

39289

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL BİR TARTI
SİSTEMİNİN TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. B.Berk ÜSTÜNDAĞ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Ocak 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Şubat 1994

Tez Danışmanı : Prof.Dr.Atilla BİR

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr.Enise ERİMEZ

: Y.Doç.Dr.Serhat İKİZOĞLU

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ŞUBAT 1994

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını bana vererek zevkli ve rahat bir ortamda çalışmamı sağlayan hocam, sayın Prof.Dr. Atilla BİR'e ve hiç bir zaman yardımlarını esirgemeyen, tüm İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Kontrol ve Kumanda Sistemleri Anabilim Dalı çalışanlarına teşekkür ederim.

Şubat 1994

B.Berk ÜSTÜNDAĞ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Ölçüm Yönteminin Tanıtılması	3
1.2. Endüstriyel Bir Tartı Sisteminden Beklenen Özellikler	4
BÖLÜM 2. YÜK HÜCRELERİ	6
2.1. Malzemenin Davranışı	6
2.1.1. Bükülen Kirişte Yüzey Uzamaları	13
2.1.2. Kesme Kuvveti Altında Yüzeyde Kayma	16
2.1.3. Burulan Milin Gerilmesi	21
2.2. Uzama Dönüştürücüsü	23
2.2.1. Uzamaya Duyarlı Alaşımlar	26
2.2.2. Taşıyıcı malzeme	27
2.2.3. Dönüştürücü Izgara Uzunluğu	28
2.2.4. Dönüştürücü şekilleri	29
2.2.5. Uzama Dönüştürücülerinin Çapraz Duyarlılığı	31
2.2.6. Sıcaklığın Uzama Dönüştürücüsüne Etkisi	37
2.2.7. Uzama Dönüştürücülerinin Yapıştırılması	41
2.3. Wheatstone Köprüsü	48
2.3.1. Dönüştürücü Bağlantılarında Köprü Kazancı	49
2.3.2. Optimum Köprü Uyarma Gerilimi	52
2.3.3. Wheatstone Köprüsünün Doğrusal Çalışmamasından Gelen Hatalar	54
2.3.4. Paralel Kalibrasyon	59
BÖLÜM 3. ÖLÇÜMDE İŞARET İŞLEME	63
3.1. Fark Kuvvetlendiricisi	63
3.2. Analog Dijital Çevirici	66
3.3. Dijital Filtreleme	69
3.4. Yazılım ile Kalibrasyon	75
3.5. Çıkışlar	76
3.5.1. Gösterge Çıkışı	77
3.5.2. Konuşma Kartı	78
3.5.3. Seri Haberleşme	79
3.5.4. Röle Çıkışları	80
BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	87

ÖZET

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında otomasyon sistemlerine uygun yapıda çıkışlar verebilen yüksek duyarlılıklı endüstriyel bir tartı sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Ölçüm kartı ile çalışmak üzere röle sürme ve konuşma kartları yapılmıştır. Ayrıca ağırlık algılama elemanı olarak kullanılan yük hücreleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Ölçüm amacına bağlı olarak mekanik yapıya uygun yük hücresinin seçimi yapılır. Bu seçimde kuvvetin uygulanma noktasına göre yük hücresinin şekli ("S" tipi, çubuk tipi, vb.), kuvvet dağılımına bağlı olarak hücre sayısı, çalışma ortamının koşullarına uygun koruma sınıfı ve her bir hücreye uygulanacak en büyük statik ve dinamik yük belirlenir.

Uygun duyarlılık ve kararlılıkta bir referans kaynak ile hücre uyarılır. Wheatstone köprüsünün ölçüm uçları olan yük hücresinin çıkış uçlarındaki gerilim yeterli doğrulukta ve kararlılıkta çalışan bir fark kuvvetlendiricisi ile yükseltilir. Ağırlık ölçme sistemlerinde mekanik sistemin zaman sabiti elektriksel sistemlerdekine göre büyük olduğundan ADC çevrim süresi göreceli olarak büyük alınabilir. Ayrıca yüksek duyarlılık gereksinimi de göz önünde tutularak çift eğimli Analog/Dijital dönüştürücüler tercih edilir. Çift eğimli dönüştürme tekniği eşdeğeri rezolüsyonda sabit sürede örnekleme yapılan içten sayıcılı dönüştürme tekniğinden daha ekonomiktir. Bunun yanında dönüştürme sırasında gürültünün, ortalaması sıfır civarındaki raslantısal bileşeni süzölmüş olur.

Sayısal ölçüm verisi, mikrokontrolör tarafından işletilen bir program ile dijital filtreden geçirilip kalibre edilerek kontrol algoritmasında kullanılır. Ölçme programının veri değerlendirme kısmı uygulamanın niteliğine bağlı olarak bazı farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, dolum kontrolü, dozajlama, süreye ve adete bağlı toplam belirleme ve sayım gibi temel fonksiyonların tek bir ölçme programında parametrik kontrolü ile giderilir. Sistemi kullanılacağı yere kuran teknisyen, ilgili kontrol programını çalıştırır.

Gerçekleştirilen bir konuşma kartı ölçme kartıyla seri haberleşerek, yüksek nitelikli bir insan sesi ile ölçüm bilgisini okumaktadır.

SUMMARY

DESIGN OF AN INDUSTRIAL WEIGHING SYSTEM

Digital measurement of weights is not only required for the consumer systems but also has been an unavoidable part of industrial processes such as filling, packing and dosing. In modern weighing scales, load cells are used to transduce a change in the mechanical force to a change in voltage.

A load cell includes three parts; The mechanical model where the input force is converted to a change in strain, strain gauge(s) where the change of strain is converted to a change in resistance and wheatstone bridge circuit where the change of resistance is converted to a change in voltage. Mechanical model causes strains due to shear stress or bending stress in the cells of weighing scales.

Strain ϵ is the change of length ΔL , with respect to an initial or reference length L_0 (Figure 1).

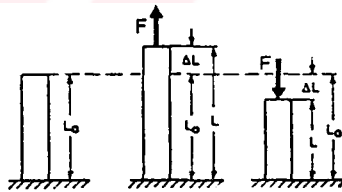


Figure 1-Change of length under the effect of Force F.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1)$$

The difference ΔL is positive for an expansion and negative for contraction. Often the value of ΔL is only a few millimeters or even micrometers. To facilitate practical calculations in the change of length is given generally in micrometers [μm] and the reference length is in meters [m]. So the strain is given as [$\mu\epsilon$] although it is a unitless quantity.

In the case of bending beam as shown in figure 2 the measured strain ϵ is

$$\epsilon = \frac{6Fl}{bEh^2} \quad (2)$$

where, F: Applied force [N]
 l: Distance to point of applied force [m]
 b: Width of beam [m]
 h: Height of beam [m]
 E: Young modulus of the beam material

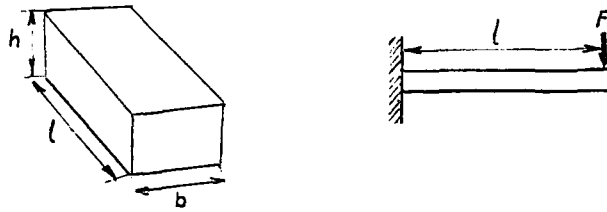


Figure 2-The case of bending beam.

The strain which is measured by strain gauges with respect to a reference point on the surface of the test material under shear forces is a function of angle between axes of gauges and the principle axes.

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_2) - (\epsilon_x - \epsilon_y)(\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2)}{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2} \quad (3)$$

where, ϵ_1 : Strain measured by gauge 1
 ϵ_2 : Strain measured by gauge 2
 ϵ_x : Strain at the x axes
 ϵ_y : Strain at the y axes
 θ_1 : Angle between gauge 1 and x axes
 θ_2 : Angle between gauge 2 and x axes
 γ_{xy} : Difference of angle between principle axes under shear force

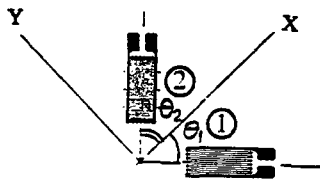


Figure 3-Principle axes and symmetric configuration of strain gauges in measurement of shear forces.

If the strain gauges are placed at angles $+45^\circ$ and -45° with respect to x axes then strain will be given by

$$\gamma_{xy} = \epsilon_1 - \epsilon_2 \quad (4)$$

Three element rosettes must be used when the directions of the principle axes are unknown since at least strains at the three arbitrary axes must be known to calculate the components and the directions of principle axes.

In a metallic foil gauge variation of resistance can be basically written as

$$\frac{\Delta R}{R} = F\epsilon \quad (5)$$

where, F is the gauge coefficient which is given by manufacturer. But this F is valid only when the gauge is bonded on steel and the direction of the stress coincides the gauge axes. F will exhibit some variations in all other conditions because strain gauge elements has transverse sensitivity. Although transverse sensitivity is much less than the sensitivity of the main axes a correction may be required according to previously selected system accuracy. Correction factor is also a function of Poisson's ratio of the test material since the Poisson's ratio is an expression of transverse strain while the strain of gauge axes (perpendicular) is known.

Another source of error in strain gauge used measurements is the thermal output. The change in environment's temperature causes a change in the measured strain. However some grid materials of the strain gauges have the property of self temperature compensation.

Some configurations of Wheatstone Bridge are possible according to number of active gauges and their bonding directions. Four active gauge used configuration (all gauges measure the same strain but the sign of the strain measured by two gauges are different from other couple) has not only the best temperature compensation but also the highest bridge gain.

Optimum bridge excitation voltage is calculated due to dissipation power of gauges and heat sink capabilities of bonded system. It is common to use 5 .. 10V in the load cells of weighing scales except some extreme conditions.

Stability of reference source's output voltage directly affects the accuracy of measurement. The designed circuit for this task limits the variations by 1 mV at 10V due to some causes such as temperature differences and electrical noise. Offset voltage and thermal stability of the operational amplifier used as differential amplifier also must satisfy accuracy requirements. Offset voltage of the circuit used in the application is limited by just few microvolts.

Since weight measurements do not require less than some 10 milliseconds dual slope analog to digital converters are suitable choices. They provide high accuracy up to 16 bits (+sign) resolution with affordable price. Dual slope converters work in four phases. The first phase is compensation of offset voltages of the input circuit. In the second phase a capacitor is charged by input signal in the constant time. Third phase is the deintegration of the voltage by a reference source. Correspondent digital value of the analog signal is determined by measuring deintegration time. Last phase named "zero integrator output" is only needed for the resolutions more than 14 bits and sets the integrator voltage to zero because output delay of the zero comparator produces a difference in the integrating capacitors voltage. It is easy to change conversion resolution by changing the integration time. On the other hand the zero averaged noise voltage is filtered during the integration phase.

Digital value of the measured weight is processed with respect to a program which runs on a microcontroller based card. This card also controls the serial display driver, the logic switchings of analog to digital converter (TC500A), serial communications, speech processor and a relay driver.

Software algorithm is important as much as hardware components in digital measurement of weights. Implemented software for this application permits the user to change some parameters in the functions such as digitally filtering, automatic zero drift calibration, rolling of measured value, A/D conversion speed, point shifting and main calibration.

Serial communication speed is set due to electrical noise of the environment and the distance between the data receiving system and the measurement card. Applied communication protocol is set on reflecting back all received data called "acknowledgement". This protocol decreases the speed of data transmission but prevents communication errors. RS232 channel can be used up to 15

meters and in longer distances RS485/488 is preferred.

A speech processing card is designed to read out the measured value by a human voice. This card has records of necessary words to make meaningful sentences. These words are stored in delta modulated compressed form and decompressed by the card while they are being read. Measurement card also sends the code number of words to be read serially.



BÖLÜM 1

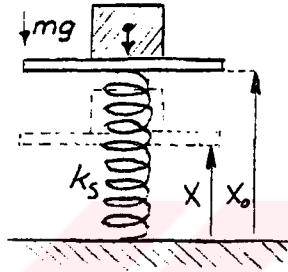
GİRİŞ

Ağırlığın sayısal olarak ölçümü, terazi ve kantar türü ölçü sistemlerinde birincil büyüklük olarak gerekli olmasının yanısıra veri depolama ve değerlendirme yöntemleri ile birlikte doldurma, paketleme ve dozajlama sistemlerinin de vazgeçilmez unsurlarından birini oluşturmaktadır.

Ağırlıkların mekanik olarak ölçülmesi yakın zamana kadar sıkça kullanılmakla birlikte bu gün bu yöntem sadece emeğin ucuz olduğu az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde görülür. Mekanik ölçüm yöntemi iki temele dayanmaktadır. Bunlardan ilki ölçülecek ağırlığı denge mafsalına sabit uzaklıkta (eşit olması gerekmez) değeri bilinen eşdeğer bir ağırlıkla karşılaştırmaktır. İkincisi ise yerçekimi ile aynı doğrultuda esneyebilen bir malzemenin ağırlık etkisiyle şekil değişimini ölçmektir. Bu yöntem aynı zamanda elektriksel ağırlık ölçümünün prensibini oluşturmaktadır. Esnek malzeme olarak lineer çalışan bir yay kullanıldığı takdirde (Şekil 1.1) kütle ,

$$m = \frac{1}{g} \cdot k_s \cdot (x_0 - x) \quad [kg] \quad (1.1)$$

olarak ölçülür. Burada $g[m/s^2]$ yerçekimi ivmesi, $k_s [N/m]$ yay sabiti, $x_0 [m]$ referans mesafe ve $x [m]$ kütlenin çekim kuvveti altındaki denge mesafesidir.



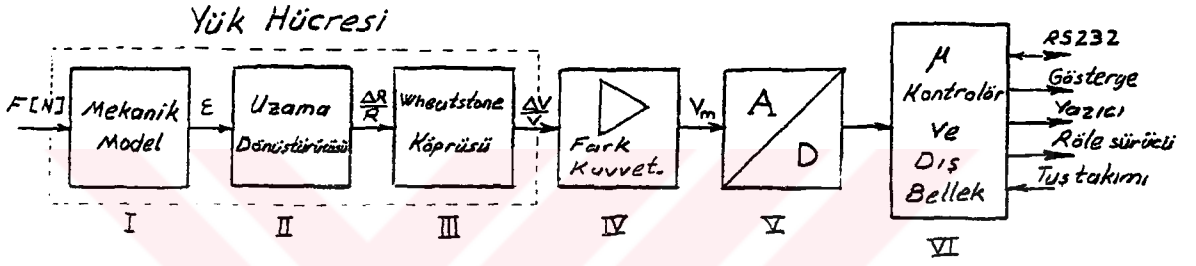
Şekil 1.1-Ağırlık ile yayın denge konumunun değişmesi.

Ancak bu mekanik ölçüm yöntemi yayın histerezisi ve rezilyansı (Sürekli çalışmada kalıcı şekil değiştirme) nedeniyle genellikle ticari işlerde kullanılmaz. Sıklıkla sıfır ayarı gerektirdiğinden sadece ev tartılarında kullanım alanı bulur.

Elektriksel ağırlık ölçümlerinde malzemenin Hook bölgesinde uygulanan kuvvetle doğrusal şekil değiştirmesi özelliğinden yararlanılır. Esneme sonucu uzama μm ($10^{-6}m$) mertebesinde olduğundan sıfır kaymasına ve lineersizliğe neden olan hata kaynakları küçüktür ve kalibrasyon otomatik olarak gerçekleştirilebilir. Ticari olarak 1/10000 mertebesinde bir duyarlılık yeterli görülmesine rağmen uygun mekanik yapı ve yazılım ile 1/30000 mertebesinde bir duyarlılığa erişilebilir.

1.1 ÖLÇÜM YÖNTEMİNİN TANITILMASI

Şekil 1.2'de mekanik F [N] kuvveti girişinden itibaren dijital veri çıkışına kadar ölçüm bilgisine uygulanan işlemler bloklar halinde gösterilmiştir.



Şekil 1.2-Dijital ağırlık ölçümüne ait blok diagram.

I ile gösterilen blok bir mekanik yapı olup görevi, ağırlığı ölçülmek istenen kütlenin neden olduğu bir gerilmeyi, doğrusal bir uzamaya çevirmektir. (II). blokta bulunan uzama dönüştürücüleri (Strain gauge) ise uzamayı direnç değişimine dönüştürürler. (III).bloktaki köprü devresiyle direnç değişimi köprü yapısına bağlı olarak gerilim değişimine çevrilir. (IV) fark kuvvetlendiricisi ile köprü devresinin dengesizlik gerilimindeki değişme ölçme sınırları içinde ADC'nin referans gerilimini geçmeyecek şekilde lineer olarak kuvvetlendirilir. Burada kullanılan işlemsel kuvvetlendiricinin giriş dengesizlik gerilimi, istenilen ölçüm duyarlılığına bağlı olarak, ölçülmesi istenen minimum yükte oluşacak köprü çıkış geriliminden daha küçük olmalıdır. (V) analog/dijital

dönüştürücüde duyarlılığın $S < 1/10000$ olması istendiğinden çözünürlük, $2^n \geq 10000$ olacak şekilde $n \geq 14$ bit seçilir. Dinamik yük değişiminin 10Hz'ten küçük olduğu düşünülürse çift eğimli (dual slope) bir ADC kullanmak uygun olur. Alınan dijital ölçüm bilgisi (VI) mikroişlemcinin kontrol algoritmasına bağlı olarak işlenerek data alma, parça sayma vb. fonksiyonlar gerçekleştirilir. Çıkış bilgisi doğrudan göstergeye verilebildiği gibi paralel yazıcı çıkışına veya seri olarak RS232 kanalına verilebilir.

1.2. ENDÜSTRİYEL BİR TARTI SİSTEMİNDEN BEKLENEN ÖZELLİKLER

Tartım sistemleri, kullanım amaçları ve ortam koşullarına göre farklılıklar göstermekle birlikte, kullanıldığı ülkedeki yasal nizamla uymalıdır. Bazıları seçime bağlı olmakla birlikte bu özellikler şöyle sıralanabilir :

a) Yüksek duyarlılık ; Hatasız ölçülebilen en küçük ağırlığın ölçülebilen en büyük ağırlığa oranıdır. Türkiye için 1/10000 duyarlılığa karşılık düşen yuvarlatılmış en küçük ağırlığın hatasız ölçülmesi istenir. Yuvarlatılan standart ağırlıklar ...5gr, 10gr, 20gr, 50gr, 100gr, ... şeklinde kademelendirilmiştir. Örneğin 300kg'lık bir kantar 300000gr/10000 'in bir üst yuvarlatılmış değeri olan 50gr'ı ölçmek zorundadır.

b) Düşük lineersizlik ; Ölçüm skalası boyunca ölçülen ağırlığın gerçek değerine karşılık düşen doğruya göre yuvarlatılmamış ölçüm değerinin sapmaya oranı olan. lineersizliğin, genellikle %0.006'dan küçük olması istenir.

c) Sıfır kararlılığı ; Ölçme sisteminin otomatik sıfır kayma kalibrasyonu yapılmadan önceki kısmında yüksüz durumda ham ölçüm verisindeki değişimdir. Bu değişimin

sıcaklığa bağılılığı tipik olarak 10 ppm/°C'dır.

d) Kazanç kararlılığı ; Ölçüm verisi dijitale çevrilmeden önce işlem gördüğü sistem kısmının toplam kazancındaki sıcaklığa bağlı değişimdir. Genellikle 7ppm/°C civarındadır.

- e) Mekanik histerezisin düşük olması,
- f) Filtrenin programlanabilir olması,
- g) Yük hücresinden fark kuvvetlendiricisine girişte yüksek girişte empedansın yüksek olması,
- h) RS232 veya RS422/485 seri çıkışın bulunması,
- i) Paralel yazıcı çıkışının bulunması,
- l) Dara alabime özelliğinin bulunması,
- m) Otomatik sıfırlama yapabilmesi,
- n) Gerçek zaman saati bulunması,
- o) Mal belleği bulunması,
- p) Müşteri belleği bulunması,
- q) Periyodik işlem raporu alınabilmesi,
- r) Programlanabilir röle çıkışları bulunması,
- s) Kendi kendini test edebilme özellikli olması,
- t) Çalışma koşuluna uygun IP sınıfında dış kılıf ve tuş takımı bulunması,
- u) Örnek ağırlığa göre sayım yapabilmesi,
- v) LED, VFD, ya da LCD göstergeye çıkış verebilmesi,
- y) Mekanik yapıda homojen bir yük dağılımının bulunması.

BÖLÜM 2

YÜK HÜCRELERİ

Mekanik yapıya bağlı olarak yük hücresinde önceden belirlenen noktalara uygulanan kuvvet sonucu gerilme ile birlikte elastik bir şekil değişimi oluşur. Yük hücresindeki bu şekil değişikliği, uygun noktalara yapıştırılmış uzama dönüştürücülerinde direnç değişimine neden olur. Yine yük hücresi içinde yapılan köprü bağlantısı ile direnç değişimi ile orantılı dengesizlik gerilimi oluşur. Köprünün uyarma ve ölçüm uçları gürültüye karşı ekranlı bir kablo ile yük hücresinden dışarı alınır.

2.1 MALZEMENİN DAVRANIŞI

Çekilen bir çubuğun başlangıçtaki kesiti A_0 [m^2] olsun. F [N] kuvveti altındaki çubuğun gerilmesi,

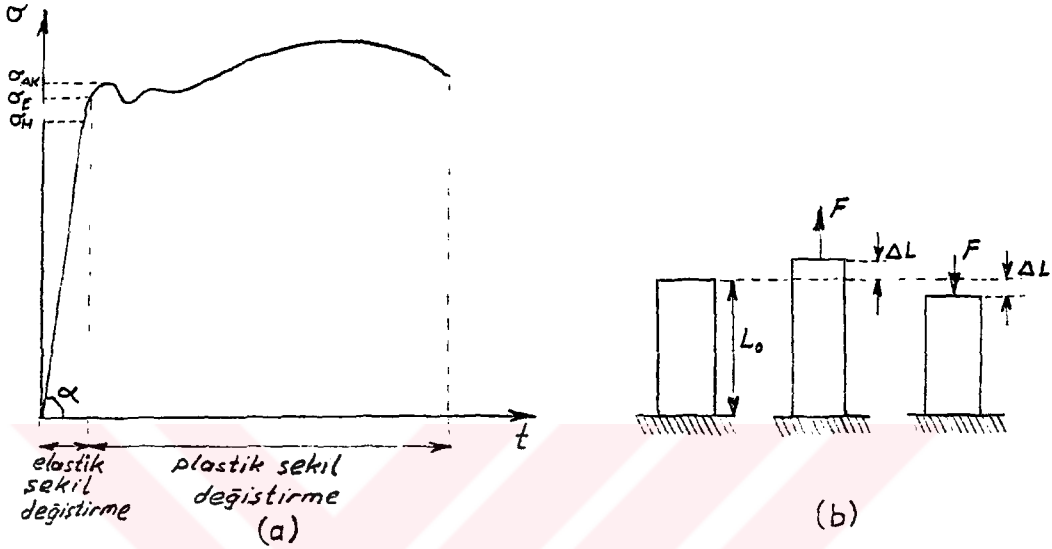
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad [N/m^2] \quad (2.1)$$

olarak tanımlanır.

Uzama ϵ , çubuk uzunluğundaki ΔL değişiminin

başlangıçtaki L_0 uzunluğuna oranıdır.

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1-a) Gerilme ile malzemenin şekil değiştirmesi.
b) Çekme ve sıkıştırma sonucu uzama.

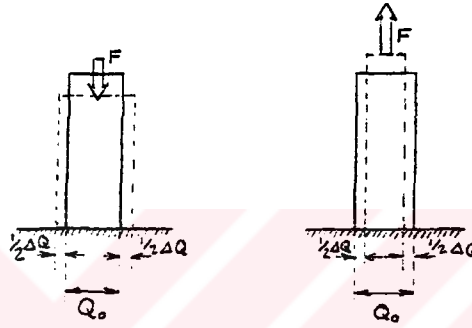
ΔL uzama için pozitif, kısalma için negatiftir. Uzama boyutsuz bir büyüklük olmasına karşın uygulamada değeri $10^{-6} \dots 10^{-2}$ mertebesinde değiştiğinden mikron (μ) ölçeğinde verilir ve ağırlık ölçümü ile ilgili literatürde $[\mu\epsilon]$ ile ifade edilir. Şekil 2.1a'daki gerilme ile uzama eğrisinde görüldüğü gibi $\sigma \leq \sigma_F$ kaldıkça aradaki ilişki lineerdir. Bu doğrusal bölgenin eğimine $\tan \alpha = E$ [N/m^2] malzemenin elastisite modülü (Young modülü) ve uzama ile gerilme arasındaki doğrusal ilişkiye Hook kanunu denir.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad [N/m^2] \quad (2.3)$$

Boyuna uzamanın yanı sıra çekilen çubukta enine bir kısalma da görülür. Bu iki şekil değiştirmenin birbirine oranı sabittir ve 2.4 bağıntısı ile ifade edilir.

$$\nu = -\frac{\epsilon_0}{\epsilon} \quad (2.4)$$

Burada ϵ_0 enine şekil değiştirme oranı, ν ise Poisson katsayısıdır. Şekil 2.2'de normal gerilme altında doğrusal çalışan bir malzemede Poisson katsayısının fiziksel karşılığı görülmektedir. Q_0 ilk kesit, ΔQ ise uygulanan kuvvet etkisiyle kesitteki değişimdir.



Şekil 2.2-Normal gerilme altında malzemede enine şekil değiştirme.

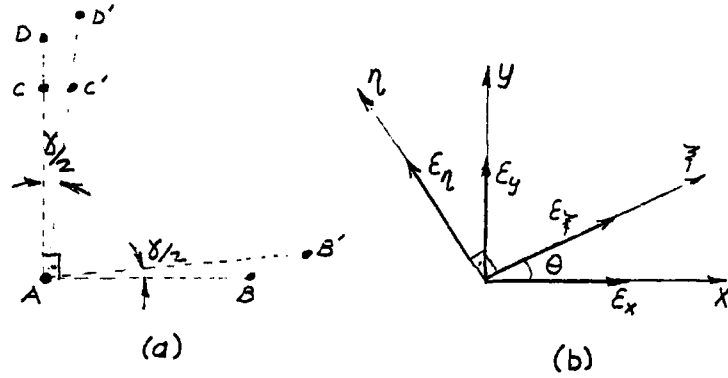
$$\nu = \frac{\frac{\Delta Q}{Q_0}}{\frac{\Delta L}{L_0}} \quad (2.5)$$

Elastiklik sınırı σ_E , malzemenin elastik şekil değiştirme özelliğinin sona erdiği sınırdır. Kalıcı deformasyonların %0.2 değerine eriştiği gerilmeye akma sınırı denir [1].

Malzeme üzerindeki bir A noktası etrafında verilen herhangi bir x doğrultusu üzerinde alınan C, D noktaları şekil değiştirdikten sonra C', D' noktalarında bulunsun-

lar. (2.2) Bağıntısına göre uzama $\epsilon = \frac{C'D' - CD}{CD}$ olarak tanımlanır (Şekil 2.2a). A noktası etrafında oluşturulan bir $\widehat{CAB}$ dik açısı şekil değiştirdikten sonra $\widehat{C'AB'}$ şekline gelmiş ise açı değişimi $\gamma = \widehat{CAB} - \widehat{C'AB'}$ olarak

belirlenir (Şekil 2.2a).



Şekil 2.3-Yüzeyde kayma sonucu eksenel değişim.

Yer değiştirme vektörleri hep aynı düzleme paralel olan düzlemler içinde kalıyor ise bu şekil değiştirmeye düzlemsel şekil değiştirme denir. Bir düzlemsel şekil değiştirme halinde birbirine dik x ve y doğrultularındaki birim uzamalar ϵ_x , ϵ_y ve açı değişimi olarak γ_{xy} verilmiş ise x eksenini ile θ açısı yapan herhangi bir ζ doğrultusundaki birim uzama (Şekil 2.2b),

$$\epsilon_{\zeta} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos \theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (2.6)$$

bağıntısı ile verilir [2]. ζ 'ya dik doğrultu η ise η doğrultusunda ϵ_{η} değeri (2.6) bağıntısında θ yerine $\theta + 90^\circ$ konularak bulunur.

Bir cismin bir A noktasındaki gerilme hali ile şekil değiştirme hali arasındaki bağıntılara bünye denklemlerinin gerilme-şekil değiştirme bağıntıları adı verilir. Lineer, izotrop ve viskoz olmayan bir cisimde bu bağıntılar,

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2.7)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2.8)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (2.9)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad , \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad , \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (2.10)$$

olarak elde edilir.

(2.10) Bağlantılarında yer alan G, kayma modülüdür. Bu bağlantılara genel olarak Hook Yasaları da denir. E, ν ve G arasında,

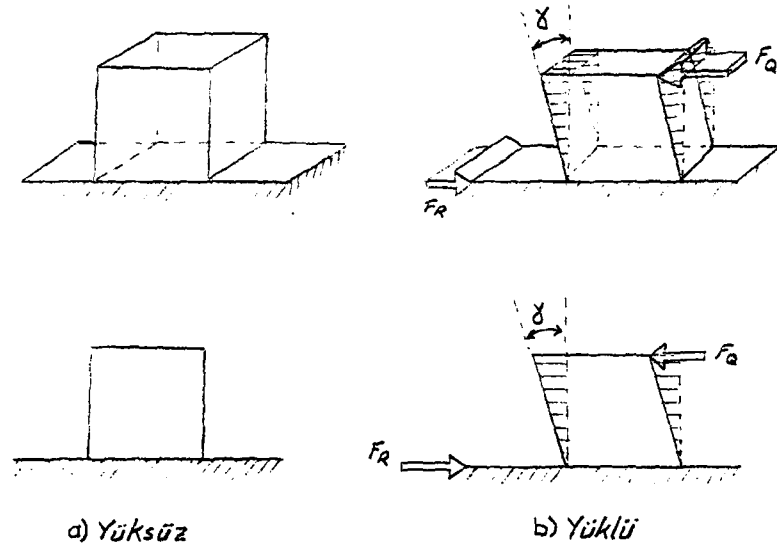
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.11)$$

ilişkisi bulunmaktadır[3].

x, y, z doğrultularındaki uzamalar ($\delta_i = L_i - L_{i0}$),

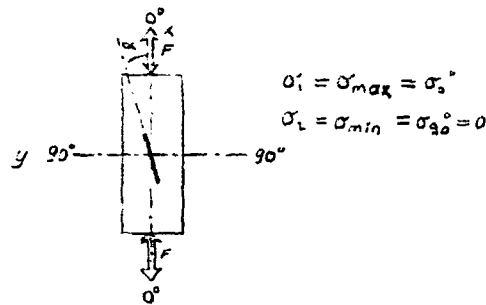
$$\begin{aligned} \delta_x &= l_x \cdot \epsilon_x \\ \delta_y &= l_y \cdot \epsilon_y \\ \delta_z &= l_z \cdot \epsilon_z \end{aligned} \quad (2.12)$$

olarak tanımlanabilir. Şekil 2.4'de kesme kuvveti altında birim malzemenin davranışı ve kayma modülünün fiziksel anlamı görülmektedir.



Şekil 2.4-Birim malzemenin kesme kuvveti ile şekil değiştirmesi.

Yük hücresinin üzerine yapıştırılacak uzama dönüştürücüsü tek eksenli bir ızgara olsa bile 2.2.5 ayrıtında açıklanacak olan çapraz duyarlılık nedeniyle kuvvet doğrultusuna bağlı olarak yüzeydeki uzama dağılımının bilinmesi gerekir. Bileşik kuvvetlerin uygulandığı bir malzemede ise ölçümü yapılan eksenel kuvvetler, dönüştürücülerin eksenlere olan açıları ile birlikte değerlendirilirler. Şekil 2.5'de görüldüğü gibi bir yüzeye sıkıştırma ya da çekme şeklinde bir kuvvet uygulandığında oluşan $\sigma = f(\alpha)$ gerilmesi ve $\epsilon = f(\alpha)$ uzamasını hesaplayalım.



Şekil 2.5-Gerilme eksenine kayık yerleşim.

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} (1 + \cos 2\alpha) \quad (2.13)$$

Normal eksenini ile α açısı yapan bir doğrultudaki uzama $\epsilon = f(\alpha)$, (2.7) ve (2.8) denklemlerinde $\sigma_y = \sigma_z = 0$ alınarak ,

$$\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = -\frac{1}{\nu}$$

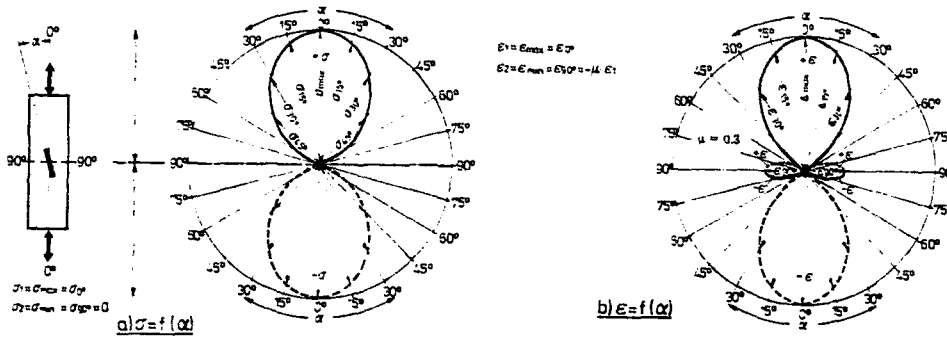
$$\epsilon_x = \epsilon_{0^{\circ}} = \epsilon_{\max} \quad , \quad \epsilon_y = -\epsilon_{0^{\circ}} \cdot \nu$$

(2.6) bağıntısında $\theta = \alpha$, $\epsilon_x = \epsilon_{0^{\circ}}$ ve $\epsilon_y = -\epsilon_{0^{\circ}} \cdot \nu$ konularak,

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{\epsilon_{0^{\circ}} - \epsilon_{0^{\circ}} \nu}{2} + \frac{\epsilon_{0^{\circ}} + \epsilon_{0^{\circ}} \nu}{2} \cos 2\alpha$$

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{1}{2} \epsilon_{0^{\circ}} [1 - \nu + (1 + \nu) \cdot \cos 2\alpha] \quad (2.14)$$

elde edilir.

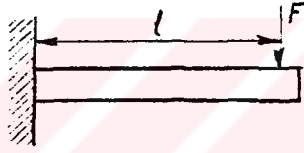


Şekil 2.6-Uzama ve gerilmeye ait kutupsal diagramlar.

2.1.1. BÜKÜLEN KİRİŞTE YÜZEY UZAMALARI

Yük hücrelerinde kuvvetin uzamaya dönüştürülmesinden yararlanılan tekniklerin başında bükülen kiriş gelir. Kullanılan aktif dönüştürücü sayısı ve köprü bağlantı biçimine bağlı olarak bir veya daha çok noktada bükülme sonucu yüzeyde oluşan uzama ve büzülme miktarı ölçülür.

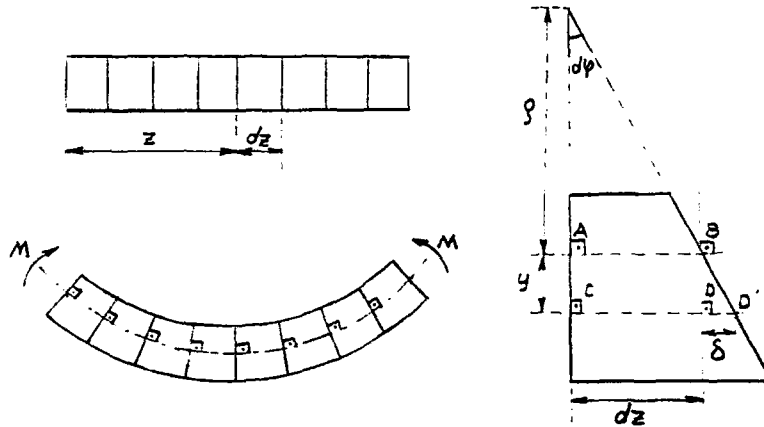
Mesnet noktasına l mesafede F kuvveti uygulanan bir kirişte uzamayı hesaplayalım (Şekil 2.7).



Şekil 2.7-1 mesafesindeki F kuvveti altında bükülen kiriş

Kiriş çubuk kesitleri halinde sonsuz küçük parçalara bölünürse (Şekil 2.8) aşağıdaki iki ilke geçerlidir [4].

- a) Çubuk kesitleri eğilmeden sonra da yine düzlem kalır.
- b) Kesitler eksenin yeni eğilme eğrisine dik kalırlar.



Şekil 2.8 - Bükülen kirişin sonsuz küçük parçalara ayrılması .

Eğrilik merkezinden eksene olan uzaklığa eğrilik yarıçapı denir ve ρ ile gösterilir. Şekil 2.8'de $dz = \rho d\phi$ dir. Benzer üçgenlerden,

$$\frac{DD'}{AB} = \frac{y}{\rho}$$

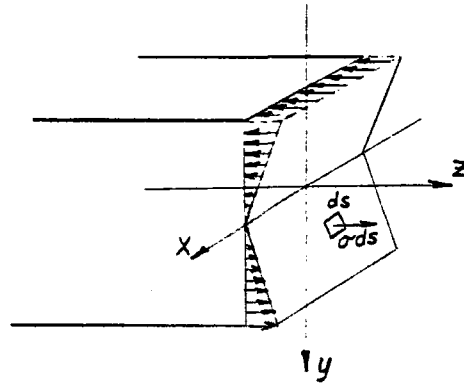
yazılabilir. Buna göre benzer üçgenlerden uzama,

$$\epsilon = \frac{DD'}{CD} = \frac{\delta}{dz} = \frac{y}{\rho}$$

(2.3) Bağıntısında gerilme yerine konursa,

$$\sigma = \frac{E}{\rho} y \quad (2.15)$$

olarak elde edilir. (2.15) Gereğince eğilme sebebiyle oluşan σ normal gerilmeleri y ile orantılıdır. Pozitif y için çubuğun altında çekme, üstünde büzülme oluşur.



Şekil 2.9-Bükülen kirişten alınan bir kesitte aksenal gerilmeler.

Çubukta alınan z' 'e dik bir kesitte (Şekil 2.9) yalnız eğilme momenti bulunduğundan σds 'ler toplamı sıfırdır.

(2.15)'de verilen σ , (2.16)'daki yerine konulursa,

$$\int_{(s)} \sigma ds = 0 \quad (2.16)$$

$$\int_{(s)} \frac{E}{\rho} y ds = \frac{E}{\rho} \int_{(s)} y ds = 0$$

olması gerektiği görülür. $\frac{E}{\rho} \neq 0$ olduğundan,

$$\int_{(s)} y ds = 0 \quad (2.17)$$

ilişkisi geçerli olur. (2.17) gereğince tarafsız eksenin ağırlık merkezinden geçer. σds Kuvvetlerinin momentleri kesitteki eğilme momentine eşit olmalıdır.

x eksenine göre σds 'in momenti $y \sigma ds$ olacağından, $\int_{(s)} y \sigma ds = M$ momentine eşit olmalıdır.

(2.15) deki σ yerine konursa,

$$\int_{(s)} y \frac{E}{\rho} y ds = \frac{E}{\rho} \int_{(s)} y^2 ds = M$$

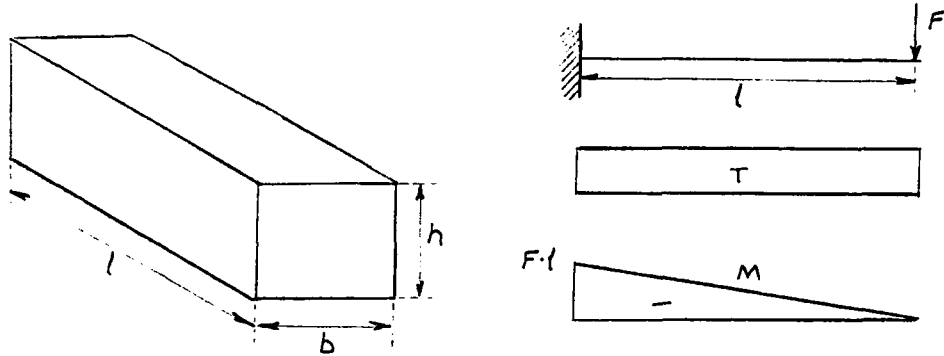
elde olunur. $\int y^2 ds$ integrali kesitin x eksenine göre I_x eylemsizlik momentidir.

$$\frac{E}{\rho} I_x = M, \quad \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_x} = \frac{\sigma}{Ey} \quad (2.18)$$

M büyüdükçe eğrilik yarıçapı küçülmektedir. EI_x çarpımına eğrilme rijidliği denir.

$$\sigma = \frac{M}{I_x} y \quad (2.19)$$

Buna göre şekil 2.10'da görülen dikdörtgen kesitte uzamayı hesaplayalım.



Şekil 2.10-Mesnet notasına l mesafeseki F kuvveti altında kirişin kesit tesiri ve moment diagramı.

$$I = b \frac{h^3}{12} , \quad M = F \cdot l \quad (2.18) \text{'de yerine konursa,}$$

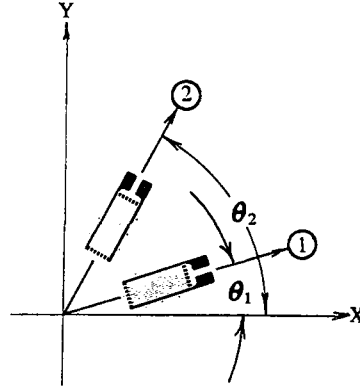
$$\sigma = \frac{F l}{\frac{b h^3}{12}} \cdot \frac{h}{2} = \frac{6 F l}{b h^2} \quad (2.20)$$

$$\epsilon = \frac{6 F l}{b E h^2} \quad (2.21)$$

olarak uzama elde edilir.

2.1.2 KESME KUVVETİ ALTINDA YÜZEYDE KAYMA

Uygun köprü yapısı ve dönüştürücü yerleşimi ile kayma gerilmesini ölçmek mümkündür. Bu yöntem ölçülen yükün uygulama noktasından bağımsız elde edilmek istendiği durumlarda tercih edilir.



Şekil 2.11-Uzamanın ölçüldüğü ve indirgendiği eksen takımları.

x-y Koordinat düzleminde birbirinden bağımsız, yatay eksenle θ_1 ve θ_2 açısında dönüştürücülerin üzerinde yer alacağı iki keyfi eksen (Şekil 2.11) göz önünde bulunduralım. (2.6) Bağıntısından,

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_1 \quad (2.22)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta_2 + \frac{\gamma}{2} \sin 2\theta_2 \quad (2.23)$$

yazılır. (2.22)'den (2.23) çıkartılır ve γ_{xy} çekilirse,

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_2) - (\epsilon_x - \epsilon_y)(\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2)}{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2} \quad (2.24)$$

elde edilir. Özellikle $\cos 2\theta_1 = \cos 2\theta_2$ için (2.23) ifadesinde ϵ_x ve ϵ_y görülmez. Bu durumda,

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2} \quad (2.25)$$

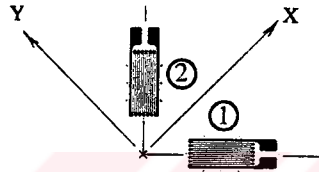
Kosinüs fonksiyonu sifıra göre simetrik olduğundan

$$\theta_1 + \alpha = -\frac{\pi}{2}, 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \dots, \frac{n\pi}{2} = \theta_2 - \alpha \quad \text{için} \quad \cos 2\theta_1 = \cos 2\theta_2 \quad \text{dir.}$$

Buna göre dönüştürücüler $\theta_1 = -\theta_2$ olacak şekilde x eksenine simetrik yerleştirilirse,

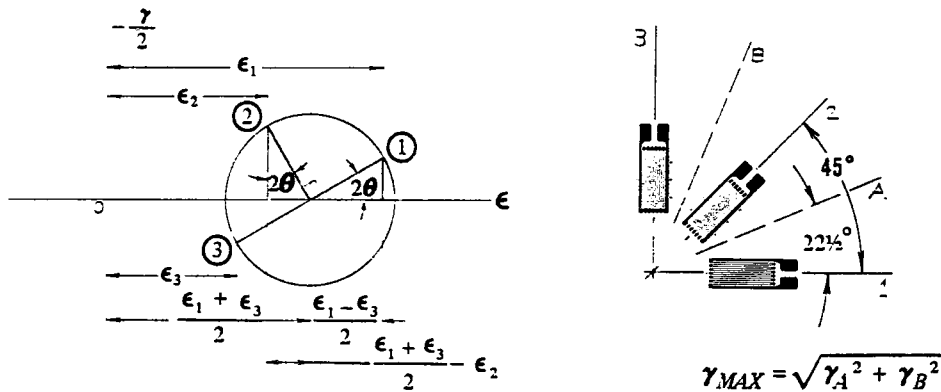
$$\gamma_{xy} = -\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sin 2\theta_2} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sin 2\theta_1} \quad (2.26)$$

elde edilir ve neticede şekil 2.12'deki gibi birbirine 90° ve x eksenine simetrik iki eksen için kaymanın $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ile orantılı olacağı görülür [5].



Şekil 2.12-Ölçüm eksenlerinin x eksenine simetrik yerleşimi.

Şekil 2.13'deki Mohr çemberinde taralı iki üçgen daima özdeştir ve 45° 'lik rozet için maksimum kayma birbirleri arasında 45° bulunan iki eksendeki uzamaların vektörel toplamına eşittir. Gerilme yönünün bilinmediği durumlarda 45° 'lik 3 elemanlı dörtgen rozet bağlanarak uzama ölçülebilir.



Şekil 2.13-Mohr çemberi ve 45° 'lik üç elemanlı rozet yerleşimi.

Vektörel toplam genliği $\gamma_{\max} = \sqrt{\gamma_A^2 + \gamma_B^2}$ ifadesindeki γ_A ve γ_B (2.26)'dan yararlanılarak ,

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sin 45^\circ}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\sin 45^\circ}\right)^2}$$

ya da

$$\gamma_{\max} = \sqrt{2} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (2.27)$$

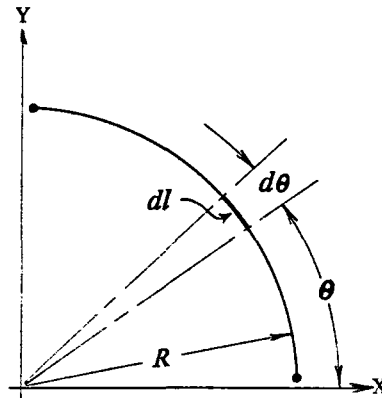
olarak yazılabilir. Mohr çemberindeki eksenel uzamalar,

$$\epsilon_p, \epsilon_q = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \quad (2.28)$$

Kesme kuvveti altında kaymayı çeşitli ızgara konfigürasyonları ile ölçmek mümkündür. Şekil 2.14'deki çeyrek dairenin dl parçasının uzunluk değişimi uzamanın uniform olduğu kabulü ile,

$$\Delta(dl) = \epsilon_\theta R d\theta \quad (2.29)$$

yazılabilir.



Şekil 2.14-Çeyrek dairenin sonsuz küçük parçalara ayrılması.

Burada ϵ_θ , θ açısındaki normal uzamadır. Çapraz duyarlılık ihmal edildiğinden dl elemanı ile tüm θ parçasında uzama aynı etkiyi gösterir. Tüm çeyrek dairedeki uzunluk değişimi,

$$\Delta l = \int_0^{\pi/2} \epsilon_\theta R d\theta \quad (2.30)$$

ve net uzama,

$$\bar{\epsilon}_1 = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{(\frac{\pi}{2}) R} \int_0^{\pi/2} \epsilon_\theta R d\theta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_\theta d\theta \quad (2.31)$$

olarak bulunur. Şekil 2.14'de görülen eksenden itibaren θ açısındaki yayda bulunan eleman $(\theta + \pi/2)$ 'deki uzamaya duyarlı olduğundan,

$$\epsilon = \epsilon_{(\theta + \frac{\pi}{2})} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2(\theta + \frac{\pi}{2}) + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2(\theta + \frac{\pi}{2})$$

$$\begin{aligned} \cos(2\theta + \pi) &= -\cos 2\theta \\ \sin(2\theta + \pi) &= -\sin 2\theta \end{aligned}$$

olduğundan

$$\epsilon_\theta = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (2.32)$$

olarak elde edilir. (2.32)'deki ϵ_θ ifadesi (2.31)'deki yerine yazıp integre edilirse,

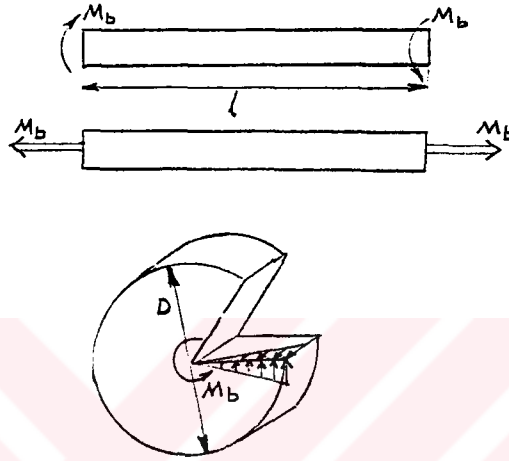
$$\bar{\epsilon}_1 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\gamma_{xy}}{\pi} \quad (2.33)$$

elde edilir. Eğer ikinci çeyrek daire üzerindeki bir yay parçasına dönüştürücü konursa görülecek uzama,

$$\bar{\epsilon}_2 = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\gamma_{xy}}{\pi} \quad (2.34)$$

olur.

2.1.3 BURULAN MİLİN GERİLMESİ



Şekil 2.15-Daire kesitli milin burulması.

Daire kesitli millerin burulmasına en yalın örnek şekil 2.15’de görülen çapı D , uzunluğu l ve M_b burulma momenti etkisinde dengede olan mil verilebilir. Böyle bir milin her dik kesiti M_b burulma momenti etkisindedir. Burulma momenti etkisindeki dairesel bir kesitte oluşan kayma gerilmesi dağılışı lineer elastik malzemeler için merkezden uzaklıkla orantılı artar. r Merkezden uzaklık olarak üzere

$$\tau = \frac{M_b}{\pi \frac{D^4}{32}} r \quad [N/m^2] \quad (2.35)$$

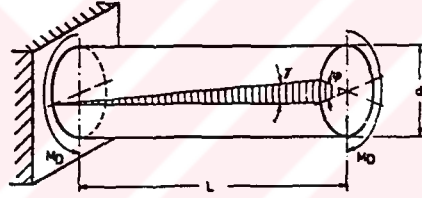
dir.

Burada $\frac{\pi D^4}{32} = J_0$ kutupsal eylemsizlik momenti adını alır [1]. Kesitte meydana gelebilecek en büyük kayma gerilmesi $r=D/2$ konarak,

$$\tau_{maks} = \frac{16M_b}{\pi D^3} \quad [N/m^2] \quad (2.36)$$

olarak bulunur. Birim dönme açısı ise (2.37) bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$\omega = \frac{M_b}{G \frac{\pi D^4}{32}} \quad [rad/m] \quad (2.37)$$



Şekil 2.16-Bir ucu mesnetlenmiş bir milin burulma momenti ile dönmesi.

Şekil 2.16'da görülen rölatif dönme θ ise uzunluğa bağlı olarak,

$$\theta = \omega \cdot l = \frac{32M_b}{G\pi D^4} l \quad [rad] \quad (2.38)$$

dir.

Yüzeyde mil burulma eksenine $\pm 45^\circ$ 'de kesme kuvveti altında şekil değişikliği,

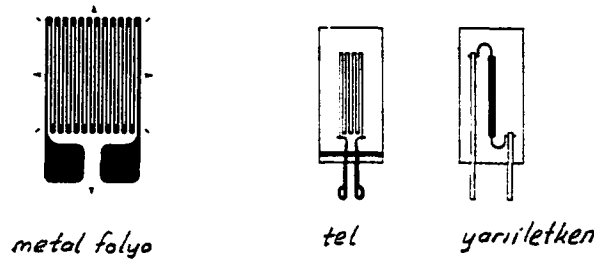
$$\epsilon_{45^\circ} = \frac{\tau_{maks}}{G} \quad (2.39)$$

dir. Burulma momenti etkisinde kalan değişik kesitlerdeki çubuklar için ilişkiler benzer şekilde J_0 hesaplanarak daire kesitli mil için verilen bağıntılarda yerine konularak elde edilir.

2.2 UZAMA DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜ (STRAIN GAUGE)

Uzama dönüştürücüsü mekanik büyüklükleri elektriksel büyüklüklere dönüştürülmesinde en yaygın ölçü elemanlardan biridir. Adında anlaşılacağı gibi doğrudan ölçtüğü büyüklük uzamadır. Uzama sebebi olan kuvvet, basınç, moment, sıcaklık ve benzeri ikincil büyüklükler gerekli koşullar sağlandığı takdirde uzama etkilerinden yararlanılarak ölçülebilirler.

Kullanım amacı ve uygulama yerine uygun olarak çok çeşitli uzama dönüştürücüleri tasarlanmıştır. Uzama dönüştürücülerini yarıiletken ve metal ızgaralı olmak üzere iki temel grupta toplamak mümkündür.



Şekil 2.17-Temel uzama dönüştürücüleri.

Metal ızgara 3..5 μm kalınlığındaki metal folyodan veya 15..25 μm çapında telden üretilebilir. Folyo tekniği ile minyatür dönüştürücüleri ucuza üretmek mümkündür. Diğer taraftan ızgara uzunluğu 20mm'yi geçen dönüştürücülerde tel kullanmak daha kolaydır. Tel ızgaralı dönüştürücüler yüksek sıcaklıkta çalışılan ortamlarda ölçüm yapmak için daha uygundur. Deneysel gerilme analizinde genellikle metal ızgaralı dönüştürücüler tercih edilirler. Pahalı, yarıiletken dönüştürücüler ise sadece bazı özel durumlarda kullanılırlar.

Uzama dönüştürücüsünün direnç değişimi dönüştürücü geometrisindeki kısmi değişimlere bağlıdır. Bu değişim,

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \epsilon + 2\nu\epsilon + \frac{d\chi}{d\epsilon} \frac{\epsilon}{\chi}$$

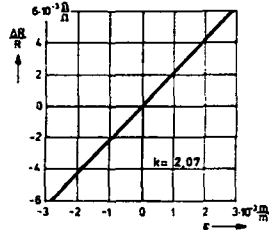
ya da

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon \left(1 + 2\nu + \frac{d\chi}{d\epsilon} \frac{1}{\chi} \right) \quad (2.40)$$

(2.40) bağıntısında yer alan $(d\chi/d\epsilon)/\chi$ malzeme yapısına bağlı bileşen olup buradaki χ dönüştürücü öz iletkenliği; $d\chi/d\epsilon$ ise uzama ile öz iletkenliğin değişimidir. Konstantan adı verilen bakır nikel alaşımı bu tür uygulamalar için bilinen en uygun malzemedir. İyi bir yaklaşıklıkla konstantanın $\frac{\Delta R}{R}$ değişimi uzama ile bir katsayının değişimine eşit alınabilir.

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon \cdot F_G \quad (2.41)$$

(2.41) Bağıntısındaki doğrusal orantı katsayısına F_G dönüştürücü kazancı denir ve dönüştürücü duyarlılığının bir ifadesidir. Şekil 2.18'de sabit sıcaklıktaki konstantan ızgaralı bir dönüştürücünün karakteristiği görülmektedir.



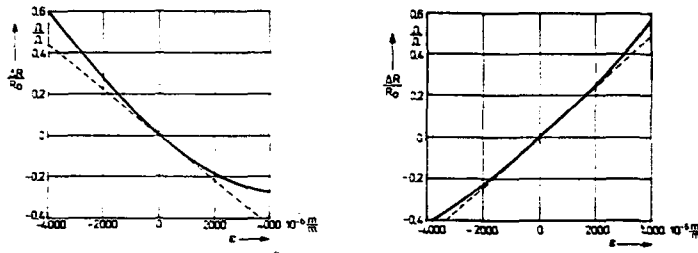
Şekil 2.18-Konstantan ızgaralı bir dönüştürücüde uzama ile direnç değişimi.

Genellikle dönüştürücü kazancı 2 civarındadır ve üretici firma tarafından ölçülerek elemanla birlikte verilir.

Yarıiletken uzama dönüştürücülerinin çalışma ilkesi piezo-elektrik etkiye dayanır ve direnç değişimi (2.42) bağıntısı ile verilebilir [6].

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{T_0}{T} k \epsilon + \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 c \epsilon^2 + \dots \quad (2.42)$$

Burada T_0 [K°] referans sıcaklık, T [K°] ölçüm sırasındaki sıcaklıktır. k ve c ise sabit katsayılarıdır. Ölçüm sonucundaki direnç değişimi uzama kadar sıcaklık değişimine de bağlıdır. Şekil 2.19'da p tipi ve n tipi silikon dönüştürücüler için uzama-direnç değişimi görülmektedir.



Şekil 2.19-n ve p tipi yarıiletken dönüştürücü karakteristikleri.

Yarıiletken dönüştürücülerde uzama miktarının sıfır olduğu noktada karakteristik eğriye çizilen teğetin eğimi dönüştürücü karakteristiği olarak tanımlanır. Ticari olarak üretilen yarıiletken dönüştürücülerde bu katsayı p tipi silikon için +110..+130; n tipi silikon için ise -80...-100 arasında değişmektedir. Yarıiletken dönüştürücülerin doğrusal olmayan karakteristikleri ölçümde sayısal düzeltmeleri gerektirmektedir. Doğrusal olmayan karakteristik ve dönüştürücünün pahallıya mal olması ancak bazı özel uygulamalarda kullanımı uygun kılmaktadır. Takip eden ayrıtlarda metal ızgaralı dönüştürücüler daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.2.1 UZAMAYA DUYARLI ALAŞIMLAR

Uzama dönüştürücüsünde işletme karakteristiğini etkileyen en önemli faktör dönüştürücüde kullanılan alaşımın niteliğidir. Dönüştürücü yapımında kullanılan alaşımlar öz sıcaklık kompanzasyonlu konstantan (A), tavlanmış konstantan (P), eş-elastik (D) ve öz sıcaklık kompanzasyonlu formda karmanın geliştirilmiş bir hali olan nikel krom alaşımıdır. Bu alaşımlar içinde konstantan, en eskisi ve halen de en yaygın kullanılanıdır. Konstantan kullanılan dönüştürücülerde dönüştürücü kazancı göreceli olarak uzamadan ve sıcaklıktan bağımsızdır. Çok küçük ızgaralarda dahi yeterli direnci sağlayabilir. Ancak %5 ve daha büyük uzamalarda ızgara malzemesi olarak tavlanmış konstantan kullanmak gerekir. Bu malzeme ile 3mm'den uzun dönüştürücüler %20'ye kadar uzatılabilirler. Fakat P alaşımında periyodik çalışmada zamanla kalıcı direnç değişimi görülür. Kalıcı direnç değişimi sıfır noktasının kaymasına sebep olur. Bu sebeple P alaşımı periyodik ölçümlerde tavsiye edilmez. Sıfır stabil noktasının gerekmediği saf dinamik ölçümlerde eş-elastik alaşımın (D) bazı üstünlükleri vardır. A alaşımına göre

yorulma ömrü fazladır ve gürültüye göre işaret kazancı yüksektir. Ancak D alaşımının ısıl bağıllılığının yüksek olması statik uzama ölçümünü engeller. Yüksek dönüştürücü kazancı gereken uygulamalarda tam köprü yapılarak (izin verilebilir bağıl ısı katsayısını elde etmek için) D alaşımı kullanılabilir. $\pm 5000\mu\epsilon$ uzamanın üzerine çıkıldığında çıkış doğrusallığı bozulur. İyileştirilmiş karma (K) da geniş uygulama alanı bulan bir ızgara malzemesidir. Yorulma ömrü ve kararlılığı çok iyidir. Oda sıcaklığında uzun periyotlu (30 günden büyük) statik ölçümler için ideal malzemedir. $-269...+260^{\circ}\text{C}$ aralığında uzun periyotlu ölçümlerde iyi sonuç verdiği gibi daha kısa süreli ölçümlerde $+400^{\circ}\text{C}$ 'a kadar çıkılabilir [7]. Konstantanda olduğu gibi K alaşımında da öz sıcaklık kompanzasyonu yapılabilir. K Alaşımı üzerine doğrudan lehim yapmak zor olduğundan uçlar çift taraflı bakır kaplanır.

2.2.2 TAŞIYICI MALZEME

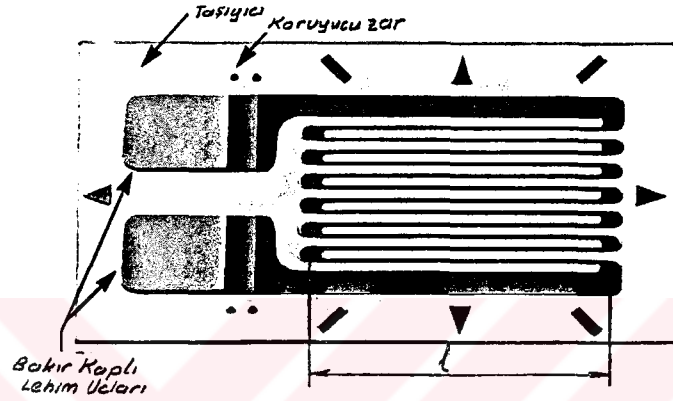
Taşıyıcı malzemenin görevleri şöyle sıralanabilir:

- a) Dönüştürücünün yük hücreğine tesisine kadar ızgaranın taşınmasını sağlar.
- b) Yapıştırmaya hazır bir yüzey oluşturur.
- c) Metal ızgara ile dönüştürücü arasında elektriksel yalıtımı sağlar.

Poliyamid ve epoksi fenolik fiberglas en çok kullanılan taşıyıcı malzemelerdir. Poliyamidin bükülebilirliği çok iyidir ve küçük açı değişimi olan yüzeylere rahatça uyum sağlar. Poliyamidin üzerine konulan ızgaranın zar mukavemeti yüksek olduğundan yapıştırma sonucu oluşabilecek mekanik darbelere karşı duyarsızdır. $-195...+175^{\circ}\text{C}$ arası statik ve dinamik gerilme ölçümleri için ideal taşıyıcı malzemesidir.

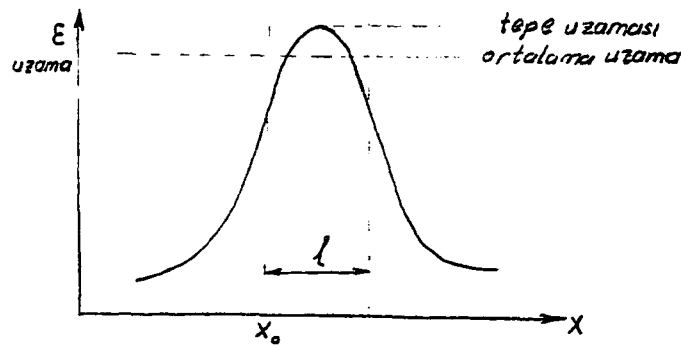
Daha geniş sıcaklık aralığında çalışmak gerektiğinde ($-269...+290^{\circ}\text{C}$) epoksi fenolik kullanılmalıdır . Bu taşıyıcı malzemesi kısa süreler için $+400^{\circ}\text{C}$ 'a dayanır. Fakat %2'den büyük uzamalarda deformasyona sebep olur.

2.2.3 DÖNÜŞTÜRÜCÜ IZGARA UZUNLUĞU



Şekil 2.20-Tek eksenli bir dönüştürücüde ızgara uzunluğu.

Dönüştürücü uzunluğu ızgarada uzamaya duyarlı bölgenin uzunluğudur. Izgara kıvrımları ve lehim uçları geniş kesitli olmaları sebebiyle uzamaya duyarsız kabul edilir. Gerilme analizi genellikle makina parçasının en çok zorlanan noktalarında yapılır ve buralarda gerilme yoğunluğu yüksektir. Maksimum gerilme sınırlı bir bölgededir. Dönüştürücü ise uzunluğu boyunca gerilmenin integraliyle yani ortalama uzamayla orantılı bir çıkış verir (direnc değişimi).



Şekil 2.21-Izgara boyunca uzamanın noktasal değişimi.

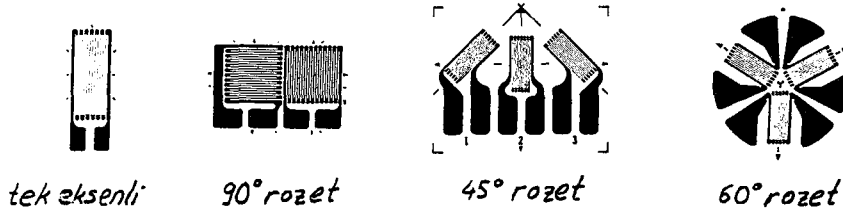
Izgara başlangıcı olan x_0 noktasında 1 ızgara uzunluklu bir dönüştürücünün algıladığı ortalama uzama,

$$\Delta L_{ort} = \frac{1}{l} \int_{x_0}^{x_0+l} \Delta L(x) dx \quad (2.43)$$

tir. Pratikte dönüştürücü uzunluğu yapıştırıldığı yerin eğrilik yarıçapının 1/10'unu geçmemelidir. 3mm'den kısa dönüştürücülerin performansı daha düşüktür. Maksimum izin verilebilir uzama, sürekli uzamadaki kararlılık ve periyodik uzamalarda ömür bundan etkilenir. Büyük dönüştürücüleri (3..13mm) taşımak ve yapıştırmak da kolaydır. Isıl disipasyon güçleri daha fazladır çünkü aynı gücü daha geniş bir alanda tüketirler. En çok 3..6mm arasındaki uzunlukta uzama dönüştürücüleri üretilir. 3 mm'den daha kısa ve 6 mm'den daha uzun dönüştürücüler daha pahalıdır. 6 mm'den büyük dönüştürücüler yorulma ömrü, kararlılık ve uzama yönünden büyük farklılıklar göstermezler.

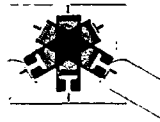
2.2.4 DÖNÜŞTÜRÜCÜ ŞEKİLLERİ

Dönüştürücü ızgara şekli kullanılacağı yerde farklı eksenlerde oluşabilen gerilme dağılımına ve ölçülmek istenen bileşene göre belirlenir. Bazı durumlarda benzer ızgara şekilli dönüştürücüler arasındaki tek fark ızgara direnci ($120\Omega, 350\Omega, \dots$) olmaktadır. Yüksek dirençli ızgara her zaman tercih edilir. Izgarada açığa çıkan enerji ızgara direnci ile ters orantılıdır. Yüksek dirençli ızgaralarda bağlantı noktaları ve bağlantı kabloları dirençlerinin toplamının, tüm direnç değişimine etki oranı daha küçüktür.



Şekil 2.22-Çeşitli dönüştürücü ızgara şekilleri.

±5° Duyarlılıkla yönü bilinen ve tek doğrultuda oluşan uzamalar için tek ızgaralı dönüştürücü kullanılır. İki eksenle birden oluşabilecek uzamalar için ise rozet dönüştürücü kullanılır. Eğer uzamaların olduğu iki eksenin yeri belirli ise bu eksenlerle çakışık olarak 90° iki ızgaralı rozet seçilir. Ancak eksenlerin yeri bilinmiyorsa üç elemanlı 45° ya da 60°'lik rozet tercih edilir. Rozet dönüştürücü kullanıldığı takdirde yayvan ve yığılmış rozet seçimi dikkate alınmalıdır.



Şekil-2.23 Yığılmış rozet.

Isı transferi açısından yayvan rozet yığılmış rozete üstünlük sağlar. Bunun sebebi aynı enerjinin daha geniş bir alanda tüketilmesi ve transferidir. Fakat uzama dağılımının gerilme yoğunluğuna bağlı olarak noktasal

farklılıklar gösterdiği yerlerde yayvan rozet hatalı ölçüme neden olur. Çünkü her bir yayvan rozet elemanı farklı noktalarındaki uzamayı ölçer. Bu durumda yığılmış rozet (Şekil 2.23) tercih edilir. Ayrıt 2.1.2’de farklı eksenlerdeki uzamalardan düzlemin temel iki eksenindeki uzama bileşenlerinin nasıl bulunabileceği gösterilmiştir.

2.2.5 UZAMA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN ÇAPRAZ DUYARLILIĞI

Çapraz duyarlılık ölçüm eksenine dik uzamaların dönüştürücü tarafından algılanmasıdır. Her bir dönüştürücü elemanı ideal olarak yapıştırıldığı yüzeyde, boyuna ekseninde oluşan uzamaları ölçer. Ancak pratikte ölçüm eksenine dik bileşeni olan uzama, dönüştürücüde ölçülen asal eksenindeki uzama bilgisini de etkiler.

Düzlem üzerine yapıştırılmış telli bir dönüştürücüde dik eksenindeki uzamanın algılanması ihmal edilebilir mertebededir. Ancak metal folyo dönüştürücülerde çapraz duyarlılık karmaşık bir olaydır ve tüm ızgara tasarımlarında değişik oranlarda etkilidir. Izgara uçlarındaki dönüşler çapraz duyarlılığı azaltmak amacıyla ızgara boyunca uzanan kesitten daha geniş tutulur. Folyo malzemesine ve metalurjik duruma bağlı olarak ızgaradaki enine uzamanın ölçülen uzamaya katkısı negatif ya da pozitif olabilir.

Tek eksenli gerilmenin olduğu malzemede kuvvet yönüne dik doğrultuda uzama, malzemenin poisson katsayısı ile orantılı olup boyuna uzamaya oranı küçüktür. Izgaranın çapraz duyarlılığı da küçük olduğundan ölçüm hatası genellikle ihmal edilebilir mertebededir. Ancak iki eksenli gerilme durumunda dik eksenindeki uzamanın büyük-

lüğüne bağlı olarak ölçüm bilgisinin düzeltilmesi gerekebilir. Tek eksenli eksenli gerilen malzemenin Poisson katsayısı 0.285 (çelik) olması hali için çapraz duyarlılıktan gelen hatalar sıfırdır. Çünkü üretici firma dönüştürücü kazancını belirlerken tek eksenli gerilme halini ve Poisson katsayısını da göz önünde bulundurur. Diğer bir deyişle, farklı Poisson katsayılı bir malzemeye yapıştırılan dönüştürücüde, çeliğe yapıştırılan ancak maksimum uzamanın olduğu asal eksenlerden kayık yerleştirilen, ya da bileşik gerilmenin (iki eksenli) olduğu durumlarda çapraz duyarlılık nedeniyle hatalar oluşur ve düzeltme yapılması gerekebilir.

Uzama dönüştürücülerinin iki adet kazanç katsayısı tanımlanabilir. Bunlar:

F_a : Eksenel (boyuna) dönüştürme kazancı,
 F_t : Enine dönüştürme kazancı
 olmak üzere,

$$\frac{\Delta R}{R} = F_a \epsilon_a + F_t \epsilon_t \quad (2.44)$$

şeklinde ilişkilidir. Burada ϵ_a eksenel uzama ve ϵ_t ise enine uzamadır. Dönüştürücünün çapraz duyarlılığı,

$$K_t = \frac{F_t}{F_a} \quad (2.45)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda dönüştürücü çıkışı,

$$\frac{\Delta R}{R} = F_a (\epsilon_a + K_t \epsilon_t) \quad (2.46)$$

şeklindedir. Tek eksenli gerilme durumunda (2.4) bağıntısı ν_0 Poisson katsayılı bir malzeme için $\epsilon_t = -\nu_0 \epsilon_a$ yazılarak,

$$\frac{\Delta R}{R} = F_a (1 - v_0 K_t) \epsilon_a \quad (2.47)$$

elde edilir. Dönüştürücü üreticileri F dönüştürücü kazancı olmak üzere,

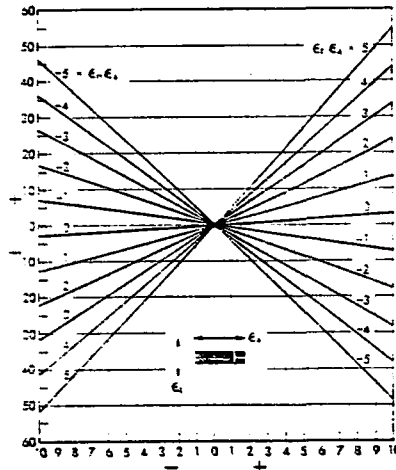
$$\frac{\Delta R}{R} = F \epsilon \quad (2.48)$$

olarak tanımlarlar. Oysa buradaki $F = F_a (1 - v_0 K_t)$ 'dir. Ayrıca bu tanımdaki ϵ eksenel uzama olan ϵ_a 'dır. Verilen F katsayısı $v_0 = 0.285$ ve tek eksenel gerilmenin tam dönüştürücü ekseninde olması durumu için geçerlidir. Bunun dışındaki bir koşulda kullanılan dönüştürücüde çapraz duyarlılık sebebiyle oluşan % hata,

$$n_\epsilon = \frac{K_t \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} + 1 \right)}{1 - v_0 K_t} \times 100 \quad (2.49)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Buradaki v_0 üretici firmanın F 'i belirlerken kullandığı Poisson katsayısıdır

(Genellikle 0.285). Yaklaşıklık yapılarak $n_\epsilon \approx K_t \frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} \times 100$ alınırsa oluşacak % hata şekil 2.24 'te görülmektedir.



Şekil 2.24-Çapraz duyarlılık sebebiyle oluşan % hata.

Çapraz duyarlılık sebebiyle oluşan ve değeri bilinen hata toplam sistem hatası içinde ihmal edilemez mertebede olduğu takdirde ölçümde düzeltme gerekir.

90° iki elemanlı rozetin x ve y olmak üzere dik iki eksene yerleştirilmiş olduğu durumu ele alalım. Eksenlerdeki gerçek uzamalar şöyle ifade edilir ($K_{t1}=K_{t2}$ şartıyla),

$$\epsilon_x = \frac{(1 - \nu_0 K_t) (\hat{\epsilon}_x - K_t \hat{\epsilon}_y)}{1 - K_t^2} \quad (2.50)$$

$$\epsilon_y = \frac{(1 - \nu_0 K_t) (\hat{\epsilon}_y - K_t \hat{\epsilon}_x)}{1 - K_t^2} \quad (2.51)$$

Burada $\hat{\epsilon}_x = \hat{\epsilon}_{a1}$ birinci dönüştürücünün ölçtüğü düzeltilmemiş uzama, $\hat{\epsilon}_y = \hat{\epsilon}_{a2}$ ikinci dönüştürücünün ölçtüğü düzeltilmemiş uzama, ϵ_x ve ϵ_y ise gerçek uzama değerleridir. Paydadaki $(1 - K_t^2)$ değeri 0.995'ten büyük olduğundan genellikle 1 olarak alınabilir. Bu durumda düzeltilmiş eksenel uzamalar,

$$\epsilon_x = (1 - \nu_0 K_t) (\hat{\epsilon}_x - K_t \hat{\epsilon}_y) \quad (2.52)$$

$$\epsilon_y = (1 - \nu_0 K_t) (\hat{\epsilon}_y - K_t \hat{\epsilon}_x) \quad (2.53)$$

olarak elde edilir [8]. Dönüştürücü katsayısında üretici tarafından belirlenen F yerine düzeltilmiş değeri olan

$$F_a = \frac{F}{1 - \nu K_t} \quad \text{kullanılırsa,}$$

$$\epsilon_x = \hat{\hat{\epsilon}}_x - K_t \hat{\hat{\epsilon}}_y \quad (2.54)$$

$$\epsilon_y = \hat{\hat{\epsilon}}_y - K_t \hat{\hat{\epsilon}}_x \quad (2.55)$$

şeklinde yazılır. Burada $\hat{\hat{\epsilon}}_x$ ve $\hat{\hat{\epsilon}}_y$ dönüştürücülerin düzeltilmiş katsayı kullanılarak ölçtükleri uzamalardır.

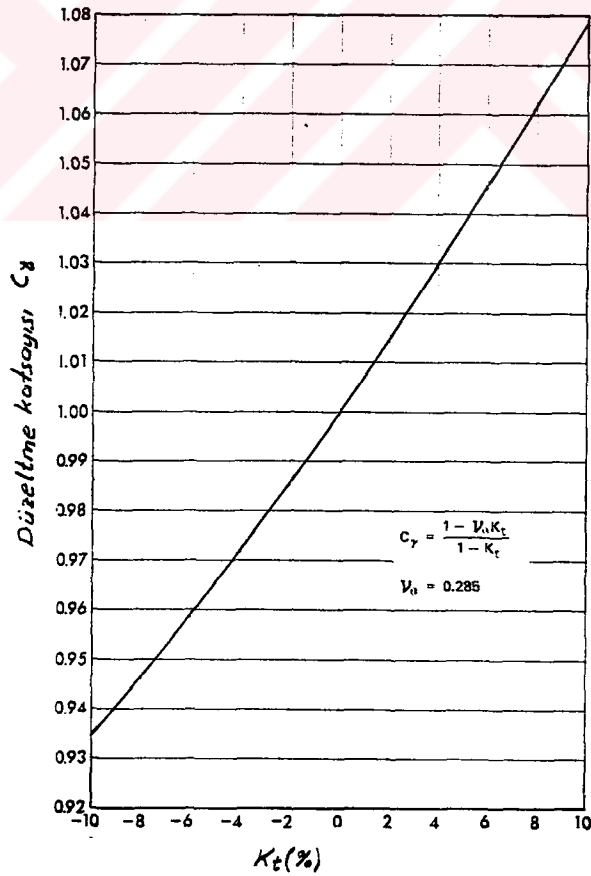
90° Rozet veya "T" rozetin kesme kuvveti altında uzamanın ölçümü için kullanabileceğini daha önce belirtmiştik. Eğer her iki dönüştürücünün de çapraz duyarlılığı aynı ise hata, uzamanın durumuna bağlı olmadığından kolayca düzeltililebilir.

$$\gamma = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t} (\hat{\epsilon}_x - \hat{\epsilon}_y) \quad (2.56)$$

Hata düzeltme katsayısı $C_\gamma = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t}$ olarak tanımlanırsa,

$$\gamma = C_\gamma (\hat{\epsilon}_x - \hat{\epsilon}_y) = C_\gamma \gamma \quad (2.57)$$

Burada γ düzeltilmeden önce kayma gerilmesi altındaki uzamadır. $\nu_0 = 0.285$ için C_γ düzeltme katsayısının değişimi şekil 2.25 görülmektedir.



Şekil 2.25-Düzeltilme katsayısının K_t ile değişimi.

Temel eksenlerin yeri bilinmediği zaman uzamanın üç bağımsız noktada ölçülmesi gerekir. Üç elemanlı rozetlerden 45° 'lik dörtgen kullanıldığı takdirde düzeltilmiş uzama değerleri,

$$\epsilon_1 = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} [\hat{\epsilon}_1 - K_t \hat{\epsilon}_3] \quad (2.58)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} [\hat{\epsilon}_2 - K_t (\hat{\epsilon}_1 + \hat{\epsilon}_3 - \hat{\epsilon}_2)] \quad (2.59)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} [\hat{\epsilon}_3 - K_t \hat{\epsilon}_1] \quad (2.60)$$

olarak yazılır. (2.58), (2.59) ve (2.60) bağıntılarında $\hat{\epsilon}_1$, $\hat{\epsilon}_2$ ve $\hat{\epsilon}_3$ dönüştürücülerin doğrudan ölçtüğü uzama, ϵ_1 , ϵ_2 ve ϵ_3 ise düzeltilmiş uzamalardır. Bu bağıntılar yığın rozetteki dönüştürücü elemanlarının aynı çapraz duyarlılıkta olması durumunda geçerlidir. Düzlemsel rozette ise geçerliliği uzama eksenlerinin kesiştiği nokta ile dönüştürücü eksenlerinin kesiştiği noktaların çakışık olmasına bağlıdır. Benzer şekilde "Y" rozette düzeltilmiş uzama miktarları,

$$\epsilon_1 = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} \left[\left(1 + \frac{K_t}{3}\right) \hat{\epsilon}_1 - \frac{2}{3} K_t (\hat{\epsilon}_2 + \hat{\epsilon}_3) \right] \quad (2.61)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} \left[\left(1 + \frac{K_t}{3}\right) \hat{\epsilon}_2 - \frac{2}{3} K_t (\hat{\epsilon}_3 + \hat{\epsilon}_1) \right] \quad (2.62)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} \left[\left(1 + \frac{K_t}{3}\right) \hat{\epsilon}_3 - \frac{2}{3} K_t (\hat{\epsilon}_1 + \hat{\epsilon}_2) \right] \quad (2.63)$$

olarak elde edilir.

Gerçekte hangi rozet şekli olursa olsun düzeltilmemiş eksenel uzamaları hesaplayıp, düzeltilmiş değerleri bunlardan türetmek mümkündür. Çünkü eksenlere indirgenmiş

uzamalardaki çapraz duyarlılığa bağlı hatalar rozet biçiminden bağımsızdır. Ancak tüm rozet elemanlarının aynı çapraz duyarlılıklı olmaması durumunda bu geçiş geçersizdir. $\hat{\epsilon}_p$ ve $\hat{\epsilon}_q$ düzeltilmemiş, eksene indirgenmiş uzamalar olsun. ϵ_p ve ϵ_q düzeltilmiş eksene indirgenmiş uzama değerleri,

$$\epsilon_p = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} (\hat{\epsilon}_p - K_t \hat{\epsilon}_q) \quad (2.64)$$

$$\epsilon_q = \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 - K_t^2} (\hat{\epsilon}_q - K_t \hat{\epsilon}_p) \quad (2.65)$$

bağıntıları ile bulunur. Benzer bir yaklaşım Mohr uzama çemberine uygulanabilir. Düzeltilmemiş Mohr çemberinde çemberin merkezinin eksene uzaklığı ve çemberin yarıçapı $\frac{1 - \nu_0 K_t}{1 + K_t}$ ile çarpılarak yeni bir çember çizilirse düzel-

tilmiş Mohr çemberi elde edilir. En büyük ve en küçük eksenel uzamalar bu çemberin merkeze uzaklığı ile yarıçapının toplamına ve farkına eşittir.

2.2.6 SICAKLIĞIN UZAMA DÖNÜŞTÜRÜCÜSÜNE ETKİSİ

İdeal olarak uzama dönüştürücüsünün ortam şartlarından bağımsız olarak sadece yapıştırıldığı yüzeydeki uzamaya bağlı bir çıkış vermesi istenir. Fakat dönüştürücü ızgara direnci sıcaklıkla değişim gösterir. Dolayısıyla direnç değişiminin uzama değişimine oranı olan dönüştürücü katsayısı da değişir. Bu ısı kaynaklı değişim ölçülen uzamanın büyüklüğünden bağımsızdır. Pratikte uzama dönüştürücüsü ile ölçümde karşılaşılan en önemli hata kaynağı olan ısıl değişimler iki şekilde etkili olmaktadır. Birincisi, ızgaradaki iletken direncinin sıcaklığa bağlı olması sebebi ile toplam ızgara direnci

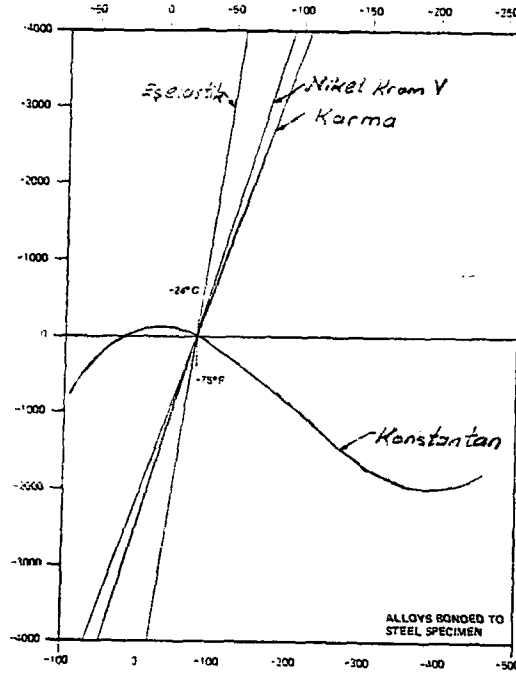
sıcaklığa bağlı olarak değişir. İkinci etken ise dönüştürücünün yapıştırıldığı malzeme ile dönüştürücünün ısı genleşme katsayılarının farklılığından kaynaklanır. Sıcaklığın değişmesi ile farklı genleşme katsayılı yüzey üzerindeki dönüştürücü büzölmeye ya da açılmaya zorlanır. Her iki ısı kaynaklı direnç değişimi de sıcaklığın değişim yönüne bağlı olarak pozitif ya da negatif olabilir. Net sıcaklığa bağlı direnç değişimi bu iki değişimin cebrik toplamına eşittir. Sıcaklık değişimine bağlı direnç değişimi,

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_T = [\beta_G + F_G \left(\frac{1+K_t}{1+\nu_0 K_t}\right) (\alpha_s - \alpha_G)] \Delta T \quad (2.66)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada β_G ızgara iletkenine ait direncin sıcaklıkla değişim katsayısı, $(\alpha_s - \alpha_G)$ ızgara ile yüzey arasındaki genleşme katsayısı fark, ΔT referans sıcaklıktan itibaren keyfi bir noktaya kadar olan sıcaklık değişimidir. Ayrıca (2.2.5) ayrıtında anlatılan çapraz duyarlılığa karşı düzeltme (2.66) bağıntısında yer almıştır. Sıcaklık değişiminin neden olduğu, gerçek uzamadan bağımsız uzamadaki değişimi elde etmek için (2.66) bağıntısının her iki tarafını ölçüm için belirlenmiş dönüştürücü katsayısı F_I 'ye bölelim.

$$e_T = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_T}{F_I} = \frac{[\beta_G + F_G \left(\frac{1+K_t}{1+\nu_0 K_t}\right) (\alpha_s - \alpha_G)] \Delta T}{F_I} \quad (2.67)$$

Buradaki F_G üretici tarafından belirlenmiş dönüştürücü kazancı, F_I ise kullanım şekline bağlı (Enstrümantasyonel) dönüştürücü kazancıdır. Genellikle $F_G = F_I$ olmakla birlikte bazı özel şartlarda farklılıklar göstermektedirler. Bu sebeple tek bir F yerine iki ayrı indisle yazılmışlardır. Şekil 2.26'da çeliğe yapıştırılmış, çeşitli alaşımlardan oluşan dönüştürücülerdeki uzamaların sıcaklıkla ne şekilde etkilendiği görölmektedir.



Şekil 2.26-Çeşitli alaşımlardan yapılmış dönüştürücülerin sıcaklığa bağlı çıkış değişimleri.

Düzeltilmiş ısı çıkışı $\tilde{\epsilon}$, düzeltilmemiş çıkış $\tilde{\epsilon}$ ile sıcaklığa bağlı çıkış ϵ_T 'nin farkına eşittir.

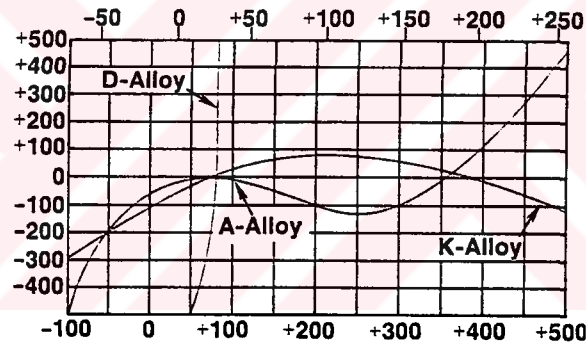
$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon} - \epsilon_T \quad (2.68)$$

(2.3) Ayırıtında söz konusu olan Wheatstone bağlantısında ölçüm yapan tek dönüştürücü olsa da denge sağlayan diğer kola ölçüm yapmayan ancak sıcaklığa bağlı kararlılığı sağlayan boşta bir dönüştürücü bağlanır. Toplam hücre kazancını arttırmak amacı ile dört kola da uygun konumlu (ikisi büzülme, ikisi çekilmeye zorlanan) ve sıcaklık karakteristiği aynı dönüştürücü bağlandığı takdirde yine sıcaklık değişimine bağlı hata büyük oranda kompanse edilmiş olacaktır.

Konstantan ve karmanın sahip olduğu bir özellik öz sıcaklık kompanzasyonlu formda (STC) üretilebilmeleridir. K ya da A alaşımı dönüştürücü seçiminde STC numarası da

belirlenmelidir. STC Numarası dönüştürücünün yapıştırılacağı malzemede sıcaklığa bağlı değişimin minimum olduğu genleşme katsayısıdır [9] .

Şekil 2.27’de Öz sıcaklık kompanzasyonlu A ve K alaşımlarının sıcaklığa bağlı çıkışları görülmektedir. Karşılaştırma yapmak amacı ile beraberinde eş-elastik (D) alaşımının da sıcaklığa bağlı çıkışı çizilmiştir. Pratikte A ya da K alaşımlı dönüştürücünün STC numarası test malzemesinin genleşme katsayısına en yakını olacak şekilde seçilir.



Şekil 2.27–STC formunda A ve K alaşımları ile D alaşımının sıcaklığa bağlı uzama cinsinden çıkış değişimleri.

Seçilen STC numarası malzemenin genleşme katsayısından küçükse sıcaklığa bağlı çıkış eğrisi saat yönüne ters yönde çevrilir. Tablo 2.1’de görülen tabloda bazı malzemelerin öz sıcaklık kompanzasyon numaraları verilmiştir.

Tablo 2.1-Bazı malzemelerin STC numaraları.

Bazı Malzemelerin Öz Sıcaklık Kompanzasyon Numaraları		
S-T-C No	Uzama Katsayısı	
	in ppm/°C (0-100°C)	M a l z e m e
00	1,4 0,5 0,03	Invar (Fe-Ni Alaşımı) Eritilmiş Quartz Titansilikat (*)
03	5,4 4,0 4,3 5,6	Pisirilmiş Alümina Molybdenum (*) Wolfram Zirkonyum
05	9,2 9,0 9,9 8,6 8,8	Soda kireçli cam Çelik, 15-7 Mo. PH. Çelik, 410 S.S. Saf Titanyum (*) Titanyum, 6 AL-4V (*)
06	11,5 12,6 12,1 10,8 13,5 11,9 12,1 11,3 10,8 10,3	Berilyum Inconel Inconel X Kursuni döküm Demir Monel Nikel A Çelik, 1008, 1018 (*) Çelik, 4340 Çelik, 17-4 PH. Çelik, 17-7 PH.
09	16,7 18,4 16,7 17,3 14,4 16,0	Berilyum-Bakır 25 Bronz-Fosfor (P %10) Bakır Çelik, 304 S.S. (*) Çelik, 310 S.S. Çelik, 316 S.S.
13	23,2 20,0 23,0	Alüminyum 2024-T4 (*), 7075-T6 Pirinç, 30-70 Saf Kalay
15	26,1	Magnezyum, AZ-31B (*)
(*) Isıl çıkış eğrilerinin belirlenmesinde kullanılan malzeme tipini belirtir.		

2.2.7 UZAMA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN YAPIŞTIRILMALARI

Uzama dönüştürücüsünün işletme performansını etkileyen önemli etkenlerden biri de yapıştırma tekniğidir. Yapıştırma tekniği, yapıştırılacak malzeme, yapıştırıcı

malzeme, işletim koşulları ve dönüştürücü yüklenme biçimi (statik/dinamik) göz önünde tutularak belirlenir. Yapıştırma malzemelerini şu gruplarda toplamak mümkündür:

- a) Soğuk uygulanan yapıştırıcılar,
- b) Sıcak uygulanan yapıştırıcılar,
- c) Seramik yapıştırma malzemeleri,
- d) Alev püskürtülmüş seramikler,
- e) Nokta kaynak bağlantıları,

Soğuk yapıştırıcıların uygulanması kolaydır. Doğrudan hava ile temas ettiğinde reaksiyona geçen ve ikinci bir madde ile reaksiyona geçen olmak üzere iki türü bulunur. Deneysel gerilme analizlerinde tercih edilirler. Sıcak yapıştırıcı kullanımı öncelikle test cisminin yapıştırma sıcaklığı dayanımına bağlıdır. Yük hücresi üretimindeki yüksek duyarlılık gereksinimi genellikle sıcak yapıştırıcılarla karşılanabilir. Sıcak yapıştırıcılar da tek ve iki bileşenli şekillerde bulunur.

Seramik yapıştırma malzemeleri sadece serbest ızgaralı dönüştürücülerde kullanılabilir. Çok yüksek sıcaklıklarda çalışma gerektiğinde tercih edilirler. Bazen aşırı soğuk işletim ortamlarında kullanılırlar. Yüksek ateşleme sıcaklığı gerektirdiklerinden uygulamaları sınırlıdır. Etkin koruma yöntemleri gerektirirler.

Alev püskürtülmüş seramikler de seramik tutkalların özel bir çeşididir. Kullanım alanı seramik yapıştırıcılardan daha sınırlıdır ve özel aletler gerektirir. Seramik yapıştırıcılara göre bir üstünlükleri yapıştırma sırasında test malzemesinin daha az ısınmasıdır. Nükleer radyasyon altındaki ortamlarda tercih edilirler.

Nokta kaynak en kolay uygulanan yöntemlerden biridir. Fakat aşağıdaki sebeplerden dolayı nadiren kullanılır : Özel dönüştürücüler gerektirirler. Kaynak yapılabilir dönüştürücüler küçük boyutlarda üretilemezler. Test malzemesinin de kaynaklanabilir bir malzeme olması gerekir. Gerilme dağılımının etkilenmemesi için test malzemesinin kalın olması gerekir.

Yapıştırma için uygun yüzey şu şekilde oluşturulur:

- a) Kaba temizlik yapılır,
- b) Yüzey düzlemselleştirilir,
- c) Temizlenir,
- d) Yüzey genişletilir,
- e) İşaretlenir,
- f) Son temizlik yapılır.

Kaba temizlikte ölçüm noktasından çok daha geniş bir yüzeyde pas, boya, toz, yağ tabakası vb. yüzey kirletici maddelerin temizlenir. Bu işlemde spatula ve kazıma aleti kullanılır. Alüminyum dışındaki malzemelerde yağdan arınmak için sodyum hidroksit kullanılabilir.

Yüzeydeki derin çatlaklar ve tepecikler hatalı ölçmeye ve yapıştırmanın zayıflamasına sebep olur. Dolayısıyla ölçüm yapılacak alanın öğütülerek düzleştirilmesi gerekir. Kabadan başlayarak inceye doğru yüzey düzlemselleştirilir. Dönüştürücü eğri yüzeylere de yapıştırılabilir. Ancak düzlemselleştirme dönüştürücü üzerinde kalkma ve büzülmelerin olmasını engeller.

Bu aşamadaki temizlik büyük bir dikkat gerektirmez. Organik çözeltiler tavsiye edilir.

Yüzey genişletmenin amacı, test malzemesi ile dönüştürücü arasındaki temas yüzeyini arttırmak sureti ile yapıştırma kuvvetini arttırmaktır. Kum püskürterek ideal bir yapıştırma yüzeyi elde edilir. Nadiren bazı kimyasal maddeler kullanılarak da yüzey genişletilebilir (Şekil 2.28). Kum püskürtülmesinin mümkün olmadığı bazı nesnelerde zımpara kullanılır. Zımparalama dairesel yapılmalı ve gerilme dağılımını etkilememesine dikkat edilmelidir.

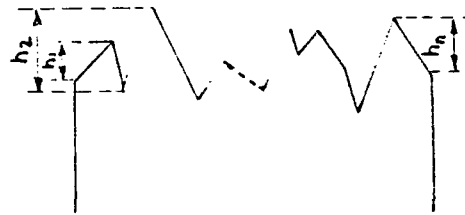


Şekil 2.28-Pürüzsüz ve genişletilmiş yüzeyler.

Yüzey pürüzlülüğünün efektif değeri şekil 2.29'dan

$$R_{TM} = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_n^2}{n}} \quad (2.69)$$

bağıntısıyla belirlenir.



Şekil 2.29-Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi.

Etkin pürüzlülük normal gerilme analizinde $1,5 \dots 3\mu\text{m}$, yüksek uzamalarda $6\mu\text{m}$, dönüştürücü hücre üretiminde ise $0,5 \dots 1,5\mu\text{m}$ civarında alınır . Pürüzlülük belirlenirken kullanılacak yapıştırma malzemesinin özellikleri de dikkate alınmalıdır. Örneğin Hottinger firmasınca $20..+50^{\circ}\text{C}$ işletme sıcaklığı için hazırlanan ve üç dakika içinde kuruyan X60 yapıştırıcısı için bu değer $3..10\mu\text{m}$ arasında olmalıdır. Yine aynı firma tarafından hazırlanan yüksek sıcaklıklara dayanıklı ancak düşük duyarlılıklı ölçümler için hazırlanan seramik tutkal CR760 için $10..20\mu\text{m}$ mertebesinde pürüzlülük gereklidir [10].

Uzama dönüştürücüsünün yapıştırılacağı yer, dönüştürücü üzerindeki işaretleri karşılayacak şekilde önceden işaretlenir. İşaretleme amacıyla çizim iğnesi ya da işaret şişi benzeri bir alet yüzeye zarar verebileceği sebebiyle kullanılmalıdır. Kuru bir nokta bilya uçlu kalem ile görülebilir bir çizgi çizilebilir ve bilya yüzeye zarar vermez.

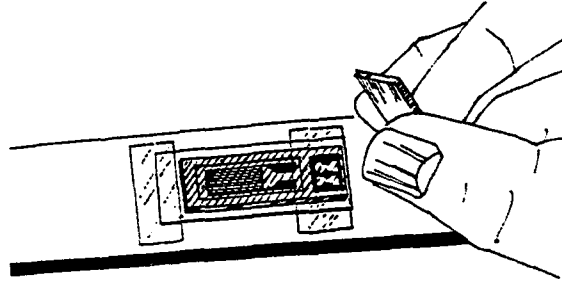
Yapıştırma malzemesi bir çok kez moleküler tabaka düzeyindedir. İnce yağ filmleri dahi yapıştırma performansını etkilediğinden son bir temizlik ile arındırılmaları gerekir. Silikon gres ve yağ arındırılması en zor maddelerdir. Kozmetik ürünlerinde geniş bir kullanım alanı bulduklarından yapıştırma işlemini yapan teknisyen öncelikle bu tür maddeleri taşımamalıdır. Ortamda sigara içilmemiş olması gerekir. Temizleme maddesinin etkilerine bağlı olarak ortamda sağlık açısından uygun olan organik çözeltiler iki saflık gurubunda toplanır:

- a) Teknik saflık : Toz partiküllerinden arındırılmış olmak,
- b) Kimyasal saflık : Saflığı bozan çözülebilir maddelerden arındırılmış olmak.

Buharlaşan çözeltinin temizlenen yüzey üzerinde yoğunlaşarak nem oluşturmaya bağlı olarak yüzeye sıcak hava uygulanabilir. Temizlenen yüzeye parmakla dokunulmamalıdır.

Temizleme ve yağdan arındırma amacıyla yaygın olarak kullanılan çözeltiler şöyle sıralanabilir: freon Tf, metil etil keton, aseton, izopropil alkol, etil alkol, etil asetat, per klor etilen, metilen klorit, toluol, saf benzin, kloroten NU.

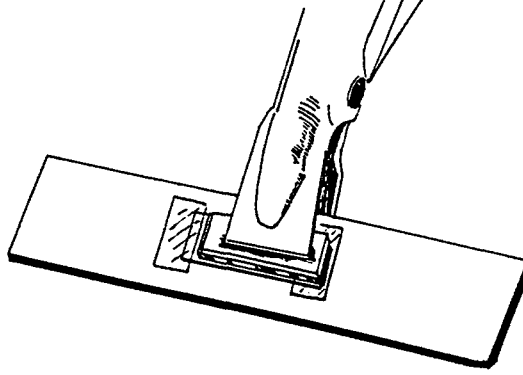
Temizleme işleminden sonra yapıştırıcının niteliğine bağlı olarak ince bir film oluşturacak şekilde yüzey yapıştırıcı madde ile kaplanır. Dönüştürücü üzerindeki yer belirleme işaretleri daha önce yüzey üzerinde belirlenen işaretleme ile çakışacak şekilde uzama dönüştürücüsü oturtulur. Dönüştürücü yüzeyi dıştan kaplayan 2,5mm kalınlığında bir silikon lastik ile örtülür (Şekil 2.30).



Şekil 2.30-Yüzey üzerinde dönüştürücünün yerleştirilmesi.

Uçlardan bantlarla tutturulan silikon, yapışma işlemi bitene kadar basıncı homojen dağıtacak bir plaka üzerinden klips ile tutturulur (Şekil 2.31). Yük hücresi üretiminde bu basıncın $275..350 \text{ kN/m}^2$ olması tavsiye edilir. Genel amaçlı çalışmalarda ise $70..480 \text{ kN/m}^2$

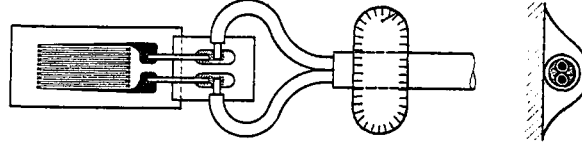
basınç uygulanır. Klips yerine ölü bir ağırlık da kuvvet oluşturmak amacıyla kullanılabilir [11].



Şekil 2.31-Yüzeye yerleştirilen dönüştürücünün silikon üzerinden klips ile tutturulması.

Yapıştırma işlemine doğrudan yapıştırıcının yapışma sıcaklığından başlamak yerine düşük sıcaklıkta başlayıp sıcaklığı kademeli olarak arttırmak gerekir. Aksi takdirde yapışkan içinde hava kabarcıkları, istenmeyen yapışma çizgileri ve yapıştırıcıda yüksek film gerilmeleri oluşur.

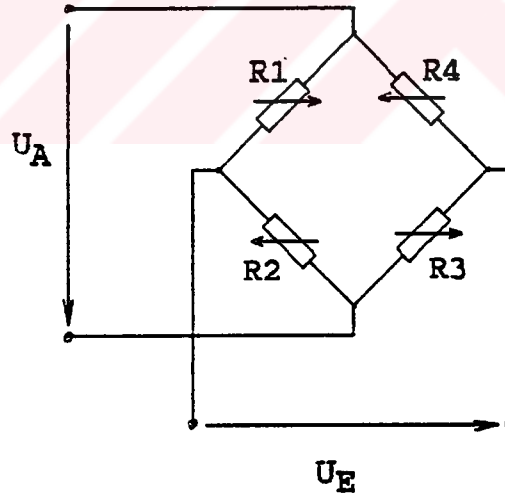
Yüksek duyarlılık istenen bir uzama dönüştürücüsü uygulamasında dönüştürücü terminaline elektriksel bağlantıyı sağlayan lehim kalitesi önem taşır. Havya ucu, terminalde noktasal deformasyona sebep olmayacak şekilde geniş yüzeyli seçilmelidir. Lehim işleminden önce terminaldeki oksidasyon ve kirlilik temizlenmelidir. Bağlantı direncinin düşürülmesi açısından telin terminale geniş, yayvan, fakat terminal dışına taşmayacak şekilde lehimlenmesi gerekir. Lehim işleminden sonra lehim noktasına elektriksel bağlantıyı sağlayan tel, terminale mekanik bir kuvvet uygulamayacak şekilde koruma kılıfına alınır (Şekil 2.32). Uygulama yerine göre dönüştürücü ve ek noktasına kadar elektriksel bağlantı, ikinci bir kaplama ile dış mekanik kuvvetlerden korunur.



Şekil 2.32-Dönüştürücünün elektriksel bağlantısı.

2.3 WHEATSTONE KÖPRÜSÜ

İngiliz fizikçisi Sir Charles Wheatstone'un 1843 yılında elektriksel direnci ölçmek amacıyla bulduğu bir köprü devresidir.



Şekil 2.33-Wheatstone Köprüsü.

Wheatstone köprüsü ile ölçümde temel ilke, köprünün iki ucu U_E ile uyarıldığında U_A köprü çıkış geriliminin köprü kollarındaki direnç değişimine bağlı olmasıdır. Köprünün denge şartı sağlanması durumunda U_A gerilim düşümü sıfırdır. Köprünün Thevenin eşdeğerinden,

$$U_A = U_B \left[\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right] \quad (2.70)$$

köprünün denge halinde $U_A = 0V$ olması için

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (2.71)$$

olması gerekir.

2.3.1 DÖNÜŞTÜRÜCÜ BAĞLANTILARINDA KÖPRÜ KAZANCI

Köprü kazancı ve köprü çıkışındaki gerilim değişimi köprü kollarındaki direnç değişimi ile orantılıdır. Uzama dönüştürücü bağlantısında aktif dönüştürücü sayısı ve dönüştürücülerin mekanik bağlantı yönü direnç değişimini etkilediğinden köprü kazancını da etkiler. (2.70) Bağlantısından R_1 , R_2 , R_3 ve R_4 'e göre kısmi türevleri elde alırsak,

$$\frac{\partial U_A}{\partial R_1} = \frac{R_4}{(R_1 + R_4)^2} U_B \quad (2.72)$$

$$\frac{\partial U_A}{\partial R_4} = -\frac{R_1}{(R_1 + R_4)^2} U_B \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial U_A}{\partial R_2} = -\frac{R_3}{(R_2 + R_3)^2} U_B \quad (2.74)$$

$$\frac{\partial U_A}{\partial R_3} = \frac{R_2}{(R_2 + R_3)^2} U_B \quad (2.75)$$

elde ederiz. Küçük direnç değişimleri için eşdeğer diferansiyel ilişki birinci derece Taylor serisi açılımı ile saptanabilir (2.76).

$$\delta U_A = \sum_{i=1}^4 \frac{\partial U_A}{\partial R_i} \delta R_i \quad (2.76)$$

(2.76) çılımındaki daha önce hesaplanan $\frac{\partial U_A}{\partial R_i}$ yerine konursa,

$$\frac{\partial U_A}{U_B} = \frac{R_4 \delta R_1 - R_1 \delta R_4}{(R_1 + R_4)^2} - \frac{R_3 \delta R_2 - R_2 \delta R_3}{(R_2 + R_3)^2} \quad (2.77)$$

elde edilir. Örneğin R_1 gerilme sonucu uzamaya maruz kalan dönüştürücünün direnci, R_2 sıcaklık kompanzasyonu amacı ile kullanılan pasif dönüştürücü, R_3 ve R_4 ise değerleri eşit dirençler olsunlar. $R_3 = R_4$ ve $\delta R_3 = \delta R_4$

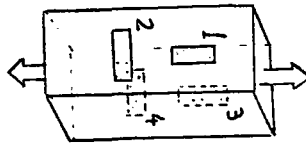
olduğundan (eşdeğer dirençler) $\frac{\partial U_A}{U_B} = \frac{\delta R}{4R}$ ve dolayısıyla

köprü kazancı $\frac{U_B}{4R}$ olarak elde edilir.

Ayrıt (2.2)'de belirtildiği gibi her bir dönüştürücü direnci uzamaya bağlı olarak (2.48) bağıntısından yazılırsa (dört aktif dönüştürücülü köprü için) köprü çıkış gerilimi,

$$U_A = U_B \frac{F}{4} (e_1 - e_2 + e_3 - e_4) \quad (2.78)$$

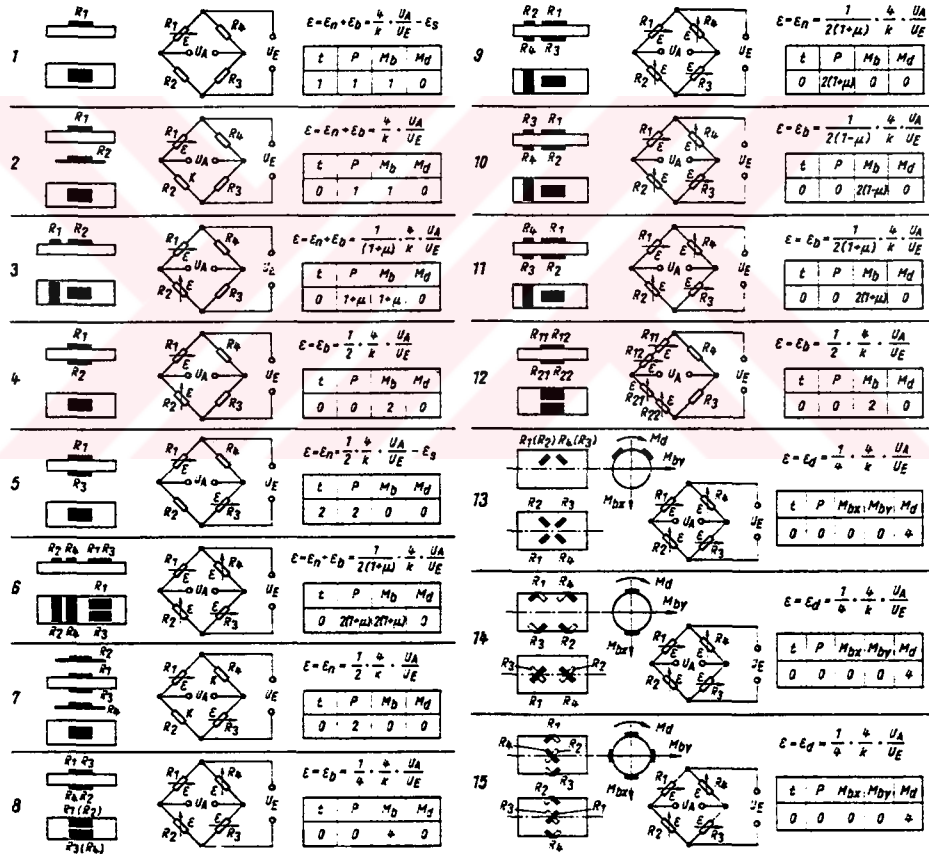
olarak bulunur. Şekil 2.34'deki gibi çekilen bir çubukta dört aktif dönüştürücü uygun şekilde bağlanarak toplam kazanç arttırılabilir, bu durumda



Şekil 2.34 Çekilen çubukta dönüştürücü konumları

$$U_A = U_B \frac{F}{4} (e_1 - e_2 + e_3 - e_4) = \frac{F}{4} [e_1 - (-ve_1) + e_3 - (-ve_3)] \quad (2.79)$$

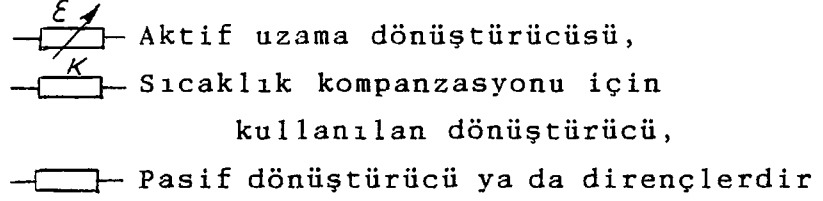
$v=0.3$ ve $e_1=e_3=e$ için çıkış gerilimi $U_A=U_B \frac{F}{4} 2,6e$ bulunur. Benzer şekilde eğilme, burulma vb. durumlarda da uygun aktif dönüştürücülerin dört kola da bağlanarak sadece sıcaklık kompanzasyonu yapılmakla kalınmaz, aynı zamanda köprü kazancı da arttırılmış olur. Şekil 2.35'te çeşitli uygulamalarda tam, yarım ve çeyrek köprü durumları için köprü uçlarındaki gerilimler ile uzamalar arasındaki ilişkiler verilmiştir.



Şekil 2.35—Çeşitli köprü yapılarında ve mekanik bağlantılarda uzama ile köprü gerilimleri arasındaki bağıntılar.

Şekil 2.35'teki 13,14 ve 15 no'lu parçalarda M_d momentiyile burulmaya zorlanan mil durumu görülmektedir.

M_{bx} ve M_{by} , M_b eğilme momentinin bileşenleri, P ise normal kuvvettir. Buradaki



2.3.2 OPTİMUM KÖPRÜ UYARMA GERİLİMİ

(2.78) Bağintısında da görüldüğü gibi U_f uyarma gerilimi ile köprü dönüştürücü kazancı doğru orantılıdır. Fakat dönüştürücünün ısı sınırlamaları sebebiyle optimum uyarma şartları belirlenmelidir. Uyarma gerilimini sınırlayan etkenler şöyle sıralanabilir :

a) Uzama dönüştürücüsü ızgara alanı (Aktif ızgara uzunluğu x Aktif ızgara genişliği); Izgara alanı açığa çıkan ısı enerjisinin yoğunluğu önceden belirlenen sınır değerden küçük kalacak kadar geniş olmalı.

b) Yapıştırma yüzeyinin ısı transfer karakteristiği; Alüminyum ya da bakır gibi ısı transfer yeteneği yüksek malzemelerde test yüzeyi üzerinden çekilebilecek ve ortama atılabilecek enerji daha fazladır. Dolayısıyla aynı ızgara direncine, termik direnci düşük malzemeye yapıştırılması durumunda daha büyük enerji kaybına izin verilir (Disipasyon gücü daha yüksek). Diğer yandan plastiklerde olduğu gibi bazı test malzemeleri ısı yalıtkan gibi davranırlar. Bu durumda çevre sıcaklığına bağlı olarak uyarma gerilimi küçültülür.

c) İşletimde çevre sıcaklığı ; Isı transfer yoğunluğu ortam sıcaklığı ile ızgarada oluşan sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır. Yüksek ortam sıcaklıkları ters yönde

ısı transferine de sebep olabilir.

d) İşletme özellikleri ; Yük hücresi üretiminde kullanılan dönüştürücüler istenen kararlılık, duyarlılık ve tekrarlı çalışma koşullarına bağlı olarak normal gerilme analizinde kullanılan dönüştürücülerden daha küçük bir gerilimle uyarılırlar.

e) Yapıştırma ve kablo bağlama teknikleri ; Yapıştırma sırasında dönüştürücü üzerinde oluşan hasar, kısmen yapışmamış bölgeler ve yapıştırma hatlarındaki süreksizlikler yüksek uyarma gerilimlerinde sorun yaratır.

Tablo 2.2'de Watt/cm² olarak köprü uyarmasında tavsiye edilen güç yoğunlukları verilmiştir. Burada kullanılan malzeme açısından,

Alüminyum ve bakır ; çok iyi

Çelik ; iyi

Paslanmaz çelik ve titanyum ; orta

Fiberglas, epoksi gibi doldurulmuş plastikler ; zayıf

Akrilik veya polistiren türü dondurulmuş plastikler;

çok zayıf

olarak vasıflandırılabilirler.

Izgarada harcanan güç,

$$P_G = \frac{U_s^2}{4R_G} \quad [\text{Watt}] \quad (2.80)$$

dır. Burada R_G ızgara direnci ve U_s köprü uyarma gerilimidir. B aktif ızgara genişliği ve L aktif ızgara uzunluğu alınarak ızgaradaki güç yoğunluğu N_G ,

$$N_G = \frac{P_G}{L \cdot B} \quad [\text{Watt}/\text{cm}^2] \quad (2.81)$$

Izgara alanı, ızgara direnci ve güç yoğunluğu biliniyorsa (2.80) ve (2.81) bağıntılarından uyarma gerilimi (2.82) bulunur.

$$U_B = \sqrt{R_G N_G L B} \quad [V] \quad (2.82)$$

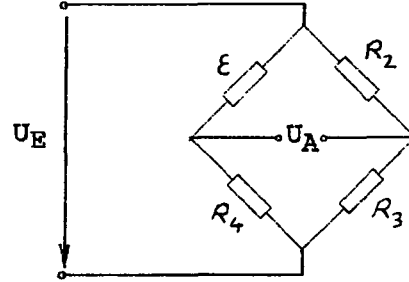
Tablo 2.2 Köprü uyarma geriliminin belirlenmesinde göz önünde tutulan güç yoğunlukları

İSTENEN DOĞRULUK		COK İYİ	İYİ	ORTA	ZAYIF	COK ZAYIF
STATİK	YÜKSEK	0.3-0.8	0.16-0.3	0.08-0.16	0.02-0.04	0.002-0.004
	ORTA	0.8-1.6	0.3-0.8	0.16-0.3	0.04-0.08	0.004-0.008
	DÜŞÜK	1.6-3.0	0.8-1.6	0.3-0.8	0.08-0.16	0.008-0.04
DİNAMİK	YÜKSEK	0.3-3.0	0.3-1.6	0.3-1.6	0.08-0.16	0.002-0.008
	ORTA	1.6-3.0	1.6-3.0	0.8-1.6	0.16-0.3	0.004-0.02
	DÜŞÜK	3.0-8.0	3.0-8.0	1.6-3.0	0.16-0.8	0.04-0.08

2.3.3 WHEATSTONE KÖPRÜSÜNÜN DOĞRUSAL ÇALIŞMAMASINDAN GELEN HATALAR

Dengelenmemiş köprü ile yapılan ölçümlerde belirli şartlar altında köprü çıkış gerilimi direnç değişiminin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Metallerin elastik uzamalarında bu hata ihmal edilecek kadar küçüktür. Fakat büyük uzamalarda kompanze edilmesi gereken bir hata halini alır. Örneğin 1000µε için %0.1, 10000µε için %1 ve 100000µε için %10 mertebesindedir.

Çeyrek köprüde R_1 aktif ızgara, R_2 , R_3 ve R_4 ise pasif dirençleri ifade etsin (Şekil 2.36).



Şekil 2.36-Tek aktif dönüştürücülü çeyrek köprü.

Aktif tek ızgaranın tek yönde gerilme ölçmesi durumunda,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{F\epsilon 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon 10^{-6}} \quad (2.83)$$

şeklinde olacaktır. Gerçek uzama ϵ [$\mu\epsilon$] ile ölçülen uzama $\hat{\epsilon}$ [$\mu\epsilon$] arasındaki ilişki,

$$\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}} = 1 + \frac{F\hat{\epsilon} 10^{-6}}{2 - F\hat{\epsilon} 10^{-6}} \quad (2.84)$$

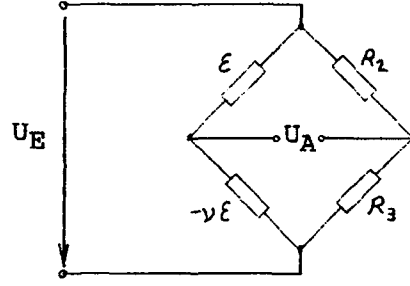
Benzer şekilde R_4 yerine ikinci bir dönüştürücü tek yönlerdeki gerilme sonucu Poisson katsayısı ile orantılı enine uzamayı ölçecek şekilde yerleştirilirse (Şekil 2.37),

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon(1-\nu) 10^{-6}} \quad (2.85)$$

ve gerçek uzamaya oranı,

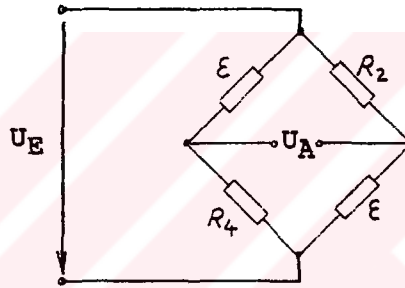
$$\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}} = 1 + \frac{F\hat{\epsilon}(1-\nu) 10^{-6}}{2 - F\hat{\epsilon}(1-\nu) 10^{-6}} \quad (2.86)$$

olarak bulunur.



Şekil 2.37-Tek eksenli gerilmede bir enine ölçüm yapan iki aktif dönüştürücü bağlantısı.

Karşılıklı iki kola aynı uzama etkisinde kalan dönüştürücüler bağlandığında (Şekil 2.38),



Şekil 2.38-Tek eksenle aynı gerilmeyi ölçen iki dönüştürücünün bağlantısı.

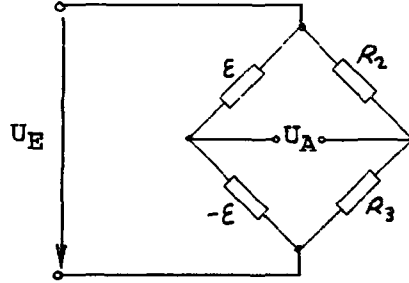
$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{F\epsilon 10^{-3}}{2 + F\epsilon 10^{-6}} \quad (2.87)$$

ve gerçek uzama oranı,

$$\frac{\epsilon}{\hat{\epsilon}} = 1 + \frac{F\hat{\epsilon} 10^{-6}}{2 - F\hat{\epsilon} 10^{-6}} \quad (2.88)$$

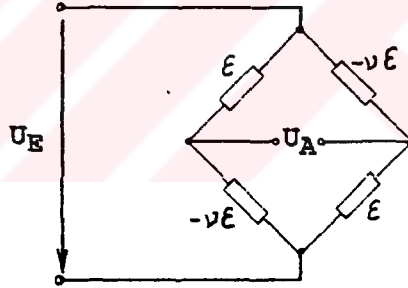
dır. İki dönüştürücünden biri diğerinin aynı büyüklükte fakat ters yönde uzamayı ölçecek şekilde yapıştırılıp köprüye şekil (2.39)'deki gibi bağlanırsa doğrusal ölçüm yapılmış olur.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{F\epsilon}{2} 10^{-3} \quad , \quad \epsilon = \hat{\epsilon} \quad (2.89)$$



Şekil 2.39-Biri diğerinin aynı büyüklükte fakat ters yönlü uzamayı ölçen iki aktif dönüştürücü.

İkisi aynı doğrultuda aynı gerilmeyi, diğer ikisi ise dik doğrultuda tek yönlü gerilme sonucu oluşan Poisson katsayısı ile orantılı enine uzamayı ölçecek şekilde (Şekil 2.40) yerleştirilmiş dört aktif elemanlı köprüde,



Şekil 2.40-İkisi enine, ikisi boyuna olmak üzere aynı uzamayı ölçen dört dönüştürücünün bağlantısı.

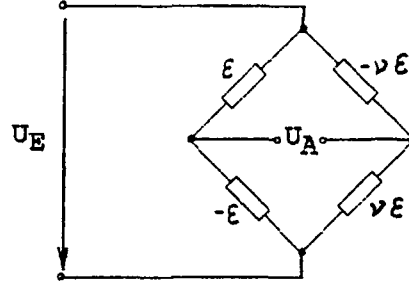
$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) 10^{-3}}{2 + F\epsilon(1-\nu) 10^{-6}} \quad (2.90)$$

ve gerçek uzama oranı,

$$\frac{\epsilon}{e} = 1 + \frac{F\epsilon(1-\nu) 10^{-6}}{2 - F\epsilon(1-\nu) 10^{-6}} \quad (2.91)$$

olarak elde edilir. Burada tek doğrultudaki gerilme

sonucu enine uzamayı ölçen dönüştürücüler karşılıklı kollardan alınıp şekil 2.41'deki gibi ters bağlantı yapıldığı takdirde doğrusallıktan sapma olmaz.

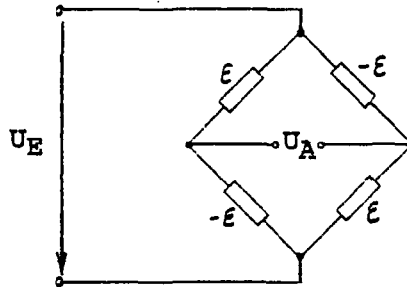


Şekil 2.41-Şekil 2.40 daki bağlantının lineer çalışma için yeniden düzenlenişi.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{F e (1 + \nu) 10^{-3}}{2}, \quad e = \hat{e} \quad (2.92)$$

Bükülen kirişte ya da burulan bir milde karşılıklı olarak ikisi büzülen, diğer ikisi çekilen dört dönüştürücü kullanılması durumunda da (Şekil 2.42) doğrusal ölçüm yapılmış olur [12].

$$\frac{U_A}{U_E} = F e 10^{-3}, \quad e = \hat{e} \quad (2.93)$$



Şekil 2.42-Lineer çalışan dört aktif dönüştürücülü köprü.

2.3.4 PARALEL KALİBRASYON

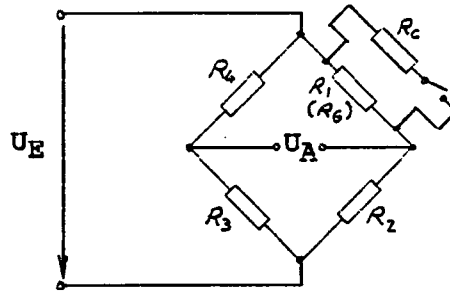
Uygulanan mekanik girişe bağlı olarak dönüştürücü çıkışlarında önceden belirlenen mertebede ölçüm değerleri elde edilmesi beklenir. Mekanik sistemde oluşan uzamalara bağlı olarak köprü çıkış gerilimlerinin istenen referans değere çekilmesi amacıyla çeşitli işlemlere başvurulabilir. Bunlardan biri köprüye elektriksel olarak bir paralel kalibrasyon direnci uygulamaktır. Şekil (2.43) deki gibi tek aktif dönüştürücüde R_c kalibrasyon direncinin bağlanmasıyla ilgili kolun direnç değişimi,

$$\Delta R = \frac{R_1 R_c}{R_1 + R_c} - R_1$$

veya

$$\frac{\Delta R}{R_1} = \frac{-R_1}{R_1 + R_c} \quad (2.94)$$

şeklinde yazılabilir.



Şekil 2.43- Çeyrek köprüde paralel kalibrasyon yönteminin uygulanışı ($R_1=R_2=R_3=R_4=R_6$).

R_c direncinin bağlanmasıyla uzamada görülecek eşdeğer değişim bilinmelidir. $R_c = f(e_s)$ şeklinde istenen uzamayı referans uzamaya denkleştirecek direnç hesaplanır.

Dönüştürücü direnç değişimi (2.48) bağıntısından $\frac{\Delta R}{R_G} = F_G \cdot e$

dur. Burada R_G , dönüştürücü anma direnci, F_G ise dönüştürme katsayısıdır. Bu ifade (2.94)'te yerine konarak,

$$F_G e_s = - \frac{R_G}{R_G + R_C}$$

ya da

$$e_s = - \frac{R_G}{F_G (R_G + R_C)} \quad (2.95)$$

elde edilir. Burada e_s , R_G 'ye koştur R_C direnci bağlayarak elde edilen eşdeğer uzamadır. R_C Kalibrasyon direnci,

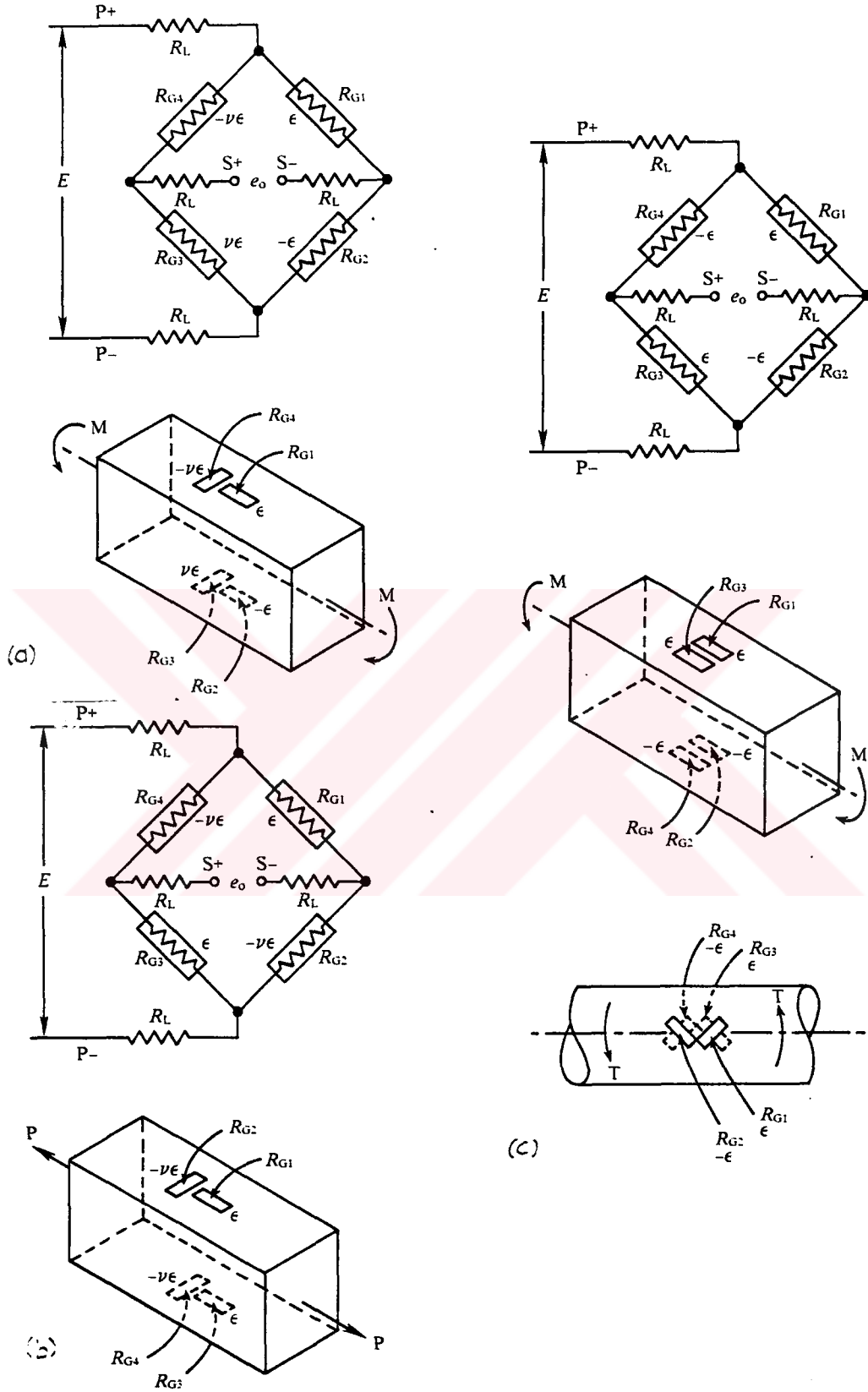
$$R_C = - \frac{R_G}{F_G e_s} - R_G \quad (2.96)$$

olarak çözülür. Paralel kalibrasyon her zaman negatif olduğundan yaygın olarak (2.97)'deki formda yazılır:

$$R_C = \frac{R_G}{F_G e_s} - R_G \quad [\Omega] \quad (2.97)$$

(2.97)'de e_s sıkıştırma yönünde olduğu bilinerek işatersiz kullanılır. $[\mu e]$ olarak değerlendirilirse kesirin payı 10^6 ile çarpılır.

Benzeri bir kalibrasyon yarım ve tam köprü elemanlarına uygulanabilir. Ekonomik olarak kabul edilebilir uygulamalarda tam köprü kullanmanın birçok üstünlüğü vardır. Gürültüye göre yüksek işaret kazancı, doğrusal ölçüm ve sıcaklık değişimine duyarsızlık bunlardan bazılarıdır. Şekil 2.44.a, 2.44.b ve 2.44.c'de görülen tam köprü uygulamalarında R_L kablo direnci de eşdeğer devreye eklenerek anma yükünde ölçülen uzamayı istenen uzamaya denkleştirecek R_C kalibrasyon direnci hesaplanabilir [13].



Şekil 2.44-a) ve c) eğilme momenti uygulanan çubukta tam köprü eşdeğer devreleri,

b) Çekilen çubukta tam köprü eşdeğer devresi.

ölçülen uzama 3 ve 4 numaralı kollardaki uzamaya eşit ancak ters yönlü olduğundan köprü çıkış gerilimi doğrusal değişir. Ancak paralel kalibrasyon ile oluşacak doğrusallıktan sapma büyük uzamalar için hesaba katılmalıdır. İstenen uzamanın simülasyonu için uygun koşt direnç daha öncekine benzer şekilde hesaplanır. Şekil 2.44.a ve Şekil 2.44.c deki eşdeğer devreler için,

$$R_c = \frac{R_G}{NF_G |e_s|} - R_G \left[\frac{1 + 3 \frac{R_L}{R_G}}{2 \left(1 + 2 \frac{R_L}{R_G}\right)} \right] \quad (2.98)$$

olarak bulunur. Burada N aktif dönüştürücü sayısı ile orantılı bir rakamdır. Şekil 2.44.a ve şekil 2.44.b'deki konfigürasyon için $N=2(1+v)$ ve şekil 2.44.c için $N=4$ tür. Şekil 2.44.b'deki konfigürasyonda ise sıkıştırma ve uzama durumları için lineersizlik farklı olduğundan gerilme yönüne bağlı olarak R_c direnci ayrı ayrı hesaplanır. R_{G1} 'in sıkıştırmaya maruz kaldığı durumda [14] ,

$$R_c = - \frac{R_G}{2(1+v) F_G e_{sc1}} - R_G \left[\frac{3(1+v) \left(1 + 2 \frac{R_L}{R_G}\right) - 2v}{4(1+v) \left(1 + 2 \frac{R_L}{R_G}\right)} \right] \quad (2.99)$$

R_{G1} 'in uzama yönünde gerilme uygulandığında [15] ,

$$R_c = \frac{R_G}{2(1+v) F_G e_{st1}} - R_G \left[\frac{3(1+v) \left(1 + 2 \frac{R_L}{R_G}\right) - 2}{4(1+v) \left(1 + 2 \frac{R_L}{R_G}\right)} \right] \quad (2.100)$$

şeklinde gerçek eşdeğer uzamayı sağlayan R_c direnci hesaplanır. Çeyrek ve yarım köprüde pasif elemanların ölçme noktasından uzakta olması durumunda kompanzasyon amaçlı ek kabloların direnci eşdeğer devrede dikkate alınmalıdır.

BÖLÜM 3

ÖLÇÜMDE İŞARET İŞLEME

3.1 FARK KUVVETLENDİRİCİSİ

Ticari olarak üretilen yük hücreleri tipik olarak 20 mV/V çıkış üretirler. Hücre sabiti olarak bilinen bu değer izin verilen en büyük yüke kadar yüklendiğinde uyarma gerilimine bağlı olarak hücre geriliminin ne kadar değişeceğini belirler. Örneğin 300 kg'lık bir yük hücre-sinde $k=20$ mV/V ve uyarma gerilimi 10.000 V olsun. Yük hücresinin bağlı olduğu sistemin tara ağırlığı 4 kg olduğu varsayılırsa 100 kg'lık ek bir yük geldiğinde çıkış uçlarındaki gerilim değişimi,

$$\Delta U_A = k U_S \frac{\Delta m}{m_N} \quad [mV] \quad (3.1)$$

bağıntısından $\Delta U_A = 20 \cdot 10 \cdot \frac{100 - 4}{300} = 64 [mV]$ olarak elde edilir.

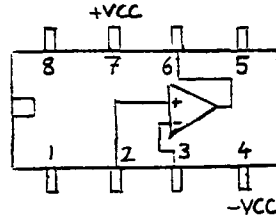
Tam yükteki gerilim değişimini 1/10000'den daha iyi bir duyarlılıkla elde edebilmek için 20 μV 'tan daha küçük gerilim değişimler doğru olarak algılanabilmelidir. Sıradan bir işlemsel kuvvetlendirici giriş dengesizlik

geriliminin yüksek olması sebebi ile (3..30 mV) kullanılamaz. Giriş dengesizlik gerilimi bir kaç μV mertebesinde özel kuvvetlendiriciler ya da kıyıcı stabilizatörlü işlemsel kuvvetlendiriciler bu amaçla kullanılabilir. Benzer şekilde uyarma devresinin gerilim değişimleri de istenen ölçüm duyarlılığı için gerekli minimum gerilim kademesinin altında olmalıdır. Unutulmamalıdır ki şekil 1.2'deki ölçüm bloğunda mekanik ve elektriksel kısımlardaki her bir elemanın hatalarının toplamı duyarlılığı belirler.

Gerçeklenen devrede fark kuvvetlendiricisi olarak giriş dengesizlik gerilimi maksimum 5 μV olan OP07X ve kıyıcı stabilizatörlü işlemsel kuvvetlendirici olan TC911 kullanıldı.

OP07 işlemsel kuvvetlendiricisinin özellikleri,

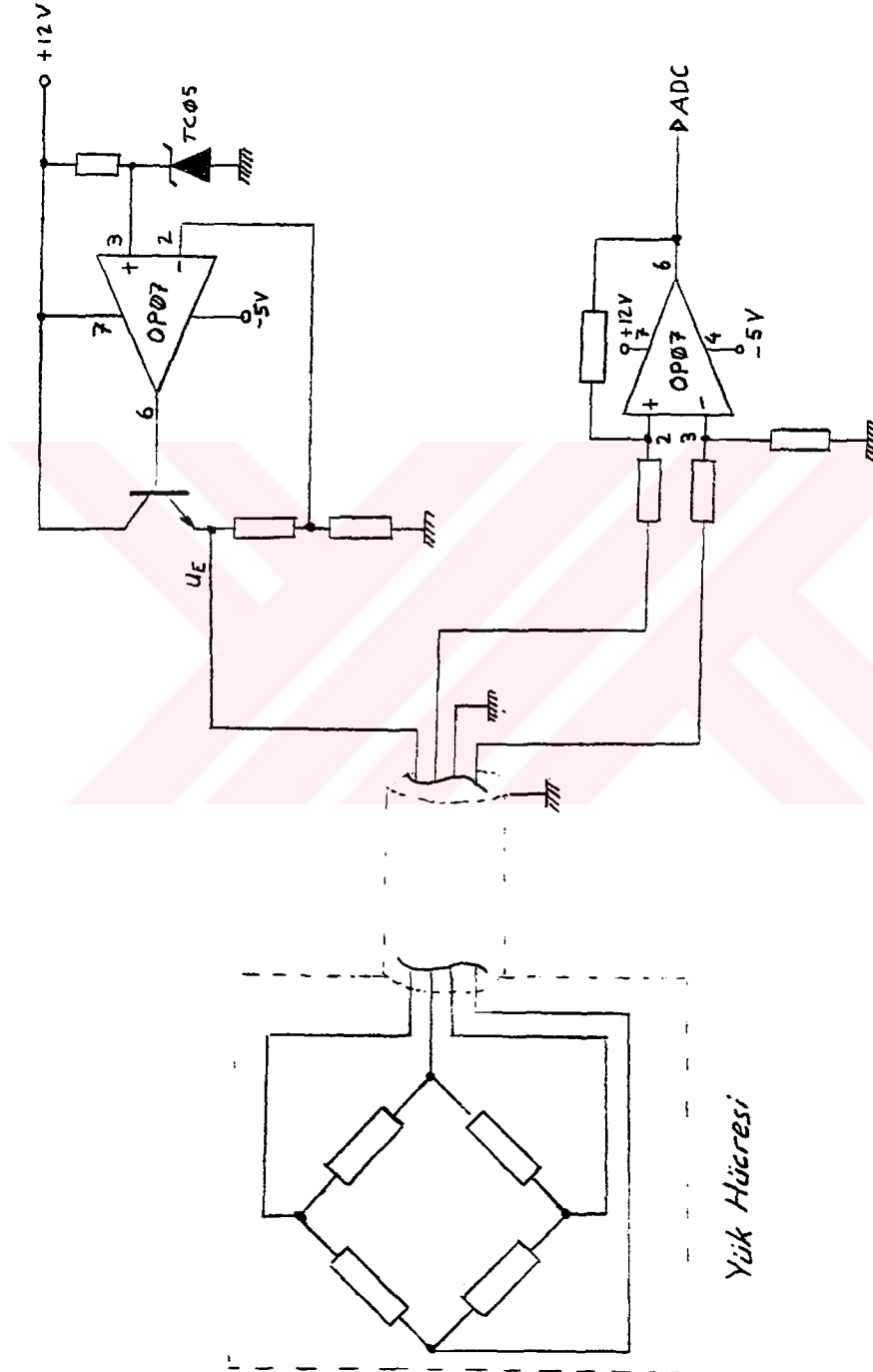
Giriş dengesizlik gerilimi: maksimum 30 μV (5 μV OP07X),
 Giriş dengesizlik geriliminin sıcaklığa bağlılığı: 0.3 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
 Giriş gerilimi: -14...+14V
 Besleme gerilimi: $\pm 3\text{V}...$ $\pm 18\text{V}$
 Çalışma sıcaklığı (Plastik kılıf): 0...70 $^{\circ}\text{C}$.



Şekil 3.1-OP07'nin bacak bağlantıları.

Kuvvetlendirici kazancı yük hücresindeki en büyük gerilim değişiminde ADC'nin referans kaynağını geçmeyecek

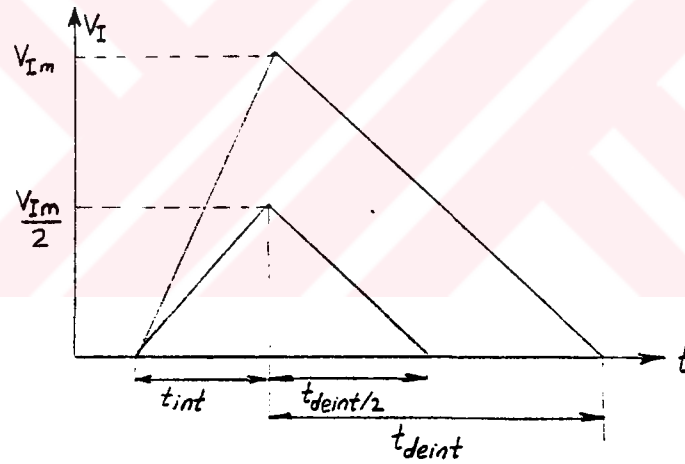
şekilde belirlenir. Köprü çıkış gerilimi sıfırdan itibaren pozitif bölgede 200 mV'lık bir değişim gösteriyorsa $V_{ref}=1.250$ V için kazanç 6.25 tir.



Şekil 3.2-Yük hücresinin uyarma ve fark kuvvetlendirici devreleri.

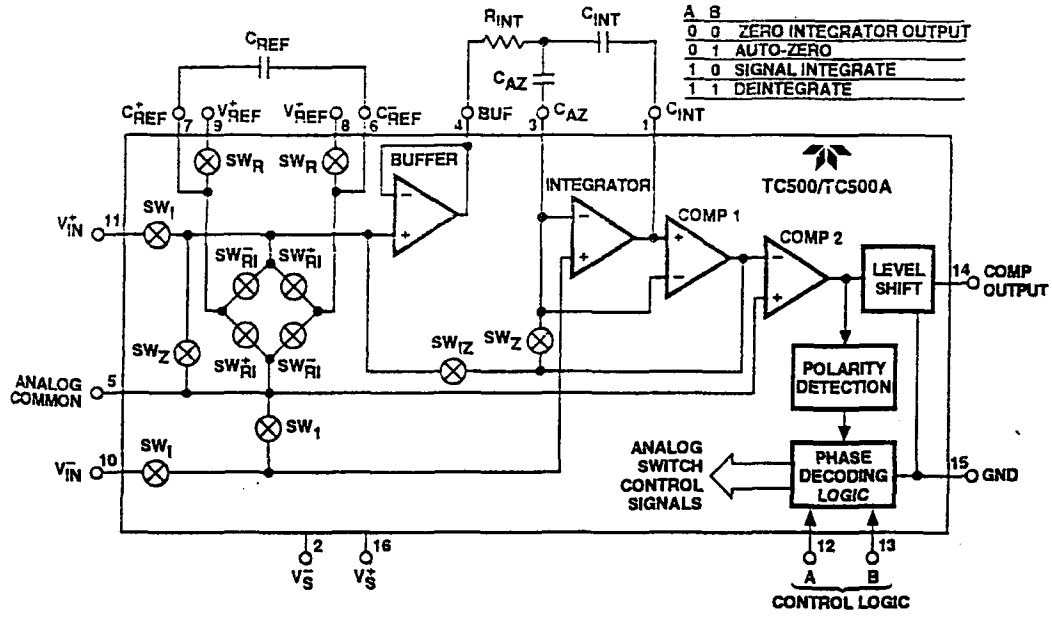
3.2 ANALOG DİJİTAL ÇEVİRİCİ

1/10000 duyarlılık için en az 14 bit kuantalama gerektiğinden çift eğimli analog/dijital dönüştürücü tercih edildi. Çift eğimli dönüştürme diğer yöntemlere göre daha yavaştır fakat daha düşük maliyetle daha yüksek kuantalama sağlayabilir. Çalışma ilkesi gereği çevrim süresi işaretin genliğine bağlıdır. Bu amaçla kullanılan TC500A tümdevresi integrasyon, ters integrasyon, otomatik sıfırlama ve dengesizlik giderme işlemlerini mikro-kontrolör çıkışından gelen ve A, B girişlerine uygulanan işaretlerle yapmaktadır. Gerçekte dönüştürme sırasında sayma işlemini de mikrokontrolör sağlamaktadır.



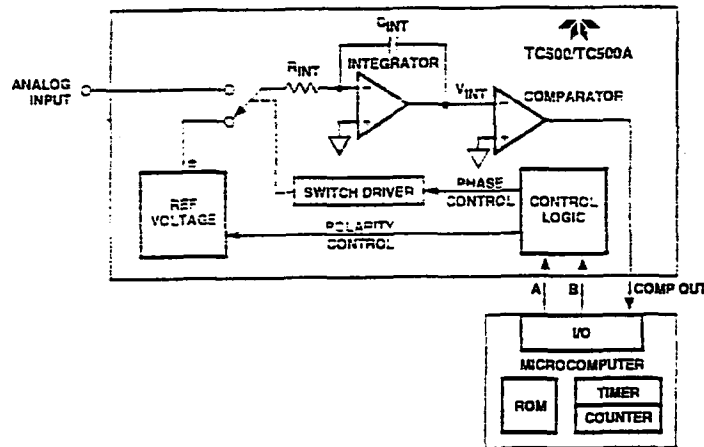
Şekil 3.3-Giriş işaret genliği ile ters integrasyon süresinin değişimi.

İlk aşamada $AB=01$ verilerek sıfırlama işlemi gerçekleşir. Diğer bir deyişle, integratör ve karşılaştırmacı dengesizlik gerilimlerinden gelen hata C_{A2} kapasitesi hata gerilimi ile yüklenerek kompanze edilir. Daha sonra 12MHz kristal bağlı 8752 işlemcisi içinde bulunan 16 bit zamanlayıcının taşma bayrağını kaldırdığı 65535ms boyunca C_{INT} kapasitesi giriş işaretiyle integre edilir ($AB=10$).



Şekil 3.4-TC500A tümdevresinin uç bağlantıları.

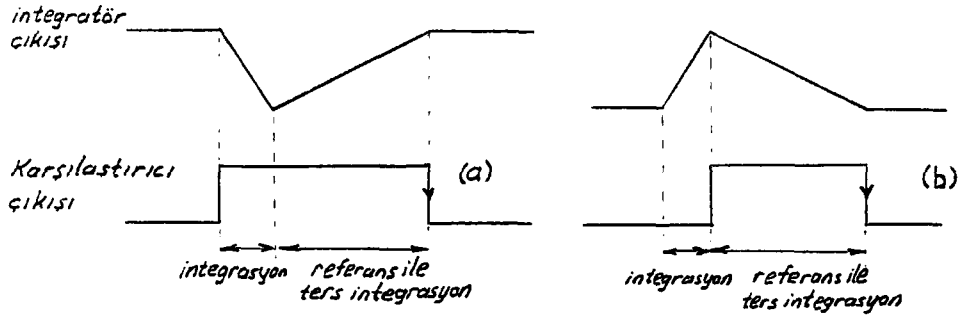
Üçüncü aşama integratör kondansatöründe yüklenen gerilimin referans kaynağa bağlı olarak sabit eğimle boşaltılmasıdır (ters integrasyon). Sabit eğimle boşalan kondansatörün boşalma süresi yükü ile doğru orantılı olduğundan analog giriş gerilimiyle orantılıdır. Dolayısıyla boşalma süresini ölçmek gerekir.



Şekil 3.5-TC500A tümdevresinin prensip şeması.

Ters integrasyon zamanının ölçülmesinde 8752 işlemcisinin dışarıdan kontrollü konumda, bağımsız çalışan

sıfır numaralı zamanlayıcısından yararlanılmıştır. İntegrasyondan ters integrasyona geçmeden önceki karşılaştırıcı çıkışı lojik sıfır ise ölçülen giriş işaret negatiftir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Karşılaştırıcı çıkışından pozitif giriş işaretinin (a) negatif giriş işaretinden (b) ayrılması

Karşılaştırıcı çıkışı tekrar sıfıra düşene kadar geçen süre 16 bit olarak TLO ve TH0 kayıtçılarında okunarak filtre, kalibrasyon ve kod çevirme işlemlerine alınır. 14 Bit ve daha büyük çözünürlüklü çevirme işlemlerinde son aşama olarak AB=00 verilerek integratör çıkışı sıfırlanır. Bu gereksinim karşılaştırıcı çıkışının sıfıra düşmesi ile TC500A'nın mikroişlemci tarafından referans kaynağıyla ters integrasyondan çıkartılana kadar oluşan gecikmede fazladan ters yönde integre edilmesinden doğar. Karşılaştırıcının gecikmesi de burada etkilidir. Bu hata gerilimi sıfırlanmadığı takdirde bir sonraki çevrim anında integrasyona bu aşım geriliminden başlanır. Karşılaştırıcı çıkışı tekrar 1 seviyesine çıkana kadar AB=00 verilir.

İntegrasyon yöntemi ile analog/dijital dönüştürmenin üstün bir özelliği sıfır civarındaki rasgele gürültünün çevrim sırasında ortalaması alındığından gerçek işaret yanında filtre edilmesidir. Periyodik örnekleme yapılan dönüştürücülerde anlık değer önemli olduğundan gürültü işareti gerçek işaretin üzerine biner.

TC500A'nın integrasyon süresi çevrim çözünürlüğünü belirlediğinden bu tür çeviricilerde duyarlılık işlemci tarafından süreye karşılık düşürülen taşma sayısı ile ifade edilir. Buna iç sayım adı verilir. R_{INT} ve C_{INT} 'in değerleri integrasyon süresi, istenen çözünürlük ve her bir iç sayım adımının bir fonksiyonudur.

TC500A ile elde edilebilecek en büyük çözünürlük 16bit+işaret bilgisidir. Doğrusallıktan sapma %0,003'ten küçüktür. Sıfır geçiş karşılaştırıcısının gecikmesi 4 μ s'dir. Tepeden tepeye çift beslemenin toplam genliği 18V'u geçmemelidir. Tek başına pozitif ya da negatif besleme 12V'la sınırlıdır. Ölçülebilecek analog giriş gerilimi ise $\pm 4,2V$ ile sınırlıdır.

3.3 DİJİTAL FİLTRELEME

Sıfır civarındaki raslantısal gürültüler dijital dönüşürme sırasında filtre edilir. Ancak belirli süreler için gelen ve ortalaması sıfırdan farklı elektriksel gürültüler ile mekanik sistemin istem dışı salınımı sonucu oluşan değişimlerin filtre edilmesi gerekir. İşaret işleme ortamı dijital olduğundan dijital filtrenin getirdiği üstünlükler düşünülerek tartı sistemine uygulanması uygun görülmüştür. Bu üstünlüklerden bazıları şöyle sıralanabilir :

- a) Önceden belirlenen koşullar altında kararlılık problemleri yoktur,
- b) Giriş-çıkış empedans uydurma sorunu ortadan kalkar,
- c) Katsayılar programda kolayca değiştirilebilir,
- d) Örneklemeye bağlı olarak geniş bir frekans bandında çalışabilirler,
- e) Yüksek dinamik performans ve yeterli duyarlılık

sağlayabilirler,

f) Zamanla oluşan veya periyodik çalışmadan kaynaklanan bir kayma görülmez.

Doğrusal katsayılı filtreler sonlu impuls cevaplı (FIR) ve sonsuz impuls cevaplı olmak üzere iki grupta toplanırlar. Bir FIR filtresinin cevabı (3.2) ile ifade edilebilir.

$$y(n) = c_0 X(n) + c_1 X(n-1) + \dots + c_{N-1} X(n-N+1) \quad (3.2)$$

Burada c_i katsayılarına filtre geçirme ağırlıkları denir. N 'inci derece bir FIR filtresinin transfer fonksiyonu,

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i z^{-i} \quad (3.3)$$

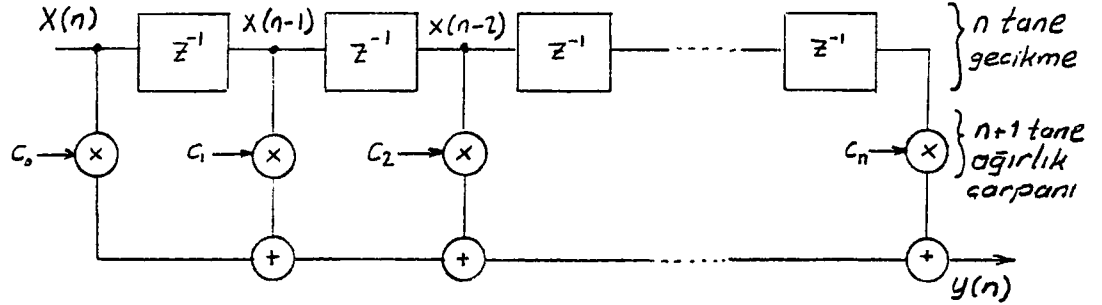
ile ifade edilir.

FIR Filtrenin Özellikleri:

- a) Impuls cevabı en az filtre derecesi kadar örnek sonunda oluşur,
- b) Transfer fonksiyonu sadece sıfırlardan meydana gelir,
- c) Ağırlık katsayılarıyla çarpımların toplamı ve durum öteleme işlemleri kolaylıkla uygulanır,
- d) Sınırlı genlikle giriş için çıkışın en büyük değeri sınırlıdır ($0 < |x(i)| \leq 1 \Rightarrow y(i) = \sum |c_i|$). Eğer katsayı ağırlıkları da sınırlı ise çıkış sınırlı olacağından kararlılık garanti edilmiş olur.

Ağırlık ölçümünde şekil 3.7'de görülen derecesi (1..n) programlanabilir FIR filtresi kullanıldı. Bu filtre giriş genliğine bağlı olarak değişim seviyesi tam skalanın 1/255'ine düştüğünde devreye girmektedir. Böylece yeni yükleme yapıldığında terazinin daha çabuk ölçüm yapması sağlanır.

$$|x(n)/255 - x(n-1)/255| \begin{cases} = 0 \Rightarrow y(n) = x(n) \\ \neq 0 \Rightarrow c_0 = c_1 = \dots = c_n = \frac{1}{n+1} \end{cases}$$



Şekil 3.7-n. dereceden FIR filtre yapısı.

Filtre frekans cevabı,

$$H(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})| e^{j\theta(\omega)} \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır. Özellikle

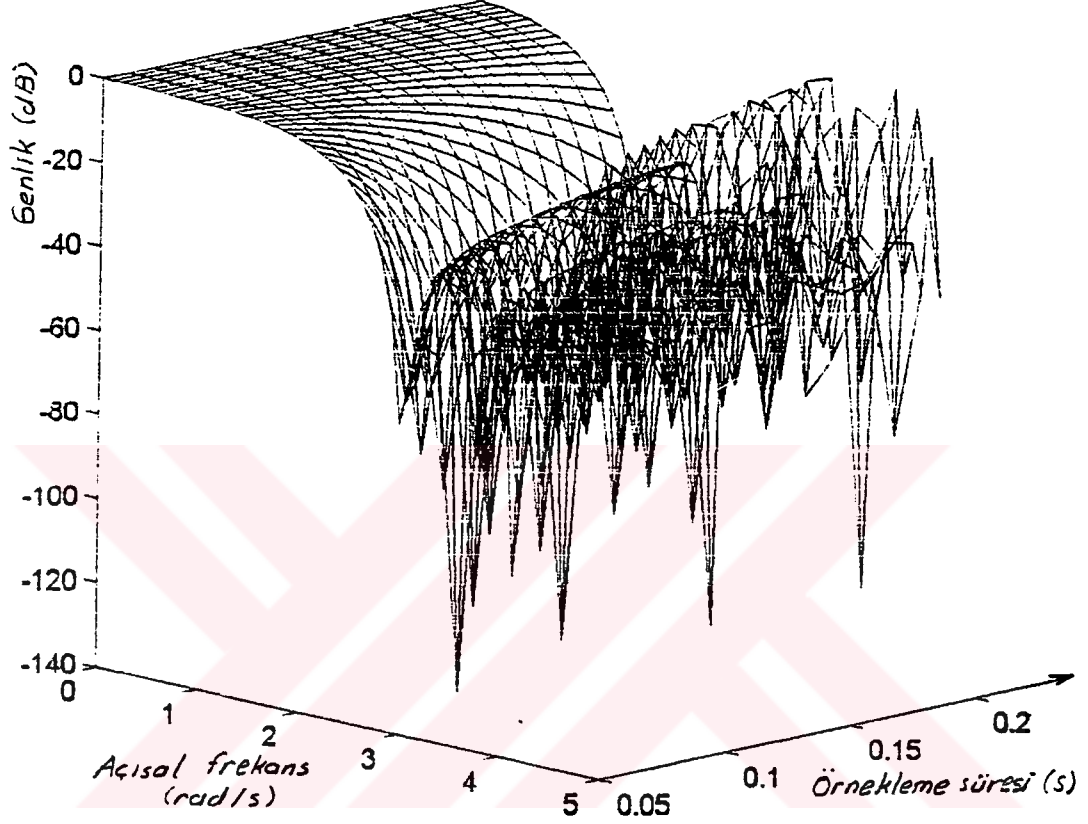
$$\begin{aligned} e^{\omega} &= a\omega + b \\ a &= \frac{(n-1)}{2}, \quad b = \mp \frac{\pi}{2}, 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

için faz cevabı lineerdir. Grup faz gecikmesi T_{gd} fazın frekansa göre türevi olarak tanımlıdır [16].

$$T_{gd} = \frac{d(e^{\omega})}{d\omega} = \frac{(n-1)}{2} \quad (3.6)$$

Görüldüğü gibi filtre derecesi arttıkça grup faz gecikmesi de artmaktadır. İmalatı tamamlanan terazi, ortamın elektriksel gürültüsüne ve mekanik sistemin kararlılığına bağlı olarak filtre derecesi ayarlanır. Pratikte kantarlarda özel durumlar dışında $n=3..10$ arasında seçilir. Ağırlık ölçüm amacına bağlı olarak bu sınırların dışına çıkılabilir. Örneğin malzeme kopma testinde $n=2$ ve duyarlılık $1/2000$ alınabilir. Böylece

daha hızlı ölçüm yapılabilir. Statik yüklerin 1/40000 duyarlılıkla ölçülmesinde $n=10\dots30$ arasında seçilir.

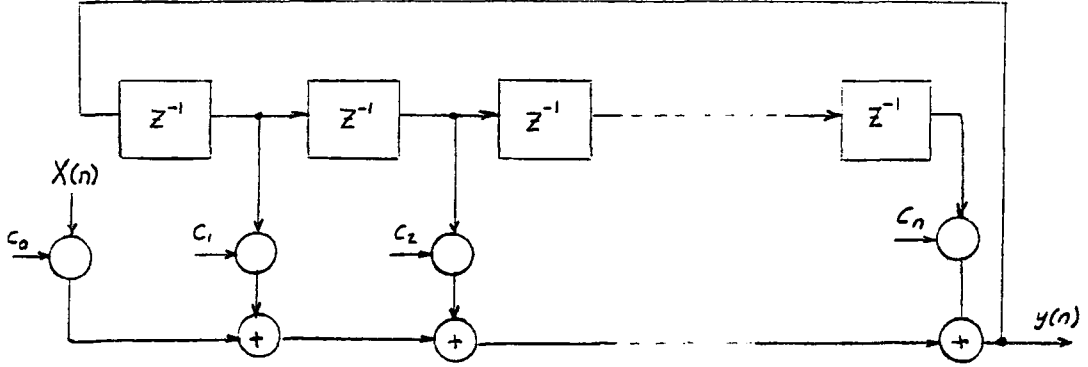


Şekil 3.8- $n=5$ ve $c_0=c_1=c_2=c_3=c_4=c_5=1/6$ için FIR filtresi frekans cevabı.

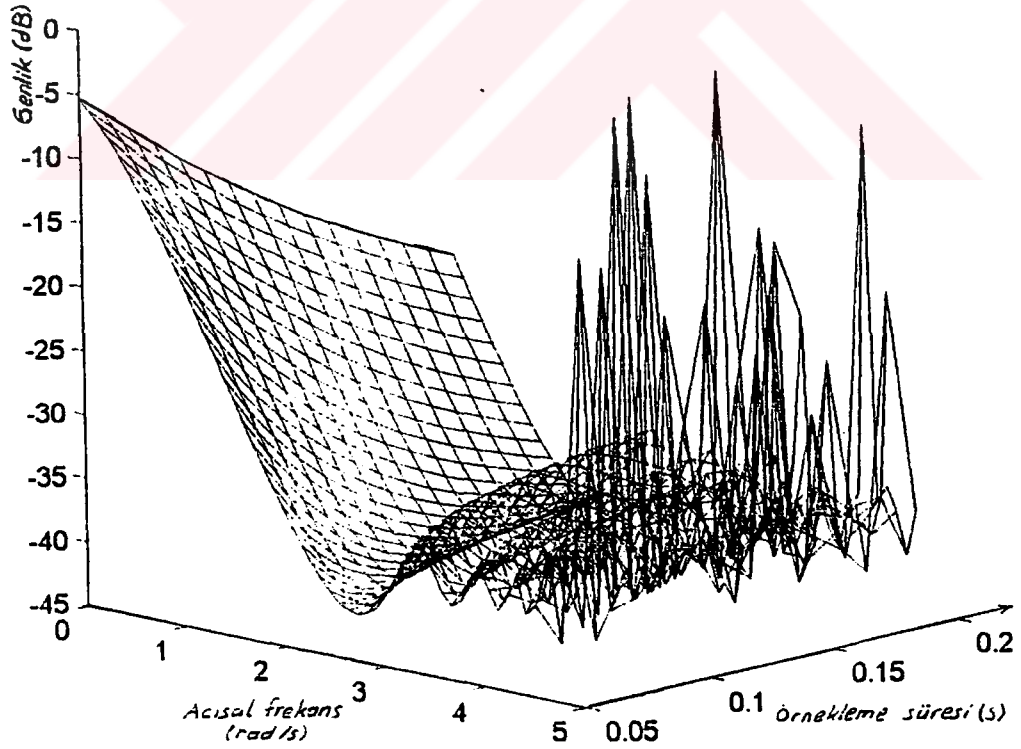
Şekil 3.9'da verilen IIR filtresi kullanılarak daha az gecikme elemanı ile daha yüksek dereceden filtre gerçekleştirilebilir. Ancak IIR filtreleri genelde lineer faz cevabına ya da sabit grup gecikmesine sahip değildirler. Transfer fonksiyonları,

$$H(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \sum_{n=0}^{\infty} c(n) z^{-n} = K \frac{\prod_{i=1}^M (z - \alpha_i)}{\prod_{i=1}^N (z - \beta_i)} \quad (3.7)$$

şeklindedir. Bir IIR filtresinin frekans cevabı önceki FIR filtre örneğine benzer şekilde beş gecikme elemanı ve $c_0=c_1=c_2=c_3=c_4=c_5=1/6$ için frekans cevabı şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9-Bir IIR filtre yapısı



Şekil 3.10-IIR filtrenin frekans cevabı

Sürekli izleme türündeki ağırlık ölçümlerinde (örneğin taşıma bantları) lineer olmayan faz cevabı sebebiyle IIR filtre dinamik değişimlerde yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir.

Geçirme bandında istenen dalgalanma δ_1 , söndürme bandı sınırı δ_2 ve Δf (geçiş frekans farkı/ f_s) bilindiği takdirde Rabiner formülü ile ampirik olarak tasarlanması gereken FIR filtrenin mertebesi bulunabilir [16].

$$n \approx \frac{-10 \log((1-\delta_1)\delta_2) - 15}{14 \Delta f} + 1 \quad (3.8)$$

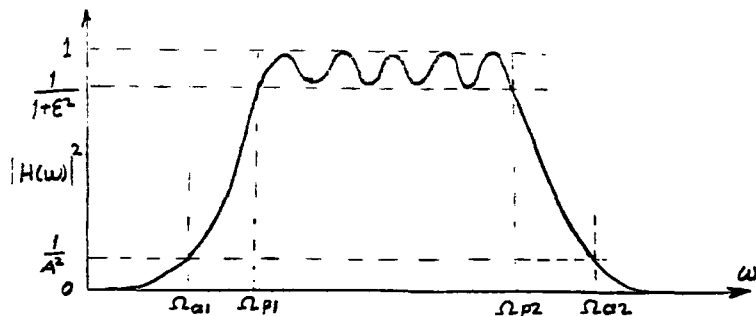
Örneğin geçirme bandında -0.0873dB , söndürme bandında -20dB , $f_s=8000\text{Hz}$, geçirme bandı $[0,480]$ Hz ve söndürme bandı $[800,4000]$ Hz için gerekli FIR filtre derecesini hesaplayalım.

Şekil 3.11 deki gibi frekans cevabı verilen bir filtrede,

$$(1-\delta_1)^2 = \frac{1}{1+\epsilon^2} \quad (3.9)$$

$$\delta_2^2 = \frac{1}{A^2} \quad (3.10)$$

$$A_p = -10 \log(1+\epsilon^2) \quad , \quad A_a = -10 \log A^2 \quad (3.11)$$



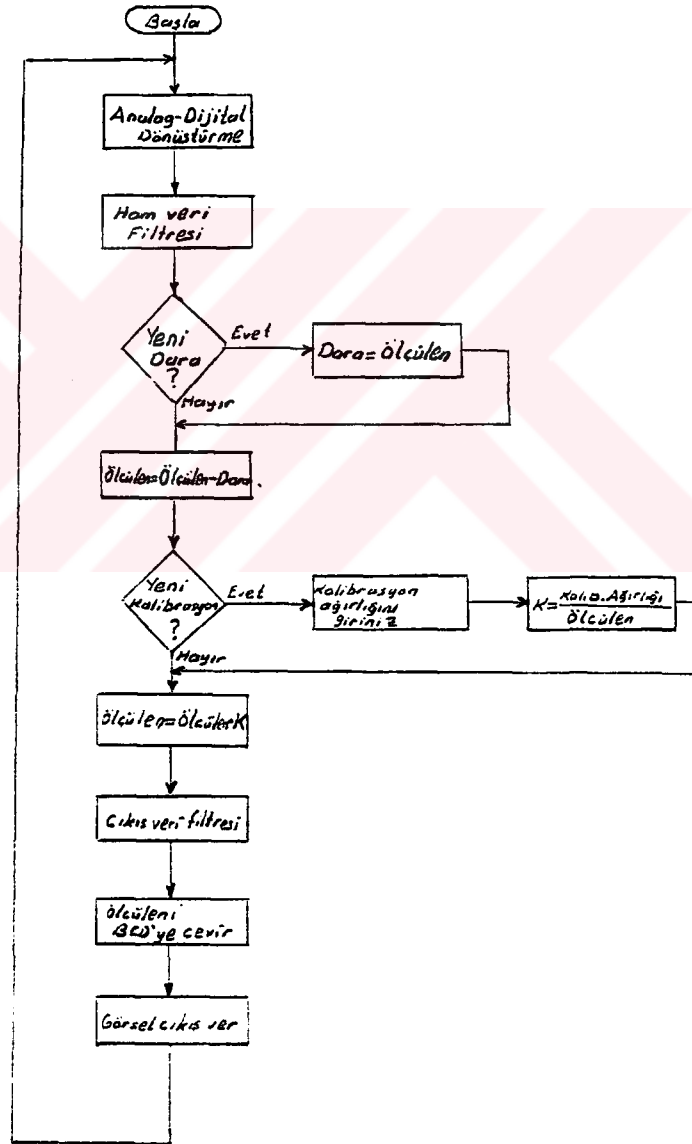
Şekil 3.11-Bant geçiren bir filtrenin frekans cevabı.

örnek problemde $\delta_1=0.99$ veya $1-\delta_1=10^{-2}$, $\delta_2=0.1$ ve $\Delta f=320/8000=0.04$

$$n = \frac{-10 \log(10^{-3}) - 15}{14 \cdot 0.04} + 1 \approx 28$$

28'inci derece FIR filtre gereklidir.

3.4 YAZILIM İLE KALİBRASYON



Şekil 3.12-Sürekli ölçümde işaret işleme algoritması.

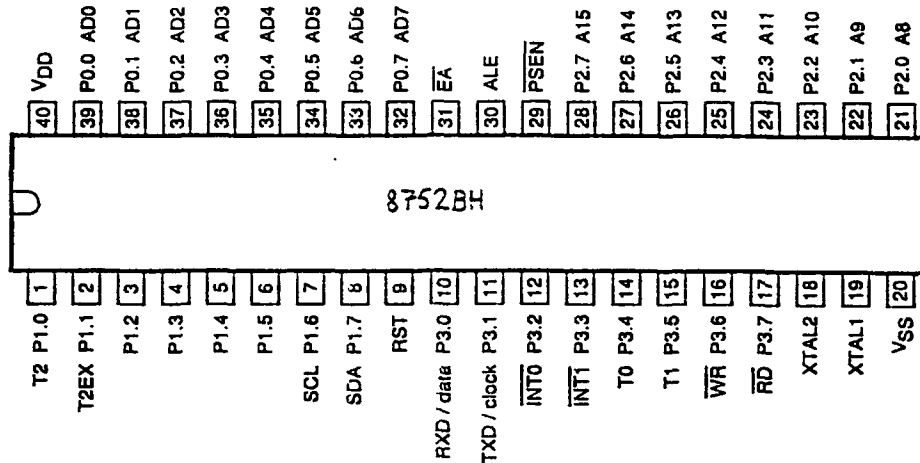
Dönüştürülen 16 bit işaret önce 16 bitlik bir ön filtreden geçirilir. Daha sonra yeni data almadığı ya da yeni bir kalibrasyon yapılmadığı takdirde,

$$Y = (M_{FD} - M_D) \cdot K \quad (3.12)$$

işlemine sokulur. Burada M_{FD} ölçülüp ön filtreden geçirilmiş 16 bit veri, M_D 16 bitlik data değeri, K kalibrasyon çarpanı, Y ise filtre edilerek çıkışa verilecek olan ölçüm verisidir. Intel firmasının 8752BH mikrokontrolörü ile gerçekleştirilen tasarımda iki adet zamanlayıcı kesme girişinden biri göstergeler diğeri ise ADC çevriminde kullanılmıştır. Bunlardan ADC için kullanılan sıfır numaralı zamanlayıcı kesme girişi önlenerek aynı zamanda seri haberleşme için seri haberleşme için gerekli 9600 baud işaretin üretiminde kullanılmıştır.

Bu temel fonksiyonlar gerçekleştirildiği sırada gerçek yazılımda otomatik sıfır noktası kayma kalibrasyonu, tuş takımı tarama, duyarlılığa bağlı rakam yuvarlama ve kararlı ağırlık arama programları çalışmaktadır.

3.5 ÇIKIŞLAR



Şekil 3.13-Intel 8752BH plastik DIP kılıfta uç dizilimi.

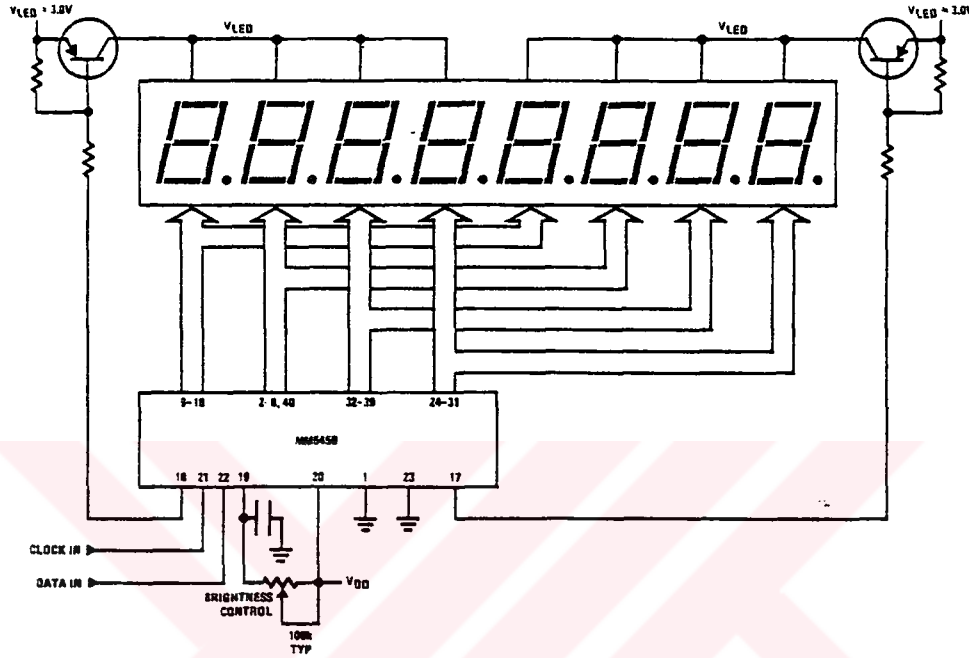
Bu uç konfigürasyonunda $\overline{EA}=0$ yapılarak P0 ve P2 dış bellek bağlantısı için Adres/Veri yolu olarak kullanılmıştır. MK48T02 (pilli RAM ve gerçek zaman saati) ile genişleme birimi 8255 bu hat üzerinden bağlanmıştır. Port1 ve port3'ün dizilimi ise,

- P1.0 Seri gösterge sürücüsü için saat çıkışı,
- P1.1 Seri gösterge için veri çıkışı,
- P1.2 ADC (TC500A - A girişi),
- P1.3 ADC (TC500A - B girişi),
- P1.4 Tuş1 (Dara),
- P1.5 Tuş2 (Saat),
- P1.6 Tuş3 (Fonksiyon girişi),
- P1.7 Tuş4 (Arttır),
- P3.0 UART/RxD (TSC232 RS232 çeviriciye),
- P3.1 UART/TxD (TSC232 RS232 çeviriciye),
- P3.2 ADC (TC500A karşılaştırıcı),
- P3.3 Tuş5 (Azalt),
- P3.4 Röle sürümü için lojik çıkış,
- P3.5 Röle sürümü için lojik çıkış,
- P3.6 Data write,
- P3.7 Data read.

3.5.1 GÖSTERGE ÇIKIŞI

Ağırlık ölçen sistemlerde gösterge ile ölçüm kartı genellikle farklı kartlardadır. Örneğin bir kantarda ölçüm bilgisi rahatça görülebilen bir yerde, gerekirse iki yönlü bilgi basabilecek şekilde istenir. İkinci bir karta altı göstergeye ait satır/sütun tarama bilgisi yerine LED göstergelerin bulunduğu karta MM5450 34 parçalı sürücü bağlanarak ana kart ile sürücü kart arasındaki bağlantı besleme, veri ve saat olmak üzere dört kabloya indirilmiştir. 33 Ve 34 numaralı çıkışlar ile sürülen transistörler ilk 32 parçayı çiftleyerek çalışmaktadır. Böylece

64 çıkış, ya da 8 rakama ait 7 parça+ 1 noktalı LED gösterge sürülebilmektedir (Şekil 3.14).



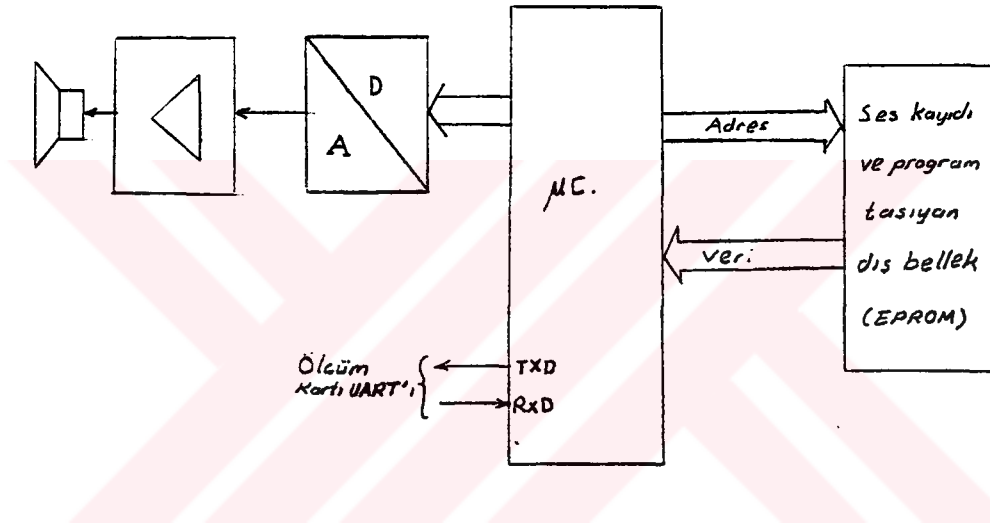
Şekil 3.14-MM5450 LED sürücü,çiftlemeli çalıştırılarak sekiz adet yedi parçalı (ve noktalı) göstergenin sürülmesi.

Elektrik kesintisinde çalışmaya devam edilmesi istenen yerlerde led gösterge yerine sıvı kristal gösterge tercih edilir. Çünkü sıvı kristalin çektiği akım ledin çektiği akımdan çok daha küçüktür.

3.5.2 KONUŞMA KARTI

Konuşma kartı seri haberleşme çıkışları UART yolu ile ana karta bağlı bir ikinci mikrokontrolör kartıdır. Konuşma kartında eşdeğer kod tablosu ana ölçüm kartında bulunan ve temel rakam ve ağırlık ölçümü ile ilgili sözcüklerin kayıtlı olduğu bir kütüphane bulunmaktadır.

ölçüm kartı ölçüm bilgisine bağlı olarak seri çıkıştan konuşma kartına kaç numaralı kayıdı okuması gerektiğini bildirir. Bu veriyi alan konuşma kartı kontrolörü ilgili ses kaydının bellekteki yerini ve uzunluğunu karşılık kod tablosundan bulur. Yeri ve uzunluğu bilinen örneklenmiş ses verisi senkron bir hızda okunarak analog işarete çevrilir. Analog işaret kuvvetlendirilerek hoparlör üzerinden ses olarak ortama verilir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15-Konuşma kartının blok şeması.

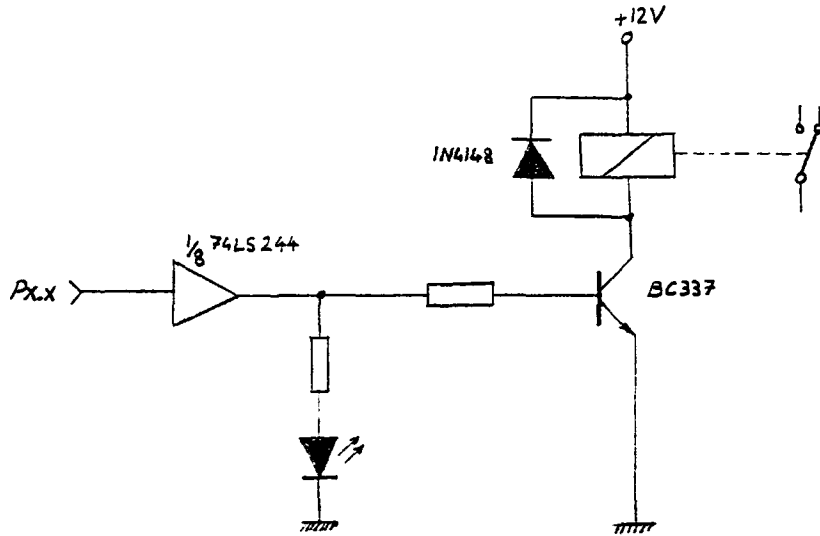
3.5.3 SERİ HABERLEŞME

Seri haberleşme ölçüm kartının RS 232 kanalı üzerinden dış dünya ile bağlantısını sağlar. Eğer UART, konuşma kartı için kullanılmıyorsa TSC232 veya eşdeğeri bir tümdevre ile RS232 standardına getirilerek kişisel bilgisayara veya benzeri bir cihazın seri haberleşme kartına bağlanır. Kişisel bilgisayar ortamına alınan ölçüm verisi grafik çıkarma, üretim analizi, üretim kontrolü vb. amaçlarla işlenebilir. Gerçeklenen sistem RS232 kanalına sürekli olarak ölçüm bilgisi ve hata kodu

göndermektedir. Gönderilen her veriden sonra bir sonrakini göndermeden önce aynı verinin geri gelmesi beklenmektedir. Gönderilen her veriden sonra bir sonrakini göndermeden önce aynı verinin geri gelmesi beklenir. 9600 baud ile yapılan bu protokol hatalı veri aktarımını engellemektedir. Haberleşilen ortam ile mesafe arttıkça iletişim hızı 1200 bauda kadar düşürülür. 15..30 m'yi geçen mesafelerde ise ortam şartlarına bağlı olarak RS232 yerine RS488/485 kullanılır.

3.5.4 RÖLE ÇIKIŞLARI

Özellikle dolum tesislerinde ölçülen ağırlık önceden belirlenen ağırlığa eriştiğinde solenoid valfler aracılığı ile boşaltımın otomatik kontrol edilmesi istenir. Yüksek hız ve doğruluk istenen dolum işlerinde bu işlemin iki kademeli yapılması gerekebilir. Bu amaçla ana kartın P3.4 ve P3.5 çıkışlarından şekil 3.16'da gösterilen devre aracılığı ile iki adet röle kontrol edilir.



Şekil 3.16-Mikrokontrolör çıkışından rölenin sürülmesi.

Röle çekme gecikmesinin getirdiği hatalar ihmal edilemez seviyelerde olduğunda doğru akımlı solenoid, bir transistörle sürülür. Alternatif akımda ise anahtar eleman olarak triyak kullanılır.



BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmanın sonunda, ölçüm bilgisini görsel ya da işitsel olarak verebilen ve otomasyon sistemleri ile bağlaşım kurabilen endüstriyel bir kart elde edilmiştir. Beraberinde tasarlanan toz ve neme dayanıklı metal dış kılıf ve membran tuş takımı ile yapılan sisteme ticari nitelik kazandırılmıştır.

Tasarımı yapılan kart ile tam skalaya göre 1/60000 duyarlılıkta ağırlık değişimleri algılanabilmektedir. Fakat ölçüm kayması ve gürültü kaynaklarına karşı yazılım ile yapılan kompanzasyon sonucu, statik ağırlıklar 1/30000 duyarlılıkla hatasız olarak ölçülebilmektedir. Dinamik yük değişimlerinde ve elektriksel gürültünün yoğun olduğu ortamlarda duyarlılık tam skalanın 1/10000'ine kadar düşmektedir. Elde edilen ölçüm duyarlılığı ticari ölçümlerde ve endüstriyel uygulamalardaki gereksinimi rahatlıkla karşılamaktadır.

Genel amaçlı bir ölçüm kartı yapıldığından sistemi kontrol eden yazılım, filtreleme, kalibrasyon, otomatik

sıfır kayma kompanzasyonu, dara alma, seri haberleşme protokolü, ADC çevrim süresi ve rakam yuvarlatma gibi fonksiyonlarda parametrik değişiklik olanağı tanımaktadır.

Elektronik ölçüm kartının baskı devre yapısında elektriksel gürültüye karşı özel önlemler alınmıştır. Yapılan devre ve yazılımla yapılan filtre ve hata kompanzasyonu ne kadar iyi düşünülmüş olursa olsun mekanik sistemin de istenen duyarlılığa uygun tasarlanmış olması gerekir. Bu noktada yük hücresinin niteliği ve mekanik sisteme uygulanacak kuvvet dağılımı önem kazanır. Örneğin kantarlarda platform büyüklüğüne bağlı olarak 1, 2, 4 ya da daha fazla yük hücresi kullanmak gerekebilir. Gerekli kuvvet dağılımı sağlanmadığı takdirde yükün platform üzerindeki yerine bağlı olarak farklı ve hatalı ölçüm yapılır.

Endüstriyel tartı sistemlerinde hedeflenen ölçme niteliğine ulaşabilmek için, tasarım sırasında, çalışılacak ortam koşulları ve sistemi oluşturan parçaların birbirlerine etkileri belirlenmelidir.

Seri haberleşme protokolünde her gönderilen veriden sonra alıcıdan aynı verinin geri gelmesinin beklenmesi iletişim hızını düşürmesine rağmen elektriksel gürültünün yoğun olduğu ortamlarda hatalı aktarımı önlemektedir.

Konuşma kartı önceden kayıtlı ve delta modülasyonu ile sıkıştırılmış sözcükleri, okuma sırasında açmakta ve arka arkaya dizerek anlamlı cümleler kurabilmektedir. Aynı sözcüklerden çok sayıda kayıt yapıp, içlerinden başka sözcüklerle birleştirmeye uygun olanlar seçilir. Kayıt yapılan ortam ve kayıt örnekleme frekansı ses kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Mikrokontrolörlü ölçüm kartı, seri haberleşilen gösterge kartı ve çevre birimler ile modüler ve ekonomik bir tasarım elde edilmiştir. Esnek ve kullanımı kolay kontrol yazılımı ile ölçüm verisi istenilen şekilde değerlendirilebilmektedir. Elde edilen ölçüm duyarlılığı ve kararlılığı daha önce yapılan benzeri çalışmaların üstündedir.



KAYNAKLAR

- [1] AKKURT, M., KENT, M., Makina Elemanları, Birsen Kitabevi, (1986).
- [2] BAKİOĞLU, M., KADIOĞLU, N., ENGİN, H., Mukavemet Problemleri, Kurtiş Matbaası, (1987).
- [3] HOFFMAN, K., Measuring Elementary Load Cases With Strain Gauges, Hottinger Baldwin Messtechnik, VD73002e.
- [4] ÖZBEK, T., Mukavemet, Birsen Kitabevi, (1983) .
- [5] MEASUREMENTS GROUP INC., Plane Shear Measurements With Strain Gauges, M.G. Tech Note, (1983).
- [6] HOFFMAN, K., The Strain Gauges A Universal Tool Of The experimental Stress Analysis , Hottinger Baldwin Messtechnik, VD73004e.
- [7] MEASUREMENTS GROUP INC., Strain Gauge Selection Criteria, M.G. Tech Note, (1989).
- [8] MEASUREMENTS GROUP INC., Errors Due To Transverse Sensitivity In Strain , M.G. Tech Note, (1982).
- [9] MEASUREMENTS GROUP INC., Strain Gauge Thermal Output And Gauge Factor Variation With Temperature, Strain, M.G. Tech Note, (1992).
- [10] HOFFMAN, K., Practice Hints For The Application of Strain Gauges, Hottinger Baldwin Messtechnik, VD84005e.
- [11] MEASUREMENTS GROUP INC., Strain Gauge Installations With M-Bond 43-B And 610 Adhesive Systems M.G. Instruction Bulletin B-130-14, (1979).

- [12] HOFFMAN, K., Applying Wheatstone Bridge , Hottinger
Baldwin Messtechnik, VD72001e.
- [13] MEASUREMENTS GROUP INC., Optimizing Strain Gauge
Excitation Levels, M.G.Tech Note, (1979).
- [14] MEASUREMENTS GROUP INC., Errors Due To Wheatstone
Bridge Nonlinearity, M.G.Tech Note, (1982).
- [15] MEASUREMENTS GROUP INC., Shunt Calibration Of Strain
Gauge Instrumentation, M.G. Tech Note,
(1988).
- [16] WILLIAMS, A.B., TAYLOR, F.J., Electronic Filter
Design Handbook, McGraw Hill Publishing
Company, (1988).

ÖZGEÇMİŞ

B.Berk Üstündağ 1970 yılında İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini Moda İlkokulu'nda, orta öğrenimini Özel Moda Koleji'nde yaptı. Lise öğrenimini Haydarpaşa Endüstri Meslek Lisesi Elektronik bölümünde tamamladı. 1987 yılında İ.T.Ü Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. 1991 yılında bu bölümden mezun olup İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilimdalı, Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Programında yüksek lisans eğitimine başladı. 1991 yılı Kasım ayında İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kontrol ve Kumanda Sistemleri Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak girdi. Halen bu görevini sürdürmektedir.