



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ENDÜSTRİ 4.0 UYGULAMALARI İÇİN
PIEZOREZİSTİF AKILLI BASINÇ SENSÖRÜ
TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ**

İbrahim TOY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Eylül-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

İbrahim TOY tarafından hazırlanan “Endüstri 4.0 Uygulamaları için Piezorezistif Akıllı Basınç Sensörü Tasarımı ve Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 30/09/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği /oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Kadir SABANCI

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY

.....

Üye

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İbrahim TOY

Tarih: 30.09.2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri 4.0 Uygulamaları için Piezoresistif Akıllı Basınç Sensörü Tasarımı ve Geliştirilmesi

İbrahim TOY

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY

2020, 72 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY

Dr. Öğr. Üyesi Kadir SABANCI

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dünya’da endüstriyel alanda gelişmeler hızlı bir şekilde devam etmektedir. Devrim olarak nitelendirilen bu gelişmelerin Endüstri 1.0 ile başlayan serüveni günümüzde Endüstri 4.0 ile devam etmektedir. Endüstri 4.0 ile hayatımıza giren nesnelerin interneti kavramı, sensör teknolojisinde yenilikleri kaçınılmaz kılmıştır. Üretim alanında kullanılmakta olan sensörlerin enerji verimliliği, güvenilirliği ve kullanılabilirliği son derece önem arz etmektedir. Klasik sensörlerin üretimde doğruluğunu artırmak için yapılan iyileştirmeler ile akıllı sensörlerin ortaya çıkması, bu gelişmelerin en önemli örneklerindedir. Endüstride makine ve proses kontrolünde, otomasyon uygulamalarında kullanılan basınç sensörleri geliştirilmeye açık sensörlerdendir. Bu tez çalışmasında Endüstri 4.0 uygulamalarında kullanılacak piezoresistif algılama yöntemi tabanlı basınç sensörü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen akıllı basınç sensörü CAN Bus üzerinden haberleşme yeteneğine sahiptir. Sensörün geliştirilmesinde dijital ve analog sinyal filtre tasarımları ile sensöre gürültü bağımsızlığı kazandırılmıştır. Ayrıca sensörün kendi kendine kalibrasyon (self-calibration) özelliğine sahip olabilmesi için yapay sinir ağı (YSA) ile sensör çıkışının doğrusallaştırılması sağlanmıştır. Tasarlanan akıllı basınç sensörü deneysel olarak test edilerek ölçüm sonuçları doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Sensör, Basınç Sensörü, Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti, Piezoresistif Algılama

ABSTRACT

MS THESIS

**PIEZORESISTIVE SMART PRESSURE SENSOR DESIGN AND
DEVELOPMENT FOR INDUSTRY4.0 APPLICATIONS**

İbrahim TOY

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRIC ELECTRONIC ENGINEERING**

Advisor: Assist. Prof. Dr. Hakkı SOY

2020, 72 Pages

Jury

Assist. Prof. Dr. Hakkı SOY

Assist. Prof. Dr. Kadir SABANCI

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Developments in the industrial field continue rapidly in the world. The adventure of these developments, which are described as revolution, started with Industry 1.0 and continues with Industry 4.0 today. The concept of Internet of Things (IoT) that came into our lives with Industry 4.0 and it made inevitable the innovations in the sensor technology. Energy efficiency, reliability and efficiency of the sensors used in the production fields are extremely important. With the improvements that made to increase the accuracy of conventional sensors in production, the emergence of smart sensors is one of the most important examples of these developments. In the industry, the pressure sensors used in machine, process control and automation applications are open to development. In this thesis, the piezoresistive sensing method based pressure sensor design has been realized for Industry 4.0 applications. The designed smart pressure sensor has the ability to communicate over CAN Bus interface. In the development of the sensor, the noise immunity has been added to the sensor with the digital and analog signal filter designs. Besides, the sensor output is linearized with an artificial neural network (ANN) so that the sensor can have self-calibration ability. The designed smart pressure sensor has been experimentally tested and the measurement results have been verified.

Keywords: Industry 4.0, Internet of Things, Smart Sensor, Piezoresistive Sensing, Pressure Sensor

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde tüm desteklerinden dolayı danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY'a,

Çalışmalarım boyunca desteklerini aldığım Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş. firması Ar-Ge müdürü Sn. Erdem ÜNÜVAR başta olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma,

Yüksek lisans eğitimimin başlangıcından bugünlerine kadar yüksek lisans döneminde yaşadığı tecrübelerini benimle paylaşan abim Ömer TOY'a ve desteklerini daima arkamda hissettiğim aileme,

Teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim TOY
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Endüstri 4.0	2
1.2. Nesnelerin İnterneti	3
1.3. Akıllı Sensör Teknolojisi	5
1.4. Tez Çalışmasının İçeriği ve Literatüre Katkısı	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Sensör Teknolojisi	11
3.2. Basınç Sensörleri	13
3.2.1. Piezorezistif Basınç Sensörleri	14
3.2.2. Piezoelektrik Basınç Sensörleri	15
3.2.3. Kapasitif Basınç Sensörleri.....	16
3.3. Piezorezistif Akıllı Basınç Sensörü Tasarımı	17
3.3.1. Piezorezistif Basınç Algılama Elemanı	17
3.3.2. Sinyal Şartlandırıcı Devresi	19
3.3.3. Sıcaklık Kompanzasyonu	22
3.3.3. Mikrokontrolör.....	27
3.3.3.1. Sinyal filtreleme.....	30
3.3.3.2. Self Kalibrasyon	35
3.4. Haberleşme Arabirimi.....	38
3.4.1. CAN Bus Haberleşmesi	38
3.5. Mekanik Muhafaza Tasarımı	44
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
4.1 Sonuçlar	47
4.2 Öneriler	48
5. KAYNAKLAR	49
EKLER	55

EK 1 PGA300 & Basınç algılayıcı bağlantı şeması	55
EK 2 STM32F107VCT6 pin diyagramı	56
EK 3 STM32F407VGT6 pin diyagramı	57
EK 4 STM32F107VCT6 / STM32F407VG	58
EK 5 MCP2551 blok diyagramı	59
ÖZGEÇMİŞ	60



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Endüstriyel devrimlerinin kronolojisi [8].....	2
Şekil 1.2. IoT teknolojisinin kullanıldığı sektörler [25]	4
Şekil 1.3 Akıllı sensör yapısı [30]	6
Şekil 1.4 Dünya genelinde basınç sensörü pazarının gelişimi [32]	7
Şekil 3.1 Ölçüm sistemi [44]	11
Şekil 3.2 Sensör 1.0'dan Sensör 4.0'a tarihsel gelişimi [30].....	13
Şekil 3.3 Basınç türlerinin gösterilmesi [51]	14
Şekil 3.4 Wheatstone köprüsünde piezorezistif sensör yapılandırması [55]	15
Şekil 3.5 Piezoelektrik özellikli basınç sensörü yapısı [42]	16
Şekil 3.6 Kapasitif basınç sensörü yapısı	16
Şekil 3.7 Akıllı basınç sensörü tasarımımızın donanım bileşenleri.....	17
Şekil 3.8 Metallux CPS1184 Basınç algılama elemanı ve bağlantı şeması [60].....	18
Şekil 3.9 Fluke 729 basınç kalibratörü	18
Şekil 3.10 Basınç algılayıcı çıkış sinyali grafiği	19
Şekil 3.11 PGA300 entegresi ve blok diyagramı [61].....	20
Şekil 3.12 PGA300EVM sinyal şartlandırıcı geliştirme kartı	20
Şekil 3.13 PGA300 GUI kalibrasyon sayfası	22
Şekil 3.14 PGA300 ile 3P-3T kompanzasyonu	23
Şekil 3.15 PGA300 Katsayı & Ölçekleme çarpanları	24
Şekil 3.16 Test yatağı	24
Şekil 3.17 Algılayıcı & PGA300 çıkış grafiği.....	25
Şekil 3.18 PGA300 kalibrasyon doğrulama	26
Şekil 3.19 Sabit basınç testi	26
Şekil 3.20 STM32F107VCT6 mikrokontrolörü	28
Şekil 3.21 Expkits STM32F107VCT6 geliştirme kartı	28
Şekil 3.22 STM32F407VGT6 mikrokontrolörü	29
Şekil 3.23 STM32F407VG-DISC1 geliştirme kartı	29
Şekil 3.24 MicroC PRO for ARM arayüz ekranı	30
Şekil 3.25 Dijital filtreleme blok diyagramı	31
Şekil 3.26 Kompresör test cihazı	31
Şekil 3.27 ADC girişinde frekans spektrumu	32
Şekil 3.28 Kenar yumuşatma filtresi şematik diyagramı.....	33
Şekil 3.29 Kenar yumuşatma filtresinin kazanç ve faz cevabı	34
Şekil 3.30 Akıllı sensör uygulamasında kullanılan self kalibrasyon için YSA bloğu....	36
Şekil 3.31 Eğitim, doğrulama, test ve tam veri seti için ağırlık çıkış basıncı ve hedef basıncı arasındaki uyum.....	37
Şekil 3.32 CAN Bus hattına bir örnek	39
Şekil 3.33 CAN hattı sinyalleri.....	39
Şekil 3.34 CAN Bus sistemi [76]	40
Şekil 3.35 MCP2551 pin diyagramı	40
Şekil 3.36 Test yatağı deneyleri ile CAN veri yolu doğrulaması	41
Şekil 3.37 Tasarlanan akıllı basınç sensörü çıkışının uygulanan basınca göre değişimi	42
Şekil 3.38 Temel veri çerçevesi veya CAN 2.0A [80]	43
Şekil 3.39 CANcalculator ile zamanlama parametrelerinin hesaplanması.....	44
Şekil 3.40 Mekanik muhafaza (Housing)	45
Şekil 3.41 Mekanik muhafaza üretimi.....	45
Şekil 3.42 3D yazıcı ile üretilen mekanik muhafaza modeli	46
Şekil 4.1 Piezorezistif Akıllı Basınç Sensörü Prototipi	47

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Algılayıcı basınç testi.....	19
Tablo 3.2 PGA300 voltaj modu pin konfigürasyonu	21
Tablo 3.3 CPS1184 basınç algılama elemanının sıcaklığa bağlı özellikleri	23
Tablo 3.4 Sinyal şartlandırıcı çıkış gerilim testi	25
Tablo 3.5 MicroC PRO for ARM derleyicisindeki CAN kütüphane fonksiyonları ve değişkenleri.....	42



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Ω	:Ohm
$^{\circ}\text{C}$:Derece Celcius
&	:Ve

Kısaltmalar

ACK	:Alındı bilgisi
ADC	:Analog Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
BİT	:Bilgi İletişim Teknolojileri
CAN	:Controller Area Network (Kontrol Alan Ağı)
CMOS	:Complementary Metal Oxide Semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken)
CRC	:Çevrimli fazlalık sınaması
DC	:Direct Current (Doğru akım)
DLC	:Veri uzunluk kodu
EOF	:Çerçeve sonu
EVM	:Evaluation Module (Geliştirme Modülü)
GUI	:Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Ara Yüzü)
HVAC	:Isıtma Havalandırma ve İklimlendirme
Hz	:Hertz
IDE	:Tanıtıcı uzantı
IEEE	:Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
INT	:Çerçeveler arası boşluk
IoT	:Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)
IIoT	:Industrial Internet of Things (Endüstriyel Nesnelerin İnterneti)
kbps	:Kilobit per Second (Saniye Başına Kilobit)
LMBP	:Levenberg-Marquardt Back Propagation (Levenberg-Marquardt Geri Yayılım)
BP	:Backpropagation (Geri Yayılım)
mBar	:Milibar
Mbps	:Megabit per Second (Saniye Başına Megabit)
MEMS	:Mikro Elektro Mekanik Sistemler
MSE	:Mean Square Error (Ortalama Karese Hata)
MKS	:Metre-Kilogram-Saniye
mV	:Milivolt
nF	:Nanofarad
OWI	:One Wire Interface (Tek hat Ara Yüz)
Pa	:Paskal
PGA	:Programmable Gain Amplifier (Programlanabilir Kazanç Yükseltici)
RMS	:Root Mean Square (Karekök ortalama)
RTR	:Uzak iletim istek
r0	:Ayrılmış bit
SOF	:Çerçeve başlangıcı
SI	:International System (Uluslararası Birimler Sistemi)
SSN	:Smart Sensor Network (Akıllı Sensör Ağı)
SSI	:Smart Sensor Interface (Akıllı Sensör Arayüzü)

TEDS :Transducer Electronic Data Sheet (Güç Çevirici Elektronik Veri Sayfası)
V :Volt
VDD :Drain Drain Voltage (Drain Besleme Voltajı)
YSA :Yapay Sinir Ağı
 μ s :Mikrosaniye



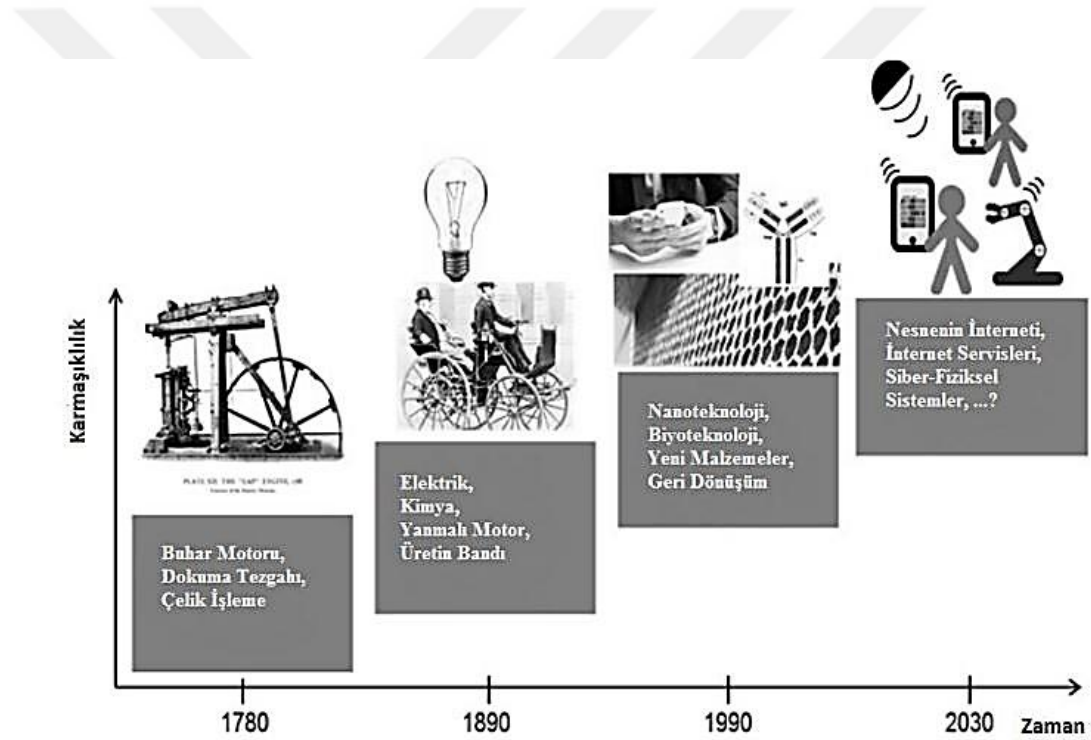
1. GİRİŞ

Son on yılda endüstriyel üretim yapan şirketler, ürün portföylerindeki değişiklikler ve tedarik darboğazları nedeniyle yenilenen koşulların neden olduğu ekonomik zorluklarla karşı karşıya kalmaktadırlar [1]. Bundan dolayı modern işletmeler, müşterilerin daha düşük maliyetle, yüksek kaliteli, son derece özelleştirilmiş olan ürünlere yönelik pazar talebini karşılayabilmek için bilgi ve iletişim teknolojilerinin (BİT) desteğine ihtiyaç duymaktadır [2]. Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, müşteri taleplerine zamanında ve doğru yanıt verebilmek için daha akıllı (smart) ve bağlantılı (connected) üretim operasyonlarını içeren yeni bir dijital dönüşüm dalgasını da beraberinde getirmektedir [3]. Endüstri 4.0 olarak adlandırılan yeni süreç, üretim ve tüketim ilişkilerini bütünüyle değiştirecek yeni bir yapı içermektedir. Endüstri 4.0 temel olarak bir yanda tüketicinin değişen ihtiyacına anlık olarak uyum sağlayan üretim sistemlerini, diğer yanda ise birbirleriyle sürekli iletişim ve koordinasyon halinde olan otomasyon sistemlerini tanımlamaktadır. Ayrıca ürün geliştirmede çeşitli disiplinler arasındaki yakın işbirliğini teşvik etmektedir [4].

İnsanlar fiziksel olayları duyu organlarıyla algılayabilmektedir. Fakat yaratılışı gereği fiziksel değişimleri tam olarak ölçememektedir. Örneğin havanın sıcak veya soğuk olduğunu algılayabilmesine karşın sıcaklığın kaç derece olduğunu net olarak bilememektedir. Benzer şekilde operatör herhangi bir endüstriyel sistemde basınç olduğunu algılayabilmesine karşın değerini ölçememektedir. Fiziksel büyüklüklerin algılanması ve elektriksel olarak ölçülmesi amacıyla sensörler kullanılmaktadır. Sensör teknolojisi, imalat endüstrisindeki üretim süreçlerini izlemek için önemli bir parça haline gelmekle kalmayıp, zamanla otomotiv endüstrisinde de araç dinamiklerini sürekli izleyerek bu sistemlerin sorunsuz çalışmasını sağlamak için kullanılmaktadır [5]. Akıllı sensör teknolojisi sayesinde arıza ve nedenlerinin erken tespiti ile yolcu güvenliği ve konforu daha üst düzeye çıkarılabilmektedir. Akıllı sensörler, sinyal özelliklerinin analizi yoluyla arızaları tespit ederek arızaları önleme, onarım süresini azaltma ve araçların verimliliğini artırma becerisine sahiptirler [6].

1.1. Endüstri 4.0

Endüstri 4.0 kavramı dördüncü sanayi devrimine işaret eder [7]. Birinci sanayi devrimi (Endüstri 1.0), kömür ve buhar makinelerinin hayatımıza girmesiyle başlamıştır. İlk sanayi devriminin ardından elektrik ve petrol ile çalışan ürünlerin ortaya çıkmasıyla İkinci sanayi devrimi (Endüstri 2.0) yaşanmıştır. Bu dönemin başlangıcında Henry Ford araba imalatına başlamıştır. 1960 yılı sonrası dönemde bilgisayarlar ile elektroniğin kullanım oranı artmış ve Üçüncü sanayi devrimi (Endüstri 3.0) hüküm sürmeye devam etmiştir. Günümüzde ise internet, yapay zeka, nesnelerin interneti (Internet of Things - IoT) gibi kavramları içinde barındıran Dördüncü sanayi devrimi devam etmektedir. Endüstride yaşanan teknolojik gelişim Şekil 1.1’de gösterilmiştir [8].



Şekil 1.1 Endüstriyel devrimlerinin kronolojisi [8]

Endüstri 4.0 birlikte çalışabilirliği, kaynak verimliliğini ve üretkenliği artırarak üretim sanayisini modernize etmek için kullanılan otomasyon sistemleri ağına ihtiyaç duyar [9]. Endüstri 4.0 için temel amaç, kendini yönetebilen üretim süreçlerinin olduğu akıllı fabrikaların hayata geçirilmesini sağlamaktır. Bu durum ancak “Siber-Fiziksel Sistemler” ve “Nesnelerin interneti” ile mümkün olabilmektedir [10]. Endüstri 4.0 uygulamaları, fabrikada insanlar tarafından yönetilebilen geleneksel bir üretim sistemini, uzaktan ve hatta otonom olarak yönetilebilen tamamen entegre, otomatikleştirilmiş ve

optimize edilmiş bir siber fiziksel sisteme dönüştürür [11]. Siber fiziksel sistem, akıllı fabrikalarda Endüstri 4.0'a hazır çözümler oluşturmak için yeni bir bakış açısı sağlayan ağ bağlantılı bir kontrol sistemidir [12]. Siber fiziksel sistemde kontrolöre girdi sağlamak amacıyla çok sayıda sensör kullanılmaktadır. Kontrolör, girdi olarak sensörlerden düzenli olarak ölçümler almakta ve daha sonra kontrol senaryolarını değerlendirerek aktüatörleri harekete geçirmektedir [13].

Endüstri 4.0 ve Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT) kavramları, endüstriyel otomasyon sistemlerinde modernizasyonu anlatmak için kullanılan iki terimdir. Üretim sürecinin tüm aşamalarında toplanan veriler ürün kalitesini, esnekliğini ve verimini artırmak için kullanılmaktadır [14]. Endüstri 4.0'a yönelik gelişmeler bugünlerde imalat sanayi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gelecekte bu etki katlanarak devam edecektir. Çünkü Endüstri 4.0 gelecekte makine-insan işbirliğine ve simbiyotik ürün gerçekleştirimine dönük yeni tip ileri üretim ve endüstriyel süreçler ortaya çıkararak eşi benzeri görülmemiş düzeyde operasyonel verimlilik elde etmemizi sağlayacaktır [15]. Fabrikalar, karşılaşacakları ürünleri hızlı devreye alma ve esnek bir şekilde üretmek ile ilgili sorunlarına çözüm bulabilmek için Endüstri 4.0'ın sahip olduğu modülerlik, otonom olma, karşılıklı çalışabilirlik, sanallaştırma, gerçek zamanlı çalışma ve internet hizmetleri gibi akıllı ürün ile ilgili prosesleri kullanma gereksinimi duyacaklardır [16].

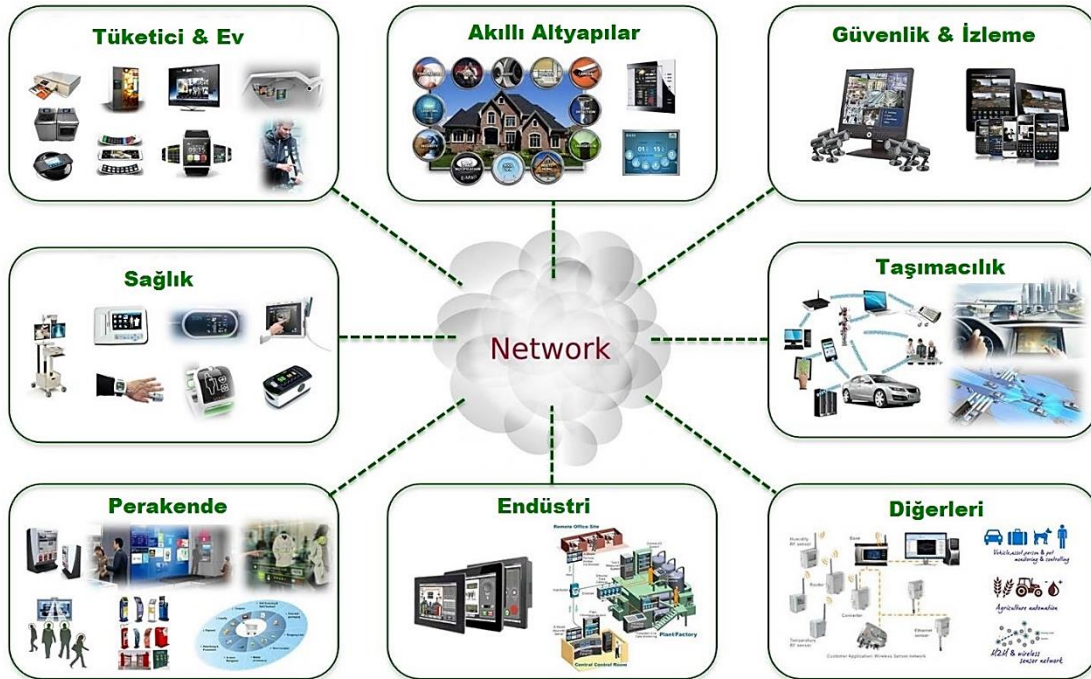
1.2. Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin interneti (IoT) kavramı ilk defa 1999 yılında Kevin Ashton tarafından kullanılmıştır [17]. Günlük hayatta kullandığımız fiziksel nesnelere ağ bağlantısı ile uzaktan erişim sağlanmasını mümkün kılar. Yani bütün nesnelerin insan müdahalesi olmadan fiziksel çevre ve birbirleriyle haberleşmesidir. IoT ilk olarak ortaya çıkarıldığında, ticari ürünlerde kullanılmaktaydı. Daha sonra birçok gelişmiş ülkede endüstriyel sistemlerin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Böylece ortaya çıkan Endüstriyel Nesnelerin İnterneti kavramı, kablosuz bağlantı kullanarak modern üretim sistemlerinin her aşamasında verileri analiz etme fırsatı sunmaktadır [18]. IIoT, endüstriyel üretimde kullanılan saha cihazları ve makinelerin birbirleriyle, dış ortamla ve insanlarla iletişim kurmak için oluşturdukları ağ olarak tanımlanmaktadır [19].

Bugün dünyada birbirleri ile haberleşebilen cihazların sayısı 20 milyar seviyelerinde olup 2025 yılına kadar bu sayının 75 milyar seviyelerine kadar çıkabileceği öngörülmektedir [20]. Örneğin Facebook Ceo'su Mark Zuckerberg tarafından oluşturulan

“internet.org” projesiyle yakın zamana kadar internetin dünyanın her yerinde kullanılabilir hale gelebileceği düşünülmektedir [21]. IoT teknolojisinin temel amacı tüm nesnelerin birbirleriyle haberleşmesini internet üzerinden sağlamaktır [22]. Nesnelerin İnterneti teknolojisinin hızlı gelişmesinin ve adından çokça bahsedilir duruma gelmesinin ana nedenlerinden birisi de teknoloji geliştiren firmaların bütün nesnelere takip edebilme düşüncelerinin olmasıdır [23]. IoT ve mevcut endüstriyel otomasyon sistemlerinin beraber kullanılması pek çok avantaj sunmaktadır. Bu yetenekler aşağıdaki gibi listelenebilir [24] :

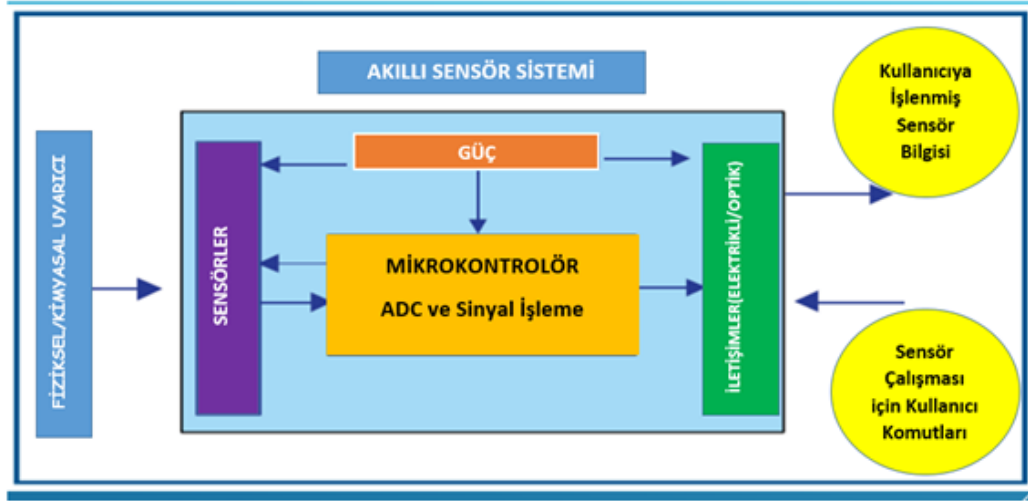
- IoT yeteneğine sahip olan akıllı üretim makineleri, ağ üzerinden birbirleri ile otomatik iletişim kurarak üretimi kontrol etmekte ve bu sayede operatörlerin katkılarını minimum düzeye indirmektedirler.
- Oluşabilecek elektriksel ve mekaniksel arızalar önceden tahmin edilerek arıza nedeniyle duruş süreleri azaltılabilmektedir.
- Fabrikanın üretimi için hammadde eksikliği hızla tespit edilerek giderilmektedir.
- Fabrika yöneticileri üretim ve arızalarla ilgili bilgileri dünyanın herhangi bir yerinden gerçek zamanlı olarak alabilmektedir.
- Bu bilgiler dağıtım kanalları ve müşteriler ile paylaşılabilir.



Şekil 1.2. IoT teknolojisinin kullanıldığı sektörler [25]

1.3. Akıllı Sensör Teknolojisi

İmalat endüstrisinde, temel olarak sensörler üretim işlemlerini otomatik olarak yürütmek ve süreç koşullarını izlemek için kullanılmaktadırlar. Sensör teknolojisinin, Endüstri 4.0 uygulamalarında çalışırken karşılaşılan birçok zorluğun çözülmesinde en önemli kolaylaştırıcılardan biri olduğu açıkça bilinmektedir [26]. Akıllı fabrikalarda güvenilir çalışmayı sağlamak için, ölçümlerin geçerliliğini arttıran daha yüksek doğrulukta sensörler gereklidir. IoT teknolojisinin ortaya çıkmasıyla birlikte sensörler ağa bağlanmaya başlarken aynı zamanda ölçüm doğruluğunu artıracak özellikler ile donatıldı [27]. Bu değişim “akıllı sensör” olarak bilinen yeni bir kavramı ortaya çıkardı. Akıllı sensör, algılanan bir fiziksel büyüklüğün doğruluğunu artırmak üzere sinyal işleme fonksiyonlarını gerçekleştirebilen gelişmiş sensör bloğudur. Yüksek doğrulukta ölçüm sağlamak için akıllı sensörler çoklu algılama, filtreleme, kendi kendine kalibrasyon (self-calibration), kendi kendine test (self-test) ve bütünlük hata teşhisi fonksiyonları ile donatılmıştır. Ayrıca IoT sistem modeline uygun olarak akıllı sensörler kablolu veya kablosuz haberleşme arabirimine sahiptir. Akıllı sensörlerin kullanımının yaygınlaşması, özellikle kablosuz alanda evrensel bir standart olmaması nedeniyle çok hızlı olmamıştır [28]. IEEE, sistemlerin sensörleri otomatik olarak tanımlamalarını, kalibrasyon ve çalışma parametrelerini elde etmelerini sağlayan bir akıllı dönüştürücü arabirimi standartları ailesi olan ‘IEEE 1451’i tanımlamıştır. IEEE 1451 standardı altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümleri akıllı sensörleri yöneten komutları, protokolleri ve işlemleri içermektedir. Diğer bölümler ise sensör konfigürasyonları ile kullanılacak fiziksel arayüzleri tanımlamaktadır. IEEE 1451 standardı halen gelişimine devam etmektedir. IEEE 1451.0 açık standardının bir özelliği, tüm dönüştürücülerdeki verilerin ve TEDS'nin tüm sensörler ve aktüatörler için aynı formatta ağdan iletilmesidir [28]. Akıllı sensör, IEEE 1451.2 ile algılanan bir fiziksel büyüklüğün elektriksel olarak karşılığını yüksek doğrulukta üretmek için sinyal işleme işlevlerini (sinyal filtreleme, doğrusallaştırma ve kompanzasyon gibi) gerçekleştirebilen gelişmiş bir sensör olarak tanımlanmaktadır [29]. Akıllı sensör Şekil 1.3’te gösterildiği gibi temel olarak algılayıcı eleman, mikrokontrolör ve haberleşme arabiriminden oluşmaktadır [30].



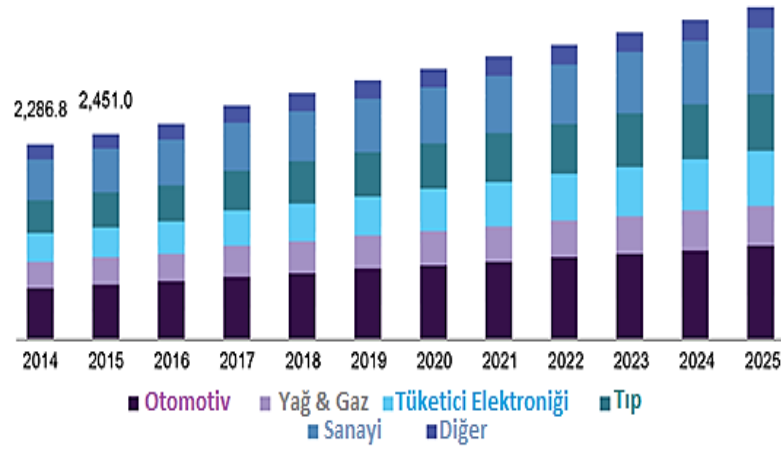
Şekil 1.3 Akıllı sensör yapısı [30]

Akıllı sensörlerin kullanımı, ham verileri buluta göndermek yerine veri analitiği (makine öğrenimi ile) ve depolama işlevlerini kullanarak kararların yerel olarak alınmasına olanak sağlamaktadır. Merkezi denetleyicideki yükü en aza indiren sis hesaplama (fog computing) olarak adlandırılan bu strateji, veri iletimi için gecikmeyi azaltmakta ve işlem koşullarındaki ani değişikliklere daha hızlı yanıt vermektedir [32].

1.4. Tez Çalışmasının İçeriği ve Literatüre Katkısı

Teknolojide yaşanan gelişmeler birçok sektörde her sensöre olan ihtiyacı arttırdığı gibi basınç sensörlerinin kullanım oranlarını da arttırmaktadır. Basınç sensörleri havacılık, otomotiv, tıp, tüketici elektroniği, giyilebilir ürünler, endüstriyel, HVAC, ev otomasyonu ve daha pek çok sektörde geniş yer tutmaktadır. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi dünya genelinde basınç sensörü pazarının 2019 yılında 16 milyon dolar değerinde olduğu ve 2020'den 2025 yılına kadar %5 bileşik yıllık büyüme oranında büyümesi tahmin edilmektedir [32].

Uygulama Alanlarına Göre Basınç Sensörü Pazarı, 2014 - 2025 (Milyon Dolar)



Şekil 1.4 Dünya genelinde basınç sensörü pazarının gelişimi [32]

Tüm bu talep ve artışın yanında basınç sensörlerinin sahip olması gereken özelliklerinde farklılaşması kaçınılmazdır. Özellikle üretim sektöründe kullanılan sensörlerin teknolojik gelişime uygunluk göstermesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında Endüstri 4.0 uygulamalarına yönelik nesnelerin interneti tabanlı akıllı bir basınç sensörünün donanımsal ve yazılımsal olarak geliştirilmesi konusu ele alınmıştır. Geliştirilen akıllı sensör, sıcaklık kompanzasyonu, kendini kendini kalibre etme ve haberleşme yeteneği gibi özellikleri bakımından klasik sensörlere göre üstünlüklere sahiptir. Tasarımı yapılacak olan akıllı basınç sensörü prototipiyle bundan sonra yapılacak çalışmalara temel teşkil edecek bir ürün ortaya koyulması hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Jing Ma ve arkadaşları tarafından akıllı basınç ve sıcaklık sensörü tasarımı ve uygulaması çalışması gerçekleştirilmiştir [33]. Gerçekleştirilen çalışmada akıllı bir basınç sensörü temel olarak dört komponentten oluşmaktadır. Bu komponentler mikroişlemci, basınç-sıcaklık algılayıcı (MS5536C), haberleşme arayüzü (RS 485) ve güç modülüdür. Basınç ölçümünde önemli ve üzerinde çalışılması gereken konulardan birisi de sıcaklık kompanzasyonudur. Bu uygulamada gerçekleştirilen piezorezistif basınç sensöründe direnç ve strain gauge kullanılmıştır. Sıcaklık değiştiği zaman bir direncin kompanzasyonu oldukça zordur. Ancak sıfır kayma voltajı sensörün çıkış voltajında çıkarılarak sensörün kompanze edilmiş nihai çıkış gerilimi elde edilebilir. Bu şekilde kompanzasyon işlemi gerçekleştirilmiş olur. Fakat bu işlemin yazılım üzerinden yapılması gerekmektedir.

Makinwa, akıllı sensörler hakkında çalışmalar gerçekleştirmiştir [34]. Bu çalışmalarından hareketle elde ettiği sonuca göre akıllı sensör, bir sensör ve özel bir arayüz devresinden oluşan kompakt bir paket sistemdir. Arayüz (interface) devresi sensörün dış dünya ile iletişimi için çıkışının dijital bir sinyal olmasına imkan tanır. Fakat akıllı sensör tasarımındaki mevcut eğilim sinyalin mümkün olan en kısa sürede dijitalleştirilmesidir. Daha sonra dijital sinyal üzerinden filtreme, doğrusallaştırma ve sinyal koşullandırma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir.

Baltes ve arkadaşları çalışmalarında [35], akıllı sensör tasarımı üzerinde en yaygın olarak durulan konuları üç farklı örnek ile açıklamışlardır. Birinci sistemde sensör çipine yalnızca bir okuma devresinin (Readout Circuit) entegre edildiği ultraviyole radyasyon dedektörü tasarımı ele alınmıştır. Bu örnek üzerinden aynı çip üzerinde sensör ve devrenin birlikte bulunmasıyla ortaya çıkan teknolojik sorunlar vurgulanmıştır. İkinci sistemde manyetorezistörlere dayanan bir manyetik vektör algılayıcının standart bir CMOS işleminde doğrudan üretilmesiyle tasarlanan bir akıllı sensör anlatılmıştır. Bu üretim şekline göre algılayıcının ideal davranışından saptığı gözlenmiştir. Oluşan hataları en aza indirmek için tasarlanacak arayüz devrelerinden bahsedilmiştir. Üçüncü mikrosistemde, üç sensör (sıcaklık, nem, debi) aynı çip üzerinde arayüz devresiyle entegre edilmiştir. Bu sistemde de hem teknolojik (üç sensörün ikisini üretmek için farklı işlem sonrası adımlar gerekir.) hem de işlem adımlarından (yüksek çözünürlüklü A/D dönüştürme ve çoğullama) kaynaklanan hatalar ortaya çıkabilmektedir.

Ramamurthy ve arkadaşları çalışmalarında [36], enstrümantasyon ve kestirimci bakım sistemlerini hedef alan kablosuz akıllı sensör platformu sunulmaktadır. Endüstriyel uygulamalar ve sistem performansı için örnek uygulamalar tartışılmıştır. Bu araştırmada taşınabilirlik, güvenilirlik, esneklik ve sağlamlık konularına odaklanılırken; enstrümantasyon ve kestirimci bakım gibi endüstriyel uygulamalarda kablosuz bağlantı kullanılırken uygulanabilecek çözümler de ele alınmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre “Akıllı Sensör Ağıyla (Smart Sensor Network-SSN)” sürekli gerçek zamanlı sistemler kurulabilir. “Akıllı Sensör Arayüzlerinin (Smart Sensor Interfaces-SSI)” çok yönlülüğü çeşitli uygulamaların gerçekleşmesine olanak sağlar. Ayrıca bu çalışmada düşük güç kapasitesiyle ZigBee’nin güç ve performans açısından Bluetooth ve RFID’ye mükemmel bir alternatif olacağı vurgulanmıştır.

Ferrari ve arkadaşları gerçekleştirmiş oldukları “Düşük Maliyetli İnternet bağlantılı Akıllı Sensör” isimli çalışmada [37], IEEE 1451.2 mimarisine sahip bir dönüştürücüsü olan ve ağ tarafında web sunucusu olarak çalışan bir akıllı sensör tasarımını açıklamışlardır. Geliştirilen sensör, dahili veri yapılarına ve bir IEEE 1451.2 STIM arabirimine sahiptir.

Hamrita ve arkadaşları çalışmalarında [38], “Akıllı Sensör Teknolojisindeki Gelişmeler” isimli makalede akıllı sensör ağlarına genel bir bakış yapmıştır. “Berkeley” in MICA2DOT smart dust: düğümü ve Dünya’nın en küçük RFID okuyucusunu kullanarak akıllı sensör ağı tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

Schütze ve arkadaşları çalışmalarında [14], son iki yüzyıl içindeki sensör gelişimini kısaca değerlendirmişlerdir. Akıllı sensörler ve veri değerlendirmeyle elde edilecek potansiyelin bir kısmını vurgulamış ve gelecekteki gelişmeler için başarı gereksinimlerini tartışmışlardır.

Gervais yapmış olduğu “Gelecek Akıllı Sensörlerin Üretimi” isimli çalışmasında [39] akıllı sensör platformu adıyla yeni bir sistem önermiştir. Bu sistemde bir MEMS ivmeölçeri 32-bit bir mikrokontrolcüye yerleştiren akıllı sensör platformunun bir uygulamasını anlatmıştır.

Malar ve Kamara çalışmalarında [40] akıllı dönüştürücülerin endüstriyel otomasyon için geliştirilmesine yönelik tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada IEEE 1451.4 standardına tam uyumlu akıllı sensör geliştirme aracı sunulmuştur. Aynı zamanda çalışmada IEEE 1451.4 standardının iki ana bileşeni olan TEDS ve karışık mod ara yüz devrelerinden bahsedilmiş ve bunlar uygulanmıştır.

Hunter ve arkadaşlarının çalışmalarında [30], akıllı sensör sistemlerinin yapısı hakkında araştırmalar verilmiştir. Akıllı sensör komponentleri detaylı olarak açıklanmış, düşük güçlü sensör komponentlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca akıllı sensör sistemlerinin gelecekteki uygulamaları hakkında tartışılmıştır.

Jon tarafından yapılan çalışmada [41], basınç sensörlerinin ölçümlerinde sıcaklık etkisinin önemi ve sıcaklık kompanzasyonu üzerinde durulmuştur. Jon yapmış olduğu çalışmada, sıcaklık kompanzasyonunun etkisini gösterebilmek için bir sıcaklık odasına sıcaklık kompanzasyonu yapılmamış bir basınç sensörü yerleştirmiştir. Ve bu sensör basıncı 0-40 bar aralığında 0° ila 40°C çevresel sıcaklık altında test etmiştir. Aynı şartlar altında bir de sıcaklık kompanzasyonu yapılmış bir basınç sensörü test etmiştir.

Çelik çalışmasında [42], üç farklı piezorezistif tabanlı basınç MEMS basınç sensörünün tasarımını ve analizini yapmıştır. Bu sensör tasarımlarında basınç ölçümleri için basıncı alan diyaframının ön yüzüne Wheatstone köprüsü mantığıyla dört adet piezorezistör konulmuştur. Basıncın etkisiyle direnç değişimlerinin oluşturulduğu gerilim farkından yararlanılarak basınç ölçümü gerçekleştirilmiştir.

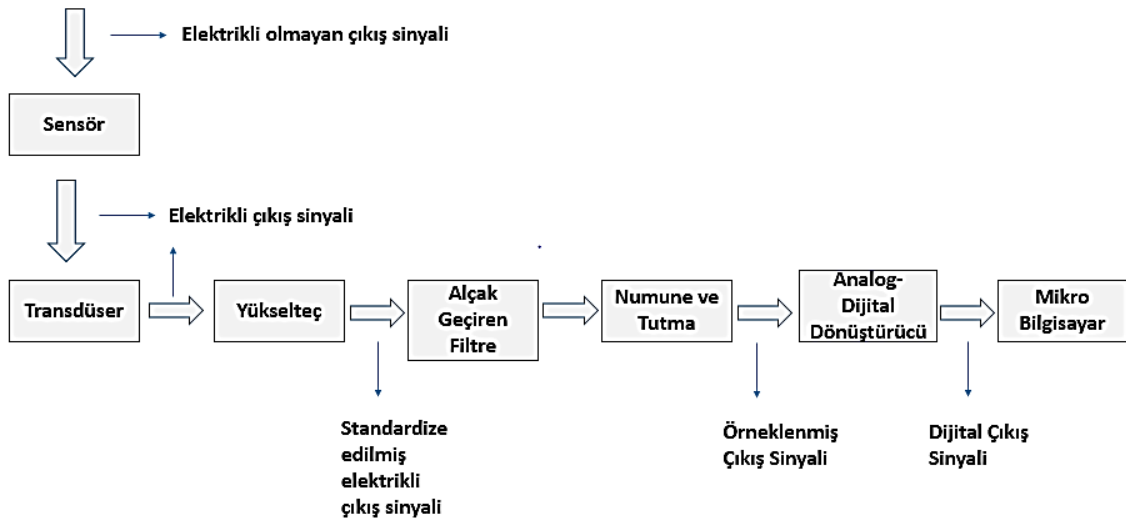
Lu ve arkadaşı tarafından yapılan çalışmada [43], mikro basınç sensör teknolojisini tanımlayan basınç sensörlerin yapıları ve çalışma presiplerini açıklanmıştır. Yapılan çalışmada sıcaklık kompanzasyonu için akıllı basınç sensörünün doğruluk, düşük sıcaklık kayması, güvenilirlik ve ekonomik gereksinimler üzerinde çalışılmıştır. Akıllı basınç sensörünün, basınç sensörü, sinyal şartlandırıcı devresi, iletişim ünitesi, sıcaklık sensörü ve mikroişlemci olmak üzere beş parçadan oluşmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde piezorezistif ölçüm yöntemine dayalı akıllı basınç sensörü geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar ele alınmıştır. Geliştirilen basınç sensörünün donanım ve yazılım olarak tasarımı ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.1. Sensör Teknolojisi

Sensörler fiziksel büyüklükleri algılar ve elektriksel sinyallere dönüştürür. Sensör tabanlı bir ölçüm sisteminin akış şeması Şekil 3.1’de verilmektedir [44].



Şekil 3.1 Ölçüm sistemi [44]

Sensörlerin ölçüm doğruluğunu belirleyen temel karakteristikleri şu şekilde sıralanabilir: [45]

a. Aralık (Range)

Bir sensörün ölçüm aralığı, giriş veya çıkış değerlerinin en küçük ve en büyük değerleri ile belirlenmektedir [45].

b. Açıklık (Span)

Sensörlerin maksimum ve minimum aralık değerleri arasındaki farka sensör açıklığı adı verilmektedir [45].

c. Duyarlılık (Sensitivity)

Bir sensörün girişindeki değerin değişimine göre göstermiş olduğu cevap yeteneğidir [46].

d. Doğruluk (Accuracy)

Bir sensörün ölçtüğü değer ile ölçülmesi gereken gerçek değer arasındaki uyumdur [47].

e. Doğrusallık (Linearity)

Bir sensörün ölçüm değerleri ile oluşan karakteristik çıkış grafiğinin bir doğru grafiği ile benzerliğini gösteren bir ölçüdür [47].

f. Yinelenebilirlik (Repeatability)

Bir sensörün aynı şartlar ve koşullar altında aynı değişkenin değerinin ölçülmesinde alınan farklı ölçümlerin birbirine benzerliği olarak tanımlanmaktadır [48].

g. Çözünürlük (Resolution)

Herhangi bir değer ölçülmesinde kademelerin belirtilmesi için kullanılan bir özelliktir [49].

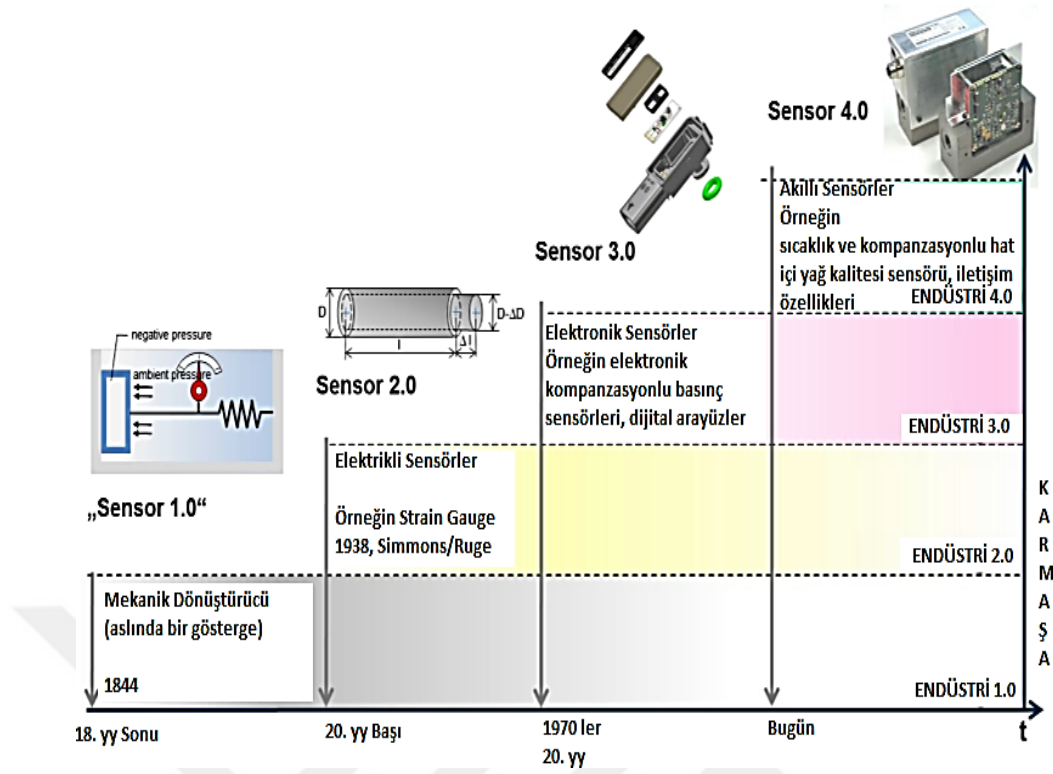
h. Hassasiyet (Precision)

Bir algılayıcının ne kadar küçük değerleri ölçebileceğiyle ilgili bir terimdir.

i. Histeresiz (Hysteresis)

Ölçülen herhangi bir değişkenin değerinin süreç değişkeninin önceden almış olduğu değerinin azaltılma ya da arttırılması yoluyla mevcut değişkene ne seviyede yaklaştığını gösteren ölçüye histeresiz denilmektedir [49].

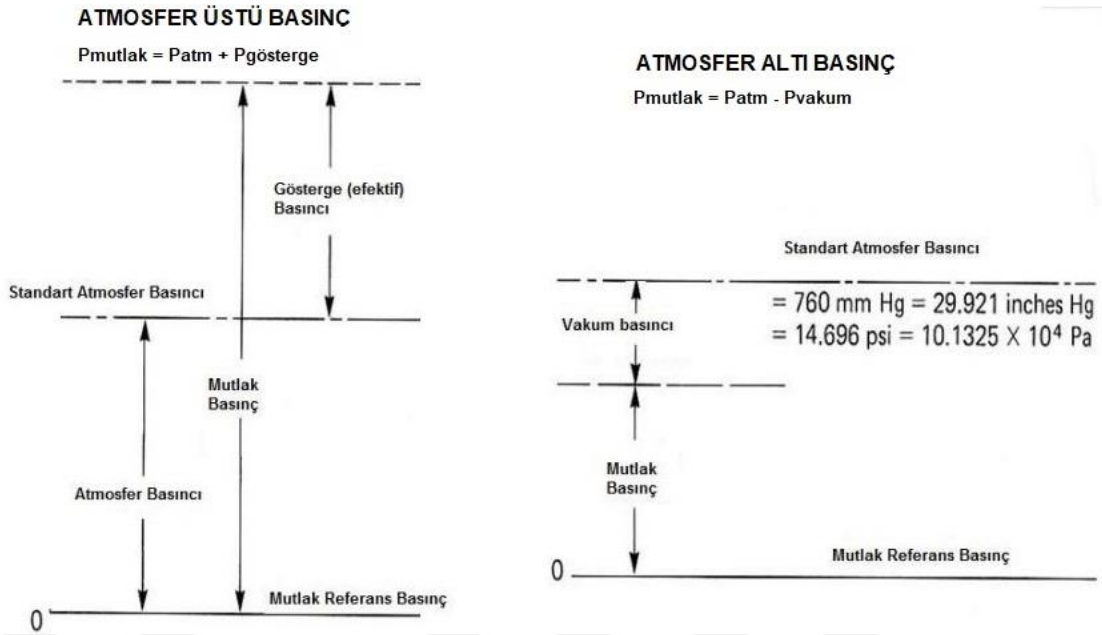
Endüstriyel alanda yaşanan gelişmeler sensör teknolojisini de etkilemiştir. Endüstriyel gelişimin dört aşamasına benzer şekilde sensör teknolojisi de Şekil 3.2’de gösterildiği gibi gelişmiştir [30].



Şekil 3.2 Sensör 1.0'dan Sensör 4.0'a tarihsel gelişimi [30]

3.2. Basınç Sensörleri

Basınç birim yüzeye uygulanan kuvvet olarak tanımlanmaktadır. SI (MKS) birim sisteminde bir metrekarelik alana uygulanan bir Newton kuvvet bir Paskal basınç olarak ölçülür [50]. Basınç değeri kuvvet ve yüzey kesitine bağlı olarak “ $P = F/A$ ” formülüyle hesaplanabilmektedir. Formülde belirtilen P basıncı, F basınç kuvveti, A ise alanı göstermektedir. Şekil 3.3'te basınç ölçüm tipleri ve bunların birbirlerine göre ölçüm ilişkisi gösterilmiştir [51].



Şekil 3.3 Basınç türlerinin gösterilmesi [51]

Basınç sensörleri analog veya dijital formda çıkış sinyali verir. Basınç farklı şekillerde ölçülebilir. Bu ölçüm türleri, gösterge basınç ölçümü, mutlak basınç ölçümü ve fark basınç ölçümüdür [51].

- Gösterge (efektif) basıncı, anlık atmosfer basıncına göre basınç değerinin ölçümünün gerçekleştirilmesiyle elde edilir.

- Mutlak basınç değeri, ölçülen basıncın sıfır basınç değerinden farkı alınarak ölçülen basıncı ifade eder.

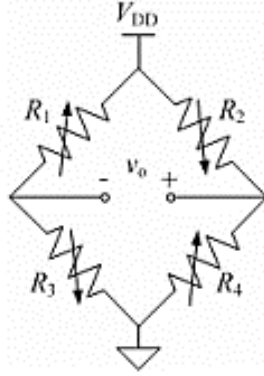
- Fark basıncında ise farklı iki noktanın basıncı ölçülerek farkı alınıp elde edilen basınç türüdür.

Basınç sensörü kullanılacağı uygulamanın ihtiyaçlarına göre seçilir. Basınç sensörleri algılama elemanının çalışma prensibine (piezorezistif, piezoelektrik, kapasitif) göre ölçüm yapmaktadır [52].

3.2.1. Piezorezistif Basınç Sensörleri

Piezorezistif etki, malzemenin mekanik deformasyona maruz kaldığı durumda direncinin değişmesidir. Piezorezistif algılama ise uygulanan basınç karşısında malzemenin mekanik deformasyona maruz kalması ile oluşan direnç değişikliğinin çıkış gerilimine dönüştürülmesine dayalıdır [53,54]. Piezorezistif sensörler Şekil 3.4'te

gösterildiği gibi Wheatstone köprüsü konfigürasyonunda bir membran (diyafram olarak da adlandırılır) üzerine yerleştirilmiş dört piezo-dirençten oluşmaktadır [55].

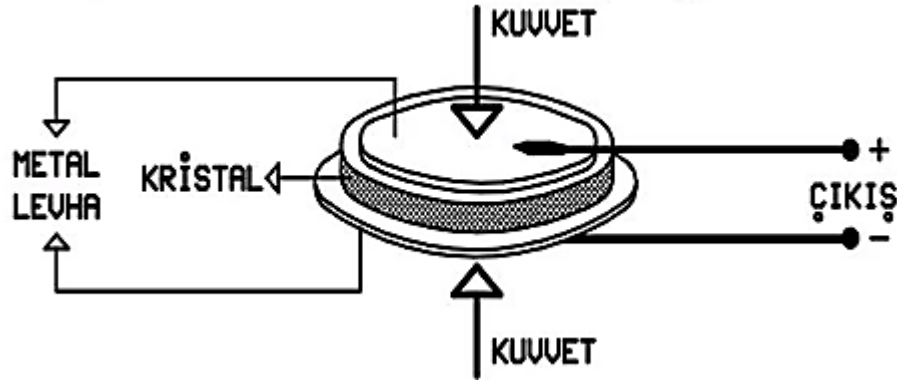


Şekil 3.4 Wheatstone köprüsünde piezorezistif sensör yapılandırması [55]

Piezorezistif basınç sensörleri, düşük maliyet, doğrusallık ve basit bir okuma devresiyle seri üretim olasılığına sahiptirler. Monte edilmiş her bir direncin piezorezistif katsayıları diyaframın yönüne, katılama tipine, miktarına ve sıcaklığa bağlıdır [56]. Piezorezistif ölçüm prensibine dayanan basınç sensörleri sensör pazarında en büyük paya sahiptir [57].

3.2.2. Piezoelektrik Basınç Sensörleri

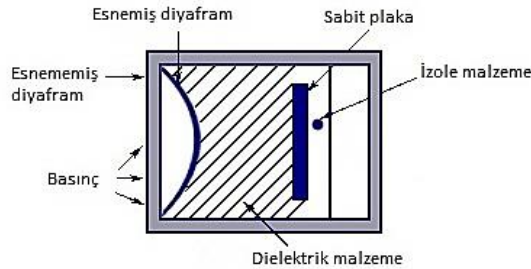
Piezoelektrik etki, kristal malzemelerin üzerine basınç uygulandığında malzeme uçlarında elektrik akımının meydana gelmesi prensibine dayanır. 1800 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Sensörlerin yapısında bulunan kuartz, roşel tuzu, baryum ve turmalin gibi kristal yapılu maddeler bulunmaktadır. Piezoelektrik etki bir basınç sensöründe kullanıldığında, sensöre basınç uygulandığında hafif sapma yapan diyafram kullanılmaktadır. Bu küçük sapma doğrudan piezoelektrik kristal malzemesine iletilir. Kristaldeki basınç değerine göre küçük bir voltaj üretir. Bu küçük değer, 0-10 V (veya istenen bir aralık) arasındaki voltaj sinyaline dönüştürülür [42]. Şekil 3.5'te piezoelektrik özellikli basınç sensörünün yapısı verilmektedir.



Şekil 3.5 Piezoelektrik özellikli basınç sensörü yapısı [42]

3.2.3. Kapasitif Basınç Sensörleri

Kapasitif basınç sensörleri, basınç etkisiyle değişen kapasitans değerini baz alarak ölçüm gerçekleştirmektedir. Sensörün yapısında kapasitif etkiye sahip iki plakadan oluşan bir diyafram bulunmaktadır. Uygulanan basınç ile diyafram esner ve plakalar arasındaki kapasitans değeri kuvvete bağlı olarak değişir. Basınç kuvveti etkisiyle doğrusal olarak değişen bu kapasitans değeri yardımıyla basınç değeri hesaplanabilmektedir. Şekil 3.6'da kapasitif basınç sensörünün yapısı görülmektedir.

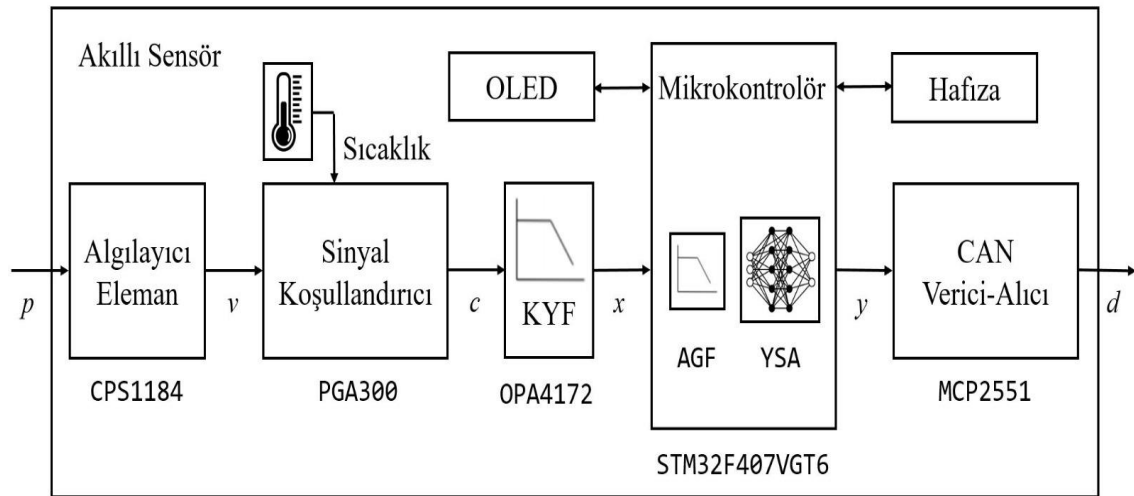


Şekil 3.6 Kapasitif basınç sensörü yapısı

Kapasitif basınç algılama, yüksek doğruluk, düşük güç tüketimi ve düşük sıcaklık hassasiyeti nedeniyle piezodirençli basınç algılamaya göre daha avantajlı durumdadır. Fakat piezorezistif algılama, kapasitif algılamadan nispeten daha düşük maliyetli bir tekniktir. Bundan dolayı basınç sensörü üretiminde genellikle piezorezistif algılama yöntemi kullanılır [58].

3.3. Piezorezistif Akıllı Basınç Sensörü Tasarımı

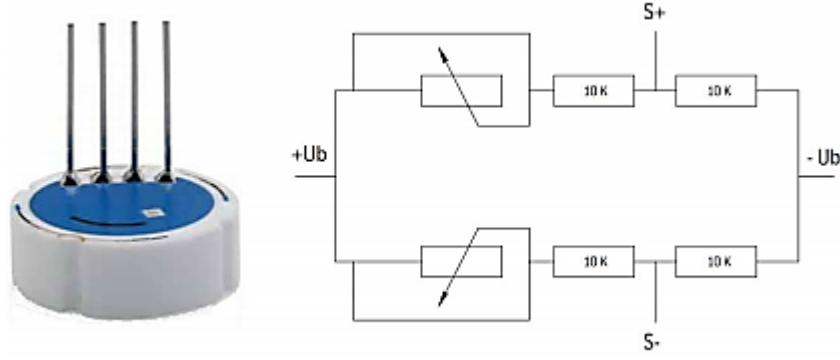
Endüstriyel uygulamalarda kullanılabilen piezorezistif algılama yöntemi temelli akıllı basınç sensörü tasarımı, piezorezistif algılayıcı, sinyal koşullandırıcı-şartlandırıcı devre bloğu, mikrokontrolör devre bloğu, haberleşme bloğu, görüntüleme ve mekanik muhafaza olmak üzere altı kısımdan oluşmaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde temel donanım blokları Şekil 3.7’de gösterilen akıllı basınç sensörü tasarımı anlatılmıştır.



Şekil 3.7 Akıllı basınç sensörü tasarımımızın donanım bileşenleri

3.3.1. Piezorezistif Basınç Algılama Elemanı

Algılama elemanı basınç sensörünün çekirdeğidir. Görevi mekanik gerilimi tespit edip uygulanan basınç ile doğru orantılı olarak bir elektrik sinyali üretmektir [59]. Tez çalışmasında piezorezistif basınç algılayıcı olarak seramik malzemeden üretilmiş CPS1184 basınç algılayıcı kullanılmıştır. Uzun süreli olarak kararlı çalışabilen Metallux firması tarafından üretilen CPS1184 basınç algılama elemanı 1.6 ila 600 bar aralığında ölçüm yapılabilmektedir. CPS1184 basınç algılama elemanının bağlantı şeması Şekil 3.7’de verilmiştir [60].



Şekil 3.8 Metallux CPS1184 Basınç algılama elemanı ve bağlantı şeması [60]

Akıllı basınç sensörü tasarımında yapılan testlerde kalibratör ile basınç değeri uygulanmıştır. Şekil 3.9’da verilen Fluke 729 otomatik basınç kalibratörü 0-20 bar aralığında 0.1 mBar hassasiyet ile basınç üretebilmektedir.

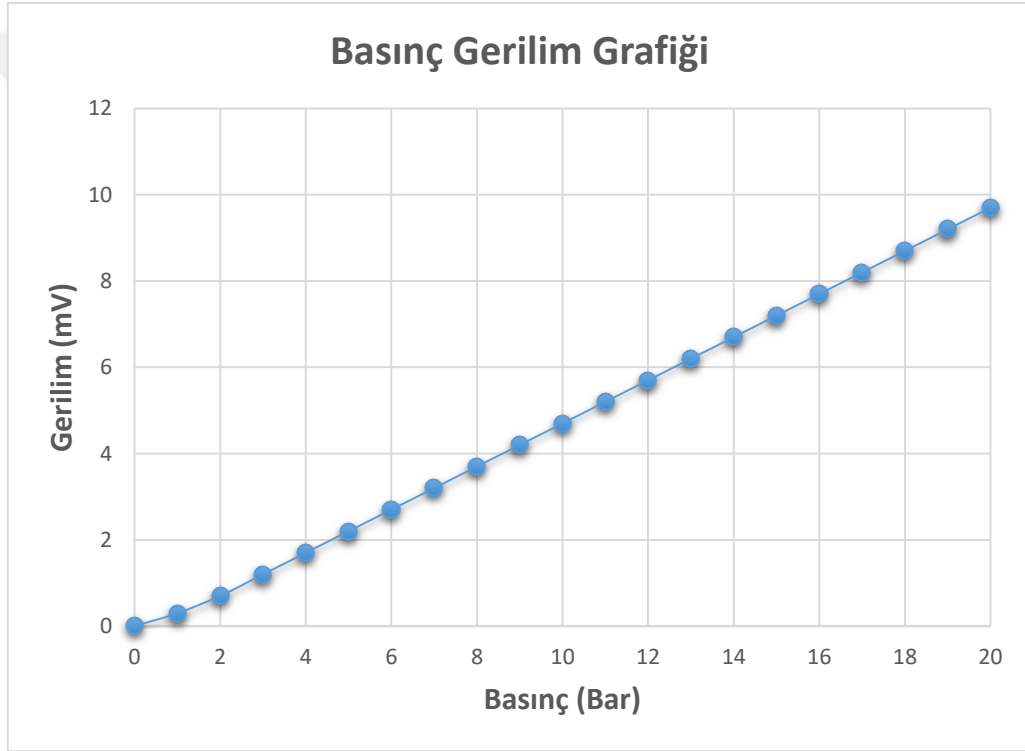


Şekil 3.9 Fluke 729 basınç kalibratörü

Tasarım çalışmalarında kullanılan basınç algılayıcı 0-20 bar aralığında mutlak basınç ölçmektedir. Algılayıcıya basınç kalibratörü kullanılarak 0-20 Bar aralığında basınç uygulanarak çıkış gerilimleri ölçülmüştür. Alınan değerler Tablo 3.1’de verilmiş ve Şekil 3.10’da gösterilen “Basınç-Gerilim” grafiği oluşturulmuştur.

Tablo 3.1 Algılayıcı basınç testi

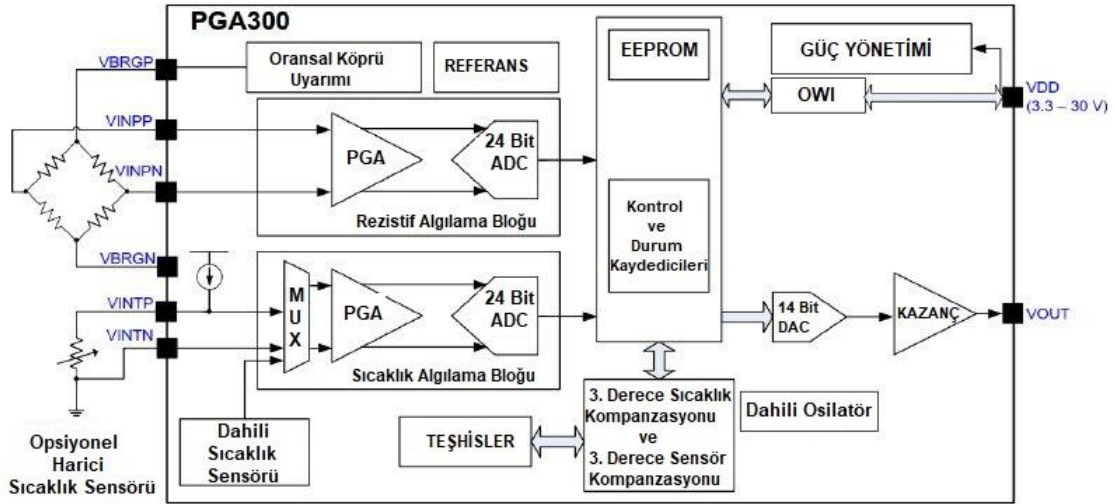
Basınç (Bar)	Gerilim (mV)	Basınç (Bar)	Gerilim (mV)
0	0.3	11	5.7
1	0.7	12	6.2
2	1.2	13	6.7
3	1.7	14	7.2
4	2.2	15	7.7
5	2.7	16	8.2
6	3.2	17	8.7
7	3.7	18	9.2
8	4.2	19	9.7
9	4.7	20	10.2
10	5.2		

**Şekil 3.10** Basınç algılayıcı çıkış sinyali grafiği

3.3.2. Sinyal Şartlandırıcı Devresi

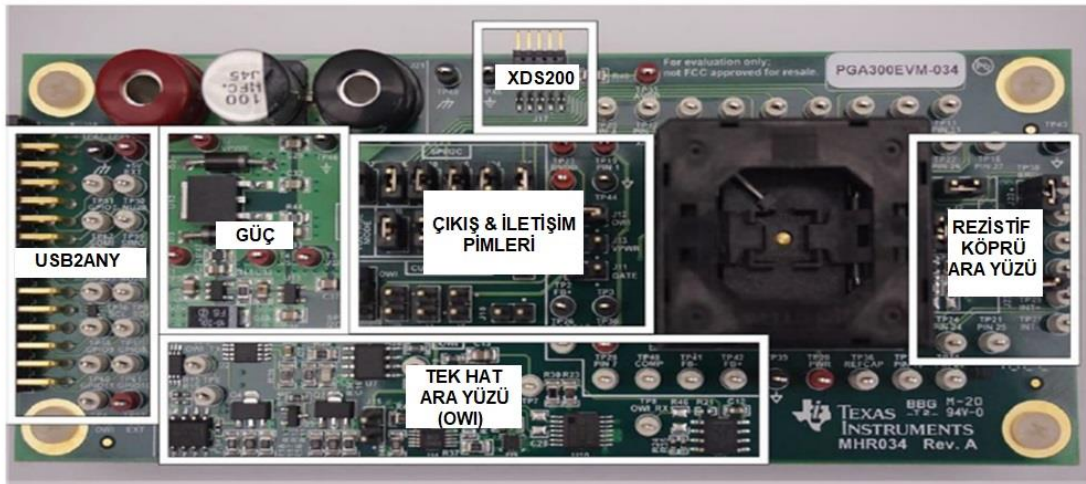
CPS1184 algılama elemanının çıkış gerilimi 0,3-10,2 mV/V olduğundan dolayı bir mikrokontrolöre doğrudan arayüz oluşturmak için yetersizdir. Bu nedenle çıkış gerilimini yükseltmek için bir sinyal şartlandırıcı devreye ihtiyaç duyulmaktadır. Piezorezistif basınç algılayıcı için sinyal şartlandırıcı olarak PGA300 entegresi kullanılmış ve deneysel çalışmalar PGAEVM-034 geliştirme kartı üzerinde

gerçekleştirilmiştir. PGA300 sinyal şartlandırıcı, piezorezistif basınç algılama elemanı için arayüz sağlamaktadır. PGA300 programlanabilir kazanç yükseltici kullanılarak CPS1184 çıkışındaki gerilim seviyesi yükseltilmiştir. PGA300 sinyal şartlandırıcı çipinin iç yapısı Şekil 3.11’de verilmiştir [61].



Şekil 3.11 PGA300 entegresi ve blok diyagramı [61]

PGA300 geliştirme modülü OWI (One Wire Interface) üzerinden haberleşme ile çalışmaktadır ve Şekil 3.12’de gösterildiği gibi geliştirme kartı ile programlanmaktadır. Geliştirme kartına 10-30 V gerilim uygulanarak PGA300 entegresi kullanıma hazır duruma getirilmekte ve konfigürasyon moduna geçirilmektedir.

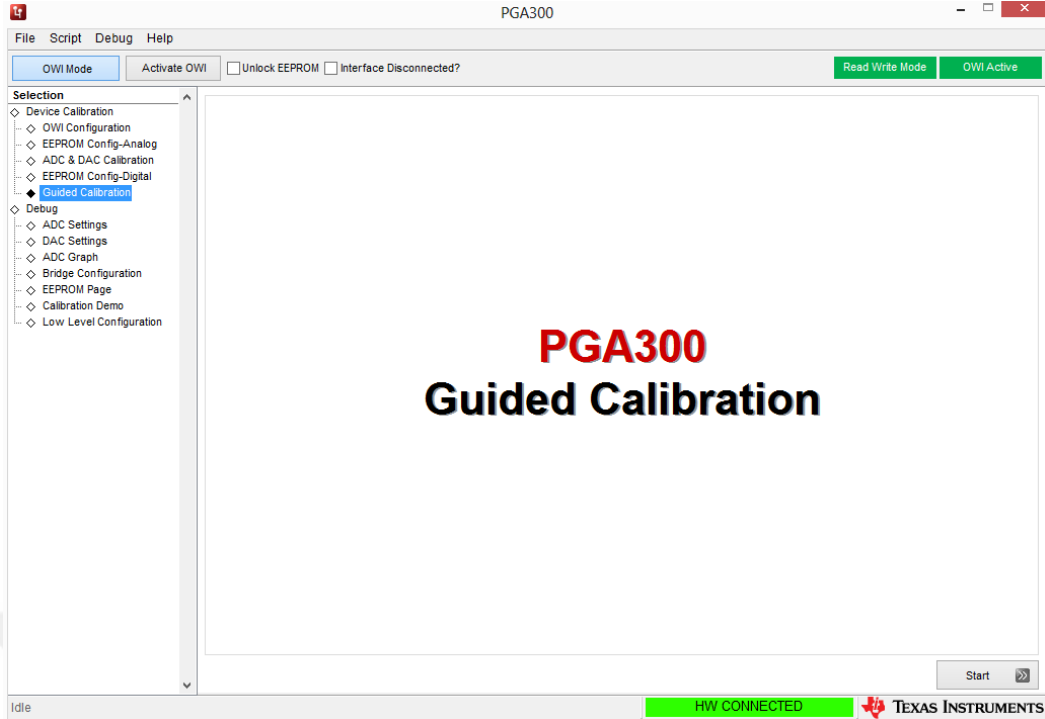


Şekil 3.12 PGA300EVM sinyal şartlandırıcı geliştirme kartı

Tablo 3.2 PGA300 voltaj modu pin konfigürasyonu

Bağlantı Pimi	Ayar	Fonksiyon
J12	Kısa devre	PGA OWI devresi (VDD=5V) tarafından beslenmektedir.
J1, J2, J3	Kısa devre	Rezistif köprü PGA'ya bağlanmaktadır.
J6, J7, J8	Kısa devre	100 nF yük ile voltaj moduna geçilmektedir.
J16	Kısa devre	ASIC_GND, IRETURN'a bağlanmaktadır.
J14	Pim 1-2 kısa devre	VDD kapasitörü ASIC_GND'ye bağlanmaktadır.
J19	Pim 2-3 kısa devre	USBGND, IRETURN'a bağlanmaktadır.

Basınç algılayıcısının çıkışına bağlanan PGA300 çipi kullanılarak konfigürasyon ayarlarını yapabilmek için aşağıdaki Tablo 3.2'de verilen pin konfigürasyonu geliştirme kartı üzerinde oluşturulmuştur. Tabloda gösterilen gerekli pin konfigürasyonları uygulandıktan sonra ayarlamalar Şekil 3.13'te verilen PGA GUI arayüz yazılımı üzerinden şartlandırıcı devre ayarlarına devam edilmiştir. PGA300 programlanabilir kazanç yükseltecinin kalibrasyon ayarlarını yapabilmek için PGA300EVM ile PC bağlantısının USB üzerinden yapılmış olması gerekmektedir. Bu bağlantıdan emin olmak için mutlaka yazılımın sağ alt köşesinde bulunan "HW CONNECTED" yazısının yeşil olarak aktif olduğu kontrol edilmiştir. Yine yazılımın üst çubuğundan bulunan "Activate OWI" butonu ile OWI haberleşmesi aktif hale getirilmiştir. Bütün bu kontroller sağlandıktan sonra hata tespit edilmeden "Start" butonu ile kalibrasyona başlatılmıştır.



Şekil 3.13 PGA300 GUI kalibrasyon sayfası

3.3.3. Sıcaklık Kompanzasyonu

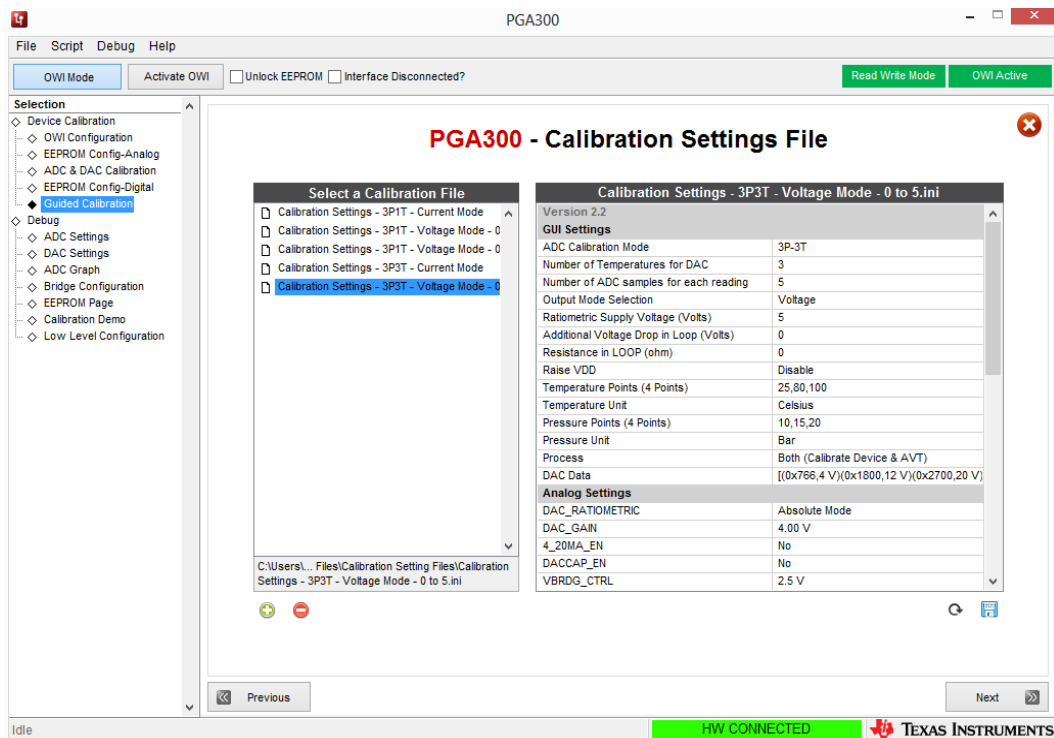
Akıllı bir basınç sensörünün performansı, algılama elemanının ne kadar iyi kalibre edildiğine ve bu kalibrasyonunu ne kadar süre koruyabileceğine bağlıdır. Sabit bir basınç altında algılama elemanının doğruluğunu artırmak için akıllı basınç sensörü tasarımı yapılırken sıcaklığa bağlı sapma etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Sıcaklığa bağlı sapmanın etkisinin en aza indirebilmek için yazılım kompanzasyonu, donanım kompanzasyonu ve hibrit yaklaşımları içeren çeşitli kompanzasyon yöntemleri önerilmektedir [61]. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında maliyetinin diğer yöntemlere göre daha uygun olmasından dolayı yazılımsal kompanzasyon tercih edilmiştir.

Metallux firmasından tedarik edilen düşük maliyetli CPS1184 basınç algılayıcı üzerine uygulanan basınca göre çıkışı mV seviyelerinde analog gerilim vermektedir. -40°C ila 150°C çalışma sıcaklığına sahiptir. Ayrıca termal ofset kayması ve termal aralık kayması parametreleri Tablo 3.3'te sabit sıcaklıkta tam ölçekli bir ölçümün yüzdesi olarak verilmektedir.

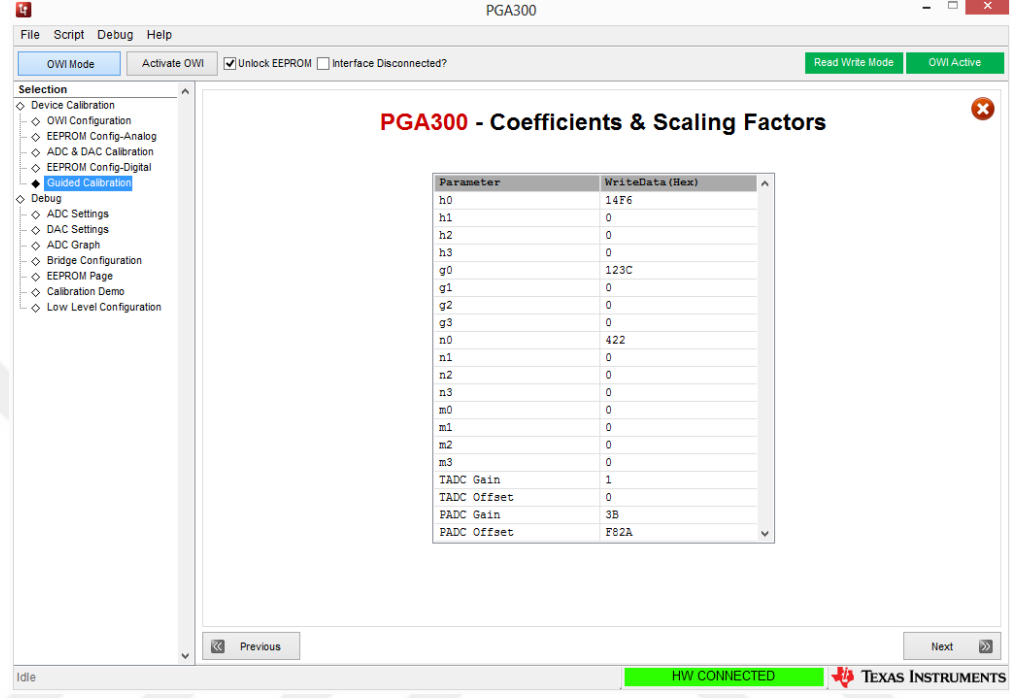
Tablo 3.3 CPS1184 basınç algılama elemanının sıcaklığa bağlı özellikleri

Termal ofset kayması	Normal 0 ± 0.015 , Maksimum $0 \pm 0.02\%FS/K$ (25...85°C)
Termal açıklık kayması	$0 \dots -0.013\%FS/K$ (0...70°C)
	$0 \dots -0.015\%FS/K$ (-20...0°C) (70...85°C)
	$0 \dots -0.018\%FS/K$ (-40...-20°C, 85...135°C)

Akıllı sensör teknolojisi, mikrokontrolörün yanı sıra yeterli fonksiyonelliğe sahip olduğunda, sinyal şartlandırıcı tarafından yapılabilen yazılım tabanlı sıcaklık kompanzasyonuna da olanak sağlamaktadır. PGA300, basınç sensörleri için özel olarak tasarlanmıştır. Algılama elemanı, basınç ölçümü esnasında sıcaklık tarafından çıkışın oluşturulabilecek termal kaymayı telafi etmek için matematiksel bir algoritma kullanmaktadır. PGA300, sıcaklık kompanzasyonunu gerçekleştirmek için üzerinde çıkış sinyali dahili ADC tarafından sayısallaştırılan yerleşik bir sıcaklık sensörü bulundurmaktadır. Tez çalışmasında Şekil 3.14’de gösterildiği gibi basınç kalibratörü ve termal oda kullanılarak üç farklı basınç (0,10,20 Bar) ve üç farklı sıcaklık (25,80,100 °C) değeriyle 3P-3T kompanzasyon kurulumu gerçekleştirilmiştir.

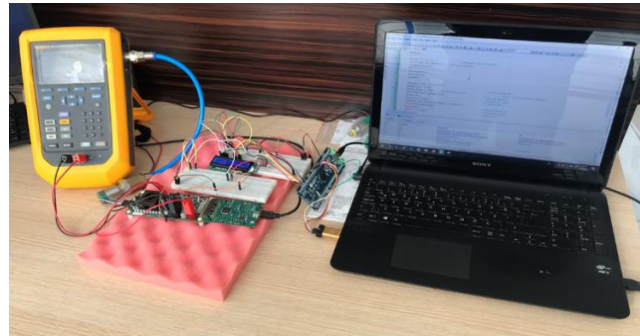
**Şekil 3.14** PGA300 ile 3P-3T kompanzasyonu

Kalibrasyon işlemi tamamlandıktan sonra Şekil 3.15'te gösterildiği gibi PGA300 üzerindeki basınç ve sıcaklık ADC birimleri algılama elemanının çıkış sinyalinde doğrusal olmayan karakteristikleri belirleyerek, üçüncü dereceden dijital doğrusallaştırma denkleminde kullanılan h, g, n ve m katsayılarını hesaplar.



Şekil 3.15 PGA300 Katsayı & Ölçekleme çarpanları

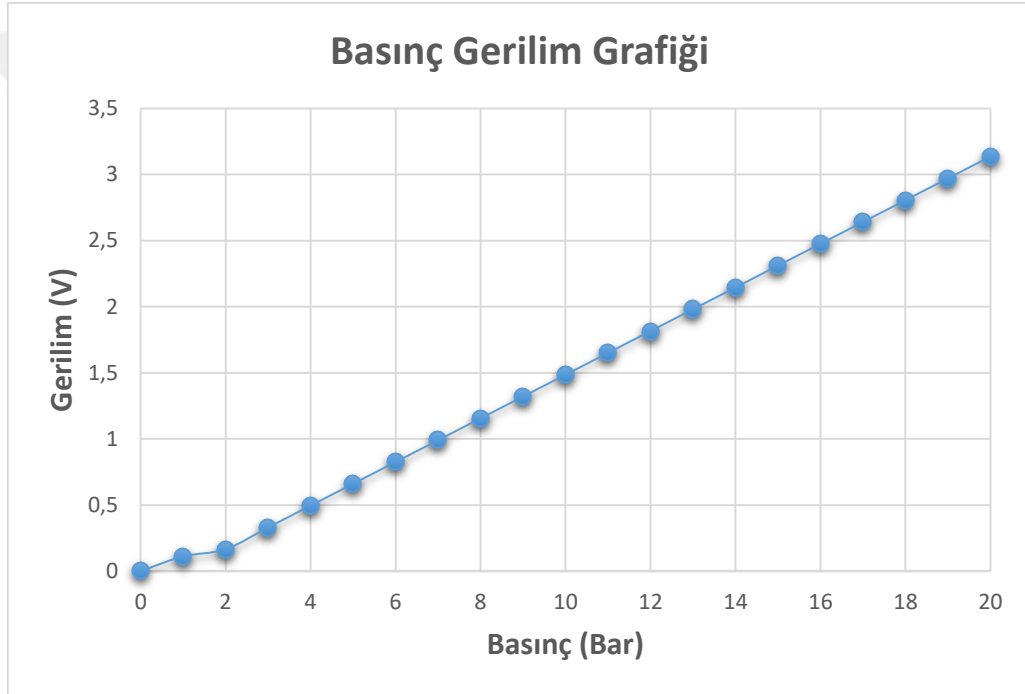
Sinyal şartlandırıcı kullanarak seramik basınç algılayıcının çıkış gerilimi mikrokontrolörün okuyabileceği seviyeye yükseltilmiştir. Bu işlem yapılırken yazılım üzerinde farklı sıcaklık ve basınçlar belirlenerek kalibrasyon dosyası oluşturulmuştur. 0-20 Bar arasındaki basınç değişimiyle doğrusal olarak değişen PGA300 sinyal şartlandırıcı devresinin çıkış sinyali değerleri Tablo 3.4'te verilmektedir.



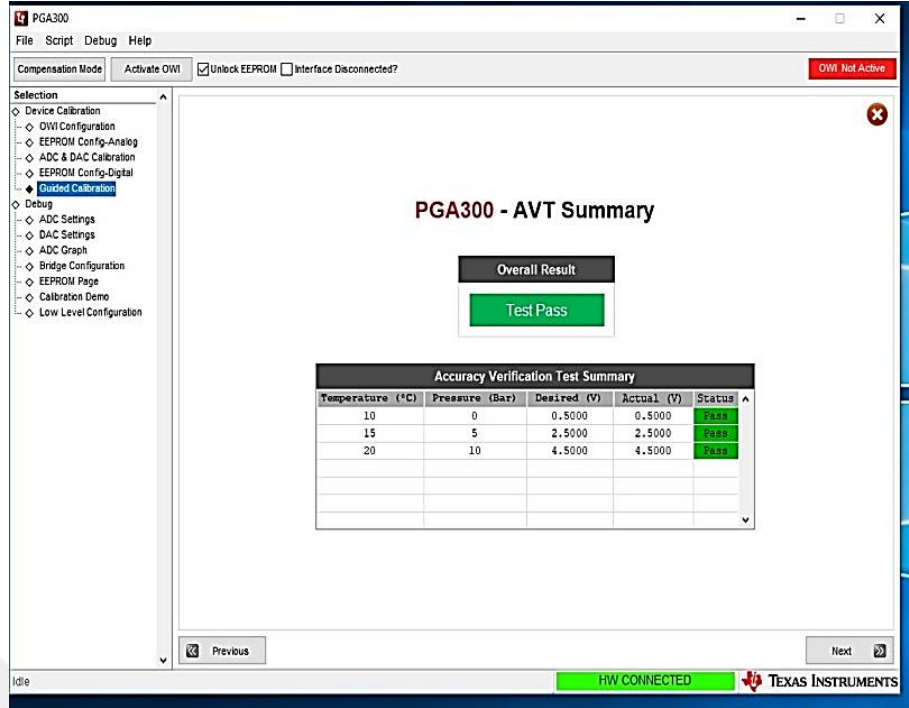
Şekil 3.16 Test yatağı

Tablo 3.4 Sinyal şartlandırıcı çıkış gerilim testi

Basınç (Bar)	Gerilim (V)	Basınç (Bar)	Gerilim (V)
0	0.111	11	1.815
1	0.165	12	1.98
2	0.33	13	2.145
3	0.495	14	2.31
4	0.66	15	2.475
5	0.825	16	2.64
6	0.99	17	2.805
7	1.155	18	2.97
8	1.32	19	3.135
9	1.485	20	3.3
10	1.65		

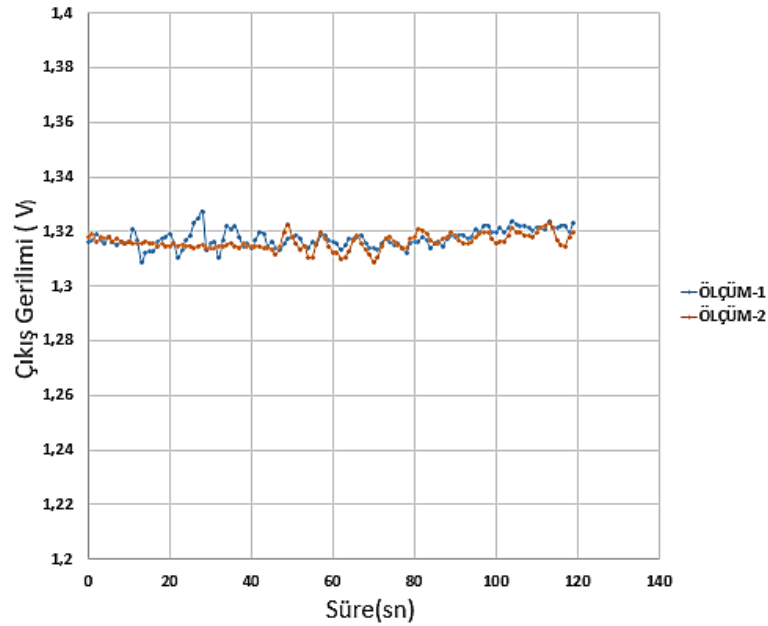
**Şekil 3.17** Algılayıcı & PGA300 çıkış grafiği

PGA300 üzerindeki kalibrasyon ayarları “Texas Instrument” tarafından açık kaynak olarak sunulan “PGA300” yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PGA300 kalibrasyonu yapıldıktan sonra Şekil 3.18’de görüldüğü gibi debug menüsünden doğrulama sağlanmıştır.



Şekil 3.18 PGA300 kalibrasyon doğrulama

PGA kalibrasyonu tamamlandıktan sonra sabit basınç altında sinyal şartlandırıcının çıkış gerilimi ölçülmüştür (Ölçüm-1). PGA'nın enerjisi kesildikten sonra tekrar aynı şartlarda ikinci bir ölçüm gerçekleştirilmiştir (Ölçüm-2). Ölçüm sonuçlarını içeren veriler Şekil 3.19'da verilmektedir.



Şekil 3.19 Sabit basınç testi

Gerçekleştirilen testte saniyede bir veri olmak üzere 120 adet veri alınmıştır. Bu verilerin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra ise aşağıdaki formül kullanılarak RMS gürültü değeri hesaplanmıştır:

$$\sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) * (x - y) * (x - y)} \quad (3.1)$$

Burada N toplam veri sayısını, x istenen çıkış değerini, y ortalama çıkış değerini göstermektedir. Birinci ölçüm sonucunda ortalama değer 1,3175 V olarak ölçülmüştür. Buna göre toplam gürültü (RMS) değeri,

$$\sqrt{\left(\frac{1}{120}\right) * (1,31 - 1,3175) * (1,31 - 1,3175)} = 0,0006846 \quad (3.2)$$

olarak hesaplanmıştır.

İkinci ölçüm sonucunda ortalama değer 1,3161 V olarak ölçülmüştür.

Buna göre toplam gürültü (RMS) değeri,

$$\sqrt{\left(\frac{1}{120}\right) * (1,31 - 1,3161) * (1,31 - 1,3161)} = 0,0005568 \quad (3.3)$$

olarak hesaplanmıştır. Yukarıdaki hesaplanan değerlere göre hesapladığımız RMS toplam gürültü miktarı yaklaşık 0,5-0,6 mV seviyelerindedir. Sensör tasarımında kullanılan mikrokontrolör 12 bit ADC çözünürlüğüne sahiptir. Dolayısıyla,

$$\text{Dijital ölçüm hassasiyeti: } 20 \text{ Bar} / 2^{12} = 4,8 \text{ mBar}$$

$$\text{Kazanç: } 0,5 \text{ mV} / 100 \text{ mV/Bar} = 0.005 \text{ bar-rms}$$

$$\text{Analog gürültü: } 0,5 \text{ mV} / 280 \text{ mV/Bar} = 0,0017 \text{ Bar} = 1,7 \text{ mBar}$$

olarak hesaplanmıştır.

3.3.3. Mikrokontrolör

Sinyal şartlandırıcı çıkışında sensörün sinyal işleme özelliklerinin yazılımsal olarak geliştirilmesi için mikrokontrolör bulunmaktadır. Prototip tasarım çalışmalarında başlangıçta STMicroelectronics firması tarafından üretilen STM32F107VCT6

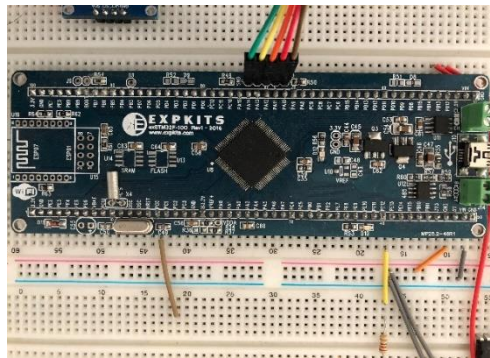
mikrokontrolör kullanılmıştır. Fakat dijital filtreleme ve kendi kendine kalibrasyon için oluşturulan algoritmaların çalıştırılmasında sinyal işleme performansını artırmak için daha sonraki aşamada STM32F407VGT6 mikrokontrolör kullanılması uygun görülmüştür. Şekil 3.20’de gösterilen STM32F107VCT6 mikrokontrolörünün özellikleri şu şekildedir [63];

1. ARM Cortex-M3 çekirdeğe sahiptirler.
2. 72 MHz frekansında çalışabilmektedirler.
3. CAN, Ethernet, I2C, LIN, SPI, UART/USART, USB OTG bağlantılarına izin vermektedir.
4. 100 pine kadar destek sunmaktadır.
5. 256 KB program bellek boyutu imkanı sağlamaktadır.
6. Besleme voltajı 2 ~ 3,6 V seviyelerindedir.
7. Çalışma sıcaklığı -40 °C ila +85 °C aralığındadır.



Şekil 3.20 STM32F107VCT6 mikrokontrolörü

STM32F107VCT6 mikrokontrolör ile yapılan deneysel çalışmalar sırasında EXPKITS STM32F100 geliştirme kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.21 Expkits STM32F107VCT6 geliştirme kartı

Şekil 3.22’de gösterilen STM32F407VGT6 mikrokontrolörünün özellikleri şu şekildedir [64];

1. ARM Cortex-M4 işlemciye sahiptirler.
2. 168 MHz frekansında çalışabilmektedirler.
3. 1 Mb flash hafıza imkanı sağlamaktadır.
4. 3 adet I2C, 4 adet USART, 2 adet UART, en fazla 3 SPI ve 2 CAN ara yüzü olmak üzere iletişim arabirimleri bulunmaktadır.
5. 2 adet 12 bit ADC ve 2 adet 12 bit DAC bulundurmaktadır.



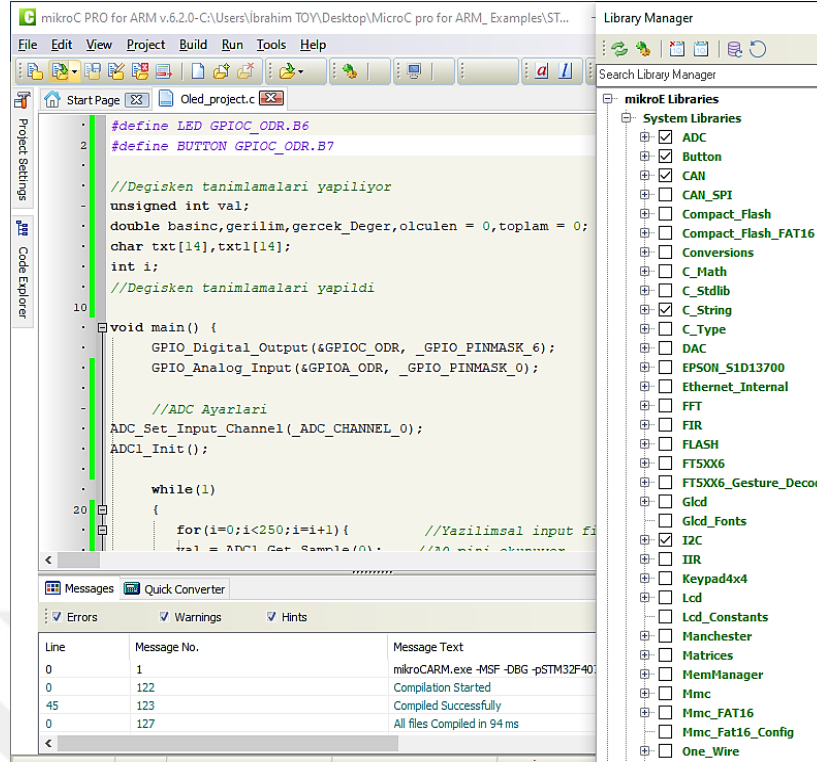
Şekil 3.22 STM32F407VGT6 mikrokontrolörü

STM32F407VGT6 mikrokontrolör ile yapılan deneysel çalışmalar sırasında Şekil 3.23’te gösterilen STM32F407G-DISC1 geliştirme kartı kullanılmıştır.



Şekil 3.23 STM32F407VG-DISC1 geliştirme kartı

STM32F107VCT6 ve STM32F407VGT6 mikrokontrolörlerinin yazılımı için Mikroelektronika firmasının geliştirmiş olduğu arayüzü Şekil 3.24’te gösterilen “MikroC PRO for ARM” derleyicisi kullanılmıştır.



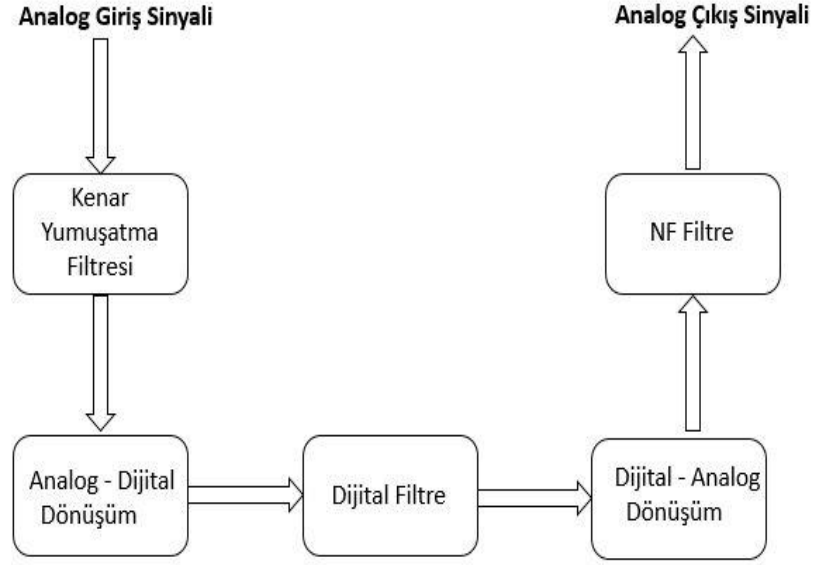
Şekil 3.24 MicroC PRO for ARM arayüz ekranı

3.3.3.1. Sinyal filtreleme

Filtreler, sinyallerin istenen frekanslarda geçirilmesi istenmeyen frekanslarda ise bastırılması işlemi yapan devrelerdir. Kullanım yerlerine göre farklı türleri bulunmaktadır. Bant geçiren filtreler, belirli bir frekans aralığında sinyalleri çıkışa aktarır. Alçak geçiren filtreler, belirli bir kesim frekansı altındaki sinyalleri çıkışa aktarır. Yüksek geçiren filtreler ise belirli bir kesim frekansı üzerindeki sinyalleri çıkışa aktarır [65,66].

Dijital filtreleme, Şekil 3.25'te verilen blok diyagramdan da anlaşılacağı gibi analog sinyallerin dijital sinyallere çevrilmesinden sonra uygulanan ve giriş sinyalini istenilen çıkış sinyaline dönüştürme işlemi olarak tanımlanabilir. Dijital filtrelemenin amaçları,

- Birbirine içerisinde geçmiş olan sinyallerin birbirinden ayrılması,
- Bozulmuş olan sinyallerin düzeltilmesi,
- Sinyal üzerine binmiş olan gürültüyü bastırarak sinyalin kalitesinin iyileştirilmesidir [67].



Şekil 3.25 Dijital filtreleme blok diyagramı

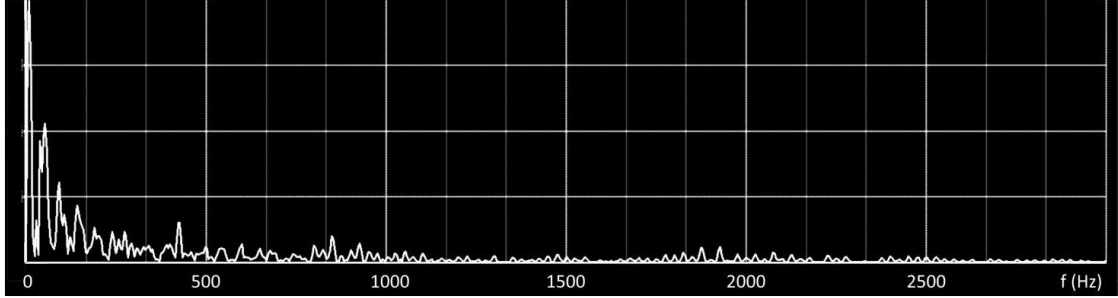
Tez çalışmasında basınç sensörü çıkışındaki gürültü dağılımını karakterize etmek için Şekil 3.26’da gösterilen kompresör test cihazı kullanılmıştır. Test cihazında 48.2 kW gücünde ve 600-3000 RPM hızları arasında kompresörü tahrik eden bir asenkron motor kullanılmaktadır.



Şekil 3.26 Kompresör test cihazı

Zaman düzleminde (domeninde) sensör çıkış sinyalinin gürültüden nasıl etkilendiğini anlamak oldukça zordur. Test cihazına bağlı basınç sensörü için gürültü içeriğinin anlaşılması amacıyla MATLAB ortamında zaman düzleminde alınan basınç

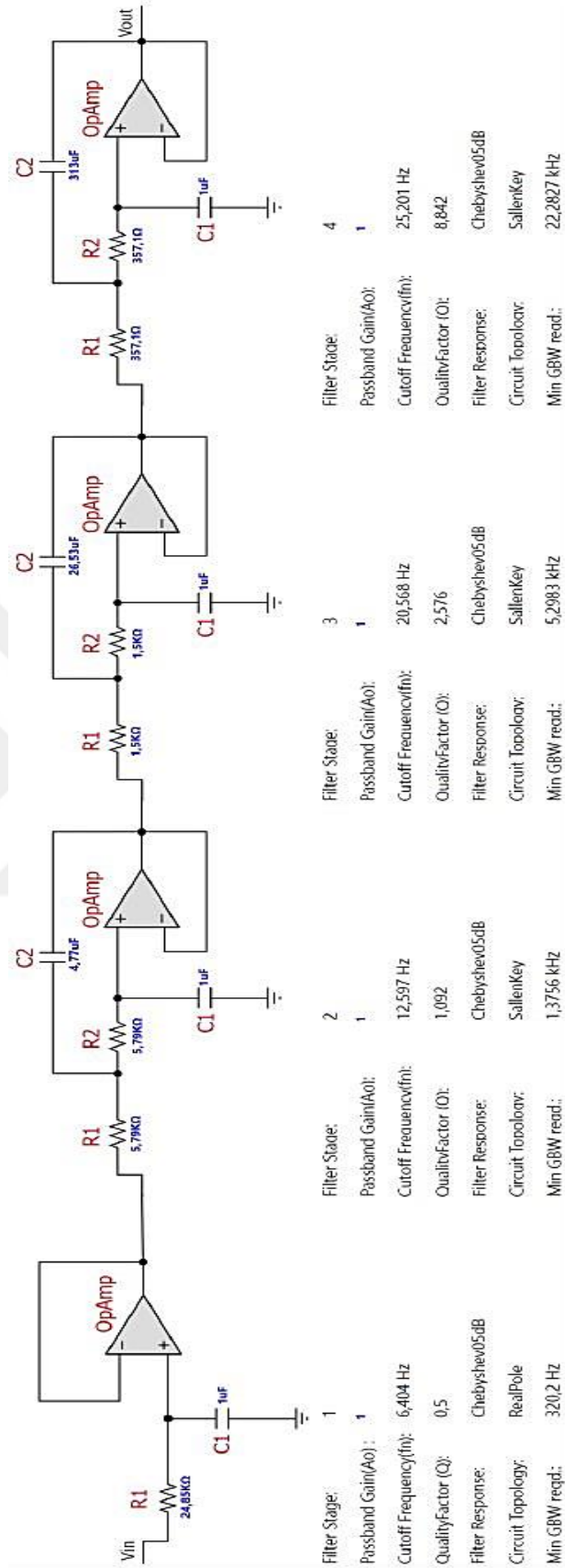
sensörü sinyali frekans düzlemine çevrilmiştir. Bu şekilde yapılan deneysel sonuçlara göre motor çalıştırıldığında sensör çıkışında Şekil 3.27’de görüldüğü gibi DC’de (0 Hz) temel bant sensör sinyali ve 2500 Hz’e kadar uzanan farklı gürültü sinyalleri oluşmaktadır.



Şekil 3.27 ADC girişinde frekans spektrumu

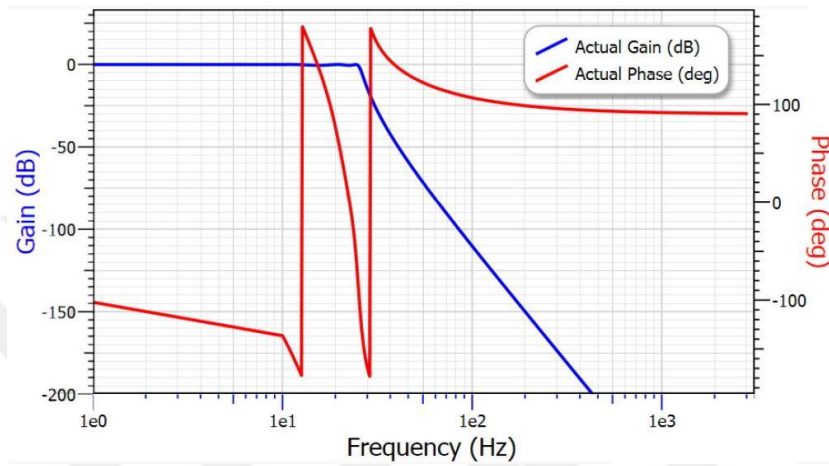
Sensör çıkışında oldukça geniş bir frekans aralığında gürültü içeriği bulunması sebebiyle doğrudan dijital filtreleme yapılması durumunda örnekleme frekansı, ihtiyaç duyulan alçak geçiren filtrenin kesim frekansına göre oldukça yüksek olacaktır. Böyle bir dijital filtrenin çalıştırılması için çok sayıda matematiksel işlem yapılması gerekli olup, filtrenin gerçek zamanlı olarak çalıştırılması donanımsal kısıtlamalar sebebiyle mümkün değildir. Bu sebepten gürültü sinyallerini bastırmak için öncelikle ADC’nin girişinde bir kenar yumuşatma filtresine (AAF) yer verilmiştir.

Sallen-Key topolojisiyle uygulanan alçak geçiren kenar yumuşatma filtresi tasarımında Texas Instrument firması tarafından geliştirilen Filter Pro programı kullanılmıştır. Sallen-Key topolojisi, kullanılan devre elemanlarının (direnc, kondansatör) değerlerine düşük hassasiyetle olup, tersine çevrilmeyen bir cevap oluşturmaktadır. Genellikle az sayıda devre elemanı ile kolay uygulamalar yapılmasına imkan sağlar [68]. Bu nedenle akıllı sensörler gibi fiziksel boyutları sınırlı olan uygulamalar için Sallen-Key topolojisi kullanmak daha uygundur. Şekil 3.28’de bileşen değerleri ile filtre devresinin şematik diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.28 Kenar yumuşatma filtresi şematik diyagramı

Tasarlanan filtre, geçiş bandı boyunca bir Chebyshev yaklaşımı kullanmaktadır. Chebyshev filtrelerinin geçiş bandı ile durdurma bandı arasında daha keskin bir geçişe sahip olduğu bilinmektedir. 50 Hz'lik kesme (Nyquist) frekansındaki zayıflama DC'den 60 dB daha düşüktür ve izin verilen dalgalanma, 25 Hz'lik geçiş bandı frekansında 1 desibeldir. Şekil 3.29, kenar yumuşatma filtresinin frekansa karşı kazanç ve faz cevaplarını göstermektedir.



Şekil 3.29 Kenar yumuşatma filtresinin kazanç ve faz cevabı

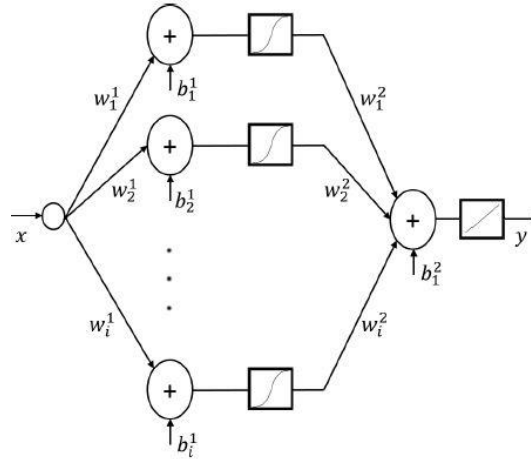
Tasarım aşamasından sonra, Texas Instruments üretimi olan OPA4172 genel amaçlı opamp kullanılarak kenar yumuşatma filtresi gerçekleştirilmiştir. Kenar yumuşatma filtresi, mikrokontrolörün ADC girişine ulaşmadan önce PGA300 sinyal koşullandırıcı çıkış sinyalindeki yüksek frekanslı gürültüyü ortadan kaldırır. ADC girişinden alınan sinyal 100 Hz frekansında örneklenmiştir. Örneklenen sinyal hala 50 Hz frekans bandında gürültü içermektedir. Bu istenmeyen gürültü, sinyalin dijital olarak filtrelenmesi ile tamamen ortadan kaldırılmıştır. Dijital filtreler iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir: sonlu darbe yanıtı (IIR) ve sonsuz darbe yanıtı (FIR) [69]. IIR filtreler, aynı kesim frekansında FIR filtrelerinden daha az katsayı ve bellek gerektirmektedir. Bu avantajı sayesinde akıllı sensör uygulamalarında genellikle IIR filtre kullanılması tercih edilir [70]. Diğer taraftan, FIR filtreler gerçek zamanlı uygulamalardaki hızını sınırlayan çok sayıda aritmetik işlem gerektirmektedir [71].

3.3.3.2. Self Kalibrasyon

Tipik bir basınç sensörü algılama elemanı ve sinyal şartlandırıcıdan oluşmaktadır. Algılama elemanı basıncı bir elektrik sinyaline dönüştürürken sinyal şartlandırıcı devresi çıkış sinyalini mikrokontrolör girişi uygun duruma getirir. İdeal bir piezorezistif basınç algılayıcıda bulunan Wheatstone köprüsündeki her direnç basınç ile doğrusal olarak değiştiğinden Wheatstone köprüsü çıkışı da basınç ile doğrusal olarak değişmektedir. Buna karşın gerçekte tüm algılama elemanları, ölçüm doğruluğunu etkileyebilecek ideal olmayan özelliklere sahiptir. Ayrıca sinyal şartlandırıcı çıkışı ofset, histerezis, kazançta değişiklik sebebiyle doğrusal olmayan (non-linear) özelliktedir. Tüm bunların yanında yaşlanma sonucunda sensörün doğruluğu da zamanla azalır. Bu nedenlerden dolayı sensör çıkışında doğrusal (linear) basınç elde etmek için donanım özelliklerinin belirlenmesi ve çıkış sinyalinin kalibre edilmesi zorunludur [72]. Ancak geleneksel kalibrasyon yöntemleri, özellikle yüksek doğruluk gerektiğinde zaman alıcı ve maliyetli işlemler gerektirmektedir. Akıllı sensörlerin geliştirilmesiyle, kendi kendine kalibrasyon özelliği ile tüm ölçüm hataları ortadan kaldırılabilmektedir. Basit bir yöntem olarak kendi kendine kalibrasyon işlemi birden fazla sayıda sensör kullanılarak gerçekleştirilebilir. Alternatif olarak ise sensörde mevcut mikrokontrolör ile sinyal işleme kullanılarak kendi kendine kalibrasyon algoritması oluşturulabilir. Arama tablosu (Look-up-table), parçalı doğrusal enterpolasyon (piecewise linear interpolation), aşamalı polinom yaklaşımı (progressive polynomial approximation) veya en küçük kare eğri uydurma (least mean square curve fitting) yöntemlerinden birine dayalı olarak kendi kendine kalibrasyon algoritması oluşturulabilmektedir [73]. Bu yöntemlere cazip bir alternatif olarak son yıllarda yapay sinir ağları (YSA), akıllı sensörlerin transfer fonksiyonu yanıt eğrisini doğrusallaştırmak için etkili bir çözüm olarak kullanılmaya başlanmıştır[74].

Otomatik basınç kalibratörü ile gerçekleştirmiş olduğumuz deneylere göre, PGA300 sinyal şartlandırıcı devresi ideale yakın doğrusallığı garanti etmektedir. Ancak yine de basınç ölçümünde ortaya çıkan küçük hataları gidermek ve uzun süreli çalışmada doğrusallığı sağlamak için kendi kendine kalibrasyon sağlayabilecek bir yapay sinir ağı oluşturulmuştur. Tipik bir yapay sinir ağı, bir dizi nöronun birbirine bağlanmasından oluşmaktadır. Yapay sinir ağı doğrusallaştırma uygulamalarında sürekli fonksiyonları (herhangi bir sensörün giriş-çıkış haritalama fonksiyonu gibi), yüksek doğrulukla öğrenebilen bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında hesaplama basitliği nedeniyle yapay sinir ağı uygulaması için çok katmanlı yapay sinir ağı topolojisi

kullanılması tercih edilmiştir. Önerilen iki katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağı mimarisi Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30 Akıllı sensör uygulamasında kullanılan self kalibrasyon için YSA bloğu

Oluşturulan yapay sinir ağında, gizli katman ve çıkış katmanında sırasıyla Logsig ve Purelin aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Mikrokontrolördeki donanım sınırlamaları göz önüne alındığında, gizli katmanda 10 adet nöron bulunması yeterli görülmüştür. Bu durumda yapay sinir ağı çıkışı aşağıda verilmiştir:

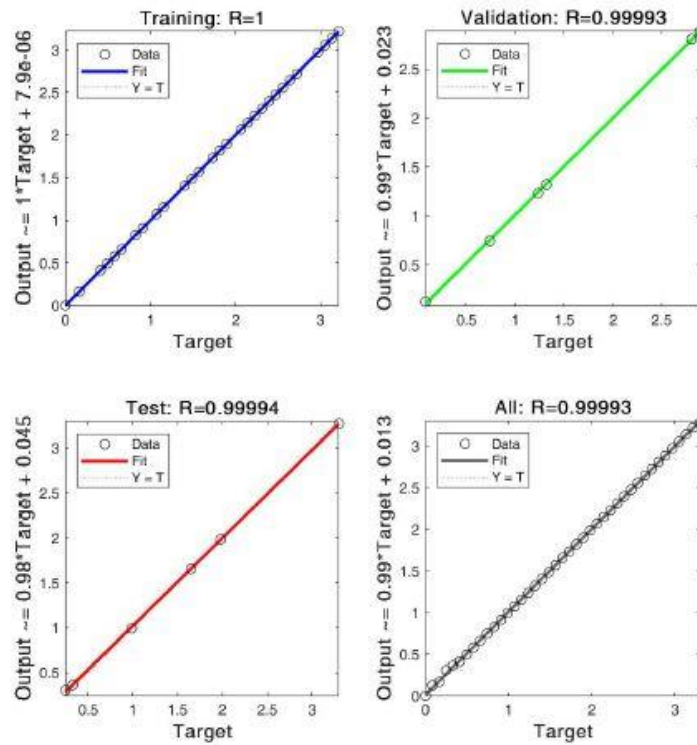
$$y = \text{Purelin} [w_i^2(\text{Logsig}(w_i^1x + b_i^1)) + b_i^2] \quad i = 1, \dots, 10 \quad (3.4)$$

Burada x mikrokontrolörün girişindeki sinyal, y ise mikrokontrolörün çıkışındaki doğrusallaştırılmış sinyaldir. w ve b parametreleri ise sırasıyla ağırlıkları ve kutuplama değerlerini ifade eder.

Sinir ağının eğitimi için Levenberg-Marquardt geri yayılım (LMBP) algoritması uygulanmıştır. LMBP algoritması performansın ortalama karesel hata (Mean Squared Error-MSE) ile ölçüldüğü uygulamalar için oldukça uygundur. Ortalama karesel hata, hedef ile yapay sinir ağı çıkışı arasındaki farkın karesinin ortalaması olarak ölçülmektedir. Ortalama karesel hata küçük olduğunda yapay sinir ağı yaklaşımı daha iyi olmaktadır [75]. Daha önce yapılan benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre Levenberg-Marquardt geri yayılım algoritması, geleneksel geri yayılım algoritmasından daha hızlı bir yakınsamaya sahiptir. Eğitim sürecinde nöronlar arasındaki bağlantıların değerleri, yapay sinir ağı daha iyi bir yaklaşım üretecek şekilde ayarlanır. Eğitim, test verisi belirlenen tolerans değerine ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Bu şekilde

eğitilmiş sinir ağının ağırlık ve kutuplama değerleri kullanılarak kendi kendine kalibrasyon algoritması mikrokontrolör içinde oluşturulmuştur.

Tez çalışmasında önerilen sinir ağı, veri uydurma problemlerini çözmek için ileri beslemeli bir sinir ağının tasarımını ve eğitimini önemli ölçüde kolaylaştıran MATLAB sinir ağı uydurma araç kutusu (nftool) kullanılarak oluşturulmuştur. Buna göre kalibrasyon verileri 41 giriş - çıkış çiftinden oluşacak şekilde rastgele üç sete ayrılmıştır. Eğitim için % 70, doğrulama için % 15, test için % 15 örnek alınmıştır. Eğitim veri seti nöronların ağırlıklarını ve kutuplama değerlerini belirlemek için kullanılmıştır. Böylece hata fonksiyonu, her yinelemede en aza indirilmiştir. Doğrulama veri seti, eğitimmiş modelin testte ne kadar iyi performans göstereceğini tahmin etmek için kullanılmıştır. Eğitimlen modelin performansı, test veri setiyle kontrol edilmiştir. Şekil 3.31 eğitim doğrulama ve test setleri için hedeflere göre ađ çıktılarını göstermektedir. Bu grafiklerden çıktının, eğitim, test ve doğrulama için hedefi izlediği görülebilir. Regresyon değeri, toplam yanıt için 0,99'un üzerindedir ve tüm veri kümeleri için kabul edilebilir derecede iyidir.



Şekil 3.31 Eğitim, doğrulama, test ve tam veri seti için ağın çıkış basıncı ve hedef basıncı arasındaki uyum

3.4. Haberleşme Arabirimi

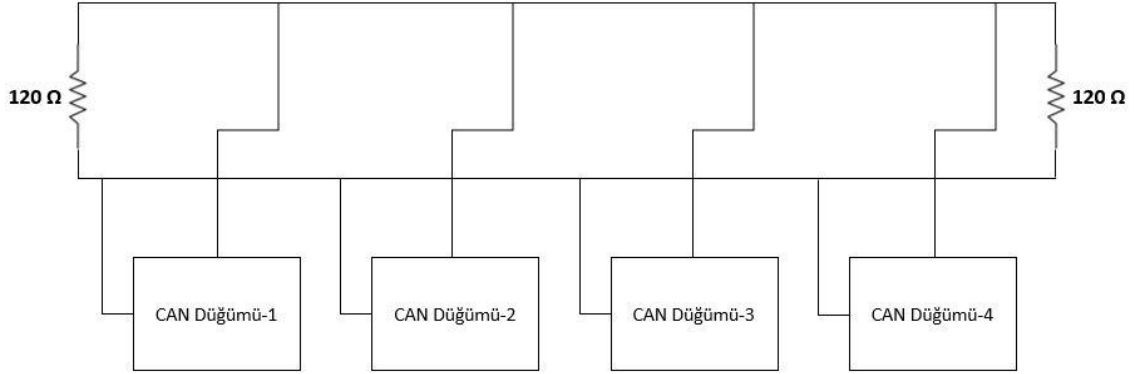
Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında tasarlanan akıllı basınç sensörünün geniş bir alanda kullanılması hedeflenmiştir. Mevcut uygulamaların çoğunda ihtiyaçları karşılaması amacıyla akıllı sensör bloğunda haberleşme arabirimi olarak CAN Bus bağlantısına yer verilmiştir. CAN Bus haberleşme protokolünü gerçekleştirilmesinde ST firmasının üretimini yaptığı STM32F107VCT6 mikrokontrolörünü içeren exSTM32F-100 geliştirme kartı, MCP2551 CAN Bus haberleşme entegresi kullanılmıştır.

3.4.1. CAN Bus Haberleşmesi

CAN Bus (Controller Area Network), genellikle otomotiv uygulamalarında kullanılan bir haberleşme protokolüdür. 1983 yılında CAN Bus üzerine çalışmalar yürüten Alman elektrik-elektronik firması olan Robert Bosch GmbH 1986 yılında Otomotiv Mühendisleri Topluluğunda bu protokolü duyurmuştur [76]. CAN protokolünün asıl amacı araç üzerindeki haberleşmeyi 2 kabloya indirgeyerek kablo yığımından kurtulmaktır. CAN, hata denetiminin önemli ve veri iletişim mekanizmasının gelişmiş olduğu bir protokoldür. Dağıtılmış gerçek zaman kontrol uygulamalarında kullanılan CAN protokolü yüksek seviyede güvenlik sağlamaktadır. CAN protokolünde 40 metreye kadar 1 Mbps hızında iletişim sağlanmaktadır. Uzun mesafeler için iletişim hızı azalmaktadır [77].

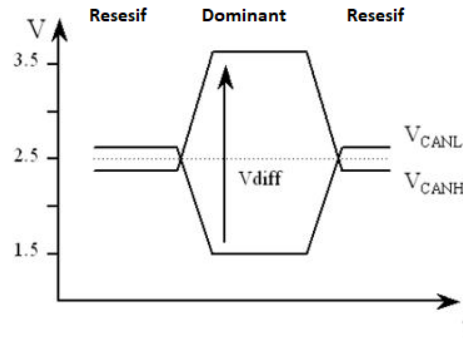
CAN Bus haberleşmesi otomotiv sektörü için oluşturulmuş olmasına rağmen askeri uygulamalarda, asansör sistemlerinde, medikal cihazlarda ve endüstriyel otomasyonda da kullanılmaktadır [78]. CAN haberleşmesi adresleme temelli değil, mesaj tabanlı bir haberleşme protokolüdür. Oluşturulan mesaj çerçevesi için herhangi bir adres tanımlanmaz. Her mesaj için özel bir ID numarası bulunmaktadır. Alıcı düğümler ağı kontrol ederek kendileri için oluşturulmuş mesajı almaktadırlar [79]. CAN haberleşme sistemi 2 kablolu bir sistemdir. Sistemde CAN High (CANH) ve CAN Low (CANL) olmak üzere Şekil 3.32'de görüldüğü üzere 120 Ω direnç değerleriyle sonlandırılmış hatlar bulunmaktadır. Haberleşmeyi sağlayan temel özellik bu iki hat arasındaki gerilim farkıdır. Gerilim farkı değeri belli bir değer üzerinde ise sinyal dominanttır ve dijital değeri lojik 0'dır. Bu durumda CANH hattında 3,5 V, CANL hattında 1,5 V gerilim

değeri görülmektedir. Eğer gerilim farkı değeri belirli bir set değerinin altında ise sinyal resesif olup dijital olarak değeri lojik 1'dir. Bu durumda ise hem CANH hattında hem de CANL hattında 2,5 V gerilim değeri görülmektedir.



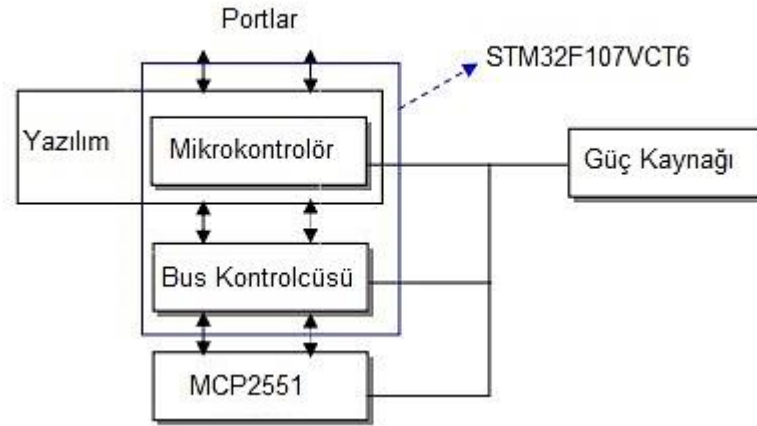
Şekil 3.32 CAN Bus hattına bir örnek

CAN haberleşmesindeki sinyallerin dominant ve resesif olması durumlarında sinyaller arasındaki gerilim farkı Şekil 3.33'de görüldüğü üzere değişim göstermektedir. Bunun nedeni ise CAN hattı üzerinde bir problem oluşursa hatanın göz ardı edilmesini sağlamaktır [80].



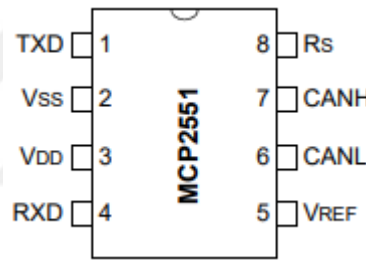
Şekil 3.33 CAN hattı sinyalleri

CAN haberleşmesinin gerçekleşmesi için veriler mesaj çerçeveleri halinde iletilmektedir. CAN, veri çerçevesi (Message frame) ve istek çerçevesi (Remote transmit request frame) olmak üzere iki adet mesaj çerçevesi içermektedir. Bu mesaj çerçeveleri arasındaki farkı şu şekilde açıklanabilmektedir. Veri çerçevesi 8 bayt uzunlukta veri taşıyabilirken istek çerçevesi belirli olan bir mesaj verisinin talep edilmesiyle oluşmaktadır [81]. Şekil 3.34'te CAN Bus sisteminin donanımsal yapısı gösterilmiştir [77].



Şekil 3.34 CAN Bus sistemi [76]

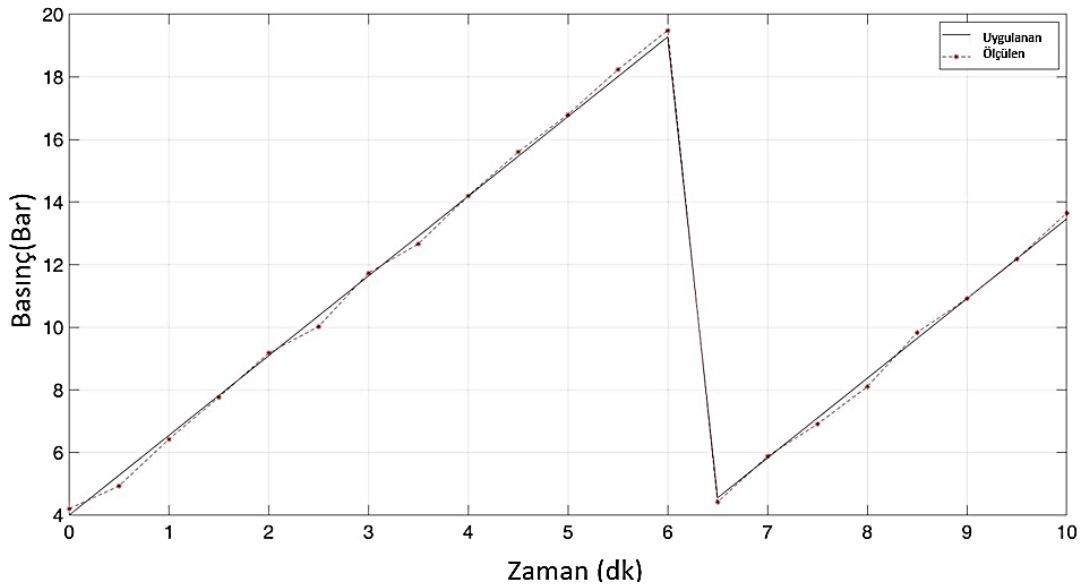
MCP2551, CAN Bus hattından gelen mesajları mikrokontrolöre, mikrokontrolörden gelen bilgi mesajlarını ise CAN Bus'a aktarabilen verici-alıcı (transceiver) entegresidir [82]. MCP2551 pin diyagramı Şekil 3.35'te verilmiştir [83].



Şekil 3.35 MCP2551 pin diyagramı

1. İletim bilgi çıkışı
2. Toprak
3. Besleme voltajı
4. Alıcı bilgi çıkışı
5. Referans çıkış voltajı
6. CAN Low hattı
7. CAN High hattı
8. Çalışma modu kontrol pini

MCP2551 için üç farklı çalışma modu bulunmaktadır. Bunlar high speed, slope-control ve standby modlarıdır. Çalışma modunu ayarlamak için 8 numaralı Rs pini kullanılmaktadır. Eğer Rs pini direkt olarak toprağa bağlanmış ise MCP2551 high speed



Şekil 3.37 Tasarlanan akıllı basınç sensörü çıkışının uygulanan basınca göre değişimi

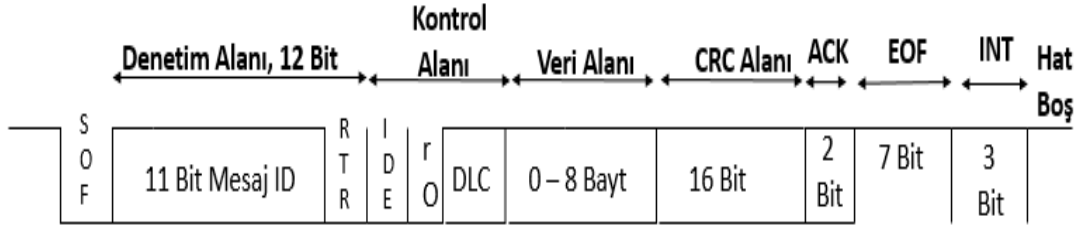
MicroC PRO for ARM derleyicisi, veri alışverişini basitleştirmek için CAN kütüphanesi ve bazı fonksiyonları içermektedir [84]. Bu fonksiyonlar ve içerdiği değişkenler Tablo 3.5’de verilmektedir.

Tablo 3.5 MicroC PRO for ARM derleyicisindeki CAN kütüphane fonksiyonları ve değişkenleri

	Değişken	Fonksiyonu
A	_CAN_TX_STD_FRAME	Can_Send_Flags
B	_CAN_RX_RTR_FRAME	Can_Rcv_Flags
C	_CAN_CONFIG_TIME_TRIGGERED_MODE_DISABLED	Can_Init_Flags
D	_CAN_OperatingMode_Initialization	CANxSetOperationMode
E	_CAN_OperatingMode_Normal	CANxSetOperationMode
F	_CAN_CONFIG_TX_FIFO_PRIORITY_BY_ID_IDENTIFIER	CANxInitializeAdvanced
G	_CAN_FILTER_ID_MASK_MODE	CANSetFilterScale32

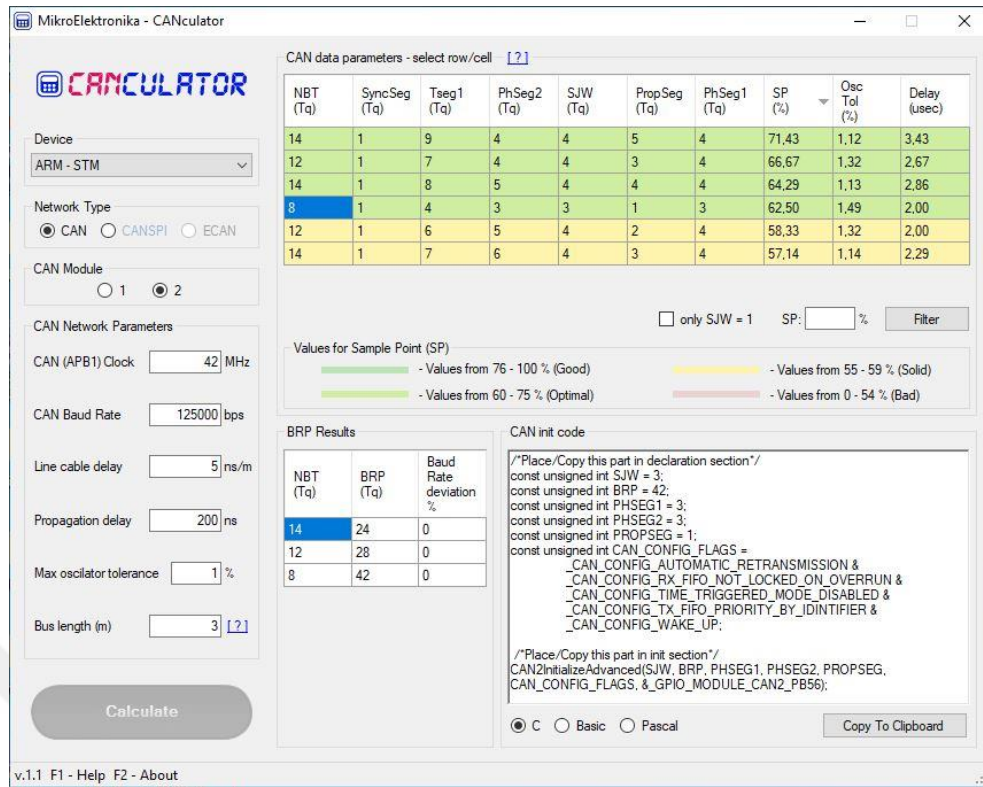
Oluşturulan test düzeneğinde akıllı sensör, 11 bitlik tanımlayıcı ile temel (CAN 2.0A) veri çerçevesi aktarımı (A) yapacak şekilde ve kontrolör akıllı sensörden bilgi gerektiğinde uzak çerçeve iletim talebi (B) gerçekleştirmek için yapılandırılmıştır. Hem veri çerçevesi hem de istek çerçevesi için aynı tanımlayıcı kullanılmıştır. Fakat veri çerçevesi tanımlayıcıyı takip eden RTR biti nedeniyle önceliği kazanır. Kontrolör istek çerçevesini ileterek mesajı hemen alabilir. Sistem başlatıldıktan sonra mikrokontrolör her

örnekleme döneminin başında basınç algılayıcıdan periyodik olarak basınç verisini almaktadır. Ölçülen basınç verileri veri çerçevesine eklenmektedir. Zamanla tetiklenen iletişim, senkronizasyon için ana (master) düğüm tarafından periyodik olarak yayınlanan global referans sinyaline ihtiyaç duyduğundan her zaman iletişimi başlatmak için bir veri yolu erişimi (C) kullanılmıştır.



Şekil 3.38 Temel veri çerçevesi veya CAN 2.0A [80]

Başlangıçta MCP2551 başlatma moduna girer (D) ve iletişim hızı, kontrol, paket filtreleme ve kesinti kayıtlarını ayarlar. Daha sonra başlatma modundan çıkarak normal çalışma moduna (E) geçer. Elde edilen başlatma kodu bloğu kullanılarak veri çerçevesi CAN veri yoluna aktarılır. Basınç verileri float tipi değişkende 4 byte uzunluğunda saklanmaktadır ve tek bir veri çerçevesi ile gönderilmektedir. İletilen mesajın benzersiz bir kimliği bulunmaktadır (F). ECU, veri yolu üzerindeki tüm mesajı alır fakat hangi mesajı kullanmak istediğini belirlemek için bir kabul filtresi (G) kullanmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda basınç verileri filtrelenmiştir. Bir mesajı sonlandırmak için gereken zamanlama açısından, bit zamanı yaklaşık 8 μ s ve veri çerçevesinin uzunluğu 79 bittir. Bundan dolayı akıllı sensör ile kontrolör arasındaki veri alışverişi için gereken toplam iletişim süresi örnekleme periyoduna göre düşüktür. CAN-Bus haberleşmesini gerçekleştirebilmesi için zamanlama parametrelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamaların yapılmasında Şekil 3.39'da verilen CANcalculator programı kullanılmıştır.



Şekil 3.39 CANcalculator ile zamanlama parametrelerinin hesaplanması

Sistemde ilk olarak Metallux firmasının üretimi olan CPS1184 seramik basınç algılayıcısı kullanılmıştır. Seramik algılayıcının basınca göre mV düzeyinde değişen çıkış gerilimi programlanabilir kazanç yükselteci PGA300'e verilmiştir. PGA300 üzerinde gerçekleştirilen kalibrasyon ayarlarıyla 0-20 bar arasında değişen basınç bilgisi PGA300 çıkışın 0,1-3,3 V olarak alınmıştır. Daha sonra bu gerilim STM32F107VCT6 mikrokontrolörün ADC girişinden okunmuştur. Mikrokontrolörün CAN2 Tx (PB13) pini veri göndermek için MCP2551 entegresinin 1 numaralı Tx pinine, CAN2 Rx (PB12) pini ise veri almak için MCP2551 entegresinin 4 numaralı Rx pinine bağlanmıştır. Okunan basınç bilgisi Can-Bus haberleşme entegresi olan MCP2551 ile can veri yoluna iletilmiştir.

3.5. Mekanik Muhafaza Tasarımı

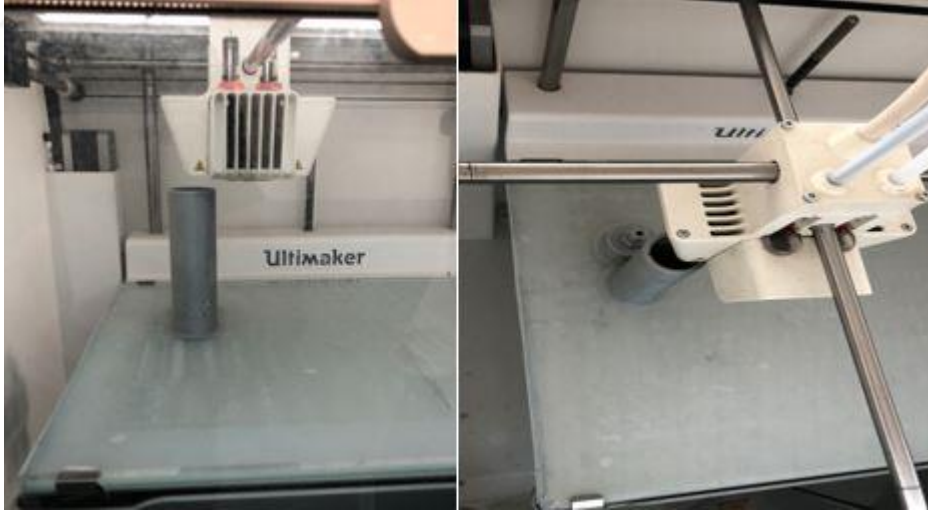
Basınç sensörlerinin uzun ömürlü olarak kullanılmasında elektronik bileşenlerinin olduğu kadar mekanik muhafazanın önemi de bulunmaktadır. Muhafaza tasarımında yüksek şoklara ve titreşime karşı dayanıklı olmasına, IP koruma sınıfına dikkat edilmesi gerekmektedir [85]. Bu tez çalışmasında, baskılı devre kartı (PCB) tasarımı tamamlanan

sensör için bir muhafaza tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.40’da verilen sensörün entegre edileceği gövdenin bilgisayar destekli prototip tasarımı SolidWorks yazılımı aracılığıyla yapılmıştır.



Şekil 3.40 Mekanik muhafaza (Housing)

Gerçekleştirilen tasarım Şekil 3.41’de görüldüğü gibi Ultimaker 3D yazıcı aracılığıyla basılarak Şekil 3.42’de verilen basınç sensörü muhafaza prototipi üretilmiştir.



Şekil 3.41 Mekanik muhafaza üretimi



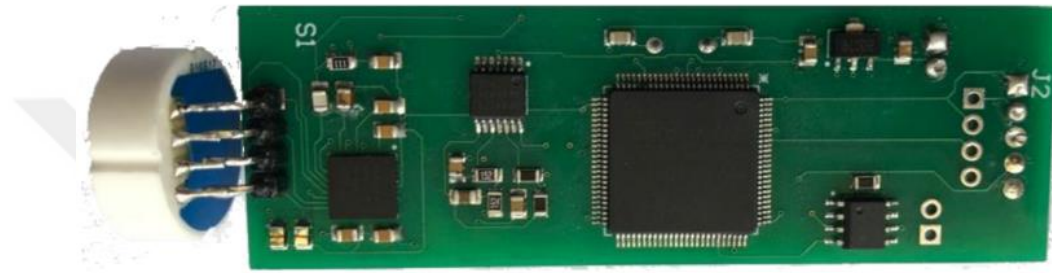
Şekil 3.42 3D yazıcı ile üretilen mekanik muhafaza modeli



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, Endüstri 4.0 ve IoT kavramları eşliğinde ortaya çıkmış olan akıllı sensörler hakkında literatür çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu temel üzerinde Şekil 4.1’de baskılı devre kartı (PCB) verilen piezorezistif tabanlı bir akıllı basınç sensörünün donanım ve yazılım olarak tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 Piezorezistif Akıllı Basınç Sensörü Prototipi

Tez çalışmasında sunulan basınç sensörü, çekirdeğinde Wheatstone köprüsü içeren seramik bir basınç algılayıcı bulundurmaktadır. Basıncın etkisiyle oluşan mekanik gerilimi tespit eden bu seramik basınç algılayıcının çıkışında çok düşük bir elektriksel gerilim (mV seviyeleri) oluşmaktadır. Bu düşük gerilim mikrokontrolör tarafından işlenemeyeceğinden dolayı gerilim seviyesini oransal olarak arttırmak için bir şartlandırıcı devresine gerek duyulmaktadır. Sinyal şartlandırıcı devresi için Texas Instrument firması tarafından üretilen PGA300 entegresi kullanılmıştır. PGA300, piezorezistif ve gerilim ölçer basınç algılama elemanları için geliştirilmiş programlanabilir bir kazanç yükseltecidir. Seramik algılayıcıdan basınç ile oransal olarak elde edilen gerilim seviyesi PGA300 entegresi ile istenilen voltaj aralığına getirilmiştir. PGA300 entegresi içerisinde bulunan dahili bir sıcaklık sensörü ile basınç sensörünün sıcaklık kompanzasyonu sağlanmıştır. Basınç sensörünün doğruluğunu arttırmak ve uzun süreli çalışmalarda bu doğruluğundan sapmaması için bir yapay sinir ağı önerilmiştir. Önerilen bu yapay sinir ağı ile sensörün self kalibrasyon özelliği kazanması sağlanmıştır. STM32F107VCT6 ve STM32F407VGT mikrokontrolörlerinin analog kanalları aracılığıyla ölçülen basınç bilgisi bir OLED ekran ile okunması sağlanmıştır. Tasarımı

gerçekleştirilen akıllı basınç sensörüne entegre edilen MCP2551 CAN-Bus alıcı-verici entegresi yardımıyla basınç bilgisinin CAN-Bus hattına aktarılmıştır.

4.2 Öneriler

Bu yüksek lisans tezinde endüstriyel uygulamalarda kullanılması uygun olan akıllı bir basınç sensörünün tasarımı ve yazılımsal olarak geliştirilmesiyle ilgili çalışmalar sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmaların bu konuda yapılacak benzer çalışmalar için yararlı bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Yapılan çalışma üzerinde, gerçekleştirilecek yazılımsal veya donanımsal değişiklikler ile farklı haberleşme protokollerine sahip bir basınç sensörü haline dönüştürülebilir. Tez çalışmasında 3D yazıcı kullanılarak gerçekleştirilen mekanik muhafaza tasarımının üretimi uygulamada, mekanik dayanımı çok daha yüksek olan paslanmaz çelik ile gerçekleştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] E. Hofmann & M. Rüsç, Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34, 2017.
- [2] K. Kumar, D. Zindani & J. P. Davim, Industry 4.0: Developments Towards the Fourth Industrial Revolution. *Springer*, 2019.
- [3] G. Büchi, M. Cugno & R. Castagnoli, Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790, 2020.
- [4] J. Herter & J. Ovtcharova A model based visualization framework for cross discipline collaboration in Industry 4.0 scenarios. *Procedia CIRP*, 57, 398-403, 2016.
- [5] P. G. Ranky, Advanced digital automobile sensor applications, *Sensor Review*, 22(3), 213-217, 2002.
- [6] J. D. Son, G. Niu, B. S. Yang, D. H. Hwang, & D. S. Kang, Development of smart sensors system for machine fault diagnosis. *Expert systems with applications*, 36(9), 11981-11991, 2009.
- [7] H. Y. Taş, M. Küçüköğlü, Endüstri 4.0 (Dördüncü Sanayi Devrimi) Sürecinde Yeni Nesil Girişimler Hakkında Bir İnceleme, 2019.
- [8] U. Dombrowski & T. Wagner, Mental strain as field of action in the 4th industrial revolution. *Procedia Cirp*, 17(1), 100-105, 2014.
- [9] E. G. Popkova, Y. V. Ragulina & A. V. Bogoviz, Fundamental differences of transition to industry 4.0 from previous industrial revolutions. In *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century* (pp. 21-29). Springer, Cham, 2019.
- [10] A. Soylu, Endüstri 4.0 ve Girişimcilikte Yeni Yaklaşımlar, 2018.
- [11] J. Lee, B. Bagheri & H. A. Kao, A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23, 2015.
- [12] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, & K. Ueda, Cyber-physical systems in manufacturing. *Cirp Annals*, 65(2), 621-641, 2016.
- [13] W. Chang, S. Burton, S., Lin, C. W., Zhu, Q., Gauerhof, L., & McDermid, J. Intelligent and Connected Cyber-Physical Systems: A Perspective from Connected Autonomous Vehicles. In *Intelligent Internet of Things* (pp. 357-392). Springer, Cham, 2020.
- [14] A. Schütze, N. Helwig & T. Schneider, Sensors 4.0—smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0. *Journal of Sensors and Sensor systems*, 7(1), 359-371, 2018.

- [15] A. Yıldız, Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 546-556, 2018.
- [16] M. Hermann, T. Pentek, B. Otto, Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. (*Working Paper*) *Technische Universität*, Dortmund, 2015.
- [17] K. Ashton, That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, 22(7), 97-114, 2009.
- [18] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag & M. Gidlund, Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11), 4724-4734, 2018.
- [19] A. Banafa, The Industrial Internet of Things (IIoT): Challenges, Requirements and Benefits, 2015.
- [20] D. Evans, The internet of things: How the next evolution of the internet is changing everything. *CISCO white paper*, 1(2011), 1-11, 2011.
- [21] URL01: <https://info.internet.org/en/> [Erişim Tarihi: 20 Temmuz 2020]
- [22] A Hammami, Smart Environment Data Monitoring. In *2019 International Conference on Computer and Information Sciences (ICCIS)* (pp. 1-6). IEEE, 2019.
- [23] F. S. Çakır, A. Aytekin & F. Tüminçin, Nesnelerin interneti ve giyilebilir teknolojiler. *Sosyal Araştırmalar ve Davranış Bilimleri Dergisi*, 4(5), 84-95, 2018.
- [24] Da Xu, L., He, W., & Li, S., Internet of things in industries: A survey. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 10(4), 2233-2243, 2014.
- [25] B. Güran, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things) Nedir ve Nerelerde Kullanılır? [online], <https://www.turktoyu.com/nesnelerin-interneti-internet-of-things-nedir-ve-nerelerde-kullanilir> [Erişim Tarihi: 10 Eylül 2020].
- [26] A. Volini, A. Sommer, D. Shackleton, B. Whitmer, S. Moradian, Using smart sensors to drive supply chain innovation, Tech. rep., Deloitte, 2018.
- [27] A. Onetti, Ubiquitous IoT perspectives: The power of connected sensors and actuators, 2017.
- [28] D. Wobschall, Networked sensor monitoring using the universal IEEE 1451 standard. *IEEE instrumentation & measurement magazine*, 11(2), 18-22, 2008.
- [29] IEEE Standards Association. IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators (IEEE 1451.2), URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/standards.jsp>, 1997.
- [30] G. W. Hunter, J. R. Stetter, P. Hesketh & C. C. Liu, Smart sensor systems. *Electrochemical Society Interface*, 19(4), 29, 2010.

- [31] P. Sethi, & S. R. Sarangi, Internet of things: architectures, protocols, and applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017.
- [32] Grand View Research, Pressure Sensor Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, By Type, Technology, GVR 978-1-68038-246-4, 2018.
- [33] J. Ma, Z. Jing, N. Xiang & T. Cai, Design and implementation of smart pressure and temperature sensor. In *Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology* (Vol. 1, pp. 344-347). IEEE, 2011.
- [34] G. Meijer, K. Makinwa & M. Pertijs, (Eds.), Smart sensor systems: Emerging technologies and applications. John Wiley & Sons, 2014.
- [35] H. Baltes, A. Haberli, P. Malcovati, F. Maloberti, Smart sensor interfaces. In *1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Circuits and Systems Connecting the World. ISCAS 96* (Vol. 4, pp. 380-383), IEEE, 1996.
- [36] H. Ramamurthy, B. S. Prabhu, Rajit Gadh, and Asad M. Madni, Fellow, Wireless industrial monitoring and control using a smart sensor platform. *IEEE sensors journal*, 7(5), 611-618., 2007.
- [37] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli and A. Taroni, A low-cost Internet-enabled smart sensor. In *SENSORS, 2002 IEEE* (Vol. 2, pp. 1549-1554). IEEE, 2002.
- [38] Dr. T. K. Hamrita, Nivedita P. Kaluskar, Kurt L. Wolfe, Advances in smart sensor technology. In *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.* (Vol. 3, pp. 2059-2062). IEEE. 2005.
- [39] S. Gervais-Ducouret, Next smart sensors generation. In *2011 IEEE Sensors Applications Symposium* (pp. 193-196), IEEE, 2011.
- [40] K. Malar, N. Kamara, Development of smart transducers with IEEE 1451.4 standard for Industrial automation. In *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies* (pp. 111-114). IEEE, 2014.
- [41] J. Sanders, Why Temperature Compensation Really Matters for Pressure Measurement, 2016.
- [42] E. Çelik, Piezorezistif tabanlı MEMS basınç sensörünün tasarımı ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.
- [43] J. Lu, Y. Li, Intelligent Temperature Compensation of Pressure Sensor Based on MEMS, 2017.
- [44] Isermann, R. Isermann, Rolf. Section 2.2 Sensors, pp. 32-52, of Chapter 2 Hardware, in *CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume VI Information Technology*. Edited by CIGR-The International Commission of Agricultural Engineering; Volume Editor, Axel Munack. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE.

Copyright American Society of Agricultural Engineers. Çevirmenler: Pınar DEMİRCİOĞLU ve İsmail BÖĞREKÇİ, 2006.

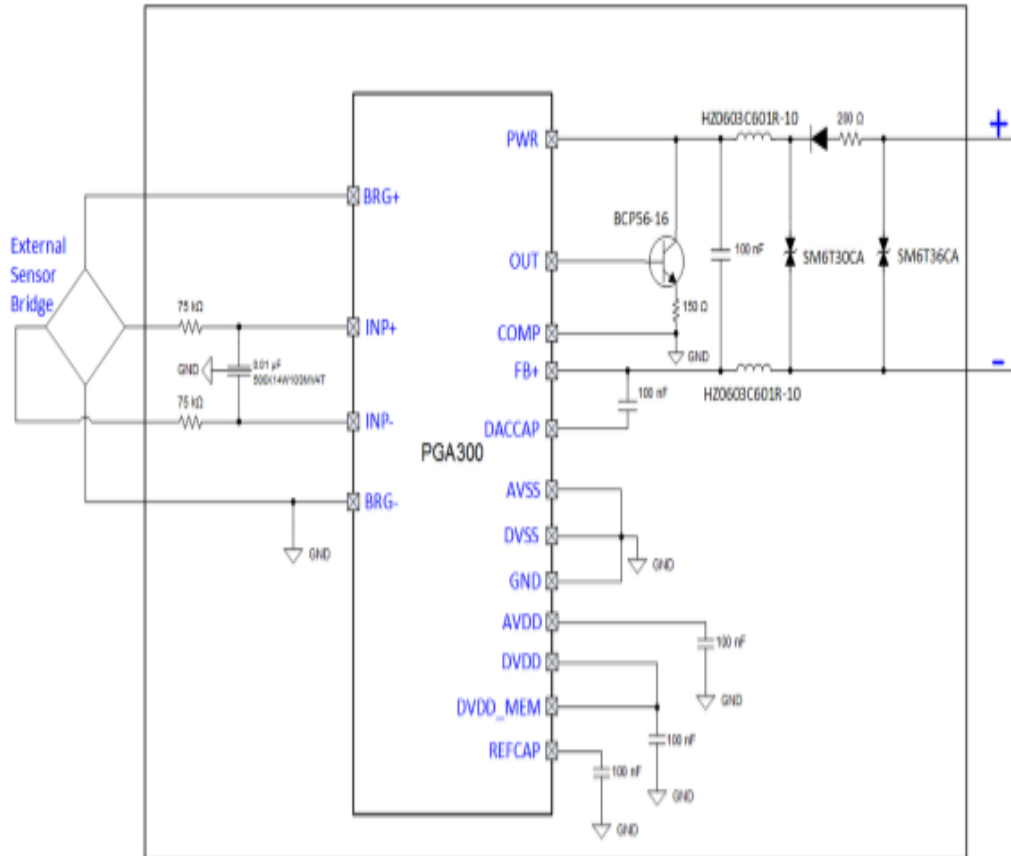
- [45] D. Engin, Sensörler ve Dönüştürücüler [online], Ege Üniversitesi, <http://tec.ege.edu.tr/dersler/sensorler.pdf> [Erişim Tarihi: 10 Haziran 2020].
- [46] Ö. Akın, Algılayıcılar ve Algılayıcı Seçimi [online], https://www.ozgurakin.com.tr/download/2-Algilayicilar_ve_Algilayici_Secimi.pdf, [Erişim Tarihi: 14 Eylül 2020].
- [47] E. Üniversitesi & E. M. M. Programı, Sensörler ve Dönüştürücüler, İzmir, 2014.
- [48] H. Küçükerdem, Sensörler Ve Transdüserlerde Süreç Kontrolü ve Bazı Parametreler [online], https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/147865/mod_resource/content/3/5.%20S%C3%9CRES%C3%87%20KONTROL%C3%9C.pdf, [Erişim Tarihi: 14 Eylül 2020].
- [49] C. Akay, Süreç Ölçüm I Ders Notları [online], Deniz Saçan, <https://slideplayer.biz.tr/slide/13833528/> [Erişim Tarihi: 14 Eylül 2020].
- [50] D. Heeley, Understanding Pressure and Pressure Measurement, NXP760 (Freescale Semiconductor), 2005.
- [51] H. Bulut, Basınç ve Ölçme Yöntemleri [online], Harran Üniversitesi, http://eng.harran.edu.tr/~hbulut/4Basinc_olcme.pdf [Erişim Tarihi: 15 Haziran 2020].
- [52] V. Viegas, J. M. D. Pereira, Sensor communication interfaces and standards, 122, The Institution of Engineering and Technology, Ch. 3, pp. 63-95, 2009.
- [53] J. Fraden, Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications, *Springer Science & Business Media*, 2004.
- [54] P. Regtien, E. Dertien, Sensors for Mechatronics, 2nd Edition, *Elsevier*, 2018.
- [55] F. Reverter, G. Horak, V. Bilas, M. Gasulla, Novel and low-cost temperature compensation technique for piezoresistive pressure sensors. In *XIX IMEKO World Congress. Fundamental and Applied Metrology* (pp. 2084-2087), 2009.
- [56] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft and N. White, *MEMS mechanical sensors*. Artech House, 2004.
- [57] MarketsandMarkets™ Research Private Ltd., Pressure Sensor Market worth \$20.8 billion by 2025, *SE 1341*, 2020.
- [58] A. E. Kubba, A. Hasson, A. I. Kubba, G. Hall, A micro-capacitive pressure sensor design and modelling. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 5(1), 95-112, 2016.

- [59] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, C. Zhang, Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions, *Computer Networks*, 2016.
- [60] Metallux AG, Ceramic Standard Pressure Sensor CPS 1184, URL: https://www.metallux.de/uploads/media/2020-01_24_,2018Metallux_product_catalogue_pressure_sensors_CPS_1184_RM_2_01.pdf.
- [61] T. Instrument, PGA300 Signal Conditioner and Transmitter for Pressure Sensors, URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pga300.pdf?ts=1600111246383&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [62] E. Perraud, Theoretical model of performance of a silicon piezoresistive pressure sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 57(3), 245-252, 1996.
- [63] STMicroelectronics, STM32F407xx Datasheet, DS8626 Rev 9, 2020.
- [64] STMicroelectronics, STM32F107xx Datasheet, DocID15274 Rev 10, 2017.
- [65] A. Noori, Analog İşaret İşleme Uygulamaları İçin Yeni Aktif Elemanla Analog Filtre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, 2011.
- [66] Lacanette, K., A basic introduction to filters-active, passive, and switched-capacitor. National Semiconductor Corporation, <http://www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Ref/DataSheet/Inttofilters.pdf>, 22., 1991.
- [67] S. W. Smith, *The scientist and engineer's guide to digital signal processing.*, 1999.
- [68] R. K. Attri, *Narrow Band-Pass Filters for Low Frequency Applications: Evaluation of Eight Electronics Filter Design Topologies*. Speed To Proficiency Research: S2Pro©., 2018.
- [69] S. M. Alessio, *Digital signal processing and spectral analysis for scientists: concepts and applications*. Springer.2015.
- [70] URL: <https://www.advsolned.com/tag/dsp/> [Erişim Tarihi: 11 Eylül 2020].
- [71] R. Mehboob, S. A. Khan, R. Qamar, FIR filter design methodology for hardware optimized implementation. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 55(3), 1669-1673., 2009.
- [72] M. Pertijs, Calibration and self-calibration of smart sensors. In *Smart Sensor Systems* (pp. 17-41). Wiley, 2014.
- [73] Gert van der Horn, Johan L. Huijsing, Calibration and Linearization Techniques, Springer-Verlag, Ch. 3, pp. 51-92, 1998.

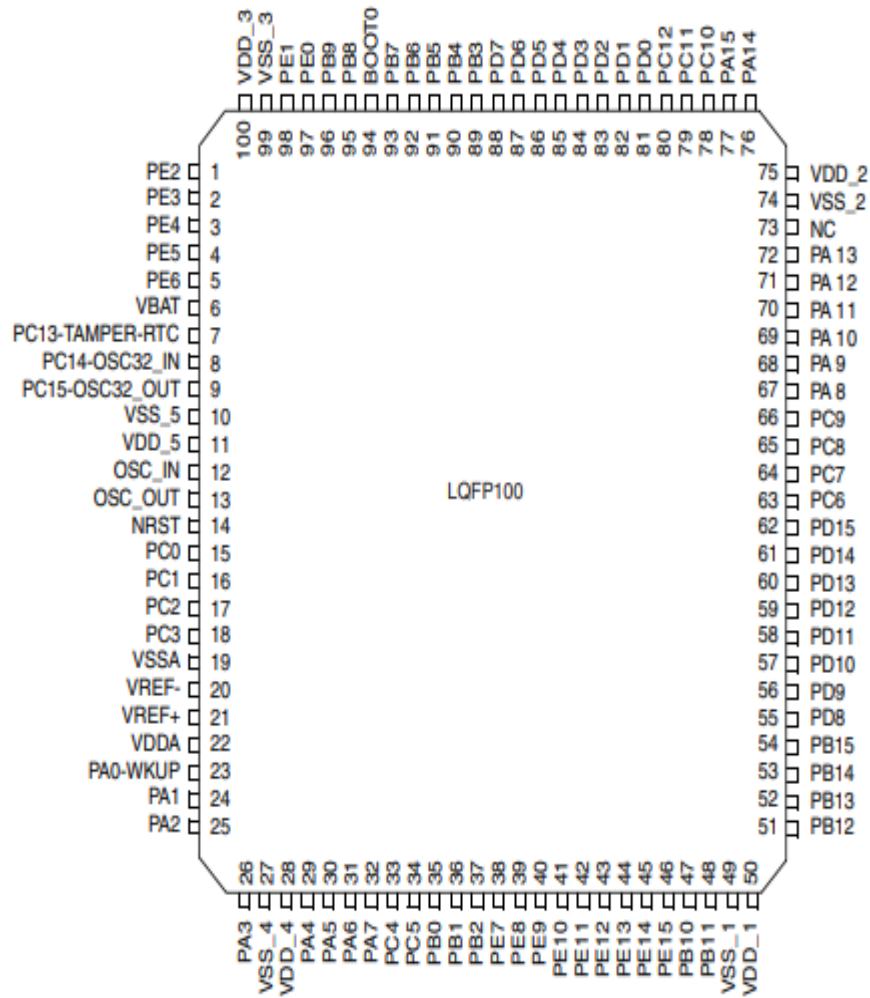
- [74] J. Rivera, M. Carrillo, M. Chac_on, G. Herrera, G. Bojorquez, Self-calibration and optimal response in intelligent sensors design based on artificial neural networks. *Sensors*, 7(8), 1509-1529., 2007.
- [75] P. Wilson, H. A. Mantooth, Model-based optimization techniques, in: P. Wilson, H. A. Mantooth (Eds.), *Model-Based Engineering for Complex Electronic Systems*, Newnes, Oxford, Ch. 10, pp. 347-367, 2013.
- [76] A. V. Herrewewege, D. Singelee and I. Verbauwhede, CANAuth-a simple, backward compatible broadcast authentication protocol for CAN bus. In *ECRYPT Workshop on Lightweight Cryptography* (Vol. 2011, p. 20)., 2011.
- [77] H. Kayabaşı, CAN (Controller Area Network) Temelli Alarm Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Malatya, 2008.
- [78] A. B. Kından, ARM Cortex M0 Serisi Mikrodenetleyicilerden Oluşan Ayrık Gömülü Sistemler İçin CAN Bus Tabanlı Yazılım Güncelleme Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Kocaeli, 2019.
- [79] C. Fil, İçten Yanmalı Motorların J1939 Canbus'tan Alınan Bilgilerinin Ve Hata Mesajlarının İşlenmesi ve Mobil Uygulamada Görüntülenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol Ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, 2019.
- [80] B. Samancı, CAN Bus nedir? CAN protokolü incelemesi, <http://www.barissamanci.net/Makale/15/can-bus-nedir-can-protokolu-incelemesi/> [Erişim Tarihi: 5 Kasım 2019].
- [81] İ. Ünal, CAN (Control Area Network) Üzerinden PIC Programlama, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı*, Isparta, 2006.
- [82] Microchip Inc., MCP2551 Datasheet, Microchip Technology Inc., USA, 2001.
- [83] D. İbrahim, Controller Area Network Projects with ARM and Arduino, *Elektor*, United Kingdom, 141-142, 2016.
- [84] İ. Kara, CAN Haberleşme Protokolünün İncelenmesi ve Bir Sıcaklık Kontrol Sistemine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, 2009.
- [85] <https://www.mechanic.com.tr/basinc-transmitterinin-genel-ozellikleri-ve-secim-kriterleri/> [Erişim Tarihi: 13 Eylül 2020].

EKLER

EK 1 PGA300 & Basınç algılayıcı bağlantı şeması

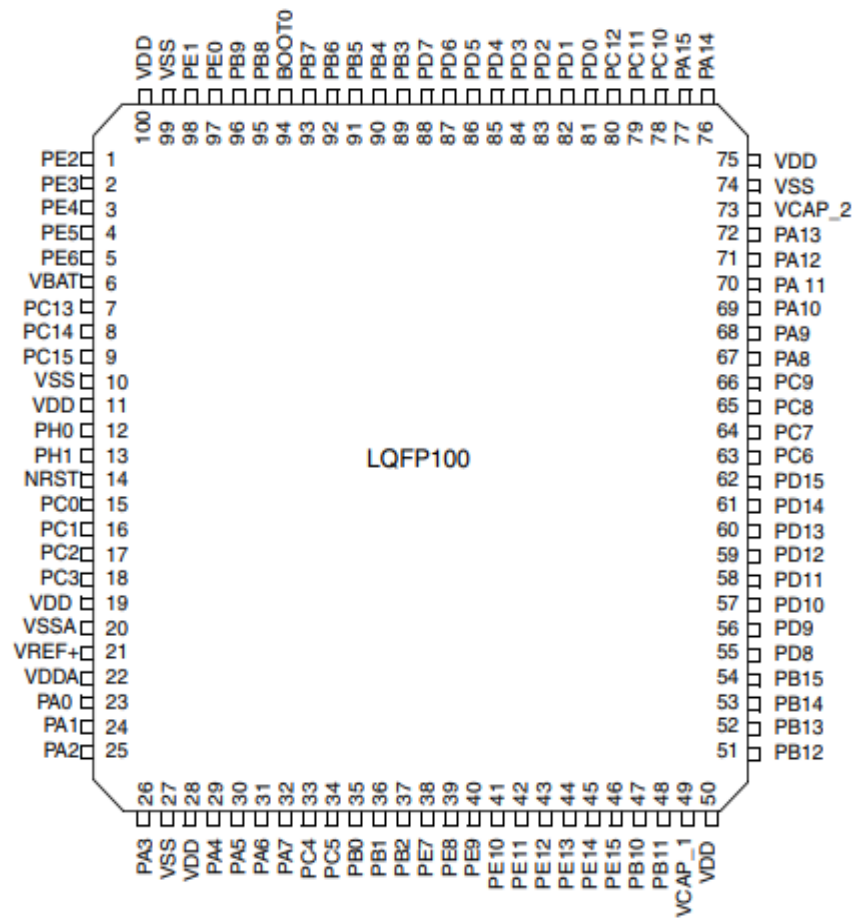


EK 2 STM32F107VCT6 pin diyagramı

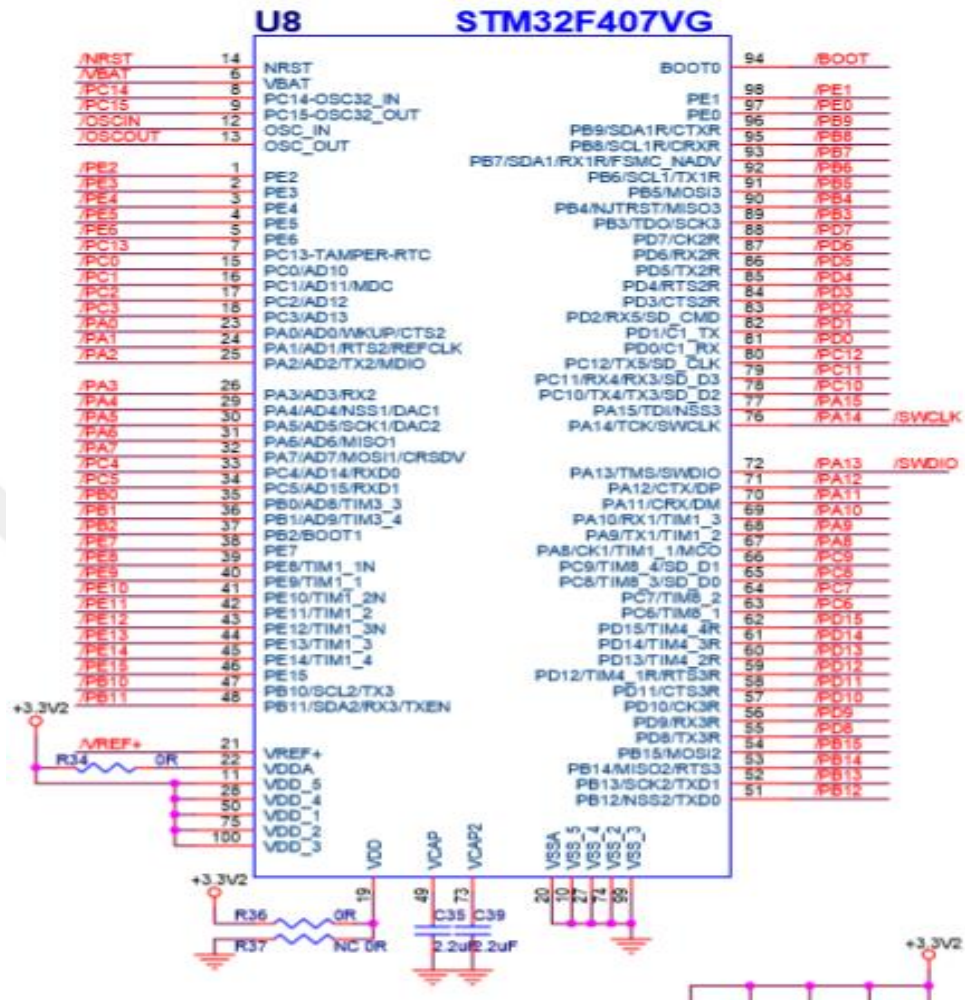


ai14391

EK 3 STM32F407VGT6 pin diyagramı

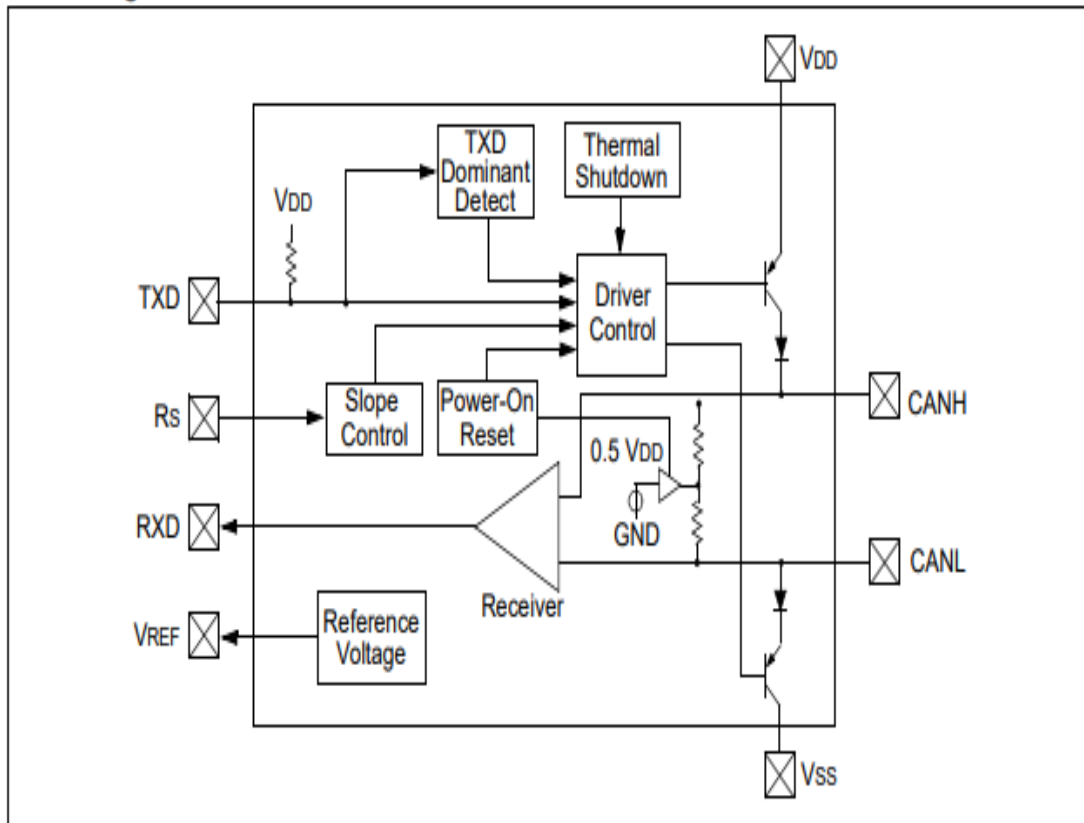


EK 4 STM32F107VCT6 / STM32F407VG



EK 5 MCP2551 blok diyagramı

Block Diagram



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İbrahim TOY
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : KONYA/1995
Telefon : 0534 051 1705
Faks : -
e-mail : toy1864@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	Mehmet-Emine AKDOĞAN Anadolu Lisesi, Sarayönü, Konya	2013
Üniversite	Necmettin ERBAKAN Üniversitesi, Meram, Konya	2017
Yüksek Lisans	Necmettin ERBAKAN Üniversitesi, Meram, Konya	-
Doktora	-	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017-...	Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Kula, G., Ciniviz, M. ve Toy, İ. (2019). Investigation of running as a result of heavy duty vehicle compressors with conditioned air feed, ISPEC 5th International Conference on Engineering & Natural Sciences, Van, 580-593.