



T. C.
Uludağ Üniversitesi
Balıkesir Mühendislik Fakültesi

I. Balıkesir Mühendislik Sempozyumu

26-27 NİSAN 1988

Uludağ Üniversitesi Basımevi - 1988

STRAIN GAUGE VE UYGULAMALARI (Strain Gauge and its Applications)

İrfan AY*

ÖZET : Makina parçaları üzerine uygulanan yükten dolayı doğan gerilmelerin analizi problemlerinin çözümünde, strain-gauge çok önemlidir. Strain gerilme sonucunda ortaya çıkar. Statik ve dinamik olabilir. Strain ölçücü elemanlara STRAIN-GAUGE adı verilir. Tel tipi, folye tipi ve yarı iletken ti - pinde olanları vardır. Pek çok gerilme analizinde rahatça kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada, strain ve strain ölçücüler araştır - rılmış olup, uygulama alanları hakkında bilgiler verilmiş - tir.

SUMMARY : A strain gauge is important in solving the problems of stress analysis which arise from the load applied on machine parts. The strain occurs a result of stress. It can be both static and dynamic. The device that measures strain is called " STRAIN GAUGE" It has different types such as wire type, foil type and semicon - ductor type. It can be used easily in many applications of stress.

In this article, strain and strain gauges and their fields of application had been investigated.

GİRİŞ : Mühendisliğin gerilme analizinde yakın zamana kadar en önemli problemlerinden birisi, bir ölçü aleti kullanarak parça üzerinde doğacak gerilmeleri ölçebilmektir. Bu yüzden de yakın zamana kadar pek çok gerilme problemi emniyet katsayı - ları esas alınarak çözülmüştür. Bu gün strain-gauge kullanıla - rak bu problemin üstesinden gelinmektedir.

Strain ölçümünün temeli 1866 da Lord Kelvin'in bir me - tal tel üzerine gerilme uygulandığında, telin uzunluğu ve çapı değiştiğinde elektrik direncinin de değiştiğini saptamasıyla atılmış oldu(3). Bu gün mevcut ticari gauge'leri iki temel ka -

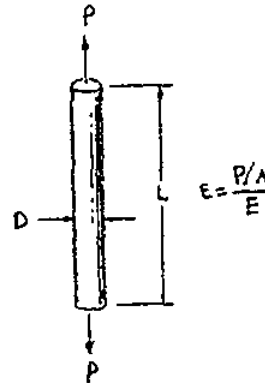
* Yard. Doç. Dr.; Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi .

tegoriye sokabiliriz. 1)- Metalik strain algılayıcı gauge'ler (Tel ve folye gauge'leri) 2)-Metalik olmayan yarı iletken gauge'leridir. Bu gün bu gauge'lerle kurallara uygun teknik ve cihazların kullanılmasıyla (± 10 pınc/inç) nisbetinde doğru ölçüm yapılabilmekte, ayrıca soğuk bölge ($\approx 20^{\circ}\text{C}$) ile $\approx 650^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklık bölgelerinde de, hem statik hem de dinamik strain'lerin güvenilir değerleri elde edilmektedir(1).

Özellikle direnç esaslı strain-gauge'ler yük, basınç, tork otomatik kontrol ve cerrahi alanlarda pek çok uygulama alanları buğmuşlardır. Bu makalede, strain'in tanımı, çeşitleri, yapısı yerleştirilmesi, sıcaklık etkileri ve kompenzasyonu ve uygulama örnekleri incelenmiştir.

1. STRAIN (Gerinim, Genlik, Uzama, Birim şekil değiştirme miktarı)

Kelime anlamı olarak strain'in tam Türkçe karşılığı henüz oturtulmamıştır. Literatür'de ve pek çok bilimsel toplantılarda, yukarıda da gösterildiği gibi bahsedilmektedir. Bu makalede orijinal adı muhafaza edilecektir (Gauge = Ölçücü).



Şekil 1. Basit bir çubukta strain.

Strain'i tanımlamak için P yüküne maruz kalmış bir çubuk düşünelim (7). Uzunluğu L, çapı D olsun. Kesiti A ile belirtilsin. Çubuğa yük uygulanır ve elastik sınıra aşmazsa;

$$\epsilon = \frac{P/A}{E} = \frac{\sigma}{E}$$

ifadesiyle eksenel strain doğar. Burada σ : Eksenel gerilme, E : Young Modülü'dür. Birim eksenel strain ise;

$$\epsilon_L = \frac{dL}{L}$$

olur. Aynı şekilde çapsal yönde de bir m strain doğar, ve

$\epsilon_r = -\frac{dD}{D}$ olur. Çap yönündeki birim strain'in, eksen yönündeki birim strain'e oranına POISSON ORANI denir.

$$\mu = - \frac{\epsilon_D}{\epsilon_L} = - \frac{dD/D}{dL/L}$$

Pek çok metal için poisson oranı 0,3 civarındadır. En düşük (Zn) da $\mu = 0,21$ en büyük pirinç'te $\mu = 0,35$, çelik için $\mu = 0,2$ dir. Eğer gerilme altındaki malzeme plastik durumda ise, hacim değişen strain ile sabit kalır ve;

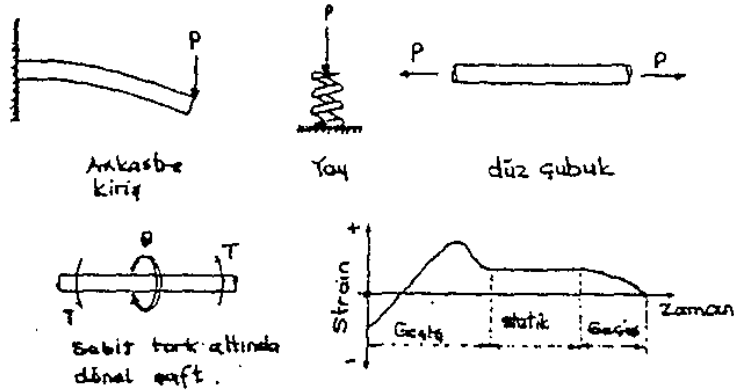
$$dV = L dA + A dL = 0 \quad \frac{dA}{A} = - \frac{dL}{L}$$

Bu ifade çap ile açıklanırsa $A = \pi D^2 / 4$

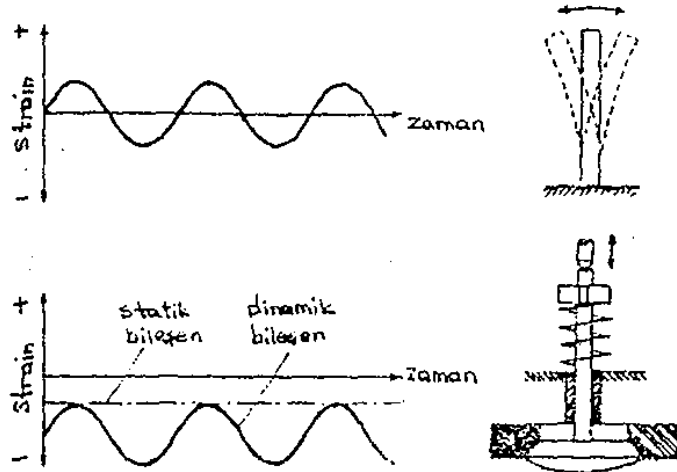
$$2 \frac{dD}{D} = - \frac{dL}{L}$$

olur. Bu şartlar altında $\mu = 0,5$ dir.

Şekil 2 ve şekil 3 te değişik strain durumları gösterilmiştir. Zaman içinde sabit kalan strain'e STATİK strain, zamanla değişen strain'e DİNAMİK strain denir. Bir parça hem statik hem de dinamik strain'e aynı zamanda maruz kalabilir.



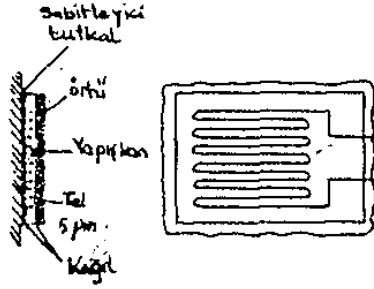
Şekil 2, Statik strain durumları.



Şekil 3. Dinamik strain, statik-dinamik strain durumu.

2. STRAIN-GAUGE YAPISI VE KULLANILACAKI YÜZEYE YAPIŞTIRILMASI

Özel bir teknikle hazırlanan çok ince bir tel Şekil 4 te görüldüğü gibi ince plastik yaprakcık üzerine yerleştirilir. Aynı plastik yaprakcıkla üstü örtülür. Gerekli yerlerde sağlam - laştırma band'cıkları ve ayakları sağlandıktan sonra basit bir strain-gauge üretilmiş olur. Bu kadar kolay anlatılmasına rağmen strain gauge imali çok hassas ve yüksek teknoloji gerektirir(7).



Şekil 4 . Strain-gauge yapısı.

Bir strain gauge ölçüm yapılacağı yere, yerleştirilmeden önce iki şeye dikkat etmek lazımdır. a)- Önce yüzey ince zımpara ile zımparalanmalı, çuha ile temizlemeyi asetonla temizleme izlemelidir. b)- Yapıştırıcının kuruyup tamamen sertleşmesi için yeterli kadar zaman tanınmalıdır. Yapışkan, gauge'in kenar çevresinde kurumuş olsa bile, alt kısmı hala ıslak kalmış olabilir. Üm - künse 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmalıdır. Yapıştırıcı olarak kullanılan pek çok değişik madde kullanılır. Ayrıntılı bilgi literatürde mevcuttur(7). Yapıştırıcı sürüldükten sonra strain-gauge monte edilir, üzerine özel plastik folye örtülerek baş parmakla tam oturması sağlanır. Bu konuda imalat - çı firmaların kullanma talimatlarına dikkat edilmelidir.

3. GAUGE FAKTÖRÜ VE ÇAPRAZ HASSASİYET

Gauge faktörü, strain gauge'in hassasiyetini tanımlamada veya strain gaugelerin çıkış karakteristiklerini belirtmede kullanılır.

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

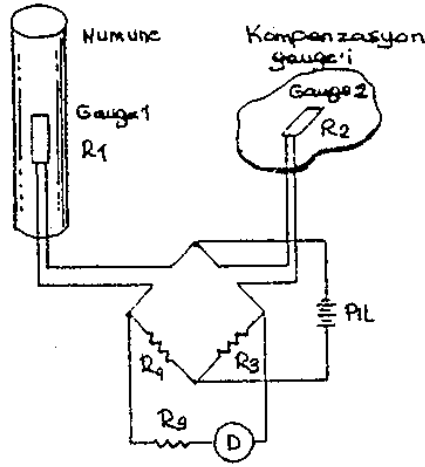
olarak tariflenir. Bu terim yalnızca boyutsal değişim açısından düşünüldüğünde, elastik sınırlar içinde yaklaşık 1,5-2 değerinde bulunacaktır. Bunun anlamı; %0,1 lik bir elastik artış, direnç'te %0,16 lık bir artış doğurmalıdır(1). (k) değeri, farklı metallere ve alaşımlar için değişiklik bulunur. Bazı durumlarda negatif değerler bile görülür. Negatif strain hassasiyeti, tel uzunluğundaki artma, direnç'te azalmaya neden oluyorsa söz konu-

audur. Tüm metal ve alaşımlar için iletkenin elastik sınırı aşıldığı zaman (k) 2 değerine yaklaşacak, hatta geçecektir.

Bri strain gauge'de uç loop'ları hiç te arzu edilmeyen "ÇAPRAZ HASSASİYET" karakteristiğinden de sorumludurlar. Çapraz hassasiyet, eksene dik strain'in, eksene paralel strain'e oranı olarak tariflenir. Genellikle % olarak tariflenir. Bu normal (k) gauge faktörünü düşürücü rol oynar(1).

4. STRAIN-GAUGE' LERİN SICAKTAN ETKİLENMELERİ

İdeal bir strain-gauge yalnızca bağlı olduğu yapı üzerindeki direnç değişimlerine müsaade eder. Fakat gauge'ler diğer faktörlerde etkilenirler. Bilinen tüm strain gauge malzemeleri verilen sıcaklığın az üzerindeki sıcaklıktan etkilenirler. Bu etkiden doğacak hataları bertaraf etmek için "Sıcaklık kompenzasyonu" şekilleri düzenlenir. Şekil 5'te görüldüğü gibi sıcaklık kompenzasyonu sağlayacak olan gauge'ler numune benzeri olan fakat, üzerine kuvvet uygulanmayan, yalnızca ortamın sıcaklığından etkilenen bir parça üzerine yapıştırılarak köprü kollarına ilave edilir (2). Bu gauge'lere "Dummy gauge" adı verilir. Şayet dummy gauge'lerin yerleştirildiği yerde sıcaklık değişimi, aktif gauge'lerin yerleştirildiği yerden farklı olursa hata doğar(7).



Şekil 5 . Sıcaklık kompenzasyon düzeneği.

"Kendi kendine sıcaklık kompenzasyonu" terimi, sıcaklık alanı çok düşük mertebelerde tutulan sıcaklıklardaki direnç değişimlerinin olduğu strain gauge'ler de uygulanır. Kendikendine kompanze'li gauge'ler, özellikle spesifik bir sıcaklık genişleme katsayısına sahip olan malzemeler üzerinde kullanıldıkları zaman iş görürler. Yani strain gauge malzemesi ile yapıştırıldığı numune malzemesinin genişleme katsayıları farklıdır. Bu tip gauge'ler sıcaklık genişleme katsayıları 0'dan 45 ppm/F⁰ (veya 25 ppm/C⁰) olan malzemeler üzerinde kullanılırlar.

Yalnızca dinamik ölçümler için hazırlanmış strain-gauge'ler, yüksek direnç sıcaklık katsayı değerlerine sahip alaşımlar-

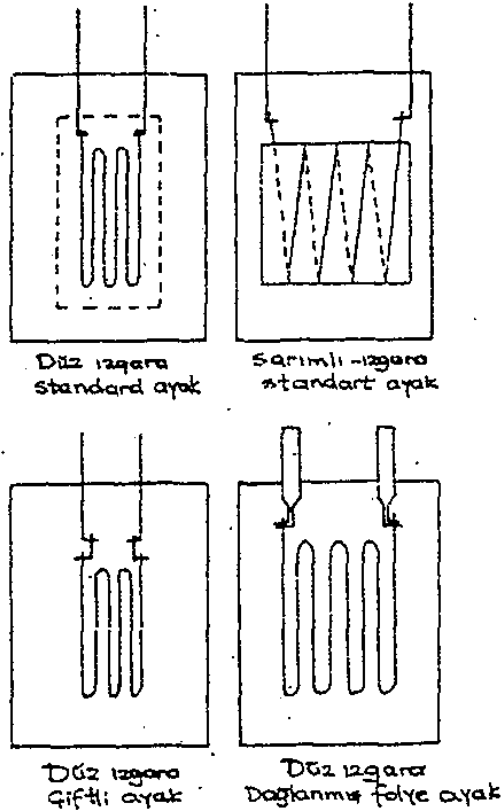
dan yapılırlar. Bu alaşımlar yüksek yorulma ömrü, yüksek strain hassasiyeti (k) değerlerine sahiptirler. Strain hassasiyeti (k) arttıkça hata' da artacaktır. Dinamik ölçümler yapının elastik bölgelerinde olduğunda, yüksek strain hassasiyet değerlerinden dolayı daha yüksek çıkış sinyallerinin alınması bir avantajdır. Dinamik ölçümlerde, Ni-Fe (İsoelastik) ve Platinyum-Tungsten alaşımları büyük tahammül gücüne sahiptirler.

5. STRAIN GAUGE TİP'LERİ VE ÖZELLİKLERİ

A)- Metal Esaslılar

1.)- Bağlı Tel strain gauge'ler :

Strain gauge'lerin en genel olanlarıdır. Tel boyutları 12 μ m ile 25 μ m arasında değişir. Bu tip gauge'lerde kalın ve kuvvetli bağlantı bandı yapıştırılarak strain gauge'lerin dayanıklılık süreleri artırılmıştır. Tel'in bu yapıştırılmış banda bağlanması çok özel bir kaynak işlemi gerektirir(2).



Şekil 6 . Bağlı tel strain gauge yapıları.

Bu tip bir strain gauge'in performansını anlamak için strain doğduğunda, tel davranışını düzenliyen mekanizmayı iyi bilmek gerekir. Yalnızca uç'ları ile yapıya bağlı, yüzeyi boyunca ve eksenel olarak zorlanmış bir tel düşünelim. Bu tel'in uç

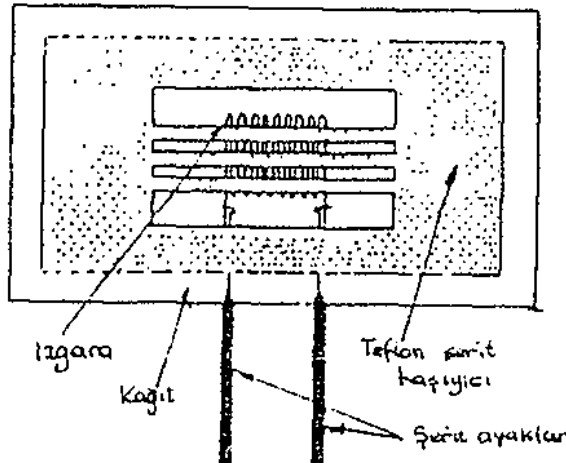
ayaklarının bağlandığı yerde max kayma gerilmesi, diğer yerlerde kayma gerilmesi çok düşük olacaktır. Poisson oranı'nın yanıl daltmasından dolayı çapsal değişme olduğunu düşünelim. Bağlama vazifesi gören yapıştırıcının (E) elastisite modülü, strain gauge tel'ininkinden 30-80 kez daha küçüktür. Bu yüzden çapsal değişmelerden doğan strain algılanmaz. Sadece uzunlamasına strainler algılanacaktır. Ayrıca, strain gauge'in iç basınç ve çekme durumları arasında ileri-geri hareketle, bukle olayı doğmasına engel olmada, bu tip gauge'ler gayet mukavim bir şekilde dayanıklıdır. Ayrıca; bağlayıcı maddenin varlığı, lüzumlu tahrik voltajından dolayı strain gauge'lerde doğan kendikendine ısınmanın etkisi, önemli ölçüde azalır(1).

1.b)- Tel -ızgara tipi gauge'ler

Özel uygulama yerleri için geliştirilmişlerdir. Bu tip strain-gauge'lerin düz ızgara tipleri, sarmalı olanlarına tercih edilirler. Genellikle, akma'nın yüksek, sıcaklığın yüksek olduğu yerlerdeki strain ölçümlerinde kullanılırlar. Constant malzeme esaslı tel ızgara gauge'lerin strain sahası % 2-5 alanıyla sınırlanır. Halbuki aynı malzameden düz ızgara çift ayaklı tip'leri, yapıştırıcısı nitroselülozlu ise, bu sınır % 5-10 'a kadar çıkar. Şekil 6 da tipik konstrüksiyon görülmektedir.

Yüksek sıcaklığa dayanım için fiber-glass takviyeli Teflon taşıyıcıya dağılanmış folye tipi ayaklar ilave edilmiş ızgara tipi strain-gauge'ler yapılmıştır.

Rokide proses'ine (1) benzer alev püskürtme ile saf bir Aliminyum oksit refrakterini eritip, partiküllerin atomize edilerek yapıştırılıp imal edildiği tek telli gauge'ler, özellikle yüksek sıcaklıklarda kullanıma çok uygundur. Uzama kapasiteleri, elektriksel yalıtım dirençleri, termal ve mekanik şok direnç özellikleri, seramik yapışkanlı gauge'lere göre süper iyidir. Şekil 7 de bu tip bir strain gauge görülmektedir.

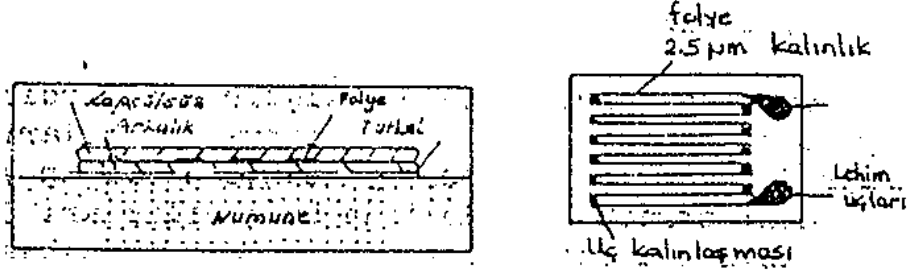


Şekil 7 . Düz tel ızgara serbest filamentli tip.

2. Folye strain gauge'ler

Bu tip gauge'lerin kalınlıkları 0,0254 mm'den küçüktür. Tel esaslı gauge'ler göre çok uzun ömürlüdürler. Hassasiyetleri hayli fazladır. Genellikle bağlantı uç'ları olmakla beraber, bazılarında yoktur. Gauge'in ömrü, yapılacak bu bağlantı işlemine bağlıdır(2).

Folye gauge'ler, folye şeklinde haddelenmiş alaşımların basılı devre işleminden geçirilmesiyle üretilirler. Folye kullanılmadan önce, direnç sıcaklık katsayısı ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kontrollü atmosferde ısıl işleme için özel birkaç adımdan geçer. Şekil 8 de 50 kez büyütülmüş folye bir gauge.



Şekil 8. Folye ızgara gauge'in kesiti ve dağılımı folye gauge.

Folye gauge'ler uç kısımlarda fazladan metal bırakılarak dizayn edilmişlerdir. Bu ise çapraz hassasiyeti azaltıcı rol oynar. Bu uç kısımların dizaynının diğer bir etkisi de, hysteresis ve creep (sürünme) olayını azaltmaktır. Bazı uygulama alanları için bu iki etki, çapraz hassasiyetin azalmasından da önemli olabilir.

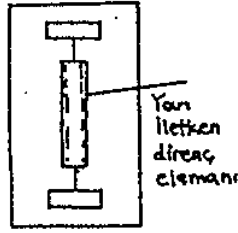
370 °C'nin üzerindeki sıcaklık kullanım alanları için tasarlanmış folye gauge'lerin bağlayıcıları, genellikle inorganik seramiklerdir. Yüksek sıcaklıklardaki problem, numune ile ızgara arasındaki yalıtım direncindeki kayıptır. Bu açıdan tel gauge'ler, folye gauge'ler göre süperdirler. Şu anda en çok kullanılan folye gauge tipi, poliamid bir arkalık üzerinde kapsül içine alınmış, constantan bir malzemedan yapılmış olanıdır. Kendikendine sıcaklık kompenzasyonu için bahsedilen bu malzeme uygun bir malzemedir. Gauge uzunlukları 152,4 mm'den 0,381 mm'ye kadar olanları mevcuttur. İnce paslanmaz çelik taşıyıcısına bağlı olan folye gauge'ler kaynaklanabilirler. Bu tip bir gauge, tutkal ile bağlanmanın zor olduğu veya uygun olmadığı yerlerde, demir esaslı malzemeler üzerinde kolaylıkla iş görürler. Ve gerilme analizi probleminin çözümünde güçlü bir ölçme aracı olurlar.

B)- Demir esaslı olmayan gauge'ler

Yarı-iletken gauge'ler :

Bu tip gauge'ler, görünüşte metalik olan, fakat pek çok metalden önemli ölçüde daha hafif tek kristalli Silikon malzemesinden yapılmışlardır. Gauge telleri, kristalden ya eski usul

kesme tekniği, yada ultrasonik kesme tekniğiyle 1,27 mm den 12,7 mm uzunluğa kadar kesilir. Kristal, elastik olmasına rağmen normal test sıcaklıklarında plastik bir strain vermez. Özel tel yapısına bağlı olarak yarı iletken strain-gauge'lerin strain sensitivite haları 1000-10 000 $\mu\text{inç/inç}$ arasında değişir(1).



Şekil 10 . Yarı iletken gauge.

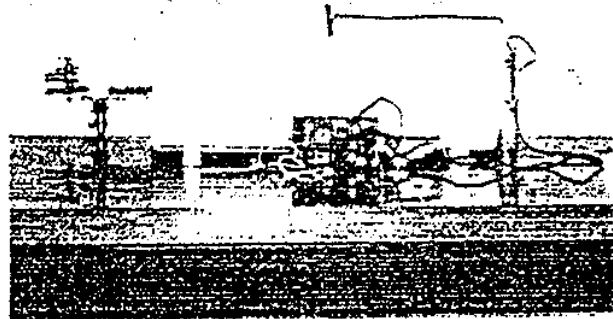
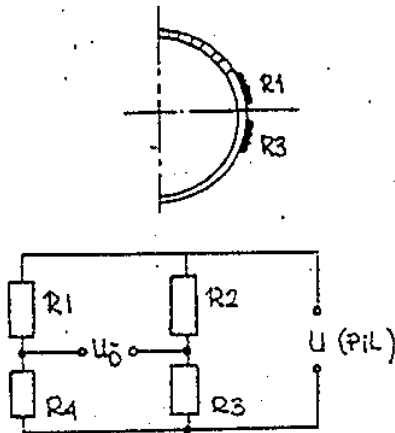
Üreticilerin çoğu, bu tip gauge'leri 3000 $\mu\text{inç/inç}$ mertebesindeki strain'lerde test ederler. Hassas algılayıcı tel'ler ince ise, esneklik kabiliyetleri fazladır. Bu tip gauge'ler epoksi veya fenolik esaslı bağlayıcılarla bağlandıklarında 6,35 mm 'den küçük numuneler üzerine kopmadan monte edilirler. Arkalaşı olmayan gauge'lerde, tel'ler üzerindeki lokal gerilme, kırılmaya neden olacağından çok aşırı titiz davranılmalıdır.

Yarı-iletken gaugelerin önemli özellikleri, aşırı direnç değişiminin olmasıdır. Bu hassaslık, diğer gauge'lerin hassaslığınının 50-80 defa fazlasıdır.

6. STRAIN- GAUGE UYGULAMALARI

A)- Kompresör depo basıncı ve motorunun strain gauge'lerle otomatik kontrolü

Şekil 11 de de görüldüğü gibi model bir kompresör deposu yapılmıştır. Bu depo üzerine R1 R3 aktif dirençleri yerleştirilerek, R2 R4 pasif (dummy) gauge'leri ile bir wheatstone köprü devresi kurulmuştur. Model kompresör deposu hava basıncı ile doldurul-

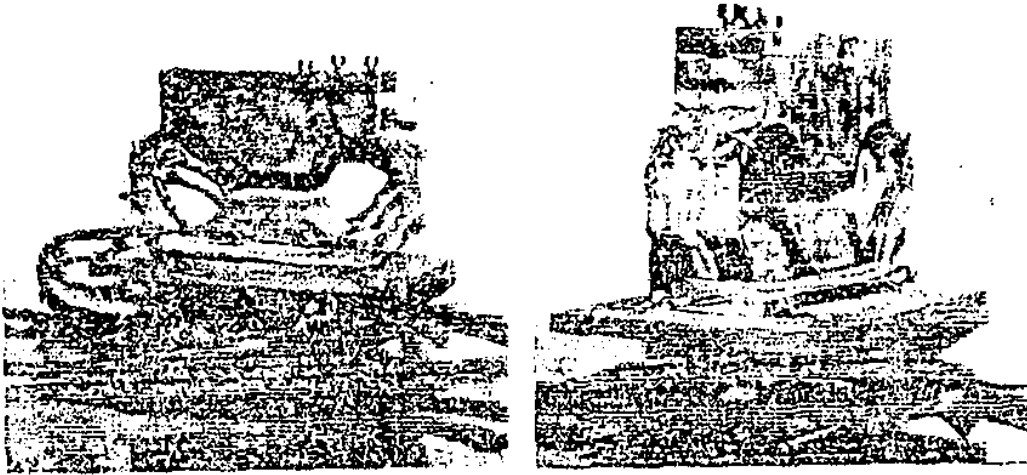


Şekil 11. Kompresör depo basıncı ve motorunun strain-gauge'lerle otomatik kontrolü.

değunda, doğacak strain'ler transducer vazifesiz gören strain-gauge'ler vasıtasıyla algılanır.Sırasıyla amplifikatöre,alt sınır ünitesine;-ki buraya gelen sinyal,alt sınır değerine ulaştığın -da motor çalışmaya başlar-. Üst sınır ünitesine; bu ünite yapı bakımından alt sınır kontrol ünitesine benzerdir.Daha yüksek sinyallerin algılanmasına müsaade eder."otorun çalışmasını indirekt olarak kesmeye çalışır.Bu az çalışan ünitedir.Elektrik motoru Kumanda Ünitesi;Elektrik motoru direkt komutu bu üniteden alır,çalışmayı durdurur veya keser.

E)- Kesme kuvvetlerini ölçen octogonal ring dinamometresi

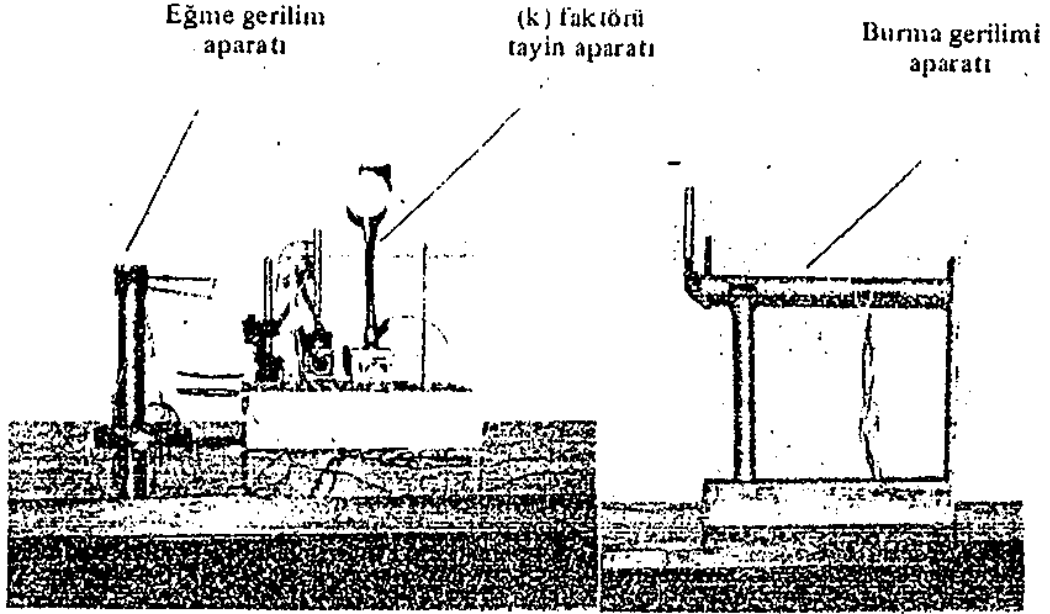
Metallerin talaş kaldırılarak tornalanmasında kesme gücünün bilinmesi,tezgaah ve takım tasarımı için gereklidir.Strain gauge kullanılarak yatay ve düşey kesme kuvvetlerini tesbit etmek olasıdır.Bu uygulamada ağırlık noktası aparatın dizaynında olmasına rağmen strain-gauge'lerin yerleştirildikleri noktalar da özel bir önem arzeder(4).Yatay ve düşey kuvvetleri aynı anda ölçebilmek için iki ayrı çıkış okuyucuya ihtiyaç vardır.İki kuvveti ölçebilmek için dizaynın konumuna uygun olarak 8 adet strain gauge yerleştirilmiştir.



Şekil 12. Tornalama esnasında doğan yatay ve düşey kesme kuvvetlerini ölçen octogonal ring dinamometresi.

C)- Eğme, burma gerilmeleri tayini ve gauge faktörünü tesbit etme aparatı uygulamaları

Şekil 13 te, bilinen wheastone köprü devreleri hazırlanarak,dikdörtgen kesitli bir çubuktaki eğme gerilimi tayini,içi boş bir boruda burma gerilimi tayini yapabilen aparatlar öğrencilerin deney yaptıkları aparatlarımız arasındadır. Ayrıca bir e strain-gauge'in (k) gauge faktörü'nü tayin için hazırlanmış bir düzenek' te uygulamalarımız arasındadır.



Şekil 13. Eğme, burma gerilimi tayini ve strain gauge faktörü (k) tayini yapılabilen düzeneğin görüntüleri.

7. SONUÇ : Mühendisliğin gerilme analizi problemlerinin çözümünde strain-gaugeler çok önemli rol oynarlar. Türkiye'de henüz tam olarak uygulama alanına girmemiş olmalarına rağmen, laboratuvar seviyesinde uygulamalar sürmektedir. Daha çok statik strain uygulamalarında kullanılan strain gauge'ler, yukarıda verilen örneklerden de görüleceği gibi, hem ölçme hem de kontrol, iki fonksiyonu birlikte yürütmektedirler. Otomatik kontrol uygulamalarında, mekanik kontrol sistemine göre, geniş ayar imkanı yaratması, basınç değerlerinin istenilen noktada izlenebilme olanağı, tamir bakım kolaylığı gibi avantajlara sahiptirler. Strain gauge'lerin uygulamaya sokulmasıyla gerilme analizi problemlerinin çözümü kolaylaşacaktır.

K A Y N A K Ç A

1. Weymouth L.J. Star J.E and Dorsen J., " Bonded Resistance Strain Gauges ", Experimental Mechanics" TA-E8 19, pp 112-120. 1979.
2. Otmanbölük N., "Genlik duyaçları (Strain gauge) Yapısı ve kullanım örnekleri " Doç. Dr. , Dokuz Eylül Üniversitesi - Müh. Fak. Dergisi, Özel sayı sayfa 131, 1983.
3. Ay İ., Ölçme Tekniği Ders Notları ,Yrd. Doç.Dr., Uludağ Üniversitesi Müh.Fak. 1984.

4. Aksoy Z., "Torna tezgahında talaş kaldırma esnasında takıma gelen kesme kuvvetlerini ölçen iki boyutlu dinamo metre tasarımı ve imalatı". Mak. Müh. Uludağ Univ. Fen Bilimleri Ens. Yüksek Lis. Tezi 1986.
5. Özgür D., Ölçü Tekniği, Prof. Dr. Yıldız Üniversitesi, Müh. Fak. Mak. Bl. 198
6. Hoffman K., "Fundamentals of the strain gauge technique" HBM, 1974.
7. Holman J.P., "Experimental Methods for Engineers" Mc Graw Hill 1981.