

Isermann, Rolf. 2006. Section 2.2 Sensors, pp. 32-52, of Chapter 2 Hardware, in CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology. Edited by CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE. Copyright American Society of Agricultural Engineers.

Çevirmenler: Pınar DEMİRCİOĞLU ve İsmail BÖĞREKÇİ
Çeviri Editörleri: Sefa TARHAN ve Mehmet Metin ÖZGÜVEN

2.2 Sensörler

Yazar: R. Isermann

Çevirmenler: Pınar DEMİRCİOĞLU ve İsmail BÖĞREKÇİ

Özet: Sensörler ve ölçüm ekipmanları tüm teknik ürün ve süreçler için temel öneme sahiptir. Sensörler manuel kontrol, otomatik ileri beslemeli ve geri beslemeli kontrol, denetim ve optimizasyon temeli ve iç durumu izlemek, süreçlerin bazı değişkenlerini belirtmek için kullanılır. Ölçülen miktarların bir sınıflandırması ve bir ölçüm sisteminin unsurlarını göz önüne aldıktan sonra, bazı sensör özellikleri ve sinyal tipleri tartışılır. Sanayi, mekatronik ve tarım sistemlerinde sıklıkla gerekli olan sensörlerin kısa açıklamaları ile devam edilir. Bu açıklamalar; yer değiştirme, hız, ivme, titreşim, kuvvet, basınç, tork, sıcaklık ve akış ölçümünü içermektedir. Son olarak, A/D dönüşüm, elektromanyetik uyumluluk ve entegre ve akıllı sensörler tartışılır.

Anahtar Kelimeler: Sensörler, Ölçme, Sinyaller, Transdüserler, Yükselteçler, Yer Değiştirme, Hız, İvme, Titreşim, Salınım, Kuvvet, Basınç, Tork, Sıcaklık, Akış, EMU, Entegre ve Akıllı Sensörler.

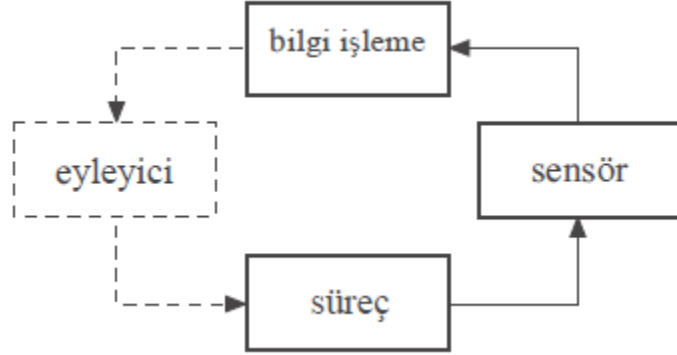
Açıklama: Bu bölüm Mekatronik Sistemler. (Isermann, R., 2002. Springer, Londra) kitabının kısaltılmış bir versiyonudur.

2.2.1 Giriş

Sensörler ve ilgili ölçüm sistemleri, teknik sistemlerde herhangi bir işlem hakkında gerekli ölçülebilir bilgi sağlar. Onlar, mikrobilgisayarlar (Şekil 1'e bakılabilir) gibi süreç ve bilgi işleme kısmı arasında önemli bir bağlantıyı temsil ederler. Mekanik veya termal miktarları ölçen ve onları elektrik sinyallerine dönüştüren sensörler, mekatronik sistemler ve hassas tarım için özel bir öneme sahiptir. Bu bölüm, bazı karakteristik özellikler, sinyal türleri ve ölçüm prensiplerinin bazılarının genel bir bakış açısını verir. Genel ölçme (metroloji) alanının daha detaylı bir açıklaması başka kaynaklarda verilmiştir [1-10]. Katı ürünler için kütle akış sensörleri, bu bölümde ele alınmayacaktır. İlgili ölçüm ilkeleri ve özellikle, biçerdöver için verim haritalamadaki uygulamaları için Kaynaklar 11-13 karşılaştırılabilir.

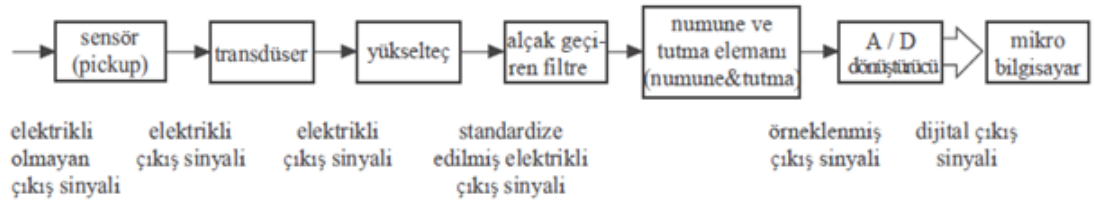
2.2.2. Ölçüm Sistemleri

Bir ölçüm sisteminin amacı gözlemlemek ve değişken bir fiziksel büyüklüğü (ölçülen büyüklük) ölçmek ve elde edilen bilgiyi işlemektir. Bu sistemin ilk elemanı, *sensör* veya *algılama elemanı*'dır. (Bu terim giderek artan bir şekilde *pick up* yerine kullanılır).



Şekil 1. Bir süreç ve bilgi işlem birimi arasındaki bağlantılar olarak sensörler.

Sensörlerin birincil işlevi ölçülen büyüklüğü algılamak ve onu uygun bir sinyale dönüştürmektir (Şekil 2). Mekatronik sistemler genellikle bir elektriksel çıkış sinyali olan sensörlere güvenirlir. Çıkış sinyalinin özellikleri sensör ölçüm prensibine bağlıdır. Transdüserler (dönüştürücü) ve yükselteçler, 0-20 mA veya 4-20 mA veya 0-10 V gibi daha sonraki işlemler için daha uygun olan elektrik sensör çıkışını/sinyalini standart bir elektrik sinyaline dönüştürür. Yüksek frekans bozucuları kullanılabilir sinyali bozarsa, etkiyi azaltmak için düşük geçiren bir filtre uygulanır. Sensör sinyali bir mikroişlemci tarafından işlenecek ise, bir örnekle-tut devresi ve analog-dijital dönüştürücü gereklidir.



Şekil 2. Bir ölçüm sistemi.

Tüketim malları ve düşük maliyetli aletler, yüksek hassasiyetli ölçüme ve ölçüm sisteminin modüler bir düzenlemesine gereksinim duymazlar. Bu nedenle, standardize edilmiş elektrik sinyallerinin üretimini kaldırmak gibi maliyetleri azaltmak için sadeleştirmeler yapılabilir.

2.2.3. Sensörlerin Sınıflandırılması

Metrolojinin geniş spektrumu nedeniyle, sensör ve ilgili sinyal işleme cihazlarını sınıflandırmak zordur. 1983 yılında derlenen "Teknik Sensörler" [14]

başlıklı bir araştırma, beş seviye ve 75 alt bölümden oluşan hiyerarşik bir sınıflandırma önerdi. Sensörler sınıflandırılması için önemli özellikler şunlardır: ölçülen miktar, sensör prensibi, üretim teknolojisi, sinyal türleri ve arayüzleri, uygulama alanları ve özellikleri, kalite sınıfı ve maliyet.

Tablo 1, bazı önemli ölçütlerin bir sınıflandırmasına genel bir bakış sunar. Kabataslak bir sınıflandırma yapılabilir: mekanik büyüklükler, ısı/kalori miktarı, elektrik miktarı, ve kimyasal ve fiziksel büyüklükler.

Tablo 1. Önemli ölçüm büyüklüklerinin sınıflandırmasının genel bir listesi.

Tür		Ölçme Miktarı
Mekanik nicelikler	Geometrik nicelikler	Yer değiştirme, açı, seviye, eğim
	Kinematik nicelikler	Hız, ivme, salınım, akış
	Gerilme nicelikleri	Kuvvet, basınç, tork
	Malzeme özellikleri	Kütle, yoğunluk, viskozite
	Akustik nicelikler	Ses hızı, ses basıncı, ses frekansı
Termal nicelikler	Sıcaklık	Temas sıcaklığı, radyasyon sıcaklığı
Elektriksel nicelikler	Elektriksel durum değişkeni	Gerilim, akım, elektriksel güç
	Elektriksel parametre	Direnç, empedans, kapasite, indüktans
	Alan değişkeni	Manyetik alan, elektriksel alan
Kimyasal ve fiziksel nicelikler	Konsantrasyon	Ph-değeri, nem, ısı iletimi
	Partikül büyüklüğü	Asılı madde miktarı, toz miktarı
	Molekül tipi	Gaz molekülleri, sıvı molekülleri, katı cisim molekülleri
	Optik nicelikler	Şiddet, dalga boyu, renk

Aşağıdaki bölümler, farklı sinyal türlerinin yanı sıra sensörlerin özellikleri ile ilgilenecektir. Ayrıca, elektriksel çıkış sinyali olan bazı sensörlerin prensipleri tarif edilecektir.

2.2.4. Sensör Özellikleri

Elektriksel olmayan niceliklerin elektriksel olanlara dönüşümü, başlıca ve yan etkilere ayrılabilen fiziksel ya da kimyasal etkilere bağlıdır. Başlıca etki, bir piezoelektrik basınç sensörünün elektrik gerilimi gibi istenen ölçme sinyalini oluşturmakla sorumludur. Ancak, sıcaklık değişikliklerinin etkisi gibi bozucu yan etkiler sık sık üst üste getirilir. Sensörlerin tasarım süreci bu yan etkileri (bazen “Çapraz Duyarlılık” denilen) göz önüne almayı gerektirir. Onların tesiri sadece küçük bir etkiye sahip olmalı ya da uygun ölçümlerle telafi edilmelidir.

Sensörleri değerlendirmek için en önemli ölçüt, statik davranış, dinamik davranış, kalite sınıfı ve ölçme aralığı, aşırı yük kapasitesi, çevresel etkiler ve güvenilirlik ile ilgili bileşenlerle uyumluluktur.

Bir sensörün *statik davranışı*, sensör özelliklerine göre tarif edilir. Bu, elektriksel çıkış sinyalinin değişiminin, ölçülen değişkenin değişimine oranı gibi bir sensörün duyarlılığını tanımlar. Bir sensörün diğer önemli özellikleri; doğrusallık, histeresis ve tekrarlanabilirliktir.

Dinamik davranışı bir sensör frekans tepkisi veya cut-off frekansları veya zaman sabitleri gibi basit karakteristik değerler tarafından tanımlanmıştır. Sensör dinamiği, sürece ve ölçüm görevine ayarlanmalıdır.

Kalite sınıfı bir sensörün doğruluğu hakkında temel bir ölçü verir. Bu, tam ölçüğe göre en büyük ölçüm hatasının yüzdesidir. Tüketim malları için uygulamalar, yüksek doğruluk (%2-%5 yeterli) gerektirmez. Öte yandan, endüstriyel uygulamalar, çok daha yüksek hassasiyet (%0.05-%1) gerektirirler. Kalibrasyon ve test ekipmanı gibi yüksek hassasiyetli ölçümler için ekipmanlar, çok ciddi gereklilikleri karşılamalıdır. *Ölçüm aralığı*, sensörün teknik özelliklerinin karşılandığı yerdeki aralığını açıklar.

Aşırı yük kapasitesi, bir sensörün, sensör özelliklerindeki ya da kendini hasara uğratmadaki değişiklikler olmadan işletilebildiği yerdeki aralığını belirtir. Tipik aşırı yük kapasiteleri, %200 ve %500 arasındadır.

Bir sensörün *uygunluğu* çıkış sinyali türüne bağlıdır (bir sonraki bölüme bakılabilir). Sıcaklık, ivme, korozyon, kirlenme/aşınma ve yıpranma gibi *çevresel etkiler* özellikle önemlidir.

Bir sensörün *güvenilirliği*, *ortalama hata oluşma zamanı* ($[h]$ 'de MTTF) ya da evrik değeri, *ortalama bozulma hızı* ($[h^{-1}]$ 'de) gibi karakteristik parametreler tarafından tanımlanır.

2.2.5. Sinyal Tipleri, Transdüser ve Ölçme Yükselteçleri

Sensör tarafından sağlanan sinyal tipi hem ölçüm prensibine hem de ilgili sinyal iletimine ve sinyal işleme cihazlarına bağlıdır. Sinyal tipleri aşağıdaki kategorilere bölünebilir: genlik modülasyonlu sinyaller, frekans modülasyonlu sinyaller, dijital sinyaller (Tablo 2).

Tablo 2. Ölçme sinyalleri için sinyal tiplerinin bazı özellikleri.

Özellikler	Sinyal Tipi		
	Genlik Modülasyonu	Frekans Modülasyonu	Dijital
Statik doğruluk	Büyük	Büyük	Kelime uzunluğu ile sınırlı
Dinamik davranış	Çok hızlı	Transdüser vasıtasıyla sınırlı	Örnekleme vasıtasıyla sınırlı
Gürültü hassasiyeti	Orta/büyük	Küçük	Küçük
Galvanik ayırma	Pahalı	Basit (transdüser)	Basit (optik bağlantı)
Dijital bir bilgisayara arayüz	Analog-dijital çeviriciler	Basit (frekans sayıcı)	Basit
Sayısal işlem	Çok sınırlı	Sınırlı	Eğer mikro bilgisayar ise, basit

Genlik modülasyonlu sinyaller sinyal genliği ve ölçülen miktar arasında oransal bir ilişki ile karakterize edilir. Eğer sinyal frekansı ölçülen miktarı ile oransal ise sinyale *frekans modülasyonlu sinyal* denilir. *Dijital sinyaller*, seri ya da paralel

ikili sinyalleri kullanarak ölçülen bir miktarı encode ederler. Tablo 2, bu sinyal türleri [2] bazı özelliklerini açıklar.

Transdüserler uygun başka elektrik sinyalini genlik modülasyonlu sinyale dönüştürür. Yükselteç olmadan transdüser devrelerin örnekleri, hassas dirençli gerilim akım transdüseri, gerilim bölücü ve akım bölücü, direnç-akım transdüseri, ve gerilim, akım veya direnç (direnç köprüsü) ölçümü için kompanzasyon şebekesidir.

Ölçüm amplifikatörler, düşük güç sensörü çıkış sinyallerini daha yüksek bir güç seviyesine yükseltir ya da daha güçlü standardize edilmiş sinyaller (0 ila 10 V, 0 ila 20 mA) üretir. Yüksek güç sensörü çıkış sinyalleri, transmision bağlantıları, filtreler ve ekranlar gibi ölçme zincirinin ilgili bileşenleri için gereklidir. Ölçüm amplifikatörleri sıklıkla analog entegre devrelerin formunda transistörler ve dirençlerden yapılmış işlemsel amplifikatörlerden oluşur. İşlemsel yükselteçler, sıcaklığa bağımlılığı ve yaşlanma nedeniyle önemli ölçüde değişebilen yüksek kazanç değerlerine sahiptir. İlave devre sistemi olmadan, işlemsel yükselteçler komparatör veya kompensatör devreleri için sadece sıfır kazanç değeri olarak kullanılabilir. Negatif bir geri besleme ekleyerek, tüm devrenin kazanç değeri, işlemsel yükselteçlerin yüksek ileri besleme kazanç değerlerinin negatif geri beslemenin dirençlerine temel olarak bağlıdır. Negatif geri beslemeli ölçüm amplifikatörleri dört temel tipe ayrılırlar: gerilim amplifikatörleri, çıkış akımı ile gerilim amplifikatörleri, akım amplifikatörleri, çıkış gerilimi ile akım amplifikatörleri.

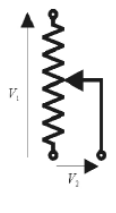
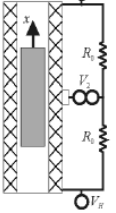
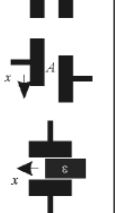
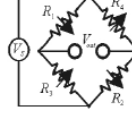

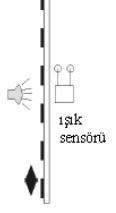
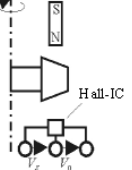
Aşağıdaki bölümler, bazı önemli sensör ilkelerinin kısa bir açıklamasını vermektedir. Daha ayrıntılı açıklamalar için kaynakçada verilen referanslara bakılabilir.

2.2.6. Yer Değişimi Ölçümü

Rezistif Algılama Elemanları

Rezistif algılama elemanları, bir telin uzunluğu veya film direnci ve onun elektriksel direnci arasındaki oransal ilişkiden yararlanır (Tablo 3). Onlar, elektriksel olarak iletken plastik veya metal telden yapılan potansiyometrelerdir. Potansiyometreler gerilim bölücüler olarak kablolanır ve multipleks potansiyometreler (örneğin, 10 devir) olarak ikinci bir formunda, doğrusal veya dönel algılama elemanları olarak sunulmaktadır. Doğrusal algılama elemanlarının ölçüm aralığı, birkaç milimetreden başlar ve yaklaşık iki metreye kadar çıkar. Sensör elemanlarının koruması, zor şartlarda sensörün yerleştirilmesine olanak sağlar. Güvenli raylar, yanal kuvvetlerin serbest olarak fırça hareketini sağlarlar. Elektriksel olarak iletken plastikten yapılmış algılama elemanları; 0.01 mm çözünürlük ile 100 mm ölçümü gibi çok yüksek bir çözünürlüğe sahiptir. Ancak, yüksek bir doğruluk, çok hassas bir gerilim kaynağı gerektirir.

Tablo 3. Yer Değişim sensörleri (doğrusal).

	dirençsel sensörler	indüktif sensörler	kapasitif sensörler	gerinim ölçer	kod sensörleri	artırılmış sensörler	Hall sensörü
sensor prensibi (örnek)							
malzeme	metal, yarı iletkenler, iletken plastikler	ferromanyetik metal	kondansatör	metal, yarı-iletken	optik enkoderler	cam, metaller	Hall yarı-iletken
çıkış sinyali	analog gerilim	analog gerilim	analog gerilim	analog gerilim	binari sinyal	binari sinyal	binari sinyal
ölçüm aralığı	1cm...2m 300° (açısal yerdeğiştirme)	+100µm...+50cm	0.1cm...10cm			10mm...3m	360°
maksimum duyarlılık	0.2V/° or 2V/cm	0.1V/cm ...40mV/µm		$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l} = 2$ (metal) $k = 100$ (yarı-iletken)	4096 puls / dev		4000 devirdeki puls sayısı
doğruluk, çözünürlük	maksimum 40 µm or 0.1°	0.1 µm	<0.1 nm		1 LSB	0.1 µm 0.00005°	10 ⁻⁵ revs
sıcaklık aralığı	-50°C...+250°C	-40°C...+100°C	800°C'ye kadar	-270°C...+1000°C	-50°C...+100°C	0°C...+50°C	-200°C...150°C

Endüktif Algılama Elemanları

Endüktif algılama elemanları, kendi değişimlerine ve elementin konumundaki ortak indüktansa bağlıdır. Bobin dizilişlerinin indüktansı, hava boşluğundaki değişikliklerle değişir. Diferansiyel bobinlerden oluşan örgü ağı neredeyse lineer bir karakteristik ortaya koyar.

Ayrımsal trafolar, birincil ve ikincil bobin arasındaki ve demir çekirdeğin yer değişimi arasındaki ilişkiden yararlanır. Birincil bobin, taşıyıcı frekansına bağlıdır. İkincil bobinin voltajındaki değişimler, çıkış sinyaline bağlı yer değişimi olarak davranış gösterir. Endüktif sensörler temassız algılama elemanlarıdır. Bunların ölçüm aralığı birkaç milimetreden başlar ve yaklaşık bir metreye kadar çıkar. Diğer tasarımlar, yer değişimi açısı algılama elemanlarıdır.

Kapasitif Algılama Elemanları

Tabaka mesafesi, tabaka alanı veya tabakalar arasındaki dielektrik malzemesindeki değişiklik, kapasitörün kapasitansını etkilemektedir. Sinyal işleme devreleri AC örgü açısından (kapasitif köprüler) meydana gelmektedir. Küçük kapasitanslardan dolayı, yüksek taşıyıcı frekansıyla (0,5 ile 1 MHz) işletilmektedir.

Gerinim Ölçerler

Gerinim ölçerler, küçük lineer deformasyonları elektrik sinyallerine dönüştürmektedir. Bunlar, elektrik direncinin değişimiyle sonuçlanan, elektriksel

iletkenin uzunluğunda değişikliğe neden olan etkisini temel alır. Eğer L kablo uzunluğu, ΔL kadar uzarsa, belirli elektriksel dirençteki değişikliklere bağlı olarak kablonun elektriksel direnci, uzunluğu ve kesit alanı değişir (yapısal deformasyondan dolayı).

Metal kablo ve film gerinim ölçerler ince konstantan tel veya filmlerden oluşmaktadır. Uzunluk ve kesit alanındaki değişiklikler; elektriksel dirençte değişikliklere yol açarken, özgül elektriksel direnç etkilenmez. *Yarıiletken* gerinim ölçerlerin temel etkisi, belirli bir direncin yapısal uzamadan kaynaklanan yapısal değişimidir. Yarıiletken gerinim ölçerler uzamaya karşı çok daha hassastır (konstantan olanlara kıyasla yaklaşık 40 ile 80 kat daha hassastır). Fakat büyük miktarda uzamalarda lineer olmayan karakteristiklere sahiptir ve metal gerinim ölçerlere göre çok daha fazla pahalıdır. İnce filmler arasına gömülen gerinim ölçerler doğrudan, gerinimi ölçülmek istenen nesne üzerine yapıştırılır. Bu nesnelere, doğrudan uzaması ölçülmesi istenen yapı elemanıdır. Özel yay elemanları ve diyaframlarla birlikte gerinim ölçerler; güç, tork ve basınç sensörleri olarak hizmet eder. Elektriksel direncin değişimi, örgü şebekesi olarak değerlendirilir (köprü devreleri). Çoğunlukla sıcaklık telafi edilir.

Kodlayıcılar (Enkoderler)

Kodlayıcılar, üzerinde kesikli yer değişiminin kodlandığı kod düzenleyiciler veya kod diskleridir. Atama mutlakdır çünkü bunlar dış referansa ihtiyaç duymazlar.

Örneğin Gri kod gibi birim mesafe kodları; çoğunlukla kodlama için kullanılmaktadır. Örnekleme optik olarak gerçekleştirilmektedir. $2n$ farklı kesikli konumları ayırtmak için, n örnekleme izlerine ihtiyaç duyulur. Bu durum bu tür algılama elementini nispeten karmaşık hale getirmektedir. Temel olarak kodlanmış algılama elemanları; nümerik kontrollü makine ekipmanları ve robotlar gibi endüstriyel metrolojide kullanılmaktadır.

Artımsal Algılama Elemanları

Artımsal konum ve açı sensörleri, genel ifadeyle çentik veya yarıkların başlangıç noktasına göre sayısını saymaktadır, örneğin *artımlar*. Örnekleme, sayılmakta olan atım dizisi ile sonuçlanan ya optik (örneğin diyotlar) ya da endüktif yöntemlerle gerçekleştirilmektedir.

Başlangıç noktası gelişigüzel seçilebilir. Eğer bir başarısızlık (örneğin güç kaybı) ortaya çıkarsa, başlangıç noktası kaybedilir ve bu yüzden referans konumuna kaydırılarak yeniden belirlenir. Artımların sayımı sırasında oluşacak bir hata tüm diğer okumaları etkileyecektir. Her bir ölçüt başına iki örnekleme ilave devre, hareket doğrultusunun ve atım çarpımının tespitini mümkün kılacaktır.

Sensör mahfazası çoğunlukla bir atım şekillendirici devresi içermektedir. Artımsal sensörler temel olarak endüstriyel metrolojide kullanılmaktadır, örneğin imalat. 3 m'ye kadar lineer ölçüler ve 1 μm 'lik derecelendirmeler mümkündür.

36.000 dereceye kadar atlayış kodlayıcılar hassas uygulamalar için kullanılmaktadır. Atım çarpımı kullanımında (interpolasyon) 0.00005° elde etmek mümkündür.

Manyetik Etkili Sensörler

Eğer bir voltaj, manyetik alana dik şekilde konumlanmış bir iletkene veya yarıiletkene uygulandığında (mevcut akışa dik açılı), Hall voltajı meydana getirilir. Bu da hem mevcut akışa hem de manyetik alana diktir. Hall voltajının manyetizasyona bağlılığı, günümüzde yaklaşık olma veya konum ölçümü için kullanılmaktadır. Eğer yarıiletken hala silikon ise, Hall tabakası voltajı yükseltilmelidir. Entegre edilmiş Hall IC'leri, güçlendirme, stabilize etme ve sıcaklık kompanzasyonunu bir araya getirmek için mevcuttur. Dönüşsel konum sensörü; sabit bir mıknatısla birlikte mıknatıs ve Hall IC (örn. Bipolar teknolojisi) arasında hareket eden bir yumuşak manyetik diş tekerleğinden oluşur. Böylece, manyetik alanın kesintiye uğramasıyla, bir atım dizisi oluşturulur ve bunun frekansı dönme hızıyla orantısaldır. Hall IC, besleme voltajına ihtiyaç duyar (örneğin 12 V). Bu tür sensörler, örneğin fırçasız DC motorlarının rotor konum algılaması ve SI motorlarının ateşleme tetik mekanizması gibi yerlerde kullanılır [4].

Diğer Ölçme Yöntemleri

Ultrasonik Mesafe Sensörleri seviye ölçümü (yığın malzemeler, akışkanlar) veya mesafe ölçerler (otomobillerdeki park asistanları) olarak kullanılır. Bunlar, ultrasonik sinyallerin eko dönüşleri ve geçişleri arasındaki zaman aralığına dayanmaktadır.

Lazer interferometreleri, uyumlu ışık mukayese fazını temel alır ve temassız hassas yer değişimi ölçümü için kullanılır.

Tüm bu yukarıda bahsedilen ölçüm sistemleri aynı zamanda güç ve basınç ölçümü için de kullanılabilir. Bunlar yayların veya membranların yer değiştirmelerini tespit eder ve bunu bir elektriksel sinyale dönüştürür.

2.2.7 Hız Ölçümü

Hız ölçümünün muhtemel yollarından biri, bunu yer değişimi sinyaline dönüştürmektir. Fakat açısal sensörler, kullanılabilir sinyale oranla gürültü veya parazitleri yükseltme dezavantajlarına sahiptir. Bundan dolayı, hız ölçümünde doğrudan ölçme yöntemleri daha uygundur. Açısal hız sensörleri özellikle pratik üstünlüğe sahiptir. Çevresel hızlar çoğunlukla, ölçüm amacıyla dönme hızlarına dönüştürülür (örn, bir hız ölçer).

Aktif Elektrodinamik Algılama Elemanları

Aktif elektrodinamik algılama elemanları, jeneratörler gibi çalışırlar. Eğer N elektriksel iletken bir manyetik akış Φ alanı içerisinden hareket ederse, indüksiyon kanununa göre bu hareket iletkenlerde bir voltaj oluşturur:

$$V = -\frac{N d\Phi}{dt}$$

Bu ikiye ayrılır:

(1) *Translasyon (çevresel hareket) ölçen sensörler*: Sabit bir mıknatıs bir bobinin içinden hareket eder ve hızla orantısal şekilde voltaja sebebiyet verir.

(2) *Rotasyon (dönüş) ölçen sensörler*: AC jeneratörler, sabit manyetik rotor ve bir statör sargısı kullanır. Dönme hızı ölçmek için, hem çıkış sinyalinin frekansı hem de voltajı kullanılır. Sonuçta Lineer voltaj karakteristikleri elde edilir. DC tako jeneratörleri; bir komitatör ve hareketsiz bir mıknatısla oluşturulan sabit manyetik alanda dönen bir bobinden oluşmaktadır. Üretilen voltajlar dönü hızıyla belli bir orana sahiptir. Voltajın polaritesi döngü algısına bağlıdır. Bu tür algılama elementi lineer özelliklere sahiptir ama komütasyona bağlı olarak dalgalı sinyal özelliği bulunur.

Artımsal Endüktif Sensörler

Bu algılama elemanları, artımsal yer değişimi sensörlerine benzerler. Dikdörtgensel dişlere sahip bir ferro manyetik halka parçası endüktif sensörden geçer. Bu sensör, yumuşak manyetik kutup pine ve bir indüksiyon bobininden oluşmaktadır. Bobindeki voltaj, manyetik akıdaki periyodik değişkenlikle orantısaldır. Bu yüzden çıktısı sinyali bir nabız dizisidir ve bunun frekansı dönme hızıyla ilişkilidir. Bir frekans voltaj dönüştürücüsü, nabız frekansını voltaja dönüştürür. Kesikli değerlendirme, belirli bir zaman aralığındaki nabız sayısını sayarak veya iki nabız arasındaki zaman ölçülerek gerçekleştirilir. Döngü başına nabız sayısı, belirli bir uygulamaya ve 1 ile birkaç 1000'lik nabız aralığına bağlıdır. Örneğin bu sensör, motor krank şaftları ve ABS (antilock braking system) tekerlek fonksiyonları için kullanılır. Elektriksel bir güç beslemesine ihtiyaç duymaz.

Diğer Yöntemler

Çevresel hızı ölçmenin diğer bir yöntemi, *Doppler etkisi*'nden faydalanır. Hareket eden nesneden, gönderilen ve yansıtılan sinyaller arasındaki hızla bağlantılı frekans atlaması ortaya çıkar. Bu tür sensörler için iyi bilinen örnekler Doppler radarı (trafik radarı, tarım makineleri için hız ölçümü) ve yüksek hassasiyet ve temassız ölçüm için lazer Doppleridir (yüksek maliyetli).

Ancak diğer bir yöntem, iki stokastik ve periyodik sinyal arasındaki *çapraz korelasyondan* faydalanmaktadır. Birbiriyle aynı iki algılama elemanı l mesafesinde yerleştirilir; gönderilen ve alınan sinyaller arasındaki τ gecikme zamanının ölçümü, hızın $v = l/\tau$ tespitini mümkün kılar. Kaba yüzeyler ve akışkanlar için kullanılan optik sensörlerde bu yöntemden faydalanılır.

2.2.8 İvme Ölçümü

İvme ölçümü çoğunlukla, m kütlelerinin a hızlanması ve $F: a = F/m$ eylemsizlik gücü arasındaki ilişkiyi kullanan güç ölçümünü temel almaktadır.

Doğrudan F güç ölçümü için, *piezoelektrik güç sensörleri* kullanılabilir. Büyük yay sertliğine ve bu transdüserlerin küçük kütlelerine bağlı olarak, yüksek doğal frekanslara ulaşmak mümkündür (100 kHz).

Yay kütle sistemleri, yay ve damperlere sahip gövdeli sensöre bağlı sismik kütleden oluşmaktadır. İvme, yayın yer değişiminin ölçülmesiyle belirlenir (örneğin endüktif şekilde). Çok çeşitli ivme sensörleri bulunmaktadır. Bunlar, atalet seyir sistemlerinde 10^{-6} g'lik ivme ölçümünü veya patlamalarda 10^5 g'ye kadar ivme ölçümünü gerçekleştirebilmektedir. Kütleler, yaylar ve damperler yüksek doğal frekanslara (15 Hz'den 100 kHz üzerine) ulaşabilecek şekilde seçilir. Faydalanılabilen ölçüm frekansı, doğal frekansın yaklaşık yarısına kadar ulaşabilir. Açısal ivme sensörleri benzer düzenlemeler kullanmaktadır.

İvme aynı zamanda, hız sensörü sinyali ayrıştırıldıktan sonra veya yer değişimi sensörü sinyali iki defa ayrıştırılarak belirlenebilir. Fakat bu yüksek frekans parazitinde artışa sebep olur ve düşük geçişli filtrelemeyi kaçınılmaz hale getirir.

2.2.9 Vibrasyon ve Osilasyon Ölçümü

Göreceli titreşimlerin ölçümü, iki referans noktası arasındaki yer değişimini temel alır ve yer değişimi sensörlerince ölçülür. *Mutlak titreşimleri* ölçmek için, kaybolan ikinci referans noktasının sismik kütle üzerine yeniden yerleştirilmesi gerekmektedir.

Osilasyon büyüklüğü ölçümü, büyük sismik kütle ve süspansiyonun küçük yay sabitine (küçük doğal frekans) ihtiyaç duyar. Bu durum da hareketsiz sismik kütle ve osilatör sensör yuvasına neden olur. Bir yer değişimi sensörü (örneğin endüktif sensör), sismik kütle ve sensör yuvası arasındaki yer değişimini ölçer. Aynısı, vibrasyon hızını ölçen elektrodinamik hız sensörleri için de geçerlidir. Titreşim ivmesi, yüksek doğal frekanslar için kalibre edilen ivme sensörleriyle ölçülür.

2.2.10 Güç ve Basınç Ölçümü

Basınç ve güç ölçümü, yay veya diyafram defleksiyonunun 2.2.6'da tanımlandığı gibi yer değişimi sensörleriyle (*yük hücreleri* olarak adlandırılan özellikle gerinim ölçerler ve endüktif algılama elemanları) ölçülmesiyle dolaylı olarak gerçekleştirilir. Piezoalgılama elemanları, basınç ve güç ölçümünde özel yere sahiptir.

Piezoelektrik algılama elemanları, piezoelektrik etkisinden yararlanır: Bir yer değişimi, kristal kafes yüzeyinde bir elektriksel yükü sonuçlanır. Artan yer değişimi oldukça küçüktür (birkaç μm). Elektriksel yük, yapay kapasitansı (algılama elementi, kablo ve yükseltici girişinden oluşan) yükler. Ortaya çıkan voltaj V , $T = RL$ sabitiyle

sönümlenir. Bu yüzden piezoelektrik algılama elemanları sadece dinamik ölçüm için uygundur. Buradan kaynaklanan ölçüm yükselticisi büyük zaman sabitine sahip olabilmek için çok yüksek giriş direncine sahip olmalıdır ($R > 10^{13} \Omega$). Yük yükselticileri, birkaç saatlik zaman sabitine sahip olanlarla kullanılır. En yüksek ölçüm frekansı yaklaşık 100 kHz'dir.

Piezodirençli algılama elemanları, piezodirenç etkisinden yararlanır. Mekanik güçlere maruz bırakılan bir kristal, kendi elektriksel direncini kristal kafes yapısındaki yer değişimine bağlı olarak değiştirir. Bu da statik ölçümleri mümkün kılar.

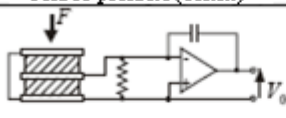
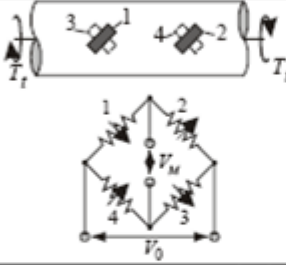
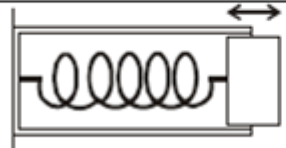
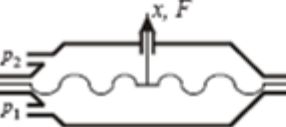
2.2.11 Tork Ölçümü

Tork; açısal, yer değişimi veya uzama sensörleriyle mil burulmasının ölçülmesiyle ortaya konur. Bu amaçla, özel *torkmetreler* flanşlar kullanılarak veya yataklar kullanılmadan şaftlara bağlanarak kullanılır. Diğer bir olasılık, tork ölçümünde yüke göre mil burulmasını temel almaktır. Sinyal gönderimi, şaftın dönüp dönmediğine bağlıdır. Eğer mil dönüyorsa, dönen sensörler sinyallerini sabit elektronik sinyal işleme birimine konektör halkasıyla veya doğrudan bir elektriksel bağlantı olmadan örneğin endüktif bağlantıyla gönderir.

Mil burulma ölçümleri, şu iki yöntemle gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilk yöntem, şaft üzerine boylamasına eksenine göre 45° eğimle yerleştirilen, Wheatstone ağına (Tablo 4'e bakılabilir) bağlı, tel gerinim ölçer kullanır. İkinci yöntem, bobinlerde üretilen voltajı ölçerek geçirgenlikteki değişimi ölçer. Her iki ölçüm prensibi doğrudan mile veya özel torkmetrelerle bağlantılı olarak uygulanabilir. Birçok durumda kolaylıkla bağlanabilen, çok yer kaplamayan ancak çok fazla elastikiyet tanımayan *torkmetre* başlarına ihtiyaç duyulur. Örneğin sensörün flanş vasıtasıyla mile bağlanması veya sensörün kasa içine yerleştirilmesi gibi ilave şartlar bulunmaktadır.

Kinematik geçişe bağlı olarak, iki burulmuş diskin arasındaki dönme açısı veya disklerin eksensel yer değişimi endüktif olarak ölçülebilir. Diğer bir ölçüm prensibi, elektriksel olarak iletken ve iletken olmayan bölgeler içeren disk veya bilezik parçaları kullanır. Milin burulması bölgelerin birbirine karşı değişimine neden olur ve bu da şamandıra akımının değişimiyle sonuçlanır. Bu durum, sabit ölçme bobininin impedansında değişkenlik meydana getirir. Tork ölçümüyle ilgili ilave yöntemlere, kuvvet akışına yerleştirilen yüzey rezonatörü ve piezoelektrik sensörleri kullanımı örnek verilebilir.

Tablo 4. Kuvvet, tork ve basınç sensörleri.

	Sensör prensibi (örnek)	Malzeme	Çıkış sinyali	Ölçme Aralığı	Hassasiyet	Sıcaklık
Piezoelektrik kuvvet sensörü		Piezo-elektrik malzeme	Analog gerilim	1 N- 1 mN	125 v/kN	-80°C - +150°C
Gerinim ölçer kullanarak tork ölçümü		Yüzey üzerinde gerinim ölçer	Analog gerilim	0.05 Nm - 50 kNm		+10°C - +60°C
Kuvvet yayı defleksiyon sensörü		Bir muhafaza içinde yay	Analog yerdeğiştirme			-40°C - +60°C
Basınç diyafram sensörü		Esnek diyafram	Analog yerdeğiştirme	0.1 bar - 10000 bar		-25°C - +100°C

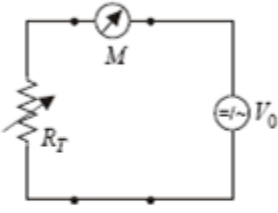
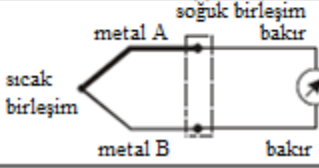
2.2.12 Sıcaklık Ölçümü

Direnç Termometreleri

Pasif direnç termometreleri, elektriksel dirençlerin sıcaklık değişimine karşı hassasiyetlerinden faydalanır (Tablo 5'e bakılabilir). Metal direnç termometreleri; ince mika veya lamine kağıt çubuklar veya gömülü cam çevresine spiral formda sarılı nikel veya platin tel bobininden oluşur. Platin (Pt100) için direncin sıcaklıkla değişim hassasiyeti 0,358 Ω/K ; ve nikel (Ni100) için 0,612 Ω/K 'dir. Her bir kutudaki nominal direnç 100 Ω 'dur ve en yüksek ölçülen sıcaklık Ni için 250°C; Pt için 850°C'dir.

Bir termistör, direnç termometresidir ve metal oksit yarıiletken materyalden oluşur. Bu madde, metal direnç termometrelerine göre yaklaşık olarak 10 kat daha hassas; güçlü derecede lineer olmayan özelliğe ve daha az doğruluğa sahiptir. Ticari boyutları çok küçüktür (<0,5 mm) ve bu sayede çok küçük ısı kapasitesi vardır. Bu durum termistörleri yüzey sıcaklıkları ve dinamik süreçlerin ölçümünde uygun konuma getirmektedir.

Tablo 5. Sıcaklık Sensörleri.

Sensör Prensipleri	Malzeme	Ölçüm Aralığı	Çıkış Sinyali	Hassa- Doğruluk, siyet Çözünürlük		
Direnç Termometreler 	Metal	Pt	-200°C	Analog gerilim <5mV/K		
		Direnç	Ni		+1000°C	
	Yarı İletken	NTC	-250°C		Ölçülen sıcaklığın %0.3	
			+1000°C			%0.25
		Direnç	PTC		-40°C	
						+850°C
Isıl Çiftler 	Fe-Cu	-180°C	Analog gerilim 53µV/K	Ölçülen sıcaklığın %0.25		
		+760°C				%0.75

Eğer bir yarıiletken negatif sıcaklık katsayısına (NTC, Negative Temperature Coefficient) sahipse (sıcaklık yükselirse elektriksel iletkenlik artar), bu *NTC termistörü* olarak adlandırılırken; pozitif sıcaklık katsayılı (PTC, Positive Temperature Coefficient) bir yarıiletken ise (sıcaklık artarsa elektriksel iletkenlik azalır) *PTC termistörü* olarak adlandırılır. Bu metalik dirençler ince veya kalın film sensörleri olarak üretilebilir ve sonra hassas üretim için nötr kesim dirençli tek bir madde gofreti üzerinde bir araya getirilebilirler [4]. En yüksek sıcaklık aralığı, *NTC* termistörleri için 100°C ile 1000°C; *PTC* termistörleri için -10°C ile 500°C'dir.

Isıl Çiftler (Termokupl)

Farklı malzemelerden yapılmış ve birbiriyle teması önlenmiş iki telin uçlarından bağlanmasıyla elde edilen düzenek ısıl çift olarak bilinir [1]. Isıl çiftler, aktif sıcaklık sensörleridir. İki metalin birleşim yerlerini ısıya maruz bırakmak, bir EMK (elektromotor kuvvet) doğurur ve bu bileşim yerindeki sıcaklığa bağlıdır. Bu, Seebeck etkisi olarak adlandırılır. İki benzersiz metalin bileşim yeri, ikinci referans bileşim yerine kıyasla ısıtıldığında veya soğutulduğunda, ortaya çıkan genel voltaj, iki bileşim yerinin sıcaklığının bir fonksiyonudur. Isıl çiftin performansı genellikle 0°C (buzlu su) referans alınarak belirtilir. Birçok pratik uygulamada referans bileşim yeri, sıfır olmayan referans sıcaklığa sahip kontrollü bir ortama yerleştirilir.

Sıcaklık voltaj karakteristiği doğrusal değildir. Ama geniş aralıkta uygulamalar için doğrusallaştırma mümkündür. Isıl çiftlerin avantajı, küçük boyutlara sahip olmalarıdır. Bu da küçük ölçüm noktalarına neden olur. Bunların güç kaynağına ihtiyacı yoktur. Fakat bunların hassasiyetleri ve çıkış sinyal seviyeleri düşüktür.

Isıl çiftler 0,25 mm ve 3 mm ölçülerinde koruyucu tüpler içerisinde kapatılmış olarak bulunur ve 220°C ile 2400°C aralığında ölçüm kabiliyetine sahiptir. Bu tür

sensörlerin küçük ısı kapasitelerine bağlı olarak, hızlı sıcaklık değişimlerini ölçmek bile mümkündür.

2.2.13 Debi Ölçümü

Bir A alanından ortalama v hızıyla Δt zaman aralığında geçen Δq akışkan miktarı (sıvı gaz) \dot{q} akışı oranını verir ve aşağıdaki eşitlikle tanımlanır:

$$\dot{q} = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Eğer hacimsel miktar dikkate alınırsa, *hacimsel debi* şu şekilde elde edilebilir:

$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = A v \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Eğer kütleli miktar dikkate alınırsa, *kütle debi* şöyledir:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \dot{V} \rho \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Eşitlikte ρ [kg/m^3] akışkanın yoğunluğudur.

Böylece hacimsel debi ölçümü ve kütle debi ölçümü birbirinden ayrılır. İlk durumda hacim; sıvı parçaları şeklinde veya akış hızı olarak ölçülür. İkinci durumda ise sıvı parçalarının kütlesi şeklinde ölçülür. Ancak ρ yoğunluğu biliniyorsa, her iki debi ölçütü birbirinden hesaplanabilir. Çok çeşitli debi ölçümü türleri bulunmaktadır, örneğin [7,9,10,16,17] kaynaklarına bakılabilir. Sıklıkla kullanılan debimetrelerin ölçüm prensipleri, aşağıda özet olarak verilmiştir. Bu açıklamalar sadece tek fazlı gaz ve sıvı akışlarını dikkate almaktadır. Bu bölümde tartışılan debimetrelerin bir özeti Tablo 6'da verilmektedir.

Pozitif Yer Değişimli Debimetreler

Pozitif yer değişimli debimetreler; belli hacime sahip olan bir odacığa, sıvının bir kısmını hapsederek anlık olarak debiyi ölçer. İçeri giriş kısmından çıkış kısmına doğru olan yer değişiminden dolayı toplam hacim, odacıklar sayılarak ölçülmekte ve belli bir zaman aralığına göre odacıkların toplam hacmini dikkate alarak volümetrik debi ölçülmektedir. Sıvılar için kullanılan en yaygın pozitif yer değişimli debimetre çeşitleri; pistonlu, kayar vanalı, ikili (veya üçlü) rotorlu ve diskli debimetrelerdir. Gazlar için ise; körüklü, diyaframlı veya roots tipi debimetreler kullanılmaktadır.

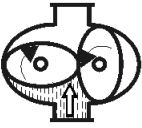
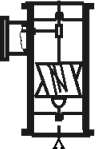
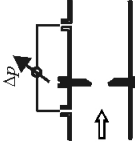
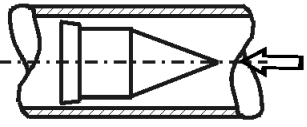
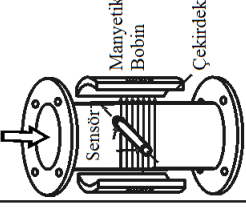
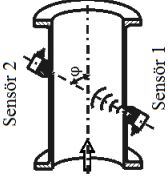

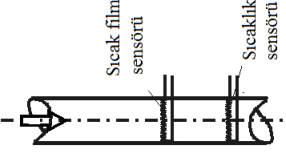
Tablo 6, oval dişli debimetreyi (piston türü) göstermektedir. Pozitif yer değişimli debimetreler; yüksek doğruluğa, geniş ölçüm aralığına sahiptir. Bunlar geniş viskozite ve yoğunluk aralığında sıvılar için kullanılırlar; akış hızı profilindeki değişimlere hassas değildirler. Fakat hareketli parçalara sahip olduklarından dolayı katı partiküllere karşı hassastırlar ve bakım gerektirirler.

Türbin Debimetreleri

Türbin debimetreleri, bölüm içerisinde akış oranına göre dönen çok kanatlı rotora sahiptir. Örneğin rotorun hızı, rotor üzerindeki sabit bir mıknatıs veya akışın

dışına yerleştirilmiş kutu içerisinde bulunan bobin tarafından indüklenen alternatif akımın frekansıyla ölçülür. Bu debimetreler ortalama hızı ölçer ve boru çapı bilindiğinden, hacimsel debi belirlenebilir. Türbin debimetreler yüksek doğruluğa sahiptir; sıvı ve gazlar için kullanılabilir, geniş aralığa sahiptir ama hareketli parçalardan aşınma meydana gelir, bakım ve kalibrasyon gerektirir. Aynı ölçüm prensibini kullanan diğer tipler radyal akışlı çarkları, tekli ve çoklu jet pervaneleri, pelton tekerlekleri veya paletli çarkları kullanmaktadır.

Tablo 6. Sıvılar için debi sensörleri

sınıflandırma	hacimsel debimetre						kütle debimetre	
	pozitif yer değişimli debimetre	türbin debimetreleri	diferansiyel basınç	değişken alan	elektromanyetik	ultrasonik	Coriolis	sıcak film
örnek								
sıvılar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
gazlar		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
bileşenler	dönen bileşenler	çok kanatlı rotor	orifis Venturi borusu meme	konik boru ve şamandıra	AC & DC		platinyum sıcak film	
çıkış sinyali	gerilim nabızları	gerilim frekansı	diferansiyel basınç	şamandıra pozisyonu	indüklenen bobin gerilimi	seyahat zamanı Doppler frekansı	köprü gerilimi	
ölçüm aralığı	1 : 20	1 : 10 1 : 1000	1 : 3	1 : 10	1 : 10 (1 : 30) 0.3 ... 10 m/s	1 : 20 1 : 100	1 : 50 1 : 100	
% doğruluk	% ± 0.5 ... ± 1	% ± 0.1 ... ± 1	% ± 1 ... ± 2	% ± 2 ... ± 4	% ± 0.25 ... ± 5	% ± 2 ... ± 5	% ± 2	
max. sıcaklık ve basınç								
açıklamalar	yüksek doğruluk geniş aralık bakım	yüksek doğruluk geniş aralık bakım	basınç düşüştü sınırlı aralık bakım	doğrudan okunabilir gürbüz laboratuvarlar	iletken sıvılar gürbüz sınırlı aralık	gürbüz geniş aralık pahalı Doppler	geniş aralık yüksek doğruluk pahalı küçük boyut	

Diferansiyel Basınç

Diferansiyel basınç debimetreler belli bir kısıt kapsamında basınç düşüşünü ölçmektedir. Bu kısıtlama bir orifis (delikli plaka), bir meme veya bir Venturi borusu olabilir. Ölçüm prensibi, v_1 ve v_2 hızlarında, konik bir borunun A_1 ve A_2 şeklinde iki farklı kesitteki p_1 ve p_2 basınçla ilgili sabit akış için bir sürtünme olmaksızın Bernoulli denklemini temel almaktadır:

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + p_1 = \rho \frac{v_2^2}{2} + p_2$$

Kütlenin korunumu kanunu dikkate alarak:

$$v_1 A_1 \rho = v_2 A_2 \rho$$

ifadesi yazılabilir. Her iki eşitlik birleştirildiğinde ise:

$$\dot{V} = v_1 A_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$

sonucuna varılır.

Sürtünmeye sahip ideal olmayan akışkanlar; türbülent akış, sıkıştırabilirlik ve orifis deliği çıkışındaki zıt yönlü akışlar yüzünden bazı düzeltme faktörlerine ihtiyaç duyulur. Sonuç olarak, orifisle debi ölçümünde alttaki eşitlik kullanılabilir:

$$\dot{V} = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$
$$\alpha = \frac{C \varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Burada C boşaltım katsayısı, ε genleşme faktörü ve β orifis deliğinin d çapının ve akışkanın aktığı borunun D çapına oranıdır ($\beta = d/D$). C ve ε uluslararası tablolarda belgeleştirilerek 5167-1 (EU) veya API 2530 (US) gibi standart hale getirilmiştir. Orifiste iyi seviyede gelişmiş türbülent akış sağlanması için montaj şartlarının takip edilmesi gerekir.

Basınç farklılığı ($\Delta p = p_1 - p_2$), orifisten önce ve sonra akışkan basınçlarının ölçülmesiyle bulunur. Venturi kullanıldığında ise bu fark, venturi öncesinde ve venturinin girişinde veya en dar bölümündeki basınçların ölçülmesiyle bulunur. Diferansiyel basınç sensörleri, $\pm\%2$ hassasiyetin yeterli olduğu endüstriyel tesislerde geniş kapsamlı olarak kullanılır. Fakat, bunlarda kir ve orifisteki aşınmadan dolayı bakıma ihtiyaç duyulur. Debinin Δp ile orantısal olmasından dolayı, ölçüm aralığı sınırlı kalmaktadır. Bu iki değer arasındaki oran yaklaşık 1:3 olmaktadır.

Değişken Alanlı Debimetreler

Değişken debimetreler, konik bir tüp ve bir şamandıradan (veya bir çekül) meydana gelmekte ve bunlar yukarı veya aşağı hareket ederek akışkan alanını

değiştirir. Diferansiyel basınç yaklaşık olarak sabittir. En bilinen türü konik borudur ve şamandıra debimetre aynı zamanda *rotametre* olarak bilinir.

Şamandıranın konumu akış oranının bir fonksiyonudur. Eğer boru cam veya şeffaf plastikse, şamandıranın konumu görünür ve ilave güç beslemesi olmadan kalibre edilen ölçek doğrudan akışı göstermektedir.

Daha yüksek basınç ve sıcaklıklar için boru paslanmaz çelikten yapılmaktadır. Şamandıra ve dış işaretleyici arasındaki manyetik eşleşme konumu gösterebilir. Değişken debimetre özellikle laboratuvar uygulamaları için caziptir ve sıklıkla endüstride elektrik sınır anahtarlarıyla birlikte kullanılır.

Elektromanyetik Debimetreler

Elektromanyetik debimetreler altında yatan prensip Faraday'ın elektromanyetik endüksiyon kanunudur. Eğer bir iletken sıvı manyetik alana dik olarak hareket ederse, hızla orantılı olarak iletim boyunca bir voltaj doğar. Voltaj, boru duvarındaki elektrotlar kullanılarak ölçülür. Elektrotlar çoğunlukla metal boru duvarından iletken olmayan ara materyalle izole edilmişlerdir. Borunun dışındaki bobinler sıvı kapsamında AC veya nabızlı DC eksitasyon voltajlarıyla bir manyetik alan oluşturur.

Bu debimetrenin boru içerisinde akışa engel hareketli veya hareketsiz bir parçası yoktur. Bu sebeple, kolay monte edilebilmekte ve yüksek doğruluk hassasiyetine sahip olmaktadır. Fakat sınırlı bir ölçüm aralığına (1:10 veya daha büyük) sahiptir; ve 1 ile 5 $\mu\text{S}/\text{m}$ 'den daha yüksek iletkenliğe sahip akışkanlara ihtiyaç duyar. Gaz veya buhar için uygun değildir.

Ultrasonik Debimetreler

Ultrasonik debimetreler, akustik dalga yayılma hızının ve akışın vektörel olarak eklenebildiği gerçeğini kullanır. *Transit zaman debimetresi* durumunda, yukarı ve aşağı yönlü akışla yayılan iki ultrasonik nabız arasındaki transit zamanlar arasındaki farklılık akış boyunca ölçülür. İki transdüser, transmitter (piezoelektrik) ve alıcılar borunun her iki kısmına akışkan içinden geçen ultrasonik dalgalar için belirli bir artan açıyla monte edilir. Ultrason nabızı için, bu yukarı ve aşağı yönlü transdüserler arasındaki seyahat için zaman farklılığı (500 kHz ile 10 MHz) akışkan hızıyla orantısaldır. Seyahat zamanı farklılığı 100 ns aralığında olduğundan, dijital sinyal değerlendirmesi için yüksek çözelti sayaçlarına ihtiyaç duyulur. Sıvı ve gazlar için kullanılabilir; geniş bir ölçüm aralığına ve yüksek hassasiyete sahiptir.

Ultrasonik *Doppler debimetre*, Doppler atlama etkisini kullanmaktadır. Doppler frekansı, gönderilen ve alınan sinyaller arasındaki farklılıktır ve sıvının hızıyla orantısaldır. Ancak bu durum ultrasonik dalgaların; partikül, baloncuk veya türbülent girdapları gibi akustik kesintilerle yansıtılmasını gerektirmektedir. Bu debimetre, hız profilindeki ve kesintilerin mekansal dağılımlarındaki değişikliklere karşı hassastır. Bundan dolayı, doğruluk oranı yaklaşık $\pm\%5$ 'dir. Gazlar ve temiz sıvılar için kullanılamaz.

Coriolis Debimetre

Bu debimetre, Coriolis etkisini kullanmaktadır. Akışkan titreşen bir borudan geçmekte ve bu Coriolis gücüne sebep olmakta, bu da kütle akışıyla orantılıdır. Akışkan, en yüksek titreşim noktasına doğru ilerledikçe hızlanır; buradan daha ilerledikçe yavaşlamaya başlar. Bu yüzden U tipi boru bükülür. Borunun ölçülen bükülmesi daha sonra akışkanın kütle debi oranı ölçütü olur. Yoğunluktaki viskozitedeki, hız profili vb.'ndeki değişimler kalibrasyonu etkilemez. Coriolis debimetreleri günümüze kadar 150 mm çapındaki borularla sınırlı olarak kullanılmıştır. Bunlar aynı zamanda iki fazlı akış için kullanılabilirler. Avantajları yüksek doğruluk seviyeleri ve geniş ölçme aralığıdır. Dezavantajları ise yüksek maliyetleri, daha büyük debi oranları ve büyük yapılarıdır.

Termal Kütle Akış Sensörleri

Termal debimetreler örneğin bir akan sıvının sıcak bir tel veya film üzerindeki etkisini ölçer. Sıcaklık profilinin ısıtıcının etrafındaki yer değişimi ölçüldüğünde, buna *k calorimetrik sensör* adı verilir.

Sıcak tel ve *sıcak film sensörleri*, platin gibi direncinin sıcaklıkla yüksek oranda değiştiği bir sensör elementi içerir. Gaz da kullanıldıklarında alüminyum veya sıvı içinde kullanıldıklarında kuvarla kaplanarak korunmuş olurlar. Sıcak film (veya tel), sensör elementi içinden sabit akım sağlayan Wheatstone köprüsü içerisinde düzenlenirler. Ölçüm kanalındaki akış sıcak filmi (veya teli) soğutmakta, direnci azaltmakta ve köprü dengesini bozmakta, akış kütesine bağlı olarak bir çıktı oluşturmaktadır.

Diğer bir alternatif sabit sıcaklık köprüsüdür. Bir akış sıcak filmi soğutur ve bunun direnci azalır ve köprü dengesini bozar. Bir diferansiyel yükseltici köprüyü geri besleme voltajıyla yeniden dengeler. Çıktı voltajı akış oranının kareköküyle orantılıdır. Sıcak film sensörlerinin geniş ölçüm aralığı ve iyi bir doğruluk seviyesi bulunmaktadır ve bütünleşik elemanlar kadar küçük şekilde yapılabilirler. Küçük zaman sabitleri vardır. Örneğin bunlar hava akış ölçümleri için içten yanmalı motorlarda kullanılırlar.

2.2.14 Analogtan Dijitale Dönüşüm

Bahsedilen algılama elemanları, bir fiziksel niceliği, elektriksel direnç, kapasitans veya indüktans değişimine dönüştürür. DC veya AC örgü şebekeleri bu elektriksel özelliklerdeki değişiklikleri voltaj sinyaline dönüştürür ve yükseltir. Voltaj veya akım yükselteçleri, elektrometre veya yük yükselteçleri gibi diğer algılama elemanları düşük voltaj gücü veya akım sinyalleri üretirler ve bunların da özel devrelerle yükseltilmesi gerekir.

Eğer bir mikroişlemci veri elde etme amaçlı kullanılırsa, analogtan dijital dönüşüme ihtiyaç duyulur. Düşük geçiren bir filtre, eğer örnekleme teoremi ile uyum elde edilmesi için gerekliyse, sinyal ölçüm bant genişliğini sınırlar. Filtre, bir

örnekle ve tut devresi tarafından ve nihayetinde analog'dan dijital konvertör tarafından (ADC, Analog to Dijital Converter) izlenir. ADC'nin hassasiyeti uygulamaya bağlı olarak seçilir. Standart ADC'ler, hassas uygulamalar 16-bit'e ihtiyaç duyarken, 8- 10- veya 12-bit hassasiyete sahiptir. Ara nicelik olarak (yük dengeleyici veya çift eğimli konvertörler) zaman aralığı veya frekans kullanan dönüştürücüler, giriş voltajını, sabit bir giriş örnek süresi (ölçüm zaman aralığı) üzerine eklerler. Buna bir örnek dijital voltmetredir. Bu tip dönüşüm metodu son derece hassastır ancak ölçülen nicelik hızla değişmeyebilir. Çoğunlukla, düşük geçiş filtreleri ve örnekle-tut devreleri bu dönüşüm sürecinde kullanılmamaktadır. Dengeleme prensibini kullanan ADC, örneğin, ardışıl yaklaşım konvertörleri, giriş voltajını, dijital analog konvertörün (DAC) çıkış voltajı ile kıyaslayarak çalışır. ADC, DAC'yi bir geri-bildirim döngüsü olarak kullanır [1]. Örnekle-tut devreleriyle bağlantılı olarak, bu tip dönüştürücü, dönüşüm oranlarında 1 MHz'i mümkün kılmaktadır. Hatta paralel ADC'ler (flaş dönüştürücüler) daha yüksek dönüşüm oranlarına ulaşabilmektedirler (10 bit hassasiyetle 100 MHz'e kadar).

2.2.15 Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)

İçerisinde bir sensör sistemin uygulandığı, mekanik (sarsıntı, şok), termal, kimyasal (su, tuz, yağ ve solventler) ve doğa gibi çevresel koşullar, sensör tipinin seçimini etkilemektedir. Çevre ortamından gelen elektromanyetik radyasyon, sensör sistemleri üzerindeki diğer bir önemli etkiyi göstermektedir. Bir sensör sisteminin bu etkilere karşı nötral kalabilme özelliğine *elektromanyetik uyum (EMC, Electromagnetic Compatibility)* adı verilir. Bu tür olumsuz etkileşim kaynakları çeşitlidir ve büyük aralıkta frekansları kapsar, örneğin $16^{2/3}$ Hz'den (trenlerin güç kaynağı) ile birkaç GHz (radar sistemleri). Trenlerin güç kaynakları; elektrik alt istasyonları, iletim hatları, radyo, televizyon ve iletişim hatları, radar sistemleri, kaynak cihazları, ışıklandırma vb. hepsi elektromanyetik enerji yaymaktadır ve bunlar belirli bir mesafedeki bir sistemi etkilemektedir. Diğer olumsuz etkileşimler, güç kaynağı sisteminin kablolarından kaynaklanan etkilere bağlıdır. Bunlara örnek olarak, diğer elektrik tüketicilerinin en yüksek tüketim yükleri, elektrik motorlarının kolektör kıvılcımlanması, güç arzındaki dalgalanmalar (örneğin 12 V'luk bir taşıt elektrik sistemi), veya diğer sistemlerin çöküşüne bağlı olarak güç sistemindeki inişler ve çıkışlar gösterilebilir. Buna ilave olarak, elektrik ve elektronik cihazlar birbirlerini etkilerler. Bu *yakın alan etkisi*, göz önüne alınmalıdır. Bu durum özellikle, eğer cihazlar sınırlı alan içerisine monte edilmişlerse karşılaşacağımız vakadır. Yakın alan etkisine örnek verecek olursak; kablo ağacı içerisinde kablolar arasında konuşmaların karışması, elektrik sürücülerinin olumsuz etkileşim yayımı, mikroişlemcilerin saat oranı, diğer dijital cihazlar, tristör devreleri ve ateşleme sistemleri sayılabilir. Bu etkilere ilave olarak; statik yükleri, hatalı topraklamaları ve yanlış kullanım hatalarını, örneğin yanlış bağlantılar veya kısa devreleri göz önüne alınmalıdır. Özellikle otomotiv sektöründe bu tip birçok hata bulunmaktadır.

Olumsuz etkileşim yayımının kaynağında bastırma veya azaltma, önemli bir karşı hamledir. Buna ulaşabilmemiz için çeşitli metotlar bulunmaktadır. Mesela, uygun bir muhafaza veya iletim hatlarında olumsuz etkileşim bastırıcı bobinlerin kullanılması bunlardandır. Gürültü alanı yoğunluğu sınırları uygun düzenlemelerle verilmiştir.

Cihazlar arasında yeterince mesafe sağlanması, özellikle kablolar arasında bırakılacak mesafe, gürültü düzeyinin düşürülmesinde yardımcı olacaktır. Donanım ve güç kabloları daima birbirinden ayrı şekilde monte edilmelidir. Radyo koruma kullanımı (metal kutu içine alma), cihazların ve bileşenlerin korunmasında önemli bir adımdır. Bükülmüş çiftler halinde düzenlenmiş iletim hatları, indüktif etkilere karşı daha az maruz kalır ve aynı zamanda kapasitif etkilerden (ve yüksek frekanslı manyetik etkiler) korunmuş olur. Koruma kalkanının uygun şekilde topraklanması hayati önem taşır. EMC konusunda karşılaşılabileceğimiz problemleri önlemede önemli bir metot, cihazları birbirine bağlamada ihtiyaç duyulan kabloların uzunluğunu azaltması ve sinyal işleme cihazlarının tek bir birimde entegre edilmesiyle başarılabilir. Olumsuz etkileşimlerden korunmuş sinyal iletimi (yüksek sinyal seviyesi kullanmak, 4 ile 20 mA arası akım iletimi, hata tespiti ile şifrelenmiş iletim) kullanmak EMC'yi daha da geliştirir. Elektromanyetik etkilerden etkilenmeyen ölçüm prensipleriyle (optik, dijital) birlikte fiber kabloları kullanan optik iletimler, maruz kalınan olumsuz etkileşimleri azaltmaktadır.

Bütün bir sistemin veya bir sistemin bir parçasının EMC özelliklerini incelemek (EMC/EMP testleri) son derece pahalı ve zordur. Karmaşık bir sistemdeki tüm etkileşimlerin incelenmesi genellikle imkânsızdır. Bu yüzden, EMC ilgili hususların en başta; sistem veya bileşenlerinin tasarımı sırasında değerlendirilmesi gereklidir. Tüm bileşenlerin olumsuz etkileşim yayma miktarı ve maruz kalma riski en aza indirilmelidir.

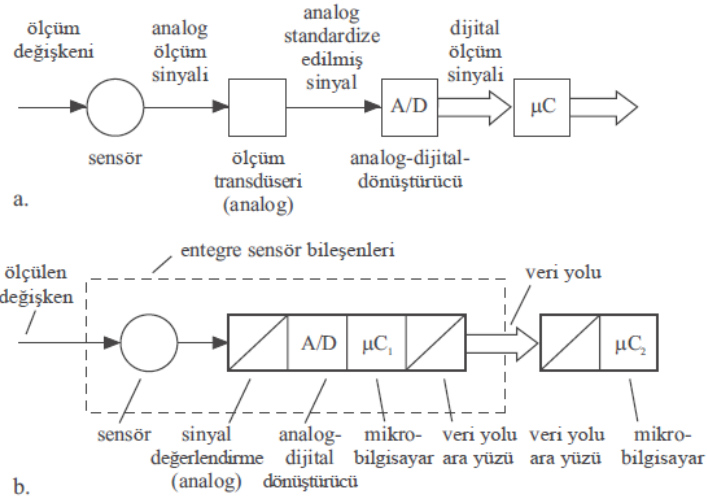
2.2.16 Entegre ve Akıllı Sensörler

Sensörler akılda iki düşünceyle tasarlanırlar. Arzu edilen sinyal, sensörün ölçtüğü baskın olan sinyal olmalı ve ölçülen sinyal gerçek fiziksel nicelikle şüpheye yer bırakmayacak şekilde örtüşmelidir. Gerçekte, bu düşünce ve hedeflere tamamen ulaşamaz. Sensörler, bazı yan etkilere maruz kalmaktadırlar; örneğin çapraz hassasiyet, karışıklık, doğrusal olmayan iletim (doğrusal olmayan nitelikler, histerisiz, cevap verebilirlik, anlamsız kayma), kayma (drift), yaşlanma, yavaş dinamik davranış ve bağımsız üretim toleransları. Sinyal üretimi sırasında bu ideal olmayan özelliklere dikkat etmemek, yanlış ölçümlere yol açabilir. Bu yüzden, bu yan etkilerin olumsuz etkilerini gidermek için, analog dönüşüm devreler kullanıldığında bile bazı adımlar atılması konusunu düşünmeliyiz. Bu adımlar; filtrelerin kullanılması, iki aynı sensörün sinyal farkları, veya sinyal kaymalarını bastırmak için özel devreleri içerir [15]. Ancak, *dijital sinyal işleme* kullanımı sonucu ortaya birçok ilave ve yeni olasılıklar çıkmaktadır.

Şekil 3a, analog'dan dijital dönüşüm ile bağdaştırılan geleneksel ölçüm zincirini ve bir mikroişlemciyi veya mikrokontrolörü göstermektedir. Örneğin, eğer sensörün doğrusal olmayan özellikleri zamanla değişmezse, bunu doğrusal yapmak veya mikroişlemci kullanarak ayarlamak mümkündür. Bu da her bir sensörün üretimi sırasında kalibrasyonunu mümkün kılar ve sensörün analog kısmı üzerindeki gerekli önlemleri azaltır. Mikrokontrolörlerin kullanımı, frekansları kolayca ölçen dâhili sayaçlar sayesinde, frekansı ayarlanmış ve artımsal sensörlerin daha ekonomik olmasını sağlamıştır.

Şekil 3b'de gösterildiği gibi, sensörün, sinyal işlemenin, ADC'nin ve mikrobilgisayarın bus arayüzüyle tek bir birimde *entegrasyonu*yla, daha ileri iyileştirmeler mümkündür. Bu entegrasyonun (muhtemelen tek bir çip üzerinde) bazı önemli avantajları vardır: büyük miktarlarda yapılan üretimin maliyetlerinde azalma, alan ihtiyacında azalma, daha yüksek hassasiyet ve gürültüye daha az meyilli sistemler. Bu entegrasyon sayesinde, dayanıklılık ve güvenilirlik ihtiyaçları artmaktadır. Çünkü bir sensör sert ortam koşullarına karşı açık durumdadır.

Entegre edilmiş sensör bileşenleri ilave bazı fonksiyonları mümkün kılar. Bunlar da bizi *akıllı sensörler* veya *zeki sensörler* dediğimiz noktaya götürür. Parazit miktarı ölçmek için ikinci bir sensör kullanılabilir. Örneğin sıcaklık ölçümü, istenmeyen yan etkilerin giderilmesinde kullanılabilir. Diğer örnekler, mikroişlemci içine yerleştirilen özel algoritmaların kullanımı sonucu doğar. Bu algoritmalar, yan etki giderici ve doğrusallaştırma amaçlı, histerisiz etkisini (manyetik, uyuşmazlık ve cevap verebilirlik özelliklerine bağlı olarak) giderme amaçlı olarak, üretim ve bakım sırasında tüm algoritmalar için kendi kendini kalibrasyonun düzeltilmesi için gürültü filtreleri olarak işlev görmektedir. Buna ek olarak hata tespiti için ve hata teşhisi şemaları için hizmet sunmaktadır. Ayrıca, tüm algoritmaların, her bir sensör için bağımsız olarak programlanabileceği gerçeği oldukça önemlidir. Sensörler için üretim toleransları, geleneksel durumlarda olduğu kadar yüksek olmasına ihtiyaç yoktur. Dijital işlem çiplerini gerçekleştirmenin bir yolu, uygulamaya özel entegre devre, yani ASIC (Application-Specific Integrated Circuit)'dir. Tränkler [2], akıllı sensörlerin gelişimini açıklamaktadır.



Şekil 3. Sensör teknolojisinin entegrasyonu.
 (a) Dijital işlem birimi ile geleneksel ölçüm zinciri.
 (b) Dijital işlem birimi ile entegre sensör elemanları.

Sensör teknolojisinin gelişiminin, mekatronik sistem gelişimine benzer bir yol izlediğini görmek ilginçtir; örneğin sensör bileşenleri üzerindeki gereklilikleri azaltmak ve daha akıllı fonksiyonlar da dâhil olmak üzere, mikroelektronik içindeki belirli fonksiyonları geliştirmek.

Çoklu sensör teknolojisinin kullanımıyla, giderek daha fazla olasılık mümkün hale gelmektedir. Örneğin, benzer veya farklı tiplerde sensörlerin bir arada kullanılması ve mikromekanik içinde ortaya çıkan artan sayıda gelişmeler bunlar arasında sayılabilir.

Kaynaklar

1. Jones, B. E. 1977. Instrumentation, Measurement and Feedback. New York, NY: McGraw-Hill.
2. Tränkler, H. R. 1992. Taschenbuch der Meßtechnik. München, Germany: Oldenbourg.
3. Beckwith, T. G., R. D. Marangoni, and J. H. Lienhard. 1995. Mechanical Measurement. 5th ed. Addison Wesley Publishing Company.
4. Bauer, H., ed. 1996. Automotive Handbook. 4th ed. Warrendale, PA: Bosch, Stuttgart and SAE.
5. Christiansen, D., ed. 1996. Electronics Engineers' Handbook. 4th ed. New York, NY: McGraw Hill. Chapter 2 Hardware 52
6. Jurgen, R. K. 1997. Sensors and Transducers. Warrendale, PA: SAE.
7. Webster, J. G. 1999. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press.
8. Whitaker, J. C. 2002. Electronic Systems Maintenance Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press.
9. Profos, P., and T. Pfeifer. 2002. Handbuch der industriellen Meßtechnik. München, Germany: Oldenbourg.
10. Czichos, H., ed. 2004. Hütte—Die Grundlage der Ingenieurwissenschaften. Berlin, Germany: Springer.

11. Missotten, B. 1998. Measurement systems for the mapping and the evaluation of crop production performance. PhD diss. K.U. Leuven.
12. Reyns, P., B. Missotten, H. Ramon, and J. De Baerdemaeker. 2002. A review of combine sensors for precision farming. *Precision Agriculture* 3: 169-182.
13. Strubbe, G. 1997. Mechanics of friction compensation in mass flow measurement of bulk solids. PhD diss. K.U. Leuven.
14. Technische Sensoren. 1983. Forschungsheft 104. Frankfurt, Germany: Forschungskuratorium Maschinenbau.
15. Tränkler, H. R., and Böttcher. 1992. Information processing in sensing devices and microsystems. IFAC-Symposium on Intelligent Components, 20-22. Malaga (Spanien), Mai 1992.
16. Miller, R. W. 1996. *Flow Measurement Engineering Handbook*. 3rd ed. New York, NY: McGraw-Hill.
17. Baker, R. C. 2000. *Flow Measurement Handbook*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.