



Kapasitif Etki Prensipli Kuvvet Ölçme Cihazlarının Yapısının, Türlerinin ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi

Fırat Akbaş¹
Bülent Aydemir²

Özet

Metroloji bilimi ile ölçümü sağlanan fiziksel büyüklüklerden biri olan kuvvet, farklı yöntemler ile ölçülebilmektedir. Çeşitli ölçüm yöntemlerine göre tasarlanmış ve kullanılmakta olan birçok kuvvet ölçme cihazı (dönüştürücü) vardır. Kapasitif kuvvet ölçüm cihazları da bunlardan birisidir. Kapasitif kuvvet ölçüm cihazı, kondansatörün iki metal plakasının bir kuvvet nedeniyle sıkıştırılması sonucu kapasitörün kapasitans değişimini algılama ve oluşan elektrik yükünden dolayı bir sinyal elde etme esasına dayanan kuvvet ölçüm cihazlarıdır. Bu çalışmada kapasitif kuvvet ölçme cihazları; çalışma teorisi, yapısı ve kullanım alanları kapsamında incelenmiştir. Bu çalışma ile kapasitif kuvvet ölçme cihazları ile ilgili uygulama ve araştırmalar için bir rehber doküman oluşturulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

Kuvvet ölçümü, Kapasitif kuvvet ölçüm cihazları, Kapasitif etki, Kapasitans

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi

Received: mm.dd.2020

Accepted: mm.dd.2020

Online Published: mm.dd.2020

Investigation of the Structure, Types and Usage Areas of Force Measuring Devices with Capacitive Effect Principle

Abstract

The force from the physical quantities that metrology science provides measurement can be calculated with different measurement methods. There are many force measuring devices that are designed and used according to various measurement methods. Force measuring devices with capacitive measuring principle are one of them. Capacitive force converters are force measurement devices based on the principle of detecting the change in capacitance of the capacitor as a result of the compression of the two plates of the capacitor due to a force and obtaining a signal due to the electric charge formed. In this way, it is aimed to create a guide document for the applications and researches related to capacitive force measurement devices.

Keywords

Force measurement, Capacitive force measuring devices, Capacitive effect, Capacitance

Article Info

Research Article

Received: mm.dd.2020

Accepted: mm.dd.2020

Online Published: mm.dd.2020

¹ Fırat Akbaş, Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği. e-mail: firatakbas@marun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-0413-6509

² Bülent Aydemir, TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (TÜBİTAK UME). e-mail: Bulent.aydemir@tubitak.gov.tr, ORCID: 0000-0001-6848-2681

GİRİŞ


Endüstri, bilim ve teknolojideki gelişmelere bağlı olarak fiziksel büyüklükleri ölçme yöntemleri ve ölçme cihazları da gelişmektedir. Uçak, inşaat, makine, gemi, savunma, otomotiv, medikal gibi daha birçok sektör için önem arz eden fiziksel büyüklüklerden birisi de kuvvettir. Günümüzde teknolojik uygulamalarda, emniyetli çalışma şartlarını gerçekleştirebilmek ve uzun dönemde kararlı ve ekonomik tasarımlara sahip olabilmek için, sistem üzerine etkiyen tüm kuvvetlerin önceden belirlenmiş doğruluk sınırları içinde bilinmeleri gerekmektedir [1].

Kuvvet; hareketi başlatan, hareketin hızını veya yönünü değiştiren ya da cisimlerde şekil ve basınç değişikliklerine neden olan itme ya da çekme etkileşimidir. Kuvvetin birimi ise Newton'dur (N). Tasarımların imalat aşaması, kalite kontrolü ve ürün testleri olmak üzere mühendislik çalışmalarının birçoğunda kuvvet uygulamaları yapılmaktadır. Bu durum da uygulanan kuvvetin büyüklüğünün doğru ölçülebilmesini önemli kılmaktadır. Kuvvet ölçümlerinde kullanılan yöntemler şöyledir:

- A. Bilinen Yük İle Dengeleme
- B. Esnek Gövde Üzerinde Kuvvet ile Oluşturulan Deformasyondan Yararlanma
- C. Uygulanan Kuvvet Etkisiyle Fiziksel Özelliklerin Değişiminden Yararlanma

Bu yöntemler ile çalışan birçok cihaz üretilmiştir (Şekil 2). Kuvvet ölçümlerinde kullanılan cihazlar ölçüm prensiplerine göre şekil 1'deki gibi sıralanabilir.

Birçok çeşidi bulunan kuvvet ölçme cihazları, kullanım alanlarına ve ölçüm kabiliyetlerinin uygunluklarına göre seçilip kullanılmaktadır. Bu çalışmada kapasitif kuvvet ölçme cihazları (dönüştürücüleri) detaylı olarak incelenmiş ve uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir [2].

<p>A. Mekanik Kuvvet Ölçme Cihazları Jiroskopik Kuvvet Ölçme Cihazları Rezonatör Kuvvet Ölçme Cihazları Titreşim Telli Kuvvet Ölçme Cihazları Hidrolik Kuvvet Ölçme Cihazları Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazları Ölçme Halkaları</p> <p>B. Elektriksel Kuvvet Ölçme Cihazları <u>Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları</u> Direnç Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları İndüktif Kuvvet Ölçme Cihazları Elektromanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazları Akustik Kuvvet Ölçme Cihazları Elektrodinamik Kuvvet Ölçme Cihazları Galvanomanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları</p>	
<p>Şekil 1. Kuvvet ölçümlerinde kullanılan cihazların ölçüm prensiplerine göre sınıflandırılması</p>	<p>Şekil 2. Çeşitli kuvvet ölçüm cihazı örnekleri</p>

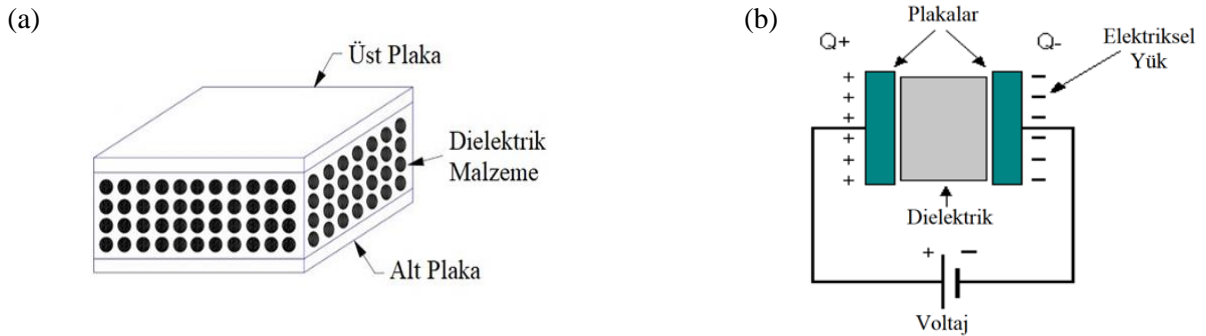
1. Kapasitif Etki

Enerji yok edilemeyen ama bir formdan diğer bir forma dönüştürebilir yapıdadır. Bazı durumlarda, enerjiyi başka bir forma dönüştürmek için başka bir enerji biçiminden yardım alınabilir. Bu enerji dönüşüm işlemini genellikle dönüştürücü (transdüser) adı verilen cihazlar tarafından yapılır. Dönüştürücüler iki tipe ayrılır. Bunlar:

- Aktif dönüştürücüler
- Pasif dönüştürücüler

Enerji dönüşüm işlemi sırasında herhangi bir güç gerektirmeyen eleman ya da cihazlara "aktif dönüştürücüler (kendiliğinden üreten)" denir. Eğer dönüşüm için bir dış enerji girişi gerekiyorsa bu durumda dönüşümü gerçekleştiren eleman ya da cihazlara "pasif dönüştürücüler (modülasyonlu dönüştürücüler)" denilmektedir. Örneğin rezistif, endüktif ve kapasitif dönüştürücüler, kullanımlarında giriş enerjisinden ayrı olarak bir AC ya da DC gerilime gerek duydıklarından pasif dönüştürücülerdir.

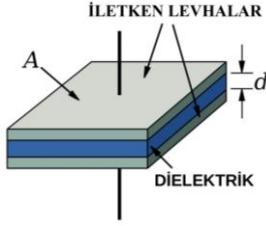
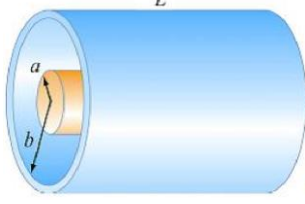
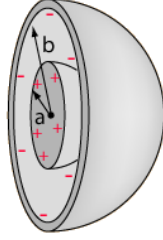
Kapasitif dönüştürücü, değişken kapasitans prensibine göre çalışır. Kapasitans bir bileşenin ya da devrenin elektrik yükü biçiminde enerji toplama ve depolama yeteneğidir. Kapasitör veya kondansör denilen eleman (Şekil 3a), temel olarak yalıtkan bir malzeme ile birbirinden ayrılmış iki metal plakadan oluşur. Kondansatörün kapasitesi, plakalar arasındaki mesafe ile ters, plakaların yüzey alanı ile doğru orantılı olarak değişir. Plakaların yüzey alanını değiştirmenin güçlüğünden dolayı plakaların arasındaki mesafe değiştirilerek ölçüm yapılır. Bunun için plakalardan bir tanesi sabit, diğeri ise uygulanan yüke bağlı olarak hareketlidir. Yüken uygulanmasıyla plakalar arasındaki mesafe değişir; bu olay kapasitenin değişmesine neden olur (Şekil 3b). Bir elektrikli titreşim devresinin elemanı olarak yerleştirilmiş bu kondansatörün kapasitesinin değişmesi bir akım değişimi meydana getirir. Aynı zamanda devrenin rezonans frekansı ve geçen akımın fazı da değişir. Bu nedenle, bu dönüştürücülerin prensibi değişken kapasitans olarak ifade edilir [3].



Şekil 3. Paralel plakalı kondansatör (a) ve kapasitif etki ile çalışan bir sistemin yapısı (b)

Herhangi bir kapasitif algılama sisteminin kalbinde bir kapasitör bulunur. (eski adıyla kondansatör). Kondansatörler üç yapıda bulunur: Tablo 1'de gösterildiği gibi düz (paralel), silindirik (eş eksenli) ve küresel (eş merkezli) olarak yer alır. Düz ve silindirik türleri en yaygın kullanılan formlar olmak üzere tüm kapasitif dönüştürücüler, bu üç tasarım sınıflandırmasından birine girer ve ayrı alt bölümlerde sunulur. Bu üç tasarımda bulunan iki plaka arasındaki kapasitanslar ise tür, şema ve formül bakımında Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kapasitif kuvvet dönüştürücülerinin temel türleri

Tür	Paralel Plakalı	Silindirik	Küresel
Şema			
Formül	$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$	$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot L}{\ln(b/a)}$	$C = \frac{4\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot a \cdot b}{b - a}$

Tablo 1’de, A örtüşen plaka alanı, d iki plaka arasındaki mesafe, ϵ ortamın geçirgenliği, C kapasitans, S plakanın alanı, L uzunluk, ϵ_r bağıl geçirgenlik, ϵ_0 boş alanın geçirgenliği, b ve a ise merkeze olan uzaklıklardır. Dönüştürücünün kapasitansı, köprü devresi kullanılarak ölçülür. Dönüştürücünün çıkış empedansı aşağıda verilen (1) bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada C kapasitans, f ise Hz cinsinden uyarma sıklığıdır [3].

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

2. Kuvvet Ölçüm Cihazlarında Sensörler

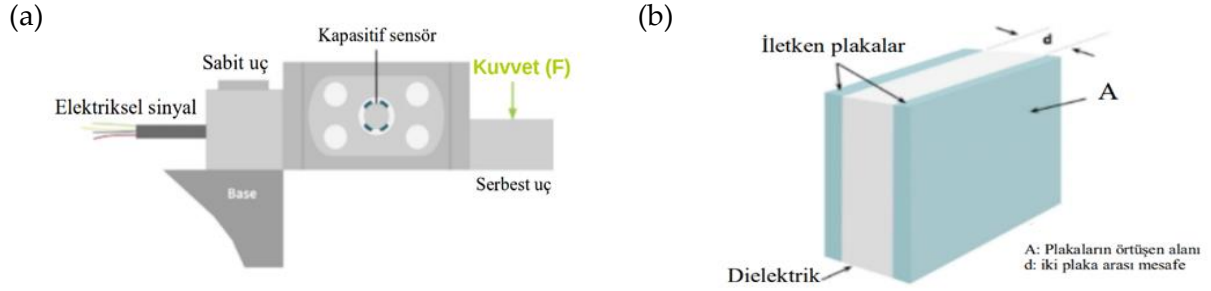
Ölçüm cihazlarının en önemli elektronik öğelerinden biriside sensörlerdir. Sensörler ile dönüştürücülerinin farkının iyi bilinmesi önemlidir. Sensör, fiziksel bir miktarı algılayan ve onu kapasitans, endüktans ve omik direnç gibi elektriksel olarak ölçülebilen bir analog niceliğe dönüştüren, dönüştürücü sisteminin bir ögesidir. Dönüştürücü ise, ölçülen miktarı normal bir elektrik sinyaline dönüştürmek için sensör ile bağlantılı bir sistemdir. Fiziksel ölçüm büyüklüklerinin çoğu elektriksel olmadığından, elektronik işlenmesi mümkün olması amacıyla ilk önce elektriksel forma dönüştürülmeleri gerekir. Bu dönüştürmeye transdüksiyon denir ve sensör tarafından gerçekleştirilir. Kapasitif kuvvet ölçüm cihazlarında bulunan sensör, anlatıldığı gibi kapasitif etki prensibi ile çalışır. Bunların yanı sıra kapasitif kuvvet dönüştürücüler için çok çeşitli modern sinyal koşullandırma, ölçüm devreleri ve gösterge sistemleri mevcuttur. Amplifikatörler ve alt grubunda yer alan osilatörler en çok kullanılan sistemlerdir [4].

Bu sistemlerin kullanıldığı bir yapı olan, endüstride yaygın olarak kullanılan tartım veya yük hücresi (loadcell) terimi, daha bilimsel olan "kuvvet ölçüm cihazı (dönüştürücüsü)" formülüne eşdeğerdir. Loadcell genellikle endüstride tartım için kullanılmaktadır [4].

3. Kapasitif Kuvvet Dönüştürücülerinin Sınıflandırılması

Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler, kapasitif kuvvet dönüştürücü (ölçme cihazı) sistemlerini de etkisi altına alarak uygulamaları ve cihaz türlerini etkilemiştir. Bu bölümde kapasitif kuvvet dönüştürücülerin yapısı ve farklı cihaz tipleri ele alınmıştır.

Kapasitif kuvvet ölçme cihazları (Şekil 4a), üzerine etki eden kuvveti elektronik bir sinyal hâline dönüştürmek için kullanılan cihazdır. Farklı uygulamalar için çeşitli türleri mevcuttur. Yapısında kapasitif etki prensibi ile çalışan sensör bulunur (Şekil 4b) [5].



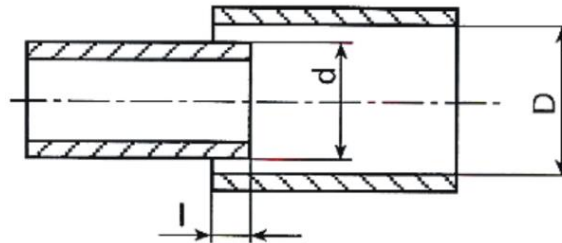
Şekil 4. (a) Örnek bir kapasitif kuvvet ölçme cihazı diyagramı ve (b) içinde yer alan kapasitif sensör

3.1. Silindirik Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

Koaksiyel konfigürasyon, kapasitif dönüştürücülerdeki en popüler ikinci tasarımıdır. İç iletken dış iletkenin içine ve dışına hareket ettirilebiliyorsa, basit bir yer değiştirme dönüştürücüsü ile silindirik bir kapasitör kullanılarak kolayca oluşturulabilir. Böyle bir dönüştürücünün kapasitansı, yer değiştirme "l" ile doğrusal bir ilişki içindedir. Silindirik kondansatörün elde edilmesi daha kolaydır ve düzlem plakalı olandan iki kat daha az yanıl duyarlılığa sahiptir.

Boru şeklinde olup sıvı sıkıştırılabilirliğini ölçmek için kullanılan diferansiyel kapasitif dönüştürücü bir kapasitör için kapasitans formülü aşağıda verilmiştir (Bağıntı 2). Burada, ϵ_r sıvının bağıl geçirgenliği, D dış borunun iç çapı, d dış borunun dış çapı, l ise iki bağlantının örtüşen uzunluğudur ve şekil 5'de gösterilmiştir [3].

$$C = 0.56 \cdot \epsilon_r \frac{l}{\ln D/d} \quad (2)$$

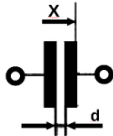
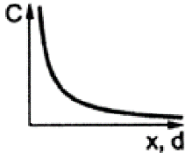
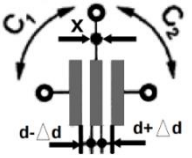
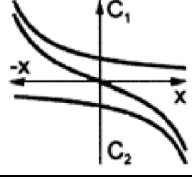


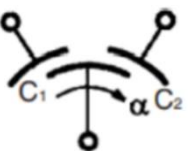
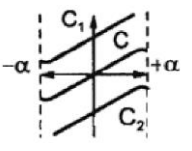


Şekil 5. Silindirik kapasitif dönüştürücünün şematik gösterimi

3.2. Plakalı Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

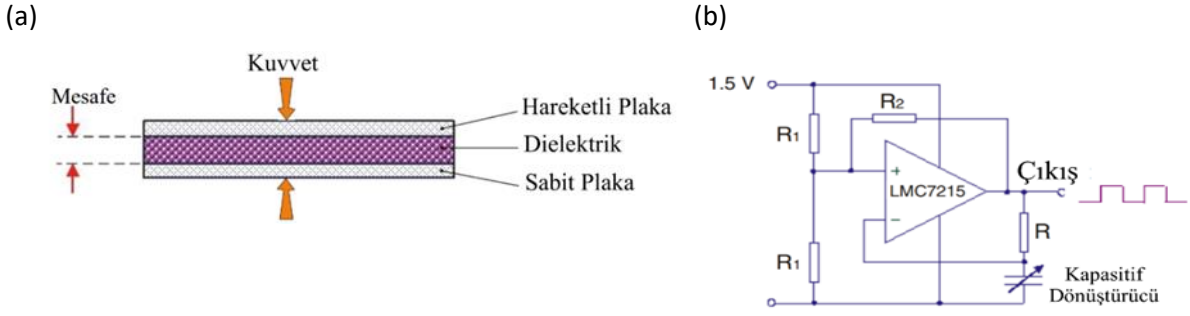
En fazla kullanılan plakalı kapasitif kuvvet dönüştürücü tipleri, kapasitans ve kapasiteye karşı doğrusal veya açısız yer değiştirme grafikleriyle birlikte Tablo 2'de sunulmaktadır. En yaygın kullanılan türleri aşağıda ayrıntılı olarak incelenip; kapasitans formülleri ile birlikte verilir ve daha sonrasında alt konu başlıkları olarak ele alınmıştır. Tablo 2'de, A örtüşen plaka alanı, d iki plaka arasındaki mesafe, ϵ ortamın geçirgenliği, C kapasitans ve S plakanın alanıdır.

Tablo 2. Plakalı ana kapasitif kuvvet dönüştürücü türleri

Tür	Şema	Formül	Grafik
Değişkenli hava boşluğu		$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right)$	
Değişken diferansiyelli hava boşluğu		$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C}{d} \left[1 + 2 \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right]$	
Dielektrik malzemenin değişken kalınlığı		$C = \frac{\epsilon_1 S}{d_0 - d_1(x) \left(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}\right)}$	
Açısal değişkenli		$C = \epsilon \frac{S(a)}{d}$	

3.2.1. Dielektrik Malzemenin Kalınlığının Değişmesini Referans Alan Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

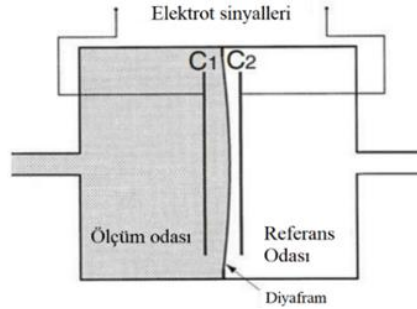
Bu dönüştürücü tipi, dielektrik görevi gören elastik bir malzemeyle ayrılmış iki metal paralel plakadan oluşur. İki plaka arasındaki malzeme, ideal elastik (histeresiz sıfır) ve düşük yükler altında yeterince deforme olmalıdır. Plakalar boyunca uygulanan kuvvet değişikliğini, uygun bir dielektrik malzeme (örneğin elastomer) aracılığıyla plakaların alanlarını, plakalar arasında mesafeyi veya bağıl geçirgenliği bir değişikliğe bağlayarak kapasitansı, uygulanan kuvvetin ters fonksiyonu olarak çalışan bir dönüştürücü (Şekil 6a) haline getirir. Bu kapasitif değişikliği bir sinyale dönüştürmek için, şekil 6b'deki gibi, bir gevşeme osilatörü kullanılması uygun olacaktır. Kapasitif dönüştürücülerde ihtiyaç durumunda yer alan elektronik devrelerden biri olan osilatör; belli frekanslarda kare, sinüs, üçgen veya testere dişi biçiminde herhangi bir girdi olmaksızın sürekli, tekrarlanan, alternatif bir dalga formu üreten bir devredir [3].



Şekil 6. (a) Değişken kalınlıkta dielektrik malzeme ve (b) İlgili kare dalga osilatör diagramı

3.2.2. Plakalar Arasındaki Mesafenin Değişimini Referans Alan Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

Bu kapasitörlerin çalışması, plakalar arasındaki mesafe ile ters orantılı olacak şekildedir. Kuvvet sonucunda ölçülecek yer değiştirme, hareketli plakalara bağlıdır. Kapasitif teknikler, kondansatörün bir plakasını oluşturabilen diyaframla birlikte ve diğer plakayı kaplayan kuvvetle birlikte kullanılabilir. Şekil 7'de gösterilen simetrik tasarım, basınç ve elektrik çıkışı arasında daha doğrusal bir ilişki sağlar ve fark kuvvetlerini kolayca ölçebilir. Mutlak basınçları ölçmek için referans odası boşaltılır. Metalize diyafram ve iki elektrot, bir AC köprü devresine dahil edilen iki kapasitörü oluşturur. Diyaframın bir tarafına kuvvet uygulandığında, diyafram sarakarak C1 ve C2 kapasitanslarının değerlerini değiştirir ve değerler ölçülür [3].

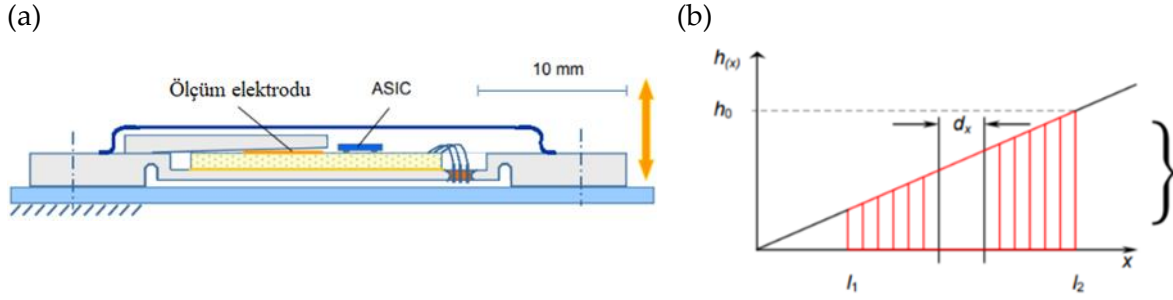


Şekil 7. Kapasitans manometresi (diyafram ölçer)

3.2.3. Belirli Bir Açıda Düzenlenmiş Plakaların Arasındaki Mesafeyi Referans Alan Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

Kapasitif dönüştürücü, açılal yer değiştirmeyi ölçmek içinde kullanılabilir (Şekil 8a). Kuvvet ölçümü temel olarak, gerilmeli birimin sarpması, uzaması veya bir şaftın burulması olarak meydana gelen mekanik gerilmenin elde edilmesine dayanır. Nominal yük aralığında bu deformasyonlar genellikle birkaç mikron seviyesindedir. Bu son derece küçük mekanik ölçüm, bir elektrik sinyalinde hassas bir şekilde dönüştürülmesi için, kapasitör elektrotlarının arasındaki mesafenin değişimini kullanan uygulamadır. Ölçüm prensibi, belirli bir mesafedeki iki nokta arasındaki distorsiyonun mekanik olarak elde edilmesidir. Sırasıyla elektrotlar ve açı arasındaki boşluğun karşılık gelen bir modifikasyonuna dönüştürülmesine dayanır. Uygulanan yüke bağlı olarak, iki elektrot arasındaki açı değişir ve kapasitansının değişmesine neden olur. Kapasitansın değeri, bağıntı (3) deki formül ile elektrotlar arasındaki karşılık gelen mesafelerin artan kapasitanslarının integrali ile hesaplanabilir (Şekil 8b). Burada k elastikiyet sabiti, T tork, b elektrot genişliği ve h_0 ise elektrotun ilk boşluğudur [3].

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot b \cdot l_2}{(h_0 \pm k \cdot T)} \cdot \ln \frac{l_2}{l_1} \quad (3)$$

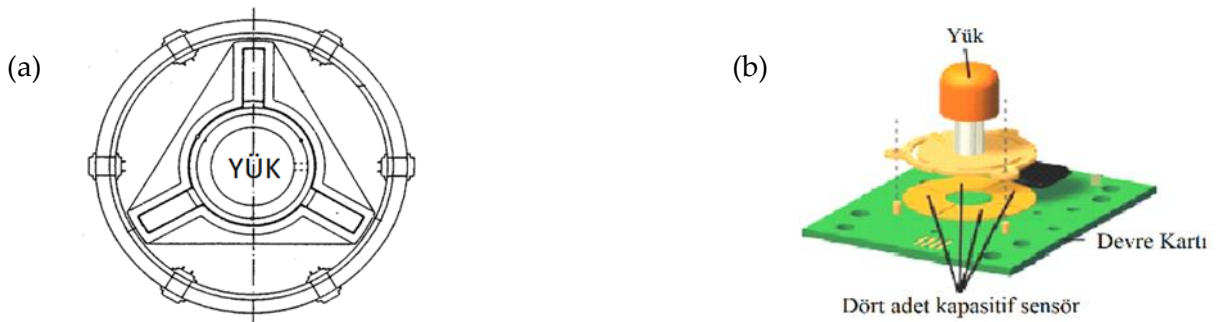


Şekil 8. (a) Plakaları arasında belirli bir açı olan kapatif kuvvet dönüştürücü ve (b) "Açısal plaka" boyutlarının kapasitansa olan bağımlılık grafiği. Burada l uzunluk ve h yüksekliktir

3.3. Çoklu Plakaya Sahip Olan Kapatif Kuvvet Dönüştürücüler

Üç ayrı hassas elemandan oluşan yeni bir dinamometre tipi geliştirilmiştir (Şekil 9a). Prensip olarak, cihaz bir konsol kirişinin elastik sapmasına dayanmaktadır. Sapması, asılı ağırlıkla orantılı olan kirişin serbest ucu, kendisine bakan iki sabit elektrot ile kirişin kendisi tarafından oluşturulan iki elektrik kapasitansın arasındaki farkı belirler. Çoklu dinamometre (Şekil 9b), 120°'de simetrik olarak düzenlenmiş ve iki cam plaka arasına sıkıştırılmış üç konsol kirişten oluşur. Kirişlerin serbest uçlarının yukarı ve aşağı bakan kısımlarında kapatif dönüştürücülerin sabit elektrotları ince film tekniği ile yapılır. Her dinamometrenin iki üçgen plakası üzerindeki monel ışını ve yüzlü elektrotlar, kapasitans farkı sapmanın bir fonksiyonu olarak değişen diferansiyel bir düzlem-paralel kapasitör çifti oluşturur. Numunelerin kütleindeki küçük değişiklikler için, her dinamometre ışını, kütle varyasyonlarının doğrusal bir fonksiyonu olarak konumunu değiştirir. Kapasitans varyasyonundan yükselen ve bununla orantılı olan akım sinyali, bir transkondüktans ön yükselticisi tarafından bir voltaj sinyaline dönüştürülür ve senkron dedektör vasıtasıyla ölçülür [3].

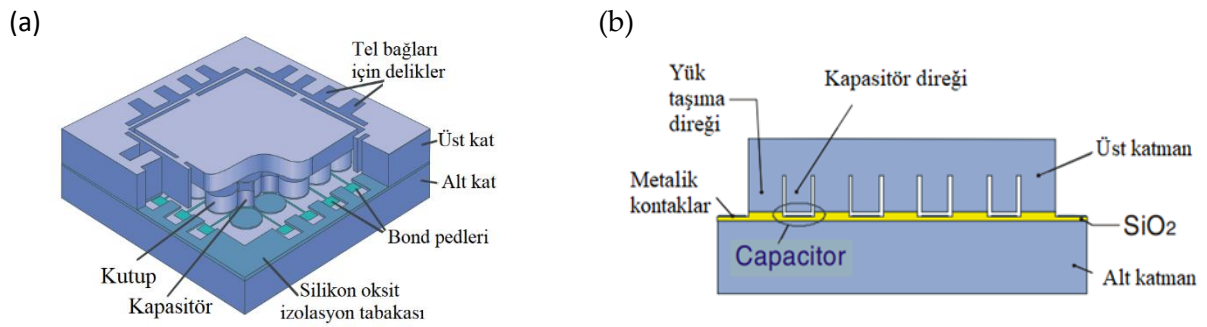
Cihaz, 250 ila 330 K sıcaklık aralığında ve %0 ila 95 nem aralığında higro termal döngüye maruz kalan üç kompozit malzeme numunesinin ağırlık değişimlerini aynı anda izleyebilir [3].



Şekil 9. Çoklu dinamometre (üç konsol kirişi): (a) Üst görünüş (b) Paralel plakalardan oluşan dört dairesel sensör

3.4. Kapasitif Algılama Elemanlarının Matrisini Kullanan Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

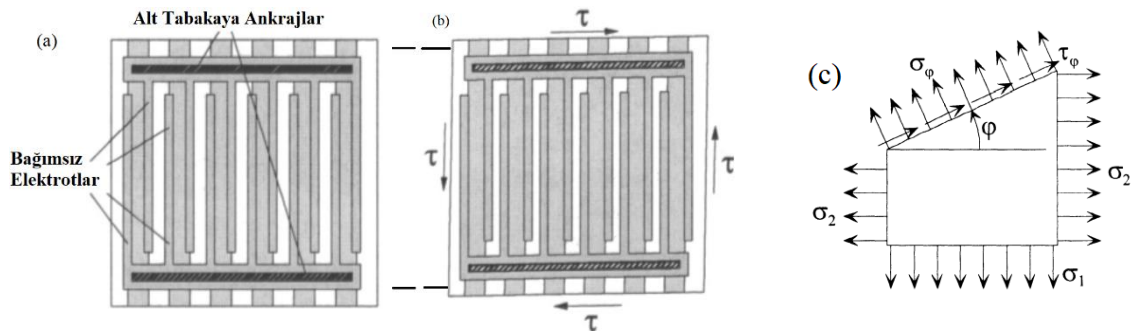
Monokristal silikon, histerezis ve sürünme hatası göstermezler. Kuvvet dönüştürücüsünde kullanmak için ideal bir malzemedir. Algılama yüzeyi kapasitif algılama elemanları matrisi (veya dizisi) içerir. Dönüştürücünün şematik bir diyagramı şekil 10a'da gösterilmiştir. Tasarım, birbiri üzerine yapıştırılmış iki gofret halinde gerçekleştirilmiştir. Gerçek çip (Şekil 10b) yük taşıma direği ve kapasitör direği içerir. Bu alanda, üst gofret, yükü taşıyan bir dizi kutup içerir. Alt plaka, üst plakanın ortak elektrot olduğu bir dizi kapasitör oluşturan bir elektrot deseni içerir. Bir yük uygulandığında, kutuplar sıkıştırılacak ve kapasitörlerin konumunda metal elektrotlar ile üst plaka arasındaki mesafe azalacak ve böylece kapasitans artacaktır. Her bir kapasitans ayrı ayrı ölçülür ve toplam kapasitans, ayrı kapasitörlerin karşılıklı değerlerinin toplamı olarak elde edilir [6].



Şekil 10. (a) Tüm çip üzerine dağıtılmış küçük kapasitörler dizisi ve (b) dağıtılmış kapasitif yük hücresinin kesiti

3.5. Birbirine Kenetlenmiş Elektrotlu Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

Bir yüzey mikro makina çipi, yük altındaki bir çubuğa (veya burulma yoluyla deforme olmuş bir şafta), sert bir şekilde monte edilir. Dönüştürücü, uygulanan bir kuvvet veya torka göre kapasitansını değiştiren, bağımsız birbirine bağlı elektrotlardan oluşur. Tarakların bağlı tarafı alt tabakaya sabitlenmiştir (Şekil 11a) ve böylece alt tabakanın kayma deformasyonu parmakların alt tabakaya göre göreceli konumlarının değiştirmesine neden olmuştur (Şekil 11b). Bu sayede iki tarak arasındaki kapasite, test gövdesinin kayma deformasyonuna göre değişir ve kapasite değişikliği doğrusal olarak kabul edilir.



Şekil 11. (a) Serbest duran birbirine kenetlenmiş penye parmaklarının kapasitif değişimi, (b) τ kayma deformasyonu nedeniyle oluşan kapasitif değişim, (c) kesme ve gerinim ilişkisinin gösterimi

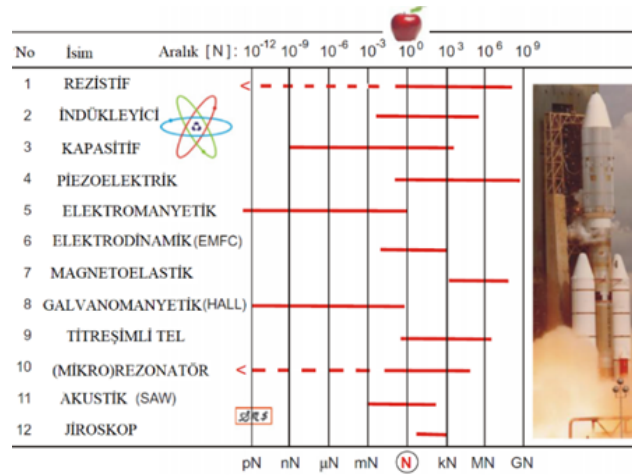
Şekil 11c'de görüldüğü gibi, ana gerinme yönü σ_1, σ_2 ile döndürülmüş bir koordinat sistemi $\sigma_\varphi, \tau_\varphi$ içindeki gerinim arasında bir ilişki bulunabilir. Burada σ kesme (yüzeye dik) ve τ ise gerinim (yüzeye paralel) olarak adlandırılır. Bu ilişki formül 4 ve 5 ile hesaplanmaktadır. [3].

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos(2\varphi) \quad (4)$$

$$\tau_\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin(2\varphi) \quad (5)$$

4. Kapasitif Kuvvet Dönüştürücülerin Kullanım Alanları, Uygulamaları, Avantaj Ve Dezavantajları

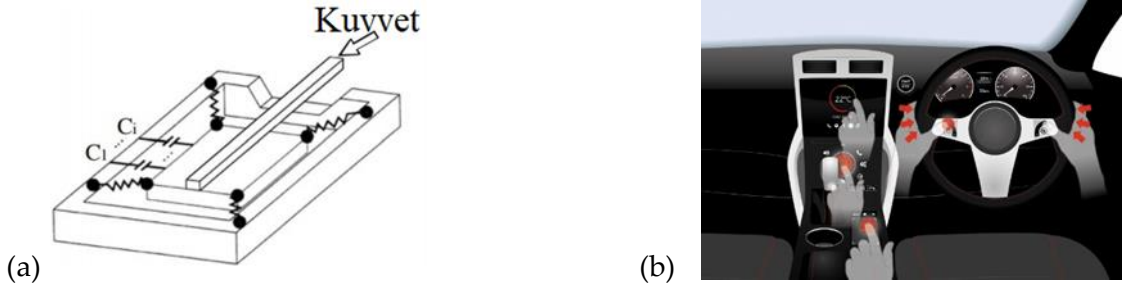
Kapasitif kuvvet dönüştürücülerin küçük kuvvet ölçümleri alanında çok fazla kullanım alanı mevcuttur. Şekil 12'de görüldüğü gibi kapasitif tip kuvvet dönüştürücüler 103 N ile 10⁻⁹ N aralığında ölçüm yapabilmektedir. Kapasitif dönüştürücüler, tüm elektrikli dönüştürücüler arasında son derece yüksek hassasiyet ve çözünürlükleri, büyük bant genişliği, sağlamlığı ve sapsız ölçüm yeteneği ile bilinirler. Kapasitif dönüştürücüler şiddetli ortamlarda (yüksek sıcaklık ve manyetik alanlar) ve aynı zamanda çeşitli müdahalesiz uygulamalarda kullanılabilirler. Bazı kullanım alanlarına dair örnekler aşağıda verilmiştir [7].



Şekil 12. Kuvvet dönüştürücülerinin ölçüm prensiplerine göre ölçüm aralıklarının gösterimi

Birbirine bağlı elektrotlu kapasitif kuvvet dönüştürücülerin çalışma prensibini ele alan değişken kapasitans tipli dönüştürücü şekil 13a'da görülmektedir. Yapay döllene için yumurta hücrelerinin intrasitoplazmik sperm enjeksiyonu sırasında ve ayrıca kuvvet aralığında (1...500) µN (mikronewton) olan diğer biyomedikal uygulamaların penetrasyon kuvvetini de ölçmek için tasarlanmıştır (Şekil 13a). MEMS tabanlı dönüştürücü, on adet sayısallaştırılmış (tarama parmaklı) kapasitör ile birleştirilmiş bükülme ve burulmaya maruz kalan esnek kirişlerden oluşan bir sistem kullanarak üç eksenli kuvvetleri ölçerler [3].

Arabalardaki ekranlarda (Şekil 13b) veya ATM'lerde olduğu gibi günümüzde kullanılan dokunmatik ekranların çoğunda ortak olan kapasitif dokunmatik teknolojisini kullanılır. Geniş kullanımına rağmen, kapasitif dokunmatik ekranların birçok dezavantajı vardır ve bunların çoğu otomotiv ortamında daha sorunlu hale gelir. Buna çözüm olarak bir başka yaklaşım da kapasitif kuvvet sensörleri ve dönüştürücüleridir [8].



Şekil 13. (a) Yapay dölleme üç eksenli kuvvetleri ölçmek için on adet birbirine bağlı kapasitör ve (b) Araç ön konsolu

Bu örneklerin yanı sıra jet motorlarının itme kuvvetinin test edilmesi, tekerlekler ve alt takım üzerindeki yükün ölçülmesi, petrol ve gaz sondaj aletleri üzerindeki kuvvetlerin ölçülmesi, çiftçilik, denizcilik, inşaat, taşımacılık gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bir aracın fren kuvvetini veya vites kolundaki burulmayı test ederken kapasitif kuvvet dönüştürücüsü ve çok eksenli sensör de kullanılmaktadır [9].

Kapasitif kuvvet dönüştürücülerin avantajları ve dezavantajlarından bazıları Tablo 3'de verilmiştir [10].

Tablo 3. Kapasitif kuvvet dönüştürücülerin avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Bu dönüştürücüler yüksek giriş empedansı sunar.	Yüksek çıkış empedansı değerinden dolayı çıkışı ölçmek için karmaşık bir devre gereklidir
Bu dönüştürücülerin frekans yanıtı son derece yüksektir.	Bu dönüştürücüler, kenar etkileri nedeniyle doğrusal olmayan davranışlar sergiler.
Bu dönüştürücüler oldukça hassastır.	Dış sıcaklık değeri bu dönüştürücü kapasitans değerini etkileyebilir.
Bu dönüştürücüler çalıştırmak için düşük güç yeterli olacaktır.	Dönüştürücülerin metalik kısımları yalıtım gerektirir.
Bu dönüştürücüler kullanılarak yüksek çözünürlük mümkün olabilir.	Kapasitörün çerçevesi, başboş manyetik alanın etkisini azaltmak için topraklama gerektirir.

SONUÇ

Kapasitif kuvvet dönüştürücülerini temel olarak uygulanan bir kuvvet sonucunda meydana gelen, iki kondansatör arasındaki değişimi algılayıp, elektriksel bir sinyale dönüştüren cihazlardır. Bu cihazların çeşitlerini sağlayan ana faktörler, farklı kondansatör tipleri ve uygulama mekanizmalarıdır. Bu etkenlerin değişimine göre sensörlerin çeşitleri ve buna bağlı olarak kullanım alanları değişmektedir. Kapasitif dönüştürücüler elektrikli dönüştürücüler arasında en hassas olanıdır. Geniş bant genişliği, sağlamlığı, kararlılığı ve sapmasız ölçüm yetenekleri ile şiddetli ortamlarda (yüksek sıcaklık, manyetik alanlar ve radyasyon) yanı sıra çeşitli temassız veya müdahalesiz uygulamalarda kullanılabilirler.

Bu çalışmada, değişken kapasitif prensibi ile çalışan kapasitif kuvvet dönüştürücülerin yapıları, çalışma prensibi ve kullanım alanları paylaşılmıştır. Bu çalışma ile kapasitif kuvvet ölçme cihazları ile ilgili uygulama ve araştırmalar için bir rehber doküman oluşturulması amaçlanmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Aydemir B. (2021), Kuvvet Kalibrasyon Rehberi, TÜBİTAK UME, Eylül 2021
- [2] Stefanescu D. M., Anghel M. A., (2013), "Electrical methods for force measurement – A brief survey", Measurement 46, 949–959
- [3] Stefanescu, D. M. (2011), Handbook of Force Transducers, Berlin: Springer-Verlag.
- [4] Usher, M.J., Keating, D.A., (1996), Sensors and Transducers – Characteristics, Applications, Instrumentation, Interfacing, 2nd edn. MacMillan, Houndmills.
- [5] Aydemir B., Dizdar H., Vatan C., (2017), "Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı", G2KV-010, TÜBİTAK UME, Gebze-Kocaeli, Aralık 2017.
- [6] Meckes, A., Aigner, R., Dorfinger, G., Wachutka, G.: Capacitive silicon microsensor for force and torque measurement. In: Int'l Conf. Transducers XI and Eurosensors XV, Munich, Germany, June 10-14, Paper 2A3.05 (2001)
- [7] Aydemir B., Ayan E., Elmas B.S., Dizdar H., (2019). "Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Yapısı, Avantajları ve Kalibrasyonu", 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress, (IMSEC 2019), Alanya Antalya/Turkey, Nisan 2019, p. 1054-1060
- [8] <https://www.baumer.com/> (Ziyaret Tarihi: 3 Eylül 2021)
- [9] Altınok M., Aydemir, B, Gülen A.U, (2020), Elektro Manyetik Kuvvet Ölçme Cihazı Yapısının ve Kullanım Yerlerinin İncelenmesi, 5th International Mediterranean Science and Engineering Congress, (IMSEC 2020) April 20-22, 2020, Alanya Antalya/Turkey
- [10] Altınok M., Aydemir, B, Gülen A.U, (2020), Manyeto Elastik Kuvvet Ölçme Cihaz Yapılarının İncelenmesi, 5th International Mediterranean Science and Engineering Congress, (IMSEC 2020) April 20-22, 2020, Alanya Antalya/Turkey