



Geçmişten Günümüze Gaz Basınç Sensörleri “Piezorezistif Sensörler Üzerine Bir Derleme”

Yasin ARSLAN^{1*} , Gülşah DEMİRHAN AYDIN¹ , Deniz KARAÇOR¹ , Nuri AKGÜN¹

¹Baskent University, Institute of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey,

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 19/01/2025
Düzeltilme: 17/05/2025
Kabul: 18/05/2025

Anahtar Kelimeler

Basınç Sensörleri
Piezorezistif
MEMS

Article Info

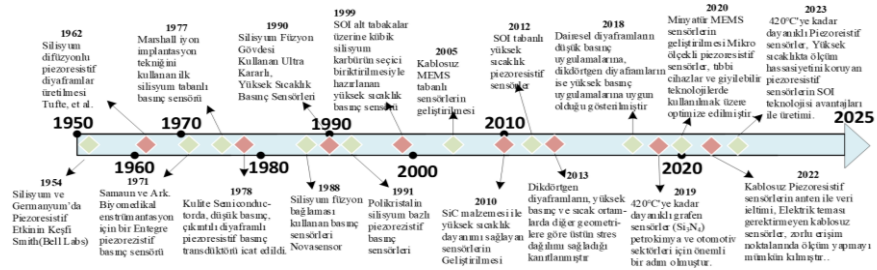
Review article
Received: 19/01/2025
Revision: 17/05/2025
Accepted: 18/05/2025

Keywords

Pressure Sensor
Piezoresistive
MEMS

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Çalışma geçmişten günümüze gelen basınç sensörlerini araştırıp bunların içinden yaygın kullanılan piezorezistif basınç sensörlerinin tarihini inceleyen ve gelişim yolunu takip eden bir derlemedir. Bu çalışmada uygulama alanlar fabrikasyon süreçleri de aktarılmaya çalışılmıştır. / The study is a compilation that investigates pressure sensors from the past to the present and examines the history of the widely used piezoresistive pressure sensors and follows the development path. In this study, application areas and fabrication processes are also tried to be conveyed.



Şekil A: Piezoresistif Basınç Sensörlerini Geçmişten günümüze gelişim süreçleri zaman akışı. /

Figure A: Piezoresistive Pressure Sensors Time flow of development processes from past to present.

Önemli Noktalar (Highlights)

- **Tarihsel Gelişim (Historical Development):** Gaz basınç sensörlerinin 1600'lerden günümüze uzanan tarihsel gelişimi, piezorezistif sensörlerin doğuşu ve MEMS teknolojisinin katkısı ayrıntılı şekilde incelenmiştir. / The historical evolution of gas pressure sensors from the 1600s to the present, including the emergence of piezoresistive sensors and the contributions of MEMS technology, has been examined in detail.
- **Piezorezistif Sensörlere Odak (Focus on Piezoresistive Sensors):** Makale, piezorezistif basınç sensörlerini hem malzeme seçimi hem de üretim süreçleri açısından detaylandırarak öne çıkarmaktadır. Yüksek sıcaklık ve Zorlu ortamlar için geliştirilen dayanıklı sensör çözümleri. / The article highlights piezoresistive pressure sensors in detail, focusing on material selection and fabrication processes.
- **Malzeme ve Diyafram Tasarımı (Material and Diaphragm Design):** Diyafram geometrisi (örneğin dikdörtgen diyafram) ve kullanılan malzemelerin sensör performansına etkileri kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. / The impact of diaphragm geometry (e.g., rectangular diaphragm) and materials used on sensor performance has been comprehensively analyzed.

Amaç (Aim): Piezorezistif gaz basınç sensörlerinin tarihsel gelişimini ve üretim süreçlerini inceleyerek mühendis ve akademisyenler için sensör seçimine rehberlik etmek amaçlanmıştır. / This study aims to guide engineers and academics in sensor selection by examining the historical development and fabrication processes of piezoresistive gas pressure sensors.

Özgünlük (Originality): Bu çalışma, gaz basınç sensörlerinin tarihçesini ve modern uygulamalarını tek çatı altında toplayan nadir derlemelerdendir. / This review uniquely combines the historical journey and modern applications of gas pressure sensors in one article.

Bulgular (Results): MEMS teknolojisi ile minyatürleşen piezorezistif sensörlerin zorlu koşullarda daha dayanıklı ve hassas hale geldiği görülmüştür. / Piezoresistive sensors miniaturized by MEMS technology are found to be more durable and accurate in harsh conditions.

Sonuç (Conclusion): Piezorezistif basınç sensörlerinin MEMS teknolojileri ve yeni nesil malzemelerle entegrasyonu, Endüstri 4.0 ve yapay zekâ desteğiyle mühendislerin sensör seçim ve geliştirme süreçlerini kolaylaştırarak sanayi, otomotiv ve havacılıkta geniş kullanım potansiyeli sunar. / The integration of piezoresistive sensors with MEMS and next-generation materials, supported by Industry 4.0 and AI, streamlines sensor selection and development while offering broad application potential in industry, automotive, and aerospace.



Geçmişten Günümüze Gaz Basınç Sensörleri “Piezorezistif Sensörler Üzerine Bir Derleme”

Yasin ARSLAN^{1*} , Gülşah DEMİRHAN AYDIN¹ , Deniz KARAÇOR¹ , Nuri AKGÜN¹

¹Baskent University, Institute of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara, Turkey,

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 19/01/2025
Düzeltilme: 17/05/2025
Kabul: 18/05/2025

Anahtar Kelimeler

Basınç Sensörleri
Piezoresistif
MEMS

Özet

Çalışmamız, endüstri, havacılık ve uzay, iklimlendirme, otomotiv ve biyomedikal alanlarında kullanılan gaz basınç sensörlerine odaklanmaktadır. Basınç sensörlerinin tarihsel gelişimi ele alındıktan sonra, sensörler iki ana başlık altında incelenmiştir: mekanik temelli sensörler ve modern teknolojilerle geliştirilen sensörler. Derleme makalemizin odağı, piezorezistif basınç sensörleridir; çünkü bu sensörler, yaygın kullanım alanlarının yanı sıra, malzeme ve üretim teknolojilerindeki gelişmelerin ışığında birçok geliştirme çalışmasına konu olarak bugün sahip oldukları üstün özelliklere ulaşmıştır. Sıcaklık değişimlerine karşı direnç göstermeleri, ölçüm sonuçlarının zamana bağlı stabilitesini korumaları, geniş basınç ve sıcaklık aralıklarında kullanılabilir hale gelmeleri, bu sensörlerin öne çıkan niteliklerindendir. Bu sensörlerin fabrikasyon ve tasarım süreçleri, kullanılan malzemeler ve tarihçeleri üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Ayrıca, piezorezistif sensörlerin kullanım alanları ve performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bilgiler, mühendislerin ve akademisyenlerin basınç sensörü seçimlerini kolaylaştıracak ve çalışmalarını hızlandıracaktır. Makalede, piezorezistif gaz basınç sensörlerinin temel özellikleri, tasarımları ve kullanım alanları ele alınacak, ayrıca gelecekteki gelişmeleri hakkında öngörüler sunulacaktır. Farklı sensör tipleri arasında yapılan kıyaslamalarla, bu sensörlerin çeşitli uygulamalardaki etkileri değerlendirilmiştir.

Gas Pressure Sensors From Past to Present: “A Review On Piezoresistive Sensors”

Article Info

Review article
Received: 19/01/2025
Revision: 17/05/2025
Accepted: 18/05/2025

Keywords

Pressure Sensor
Piezoresistive
MEMS

Abstract

Our study focuses on gas pressure sensors used in industries, aerospace, HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning), automotive, and biomedical fields. After discussing the historical development of pressure sensors, the sensors will be examined under two main categories: mechanical-based sensors and sensors developed with modern technologies. The focus of our review article is on piezoresistive pressure sensors, as these sensors have not only widespread applications but have also reached their superior characteristics today due to ongoing developments in materials and manufacturing technologies. Their resistance to temperature variations, stability of measurement results over time long-term stability of measurements, and ability to operate in a wide range of pressure and temperature conditions are some of the key features that make these sensors stand out. A comprehensive literature review has been conducted on the fabrication and design processes of these sensors, the materials used, and their history. Additionally, the applications and performances of piezoresistive sensors have been thoroughly analyzed. This information will facilitate pressure sensor selection for engineers and academics, accelerating their work. The paper will cover the basic features, designs, and applications of piezoresistive gas pressure sensors, as well as provide insights into future developments. By comparing different sensor types, the impacts of these sensors in various applications will be evaluated.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojik gelişmeler, sensör sistemlerinin duyarlılığını ve hızlı yanıtını artırmış, aynı zamanda ortam koşullarının etkilerini azaltan çözümler sunmuştur. Basınç sensörleri de bu ilerlemeler

sayesinde daha küçük, hassas ve zorlu koşullarda bile doğru ölçüm yapabilme yeteneği kazanmıştır [1]. Basınç sensörleri, endüstri, aviyonik, savunma, otomotiv ve tıp gibi çeşitli sektörlerde hem hassas ölçümler sağlar hem de kontrol sistemleri için kritik öneme sahiptir [1], [2]. Özellikle gaz basınç

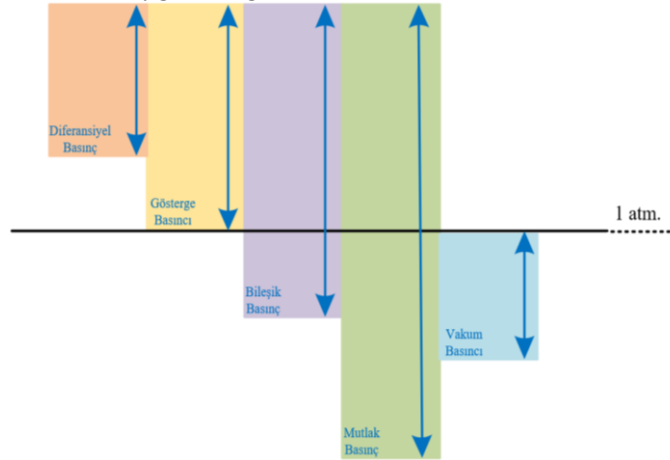
sensörleri, bu alanlardaki süreçlerin güvenliği ve verimliliği için temel bir rol oynamaktadır [3]. Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) teknolojisine dayalı basınç sensörleri, düşük maliyet ve yüksek performans talebiyle ana akım olmuştur [2]. Piezorezistif sensörler, kapasitif ve rezonans tiplerine göre daha az maliyetli üretim, daha yüksek üretilebilirlik ve elektronik sinyal işleme ile daha kolay entegrasyona sahiptir [1], [4], [5]. Bu çalışmanın amacı, basınç sensörlerini tanımak ve günümüzde kullanılan gaz basınç sensörlerinden piezorezistif gaz basınç sensörünün fabrikasyon ve tasarım süreçlerinin anlaşılmasını sağlamaktır. Bu derleme makalesi, piezorezistif gaz basınç sensörlerinin önemini ve gelişim süreçlerini okuyuculara aktarmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, basınç ölçümü gerektiren çalışmalarda uygun sensörün seçimini kolaylaştıracak bir rehber niteliğinde olması hedeflenmiştir. Piezorezistif gaz basınç sensörleri teknolojisinin MEMS ile birleştiğinde sunduğu esneklik ile tasarım optimizasyonunun sağladığı verimlilik avantajı, sürdürülebilir ve düşük maliyetli çözümler sunarak endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda çalışmamız, özellikle havacılık ve uzay sektörlerinde piezorezistif MEMS basınç sensör teknolojisinin nasıl uygulandığını ve

sağladığı avantaj ve dezavantajları değerlendirmektedir. Bu çalışma, bu teknolojilerin gelecekteki entegrasyon potansiyelini ortaya koyarak, daha verimli ve yenilikçi üretim süreçleri geliştirme konusundaki önemini vurgulamaktadır.

2. BASINÇ SENSÖRLERİ (PRESSURE SENSORS)

2.1. Basınç Sensörlerine Genel Bakış (Overview of Pressure Sensors)

Basınç sensörü, algıladığı kuvveti uygulanan basıncın gücüne dönüştürerek elektriksel bir çıkış sinyali üretir; mekanik bir sistem ise basınç değerini ölçeklendirilmiş göstergelerindeki ibreler aracılığıyla göstermektedir. Basınç ölçümünde anlaşılması gereken bazı temel terimler vardır (Şekil 1). Gösterge Basıncı, yerel atmosfer basıncına göre ölçülen basınçtır. Mutlak Basınç, her yerde aynı olan, vakum referansına göre ölçülen basıncı ifade eder. Diferansiyel Basınç, borulardaki sıvı veya gaz akışını ölçmek için iki nokta arasındaki farkı belirtir. Vakum Basıncı, yerel atmosferik basınçtan daha düşük değerleri ölçer. Bileşik Basınç ise hem pozitif hem negatif basıncı ölçebilen sensörlerle ilgilidir [6].



Şekil 1. 1 atm. (atmosfer basıncı)'ye göre Basınç ölçüm metotları [6]. (According to 1 atm. (atmospheric pressure)

Pressure measurement methods)

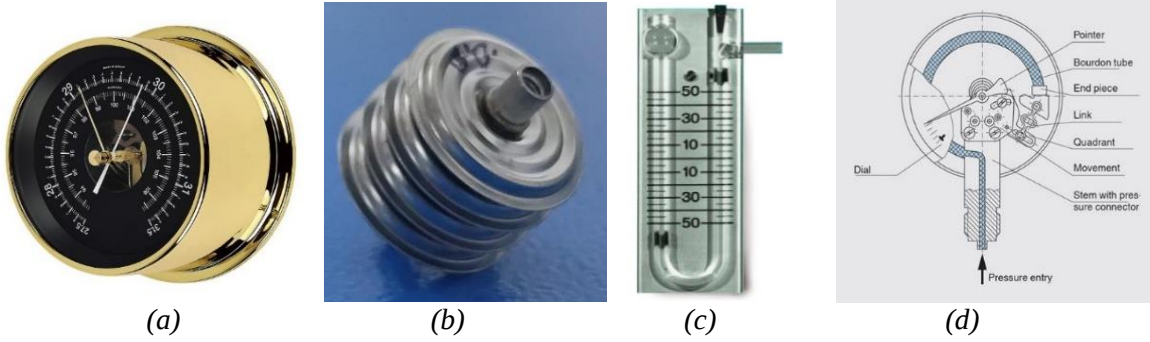
2.2. Tarihçe (History)

Basınç sensörlerinin tarihçesi 1600'lü yıllara dayanmaktadır. İlk basınç sensörü olarak İtalyan fizikçi ve matematikçi Evangelista Torricelli'nin icat ettiği barometreyi gösterebiliriz [7] Takip eden yüzyıllarda, Fransız mühendis ve mucit Lucien Vidi Aneroid Barometreyi geliştirmiştir [7]. 1848 yılında Ernst Schaeffer, bir diyafram tipi manometreyi geliştirmiştir ve 1849 yılında Fransız mühendis Eugene Bourdon kendi adını verdiği basınç sensörü Bourdon tüpünü icat etmiştir [7]. 1940'ta Hans Hintze ve Hans Illgen (Zeiss Ikon AG), yanmalı

motorların pistonlarındaki basıncı ölçmek için piezoelektrik basınç göstergesini geliştirmiştir [8]. 1950'lerde MEMS teknolojisinin ilk adımlarıyla birlikte basınç sensörleri de minyatürleşme başlamış ve halen devam etmektedir. 1954'te C. S. Smith, silisyum (Si) ve germanyum (Ge) gibi yarı iletken malzemelerde piezodirenç etkisini keşfetmiş, bu malzemelerin basıncı metalden daha iyi algıladığını göstermiştir [8], [9]. 1959'da İlk Si basınç sensörünün Kulite tarafından tanıtılmıştır [8], [9]. 1970'lerde, IBM araştırma laboratuvarından Kurt Peterson tarafından Si diyafram kullanan mikro işlenmiş bir basınç sensörü geliştirilmiştir.

Bu ince diyaframlı basınç sensörleri, mikrosistem cihazlarının en eski ticari başarılarından biri olarak kabul edilebilecek kan basıncı izleme cihazlarında yaygınlaşmıştır [9]. 1982 yılında tek kullanımlık kan basıncı dönüştürücü Honeywell şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir. 1983 yılında Entegre basınç sensörü Honeywell tarafından ve 1988 yılında plaka bağlama yoluyla seri olarak üretilen basınç sensörleri Nova Sensor tarafından geliştirilmiştir [9].

Bu tarihsel ilerlemeler, basınç sensörlerindeki gelişimi hızlandırmıştır. Özellikle MEMS yapılarının ve teknolojilerinin ilerlemesi, farklı türde basınç sensörlerinin gelişimini de tetiklemiştir. Makalenin “Piezorezistif Basınç Sensörleri” başlığı altında, bu yapıdaki sensörlerin gelişimi detaylı bir şekilde ele alınmıştır.



Şekil 2. (a) Aneroid Barometre, (b) Aneroid barometre içindeki metal kapsül, (c) U Tip Manometre ve (d) Bourdon tüpü. ((a) Aneroid Barometer, (b) Metal capsule inside the aneroid barometer, (c) U Type Manometer and (d) Bourdon tube.)

3.1.2. Manometre Basınç Sensörleri (Manometer Pressure Sensors)

Manometre basınç sensörleri, basit bir tasarım yapısına sahip olmalarına rağmen, aneroid barometrik basınç sensörlerinden daha yüksek hassasiyete sahiptirler. Cam tüp içindeki sıvının hareketi, iki yüzey arasındaki basınç farkını ölçmektedir. En yaygın manometre sensörü U şeklindedir (Şekil 2 (c)) ve basınç, tüpün bir tarafına uygulandığında sıvının seviyesindeki değişiklik basınç seviyesini göstermektedir. Bu sensörler genellikle laboratuvar ekipmanlarını kalibre etmek için kullanılır, ancak yavaş tepki hızına ve sınırlı basınç aralığına sahiptirler, bu nedenle dinamik basınç algılamada etkili değildirler [7].

3.1.3. Bourdon Tüpü Basınç Sensörleri (Bourdon Tube Pressure Sensors)

Bourdon tüpü basınç sensörleri (Şekil 2 (d)), aneroid barometrelerle benzer şekilde çalışmakta ancak içi boş kapsül yerine sarmal veya C şeklinde

3. BASINÇ SENSÖRLERİ TÜRLERİ VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ (TYPES AND WORKING PRINCIPLES OF PRESSURE SENSORS)

3.1. Mekanik Sensörler (Mechanical Sensors)

3.1.1. Aneroid Basınç Sensörleri (Aneroid Pressure Sensors)

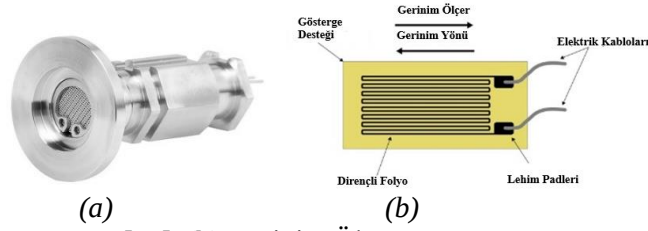
Aneroid barometrik basınç göstergesi (Şekil 2 (a)) basıncı ölçmek için kullanılan tamamen mekanik cihazlardır ve atmosferik değişikliklere tepki olarak şekil değiştiren esnek bir metal kapsül (Şekil 2(b)) içermektedir [7]. Genellikle uçaklarda ve çevresel uygulamalarda kullanılan bu kompakt ve dayanıklı sensörler, basınç algılama elemanlarının kütlesi nedeniyle dinamik basınç uygulamalarında sınırlı etkiye sahiptirler.

bir algılama elemanına sahiptirler. Gösterge ve diferansiyel sensörler olarak kullanılan Bourdon tüpleri, sağlamlıkları ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilirken, mekanik yapıları sebebiyle şok ve titreşime karşı hassas olmalarından dolayı düşük basınçlı hassas ölçümler için önerilmemektedirler [7].

3.2. Modern Sensörler (Modern Sensors)

3.2.1. Vakum Basınç Sensörleri (Vacuum Pressure Sensors)

Vakum teknolojisi, doğal bilimler ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli araştırma ve endüstriyel alanlarda kullanılır [10]. Mekanik basınç sensörleri genellikle kuvvet ölçmekteyken, düşük atmosferik basınçlarda malzeme etkilerini gözlemleyen vakum basınç sensörleri devreye girmektedir. Özellikle düşük vakum aralıklarını ölçen Pirani sensörü, ısıtılmış filamanının direncini ölçerek çalışmaktadır (Şekil 3(a)). Bu direnç, çevresel vakum basıncına bağlı olarak değişmekte ve elektrik devresine bağlanarak basınç değeri olarak tayin edilmektedir.



Şekil 3. (a) Vakum basınç sensörü [11], (b) Gerinim Ölçer Basınç sensörü. (a) Vacuum pressure sensor [11], (b)

Strain gauge Pressure sensor)

3.2.2. Gerinim Ölçer Basınç Sensörleri (Strain Gauge Pressure Sensors)

Gerilim ölçer basınç sensörleri (Şekil 3(b)), ilk olarak 1952 yıllarında Peter George Scott Jackson tarafından icat edilmiştir [8]. Temel prensibi, bir yayın boyutlarında meydana gelen genişleme veya daralmayı kullanarak basınç ölçülmesidir. Uygulanan kuvvetle yay deforme olur, bu da direncin dalgalanmasına ve voltajın elektrik sinyallerine dönüşmesine neden olur. Bu sinyaller, basınç değerlerine dönüştürülerek görüntülenir. Bu sensörler, araçlar, gemi gövdeleri, barajlar ve petrol platformları gibi yapıların uzun vadeli tork, gerilim ve sapma gibi özelliklerini izlemek için kullanılmaktadır.

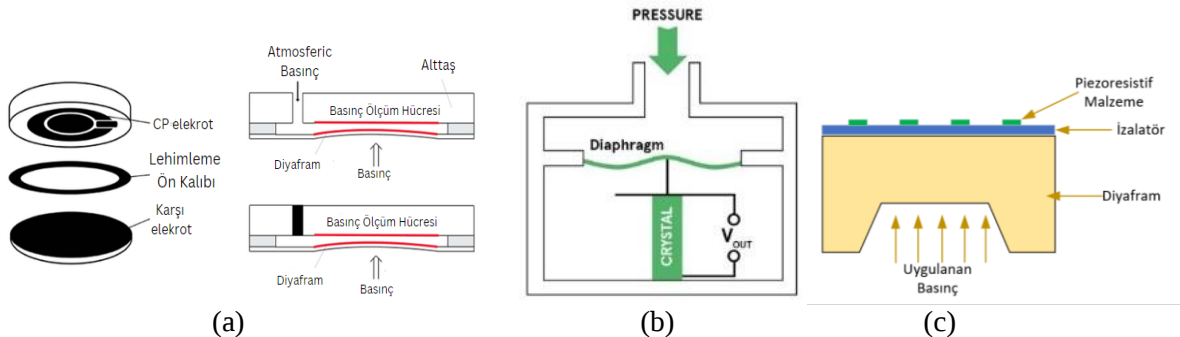
3.2.3. Kapasitif Basınç Sensörleri (Capacitive Pressure Sensors)

Kapasitörler elektrik yükünü depolamak için kullanılan komponentlerdir. Aralarında yakın bir boşlukla ayrılmış iki iletkenle çalışmaktadır. Çoğu kapasitif basınç sensörü de benzer yapıdadır, iki elektrot plakası arasına sıkıştırılmış bir dielektrik tabaka ile karakterize edilen paralel plaka kapasitörleri olarak üretilmektedir [12]. Sensör iki plaka arasındaki kapasitansı ölçmektedir. İki plaka arasındaki mesafe, çevredeki basınca göre değişen

kapasitans değerlerini belirlemektedir. Kapasitif basınç sensörü modeli Şekil 4 (a)'de gösterilmektedir. Kapasitif basınç sensörlerinin uygulamaları arasında jet motorları, araba lastikleri ve gemilerdeki basınç değişikliklerinin ölçülmesi yer almaktadır. Zorlu ortamlara dayanmalarını sağlayan basit bir mekanik tasarıma sahiptirler.

3.2.4. Piezoelektrik Basınç Sensörleri (Piezoelectric Pressure Sensors)

Piezoelektrik basınç sensörleri (Şekil 4(b)), hızlı tepki süresi, yüksek yer değiştirme çözünürlüğü ve düşük ısı üretimi gibi özellikler sayesinde, hassas hareketlerin gerektiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensörler, kuvvet uygulandığında piezoelektrik malzemeden elektrik yükü üretme kabiliyetine sahip olup, bu özellik geniş basınç seviyelerinde yüksek voltaj çıkışları sağlamaktadır. Ayrıca, harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymayan yapıları ile enerji verimli ve kompakt tasarımları mümkün kılmaktadır, bu da onları zorlu çevre koşullarında bile dayanıklı ve uzun ömürlü yapmaktadır. Bu avantajlar, piezoelektrik basınç sensörlerini hem endüstriyel hem de bilimsel uygulamalar için ideal bir tercih haline getirmektedir.



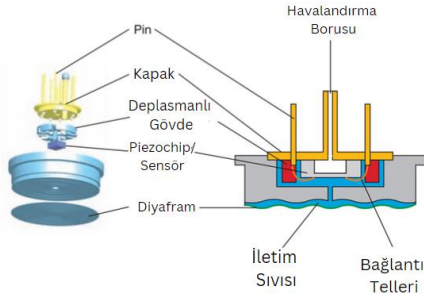
Şekil 4. (a) Kapasitif basınç sensörü modeli, (b) Piezoelektrik Basınç sensörü [13], (c) Piezoresistif sensör katman gösterimi. (a) Capacitive pressure sensor model, (b) Piezoelectric pressure sensor [13], (c) Piezoresistive sensor layer representation.)

3.2.5. Rezonans Basınç Sensörleri (Resonant Pressure Sensors)

Yarı dijital çıkışları, üstün kararlılıkları ve yüksek sinyal-gürültü oranları (SNR - Signal-to-Noise Ratio) ile rezonans basınç sensörleri, piezorezistif ve kapasitif basınç sensörlerine kıyasla daha yüksek hassasiyet ve uzun vadeli stabilite sunmaktadır. Bu sensörler, basıncı mekanik rezonans frekansındaki değişimle ölçerek frekans tabanlı bir çıkış üretir. Frekans tabanlı bu çıkış, dijital sistemler tarafından doğrudan işlenebilir olduğu için 'yarı dijital' olarak adlandırılmaktadır.

Bu özellikleri sayesinde rezonans basınç sensörleri, havacılık, endüstriyel kontrol sistemleri ve ölçüm cihazlarının kalibrasyonu gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda bu sensörler üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiş olup, MEMS üretim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte silisyum ve kuvars bazlı varyantlar önerilmektedir. Ancak, ticari kullanım açısından silisyum rezonatör bazlı basınç sensörlerinin piyasada yaygın olarak bulunabilirliği halen sınırlıdır [14].

3.2.6. Piezorezistif Basınç sensörleri (Piezoresistive Pressure Sensors)



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. (a) Piezorezistif sensör, (b) Metal diyaframlı Piezorezistif Basınç sensörü ve (c) Diferansiyel

Piezorezistif Basınç Sensörü. ((a) Piezoresistive sensor, (b) Piezoresistive Pressure sensor with metal diaphragm and (c) Differential Piezoresistive Pressure Sensor.)

Atmosferik basınç sensörleri (Şekil 5 (b), Şekil 6 (a)) adından da anlaşıldığı üzere atmosferik basıncı referans olarak kullanmaktadır. Mutlak basınç sensörlerinde (Şekil 6 (b)), sensör içerisindeki referans bölge vakumlanır, bu kısım vakumlandığından dolayı ölçüm oluşan vakuma göre yapılmaktadır. Ancak teknolojik sınırlamalar nedeniyle “mutlak vakum” oluşturulamaz [15]. Diferansiyel basınç sensörleri (Şekil 5 (c), Şekil 6 (d)) ise iki giriş portu arasında fark basıncı ölçer diğer sensör türlerine göre daha karmaşıktır ve

Piezorezistif basınç sensörlerinde (Şekil 4(c)), diyaframa uygulanan mekanik basınç, mekanik stres oluşturur ve gerilme meydana gelir. Bu gerilme malzemenin elektrik direncindeki değişimine dayanan ve piezorezistör etkisini kullanarak çalışan önemli sensörlerden biridir [15]. Piezorezistif sensörler, basınç değişikliklerini direnç değişimleri aracılığıyla ölçerek farklı uygulama alanlarında geniş bir kullanım bulmaktadır. Ana odağımız olan bu sensör tipi detaylı olarak 4. başlık altında anlatılacaktır.

4. PIEZOREZİSTİF BASINÇ SENSÖRLERİ (PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSORS)

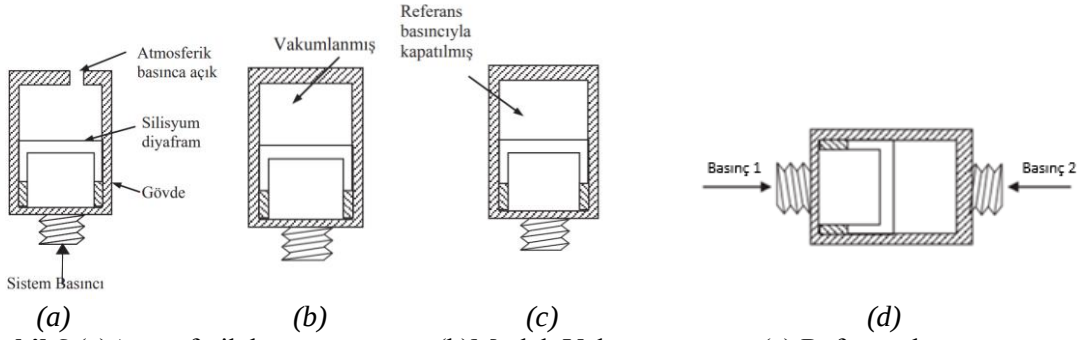
Gelişmiş mikro işlenmiş basınç sensörlerinin modellenmesi, tasarımı ve üretimi konusundaki çalışmalarda piezorezistif, kapasitif, optik, rezonans ve akustik transdüksiyon prensipleri literatürde detaylı bir şekilde incelenmiştir [16]. Bu prensipler arasında, piezorezistör ve kapasitif transdüksiyon mekanizmaları genellikle tercih edilen ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak benimsenen yöntemlerdir. Piezorezistif basınç sensörü (Şekil 5 (a)) türleri mutlak basınç sensörleri, atmosferik basınç sensörleri ve diferansiyel basınç sensörleri şeklinde adlandırılmaktadır [15].

genellikle sınırlı uygulamalarda kullanılmaktadırlar [15].

Silisyum malzeme ve paketlenme ortamı, çevredeki sıcaklık değişimlerinden kolayca etkilenecek sensör çıkışında sıcaklık kaymasına neden olmaktadır. Günümüzde, sıcaklık kompanzasyonu için temel olarak donanım ve yazılım tabanlı yöntemler uygulanmaktadır. Donanım kompanzasyonu, karmaşık devre tasarımı gerektirmesi, hata ayıklama sürecinin zorlukları, düşük hassasiyet ve sınırlı uyumluluk gibi dezavantajlar nedeniyle

mühendislik uygulamalarında yeterince verimli olamamaktadır. Bu sebeple, pratik uygulamalarda

yazılım tabanlı kompanseasyon yöntemleri daha yaygın olarak tercih edilmektedir [17].



Şekil 6.(a)Atmosferik basınç sensörü, (b)Mutlak Vakum sensörü, (c) Referans basınç sensörü,

(d)Fark(diferansiyel) basınç sensörü, Paketlenmiş Basınç sensörünün basınç ölçümü için yapısal

gösterimleri. ((a) Atmospheric pressure sensor, (b) Absolute vacuum sensor, (c) Reference pressure sensor, (d) Differential pressure sensor, Structural representations of a packaged pressure sensor for pressure measurement.)

4.1. Temel Çalışma Prensipleri (Basic Working Principle)

Piezoresistif basınç sensörleri, genellikle silisyum malzemesinin piezoresistif etkisini kullanarak çalışmaktadır. Silisyumun atom düzeyindeki özellikleri, bu sensörlerin üretiminde avantaj sağlar ve mevcut silisyum fabrikalarının toplu üretim imkanlarından yararlanılabilir. Bu nedenle, birçok ticarileştirilmiş MEMS basınç sensörü, basınç değişikliklerini direnç değişiklikleri üzerinden ölçmek için piezorezistör transdüksiyon mekanizmasını kullanmaktadır [18]. Piezoresistif basınç sensörlerinin tasarımı, piezorezistör elemanlarının zarın üstüne yerleştirilmesini esas alır. Hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve sıcaklık sapması özellikleri, piezoresistif basınç sensörlerinin özellikle önemli performans göstergeleridir [1]. Hassas ölçümler yapabilmek için piezorezistör malzemesinin yerleşim konumu büyük önem taşır, özellikle maksimum stres bölgelerinde, sensör performansını doğrudan etkilemektedir [19]. Bu sensörler, Wheatstone köprüsü konfigürasyonunda piezorezistörlerin basınca duyarlı bir diyaframa bağlanmasıyla çalışır. Uygulanan basınç, diyaframın eğilmesine ve piezorezistörlerin direncinde değişikliğe yol açar. Bu direnç değişikliği, basınçla orantılı bir çıkış gerilimi olarak ölçülür [18]. Şekil 7 (a) ve (b)'de sırasıyla Wheatstone köprüsü yapısı ve sensör yerleşimi gösterilmiştir. Piezorezistif malzemenin direnci değiştiğinde, Wheatstone köprüsünün dengesi bozulur ve bir çıkış voltajı üretilir. Bu çıkış voltajı, sensörün direncindeki değişimle doğru orantılıdır ve sensörün kalibrasyonu yapılarak basınç değeri hesaplanabilir. Direnç değişimi eşitlik (1)'de gösterilmiştir.

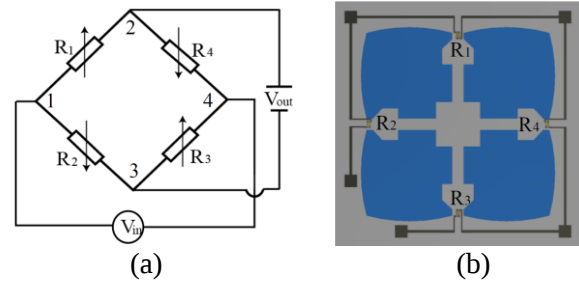
$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (1)$$

Burada, ρ bir piezorezistör malzemesinin direncidir, L uzunluğu ve A alanıdır. Wheatstone köprüsü, diyaframa monte edilir. Basınç diyaframa uygulandığında, basınca maruz kalan yönde kayma gerilmesini yaşar. Bu kayma sonrası piezoresistörleri gererek uzunluklarını artırır ve alanlarını azaltır. Eşitlik (1)'den, piezorezistörlerin direnci artar ve çıkış gerilimi düşer. Transdüksiyondaki basıncı hesaplamak için eşitlik (2) ve (3) kullanılır.

$$V_{out} = V_{in} \frac{\Delta R}{R} \quad (2)$$

$$S = \frac{\Delta V}{P_I - P_M} * \frac{1}{V_{in}} = \frac{\Delta V}{\Delta P * V_{in}} \quad (3)$$

Burada V_{in} uyarım voltajını; ΔV ise sensörün çıkışını tam ölçek temsil eder ve cihazın çıkış voltajındaki değişimi, P_I basıncından P_M basıncına kadar olan değişimi ifade eder [19].



Şekil 7. (a) Piezorezistif sensörün oluşturduğu

wheatstone devresi ve (b) örnek sensör görseli. ((a)

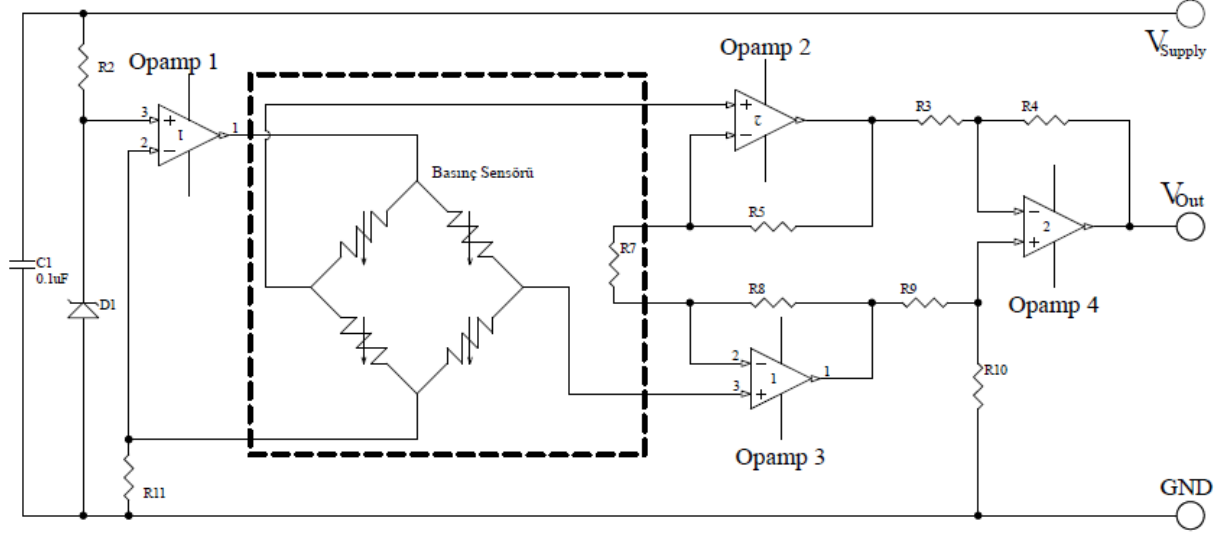
Wheatstone circuit generated by the piezoresistive sensor and (b) sample sensor image.)

Piezoresistif basınç sensörlerinin elektronik devrelerinde bir uyarım voltaj ya da akım devresiyle güç sağlanır (V_{Supply}). V_{Out} ise diferansiyel bir

analog çıkış vermektedir. Bu analog çıkışı ölçmek için diferansiyel analog okuma devresi kullanılmaktadır.

Şekil 8' de gösterilen devrede Basınç değıştikçe köprü devresi dengesiz hale gelir ve küçük bir diferansiyel voltaj üretir. Opamp(Operational

amplifier-İşlevsel yükselteç) 2 ve Opamp 3 bu küçük sinyali kuvvetlendirir. Opamp 4 son kazancı uygular ve işlenmiş gerilim çıkışına gönderir. V_{Out} çıkışı, basınca orantılı olarak değışir ve bir ADC (Analog to Digital Converter) veya diğer ölçüm sistemlerine iletilir.



Şekil 8. Piezoresistif basınç sensörü elektronik ölçümü için kullanılabilecek devre örneği. (Example of a circuit that can be used for electronic measurement of piezoresistive pressure sensor.)

4.2. Tarihsel Gelişim ve Yenilikler (Historical

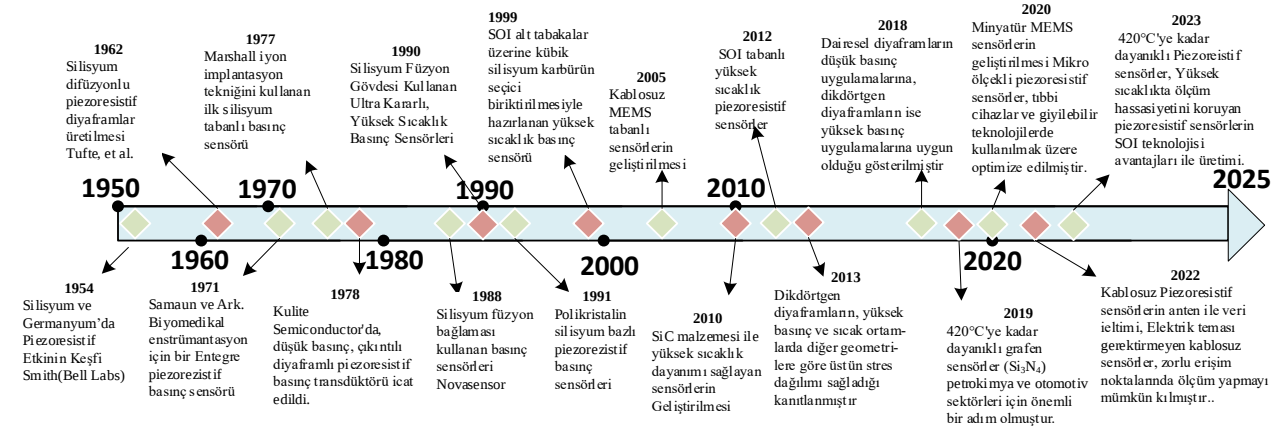
Development and Innovations)

Piezoresistif basınç sensörleri, C.S. Smith'in, 1954'te Si (Silisyum) ve Ge (Germanyum)'de piezorezistif etkiyi keşfetmesinin [20] ardından, 1962'de Tufte ve diğerleri silisyum difüzyonlu piezorezistif diyaframlar üretilip test edilmiştir. Bu, piezoresistif etkiyle çalışan ilk bütünleşik basınç sensörü örneği olmuştur [21]. 1967'de Stedman, çıkıntılı diyaframlı basınç sensörlerini geliştirmiştir [22]. Samaun ve arkadaşları, piezorezistörler yerleştirerek diyaframın hassasiyetini artıran anizotropik aşındırma yöntemiyle biyomedikal enstrümantasyon için entegre piezorezistif basınç sensörü geliştirmişlerdir [23]. 1970'lerde Kulite Semiconductor ve Honeywell, ticari entegre basınç sensörleri üretmeye başlamıştır. 1977'de Marshall, Honeywell'de iyon implantasyonu kullanarak ilk silisyum tabanlı basınç sensörünü patentlemiştir [22]. 1978'de Kurtz ve ekibi, Kulite Semiconductor'da, düşük basınç, çıkıntılı diyaframlı piezorezistif basınç transdüktörü icat etmiştir [22]. Clark ve Wise, ince diyafram silisyum sensörleri için elektrokimyasal denklemlerin türevlerini kullanarak hassas tasarımlar geliştirmiştir. Çözümler, mikro işlenmiş kare diyaframlarda uygulamalı anizotropik aşındırmaya uygun boyutsuz bir formda sunulmuştur [22]. MEMS teknolojisiyle bu sensörler küçülmüş,

hassasiyetleri artmış; tasarım, malzeme seçimi ve üretim süreçlerinde yenilikler yapılmıştır [24], [25]. Sensör malzemeleri, performansı artırmak ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Silisyum Karbür (SiC), yüksek sıcaklık ve radyasyon ortamlarında başarılı sonuçlar verirken [26], esnek malzemeler, giyilebilir teknolojiler ve biyomedikal cihazlar için optimize edilmesini sağlamıştır [27]. Yüksek sıcaklık uygulamaları için piezoresistif sensörler, SOI (Silicon-on-Insulator, yalıtkan üzerine silisyum) gibi yenilikçi malzemelerle donatılmıştır ve 300°C gibi yüksek sıcaklıklarda bile doğrusal yanıt ve hassasiyet sağlar. Bu otomotiv ve havacılık gibi alanlarda kullanımı için önemli bir rol oynamaktadır [28]. Grafen tabanlı sensörlerdeki Silisyum Nitrür (Si_3N_4) kaplamalar ise 420°C'ye kadar mükemmel performans göstererek termal kararlılığı artırmıştır [29]. Son gelişmeler, optoelektronik bileşenlerin piezoresistif sensörlerle entegrasyonunu mümkün kılarak veri aktarım hızını artırmış ve hassas ölçümlerde büyük avantaj sağlamıştır. Monolitik entegrasyon ise, sensörlerin elektronik devrelerle doğrudan uyumlu hale getirilmesini sağlamıştır [30], [31]. Piezorezistif etkilerin modellenmesi ve diyafram malzemesi optimizasyonu, diyaframın geometrik yapısı, hassasiyet ve doğruluk açısından önemli ilerlemeler sağlamıştır [32]. Kablosuz sensör tasarımları, rüzgar ve basınç ölçümlerinden tıbbi cihazlara

kadar geniş bir uygulama alanı sağlamaktadır [33], [34]. Kablosuz piezoresistif basınç sensörleri, zorlu erişim noktalarında ölçüm yapmayı kolaylaştırmak için geliştirilmiş, sandviç yapısı sayesinde elektrik teması gerektirmeyen bir tasarım sunarak verilerin kablosuz iletilmesini sağlamaktadır [35]. Esnek ve minyatür MEMS sensörler, düşük maliyetli ve kompakt çözümler sunarak günlük hayatta daha geniş kullanım alanı bulmuş [36], [37], esnek polimerik sensörler ise hafif ve dayanıklı tasarımlarıyla tıbbi cihazlar ve giyilebilir teknolojilerde yaygınlaşmıştır [36]. 600 °C'de

ortaya çıkan sıfır basınç çıkışındaki voltaj kaymalarının giderilmesine yönelik çalışmalar, piezorezistif silisyum karbür (SiC) basınç sensörlerinin güvenilirliğini artırarak hem kısa süreli motor testlerinde hem de uçuş testlerinde kullanımını mümkün kılmıştır [38]. Piezoresistif basınç sensörlerinin tarihsel gelişimi, malzeme bilimindeki yenilikler ve MEMS teknolojisinin sunduğu avantajlarla hız kazanmıştır. Piezoresistif basınç sensörlerinin gelişim sürecindeki önemli adımları Şekil 9'te kronolojik olarak gösterilmektedir.



Şekil 9. Piezoresistif Basınç Sensörlerini Geçmişten günümüze gelişim süreçleri zaman akışı. (

Piezoresistive Pressure Sensors Time flow of development processes from past to present.)

4.3. Malzemeler ve Tasarım Özellikleri (Materials and Design Features)

Piezorezistif basınç sensörün önemli bileşenleri diyafram ve piezorezistörlerdir [15]. Diyaframın kalınlık, genişlik ve geometrisi analiz edilerek optimum mekanik dayanıklılık ve hassasiyet sağlanmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Modeling, FEM) ile diyafram deformasyonu ve gerinim bölgelerinin modellenmesi önemlidir. İnce diyaframlar yüksek hassasiyet sunsa bile, mekanik dayanıklılığı azalmaktadır. Bu nedenle dengeli bir tasarım yapılmasının önemi literatürdeki çalışmalarda vurgulanmıştır [19], [28], [39]. Literatürde piezorezistörler maksimum gerinim bölgelerine yerleştirilmiş ve Wheatstone köprüsü ile entegre edilmiştir. Bu entegrasyon direnç değişimlerini hassas elektrik sinyaline dönüştürür. Farklı piezorezistif malzemeler, uygulama ve ortam koşullarına göre seçilmelidir; örneğin silisyum (Si), yalıtkan üzerine silisyum (SOI), safır üzerine silisyum (SOS), silisyum karbür (SiC), çelik, karbon nanotüpler (CNT), grafen ve elmas gibi [29], [40]. Malzemeler değişse de basınç algılama prensip aynıdır. Kullanılan malzeme, diyafram tasarımını belirleyerek, basınç sensörünün uygulama alanında önemli bir rol oynar [18].

Piezorezistif basınç sensörlerinde Young Modülü (E) ve Poisson oranı (ν) önemli özelliklerindendir [41]. Young modülü, piezorezistif yapı ile diyafram malzemesinin sertliğini belirler [18]. Poisson oranı (ν), bir malzemenin boyutlarının, özellikle genişlik ve yükseklik gibi özelliklerinin, uzama veya sıkıştırma sırasında nasıl değiştiğini tanımlar. Bu oran sensör elemanındaki gerilmeyi doğru şekilde ölçme yeteneğini etkileyebilir.

Tablo 1 çeşitli diyafram malzemelerinin özelliklerini listelemektedir. Tablo 2 çeşitli piezorezistif malzemelerinin özelliklerini listelemektedir. Piezorezistif sensörlerde diyafram tasarımı, hassasiyet ve doğruluğu artırmada kritik bir rol oynar. Dikdörtgen diyaframlar, yüksek basınç ortamlarında benzersiz stres dağılımı özellikleri yuvarlak diyaframların aksine, hassasiyet ve sıcaklık açısından daha etkili çalıştıkları kanıtlanmıştır [39], [42]. Piezorezistif basınç sensöründe çıkış sinyali Wheatstone köprüsünden gelir. Köprüdeki direnç dört yönde dağılmıştır. Çıkış sinyali (V_{OUT}) hesaplamak için eşitlik (4) kullanılır.

$$V_{OUT} = V_{IN} * (\Delta R/R) \quad (4)$$

Burada V_{OUT} çıkış gerilimini (V), V_{IN} giriş sinyali gerilimini (V), ΔR direncin değişimini ($k\Omega$) ve R direncin başlangıç değerini ($k\Omega$) temsil eder. Dirençlerin voltaj hassasiyetindeki değişim miktarı eşitlik (5)'te gösterildiği gibi ifade edilir:

$$\Delta R/R = (\pi_l * \sigma_l) + (\pi_t * \sigma_t) \quad (5)$$

Burada σ_l direncin iç kısmında akım yönlendirme ile paralel olan uzunlamasına stresi (N/m^2), σ_t akım yönlendirme ile dik olan enine stresi (N/m^2) ifade ederken, π_l uzunlamasına stresle aynı yönde, silisyumun uzunlamasına piezorezistör katsayısıdır (m^2/N), π_t ise enine stresle aynı yönde silisyumun enine piezorezistör katsayısıdır (m^2/N). Piezorezistör oryantasyonları silisyum levhanın

kristal yapısının düzenini tanımlar ve Miller indeksleri kullanılarak belirtilir. Yaygın yerleşim türleri arasında $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ yer alır. En yaygın düz yüzeyli ve yüksek kaliteli üretim için kullanılan $\langle 100 \rangle$ oryantasyonudur. $\langle 110 \rangle$ Oryantasyonlu silisyum kristalin farklı özelliklere sahip bir yüzeyi olduğunu temsil eder ve çoğu elektronik uygulamada kullanılır. $\langle 111 \rangle$ Oryantasyonu en düşük yüzey enerjisine sahiptir ve özel uygulamalar için tercih edilmektedir. Tablo 3, $\langle 110 \rangle$ silisyum alttaş (wafer) için piezorezistör katsayılarını göstermektedir [18]. Piezorezistif basınç sensöründe kullanılan malzemelerin avantaj, dezavantaj ve kullanım alanları Tablo 4'de verilmiştir. Şekil 10 (a)'da çeşitli malzemelere göre sıcaklık dayanımlarını göstermektedir.

Tablo 1. Çeşitli diyafram malzemelerinin özellikleri [18]. (Properties of various diaphragm materials)

	Materyal	Yoğunluk (kg/m^3)	Young modülü (GPa)	Poisson Oranı
1	Silisyum Di Oksit	2270	70	0.17
2	Polisilisyum	2320	169	0.22
3	Çelik (AISI 4340)	7850	205	0.28
4	Al_2O_3	3970	393	0.27
5	Si_3N_4	3310	317	0.23
6	Germanyum	5323	103	0.26
7	Al	2700	68	0.25
8	Cu	8960	130	0.34

Tablo 2. Çeşitli piezorezistif malzemelerinin özellikleri [18]. (Properties of various piezoresistive materials)

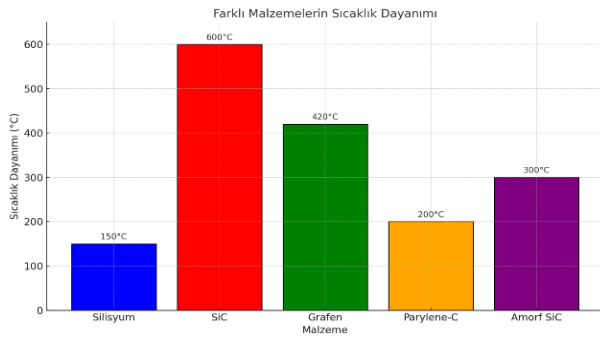
	Materyal	Yoğunluk (kg/m^3)	Young modülü (GPa)	Poisson Oranı
1	Tek Kristalli Silisyum (n,p tipi)	2329	168	0.24
2	Karbon Nanotüpler	1600	1000	0.2
3	Elmas	3520	1220	0.2
4	SiC	3210	410	0.19
5	Silisyum	2330	160	0.22
6	SOS	3.97	250-400	0.29
7	Polikristalin Si	2330	160	0.23

Tablo 3. Piezorezistif silisyum katsayı sabitleri [18]. (Piezoresistive silicon coefficient constants)

	Alttaş (Wafer) Türü	π_l	π_t	Oryantasyon
1	P- Tipi	-31.6	-17.16	$\langle 110 \rangle$
2	N-Tipi	71.8	-66.3	$\langle 110 \rangle$

Tablo 4. Piezorezistif basınç sensörü malzemelerinin karşılaştırması. (Comparison of piezoresistive pressure sensor materials.)

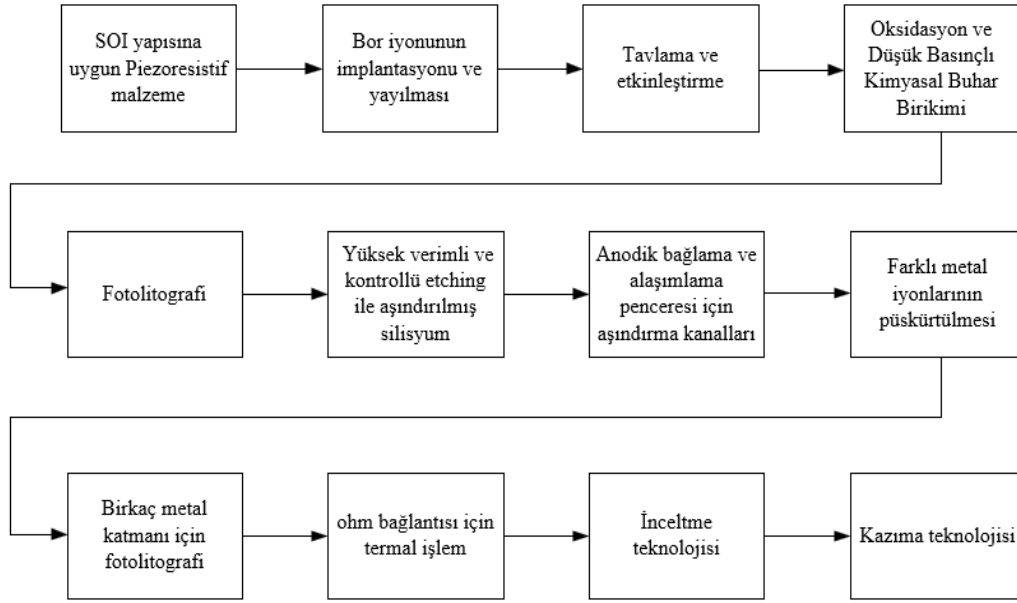
Malzeme	Avantajları	Dezavantajları	Kullanım Alanları
Silisyum (Si) [29], [40]	- Yüksek piezorezistif katsayı (hassasiyet) - MEMS ile kolay üretim - Düşük maliyet	- Yüksek sıcaklıklarda performansı düşebilir	Endüstriyel sensörler, MEMS tabanlı basınç sensörleri
Yalıtkan Üzerine Silisyum (SOI) [29], [40]	- Yüksek sıcaklık stabilitesi - Daha iyi izolasyon (sızıntı azalır) - Düşük güç tüketimi	- Üretim maliyeti daha yüksek	Havacılık, otomotiv, yüksek sıcaklık sensörleri
Safir Üzerine Silisyum (SOS) [29], [40]	- 500°C'ye kadar çalışma sıcaklığı - Yüksek yalıtkanlık, düşük gürültü - Kimyasallara ve radyasyona dayanım	- Üretimi pahalı - Mekanik esneklik düşük	Havacılık, askeri uygulamalar, nükleer alanlar
Silisyum Karbür (SiC) [29], [40]	- Yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortamlara dayanım - Yüksek sertlik ve kimyasal direnç - Düşük sıcaklık bağımlılığı (doğruluk artar)	- Üretim zor ve pahalı	Havacılık, otomotiv, petrol sondajı, aşındırıcı ortamlarda sensörler
Çelik [29], [40]	- Mekanik olarak dayanıklı - Yüksek basınç ve korozyon direnci	- Piezorezistif etkisi düşük	Endüstriyel yüksek basınç sensörleri
Karbon Nanotüpler (CNT) [27], [29], [39]	- Çok yüksek esneklik ve mukavemet - Hafif ve minyatür yapı - Düşük enerji tüketimi	- Üretim süreci karmaşık - Endüstriyel ölçekte kullanımı sınırlı	Esnek sensörler, biyomedikal uygulamalar
Grafen [29], [40]	- Çok yüksek mekanik dayanıklılık ve esneklik - Süper hassas ve ultra hafif - Yüksek iletkenlik, düşük güç tüketimi	- Kararlı üretim zorluğu - Henüz yaygın üretime geçmemiş	Nano sensörler, giyilebilir teknolojiler
Elmas [29], [40]	- Aşınma ve mekanik hasara dayanıklı - Yüksek sıcaklıklarda çalışabilir - Kimyasal olarak inert (aşındırıcı ortamlara dayanıklı)	- Çok pahalı ve üretimi zor - Mikro işleme zorlukları var	Aşındırıcı ortam sensörleri, havacılık, nükleer uygulamalar

**Şekil 10.** Malzemelere göre sıcaklık dayanımları.

(Temperature resistance according to materials)

4.4. Fabrikasyon Süreçleri (Fabrication Processes)

Literatür irdelendiğinde piezorezistif basınç sensörlerinin fabrikasyon süreçlerinde benzer yöntemlerin izlendiği gözlemlenmiştir. Genel olarak termal yönetim ve radyasyon dayanıklılığına sahip malzemelere karar verilip ilgili simülasyon ve testler ile diyafram optimizasyonu yapıldıktan sonra fotolitografi ve mikro işleme teknikleri ile üretimin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Şekil 11’de SOI yapısına uygun piezorezistif malzeme ile başlayıp iyon implantasyonu, tavlama, oksidasyon, fotolitografi, aşındırma, anodik bağlama, iyon püskürtme, tekrardan farklı metal katmanlar için fotolitografi, piezorezistif bağlantısı için termal işlem, inceltme ve kazıma şeklinde tamamlanan genel bir üretim akış süreci gösterilmektedir.



Şekil 11. Piezorezistif basınç sensörlerin yaygın fabrikasyon süreçleri [43]. (Common fabrication processes of piezoresistive pressure sensors)

Şekil 11’de görselleştirilen süreç, SOI yapısına sahip piezorezistif bir basınç sensörünün üretim aşamalarını göstermektedir. Aşamaların alt işlevleri de aşağıda belirtilmiştir.

- I. Adım: SOI Yapısına Uygun Piezorezistif Malzeme Seçimi
 - SOI teknolojisi, ince bir silisyum katmanının bir yalıtkan (genellikle silisyum dioksit(SiO₂)) üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulur.
 - Bu yapı, düşük güç tüketimi ve yüksek sıcaklık dayanımı sağlar.
 - Kullanılacak piezorezistif malzeme, sensörün hassasiyetini ve performansını belirler.
- II. Adım: Bor İyonunun İmplant Edilmesi ve Yayılması
 - Piezorezistif dirençlerin oluşturulması için silisyum içine bor iyonu eklenir (p-tipi katkılama).
 - İyon implantasyonu: Yüksek enerjili bor iyonları, silisyum yüzeyine belirli bir derinliğe kadar gömülür.
 - Yayılma (diffusion): İyonlar, kontrollü bir sıcaklıkta ısıtılarak malzeme içinde homojen şekilde dağıtılır.
- III. Adım: Tavlama ve Etkinleştirme
 - İmplant edilen bor iyonlarının kristal yapı içinde doğru yerlere oturması için ısıtma işlemi uygulanır.
 - Bu işlem, piezorezistif bölgelerin elektriksel özelliklerini iyileştirir.
- IV. Adım: Oksidasyon ve Düşük Basıncılı Kimyasal Buhar Biriktirme (LPCVD-Low Pressure Chemical Vapor Deposition)

- Oksidasyon: Silisyum yüzeyi, silisyum dioksit(SiO₂) tabakası oluşturacak şekilde oksitlenir. Bu tabaka, maskeleme ve izolasyon için gereklidir.
- LPCVD: İnce film kaplama yöntemiyle ek yalıtım veya pasivasyon katmanları oluşturulur.
- V. Adım: Foto-litografi (Fotorezist Kaplama ve Pozlama)
 - Yüzeye ışığa duyarlı bir polimer (fotorezist) kaplanır.
 - Bir maske kullanılarak belirli bölgeler UV (Ultra Violet) ışığı ile pozlanır.
 - Pozlanan alanlar kimyasal çözeltilerle geliştirilerek istenen desenler oluşturulur.
- VI. Adım: Yüksek Verimli ve Kontrollü Aşındırma (Etching) ile Aşındırılmış Silisyum
 - Kimyasal veya plazma kullanılarak belirli bölgelerdeki silisyum aşındırılır.
 - Islak aşındırma (wet etching): Kimyasal çözeltilerle yapılır (örneğin KOH (Potasyum hidroksit) ile).
 - Kuru aşındırma (dry etching): Plazma veya iyonlarla seçici olarak silisyum kazınır.
- VII. Adım: Anodik Bağlama ve Alaşımlama Penceresi için Aşındırma Kanalları
 - Cam ve silisyum, yüksek sıcaklık ve elektrik alanı kullanılarak anodik bağlama yöntemiyle birleştirilir.
 - Bağlantı bölgelerinde metal iletkenlerin yerleştirilmesi için kanallar açılır.
- VIII. Adım: Farklı Metal İyonlarının Püskürtülmesi (Sputtering)

- Metal kontaklar (örneğin altın, alüminyum veya platin) ince film kaplama ile püskürtülerek yüzeye yerleştirilir.
 - Bu işlem, piezorezistif sensörlerin bağlantıları için iletken yollar oluşturur.
- IX. Adım: Birkaç Metal Katmanı İçin Fotolitografi
- Sensörün metal bağlantıları için ek katmanlar oluşturulur.
 - Bu katmanlar, bağlantıların dayanıklılığını ve iletkenliğini artırır.
- X. Adım: Ohm Bağlantısı İçin Termal İşlem
- Metal bağlantıların direnç kayıplarını azaltmak için ısıtma işlemi uygulanır.
 - Bu işlem, iletkenlik ve temas kalitesini iyileştirir.
- XI. Adım: İnce Film Teknolojisi ile Yapının İnceltilmesi
- Sensörün hassasiyetini artırmak için belirli bölgeler inceltirilir.
 - Bu işlem, özellikle diyafram yapısını optimize etmek için gereklidir.
- XII. Adım: Kazıma Teknolojisi ile Nihai Yapının Oluşturulması
- Mikro-kanallar veya boşluklar kazınarak yapı tamamlanır.
 - Bu işlem, sensörün mekanik özelliklerini iyileştirmek ve optimum çalışma koşullarını sağlamak için yapılır.

Bu adımlar, piezorezistif basınç sensörlerinin üretimi için kullanılan karmaşık mikro işleme tekniklerini özetlemektedir. Her bir aşama, sensörün performansını ve güvenilirliğini artırmaya yönelik kritik bir role sahiptir.

4.5. Termal Kompanzasyon ve Termal Etkilerin Yönetimi (Fabrication Processes)

Termal genleşmeden kaynaklanan hata oranlarını azaltmak için uyumlu malzeme seçimi yapılması oldukça önemlidir. Diyafram ve piezorezistör malzemelerinin termal genleşme katsayıları literatürde yapılan çalışmalarda dengelenmiş ve sıcaklık kompanzasyon devreleri eklenmiştir [44], [45], [46].

4.6. Radyasyon Dayanıklılığı Analizleri (Fabrication Processes)

Gamma radyasyonu altındaki sensör performansının analiz edilmesi de radyasyon dayanıklılığı açısından oldukça önemlidir. Piezorezistör ve diyafram malzemeleri Polisilisyum ve silisyum karbür gibi radyasyona karşı yüksek dayanıklılığa sahip malzemelerden seçilmelidir. Literatürde simülasyon ve deneysel testlerle

radyasyonun sensör üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir [44], [46].

4.7. Fotolitografi ve Mikro İşleme Teknikleri (Photolithography and Micromachining Techniques)

MEMS sensörlerin üretiminde entegre devre üretiminde yaygın olarak kullanılan fotolitografi ve mikro işleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler, yüksek hassasiyetli diyafram ve piezorezistör üretimi sağlamaktadır. Fotolitografi, diyafram yapılarının boyutlarının ve konumlarının hassas bir şekilde tanımlanmasını sağlamaktadır [28], [39], [44].

4.8. Hermetik Paketleme ve Çevresel Koruma (Hermetic Packaging and Environmental Protection)

Hermetik sızdırmazlık, sensörün nem, sıcaklık değişimleri ve mekanik şoklara karşı korunmasını sağlamak için oldukça önemlidir. Bu süreçte yüksek sıcaklık dayanımına sahip malzemeler kullanılarak sensör dayanıklılığının artırılması göz ardı edilemeyecek bir önem arz etmektedir [47].

4.9. Uygulama Alanları (Application Areas)

Piezorezistif basınç sensörleri, yüksek ölçek faktörü ve seri üretime uygunluğu nedeniyle birçok uygulama alanında tercih edilmektedir. Geniş bir yelpazede güvenilir, hassas ölçümler için kullanılır. Biyomedikal uygulamalarda biyouyumluluk, uzun süreli doğruluk, minyatürleşme ve zorlu koşullarda çalışma gibi özellikleriyle kan basıncı ölçümünde, solunum izleme sistemlerinde ve çoklu hayati sinyal takibinde kullanılmaktadır [48]. Bu sensörler, günümüzde ticari olarak en gelişmiş MEMS tabanlı sensörler arasında yer almakta olup, birçok farklı sektörde kendine kullanım alanı bulmaktadır. Otomotiv endüstrisinde lastik basıncı izleme sistemleri (TPMS-Tire Pressure Monitoring System), motor performansı ve yakıt verimliliği takibi gibi kritik uygulamalarda kullanılmaktadır [49]. Endüstriyel süreç kontrolü ve otomasyon sistemlerinde, sıvı ve gaz akış basıncının izlenmesi için tercih edilmektedir. Uçak ve havacılık uygulamalarında ise motor basıncı, kabin basıncı kontrolü ve aerodinamik testlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [50]. Ayrıca, piezorezistif basınç sensörleri savunma ve uzay sistemlerinde de dayanıklılık açısından geliştirilerek yer almaktadır. Uydu sistemlerinde atmosferik basınç değişimlerinin ölçülmesi, roket motorlarının basınç analizleri ve yüksek G kuvvetlerine dayanıklı aviyonik sensörler gibi uygulamalar için optimize edilmektedir [51]. Giyilebilir teknolojilerde de piezorezistif sensörler yaygınlaşmıştır. Akıllı tekstil uygulamalarında, esnek ve hafif sensörler olarak

insan hareketlerini izleme ve biyomekanik analiz için kullanılmaktadır. Özellikle melamin köpük yapıdaki esnek sensörler, vücut hareketlerini izleme ve spor performansı değerlendirme çalışmalarında geliştirilmiştir [52].

Bunlara ek olarak, tıbbi cihazlar, deniz altı basınç ölçüm sistemleri, petrol ve doğalgaz sektöründe kuyu içi basınç izleme, gıda işleme endüstrisi ve çevresel hava basıncı izleme gibi birçok alanda piezorezistif sensörlerin kullanımı artmaktadır. Bu geniş kullanım alanı, piezorezistif basınç sensörlerini modern mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir teknoloji haline getirmiştir.

4.10. Avantajlar ve Sınırlamalar (Advantages and Limitations)

Piezorezistif basınç sensörleri, basit yapıları nedeniyle düşük maliyetli, dayanıklı ve şoka, titreşime karşı dirençlidir. Elektronik okuma devreleri basit olup yüksek çözünürlük sağlar, çıkışları basınçla doğrusaldır ve tepki süresi milisaniyenin altındadır. 3 psi ile 20.000 psi arasında geniş bir basınç ölçüm aralığına sahiptir. Çıkışı zaman içinde stabildir ve kalibrasyon gereksinimi azdır. Piezorezistif elemanlar diyaframa bağlanabilir, ancak yüksek sıcaklık ve aşırı basınçta yapıştırıcılarda sorunlar yaşanabilir. Alternatif olarak, doğrudan membran üzerinde ince film dirençler kullanılabilir. Bu dirençler daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir ve zorlu ortamlarda daha uygundur. Ancak, sensörlerin güç gereksinimi düşük güçlü sistemlerde kullanımı zorlaştırır. Boyut küçültme, direnci azaltarak güç tüketimini artırır ve hassasiyet kaybına yol açabilir. MEMS cihazları küçük boyutlarda üretilebilir, ancak gerinim ortalaması hassasiyeti düşürebilir. Ayrıca, sıcaklık değişimleri ve bağlantı kaçak akımları doğruluğu etkileyebilir.

5. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ (CONCLUSIONS AND FUTURE PERSPECTIVES)

Gaz sensörlerinin geçmişten günümüze göre gelişimi araştırılmış, MEMS teknolojisinin gelişimiyle boyutlardaki küçülmeleri gözlemlenmiştir. Üretim olarak en yaygın basınç sensörlerinin piezorezistif özellikte olduğu ve yüksek basınç okuma çalışmalarında da piezorezistif basınç sensörün diyafram yapısının daireselden dikdörtgen hale getirilmesi ile başarımın arttığı yapılan literatür araştırmamızda gözlemlenmiştir. Piezorezistif basınç sensörlerindeki yüksek sıcaklık dezavantajını malzeme teknolojisi ile çözüm çalışmaları yapılmış, 600°C'ye kadar güvenilir

sonuç veren piezorezistif basınç sensörü çalışması literatüre eklenmiştir [38] ve MEMS tabanlı piezorezistif sensörlerin endüstrideki rolü diğer sensörlere göre daha da artmıştır. 800°C ve üzerinde çalışacak yapıda sensörlerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar literatürde görülmüştür. Benzer şekilde uzun süreli doğruluk üzerine de çalışmaların olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, MEMS tabanlı piezorezistif sensörler günümüzde ve gelecekte endüstriyel üretimde devrim yaratacak potansiyele sahiptir. Endüstri 4.0'ın getirdiği dijitalleşme, nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki gelişmeler, farklı geometriler kullanılarak yapılabilecek özgün tasarımlar, nesnelerin interneti (IoT- Internet of Things) ve yapay zekâ (AI- Artificial Intelligence) entegrasyonu ile birlikte bu teknolojinin önemi daha da artacaktır ve sektörel uygulamaları gelecekte daha geniş bir yelpazeye yayılacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Yazmış olduğumuz derleme makalesine desteklerinden dolayı LOGOS KİMYA TEKNOLOJİLERİ SAN. TİC. ve LTD ve TÜBİTAK TEYDEP 1501 SANAYİİ ARGE PROGRAMI DESTEKLİ 3240060 Numaralı Hava ve Uzay Platformlarına Yönelik Yüksek Basınç ve Hassasiyette Çalışabilen, Askeri Standartlara Uygun Basınç Sensörünün Geliştirilmesi projesine teşekkür eder; ayrıca bu makalenin çıkmasında bize sabır gösteren ailemize de teşekkürü bir borç biliriz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yasin ARSLAN: Araştırmaları yapmış literatür taramış ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted research, reviewed the literature and carried out the writing of the article.

Gülşah DEMİRHAN AYDIN: Fikri öne sürmüş, araştırmaları yönlendirmiş, makalenin yazım ve kontrol işlemini gerçekleştirmiştir.

She proposed the idea, guided the research, and carried out the writing and revision of the article.

Deniz KARAÇOR: Makalenin yazım ve kontrol işlemini gerçekleştirmiştir.

She carried out the writing and revision of the article.

Nuri AKGÜN: Makalenin yazım ve kontrol işlemini gerçekleştirmiştir.

He carried out the writing and revision of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Z. Xu *et al.*, “An SOI-Structured Piezoresistive Differential Pressure Sensor with High Performance,” *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/mi13122250.
- [2] B. Ganev, D. Nikolov, and M. B. Marinov, “Performance evaluation of MEMS pressure sensors,” in 11th National Conference with International Participation, ELECTRONICA 2020 - Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2020. doi: 10.1109/ELECTRONICA50406.2020.9305140.
- [3] V. Belwanshi, S. Philip, and A. Topkar, “Performance Study of MEMS Piezoresistive Pressure Sensors at Elevated Temperatures,” *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 10, pp. 9313–9320, May 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3164435.
- [4] C. Gao and D. Zhang, “The Establishment and Verification of the Sensitivity Model of the Piezoresistive Pressure Sensor Based on the New Peninsula Structure,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 305–314, Apr. 2022, doi: 10.1109/JMEMS.2022.3150909.
- [5] R. Gao *et al.*, “Design, Fabrication, and Dynamic Environmental Test of a Piezoresistive Pressure Sensor,” *Micromachines (Basel)*, vol. 13, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/mi13071142.
- [6] Paul Francoletti, “<https://blog.ashcroft.com/absolute-vacuum-and-compound-pressure#:~:text=Compound%20pressure%20measures%20both%20positive,is%20applied%20to%20the%20gauge.>”
- [7] L. B. Lambert, “History of measurement and control A history of pressure measurement,” 1979.
- [8] Instrupaedia, “History of electronic pressure transducers.” Accessed: Jan. 02, 2025. [Online]. Available: <https://instrulearning.com/pressure/pressure-transducer-history/>
- [9] “History of MEMS Primary Knowledge Participant Guide.”
- [10] S. Il Ahn, “High-temperature vacuum pressure sensor using carbon nanotubes,” *Mater Lett*, vol. 268, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.matlet.2020.127643.
- [11] “Edwards Vacuum - Wikiwand.” Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.wikiwand.com/en/articles/Edwards_Vacuum
- [12] W. H. Ko, B.-X. Shao, C. D. Fung, W.-3 Shen, G.-J. Yeh, and B. E. Resource, “CAPACITIVE PRESSURE TRANSDUCERS WITH INTEGRATED CIRCUITS*,” 1983.
- [13] “Piezoelectric Pressure Sensors | The Design Engineer’s Guide | Avnet Abacus.” Accessed: Jan. 06, 2025. [Online]. Available: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoelectric/>
- [14] X. Han *et al.*, “Novel resonant pressure sensor based on piezoresistive detection and symmetrical in-plane mode vibration,” *Microsyst Nanoeng*, vol. 6, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41378-020-00207-0.
- [15] L. Gupta, G. Singh, and V. Pandey, “A study of piezoresistive pressure sensor technology,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Feb. 2021. doi: 10.1063/5.0039425.
- [16] W. P. Eaton and J. H. Smith, “Micromachined pressure sensors: review and recent developments,” 1997. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/0964-1726/6/5/004>
- [17] J. Wang, G. Hu, J. Li, Y. Zhou, C. Zou, and S. M. Jahangir Alam, “Research on Temperature Compensation of Piezo-resistive Pressure Sensor Based on Newton interpolation and Spline interpolation,” in *2021 15th IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 109–113. doi: 10.1109/ICEMI52946.2021.9679505.
- [18] S. Meti, K. B. Balavald, and B. G. Sheeparmatti, “MEMS Piezoresistive Pressure Sensor: A Survey,” 2016. [Online].
- [19] P. Thawornsathit *et al.*, “Mechanical Diaphragm Structure Design of a MEMS-Based Piezoresistive Pressure Sensor for Sensitivity and Linearity Enhancement,”

- Engineering Journal*, vol. 26, no. 5, pp. 43–57, May 2022, doi: 10.4186/ej.2022.26.5.43.
- [20] Q. Meng, Y. Lu, J. Wang, D. Chen, and J. Chen, “A piezoresistive pressure sensor with optimized positions and thickness of piezoresistors,” *Micromachines (Basel)*, vol. 12, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/mi12091095.
- [21] O. N. Tufte, P. W. Chapman, and D. Long, “Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms,” *J Appl Phys*, vol. 33, no. 11, pp. 3322–3327, 1962, doi: 10.1063/1.1931164.
- [22] A. A. Barlian, W. T. Park, J. R. Mallon, A. J. Rastegar, and B. L. Pruitt, “Review: Semiconductor piezoresistance for microsystems,” 2009, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JPROC.2009.2013612.
- [23] SAMAUN, K. D. Wise, and J. B. Angell, “An IC Piezoresistive Pressure Sensor for Biomedical Instrumentation,” *Analog Dialogue*, 1973.
- [24] J. Akhtar, B. B. Dixit, B. D. Pant, and V. P. Deshwal, “Polysilicon piezoresistive pressure sensors based on mems technology,” *IETE J Res*, vol. 49, no. 6, pp. 365–377, 2003, doi: 10.1080/03772063.2003.11416360.
- [25] K. N. Bhat and M. M. Nayak, “MEMS Pressure Sensors-An Overview of Challenges in Technology and Packaging,” 2012. [Online]. Available: www.issnonline.in/journal/02paper05.pdf
- [26] M. A. Fraga, H. Furlan, M. Massi, I. C. Oliveira, and L. L. Koberstein, “Fabrication and characterization of a SiC/SiO₂/Si piezoresistive pressure sensor,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2010, pp. 609–612. doi: 10.1016/j.proeng.2010.09.183.
- [27] S. Kurnaz, O. Ozturk, A. H. Mehmet, U. Guduloglu, N. Yilmaz, and O. Cicek, “Flexible capacitive and piezoresistive pressure sensors based on screen-printed parylene C/polyurethane composites in low-pressure range,” *Flexible and Printed Electronics*, vol. 8, no. 3, Sep. 2023, doi: 10.1088/2058-8585/acf774.
- [28] P. Li *et al.*, “A Single-Side Micromachined MPa-Scale High-Temperature Pressure Sensor,” *Micromachines (Basel)*, vol. 14, no. 5, May 2023, doi: 10.3390/mi14050981.
- [29] C. Mo, Z. Tian, and D. Wang, “A Novel High-Performance MXene-Doped Graphene Pressure Sensor,” *IEEE Sens J*, vol. 24, no. 9, pp. 14059–14067, May 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3382107.
- [30] T. Nguyen and T. Dinh, “OPTOELECTRONIC ENHANCEMENT FOR PIEZORESISTIVE PRESSURE SENSOR,” p. 945, 2020.
- [31] D. Lin, R. Shi, M. Wong, and K. Chau, “Metal-Oxide Thin-Film Transistor for Monolithic Integration with High-Pressure MEMS Pressure Sensor,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 672–675. doi: 10.1109/MEMS51670.2022.9699551.
- [32] L. Kaabi, A. Kaabi, J. Sakly, and F. AbdelMalek, “Modelling and analysis of MEMS sensor based on piezoresistive effects,” May 16, 2007. doi: 10.1016/j.msec.2006.06.022.
- [33] A. Arshak *et al.*, “Review of the potential of a wireless MEMS and TFT microsystems for the measurement of pressure in the GI tract,” 2005, *Elsevier BV*. doi: 10.1016/j.medengphy.2004.11.002.
- [34] A. Rossetti, R. Codeluppi, A. Golfarelli, M. Zagnoni, A. Talamelli, and M. Tartagni, “Design and characterization of polymeric pressure sensors for wireless wind sail monitoring,” Jun. 2011. doi: 10.1016/j.sna.2011.02.033.
- [35] S. Rodini, S. Genovesi, G. Manara, and F. Costa, “A Pressure Sensor based on Piezoresistive Loaded Electromagnetic Absorber,” in *2022 IEEE 12th International Conference on RFID Technology and Applications, RFID-TA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 194–196. doi: 10.1109/RFID-TA54958.2022.9923961.
- [36] Y. Huang, X. Fan, S. C. Chen, and N. Zhao, “Emerging Technologies of Flexible Pressure Sensors: Materials, Modeling, Devices, and Manufacturing,” Mar. 21, 2019, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/adfm.201808509.
- [37] P. Song *et al.*, “A novel piezoresistive MEMS pressure sensors based on temporary bonding technology,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 2, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20020337.
- [38] B. Tian, H. Shang, and W. Wang, “Research on Temperature Zero Drift of SiC Piezoresistive Pressure Sensor Based on Asymmetric Wheatstone Bridge,” *Silikon(2922)*, Aug. 2021, doi: 10.1007/s12633-021-01330-x/Published.
- [39] A. Nallathambi, T. Shanmuganantham, and D. Sindhanaiselvi, “Design and Analysis of MEMS based Piezoresistive Pressure sensor for Sensitivity Enhancement,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2018, pp.

- 1897–1903. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.291.
- [40] S. Zeng *et al.*, “A Novel High-Temperature Pressure Sensor Based on Graphene Coated by Si₃N₄,” *IEEE Sens J*, vol. 23, no. 3, pp. 2008–2013, Feb. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2022.3232626.
- [41] S. S. Kumar and B. D. Pant, “Effect of piezoresistor configuration on output characteristics of piezoresistive pressure sensor: an experimental study,” *Microsystem Technologies*, vol. 22, no. 4, pp. 709–719, Apr. 2016, doi: 10.1007/s00542-015-2451-5.
- [42] Z. Niu, Y. L. Zhao, B. Tian, and F. F. Guo, “Comparative Study of a High Pressure Sensor with Rectangular Diaphragm,” Apr. 2013.
- [43] L. B. Zhao, Y. L. Zhao, and Z. D. Jiang, “Design and fabrication of a piezoresistive pressure sensor for ultra high temperature environment,” *J Phys Conf Ser*, vol. 48, no. 1, pp. 178–183, Oct. 2006, doi: 10.1088/1742-6596/48/1/033.
- [44] J. Akhtar, B. B. Dixit, B. D. Pant, and V. P. Deshwal, “Polysilicon piezoresistive pressure sensors based on mems technology,” *IETE J Res*, vol. 49, no. 6, pp. 365–377, 2003, doi: 10.1080/03772063.2003.11416360.
- [45] X. Han *et al.*, “Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging,” Dec. 01, 2023, *Springer Nature*. doi: 10.1038/s41378-023-00620-1.
- [46] V. Belwanshi, S. Philip, and A. Topkar, “Gamma Radiation Induced Effects on the Performance of Piezoresistive Pressure Sensors Fabricated Using Different Technologies,” *IEEE Trans Nucl Sci*, vol. 66, no. 9, pp. 2055–2062, Sep. 2019, doi: 10.1109/TNS.2019.2931777.
- [47] R. H. Kronendorfer and Y. K. Kim, “Packaging effect on MEMS pressure sensor performance,” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 30, no. 2, pp. 285–293, Jun. 2007, doi: 10.1109/TCAPT.2007.898360.
- [48] M. Alghrairi, B. A. K. Farhan, H. M. Ridha, S. Mutashar, W. Algriree, and B. M. Sabbar, “Advancing healthcare through piezoresistive pressure sensors: a comprehensive review of biomedical applications and performance metrics,” Sep. 01, 2024, *Institute of Physics*. doi: 10.1088/2399-6528/ad7d5d.
- [49] B. Song, F. Li, F. Zhu, and S. liu, “High reliability of piezoresistive pressure sensors by wafer to wafer direct bonding at room temperature,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 364, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.sna.2023.114834.
- [50] S. Büttgenbach, I. Constantinou, A. Dietzel, and M. Leester-Schädel, “Piezoresistive Pressure Sensors,” in *Case Studies in Micromechatronics*, Springer Berlin Heidelberg, 2020, pp. 21–85. doi: 10.1007/978-3-662-61320-7_2.
- [51] T. Beutel, M. Leester-Schädel, and M. Sinapius, “Novel Pressure Sensor for Aerospace Purposes.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/225025778>
- [52] Y. Su, K. Ma, X. Mao, M. Liu, and X. Zhang, “Highly Compressible and Sensitive Flexible Piezoresistive Pressure Sensor Based on MWCNTs/Ti₃ C₂ Tx MXene @ Melamine Foam for Human Gesture Monitoring and Recognition,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/nano12132225.