



T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

MÜHENDİSLİKTE DENEYSEL METODLAR DERSİ
GERİLME ANALİZİ DENEY FÖYÜ

1. DENEYİN AMACI:

Yük etkisi altındaki bir yapı veya makine parçasının herhangi bir noktasındaki gerilme değerinin deneysel olarak belirlenmesi deneyin amacını oluşturmaktadır.

2. DENEYİN ÖNEMİ VE KULLANILDIĞI ALANLAR:

Mühendislik yapıları ve taşıyıcı sistemlerin tasarımları sırasında dış yükler altında ortaya çıkan gerilmeler teorik olarak hesaplanmakta ve bu sistemler belirli güvenlik katsayıları ile yeterli dayanıma sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Tasarlanan yapının karmaşıklığı arttıkça matematiksel hesaplamalar zorlaşmakta ve bu nedenle yapının daha basit bir modeli üzerinden hesaplar yapılarak çeşitli kabullerle sonuca ulaşılmaktadır. Bu kabullerin doğruluğunu ispatlamak için deneysel gerilme analizinden faydalanılmaktadır. Ayrıca pratikte var olan bazı problemler, geometri ve yükleme koşulları açısından çok karmaşık olabilmekte ve bu problemlerin çözümü için gelişmiş bilgisayarlar kullanılarak problem modellenmekte ve gerçek durum birebir simüle edilerek analiz edilmeye çalışılmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyonların pratik problemi ne ölçüde karşıladığının yani simülasyon sonuçlarının doğrulamasını yapmak için de deneysel gerilme analizinden faydalanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları ise şunlardır;

- ▶ Deplasman ve Pozisyon Sensörlerinde
- ▶ Sağlık Testlerinde
- ▶ Esneklik Algılamada
- ▶ Dijital Barometrelerde
- ▶ Alarm Cihazlarında kullanılmaktadırlar.

3. TEORİK BİLGİ:

Elastik bir cisim, en genel halde bir kuvvet sisteminin ve bağ kuvvetlerinin etkisinde dengede olsun. Cisimde genelde noktadan noktaya değişen bir gerilme hali, bunun sonucu olarak da şekil değiştirme meydana gelecektir.

Mühendislik problemlerinde cismin herhangi bir noktasındaki gerilme halini analiz etmek için (gerilme bileşenlerini, asal gerilmeleri ve doğrultularını vs bulmak için); gerilmelerin ölçülmesi mümkün değildir. Bunun için birim uzamalar (strains) ölçülerek, gerilme analizi yapılır. Cismin bir A noktasında, ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} şekil değiştirme bileşenlerinin bilindiği kabul edilsin. Bu takdirde bu noktadaki gerilme analizi için gerekli bütün hesaplamalar yapılabilir. Bir noktadaki gerilme analizini yapabilmek için önce,

$$\epsilon = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

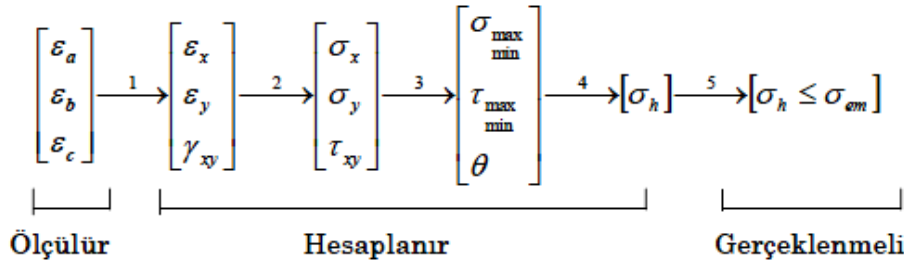
bağıntısını herhangi üç doğrultuyu tanımlayan açılar için yazacak olursak;

$$\varepsilon_a = \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \sin \theta_1 \cos \theta_1$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \sin \theta_2 \cos \theta_2$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \sin \theta_3 \cos \theta_3$$

bulunur. Burada ε_a , ε_b , ε_c ölçülen değerlerdir, θ_1 , θ_2 , θ_3 değerleri ise bilinmektedir. Bu üç bağıntı kullanılarak ε_x , ε_y ve γ_{xy} değerleri hesaplanır. O halde düzlem gerilme hali olan herhangi bir noktadaki gerilme analizini yapabilmek için, seçilen en az 3 doğrultuda ε 'ların (birim uzamalar) ölçülmesi gerekir. Seçilen üç doğrultudaki birim uzamalar ölçüldükten sonra, aşağıdaki akış diyagramında görülen işlemler yapılır.



Bu diyagramdaki işlemler için, belirtilen numaralarla tanımlanan aşağıdaki bağıntılar kullanılır.

$$1) \quad \varepsilon_\xi = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

2)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y] \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x] \\ \tau_{xy} &= G \gamma_{xy} \end{aligned} \right\} \text{İki eksenli halde Hooke bağıntıları}$$

3)

$$\sigma_{\max/\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}\right)$$

$$\tau_{\max/\min} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(-\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}}\right)$$

4) Seçilecek bir HasarTeorisi (Failure Theories).

3.1. Birim Uzamaların Ölçülmesi: Pratikte şekil değiştirme elemanı olarak birim uzamalar (ϵ -strain) değişik prensiplerle tasarlanan elemanlarla ölçülür. Bu elemanlara genelde *strain gauge* adı verilir.

Bunlar değişik fizik prensipleri kullanıldığında,

- 1-) Mekanik Strain-Gaugeler
- 2-) Optik Strain-Gaugeler
- 3-) Elektriksel Strain-Gaugeler
- 4-) Akustik Strain-Gaugeler
- 5-) Pnömatik Strain-Gaugeler

şeklinde gruplandırılabilirler. Bunlar içinde pratikte en çok kullanılan grup elektriksel strain gauge'lerdir.

3.1.1. Elektriksel Strain-Gaugeler:

Elektriksel strain-gauge'ler kullanma prensiplerine göre kendi içinde üç guruba ayrılırlar.

- 1-) İndüktif Strain-Gaugeler
- 2-) Kapasitif Strain-Gaugeler
- 3-) Rezistif Strain-Gaugeler

Bunlar şekil değiştirme sonucu strain gauge elemanının bağlı olduğu devrede indüktans, kapasitans ve rezistans değişimi verecek şekilde tasarlanmışlardır.

3.1.2. Strain Gauge'lerden Beklenen Özellikler:

Birim uzama ölçümü için algılayıcı olarak kullanılacak strain gauge'den beklenen özellikler;

- 1-) Kalibrasyon sabiti sıcaklık ve zamanla değişmemeli.
- 2-) Birim uzamalar 1×10^{-6} mertebesinde ölçülebilmeli.
- 3-) Noktasal ölçme yapılabilmesi.
- 4-) Dinamik ve statik ölçmeler yapılabilmesi.
- 5-) Ekonomik olmalı.
- 6-) Ölçümler kolay olmalı.
- 7-) Strain-Gauge cevabı lineer olmalı.
- 8-) Hassas ölçüm yapılabilmesi.

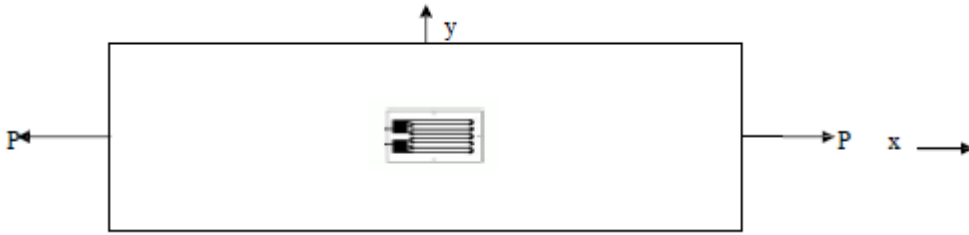
Bu özelliklere en iyi uyan tip elektrik rezistans strain gauge'leridir. Burada sadece bu tipin özellikleri uygulama ve ölçme yöntemleri detaylı olarak incelenecektir. Bundan sonraki bölümlerde strain gauge terimi elektriksel rezistans strain gauge'leri için kullanılacaktır.

Strain Gauge (Gerinim Ölçer) Konumlandırılışları :

Gerinim ölçerler malzemelerde meydana gelen şekil değişikliklerini ölçmek için kullanılırlar. Malzemede meydana gelen gerinimler, dış veya iç etkiler sonucu oluşurlar. Bu etkiler: kuvvet, basınç, moment veya ısı olabilir.

Gerinim ölçerler, ölçüm yapılacak malzemenin yüzeyine özel bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılırlar. Gerilim analizinin tam yapılabilmesi için bir noktadan üç gerinim değeri okunması gerekir fakat bazı özel durumlarda bir veya iki gerinim değerinin okunması da yeterli olmaktadır.

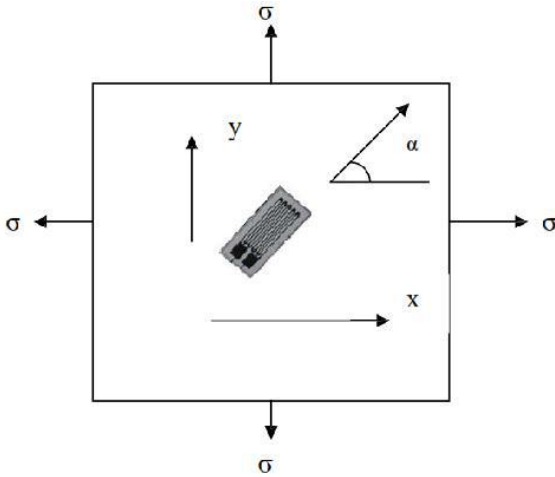
- Tek Eksenli Gerilme Durumu



Şekilde gösterilen durumda sadece “x” yönünde bir gerilme vardır ve bu yönde yerleştirilen tek gerinim ölçer bize bu yöndeki uzamayı vermektedir.

$$\sigma_{xx} = E \epsilon_{xx} \quad (1)$$

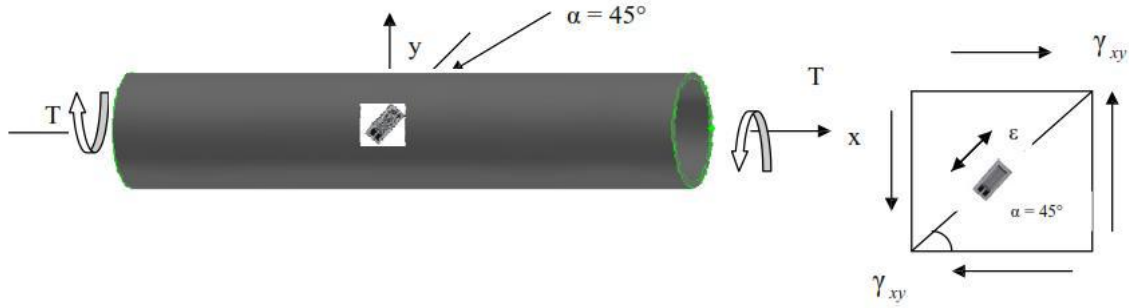
- İzotropik Gerilme Durumu



Şekilde gösterilen izotropik gerilme durumunda $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ ve $\tau_{xy} = 0$ olur. Bu durumda malzeme yüzeyindeki gerilme durumunu belirlemek için tek bir gerinim ölçer, malzeme yüzeyine herhangi bir pozisyonda yerleştirilebilir ve gerilme değerleri aşağıdaki denklemlerden elde edilebilir.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{E\varepsilon}{1-\nu} \quad (2)$$

- Sadece Burulma



Bu durumda, gerinim ölçer, asal gerilme yönlerinden biri doğrultusunda (x eksenine ile 45°) yerleştirilir. Maksimum kayma gerilmesi aşağıdaki denklemden elde edilir.

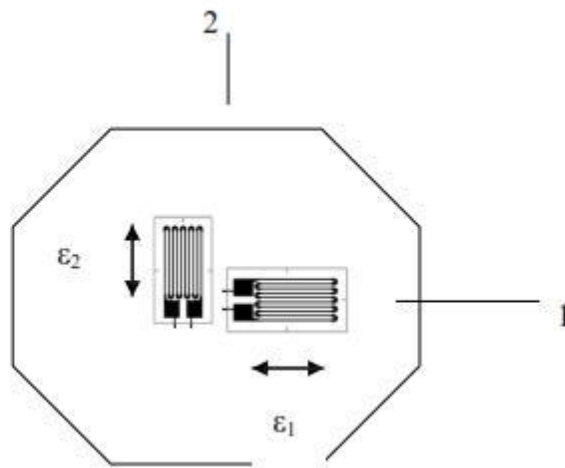
$$\tau_{xy} = \tau_{\max} = G\gamma_{xy} \quad (3)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon \quad (\varepsilon: \text{gerinim ölçerden okunan değer}) \quad (4)$$

- İki Eksenli Gerilim Durumu

a) Eğer asal gerilme yönleri biliniyorsa, iki elemanlı dikdörtgen rozet gerinim ölçer malzeme üzerine yerleştirilir ve asal gerinim değerleri (ε_1 ve ε_2) okunabilir. Aşağıdaki formüller kullanılarak asal gerilme değerleri elde edilebilir.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \text{ ve } \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (5)$$



b) Eğer asal gerilme yönleri bilinmiyorsa, üç elemanlı rozet gerinim ölçer kullanılmalıdır.

Gerinim (strain), cisim üzerine yük uygulandığında , birim uzunlukta oluşan deformasyon miktarı olarak tanımlanır. Başlangıç uzunluğundaki toplam deformasyonun, başlangıç uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanır.

Temel olarak tüm strain gauge'ler mekanik hareketi elektronik sinyale çevirmek için tasarlanmışlardır. Strain gauge mekanik gerinimin fonksiyonu olarak değişen bir dirence sahiptir. Dirençteki değişim ohm-metre birimi cinsinden ölçülebildiği halde, birim uzama ölçüm cihazları, direnç değişimini voltaj birimine çevirir. Giriş gerinimi ile çıkış voltajı arasındaki ilişki, sistem hassasiyetinin saptanmasında kullanılabilir.

Bir parça telin elektriksel direnci, telin boyu ile doğru orantılı ve kesit alanı ile ters orantılıdır. Gerinim ölçümü için, strain gauge yapının yüzeyine yapıştırılır. Direnç kesit alanı ve/veya uzunluğa bağlı olarak değişir. Dirençteki bu değişim, veri toplama sistemi yardımı ile ölçülür ve sonuç strain birimine dönüştürülerek görüntülenir. Her bir strain gauge, üretici firma tarafından belirlenmiş olan gerinim ile direnç arasında uygunluğu sağlayan ve gauge faktörü denilen, hassasiyet faktörüne sahiptir.

Tel Direnci

- L uzunluğunda ve A kesit alanına sahip bir telin elektrik direnci şu formülle ifade edilebilir:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Bu eşitlikte ρ telin malzemesinin özgül direncidir. (ρ sembolünü yoğunluk için kullanılan sembolle karıştırmayınız.)

- Bir telin elektrik direnci telde meydana gelen gerinim ile değişim gösterir:

- o Gerinim artınca tel uzunluğu L artacak ve dolayısıyla telin elektrik direnci olan R'de artacaktır.

- o Gerinim artınca telin kesit alanı A azalacak ve dolayısıyla telin elektrik direnci olan R'de artacaktır.

- o Çoğu malzeme için gerinim artınca telin özgül direnci ρ artacak ve dolayısıyla telin elektrik direnci R'de artacaktır.

- Kısacası gerinim artınca telin elektrik direnci de artacaktır.

- Aslında sabit sıcaklıkta gerinim ile birlikte telin elektrik direnci de doğrusal olarak artacaktır.

- Matematiksel olarak şöyle ifade edilebilir:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

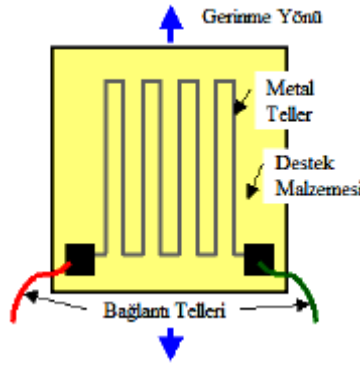
Burada;

- R : Strain gauge'in deforme olmadan önceki direnci,
 ΔR : Şekil değiştirme nedeniyle strain gauge üzerinde oluşan direnç değişimi,
 $\Delta L/L=\epsilon$: Şekil değiştirme (birim deformasyon), olarak adlandırılmaktadır.

Metalik strain gauge'ler için gauge faktörü (GF) genel olarak 2 civarındadır.

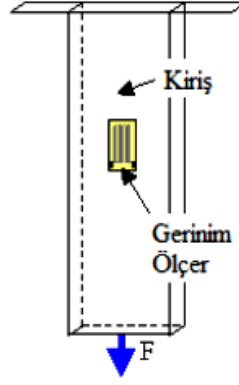
Gerinim Ölçer

- Yukarıda verilen bilgi (telin elektrik direncinin gerinim ile artış göstermesi) gerinim ölçerlerin çalışmasını anlamak için önemlidir.
- Bir gerinim ölçer genelde plastik olan bir alt malzemeye (destek malzemesi) gömülü küçük çaplı bir tel içermektedir. Bu tel, uzunluğunu artırmak için birkaç defa gidiş geliş şeklinde döşenmiştir. Daha uzun tel demek daha büyük direnç demektir. Bu da gerinim ile ortaya çıkan daha büyük direnç değişimi demektir. Aşağıdaki şekilde örnek bir gerinim ölçer gösterilmektedir:



Şekilde verilen gerinim ölçerde dört adet tel döngüsü kullanılmıştır. Bu da tek bir telin uzunluğunun sekiz katı tel uzunluğu demektir. Ticari olarak piyasada bulunan bazı gerinim ölçerlerin daha fazla tel döngüsü bulunmaktadır.

- Uygulanan gerininin yönü şekilde gösterilmektedir. Gerinim ölçerlerde gömülü olan döngülü telin iki ucu bağlantı telleri yardımıyla elektrik direncindeki değişimi ölçecek elektronik bir devreye bağlanmaktadır.
- Gerinim ölçerler nasıl kullanılır? Bunu gösteren bir laboratuvar uygulaması bu deneyimizde anlatılacaktır.
- Eksenel gerininin oluştuğu bir kiriş düşünün. Bu kirişte meydana gelen eksenel gerinim ölçülmek istenmektedir.
- Gerinim ölçer, uygulanan yükten dolayı oluşacak eksenel gerinim ile aynı yönde olacak şekilde kirişin yüzeyine yapıştırılır:



- Kiriş yüzeyinde gerinim meydana gelince gerinim ölçerde yükün uygulandığı yönde uzar. Böylece meydana gelen gerinim ile gerinim ölçerin direnci de artar. Gerinim ölçerin (döngülü telin) direncinde meydana gelen değişimin ölçülebildiği farz edilirse gerinim ölçerler gerinim ölçmede kullanılan bir metot haline gelirler.

Yaygın Olan Gerinim Ölçer Değerleri

- Burada gerinim ölçer direnci, gerinim ölçer faktörü ve gerinim ölçer direncinde tahmin edilen değişim için yaygın olan değerler verilecektir:

- o Gerinimsiz bir durumda gerinim ölçerin sahip olduğu elektrik direnci R değeri, yaygın olarak ya 120Ω veya 350Ω dur.

- o En yaygın ticari gerinim ölçerlerin elektrik direnci 120Ω dur.

- o Gerinim ölçerlerde kullanılan tel döngüsünün gerinim ölçer faktörü ise genelde 2.0 civarındadır.

- o Metal kirişlerin yer aldığı mühendislik uygulamalarının çoğunda aksenal gerinim değeri ϵ_a , 10^{-6} ila 10^{-3} aralığında bulunmaktadır.

- Verilen bu değerleri ve yukarıda gerinimin ve gerinim ölçer faktörünün bir fonksiyonu olarak ifade edilen direnç formülünü kullanarak,

$$\frac{dR}{R} = S\epsilon_a, \text{ or } dR = RS\epsilon_a = (120\Omega)(2.0)(10^{-6} \text{ to } 10^{-3}),$$

i.e. $dR = 0.00024\Omega \text{ to } 0.24\Omega$

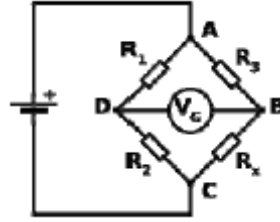
- Burada elde edilen dR değerinin ne kadar küçük olduğuna dikkat ediniz!
- Tipik bir 120Ω gerinim ölçer için direncinde meydana gelen değişimin R'ye oranı olarak ifade edilen dR/R değeri 2×10^{-6} dan 2×10^{-3} ya kadar değişim göstermektedir.
- Gerinim ölçerlerle çalışılırken karşılaşılan ana problem dR/R değerinin çok küçük olmasıdır. dR/R değeri çok küçük olduğu için döngülü telin direncinde meydana gelen değişimin ohmmetre kullanılarak ölçülmesi doğru bir yol değildir. Çünkü çoğu ohmmetreler dirençte meydana gelen değişimi ölçmek için yeter derecede çözünürlüğe sahip değildir. Dirençte

meydana gelen değişim miktarları direncin kendi değerine göre üç ila altı kat daha küçüktürler.

Strain Gauge Devreleri

Wheatstone Köprüsü

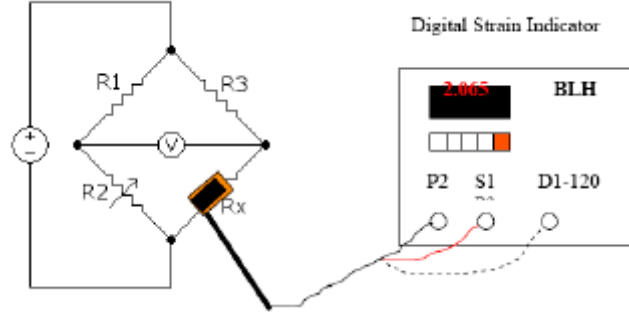
Strain gauge indikatörleri genellikle, Wheatstone köprü devresi formunda elektriksel olarak bağlı dört strain gauge elemanı şeklinde kullanılır.



Wheatstone köprüsü, statik veya dinamik elektriksel direnç ölçmek için kullanılan bir köprü devresidir. Şekil'deki devrede, R_x ölçülmek istenen dirençtir; R_1 , R_2 ve R_3 direnci bilinen rezistanslardır ve R_2 direnci ayarlanabilir. Eğer bilinen iki koldaki iki direncin oranı (R_2/R_1) bilinmeyen iki koldaki direncin oranına (R_x/R_3) eşitse, o zaman iki orta nokta (B ve D) arasındaki voltaj sıfır olacaktır ve V_g galvanometresinden hiç akım geçmeyecektir. Bu koşula ulaşana kadar R_2 değişir. Bu noktaya ulaşıldığında, kesinlik en üst seviyeye ulaşır. Bu yüzden, eğer R_1 , R_2 ve R_3 yüksek kesinlikli olarak biliniyorsa, o zaman R_x 'de yüksek kesinlikle ölçülebilir. R_x direncindeki çok küçük değişiklikler bile dengeyi bozar ve kolaylıkla saptanır. Strain gauge Wheatstone köprüsü genellikle, sabit rezistans sayısına karşılık aktif strain gauge elemanı sayısına bakılarak tanımlanır. Çeşitli yaygın konfigürasyonlar ve bunlar arasındaki ilişki Tablo 1'de belirtilmiştir.

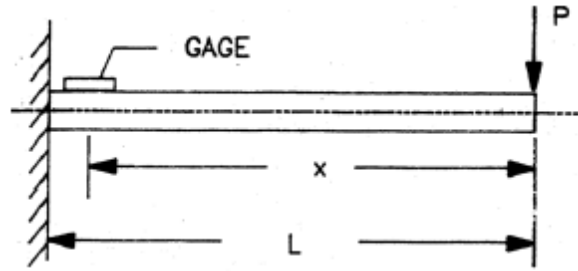
Tablo 1. Wheatstone Köprüsü

Köprü Tipi	Aktif Rezistans Elemanları	Hassasiyet Sabitleme Rezistansları	Genel Uygulamalar
Çeyrek Köprü (Quarter Bridge)	R_1	R_2, R_3, R_4	Kullanımı daha kolaydır. Malzeme karşılaştırması gerektirir.
Yarım Köprü (Half Bridge)	R_1, R_3	R_2, R_4	İstenmeyen ısıl etkilerin veya eğilme etkilerinin iptal edileceği durumlar.
Tam Köprü (Full Bridge)	R_1, R_2, R_3, R_4	-	Arttırılmış hassasiyet.



ÖRNEK UYGULAMA:

Strain Gauge olmadan elastisite modülünün belirlenmesi:



Ankastre mesnetlenmiş bir kirişin ucunda meydana gelen maksimum deplasman;

$$y_{\max} = \frac{PL^3}{3EI} \text{ dir.} \quad (1)$$

Dikdörtgen kesite sahip bir kiriş için atalet momenti;

$$I = \frac{bh^3}{12} \text{ dir.} \quad (2)$$

Eğer uyguladığımız P kuvvetinin değerini biliyorsak, kiriş ucunda meydana gelen maksimum deplasmanı mikrometre ile ölçüp, (1) numaralı denklem vasıtası ile kirişe ait elastisite modülünü tespit edebiliriz.

Strain Gauge yardımı ile elastisite modülü ve poisson oranının belirlenmesi:

Eğilmeden dolayı meydana gelen gerilme;

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \text{ ve} \quad (3)$$

P kuvvetinden dolayı meydana gelen eğilme momenti;

$$M = Px \text{ dir.} \quad (4)$$

Hooke Kanunu'na göre;

$$\sigma = E.\varepsilon_1 \text{ dir.} \quad (5)$$

Değişik P kuvvetleri etkisi altında strain gauge'ler üzerinden, strain indikatör yardımı ile, boyuna yöndeki strain (ϵ_1) değerleri okunur. Gerilme değerleri de (3) ve (4) denklemleri ile bulunduktan sonra elde edilen değerlerin tümü (5) denkleminde yerine konularak elastisite modülü (E) değeri hesaplanır.

Poisson oranını tespit etmek için enine yöndeki strain değerleri (ϵ_2) de strain indikatör yardımı ile tespit edilir.

$$\nu = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (6)$$

Elde edilen boyuna ve enine yöndeki strain değerlerinden (6) denklemini yardımı ile poisson oranı tespit edilir.

KAYNAKLAR

[1] İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi Deney Raporu.

[2] Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Deneysel Gerilme Analizi Deney Raporu.

[3] Tunçer Toprak, Deneysel Gerilme Analizi Raporu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

[4] Başkent Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Makine Mühendisliği Laboratuvarı Deney Raporu.