındaki aktif ızgara uzunluğunda, levha strain gage'lerin imalâtı daha ekonomiktir [3,5,6,7,11,12].

### 3.3.1.2. Metal esaslı olmayan yarı-iletken strain gage'ler

Bu tip strain gage'ler görüntüde metalik olan, fakat pek çok metalden önemli ölçüde daha hafif olan, tek kristalli silikondan veya germanyumdan yapılırlar. Tek bir dikdörtgen şeklinde olan aktif ızgara, 0.05 mm kalınlıkta ve 0.25 mm genişliktedir. Aktif ızgara uzunluğu, 1.5-12 mm arasında değişir. Yarı-iletken strain gage'lerin duyarlılıkları yüksektir. Bu özellik, çok küçük uzamaların bile doğru olarak ölçülmesini sağlar. Tel ve levha strain gage'ler 2 civarında bir gage faktörüne sahipken, yarı-iletken strain gage'lerin gage faktörü 100-200 arasında değişir. Şekil 3.5'de gösterilen yarı-iletken strain gage daha pahalıdır ve özel uygulamalarda kullanılır [3,6,7,8].



Şekil 3.5 Yarı-iletken Strain Gage

### 3.4. Gage Faktörü

Uzunluğu  $L$ , kesit alanı  $A$  ve öz direnci  $\rho$  olan bir iletken, belirli bir sıcaklıkta

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.1)$$

formülü ile hesaplanabilen bir elektrik direncine sahiptir. Uzunluk ve kesit alanındaki değişimin iletken direnci üzerindeki etkisi, (3.1) in uzunluk, alan ve öz dirence göre diferansiyeli ile ifade edilir. Buna göre

$$dR = \rho \frac{dL}{A} - \rho \frac{L dA}{A^2} + \frac{L}{A} d\rho \quad (3.2)$$

eşitliği yazılabilir. (3.2) eşitliği, (3.1) e bölünürse

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3.3)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdan izafi direnç değişikliğinin,  $\frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$  ve  $\frac{d\rho}{\rho}$  terimlerine bağlı olduğu görülür. Metal esaslı strain gage'lerde, geometrik şekil değiştirme neticesinde ortaya çıkan  $\frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$  büyüklüğü; yarı-iletken strain gage'lerde ise, kristal yapı değişikliğinden dolayı meydana gelen  $\frac{d\rho}{\rho}$  büyüklüğü, bütün ölçme efektinin büyük bir yüzdesini teşkil eder.

Bir kenarı  $t$  olan, kare kesitli bir numune gözönüne alınsın. Eğer numune uzatılırsa,  $t$  kenarında  $\Delta t$ 'lik bir azalma olur. Buna göre kesit alanındaki değişme

$$\Delta A = (t - \Delta t)^2 - t^2$$

olur. Bu eşitlik, numunenin başlangıçtaki kesit alanına oranlanırsa

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{t^2 - 2t\Delta t + \Delta t^2 - t^2}{t^2} = -\frac{2t\Delta t}{t^2} + \frac{\Delta t^2}{t^2} \quad (3.4)$$

eşitliği elde edilir.  $\frac{\Delta t^2}{t^2}$  terimi küçüktür ve ihmal edilebilir. Böylece (3.4) eşitliği

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\frac{\Delta t}{t} \quad (3.5)$$

şekline indirgenir. Buradaki  $\frac{\Delta t}{t}$  terimi, enine birim uzamadır ve Poisson oranı yardımıyla

$$\frac{\Delta t}{t} = \mu \frac{\Delta L}{L} \quad (3.6)$$

yazılabilir. (3.6) eşitliği, (3.5) deki yerine yazılırsa

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\mu \frac{\Delta L}{L}$$

olur veya limit durumunda

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \frac{dL}{L} \quad (3.7)$$

elde edilir. (3.7) eşitliği, (3.3) bağıntısındaki yerine yazılırsa

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3.8)$$

elde edilir. (3.8) eşitliği,  $\frac{dL}{L}$  'ye bölünürse

$$\frac{dR/R}{dL/L} = \underbrace{1}_{\substack{\text{Uzunluk de-} \\ \text{ğişikliğin-} \\ \text{den dolayı} \\ \text{direnç de-} \\ \text{ğişmesi}}} + \underbrace{2\mu}_{\substack{\text{Alan değişikli-} \\ \text{ğinden dolayı} \\ \text{direnç de-} \\ \text{ğişmesi}}} + \underbrace{\frac{dp/\rho}{dL/L}}_{\substack{\text{Kristal yapı de-} \\ \text{ğişikliğinden} \\ \text{dolayı direnç} \\ \text{değişmesi}} \quad (3.9)$$

eşitliği elde edilir [4,5,6]. Bu eşitlikteki son terim

$$\frac{dp/\rho}{dL/L} = m (1-2\mu) \quad (3.10)$$

olarak tanımlanır. Burada m, aktif ızgara malzemesine bağlı bir sabittir. (3.10) eşitliği, (3.9) daki yerine yazılırsa

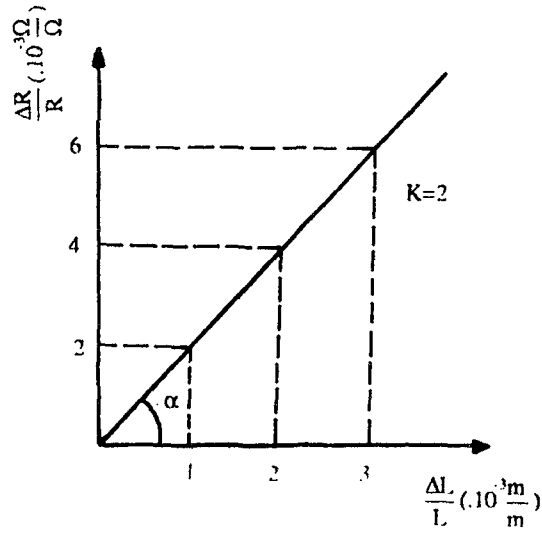
$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\mu + m (1-2\mu) \quad (3.11)$$

elde edilir. Bu eşitlikteki  $K = 1 + 2\mu + m (1-2\mu)$  orantı sabitine "Gage Faktörü" denir. Bu faktör, strain gage'in uzama hassasiyetini tanımlamada kullanılır. K değeri, aktif ızgara malzemesinin cinsine ve sıcaklığa göre farklı değerler alır. Gage faktörü, aktif ızgara malzemelerine (konstantan, izoelastik, karma) göre 2 ile 5 arasında değişir [3,5,20]. Yüksek gage föktörlü malzemeler, sıcaklığa karşı daha duyarlıdırlar. Ancak düşük gage faktörlü malzemeler kadar kararlı değillerdir. (3.11) eşitliğine dikkat edilirse, izafi direnç değişikliğinin, iletken boyunun çok küçük uzamaları ile orantılı olduğu görülür. Bu eşitlik

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = \text{tg } \alpha$$

olarak yazılabilir. Bu lineer ilişki, Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Böylece birim uzamanın ölçülmesi, izafi direnç değişikliğinin ölçülmesine dönüştürülmüş olur.

$\rho$ 'nun bir sabit olduğu dikkate alınır, (3.9) eşitliğindeki kristal yapı



Şekil 3.6 Gage Faktörü

değişikliğinden dolayı direnç değişmesi sıfır olur. Bu durumda gage faktörü,  $1+2\mu$  olarak ortaya çıkar. Metalik malzemede  $\mu$ , 0.3 civarında olduğundan, K değerinin elastik sınırlar içinde 1.6 değerinde bir sabit olması beklenilir. Pratikte bu değer, 1.9 ve 2.1 arasında bulunur. Aradaki fark, iletkenin hacim değişikliğiyle oluşan öz dirençteki değişmeden dolayıdır.

Her strain gage'in gage faktörü katalogunda verilir. Bu çalışmada imâl edilen dinamometrede, gage faktörü 2.11 olan strain gage'ler kullanılmıştır.

### 3.5. Strain Gage'in Yüzeğe Yapıştırılması

Strain gage, ölçüm yapılacağı yere yapıştırılmadan önce aşağıdaki iki önemli faktör dikkate alınmıştır:

a) Önce strain gage'in yapıştırılacağı yüzey, ince zımpara ile zımparalanmıştır. Daha sonra yüzey, bezle ve asetonla temizlenmiştir.

b) Yapıştırıcı, strain gage'in kenarlarında kurumuş olsa bile, strain gage'in alt kısmı halâ ıslak kalmış olabilir. Yapıştırıcının kuruyup tamamen sertleşmesi için, belirli bir sürenin geçmesi gerekir. Bu nedenle strain gage, 24 saat oda sıcaklığında

kurumaya bırakılmıştır.

Yapıştırıcı olarak pek çok değişik maddeler (epoksi, epoksi-fenolik, polimid, seramik, nitroselüloz ve cyanoacrylate) kullanılır [11,20]. İdeal bir yapıştırıcı, numune üzerinde meydana gelen uzamanın tamamını strain gage'e iletir. Yapıştırıcı, yüzeye sürüldükten sonra strain gage yerleştirilir. Daha sonra strain gage'in üstü özel bir naylonla kaplanır. Ek-8'deki Fotoğraf 1'de , dinamometre yüzeyine yapıştırılmış strain gage'ler ve strain gage'lerin uçlarına lehimlenmiş bağlantı kabloları görülmektedir.

Yapıştırıcı seçiminde aşağıdaki faktörler gözönüne alınır:

- 1) Yüksek mukavemet
- 2) Yüksek sürünme direnci
- 3) Yüksek elektrik izolasyonu
- 4) Düşük ısı yalıtımı
- 5) Sıcaklık değişikliklerinden etkilenmeme
- 6) İnce bir tabaka oluşturma
- 7) Kuvvetli yapışkanlık
- 8) Hızlı kuruma
- 9) Uygulama kolaylığı

Bu çalışmada strain gage yapıştırıcısı olarak, hızlı kuruyan (kuruma süresi 1-1.5 dakika) cyanoacrylate kullanılmıştır.

### 3.6. Strain Gage Seçimi

Tel strain gage'lere göre daha ince olması, yapıştırma ve lehimleme kolaylığı sağlaması , hassasiyetinin daha fazla olması nedeniyle levha tipi strain gage tercih edilmiştir. Bu çalışmada, CEA-13-250UW-120 levha tipi strain gage kullanılmıştır [20]. Bu gösterim tarzı

$$\frac{\text{CEA}}{1} - \frac{13}{2} - \frac{250}{3} \frac{\text{UW}}{4} - \frac{120}{5}$$

şeklinde gruplandırılırsa, bu grupların anlamları şöyle olur:



1: Strain gage serisini gösterir. CEA serisi strain gage'ler, deneysel gerilme analizindeki statik uzama ölçümlerinde,  $-75^{\circ}\text{C}$  ve  $+205^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında geniş çapta kullanılırlar.

CE: Taşıyıcı levha malzemesi olarak ince, sağlam ve esnek olan polimid kullanıldığını gösterir. Kullanılan strain gage'in taşıyıcı levha uzunluğu 14 mm, genişliği 6.5 mm'dir (Şekil 3.4).

A: Aktif ızgara malzemesi olarak konstantan kullanıldığını gösterir. Konstantan, %55 bakır, %45 nikel içeren bir alaşımdır. Konstantanlı strain gage'lerin çapraz duyarlılık değeri çok küçüktür. Bu nedenle, strain gage'in gage faktöründe herhangi bir değişiklik olmaz. Aktif ızgara uzunluğu 6.35 mm, genişliği 4.57 mm'dir. Toplam uzunluk ise 11.43 mm'dir (Şekil 3.4).

2: Strain gage'in yapıştırıldığı malzemenin, sıcaklıkla genişleme katsayısını temsil eden numaradır. Bu çalışmada kullanılan alüminyum malzeme için bu katsayı  $23.10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$  dir.

3: 1/1000 inch olarak aktif ızgara uzunluğunu gösterir.

4: Tek eksenli gerilme durumunda kullanılan aktif ızgara şeklini gösterir. Burada UW, tek eksenli gerilme ölçüleceğine işaret eder.

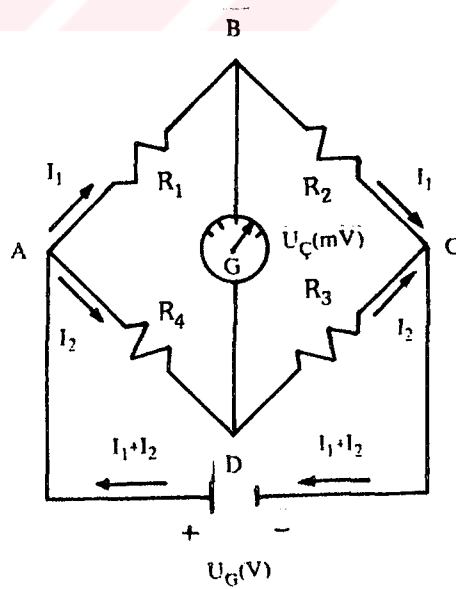
5: Strain gage'in direnç değerini gösterir. Kullanılan strain gage'in direnci  $120\Omega$  'dur.

## 4. WHEATSTONE KÖPRÜ DEVRESİ

### 4.1. Genel Bilgi

1843 yılında, İngiliz fizikçi Sir Charles Wheatstone tarafından, çok küçük elektrik dirençlerinin ölçülmesi için bir köprü devresi tasarlanmıştır. Bugün Wheatstone köprüsü olarak bilinen bu köprü devresinde bilinmeyen dirençler, bilinen dirençlerle karşılaştırılır.

Strain gage kendi üzerine uygulanan uzamayı, uzamayla orantılı olan direnç değişikliğine dönüştürür. Bu direnç değişikliği de Wheatstone köprü devresiyle ölçülür (Şekil 4.1). Wheatstone köprü devresi, bazı kompensasyon (elimine etme) özelliklerine de sahiptir. Buna göre, sıcaklığın strain gage'e etkisi ile köprü devresi bağlantılarındaki hataların etkisi kompanze edilir. Wheatstone köprü devresi birleşik yükleme durumunda (çekme ile eğilme gibi), birim uzama bileşenlerini ayrı olarak ölçme imkânı da sunar.



Şekil 4.1 Wheatstone Köprü Devresi

Şekil 4.1'de gösterilen Wheatstone köprü devresi, galvanometre, güç kaynağı (pil, şehir cereyanı) ve dört adet dirençten ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  ve  $R_4$ ) oluşur. Devre alternatif veya doğru akımla beslenir. Köprü devresinin kollarında bulunan dirençler, aynı zamanda strain gage'leri de temsil ederler. Köprü devresindeki komşu dirençler ( $R_1$ ,  $R_2$ ), ( $R_2, R_3$ ), ( $R_3, R_4$ ), ( $R_4, R_1$ ); zıt dirençler ise ( $R_1$ ,  $R_3$ ) ve ( $R_2$ ,  $R_4$ )'tür [3,6,10].

#### 4.2. Wheatstone Köprü Devresi İçin Denge Şartı

Şekil 4.1'deki Wheatstone köprü devresinde Kirchoff'un gerilimler kanununa göre çıkış gerilimi için

$$U_G = I_1 R_1 - I_2 R_4 \quad (4.1)$$

yazılabilir. Giriş gerilimi gözönüne alınarak da

$$I_1 = \frac{U_G}{R_1 + R_2} \quad (4.2)$$

ve

$$I_2 = \frac{U_G}{R_3 + R_4} \quad (4.3)$$

eşitlikleri yazılır. (4.2) ve (4.3), (4.1) deki yerlerine yazılırsa

$$U_G = U_{BD} = U_{AB} - U_{AD} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_G - \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_G \quad (4.4)$$

elde edilir. (4.4) eşitliğindeki paydalar eşitlenip, gerekli düzenleme yapılırsa

$$U_G = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_G \quad (4.5)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte  $R_1 R_3 - R_2 R_4$  değeri, Wheatstone köprü devresi dengelenerek

sıfır yapılabilir. Bu ise çıkış geriliminin sıfır olmasını sağlar. Dinamometre yüklenmeden önce bu işlemin yapılması gerekir.

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0$$

ifadesi yazılarak işlem yapılırsa

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (4.6)$$

eşitliği elde edilir [6,10]. Bu eşitliğe göre Wheatstone köprü devresinin dengesi için, iki komşu koldaki dirençlerin oranı, diğer iki koldaki dirençlerin oranına eşit olmalıdır. Direnç değerleri (4.6) eşitliğini sağlıyorsa, galvanometreden akım geçmez. Direnç değerleri birbirine eşitse ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ), bu durumda da köprü devresinin dengesi sağlanır. Giriş gerilimi A ve C uçları arasına uygulanırsa, B ve D uçları arasında potansiyel fark meydana gelmez. Direnç değerlerinde değişme meydana gelirse, köprü devresinin dengesi bozulur ve bu dengesizlikle orantılı çıkış gerilimi oluşur.

### 4.3. Köprü Devresinin Kollarındaki Direnç Değişiklikleriyle Çıkış Gerilimi Arasındaki Bağını

İncelenecek numune üzerine dört adet strain gage'in yapıştırıldığı gözönüne alınsın. Numuneye uygulanan kuvvet etkisiyle,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  ve  $R_4$  dirençlerindeki strain gage'lerde oluşan birim uzama, bu strain gage'lerde sırasıyla  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$  ve  $\Delta R_4$  miktarlarında direnç değişikliğine neden olur. (4.5) eşitliğinde,  $R_i$  yerine  $R_i + \Delta R_i$  ( $i = 1,2,3$  ve  $4$ ) değerleri yazılır ve çok küçük olan  $\Delta R_i$ ,  $\Delta R_j$  ( $i = j = 1,2,3$  ve  $4$ ) değerleri ihmal edilirse, köprü devresinde çıkış gerilimleri arasındaki fark

$$\Delta U_{\text{Ç}} = \frac{R_1 R_3 \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot \frac{U_G}{\left[ 1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{R_1 + R_2} + \frac{\Delta R_3 + \Delta R_4}{R_3 + R_4} \right]} \quad (4.7)$$

olarak bulunur.

Köprü devresi aynı dirence sahip strain gage'lerden teşekkül etmişse, (4.7) eşitliği

$$\Delta U_{\zeta} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) \cdot \frac{U_G}{1 + \frac{1}{2R} \sum_{i=1}^4 \Delta R_i} \quad (4.8)$$

şeklını alır. Burada R dirençleri 120Ω civarında iken, ΔR<sub>i</sub> dirençleri bir kaç mΩ mertebesinde ortaya çıkar. ΔR<sub>i</sub> dirençleri, R dirençlerine göre çok küçük olduğundan

$$\frac{1}{2R} \sum_{i=1}^4 \Delta R_i \cong 0$$

kabulü yapılarak (4.8) eşitliği

$$\Delta U_{\zeta} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) U_G \quad (4.9)$$

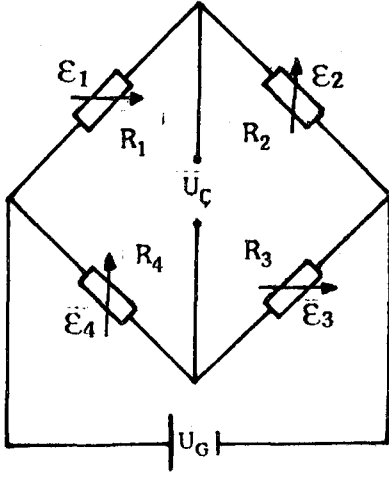
şeklinde yazılır. (4.9) da  $\frac{\Delta R_i}{R}$  yerine, Kε<sub>i</sub> (i = 1,2,3 ve 4) yazılarak

$$\Delta U_{\zeta} = \frac{K}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) U_G \quad (4.10)$$

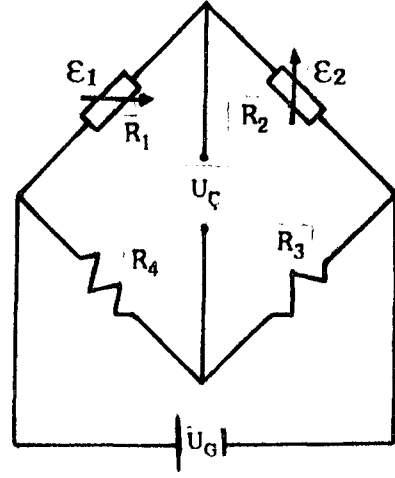
genel eşitliği elde edilir [10]. Bu eşitlik dikkatlice incelenirse köprü devresinde zıt dirençlerin aynı işarette, komşu dirençlerin ise zıt işarette ölçme sonucunu belirledikleri görülür. Başka bir ifadeyle köprü devresi dengesizliği, iki komşu koldaki direnç değişikliğinin cebirsel farkıyla ve iki zıt koldaki direnç değişikliğinin cebirsel toplamıyla orantılı olarak artar.

#### 4.4. Wheatstone Köprü Devresi Çeşitleri

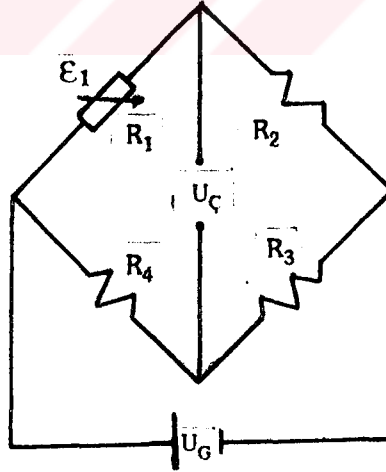
Köprü devresindeki strain gage'lerden numunenin deformasyonuna iştirak edenlerine aktif strain gage, iştirak etmeyenlerine ise pasif (dummy) strain gage denir. Bütün strain gage'lerin deformasyona uğramaları haline tam köprü (Şekil 4.2.a), sadece iki strain gage'in deformasyona uğraması haline yarım köprü (Şekil 4.2.b), tek strain gage'in deformasyona uğraması haline de çeyrek köprü (Şekil 4.2.c) denir [6,10,18,19].



a- Tam Köprü



b- Yarım Köprü



c- Çeyrek Köprü

Şekil 4.2 Wheatstone Köprü Devresi Çeşitleri

Kuvvet transducer'ı dizayn edilirken amaç, eksantrik yükler nedeniyle oluşan eğilme uzamalarını ölçmek değil, yalnızca transducer eksen yönündeki kuvvetleri ölçmektir. Ölçülen sinyal yüksek ve hata sinyallerinin elimine edilmesi daha iyi olduğundan, kuvvet ölçmeleri için kullanılan kuvvet transducer'larının (load cells) dizaynında tam köprü devresi tercih edilir[6,9].

Köprü devresinde birden fazla strain gage kullanılması, aşağıda belirtilen avantajları sağlar:

- 1- Çıkış gerilimi, dolayısıyla hassasiyet artar.
- 2- Sıcaklık kompenzasyonu sağlanır.

3- Arzu edilmeyen etkiler elimine edilir [3,10,18]. Örneğin çekme kuvvetine maruz kalan bir çubuk, biraz eğilmeye çalışır. Sadece çekme kuvvetinden dolayı meydana gelen birim uzama isteniyorsa, köprü devresinde ve numune üzerinde strain gage'ler, bu eğilme etkisini yok edecek şekilde yerleştirilirler. Böylece köprü devresinin çıkışı, sadece çekme kuvvetinden dolayı meydana gelen birim uzama değerine karşılık gelir.

Bu çalışmada, yukarıda anlatılan faydalarından dolayı tam köprü devresi tercih edilmiştir.

## 5. DİNAMOMETRE TASARIMI

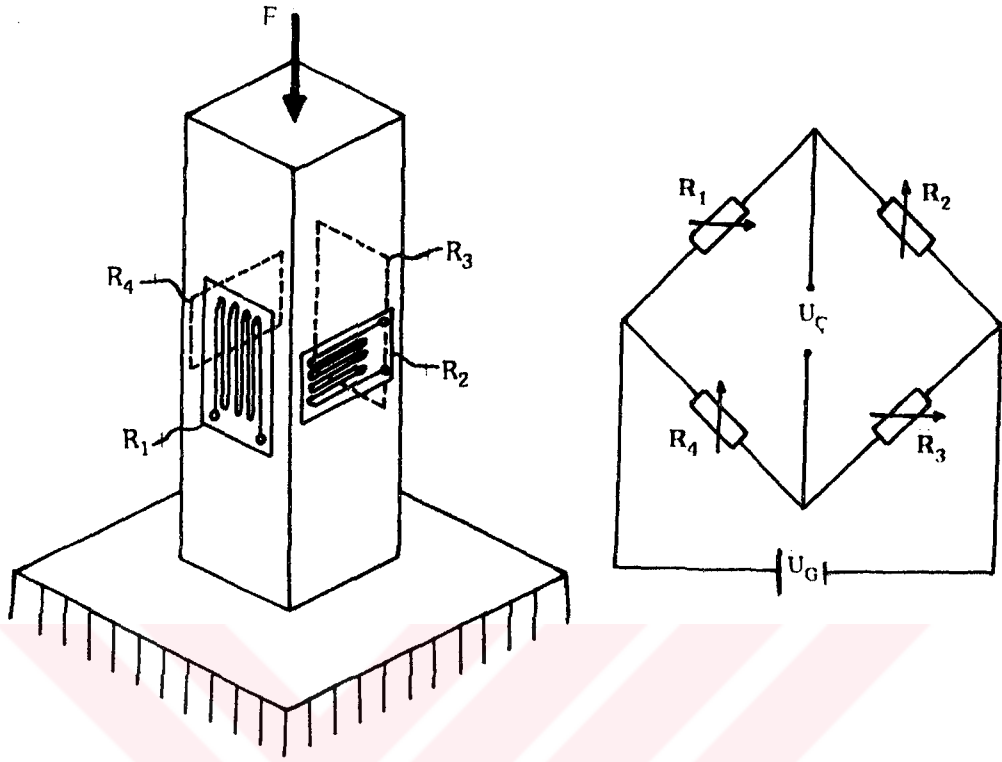
### 5.1. Strain Gage Tipi Temel Dinamometre Konstrüksiyonları

Kuvvetlerin veya gerilmelerin ölçülmesi, strain gage'lerin doğrudan doğruya yapı elemanına yapıştırılmasıyla yapılabilir. Ancak kuvvet analizinde çoğu zaman, münferit kuvvet bileşenlerinin bilinmesine ihtiyaç duyulur. Genellikle ilgi duyulan kuvvet, doğrudan doğruya yapı elemanı üzerinde ölçülemez. Bu kuvvetin bir dinamometre yardımıyla bulunması gerekir. Bu sebeple dinamometre, sadece ölçülmek istenilen kuvvet bileşeniyle deforme olacak şekilde tasarlanmalıdır. Böylelikle ölçülmek istenilen kuvvetlere, diğer kuvvetlerin etkisi ortadan kaldırılabılır. Bununla birlikte, bu etkilerin tamamen ortadan kaldırılması da hemen hemen imkânsızdır.

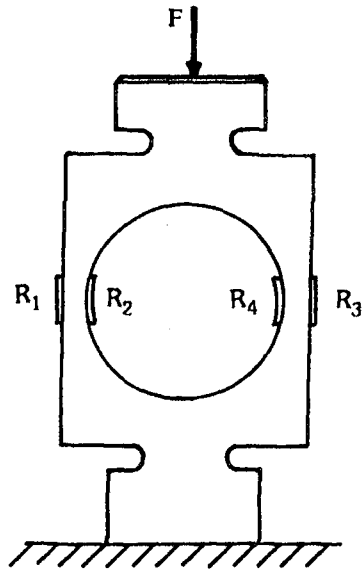
Kuvvetleri birbirinden ayırt etme işleminde, genelde basit zorlanma halleri kullanılır [9,10]. Eksenel yüklü bir çubuk, en basit bir dinamometre olarak kullanılabilir (Şekil 5.1).

Basma halinde çubuk şişer. Çekme halinde ise daralır. Uygun yerlere yapıştırılmış strain gage'lerle köprü devresi teşekkül ettirilir. Burada ölçülecek kuvvetlerin, çubukta yeteri kadar bir deformasyon oluşturmaları şartı aranır. Başka bir ifadeyle, dinamometre görevini görece çubuğun malzemesinin ve kesitinin, ölçülecek kuvvete göre tespiti gerekir. Ancak küçük kuvvetlerin ölçülmesinde, deformasyonun azlığı nedeniyle bu dinamometre iyi netice vermez. Bu gerçek, büyük deformasyon elde edilebilecek bir dinamometre tasarımını gerekli kılar. Bu amaçla, basma veya çekme çubuğu şeklindeki dinamometreden ring dinamometreler türemiştir (Şekil 5.2). Bu dinamometrede, dolu bir çubuğa nazaran daha büyük birim uzamalar elde edilebilir. Bu iki dinamometre arasındaki temel fark birinde eksenel uzamanın, diğerinde eğilme uzamasının ölçülmesidir. Bu dinamometrelerin her ikisi de kayma gerilmesini ölçmek için uygun değildir [2,5].





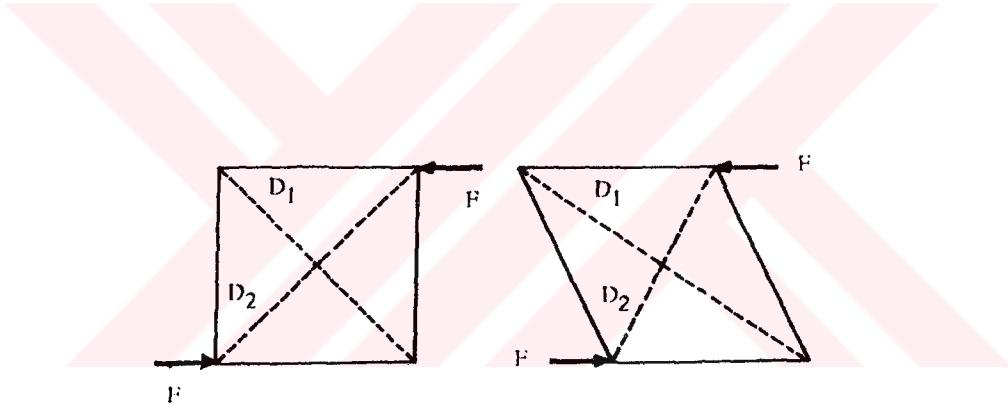
Şekil 5.1 Eksenel Yüklü Bir Çubuğun Dinamometre Olarak Kullanımı



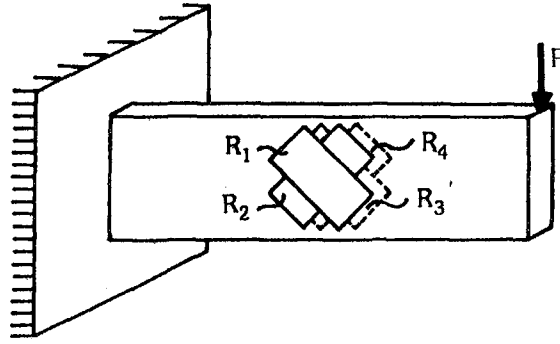
Şekil 5.2 Ring Dinamometre

Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için çoğu kez, Şekil 5.3'deki modelden faydalanılır. Bu modelde eleman, iki yatay kuvvetle zorlanmaktadır. Elemanın zorlanmadan sonraki durumu da Şekil 5.3'de görülmektedir. Burada köşegenlerden birisi kısalmışken diğeri uzamaktadır. Köşegenler doğrultusunda yapıştırılacak strain gage'lerle,  $F$  kuvveti hakkında bir sonuca gidilebilir. Bu prensibi kullanarak, en basit şekilde zorlanan eleman üzerinde kesme kuvveti ölçme işlemi Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Bu dinamometrenin de dolu çubuğa benzer şekilde, deformasyonunun az olması gibi bir dezavantajı vardır. Bu dezavantaj, dinamometreye Şekil 5.5'deki biçim verilerek aşılır [2,6,9].

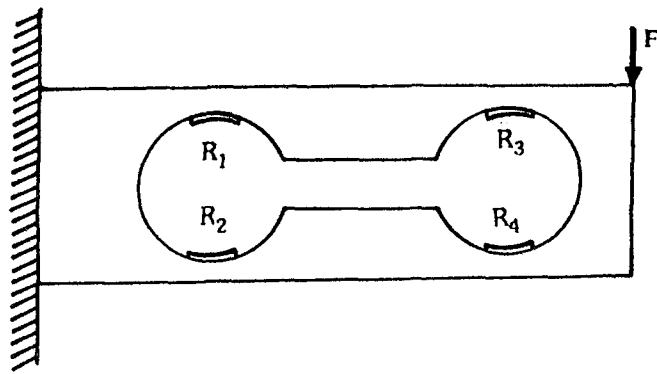
Bu çalışmada burulma ölçülmediği için, burulma ile ilgili dinamometreler burada anlatılmamıştır.



Şekil 5.3 Bir Yüzey Elemanının Kayma Deformasyonu



Şekil 5.4 Kesme Kuvveti Dinamometresi



Şekil 5.5 Kesme Kuvveti Dinamometresinin Değişik Bir Formu

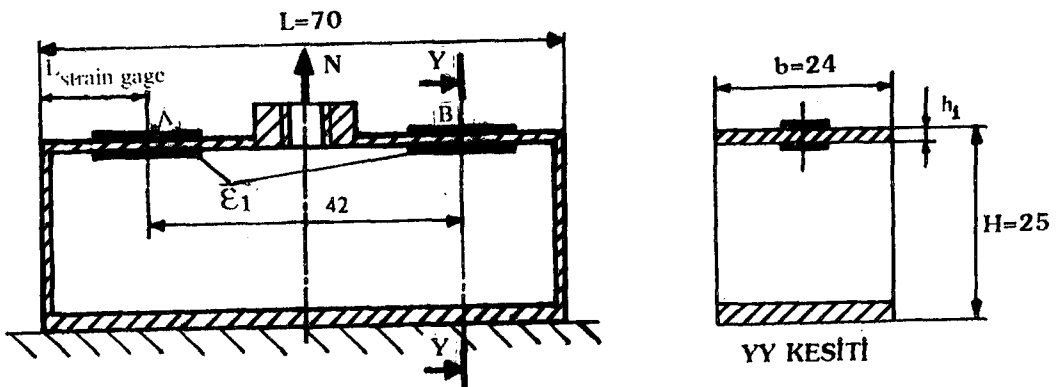
## 5.2. Normal ve Kesme Kuvvetlerini Birlikte Ölçebilecek Dinamometre

### Tasarımı

Normal kuvvetleri ölçmek için, Şekil 5.1'de verilen aksenal yüklü bir çubuk, dinamometre olarak kullanılabilir. Ancak, eğilme zorlanmasıyla daha fazla deformasyon elde edilebileceğinden, normal kuvvetleri ölçmek için, Şekil 5.6'da verilen konstrüksiyon düşünülmüştür. Dinamometre malzemesi olarak alüminyum alaşımı seçilmiştir. Alüminyum, çeliğe göre daha iyi ısı iletir, hafiftir ve kolay işlenebilir. Ayrıca elastisite modülü çeliğinkinin üçte biridir. Bu durum, tasarlanan dinamometrede daha büyük sinyal elde edilmesini sağlar.

Tasarlanan dinamometrenin, 1 ile 5 Newton arasındaki kuvvetleri algılayabilecek durumda olmasına karar verilmiştir. Şekil 5.6'daki konstrüksiyonda strain gage'lerin kolayca yapıştırılabilmesi için, L boyu 70 mm ve b derinliği 24 mm seçilmiştir. H yüksekliğinin, kuvvet ölçme açısından bir fonksiyonu yoktur. Ancak, içerideki boşluğa elin rahatça girebileceği kadar büyük, kuvvetler karşısında burkulmayacak kadar dayanıklı olması gerekir. Bu nedenle H yüksekliği 25 mm seçilmiştir.

Ölçek 1:1



Şekil 5.6 Normal Kuvveti Ölçebilecek Bir Konstrüksiyon

Eğilmeye çalışan bir kiriş için, mukavemet modülünün

$$W = \frac{I}{c} = \frac{bh^3}{12} / \frac{h}{2} = \frac{bh^2}{6}$$

olduğu gözönüne alınarak

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{Mc}{IE} = \frac{M}{WE} = \frac{6M}{bh^2E} \quad (5.1)$$

eşitliğinden

$$h \leq \sqrt{\frac{6M}{E\varepsilon b}} \quad (5.2)$$

olması gerektiği görülür.

Şekil 5.7'de gösterilen iki ucu ankastre bağlı bir kirişin, tekil bir N kuvvetiyle yüklenmesi durumunda 1 ve 2 noktalarındaki tepki kuvvetleri

$$R_1 = \frac{Nb^2}{L^2} + \frac{2Nab^2}{L^3} \quad (5.3)$$

ve

$$R_2 = \frac{Na^2}{L^2} + \frac{2Na^2b}{L^3} \quad (5.4)$$

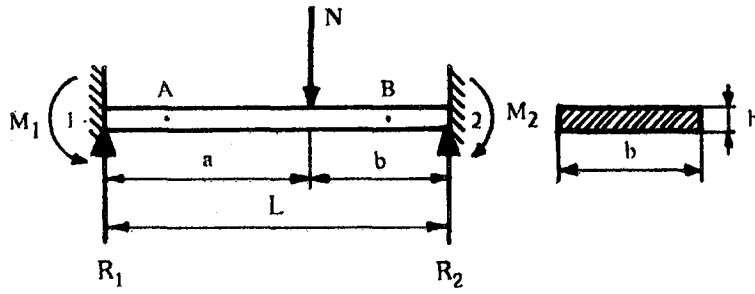
olur. Moment tepkileri ise

$$M_1 = \frac{Nab^2}{L^2} \quad (5.5)$$

ve

$$M_2 = \frac{Na^2b}{L^2} \quad (5.6)$$

olur [15,17].



Şekil 5.7 İki Ucu Ankastre Bağlı Bir Kiriş

Dinamometrenin ankastre olarak bağlı olduğu düşünülürse, merkezde 1 Newton'luk bir kuvvet uygulanması durumunda Şekil 5.7'deki tepki kuvvetleri,  $a = b = L/2$  olduğu dikkate alınarak (5.3) ve (5.4) eşitliklerinden

$$R_1 = R_2 = \frac{N}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ N}$$

olarak ve moment tepkileri de, (5.5) ve (5.6) eşitliklerinden

$$M_1 = M_2 = \frac{NL}{8} = \frac{1,70}{8} = 8,75 \text{ Nmm}$$

olarak hesaplanır. Buna göre strain gage'lerin yapıştırıldığı A ve B noktalarındaki eğilme momenti

$$M_A = M_B = M_1 - R_1 L_{\text{strain gage}} = 8,75 - 0,5 \cdot 14 = 1,75 \text{ Nmm}$$

olur. Şekil 5.6'daki A ve B noktalarında  $1 \cdot 10^{-6}$ 'lık bir birim uzamanın oluşabilmesi için, alüminyumun elastisite modülünün  $70.000 \text{ N/mm}^2$  olduğu dikkate alınarak, (5.2) formülü yardımıyla

$$h_t \leq \sqrt{\frac{6 \cdot 1,75}{70.000 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 24}} = 2,5 \text{ mm}$$

olması gerektiği bulunur. Bununla beraber dinamometrenin 1 Newton'un altındaki kuvvetlere de tepki gösterebilmesi için,  $h_1 = 1$  mm olarak alınmıştır.

Kesme kuvveti ve normal kuvvetin uygulama noktasının merkezden kaçıklığının ölçülebilmesi için, Şekil 5.8'de verilen dinamometre tasarlanmıştır. Burada da 1 Newton'luk bir kesme kuvvetinin hissedilebilmesi esas alınmıştır. 1 Newton'luk kuvvetin , strain gage'lerin yapıştırılı olduğu C noktasında oluşturduğu eğilme momenti,  $z_2 = 66$  mm alınır

$$M_C = Sz_2 = 1.66 = 66 \text{ Nmm}$$

olarak hesaplanır. Burada  $z_2$  mesafesi, kesme kuvvetinin uygulanmasını sağlayan tabla ve kızak parçasının yüksekliği de dikkate alınarak ölçülmüştür. Yine (5.2) formülü yardımıyla, C noktasında  $1.10^{-6}$  'lık bir birim uzamanın oluşabilmesi için

$$h_2 \leq \sqrt{\frac{6.66}{70.000 \cdot 1.10^{-6} \cdot 24}} = 15,35 \text{ mm}$$

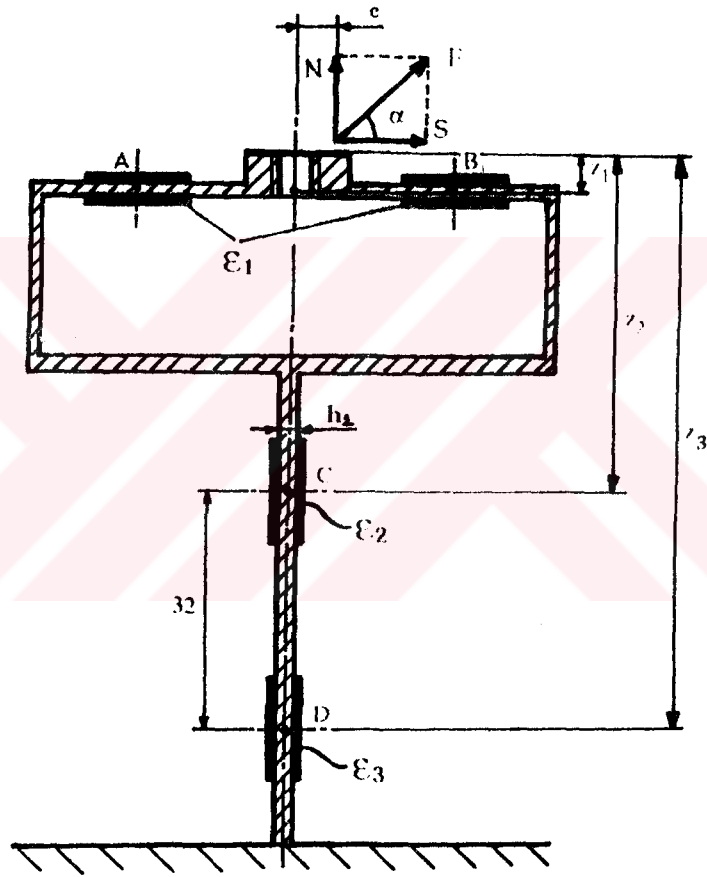
olması gerektiği bulunur. Bununla beraber dinamometrenin 1 Newton'un altındaki kuvvetlere de tepki gösterebilmesi için,  $h_2 = 2,4$  mm olarak alınmıştır.

Sadece kesme kuvvetinin ölçülmesi durumunda, bir köprü devresi yeterli olabilir. Ancak ölçülecek normal kuvvetin eksantrik olarak etkimesi durumunda eksantrikliği de ölçebilmek için, bu dinamometreye  $z_3$  mesafesindeki strain gage'lerle ikinci bir köprü devresi eklenmiştir.

Bu üç etkiyi, yani normal kuvvet, kesme kuvveti ve eksantrikliği ölçebilecek dinamometre, Şekil 5.9'daki gibi bir tek gövdede toplanmış ve imalâtı yapılmıştır.

Normal kuvvet, kesme kuvveti ve eksantrikliğin ölçülebilmesi için, üç tam köprü devresi teşkil edilmiştir. Ölçme sonucu her köprü devresi için, bir ölçme sinyali okunur. Ölçme sinyali, strain gage'lerin yapıştırılı olduğu yerdeki birim uzama değerini verir.

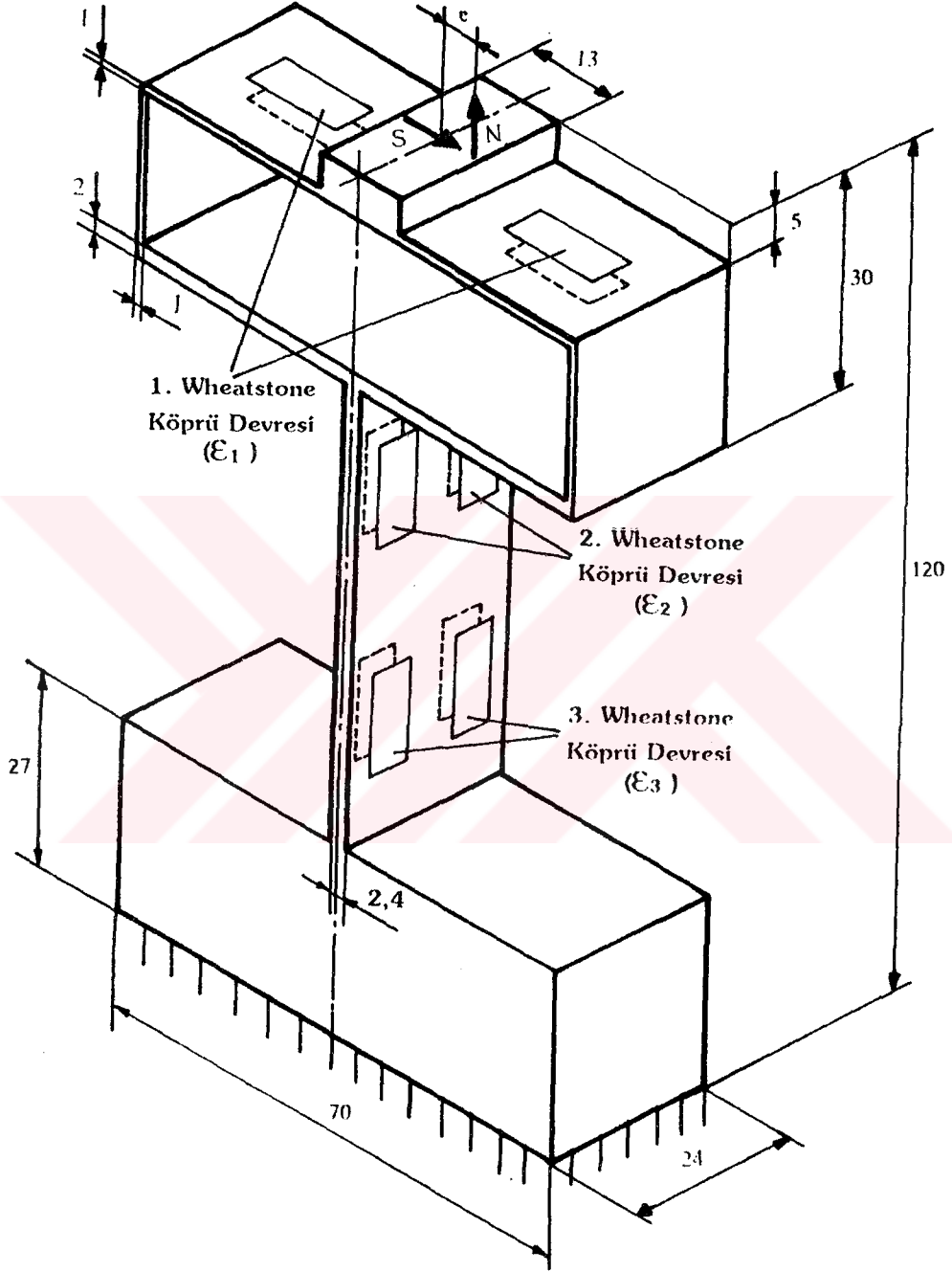
Ölçek 1:1



Şekil 5.8 Kesme Kuvveti ve Eksantrikliği Ölçebilecek Bir Konstrüksiyon



Ölçek 1:1



Şekil 5.9 Normal Kuvvet ve Kesme Kuvvetini Birlikte Ölçen Dinamometre Konstrüksiyonu

### 5.3. Dinamometre Üzerine Monte Edilen Kuvvet Uygulama Düzeneği

Dinamometreye eksantrik olarak kuvvet uygulanabilmesini sağlamak amacıyla bir düzenek tasarlanmıştır. Şekil 5.10'da şematik olarak gösterilen bu düzeneği oluşturan tabla, kızak ve tespit vidası gibi parçalar imâl edilip dinamometre üzerine monte edilmiştir. Kızak, tespit vidası gevşetilerek tabla üzerinde kaydırılabilir. Kızak, tespit vidası sıkıştırılarak da eksantrik herhangi bir konumda sabitlenebilir.

Dinamometre gövdesinin alt kısmı mengeneye tutturulmuştur. Tespit vidasına bağlanan bir naylon ip yardımıyla kuvvet uygulanmıştır. Kuvvet yönünü değiştirmek için de makaralar kullanılmıştır.

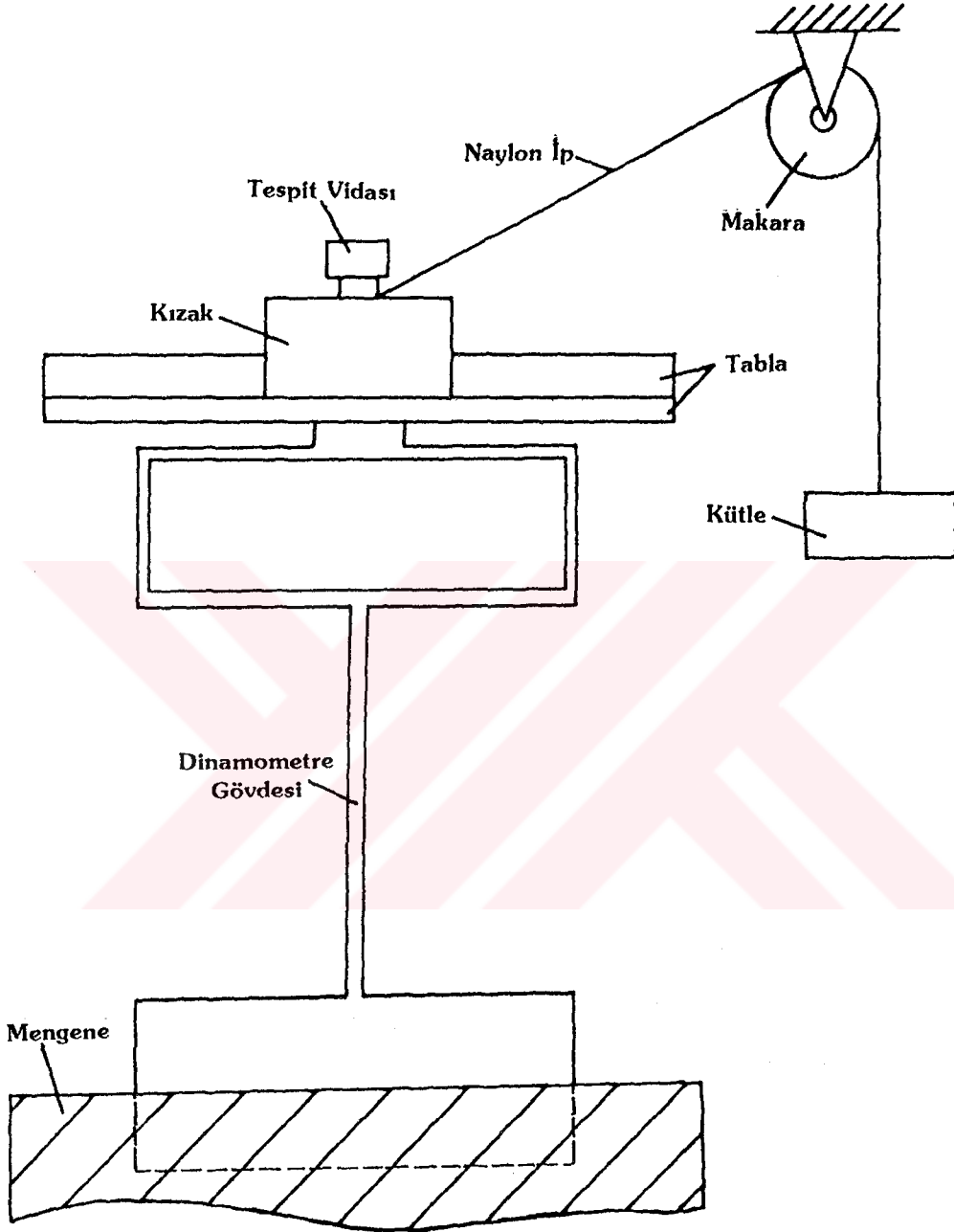
Ek-8'deki Fotoğraf 2'de deneylerde kullanılan strain gage cihazı, Ek-9'daki Fotoğraf 3' de deney düzeneği ve Fotoğraf 4' de de kuvvet uygulama düzeneği görülmektedir.

### 5.4. Dinamometrenin Kalibrasyonu

İmalâtı yapılan dinamometrede önce, dinamometrenin merkezinden uygulanan normal kuvvet ve kesme kuvvetini ölçmede kullanılabilecek kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Bu iki temel büyüklüğü ölçmek için, Şekil 5.9'da gösterilen 1. ve 2. Wheatstone köprü devrelerinden elde edilen sinyallerin, diğer devre kombinasyonlarına göre daha uygun olduğu deneylerle gözlenmiştir.

Dinamometrenin kalibrasyonu için, bir dizi deney yapılmıştır. Deneylerde dinamometreye, Ek-10'daki Fotoğraf 5'de görüldüğü gibi bileşke kuvvet ve Fotoğraf 6'da görüldüğü gibi kesme kuvveti, Ek-11'deki Fotoğraf 7'de görüldüğü gibi normal kuvvet uygulanmıştır. Bu esnada, Şekil 5.9'da gösterilen yerlerdeki  $\epsilon_1, \epsilon_2$  ve  $\epsilon_3$  birim uzama değerleri okunmuştur.

Dinamometreye sadece normal kuvvet uygulanması durumunda elde edilen  $\epsilon_1, \epsilon_2$  ve  $\epsilon_3$  sinyalleri Ek-1'deki tabloda, sadece kesme kuvveti uygulanması durumunda



Şekil 5.10 Kuvvet Uygulama Düzenegi

elde edilen  $\epsilon_1, \epsilon_2$  ve  $\epsilon_3$  sinyalleri de, Ek-2' deki tabloda verilmiştir. Ancak bu tablolardaki değerlerin pratik olarak kullanılabilmesi için, birim uzama ile kuvvet arasındaki bağıntının bulunması gerekir.

Şekil 5.11'deki yükleme durumu için,  $\epsilon_1$  ile N ve S arasındaki bağıntı, N ve S'nin  $\epsilon_1$  değerine etkilerinin toplanmasıyla bulunabilir.

Sadece N'nin merkezden uygulanması durumunda, Şekil 5.7'de  $a=b=L/2$  olduğu dikkate alınarak, (5.3) ve (5.5) yardımıyla

$$\epsilon_1^{(N)} = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_A c}{IE} = (M_1 - R_1 L_{\text{strain gage}}) \frac{h_1}{2IE} = \left( \frac{NL}{8} - \frac{N}{2} L_{\text{strain gage}} \right) \frac{h_1}{2IE}$$

olur. Burada

$$C_{11} = \left( \frac{L}{4} - L_{\text{strain gage}} \right) \frac{h_1}{4IE}$$

olmak üzere

$$\epsilon_1^{(N)} = C_{11} N \quad (5.7)$$

yazılabilir.

Sadece S'nin uygulanması durumu ise, Şekil 5.11'deki K noktasında  $M_0 = Sz_1$  kuvvet çifti ve S kuvveti etkimesi haline eşdeğerdir. Burada  $z_1$  mesafesi, kesme kuvvetinin uygulanmasını sağlayan tabla ve kızak parçasının yüksekliğini de kapsamaktadır. S kuvvetinin eksenel etkisi küçük olduğundan ihmal edilebilir. Şekil 5.12'de gösterilen iki ucu ankastre bağlı bir kirişin  $M_0$  momentiyle yüklenmesi durumunda tepki kuvvetleri

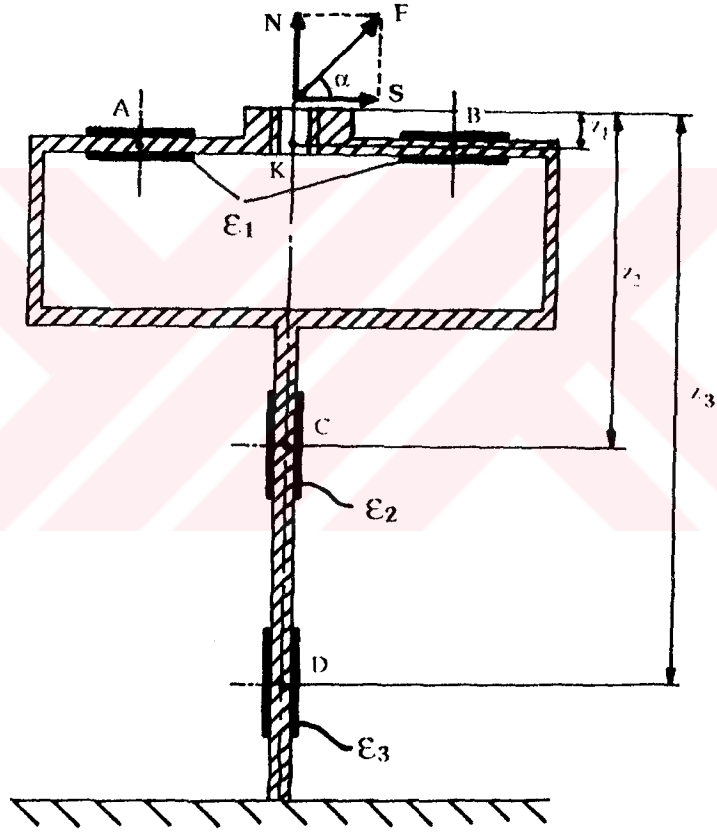
$$R_1 = \frac{3M_0}{2L} \quad (5.8)$$

ve moment tepkileri ise

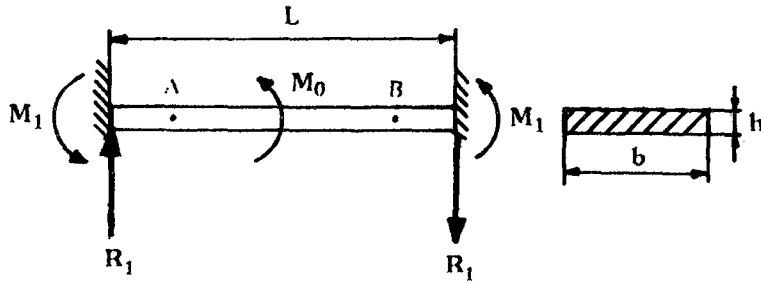
$$M_1 = \frac{M_0}{4} \quad (5.9)$$

olur [16,17].

Ölçek 1:1



Şekil 5.11 Normal Kuvvet ve Kesme Kuvvetinin Dinamometre Mekezinden Uygulanması



Şekil 5.12 İki Ucu Ankastre Bağlı Bir Kiriş

Strain gage'lerin yapıştırıldığı olduğu A ve B noktalarındaki eğilme momenti

$$M_A = M_B = M_1 - R_1 L_{\text{strain gage}} \quad (5.10)$$

şeklindedir. (5.8) ve (5.9) , (5.10) daki yerlerine yazılırsa

$$M_A = M_B = \frac{M_0}{4} - \frac{3M_0}{2L} L_{\text{strain gage}}$$

olur. Bu eşitlikte  $M_0 = Sz_1$  yazılarak

$$M_A = M_B = \frac{Sz_1}{4} - \frac{3Sz_1}{2L} L_{\text{strain gage}} = \left( \frac{z_1}{4} - \frac{3z_1 L_{\text{strain gage}}}{2L} \right) S \quad (5.11)$$

elde edilir. S 'nin uygulanması halinde (5.11) kullanılarak

$$\epsilon_1^{(S)} = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_A c}{IE} = \left( \frac{z_1}{4} - \frac{3z_1 L_{\text{strain gage}}}{2L} \right) \frac{Sh_1}{2IE}$$

bulunur.

Burada

$$C_{12} = \left( \frac{z_1}{2} - \frac{3z_1 L_{\text{strain gage}}}{L} \right) \frac{h_1}{4IE}$$

olmak üzere

$$\varepsilon_1^{(S)} = C_{12} S \quad (5.12)$$

yazılabilir. Sonuç olarak süperpozisyon prensibiyle

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^{(N)} + \varepsilon_1^{(S)}$$

eşitliği yazılabilir. Bu eşitlik, (5.7) ve (5.12) kullanılarak

$$\varepsilon_1 = C_{11} N + C_{12} S \quad (5.13)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Şekil 5.11'deki yükleme durumu için  $\varepsilon_2$  ile N ve S arasındaki bağıntı, N ve S'nin  $\varepsilon_2$  değerine etkilerinin toplanmasıyla bulunabilir.

Sadece N'nin uygulanması durumunda

$$\varepsilon_2^{(N)} = \frac{\sigma}{E} = \frac{N}{AE}$$

olur. Burada

$$C_{21} = \frac{1}{AE}$$

olmak üzere

$$\epsilon_2^{(N)} = C_{21} N \quad (5.14)$$

yazılabilir.

Sadece S'nin uygulanması halinde, C noktasında meydana gelen  $M_C = Sz_2$  eğilme momenti kullanılırsa

$$\epsilon_2^{(S)} = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_C c}{IE} = \frac{Sz_2 h_2}{2IE}$$

olur. Burada

$$C_{22} = \frac{z_2 h_2}{2IE}$$

olmak üzere

$$\epsilon_2^{(S)} = C_{22} S \quad (5.15)$$

yazılabilir.

$$\epsilon_2 = \epsilon_2^{(N)} + \epsilon_2^{(S)}$$

eşitliği (5.14) ve (5.15) kullanılarak

$$\epsilon_2 = C_{21} N + C_{22} S \quad (5.16)$$

şeklinde ifade edilebilir.

(5.13) den  $\epsilon_1$ 'in ve (5.16) dan  $\epsilon_2$ 'nin N ve S ile lineer olarak değiştiği görülebilir. (5.13) deki  $C_{11}$  ve  $C_{12}$  ile (5.16) daki  $C_{21}$  ve  $C_{22}$ , dinamometre sabitleridir.  $C_{ij}$  ( $i = j = 1, 2$ ) katsayılarının boyutu l/Newton şeklindedir. Bu dinamometre sabitlerinin bulunması gerekir.



(5.7) eşitliğindeki  $C_{11}$  değeri, Ek-1'deki tabloda verilen  $\epsilon_1$  değerlerinin N değerlerine bölünmesiyle; (5.12) eşitliğindeki  $C_{12}$  değeri ise, Ek-2'deki tabloda verilen  $\epsilon_1$  değerlerinin S değerlerine bölünmesiyle elde edilir. (5.14) deki  $C_{21}$  değeri, Ek-1'deki tabloda verilen  $\epsilon_2$  değerlerinin N değerlerine bölünmesiyle; (5.15) deki  $C_{22}$  değeri ise, Ek-2'deki tabloda verilen  $\epsilon_2$  değerlerinin S değerlerine bölünmesiyle elde edilir.

Ek-1,2 ve 3'deki tablolarda verilen ortalama dinamometre sabitleri ( $C_{ij}^{ORT}$ ), 2 ile 5 Newton arasındaki kuvvetlerde okunan birim uzama değerleriyle hesaplanan katsayıların ortalaması alınarak bulunmuştur. Ortalama dinamometre sabitleriyle (5.13) ve (5.16) eşitlikleri

$$\epsilon_1 = -0.577 N - 0.577 S \quad (5.17)$$

$$\epsilon_2 = 1.27 N - 33.05 S \quad (5.18)$$

şeklinde yazılabilir. (5.17) ve (5.18), N ve S için çözümlerse

$$N = -1.67 \epsilon_1 + 0.029 \epsilon_2 \quad (5.19)$$

$$S = -0.064 \epsilon_1 - 0.029 \epsilon_2 \quad (5.20)$$

kalibrasyon eşitlikleri bulunur.

Şekil 5.8'deki N kuvvetinin eksantrikliğini ölçmede kullanılacak kalibrasyon eşitliğinin bulunması gerekir. Bunun için de bir dizi deney yapılmıştır. Deney sonuçları, Ek-3'deki tabloda verilmiştir. Burada  $N_e$  değeri, bir tek bilinmeyen olacak şekilde ifade edilirse,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  ve  $\epsilon_3$  değerlerinin hem N, hem S ve hem de  $N_e$ 'ye lineer olarak bağlı olduğu kabulüyle

$$\epsilon_1 = C_{11} N + C_{12} S + C_{13} N_e \quad (5.21)$$

$$\epsilon_2 = C_{21} N + C_{22} S + C_{23} N_e \quad (5.22)$$

$$\epsilon_3 = C_{31} N + C_{32} S + C_{33} N_e \quad (5.23)$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada,  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  ve  $C_{33}$  katsayılarının boyutu 1/Nmm'dir.  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{21}$  ve  $C_{22}$  katsayılarının bulunuş şekli daha önce açıklanmıştır.  $C_{31}$  ve  $C_{32}$

benzer şekilde bulunabilir. Bu değerler de Ek-1 ve Ek-2'deki tablolarda mevcuttur. Ek-3'deki tabloda görülen  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  ve  $C_{33}$  katsayıları ise,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  ve  $\epsilon_3$  değerlerinin  $N_e$  değerlerine bölünmesiyle bulunur.  $C_{13}$ ,  $C_{23}$  ve  $C_{33}$  katsayılarının ortalamaları Ek-3'deki tablonun ilgili sütunlarında hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerle (5.21), (5.22) ve (5.23) eşitlikleri

$$\epsilon_1 = -0.577 N - 0.577 S - 0.0398 N_e$$

$$\epsilon_2 = 1.27 N - 33.05 S + 0.581 N_e$$

$$\epsilon_3 = 1.52 N - 46.15 S + 0.563 N_e$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklem sistemi  $N$ ,  $S$  ve  $N_e$  için zlrs

$$N = -1.837\epsilon_1 - 0.483\epsilon_2 + 0.369\epsilon_3 \quad (5.24)$$

$$S = -0.035\epsilon_1 + 0.059\epsilon_2 - 0.063\epsilon_3 \quad (5.25)$$

$$N_e = 2.015\epsilon_1 + 6.155\epsilon_2 - 4.436\epsilon_3 \quad (5.26)$$

kalibrasyon eşitlikleri bulunur.

İml edilen dinamometre, sadece normal ve kesme kuvvetlerini ölçmede kullanılması halinde, (5.19) ve (5.20) kalibrasyon eşitliklerinden faydalanmak gerekir. Normal ve kesme kuvvetlerinin yanında eksantrikliği de ölçmek için kullanılacaksa (5.24), (5.25) ve (5.26) kalibrasyon eşitlikleri geçerli olur. Ancak bu eşitliklerin ne derece doğru sonuçlar verdiğinin kontrolü gerekir.

### 5.5. Kalibrasyon Eşitliklerinin Kontrolü

Kalibrasyon eşitliklerinin kontrolü için bir dizi deney yapılmıştır.

Bileşke kuvvetin merkezde uygulanması durumunda, normal ve kesme kuvveti bileşenlerini bulmakta kullanılacak olan (5.19) ve (5.20) kalibrasyon eşitliklerinin kontrolü için yapılan deneyler ve bu eşitliklerden bulunan sonuçlar Ek-4,5 ve 6'daki tablolarda verilmiştir.

Dinamometrenin doğru çalışıp çalışmadığının kontrolü için yapılan deneylerde bileşke kuvvet, çekme kuvveti olarak alınmıştır. Bunun sebebi, kuvvet yönünü değiştirmek için kullanılan düzeneğin buna uygun olmasıdır. Dinamometre, basma durumunda uygulanan bileşke kuvvetlerin ölçülmesinde de kullanılabilir. Ancak, bu durumda bileşke kuvvetin uygulanabilmesini sağlayan bir düzene, dinamometreye monte edilmelidir. Kalibrasyon eşitliklerinin de yeniden bulunması gerekir. Bununla birlikte dinamometreye ortasından sadece basma kuvveti uygulanarak da bir dizi deney yapılmıştır. Bu durumda bulunan kalibrasyon eşitlikleri, bu kalibrasyon eşitliklerinin kontrolü için elde edilen veriler ve hesaplanan hata oranları Ek-7 'deki tabloda verilmiştir.



## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, normal ve kesme kuvvetlerini ölçebilecek bir dinamometre imâl edilmiştir.

Dinamometre, 1 Newton'un altındaki kuvvetleri algılayabilecek şekilde tasarlanmasına rağmen, ancak 2 Newton'dan itibaren güvenilir sonuçlar vermeye başlamıştır. Bu durumda dinamometrenin kullanılacağı aralık, 2 ile 5 Newton arasındır. 5 Newton sınırının sebebi, dinamometre gövdesinin mukavemetidir.

Ölçülecek yüklerin sadece çekme kuvveti olarak uygulanması durumunda dinamometre, maksimum % 13'lük bir hata ile kullanılabilir. Hata oranları, Ek-1'deki tabloda hesaplanmıştır. Basma durumunda ise,  $\epsilon_2$  değeri alındığında maksimum hata oranı %9.3'tür.  $\epsilon_2$  değeri yerine  $\epsilon_1$  değeri kullanıldığı zaman, maksimum hata oranının %5'e düştüğü gözlenmiştir. Hata oranları, Ek-7'deki tabloda hesaplanmıştır.

Ölçülecek yüklerin sadece kesme kuvveti olarak uygulanması durumunda dinamometre, maksimum % 1.5 'luk bir hatayı göze alarak güvenle kullanılabilir. Hata oranları, Ek-2'deki tabloda hesaplanmıştır.

Dinamometre, S ve N'nin ikisinin de bilinmemesi halinde bunların ölçülmesi için kullanılacaksa, (5.19) ve (5.20) kalibrasyon eşitliklerinden yararlanılabilir. Bu eşitliklerde hata miktarı, kuvvetin sadece normal veya kesme olarak uygulanması durumuna göre fazladır. Bu durum Ek-4, Ek-5 ve Ek-6'daki tablolarda görülebilir. Burada hatanın büyük olmasının sebebi, ölçülecek kuvvetin iki farklı  $\epsilon$  değerine bağlı olmasındandır. Bu  $\epsilon$  değerlerindeki hataların üst üste bindirilmesinden dolayı, hata miktarı artmaktadır.

N ve S kuvvetlerinin yanısıra, N'nin eksantrikliği e'nin ölçülmesi için bulunan (5.24), (5.25) ve (5.26) kalibrasyon eşitlikleri beklenen sonuçları vermemiştir. Bunun sebebi,  $\epsilon_1$  değerinin  $N_e$  ile lineer olarak değişmemesidir.

$\epsilon_1$  birim uzamasını ölçen strain gage'lerde ortaya çıkan hata oranının büyük olmasının sebebi, strain gage'lerin tam olarak aynı eksenli ve karşılıklı yerleştirilememesidir. Strain gage'lerin yapıştırıldığı yerlerdeki kalınlıkların farklı olması da hata oranını

arttırmıştır. Bu durum, dinamometrenin merkezi olarak yüklenmesi durumunda, 1. Wheatstone köprü devresindeki dört strain gage'in, aynı kuvvette birbirinden farklı değerler gösterdiği gözlenerek farkedilmiştir. Strain gage'lerin yapıştırıldığı yerlerdeki kalınlık toleranslarının,  $\mu\text{m}$  seviyesine indirilmesiyle hata oranı azaltılabilir.

Bu haliyle tasarlanan ve imâl edilen dinamometre, hassas bir terazi olarak kullanılamamakla birlikte, içinden akışkan geçen bir borudaki basınç ve sürtünme kuvvetlerini ölçmek için, uygun bir düzeneğin dinamometreye ilâve edilmesiyle kullanılabilir.

Dinamometredeki kalibrasyon sabitleri, İngiliz imalâtı olan E 10 Mk II tipi strain gage cihazıyla bulunmuştur. Deneylerin başka bir cihazla yapılması durumunda, kalibrasyon sabitlerinin % 100 aynı kalacağı iddia edilemez.

Bir tek strain gage'in yapıştırılması ve yerleştirilmesinde, hata oranının azaltılması yönünde çalışmaların devam ettirilmesinde fayda vardır.

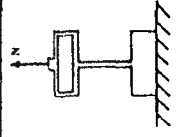
## 7. KAYNAKLAR

- [1] SCHULZE, D. ve LYLE, C., 1988. "The Development of a Five -Component Stress Measuring Cell for Stress Measurements on Silos", Reports In Applied Measurement, Vol. 4, No.2, 34-38.
- [2] NOWAK, M., 1987. "Berechnung und Optimierung einer Spannungsmesszelle", Student Project at the Institut für Mechanische Verfahrenstechnik, Technische Universität Braunschweig.
- [3] COLLETT, C.V. ve HOPE, A.D., 1974. "Engineering Measurements", 2nd Ed., Longman Group Ltd., Singapore, 166-200.
- [4] BECKWITH, T.G. ve BUCK N.L., 1961. "Mechanical Measurements", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 241-322, 301-322.
- [5] DOEBELIN, E.O., 1966. "Measurement Systems: Application and Design", Kogakusha Company, Ltd., Japan, 224-233, 333-339.
- [6] SMITH, E., 1976. "Principles of Industrial Measurement for Control Applications", USA, 21-31, 59-81.
- [7] NOLTINGK, B.E., 1985. "Instrument Technology", Vol.1, Butterworth & Co.Ltd, England, 66-75, 100-107.
- [8] HOFFMAN, K., 1973. "Fundamentals of the Strain Gage Technique : The Strain Gage, a Universal Tool of the Experimental Stress Analysis", Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [9] HOFFMANN, K., 1973. "Fundamentals of the Strain Gage Technique: Measuring Elementary Load Cases with Strain Gages", HBM GmbH.
- [10] HOFFMANN, K., 1973. "Fundamentals of the Strain Gage Technique : Applying the Wheatstone Bridge Circuit", HBM GmbH.

- [11] HARRİS , C.M. ve CREDE, C.E., 1961. "Shock and Vibration Handbook", Vol. 1, McGraw - Hill Book Company , USA, 17-1, 17-43.
- [12] AY, İ., "Strain Gage ve Uygulamaları (Strain Gage and its Applications)". I. Balıkesir Mühendislik Sempozyumu, Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi, 26-27 Nisan 1988, Uludağ Üniversitesi Basımevi, 1988, Yayın No: 5-002-0164, 507-518
- [13] UĞUR, N. ve BEŞERĞİL, B., 1991. "Proses Ölçme Tekniği", E.Ü. Ege Meslek Yüksek Okulu Yayınları, No: 13, E.Ü. Basımevi, İzmir, 188-192, 256-258.
- [14] İNAN, M., 1970. "Cisimlerin Mukavemeti". Ofset Matbaacılık Ltd. Şti., İstanbul.
- [15] TIMOSHENKO, S. (Tercüme : İNAN M. ve SÖNMEZ F.), 1947 "Cisimlerin Mukavemeti", İ.T.Ü. Basımevi, İstanbul, 180-183.
- [16] BEER, F. ve JOHNSTON, R., 1987. "Mechanics of Materials", McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- [17] NASH, W.A. (Tercüme: SÜMER, S.), 1979. "Cisimlerin Mukavemeti" , Güven Kitabevi Yayınları, Ankara.
- [18] Danimarka'nın Brüel & Kjaer Firması Tarafından İmal Edilmiş Olan 1516 Tipi Strain Gage Cihazı Kataloğu, Nisan 1969.
- [19] İngiltere'nin TecQuipment Firması Tarafından İmâl Edilmiş Olan E 10 Mk II Tipi Strain Gage Cihazı Kataloğu.
- [20] Amerikan Measurements Group Firmasının Katalogları ve Teknik Notları.

**EK-1** Dinamometreye Sadece Normal Kuvvet Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

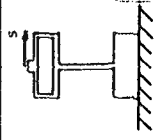
Gerçek Değerler (Newton)	Deneyde Ölçülen Birim Uzama Değerleri (µε)			Dinamometre Sabitleri			(5.19) Kalibrasyon Eşitliğiyle Bulunan Değerler (Ölçülen Değerler) (Newton)	% Hata = $\frac{\text{Ölçülen Değer} - \text{Gerçek Değer}}{\text{Gerçek Değer}}$
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$C_{11} = \frac{\epsilon_1}{N}$	$C_{21} = \frac{\epsilon_2}{N}$	$C_{31} = \frac{\epsilon_3}{N}$		
N							$N = -1.67\epsilon_1 + 0.029\epsilon_2$	N'deki % Hata
2	-1	2.5	3	-0.5	1.25	1.5	1.74	- % 13
3	-1.75	3.75	4.5	-0.583	1.25	1.5	3.03	% 1
4	-2.5	5.25	6.25	-0.625	1.31	1.56	4.32	% 8
5	-3	6.5	7.75	-0.6	1.30	1.55	5.19	% 3.8
<b>Ortalama Dinamometre Sabitleri</b>				$C_{11} = -0.577$ ORT.	$C_{21} = 1.27$ ORT.	$C_{31} = 1.52$ ORT.		





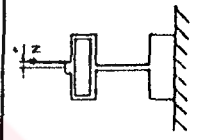
**EK-2** Dinamometreye Sadece Kesme Kuvveti Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

Gerçek Değerler (Newton)	Denejde Ölçülen Birim Uzama Değerleri (µε)			Dinamometre Sabitleri			(5.20) Kalibrasyon Eşitliğiyle Bulunan Değerler(Ölçülen Değerler) (Newton)	% Hata= $\frac{\text{Ölçülen Değer}-\text{Gerçek Değer}}{\text{Gerçek Değer}}$
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$C_{12} = \frac{\epsilon_1}{S}$	$C_{22} = \frac{\epsilon_2}{S}$	$C_{32} = \frac{\epsilon_3}{S}$		
S							$S = -0.064\epsilon_1 - 0.029\epsilon_2$	S'deki % Hata
2	-1	-65.75	-92.5	-0.5	-32.8	-46.2	1.97	- % 1.5
3	-1.75	-99	-137.5	-0.583	-33	-45.8	2.98	- % 0.6
4	-2.5	-133	-185.5	-0.625	-33.2	-46.3	4.01	% 0.2
5	-3	-166	-231.5	-0.6	-33.2	-46.3	5.006	% 0.1
<b>Ortalama Dinamometre Sabitleri</b>				$C_{12} = -0.577$ ORT.	$C_{22} = -33.05$ ORT.	$C_{32} = -46.15$ ORT.		



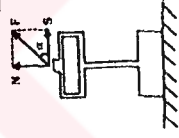
**EK-3** Dinamometre Normal Kuvvetin  $e=10\text{mm}$  Mesafede Eksantrik Olarak Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

Normal Kuvvet (Newton)	Uygulanan Normal Kuvvet x Eksantriklik (Nmm)	Deyide Ölçülen Birim Uzama Değerleri ( $\mu\epsilon$ )			Dinamometre Sabitleri		
		$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$C_{13} = \frac{\epsilon_1}{Ne}$	$C_{23} = \frac{\epsilon_2}{Ne}$	$C_{33} = \frac{\epsilon_3}{Ne}$
N	Ne						
2	20	-0.75	11.75	11.25	-0.0375	0.587	0.562
3	30	-1	17.5	16.75	-0.0333	0.583	0.558
4	40	-1.75	23.25	22.75	-0.0437	0.581	0.568
5	50	-2.25	28.75	28.25	-0.0450	0.575	0.565
<b>Ortalama Dinamometre Sabitleri</b>					$C_{13} = -0.0398$ ORT.	$C_{23} = 0.581$ ORT.	$C_{33} = 0.563$ ORT.



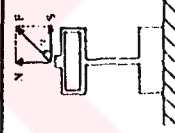
**EK-4** Dinamometreye  $\alpha=30^\circ$ 'lık Açıda F Bileşke Kuvvetinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

Gerçek Değerler (Newton)	Deneyde Ölçülen Birim Uzama Değerleri ( $\mu\text{E}$ )			(5.19) ve (5.20) Kalibrasyon Eşitlikleriyle Bulunan Değerler (Ölçülen Değerler)(Newton)			% Hata= $\frac{\text{Ölçülen Değer}-\text{Gerçek Değer}}{\text{Gerçek Değer}}$					
	Bileşke Kuvvet	Normal Kuvvet	Kesme Kuvveti	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$N=-1.67\epsilon_1+0.029\epsilon_2$	$S=-0.064\epsilon_1-0.029\epsilon_2$	$F=\sqrt{\frac{N^2}{N}+S^2}$	N'deki % Hata	S'deki % Hata	F'deki % Hata
F	$N=F \sin \alpha$	$S=F \cos \alpha$										
2	1	1.73		-1.5	-53.25	-76.5	0.96	1.64	1.9	-%4	-%5.2	-%5
3	1.5	2.59		-2.75	-79.75	-113	2.27	2.48	3.36	%51.3	-%4.2	%12
4	2	3.46		-3.5	-106.5	-151.5	2.75	3.31	4.3	%37.5	-%4.3	%7.5
5	2.5	4.33		-4.5	-132.5	-188.5	3.67	4.13	5.52	%46.8	-%4.6	%10.4



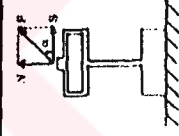
**EK-5** Dinamometreye  $\alpha=45^\circ$ lik Açıda F Bileşke Kuvvetinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

Bileşke Kuvvet	Gerçek Değerler (Newton)		Deneyde Ölçülen Birim Uzama Değerleri ( $\mu\text{E}$ )			(5.19) ve (5.20) Kalibrasyon Eşitlikleriyle Bulunan Değerler (Ölçülen Değerler) (Newton)				% Hata= $\frac{\text{Ölçülen Değer}-\text{Gerçek Değer}}{\text{Gerçek Değer}}$		
	Normal Kuvvet	Kesme Kuvveti	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$N=-1.67\epsilon_1+0.029\epsilon_2$	$S=-0.064\epsilon_1-0.029\epsilon_2$	$F=\sqrt{N^2+S^2}$	N'deki % Hata	S'deki % Hata	F'deki % Hata	
F	$N=F \sin \alpha$	$S=F \cos \alpha$										
2	1.41	1.41	-1.5	-38.5	-55.5	1.38	1.21	1.83	-%2.1	-%14.1	-%8.5	
3	2.12	2.12	-2.25	-58	-82.5	2.07	1.82	2.75	-%2.3	-%14.1	-%8.3	
4	2.82	2.82	-3.25	-77.5	-112	3.18	2.45	4.01	%12.7	-%13.1	%0.2	
5	3.53	3.53	-4.25	-96.25	-139	4.30	3.06	5.27	%21.8	-%13.3	%5.4	



**EK-6** Dinamometreye  $\alpha=60^\circ$ lık Açıda F Bileşke Kuvvetinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Veriler

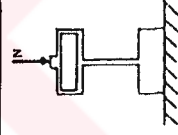
Gerçek Değerler (Newton)		Denejde Ölçülen Birim Uzama Değerleri ( $\mu\epsilon$ )			(5.19) ve (5.20) Kalibrasyon Eşitlikleriyle Bulunan Değerler (Ölçülen Değerler) (Newton)				Ölçülen Değer-Gerçek Değer Gerçek Değer		
Bileşke Kuvvet	Normal Kuvvet	Kesme Kuvveti	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	N	S	F	N'deki % Hata	S'deki % Hata	F'deki % Hata
F	$N=F \sin\alpha$	$S=F \cos\alpha$				$N=-1.67\epsilon_1+0.029\epsilon_2$	$S=-0.064\epsilon_1-0.029\epsilon_2$	$F=\sqrt{N^2+S^2}$			
2	1.73	1	-1.5	-21	-31.5	1.89	0.7	2.01	%9.2	-%30	%0.5
3	2.59	1.5	-2.25	-31.5	-47.25	2.84	1.05	3.02	%9.6	-%30	%0.6
4	3.46	2	-3	-42.75	-63.75	3.77	1.43	4.03	%8.9	-%28.5	%0.7
5	4.33	2.5	-4	-53.25	-79.5	5.13	1.8	5.43	%18.4	-%28	%8.6



**EK-7** Dinamometreye Basma Halinde Uygulanan Normal Kuvvetlerin Ölçülmesinde Bulunan Kalibrasyon Eşitlikleri ve

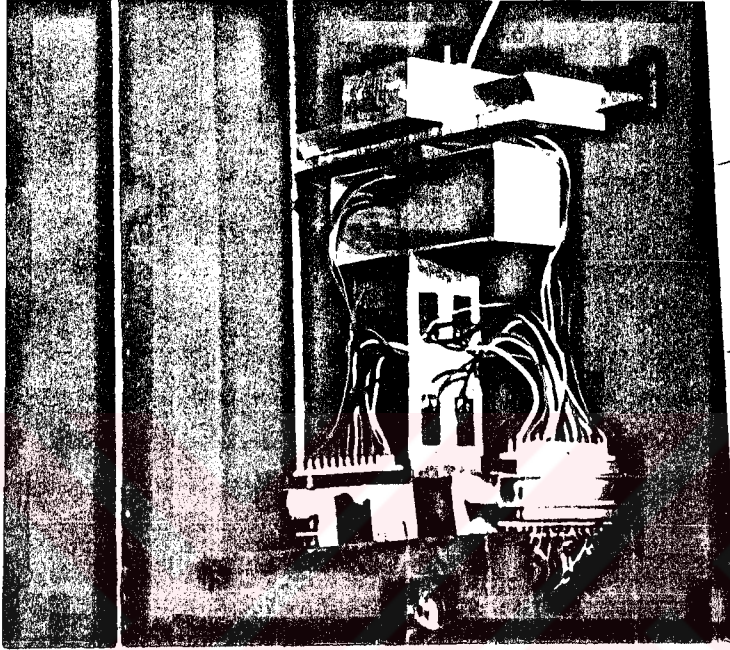
Bu Kalibrasyon Eşitliklerinin Kontrolü İçin Elde Edilen Veriler

Gerçek Değerler (Newton)	Deneyde Ölçülen Birim Uzama Değerleri ( $\mu\epsilon$ )		Dinamometre Sabitleri		Kalibrasyon Eşitlikleriyle Bulunan Değerler (Ölçülen Değerler) (Newton)		% Hata = $\frac{\text{Ölçülen Değer} - \text{Gerçek Değer}}{\text{Gerçek Değer}}$	
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$C_{11} = \frac{\epsilon_1}{N}$	$C_{21} = \frac{\epsilon_2}{N}$	1. Wheatstone Köprü Devresi ile Ölçülen Normal Kuvvet $N = \frac{\epsilon_1}{C_{11}}$ ORT.	2. Wheatstone Köprü Devresi ile Ölçülen Normal Kuvvet $N = \frac{\epsilon_2}{C_{21}}$ ORT.	1. Wheatstone Köprü Devresi ile Ölçümede Bulunan Normal Kuvvet İçin	2. Wheatstone Köprü Devresi ile Ölçümede Bulunan Normal Kuvvet İçin
2	1.75	-5.5	0.875	-2.75	1.90	1.90	-%5	-%5
3	2.75	-9.5	0.916	-3.16	2.99	3.28	-%0.3	%9.3
4	3.75	-10.75	0.937	-2.68	4.08	3.71	%2	-%7.2
5	4.75	-15	0.950	-3	5.16	5.19	%3.2	%3.8
<b>Ortalama Dinamometre Sabitleri</b>			$C_{11} = 0.919$ ORT.	$C_{21} = -2.89$ ORT.				

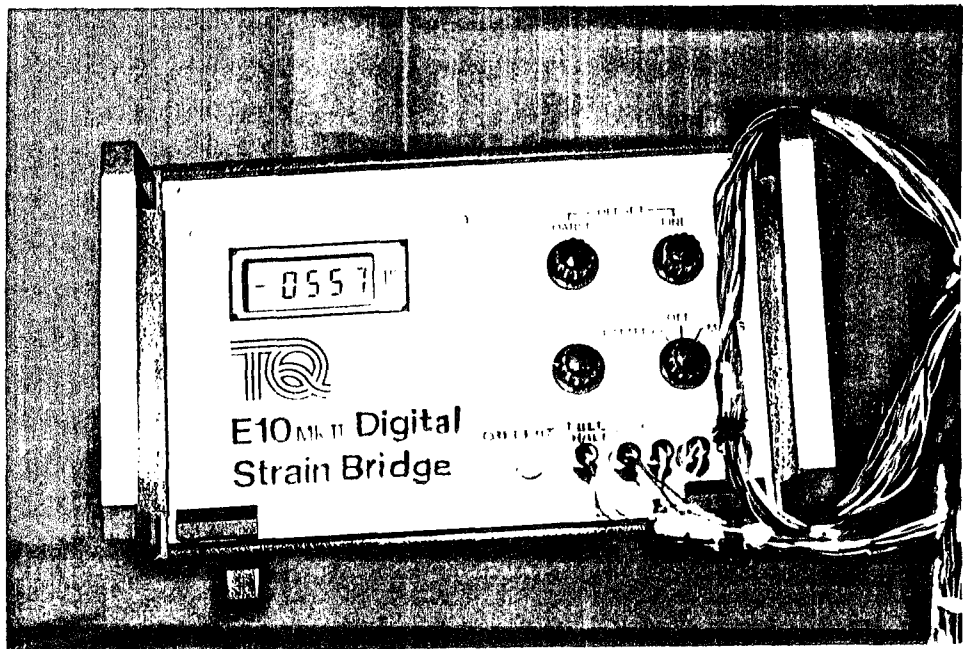


EK-8

Fotoğraf 1 Dinamometre Yüzeğine Yapıştırılmış Strain Gage'ler ve Strain Gage'lerin Uçlarına Lehimlenmiş Bağlantı Kabloları



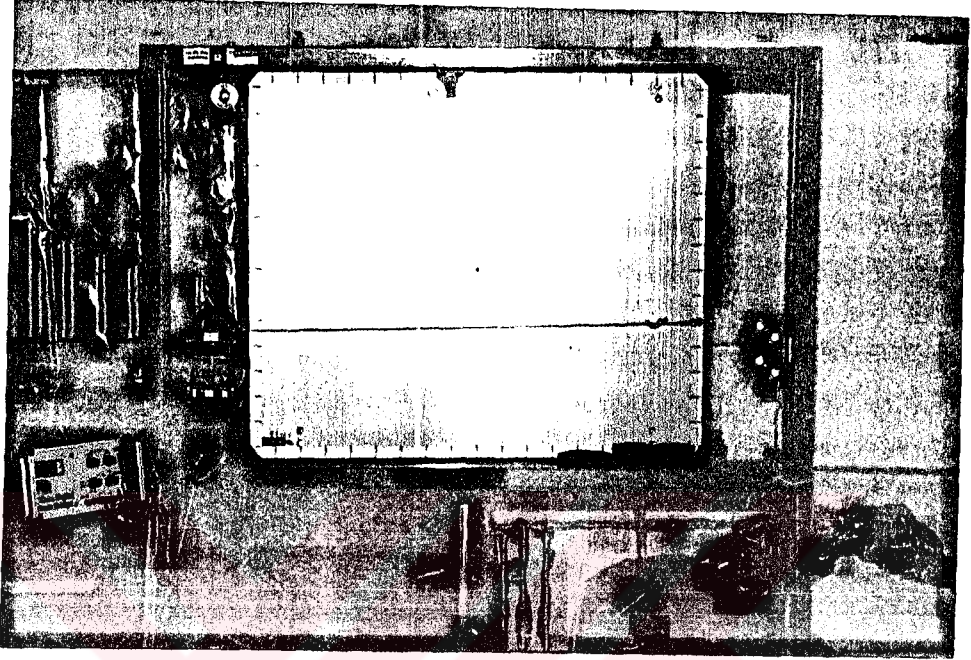
Fotoğraf 2 Deneçlerde Kullanılan E-10 MK II Tipi Strain Gage Cihazı



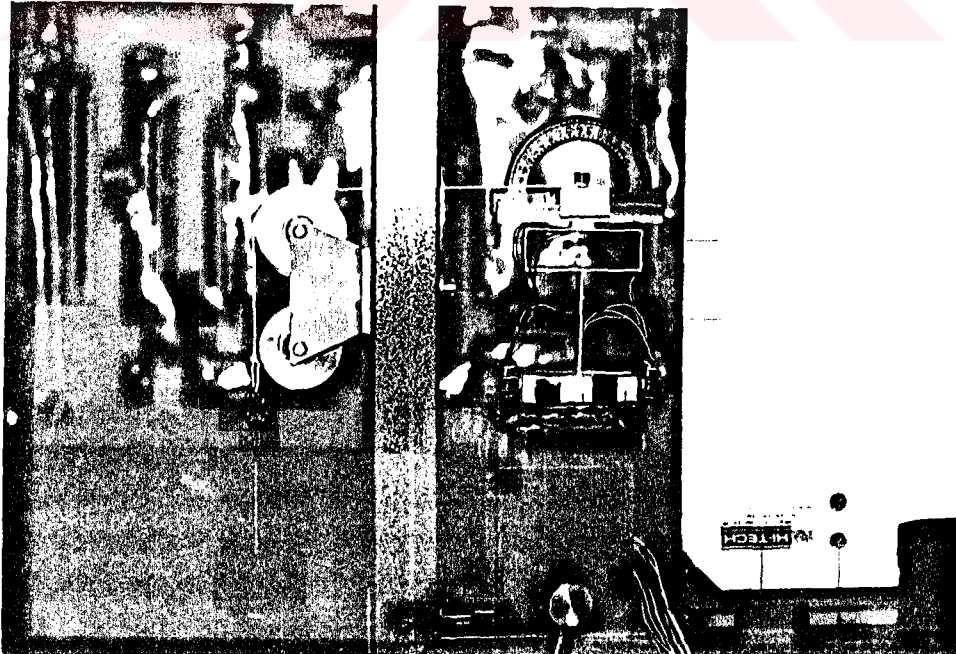


EK-9

Fotoğraf 3 Deney Düzenegi



Fotoğraf 4 Kuvvet Uygulama Düzenegi



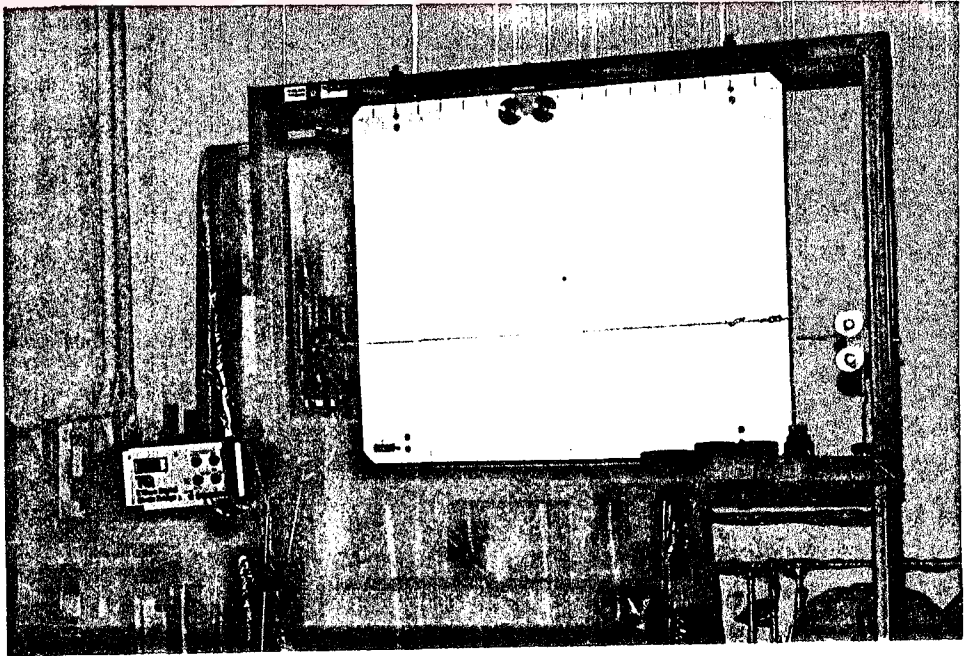


**EK-10**

Fotoğraf 5 Dinamometreye Bileşke Kuvvet Uygulanması



Fotoğraf 6 Dinamometreye Kesme Kuvveti Uygulanması



EK-11

Fotoğraf 7 Dinamometreye Normal Kuvvet Uygulanması

