



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SERBEST DÜŞEN KÜTLE YÖNTEMİ İLE BİRİNCİL SEVİYE
DİNAMİK BASINÇ STANDARDI GELİŞTİRİLMESİ**

Recep YILMAZ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Recep YILMAZ tarafından hazırlanan ‘‘Serbest Düşen Kütle Yöntemi İle Birincil Seviye Dinamik Basınç Standardı Geliştirilmesi’’ adlı tez çalışması 10/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ

.....

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

.....

Üye

Doç. Dr. M. Hüseyin ÇETİN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

.....

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

Prof. Dr. Şerife Yurdağül KUMCU
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.

Recep YILMAZ

15.12.2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SERBEST DÜŞEN KÜTLE YÖNTEMİ İLE BİRİNCİL SEVİYE DİNAMİK BASINÇ STANDARDI GELİŞTİRİLMESİ

Recep YILMAZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2024, 158 Sayfa

Otomotiv, savunma sanayi ve havacılık gibi sektörlerde sıklıkla dinamik basınç sensörleri kullanılmaktadır ve bu sensörlerle gerçekleştirilen ölçümlerdeki doğruluk önem arz etmektedir. Dinamik basınç, statik basınçtan farklı olup zamanla değişen ve çoğunlukla birkaç milisaniye içerisinde gerçekleşen bir basınç tipidir ve bu tür basınçları ölçen dinamik basınç sensörlerinin de yine bu küçük zaman dilimlerinde benzer etkiyi gösteren sistemlerle davranışının incelenmesi ve doğrulanması gerekmektedir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen tasarım ve üretimlerle dinamik basınç ölçüm yöntemlerinden biri olan serbest düşen kütle yöntemi ile birincil seviye dinamik basınç standardı kullanılarak endüstriyel dinamik basınç sensörleri ile tamamen ilgili fizik yasalarına göre toplam kütle, piston-silindir ünitesi efektif alanı, lazer interferometreden elde edilen ivme değerleri ve yerel yer çekimi ivme değeri yardımıyla elde edilen referans dinamik basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Referans basınç değerlerini hassas bir şekilde elde edebilmek için özellikle efektif alan ve ivme sinyalleri üzerine detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Efektif alan hesapları, piston ve silindirlere ait boyutsal ölçümler yardımıyla Dadson teorisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvme sinyallerindeki kayıpları minimize edebilmek için sistemde üç adet lazer interferometre kullanılmıştır. Lazer interferometreler 120° açıyla konumlandırılmış ve bu interferometrelerden elde edilen ivme değerlerinin ortalaması kullanılarak kütle merkezinde meydana gelen ivme değişimine yakınsama sağlanmıştır. İvme sinyalleri üzerinde alçak geçiren filtre ve polinomsal eğri uydurma yöntemi ile form düzeltme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistemde kullanılan bazı parametreler Taguchi metodu ile belirlenerek hem Taguchi deney tasarımında alınan ölçümler hem de parametreler belirlendikten sonra gerçekleştirilen ölçümler, kalibreli dinamik basınç sensörleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde özellikle düşme sırasında kütlede meydana gelen eğilmelerin, sistemde oluşan mekanik titreşimlerin ve yine kütlede düşme sırasındaki eksenel kaçıklığı sebebiyle piston silindir arasında oluşan sürtünmenin ivme sinyalleri üzerindeki olumsuz etkileri değerlendirilmiştir. (500-3000) bar aralığında dinamik basınç ölçümleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dinamik basınç, efektif alan, lazer interferometre, Taguchi metot

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DEVELOPING A PRIMARY LEVEL DYNAMIC PRESSURE STANDARD USING FREE FALLING MASS METHOD

Recep YILMAZ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2024, 158 Pages

Dynamic pressure sensors are frequently used in sectors such as automotive, defense industry and aviation, and the accuracy of measurements made with these sensors is important. Dynamic pressure is a type of pressure that is different from static pressure and changes over time and mostly occurs within a few milliseconds, and the behavior of dynamic pressure sensors that measure such pressures must be examined and verified with systems that show similar effects in these small time periods. By using with the designs and productions carried out in the thesis study, the primary level dynamic pressure standard with free falling mass method, which is one of the dynamic pressure measurement methods, industrial dynamic pressure sensors compared with the reference dynamic pressure values obtained from completely according to the relevant physics laws via total mass, piston-cylinder unit effective area, acceleration values obtained from the laser interferometer and local gravity value. In order to obtain reference pressure values precisely, detailed studies have been carried out, especially on effective area and acceleration signals. Effective area calculations were carried out using Dadson theory with the help of dimensional measurements of pistons and cylinders. In order to minimize losses in acceleration signals, three laser interferometers were used in the system. Laser interferometers were positioned at an angle of 120° and the average of the acceleration values obtained from these interferometers was used to approximate the acceleration change occurring at the center of mass. Form correction studies were carried out on the acceleration signals using a low-pass filter and polynomial curve fitting method. Some parameters used in the system were determined by the Taguchi method, and both the measurements taken in the Taguchi experimental design and the measurements performed after the parameters were determined were compared with calibrated dynamic pressure sensors. When the results were examined, the negative effects of the bending of the mass during the fall, the mechanical vibrations in the system, and the friction between the piston and cylinder due to the axial misalignment of the mass during the fall, on the acceleration signals were evaluated. Dynamic pressure measurements were carried out in the range of (500-3000) bar and the results were shared.

Keywords: Dynamic pressure, effective area, laser interferometer, Taguchi method

ÖNSÖZ

Tez çalışması boyunca gerek destek ve anlayış gerekse çok değerli katkılarından dolayı danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a çok teşekkür ederim. Bu süreçte çok değerli görüşleriyle katkıda bulunan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN hocalarıma ayrı ayrı teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca verdikleri her türlü destek için TÜBİTAK UME ve TÜBİTAK SAGE'deki değerli yönetici ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım. Bugünlere gelmemde emeği geçen ve adını zikretmediğim tüm hocalarıma ve dostlarıma minnetlerimi sunarım.

Manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen aileme, her konuda her zaman yanımda olan, uzun çalışma süreleri boyunca onlara ayıramadığım zaman için sabır ve anlayışla yaklaşan değerli eşim Pınar'a, oğullarım İbrahim Yusuf ve Ömer Musab'a çok teşekkür ederim.

Recep YILMAZ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | x |
| TABLO LİSTESİ..... | xiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR..... | xiv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Basınç Ölçümü | 2 |
| 1.1.1. Manometreler..... | 3 |
| 1.1.2. Basınç sensörleri..... | 4 |
| 1.1.2.1. Gerinim ölçer (strain-gauge) tabanlı basınç sensörleri..... | 5 |
| 1.1.2.2. Kapasitif basınç sensörleri..... | 6 |
| 1.1.2.3. Piezoelektrik basınç sensörleri | 7 |
| 1.2. Basınç Ölçümü İçin Çeşitli Modlar | 8 |
| 1.3. Basınç Cihazlarının Kalibrasyonu | 8 |
| 1.3.1. İzlenebilirlik kavramı | 9 |
| 1.3.2. Primer (birincil) ve sekonder (ikincil) standartlar | 10 |
| 1.3.3. Statik kalibrasyon | 11 |
| 1.3.4. Dinamik kalibrasyon | 14 |
| 1.3.4.1. Periyodik basınç üreticileri..... | 14 |
| 1.3.4.2. Periyodik olmayan basınç üreticileri | 14 |
| 1.4. Dinamik Basınç Uygulama Alanları | 15 |
| 1.4.1. Turbo makineler | 15 |
| 1.4.2. Akustik | 15 |
| 1.4.3. Aerodinamik | 16 |
| 1.4.4. Üretim prosesleri | 16 |
| 1.4.5. İçten yanmalı motorlar..... | 16 |
| 1.4.6. Diğer otomotiv uygulamaları | 16 |
| 1.4.7. Akışkan güç ve kontrol uygulamaları..... | 17 |
| 1.4.8. Tıp ve ergonomi uygulamaları | 17 |

| | |
|--|-----------|
| 1.4.9. Patlama dalgaları | 17 |
| 1.4.10. Balistik..... | 18 |
| 1.4.11. Robotik uygulamalar | 18 |
| 1.5. Motivasyon ve Tezin Amacı | 18 |
| 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI | 20 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 24 |
| 3.1. Serbest Düşen Kütle Yöntemi İle Dinamik Basınç Kalibrasyon Cihazının Çalışma Prensipleri | 27 |
| 3.2. Ölçüm Başlığı, Piston ve Silindirler | 33 |
| 3.2.1. Ölçüm başlığı, piston ve silindir tasarım ve üretimi..... | 34 |
| 3.2.1.1. Birinci ölçüm başlığı, piston ve silindir | 34 |
| 3.2.1.2. İkinci ölçüm başlığı, piston ve silindirler | 37 |
| 3.2.2. Bağlantı parçaları tasarım ve üretimi..... | 47 |
| 3.2.2.1. Bağlantı adaptörleri | 47 |
| 3.2.2.2. Çelik conta..... | 48 |
| 3.2.3. Üretilen ölçüm başlığı, piston-silindir ve bağlantı parçalarının montajı ... | 49 |
| 3.3. Lazer İnterferometrik Sistem | 50 |
| 3.3.1. Lazer interferometre sistem bileşenleri | 51 |
| 3.3.2. Lazer interferometrik sistemin ayarlanması ve ölçümler için hazır hale getirilmesi | 53 |
| 3.4. Piston ve Silindir Ünitesi İçin Efektif Alan Hesaplama Metodu | 56 |
| 3.4.1. Karşılıklı dengeleme metodu (cross-float) | 56 |
| 3.4.2. Boyutsal ölçümler yardımıyla piston-silindir ünitesi efektif alan değerinin belirlenmesi..... | 59 |
| 3.4.2.1. Mutlak çap ölçümleri ile efektif alan hesabı | 59 |
| 3.4.2.2. Mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri ile efektif alan hesabı..... | 60 |
| 3.4.2.3. Dadson Teorisi..... | 60 |
| 3.5. Deneylerde Kullanılan Ortam Sıvıları | 62 |
| 3.6. Taguchi Metodu ile Parametrelerin Belirlenmesi | 64 |
| 3.7. Doğrulama Deneylerinde Kullanılacak Olan Diğer Bileşenler..... | 66 |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... | 70 |
| 4.1. Referans Dinamik Basınç Hesabı | 70 |
| 4.1.1. Toplam kütle değerinin belirlenmesi | 75 |
| 4.1.2. Yerel yerçekimi ivme değerinin belirlenmesi | 76 |
| 4.1.3. Piston ve silindir ünitelerine ait efektif alan hesapları | 77 |
| 4.1.4. Lazer interferometrelerden elde edilen ivme sinyallerinin analizi | 79 |
| 4.2. Taguchi Metodu Kullanılarak Optimum Parametre Belirleme Çalışması | 88 |
| 4.3. Hesaplanan Referans Basınç Değerleri ile Değeri İyi Bilinen Dinamik Basınç Sensörü Değerlerinin Karşılaştırılması | 93 |
| 4.4. (500-3000) bar Basınç Aralığında Gerçekleştirilen Dinamik Basınç Ölçümleri | 101 |
| 4.4.1. 500 bar basınç değerinde dinamik basınç ölçümleri | 103 |
| 4.4.1.1. Birinci ölçüm sonuçları | 103 |

| | | |
|------------------------|--|------------|
| 4.4.2. | 3000 bar basınç değerinde dinamik basınç ölçümleri | 106 |
| 4.4.2.1. | Üçüncü ölçüm sonuçları | 106 |
| 4.4.3. | Toplu sonuçlar | 108 |
| 4.4.4. | Ölçüm belirsizliği | 110 |
| 5. | SONUÇ VE DEğERLENDİRME | 113 |
| KAYNAKLAR | | 118 |
| EKLER | | 123 |



ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Basıncın gösterimi | 2 |
| Şekil 1.2. Manometreler..... | 3 |
| Şekil 1.3. Örnek bir gerinim ölçer gösterimi | 5 |
| Şekil 1.4. Gerinim ölçer tabanlı basınç sensörü yapısının basit modeli | 5 |
| Şekil 1.5. Gerinim ölçer tabanlı ölçüm yapan örnek bir endüstriyel basınç sensörü..... | 6 |
| Şekil 1.6. Kapasitif basınç sensörü çalışma prensibinin basit modeli | 6 |
| Şekil 1.7. Endüstriyel bir kapasitif basınç transimteri | 7 |
| Şekil 1.8. Piezoelektrik basınç sensörü çalışma prensibinin basit modeli..... | 7 |
| Şekil 1.9. Basınç modları | 8 |
| Şekil 1.10. İzlenebilirlik kavramı | 9 |
| Şekil 1.11. Primer sistem ile statik basınç kalibrasyon düzeneği basit gösterimi | 10 |
| Şekil 1.12. Sekonder sistem ile statik basınç kalibrasyon düzeneği basit gösterimi | 11 |
| Şekil 1.13. Deadweight kalibrasyon cihazı..... | 12 |
| Şekil 1.14. AMH-38 ve PG7601 Platformu..... | 13 |
| Şekil 1.15. Basınç kontrolcüsü | 13 |
| Şekil 1.16. Bazı dinamik basınç uygulama alanları..... | 15 |
| Şekil 3.1. Serbest düşen kütle yöntemi ile dinamik basınç ölçüm sistemi şematik görünümü | 28 |
| Şekil 3.2. Dinamik basınç kalibrasyon sistemi | 29 |
| Şekil 3.3. Servo motorlar ve serbest düşen kütle | 30 |
| Şekil 3.4. Elektromıknatıs , ölçüm başlığı, piston ve silindir | 31 |
| Şekil 3.5. Kılavuz miller ve ribaund sistem..... | 31 |
| Şekil 3.6. Lazer interferometre ve retroreflektör | 31 |
| Şekil 3.7. Sistemin çalışma prensibinin basit şematik gösterimi | 32 |
| Şekil 3.8. Ölçüm başlığının basit şematik gösterimi | 33 |
| Şekil 3.9. İlk tasarlanan ölçüm başlığı | 34 |
| Şekil 3.10. Üretimi tamamlanmış olan ölçüm başlığı, piston ve silindir..... | 35 |
| Şekil 3.11. İlk olarak üretilen piston ve silindir için CMM ölçümleri..... | 36 |
| Şekil 3.12. İlk üretilen piston ve silindire ait eş çalışma uzunluğu boyunca çap değerleri | 37 |
| Şekil 3.13. İkinci olarak tasarlanan ölçüm başlığı | 37 |
| Şekil 3.14. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, mesh işlemi, sabit destek | 39 |
| Şekil 3.15. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, basınç değerinin atanması..... | 40 |
| Şekil 3.16. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, Von-Mises gerilme değerleri (genel) .. | 40 |
| Şekil 3.17. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, Von-Mises gerilme değerleri | 41 |
| Şekil 3.18. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, deformasyon değerleri | 42 |
| Şekil 3.19. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, gerilme değerlerinin dağılımı..... | 42 |
| Şekil 3.20. Üretimi gerçekleştirilen ve ısıtma işlemi uygulanmış ölçüm başlığı | 43 |
| Şekil 3.21. Tasarlanan piston ve silindir | 44 |
| Şekil 3.22. Silindir sayısal statik analizi | 44 |
| Şekil 3.23. Silindir ve piston montaj yapılmış hali..... | 45 |
| Şekil 3.24. Üretilen tüm silindir ve pistonların montaj yapılmış halleri..... | 45 |
| Şekil 3.25. Silindir ve piston CMM ölçümleri öncesi hazırlanan uygulama çizimi..... | 45 |
| Şekil 3.26. 2 numaralı silindir ve pistonu ait CMM ölçümleri | 46 |
| Şekil 3.27. CMM ile elde edilen değerlerin düzenlenmesi | 47 |
| Şekil 3.28. Tasarım ve üretimi gerçekleştirilen geçiş adaptörü | 48 |
| Şekil 3.29. Tasarım ve üretimi gerçekleştirilen çelik conta..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.30. Ölçüm başlığı, piston, silindir, geçiş adaptörü ve çelik contanın üç boyutlu modellerine ait montaj görüntüsünün kesit alanı | 49 |
| Şekil 3.31. Ölçüm başlığı, piston, silindir, geçiş adaptörü ve çelik contanın dinamik basınç ölçüm sistemine montajı | 50 |
| Şekil 3.32. Pitch, yaw ve roll hareketleri | 51 |
| Şekil 3.33. Alüminyum plaka üzerine montajı yapılmış üç adet retroreflektör..... | 51 |
| Şekil 3.34. Alüminyum plaka üzerine montajı yapılan retroreflektörlerin serbest düşen kütle üzerindeki görüntüsü..... | 52 |
| Şekil 3.35. Alüminyum parça üzerine montajı yapılan lazer interferometreler..... | 52 |
| Şekil 3.36. Lazer interferometre, ayna ve retroreflektörlere ait üç boyutlu model görüntüsü | 53 |
| Şekil 3.37. Lazer interferometrelerin bağlı olduğu kontrol ünitesi..... | 54 |
| Şekil 3.38. RE-10 USB programı ile elde edilen üç ayrı kanala ait sinyallerin gösterimi | 54 |
| Şekil 3.39. RE-10 USB programı ile elde edilen üç ayrı kanala ait sinyallerin gösterimi | 55 |
| Şekil 3.40. InfasVibro isimli programdan bir kesit | 55 |
| Şekil 3.41. Karşılıklı dengeleme metodu için kurulumu gerçekleştirilmiş sistem | 56 |
| Şekil 3.42. Karşılıklı dengeleme metodu için kullanılan örnek bir hassas ağırlık seti ... | 57 |
| Şekil 3.43. Piston ve silindir üniteleri | 58 |
| Şekil 3.44. Ölçüm başlığında ortam sıvısı ile dolu olan bölgenin kesit görüntüsü..... | 62 |
| Şekil 3.45. Deneylerde kullanılan ortam sıvıları | 63 |
| Şekil 3.46. Deneylerde kullanılan dinamik basınç dönüştürücüleri | 67 |
| Şekil 3.47. Kistler 6907B kalibratörü ile beraber kullanılan cihazlar | 68 |
| Şekil 3.48. Kistler 6907B kalibratör | 69 |
| Şekil 4.1. Kütle değerindeki 10 g değişikliğin farklı nominal basınç değerlerinde referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi | 70 |
| Şekil 4.2. Efektif alan değerindeki 1 mm ² 'lik değişikliğin farklı nominal basınç değerlerinde referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisinin grafiksel gösterimi .. | 72 |
| Şekil 4.3. İvme değerlerindeki farklı oranlardaki değişimlerin farklı nominal basınç değerleri üzerinde meydana getireceği sapmaların grafiksel gösterimi..... | 74 |
| Şekil 4.4. Kütle, efektif alan ve ivme değerlerindeki değişimin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisinin grafik üzerinde topluca gösterimi | 74 |
| Şekil 4.5. Mutlak gravimetre cihazı ile yerel yer çekimi ivme değeri belirleme çalışması | 76 |
| Şekil 4.6. 2 numaralı pistonun yarıçap değerlerine karşı 2, 3, 4 ve 5 numaralı silindirlere yarıçap değerlerinin oluşturduğu farklı kombinasyonlar | 77 |
| Şekil 4.7. Alçak geçişli filtre (LPF) kullanılmadan lazer interferometrenin bir kanalından elde edilen ivme sinyali örneği..... | 79 |
| Şekil 4.8. Alçak geçişli filtre (LPF) kullanılmadan lazer interferometrenin bir kanalından elde edilen örnek sinyalin pik yaptığı noktadan yakınlştırılmış görünümü | 80 |
| Şekil 4.9. Alçak geçiren filtre (LPF) için kesme frekansı (cut-off) belirleme çalışması | 81 |
| Şekil 4.10. (0-2) kHz aralığında alçak geçiren bir filtre (LPF) için kesme frekansının (cut-off) belirlenmesi. | 81 |
| Şekil 4.11. Farklı alçak geçiren filtre kesme frekans değerleriyle filtrelenen sinyalin tepe formunu ve değerlerini gösteren grafik | 82 |
| Şekil 4.12. Lazer interferometrenin bir kanalından ele edilen 1500 Hz kesme frekans değerine sahip alçak geçiren filtre uygulanmış örnek bir ivme sinyali | 83 |
| Şekil 4.13. Şekil 4.12 ile gösterilen grafikteki ivme sinyalinin mutlak maksimum noktasının yakınlştırılmış kısmı | 83 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.14. Aynı pik bölgesine uygulanan farklı derecelerdeki eğri uydurma grafikleri (1500 Hz LPF uygulanmıştır)..... | 84 |
| Şekil 4.15. İvme sinyali üzerinde mutlak maksimum ivme değerinin belirlenmesinde dikkate alınan noktaların gösterimi..... | 86 |
| Şekil 4.16. Seviye ortalamaları grafiği | 91 |
| Şekil 4.17. Standart sapmaların ortalamalarının grafiği | 92 |
| Şekil 4.18. Sinyal gürültü oranlarının ortalamalarının grafiği..... | 92 |
| Şekil 4.19. Varyans analizi sonuçları..... | 93 |
| Şekil 4.20. Normal sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları | 97 |
| Şekil 4.21. 6.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları | 98 |
| Şekil 4.22. 5.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları | 98 |
| Şekil 4.23. 4.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları | 99 |
| Şekil 4.24. 3.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları | 99 |
| Şekil 4.25. 2.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları | 100 |
| Şekil 4.26. 500 bar basınç değeri 1. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)..... | 105 |
| Şekil 4.27. 500 bar basınç değeri 1. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)..... | 105 |
| Şekil 4.28. 3000 bar basınç değeri 3. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)..... | 107 |
| Şekil 4.29. 3000 bar basınç değeri 3. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)..... | 107 |
| Şekil 4.30. Kistler 6229AK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)..... | 108 |
| Şekil 4.31. Kistler 6213BK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)..... | 108 |
| Şekil 4.32. Kistler 6229AK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)..... | 109 |
| Şekil 4.33. Kistler 6213BK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)..... | 109 |
| Şekil 4.34. Kistler 6229AK ile gerçekleştirilen (500-3000) bar aralığındaki dinamik basınç ölçümlerinde elde edilen değerlerin ölçüm belirsizlikleri ile gösterimi | 112 |
| Şekil 4.35. Kistler 6213BK ile gerçekleştirilen (500-3000) bar aralığındaki dinamik basınç ölçümlerinde elde edilen değerlerin ölçüm belirsizlikleri ile gösterimi | 112 |

TABLO LİSTESİ

| | |
|--|-----|
| Tablo 3.1. Tez kapsamında kullanılacak materyal ve uygulanacak yöntemlerin özet gösterimi | 26 |
| Tablo 3.2. 303 paslanmaz çelik malzeme kimyasal özellikleri | 35 |
| Tablo 3.3. 303 paslanmaz çelik malzeme için bazı mekanik özellikler | 35 |
| Tablo 3.4. Calmax malzeme kimyasal özellikleri..... | 38 |
| Tablo 3.5. Calmax malzeme için bazı mekanik özellikler..... | 38 |
| Tablo 3.6. 1045 malzeme kimyasal özellikleri | 38 |
| Tablo 3.7. 1045 malzeme için bazı mekanik özellikler | 38 |
| Tablo 3.8. Gliserol ve sebacate için bazı özellikler | 63 |
| Tablo 3.9. Belirlenmesi gereken parametreler | 64 |
| Tablo 3.10. Taguchi deney tasarım aşamaları | 65 |
| Tablo 3.11. Taguchi deney tasarımında kullanılan faktör ve seviyeler | 65 |
| Tablo 3.12. Taguchi deney tasarımı..... | 66 |
| Tablo 3.13. Kistler 6229AK dinamik basınç sensörü için kalibrasyon sonuçları..... | 67 |
| Tablo 3.14. Kistler 6213BK dinamik basınç sensörü için kalibrasyon sonuçları..... | 68 |
| Tablo 4.1. Kütle değerindeki 10 g değişikliğin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi | 70 |
| Tablo 4.2. Efektif alan değerindeki 1 mm ² 'lik değişimin farklı nominal basınç değerlerinde referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi | 71 |
| Tablo 4.3. Lazer interferometrelerden elde edilen ivme değerlerindeki 20 m/s ² 'lik değişimin 100 bar nominal basınç değerindeki referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi | 73 |
| Tablo 4.4. Referans dinamik basınç hesabında kullanılan kütle değerlerinin gösterimi | 75 |
| Tablo 4.5. Farklı piston ve silindir kombinasyonları için belirlenen parametreler ve bu parametrelerle hesaplanan efektif alan değerleri | 78 |
| Tablo 4.6. Şekil 4.14 ile gösterilen grafiklerde kullanılan katsayı değerleri | 85 |
| Tablo 4.7. 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi için kullanılan katsayılar | 85 |
| Tablo 4.8. Şekil 4.14 ile gösterilen grafiklerden elde edilen negatif yöndeki pik değerleri | 86 |
| Tablo 4.9. İvme sinyali üzerinde farklı noktalarda ivme hesabı..... | 87 |
| Tablo 4.10. Taguchi deney tasarımı ölçümlerinde elde edilen ivme değerleri..... | 88 |
| Tablo 4.11. Gözlem değerleri | 89 |
| Tablo 4.12. S/N değerlerinin ortalamaları | 91 |
| Tablo 4.13. Hesaplanan ortalama basınç değerleri | 94 |
| Tablo 4.14. Karşılaştırma değerleri farklarının bar birimi cinsinden gösterimi | 95 |
| Tablo 4.15. Karşılaştırma değerleri farklarının yüzdesel gösterimi | 96 |
| Tablo 4.16. (500-3000) bar basınç aralığı için serbest düşen kütle yöntemiyle çalışan birincil seviye dinamik basınç standardı ile alınan ölçümlerde kullanılan parametreler | 103 |
| Tablo 4.17. 500 bar basınç değeri 1. ölçüm için serbest düşen kütle yöntemiyle çalışan birincil seviye dinamik basınç standardı ile alınan ölçümlerde elde edilen değerler ... | 103 |
| Tablo 4.18. 3000 bar basınç değeri 3. ölçüm için elde edilen değerler | 106 |
| Tablo 4.19. 500 bar basınç değeri için ölçüm belirsizlikleri | 111 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

| | | |
|------------------|---|---------------------------------|
| p | : | Basınç değeri |
| p(t) | : | Zamana bağlı basınç değeri |
| F | : | Uygulanan kuvvet değeri |
| A | : | Alan değeri |
| A _{eff} | : | Efektif alan değeri |
| cm ² | : | Santimetrekare |
| atm | : | Atmosfer |
| Pa | : | Pascal |
| MPa | : | Megapascal |
| GPa | : | Gigapascal |
| dB | : | Desibel |
| Hz | : | Hertz |
| kHz | : | Kilohertz |
| ms | : | Milisaniye |
| mV | : | Milivolt |
| m | : | Kütle değeri |
| a | : | İvme değeri |
| g | : | Yerçekimi ivme değeri |
| σ | : | Mukavemet değeri |
| ν | : | Poisson oranı |
| E | : | Elastisite modülü |
| ρ | : | Yoğunluk değeri |
| pC | : | Pikocoulomb |
| t | : | Sıcaklık değeri |
| °C | : | Derece celcius |
| α | : | Piston ısı genleşme katsayısı |
| β | : | Silindir ısı genleşme katsayısı |
| λ | : | Basınç distorsiyon katsayısı |
| μGal | : | MikroGalileo |

1. GİRİŞ

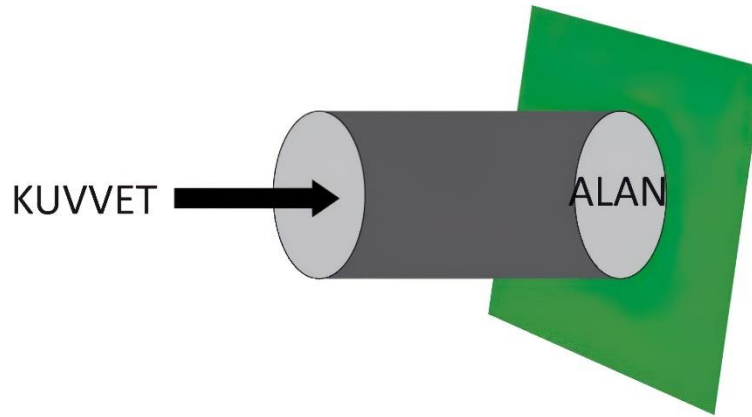
Dinamik basınç sensörleri havacılık, otomotiv, gıdaların işlenmesi gibi alanlar başta olmak üzere gerek ölçüm gerekse kontrol süreçlerinde birçok alandaki uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisi, yanma analizi, turbo makineler, akışkan gücü ve kontrolü, aerodinamik gibi birçok önemli alanda birkaç Pa değerinden birkaç GPa değerine kadar olan genliklerde ve 1 Hz frekans değeri altından başlayarak yaklaşık 1 MHz frekans değerine kadar değişebilen aralıkta zamana bağlı olarak değişiklik gösteren dinamik basınç ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Bilgiç ve Durgut, 2015) (Durgut ve ark., 2017). Endüstride bazı uygulamalar zamanla değişmeyen yani statik olarak adlandırılan karakteristiğe sahiptir ve belli tipteki basınç ölçerler oluşan statik basıncı ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Fakat, basınç değeri sabit bir değer olmayıp zamana bağlı olarak değişiklik gösteriyorsa bu şekilde oluşan basınç, dinamik basınç olarak belirtilmektedir ve gerçekleştirilen bir dinamik ölçüm sırasında çok kısa bir zaman aralığında basınç değerinde ciddi oranda değişiklik göstermektedir.

Oluşturulan dinamik basıncın güvenilir bir biçimde ölçülebilmesi için cevap süreleri oldukça hızlı olan dinamik basınç dönüştürücüleri kullanılmaktadır. Kısa zaman aralığında hızlı basınç değişimlerini algılayabilecek yapılarından dolayı piezoelektrik basınç sensörleri dinamik ölçüm alanında daha çok tercih edilmektedir. Dinamik basınç dönüştürücülerinin kalibrasyonları yine uygulanacak referans bir dinamik basınca karşı gerçekleştirilmelidir. Mekanik büyüklükler olan tork, kuvvet ve basınç ölçümlerinin birçok uygulaması dinamik tiptedir fakat ilgili basınç dönüştürücülerin kalibrasyonu, hali hazırda tamamen statik prosedürlere göre gerçekleştirilmektedir. Bu durumun nedenlerinden biri de dinamik kalibrasyon alanında uluslararası kabul görmüş standart ve yöntem eksikliğidir denilebilir (Hjelmgren, 2002). Bir dinamik basınç sensörünün kalibrasyonu ya da dinamik basınç ölçümü, kalibrasyonu yapılan sensörün dinamik davranışının, sensörün kullanılacağı yerdeki ihtiyaç duyulan ölçüm doğruluğuna uygun şekilde dinamik davranışının ortaya konulmasını ve analizini içermektedir. Dinamik basınç kalibrasyonunda, referans dinamik basınç standardı tarafından kalibrasyonu yapılacak sensöre uygulanmak üzere değeri zamanla değişen güvenilir, kontrol edilebilir ve değeri iyi bilinen dinamik basınç üretilmelidir. Üretilen dinamik basınç, test sensörü olarak adlandırılan kalibre edilecek dinamik basınç sensörüne uygulanarak sensörün ürettiği basınç ya da elektriksel yük tepkisi ölçülmektedir. Bu test sensörüne karşılık uygulanan referans basıncı belirleyebilmek için farklı bir dinamik basınç sensörü

kullanılabilir ve bu şekilde bu sensör referans dinamik basınç sensörü olarak adlandırılır. Fakat burada ortaya çıkan sorun, referans olarak kullanılan bu dinamik basınç sensöründe primer seviyede dinamik basınç kalibrasyonuna ihtiyacı olmasıdır. Bu tür bir kalibrasyonda uygulanan referans dinamik basınç fizik yasalarına dayanarak hesaplanır ve kalibrasyon sonuçlarında kullanılır. Bu tez çalışmasında, dinamik basınç sensörlerinin kalibrasyonlarında kullanılacak olan primer seviyede serbest düşen kütle yöntemine dayalı kalibrasyon standardı geliştirilecektir.

1.1. Basınç Ölçümü

Mikroskopik düzeyde bir akışkan içerisindeki basınç, moleküllerden nesnelere doğru momentum transferinin bir sonucu olduğu söylenebilir ve basıncın büyüklüğü, basınç ölçümü yapılan yüzeyi etkileyen moleküllerin momentum sayısına bağlıdır. Makroskopik seviyede ise basınç Şekil 1.1 ve Eşitlik 1’de gösterildiği gibi genellikle yüzey alanına etki eden dik kuvvet değeri olarak ya da kapalı bir kap içerisindeki akışkanın herhangi bir noktasındaki gerilim olarak tanımlanmaktadır ve birimi Pascal (Pa)’dır. Pascal, kütle ve uzunluk değerleri kullanılarak türetilmiş bir birimdir (N/m^2).



Şekil 1.1. Basıncın gösterimi

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Kinetik teoriye göre sıvılar, içinde buldukları kabın çeperlerinin yüzeylerine dik olarak kuvvet uygularlar. Bir sıvının içindeki 1 cm^2 lik yüzeye o sıvının yaptığı etki,

hidrostatik basınç olarak adlandırılmaktadır. Statik akışkan tarafından oluşturulan basınç değeri sadece sıvının yoğunluğuna, sıvı derinliğine ve yerçekimi ivmesine bağlı olmakla beraber aynı derinlikteki tüm noktalarda basınç değeri aynıdır. Eğer basınç değeri zaman ile değişmiyor ve sabit kalıyorsa bu tür basınçlar statik basınç olarak adlandırılmaktadır. Fakat basınç değeri kısa zaman periyotlarıyla değişiklik gösteriyorsa bu durumda Eşitlik 2'de gösterildiği gibi dinamik basınçtan söz edilebilir. Toplam basınç değeri ise statik ve dinamik basınç değerlerinin toplamından oluşmaktadır (Hjelmgren, 2002).

$$p = p(t) \quad (2)$$

Uygulanan basıncı ölçebilmek için manometreler, basınç sensörleri ve basınç sensörlerinden türetilmiş cihazlar kullanılmaktadır. Kullanım alanları ise gereksinime göre farklılıklar göstermektedir. Farklı uygulamalarda farklı tipte basınçölçerler kullanılmaktadır.

1.1.1. Manometreler

Manometreleri öncelikle analog ve sayısal olarak ikiye ayırabiliriz. Analog manometreler, içlerinde bulunan elastik elemanın dışarıdan uygulanan basınçla orantılı olacak şekilde hareket etmesi ilkesine dayalı olarak çalışmaktadırlar. Bu hareket, manometrenin içerisinde bulunan uygun dişliler ve kollar yardımıyla, uygulan basıncı gösterecek olan gösterge üzerindeki ibreye aktarılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 1.2. Manometreler, analog manometre (a), sayısal manometre (b)

Genel olarak bourdon tüplü, diyaframlı ve fark basınç manometreleri gibi çeşitli tipleri vardır. Şekil 1.2 (a) ile örnek bir analog manometre gösterilmiştir. Sayısal manometreler ise aslında içerisinde bir basınç sensörü barındıran manometrelerdir denilebilir. Basınç sensöründen elde edilen voltaj çıktısı göstergeden basınç değeri olarak okunmaktadır. Şekil 1.2 (b) ile de örnek bir sayısal manometre gösterilmiştir.

1.1.2. Basınç sensörleri

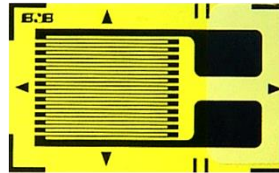
Basınç sensörleri, gaz veya sıvılardaki basıncı ölçebilen bir cihaz veya alet olarak tanımlanabilir. Bir basınç sensörü, uygulanan basıncı belirleyebilen basınca duyarlı bir elemandan ve bu bilgiyi bir çıkış sinyaline dönüştüren bileşenlerden oluşmaktadır. Basınç sensörlerini tanımlamak için sıklıkla birbirinin yerine kullanılan birkaç ortak terim vardır. Bunlar, basınç dönüştürücüleri, basınç transmitterleri ve basınç göstergeleri olarak belirtilebilir. Hangi terimin kullanıldığına bakılmaksızın hepsi bir çıkış sinyali üretir ve basıncı ölçerler. Basınç sensörleri, basınç dönüştürücüleri ve basınç transmitterleri arasında bazı ayrımlar vardır. Ayrım yapmanın önemli olmasının nedeni, bunların sıklıkla birbirinin yerine kullanılması, ancak her birinin biraz farklılıklar içermesidir. Bir basınç sensörü fiziksel bir reaksiyonla çalışır. Basınç sensörünün içindeki sensör modülü bir çıkış voltajı üretir. Sonuçların güvenilir ve istikrarlı olması için kalibrasyon, amplifikasyon ve sıcaklık telafisinin önceden ele alınması gerekir. Basınç dönüştürücüler, sensörün algılama elemanının içinde fiziksel bir reaksiyona sahip olduklarından, basınç sensörü gibi bir çıkış voltajı üretirler. Bununla birlikte, basınç dönüştürücüler aynı zamanda sinyal koşullandırmayı da gerçekleştirebilir ve bu da onların daha büyük bir mesafeye iletilmesine olanak tanır. Basınç dönüştürücüler volt (V) veya milivolt (mV) cinsinden çıkış sinyali verirler. Öte yandan basınç transmitterleri ise bir basınç dönüştürücüye çok benzer şekilde çalışır, ancak basınç transmitterleri, voltaj değeri okumak yerine düşük empedanslı bir yük üzerinden miliamper (mA) cinsinden bir akım sinyali üretirler.

Tüm basınç sensörleri, basınç farklarındaki fiziksel değişimi ölçerek aynı temel çalışma prensibini kullanırlar. Basınç sensörü fiziksel bir değişikliği ölçtüğünde, bu bilgi bir elektrik sinyaline dönüştürülmekte ve bu daha sonra kullanıcının yorumlayabileceği kullanılabilir veriler olarak görüntülenmektedir.

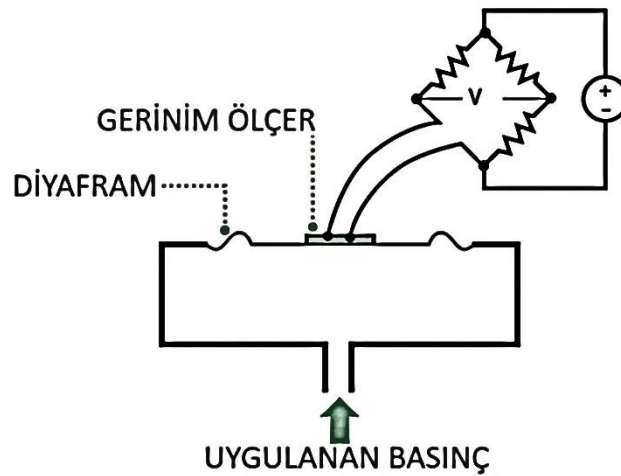
Temel olarak farklı fiziksel prensiplerle çalışan 3 tip basınç sensörü vardır denilebilir. Bunlar gerinim ölçer (strain gauge) tabanlı basınç sensörleri, kapasitif basınç sensörleri ve piezoelektrik basınç sensörleri olarak belirtilebilir.

1.1.2.1. Gerinim ölçer (strain-gauge) tabanlı basınç sensörleri

Gerinim ölçer, direnci uygulanan kuvvete göre değişen bir sensördür. Kuvveti, basıncı, ağırlığı vb. elektrik direncinde ölçülebilecek bir değişime dönüştürmektedir. Gerinim ölçerin çalışma prensibi, mekanik zorlanmaya bağlı olarak elektriksel direncin değişmesi kavramına dayanmaktadır. Gerinim ölçer, esnek bir arka malzemeye tutturulmuş, tipik olarak bakır gibi oldukça iletken bir malzemeden yapılmış ince bir tel veya folyodan oluşmaktadır. Gerinim ölçer üzerinde bulunan bu teller bir dış harici etkiye maruz kaldıklarında uzar veya kısalırlar, bu uzama veya kısalma anında telin direncinde de değişim meydana gelmektedir. İşte bu direnç değişimi Wheatstone köprüsü vasıtasıyla ölçülebilir. Ölçülen direnç değişimi hesaplamalara katılarak fark voltajı hesaplanır ve bu voltaj değeri uygun bir dönüşüm katsayısı ile basınç değerine dönüştürülebilir. Şekil 1.3 ile örnek bir gerinim ölçer gösterilmektedir. Şekil 1.4 ile de bir gerinim ölçer tabanlı basınç sensörü yapısının basit modeli verilmiştir.

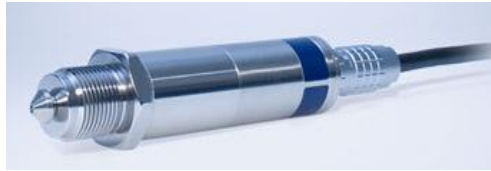


Şekil 1.3. Örnek bir gerinim ölçer gösterimi



Şekil 1.4. Gerinim ölçer tabanlı basınç sensörü yapısının basit modeli

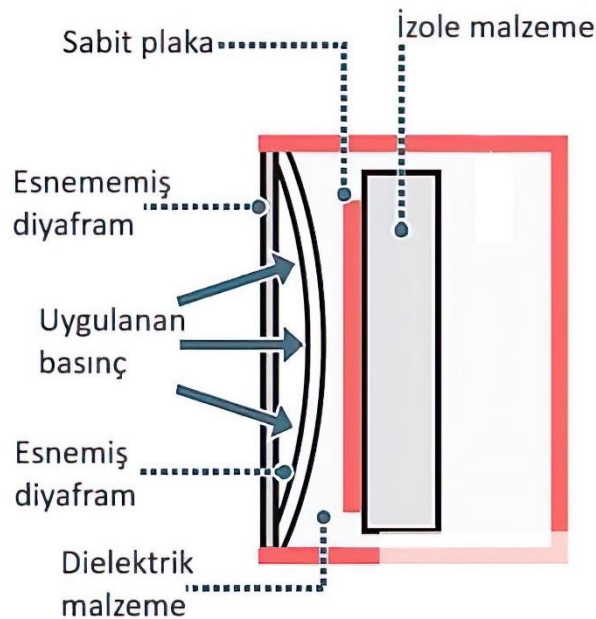
Şekil 1.4 incelendiğinde basınç sensörünün basınç girişi bölümünden uygulanan basınç, sensör içerisinde bulunan diyaframa ulaşır. Uygulanan basınca göre diyaframın şekli değişir. Bu şekil değişimi diyafram üzerinde bulunan gerinim ölçer vasıtasıyla ölçülür. Ölçülen gerinim Wheatstone köprüsü vasıtasıyla voltaj değerine dönüştürülür. Şekil 1.5 ile endüstriyel bir gerinim ölçer prensibi ile çalışan basınç sensörü gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Gerinim ölçer tabanlı ölçüm yapan örnek bir endüstriyel basınç sensörü

1.1.2.2.Kapasitif basınç sensörleri

Kondansatörler yapıları gereği elektrik yükü depolayabilmektedirler, bu yetenek, kondansatör plakalarının boyutları, plakalar arası mesafe ve plakalar arasındaki yalıtkan malzemenin özelliği ile ilişkilidir. Şekil 1.6 ile gösterildiği gibi eğer kondansatörde bulunan plakalar esnetilirse, birbirinden uzaklaştırılırsa ya da plakalar arasındaki dielektrik malzeme hareket ettirilirse kondansatörün kapasitesi değişir dolayısıyla dirençte değişir. Bu prensibi kullanarak kapasitif basınç sensörleri üretilmektedir. Şekil 1.7 ile örnek bir endüstriyel kapasitif basınç transmitteri gösterilmiştir.



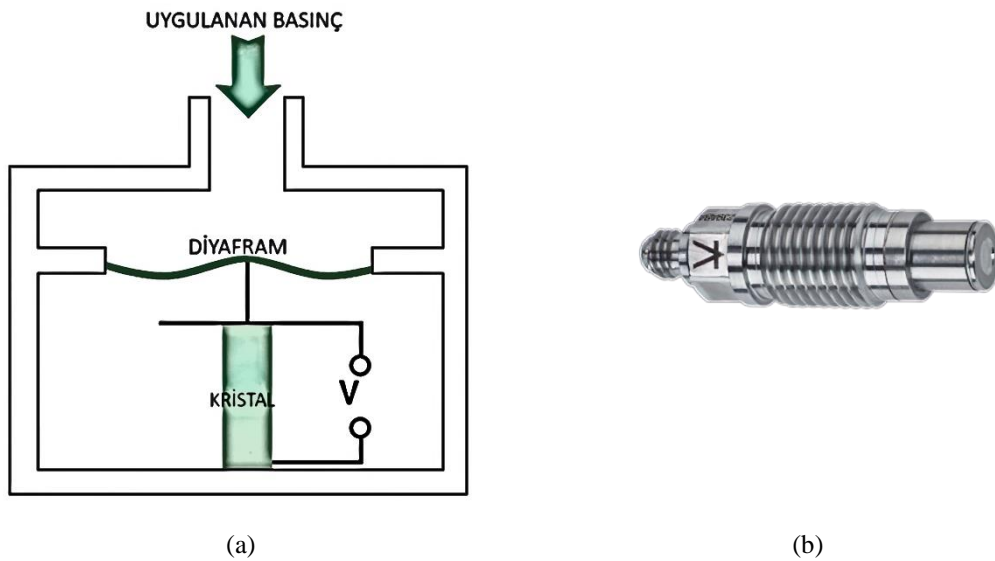
Şekil 1.6. Kapasitif basınç sensörü çalışma prensibinin basit modeli



Şekil 1.7. Endüstriyel bir kapasitif basınç transmitteri

1.1.2.3. Piezoelektrik basınç sensörleri

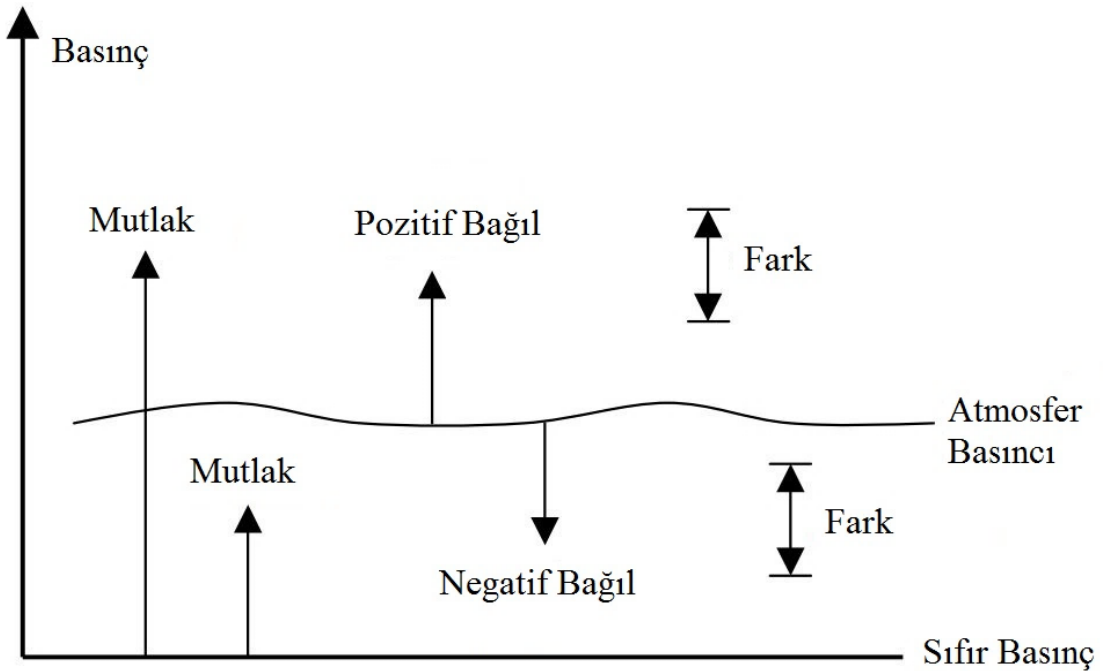
Piezoelektrik basınç sensörleri, uygulanan basınç nedeniyle algılama mekanizması üzerindeki gerilimi ölçmek için quartz gibi belirli malzemelerde piezoelektrik etkiyi esas alır. Bu teknoloji genellikle yüksek dinamik basınçların ölçümü için kullanılmaktadır. Piezoelektrik basınç sensörleri, iki elektrot arasına sıkıştırılmış, genellikle kristal veya seramik olan bir piezoelektrik malzemedir. Sensöre basınç uygulandığında piezoelektrik malzeme deforme olur ve elektrotlar arasında voltaj farkına neden olur. Bu voltaj daha sonra ölçülebilir ve uygulanan basınçla ilişkilendirilebilir. Şekil 1.8 (a) ile piezoelektrik basınç sensörü çalışma prensibinin basit bir modeli, Şekil 1.8 (b) ile de endüstriyel bir örnek piezoelektrik basınç sensörü verilmiştir.



Şekil 1.8. Piezoelektrik basınç sensörü çalışma prensibinin basit modeli

1.2. Basınç Ölçümü İçin Çeşitli Modlar

Bazı durumlarda basıncın mutlak değeri ölçülür fakat çoğunlukla referans basınca göre bağıl basınç tanımlamak daha pratiktir. Havanın dünyanın yerçekimi etkisiyle yüzeye dik olarak uyguladığı kuvvetle oluşan basınca atmosfer basıncı denir. Atmosfer basıncının birimi atmosfer (atm)'dir. 1 atmosfer 101325 Pa olarak tanımlanmıştır. Deniz seviyesinden yükseklere çıkıldıkça atmosfer basıncı düşmektedir. Açık hava basıncı barometre cihazları ile ölçülmektedir. Mutlak basınç ölçümü ise (mutlak) vakum referans alınarak gerçekleştirilen ölçüm olarak tanımlanmaktadır. Atmosfer basıncı referans alınarak gerçekleştirilen ölçüme ise bağıl (gauge) basınç ölçümü denilmektedir. Eğer basınç ölçümü atmosfer basıncı referans alınarak atmosfer basıncı altında gerçekleştirilecekse bu tür ölçümlere negatif bağıl basınç ölçümü denir. Fark basıncı ölçümü ise herhangi iki basınç değeri arasında gerçekleştirilen basınç ölçümüdür. Şekil 1.9 ile çeşitli basınç modları bir arada gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Basınç modları

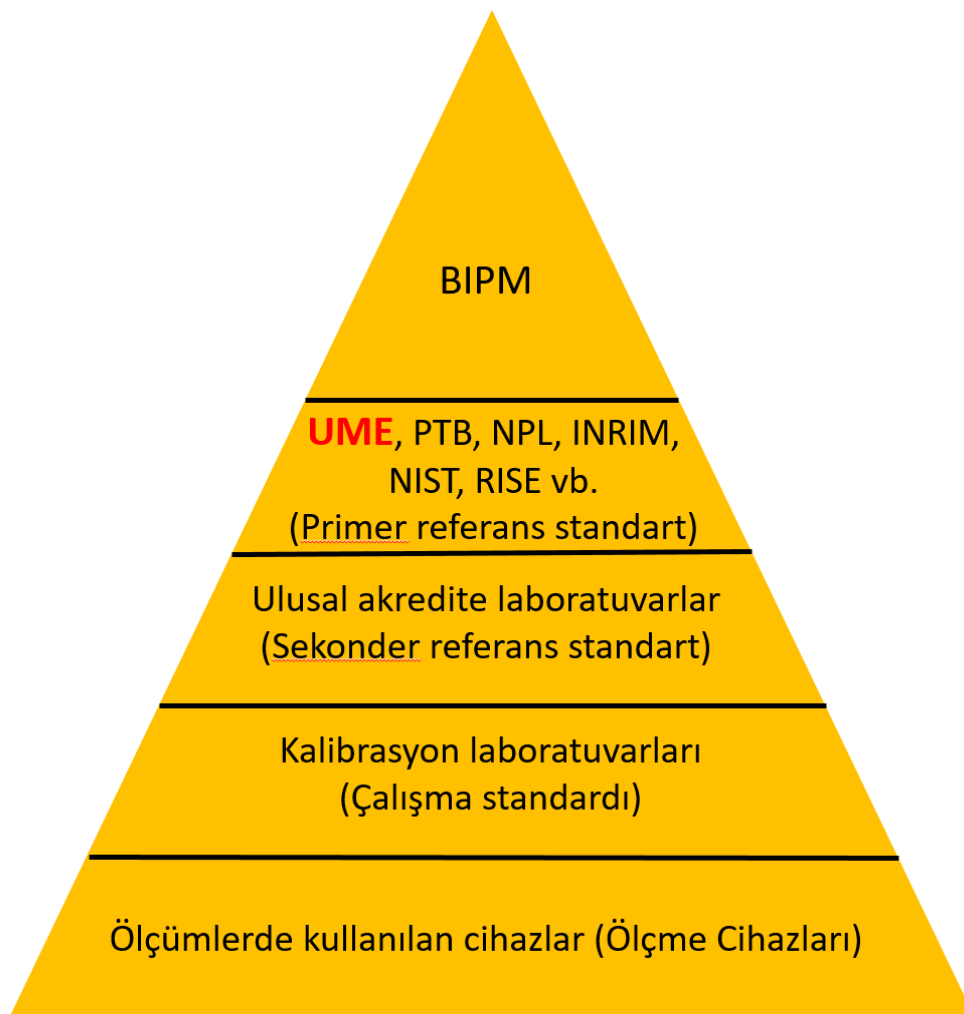
1.3. Basınç Cihazlarının Kalibrasyonu

Kalibrasyonun resmi tanımı, belirtilen şartlar altında ölçüm sistemi ya da ölçüm cihazı tarafından gösterilen miktar değerleri arasındaki ilişki ya da metaryal ölçümü tarafından sunulan değerler ya da bir referans materyal arasındaki ilişki ve standartlar tarafından elde edilen karşılık gelen değerlerin saptandığı bir takım operasyonlardır (Vim,

2004). Başka bir deyişle, bu, bir kalibrasyonda basınç ölçüm sisteminden elde edilen çıktının basınç standardı ile karşılaştırıldığı anlamına gelmektedir.

1.3.1. İzlenebilirlik kavramı

Modern kalite sistemlerinin tümü, yapılan kalibrasyonların ulusal veya uluslararası standartlara göre izlenebilir olmasını gerektirmektedir. Metrolojide izlenebilirlik kelimesi, tüm belirsizlikleri belirten kesintisiz bir karşılaştırma zinciri yoluyla genellikle ulusal veya uluslararası standartlarda belirtilen referanslarla gerçekleştirilen bir ölçümün sonucunun özelliği veya bir standardın değeri anlamına gelmektedir (Vim, 2004). Farklı zamanlarda, farklı kurumlarda veya farklı ülkelerde yapılan aynı değerlerdeki ölçümlerin karşılaştırılabilmesini sağlamak için tüm ölçümlerin Şekil 1.10 ile gösterildiği gibi izlenebilir olması gereklidir.

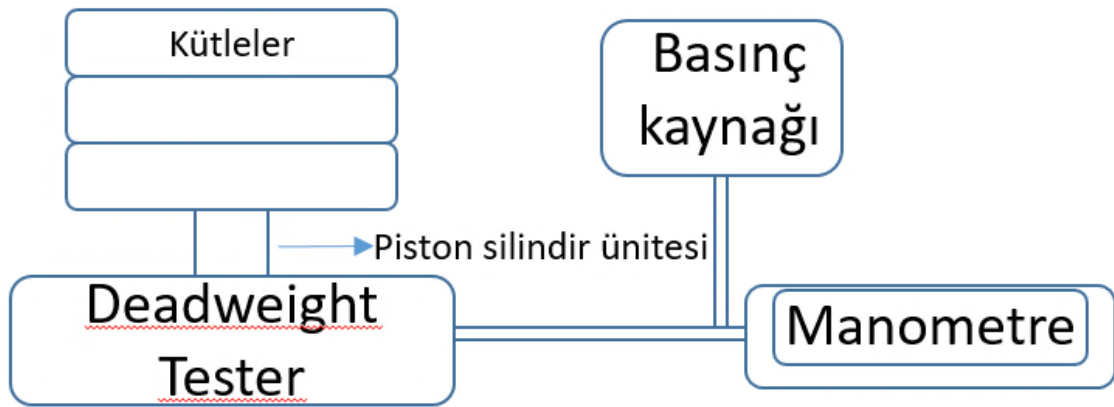


Şekil 1.10. İzlenebilirlik kavramı

Statik basınç ölçümleri ile dinamik basınç ölçümleri arasındaki farkın, statik standartlar yerine dinamik bir standarda göre izlenebilirliği ihtiyaç haline getirmiştir. Yayımlanan bazı anketler dinamik bir standart için izlenebilirlik ihtiyacının dinamik basınç ölçümleri ile ilgili tüm uygulamalarda fark edilir biçimde gerekli olduğunu belirtmektedir (Barbera ve Molinar, 1991) (Hunt, 1998). Bunun nedeni, elde edilen ölçüm verilerine güven kazanma ve ilişkili ölçüm belirsizliğini ölçme ihtiyacının, resmi bir izlenebilirlik gereksinimini karşılama arzusundan çok daha büyük olmasıdır.

1.3.2. Primer (birincil) ve sekonder (ikincil) standartlar

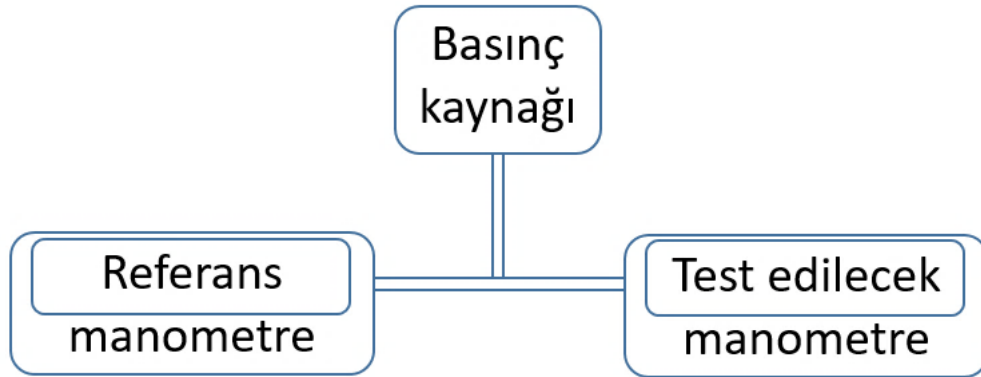
Primer kalibrasyon yönteminin tanımı, basıncı oluşturmak için primer standartları kullanan bir yöntem olarak belirtilebilir. Primer standart, en yüksek metrolojik niteliklere sahip olarak belirlenmiş veya yaygın olarak kabul edilen ve değeri aynı miktardaki diğer standartlara atıfta bulunulmaksızın kabul edilen bir standarttır. Bu, basınç kalibrasyonu gibi alanlarda referans değeri hesaplamak için fizik kurallarının kullanılacağı anlamına gelmektedir. Örneğin Şekil 1.11 ile gösterildiği gibi primer bir statik basınç kalibrasyonunda referans basınç değeri primer bir deadweight tester kullanılarak üretilebilir.



Şekil 1.11. Primer sistem ile statik basınç kalibrasyon düzeneği basit gösterimi

Diğer taraftan, sekonder bir standart, değeri aynı miktarın primer standardı ile karşılaştırıldığında atanan standart olarak tanımlanmaktadır (Vim, 2004). Sekonder standartlar kullanılarak kalibre edilen bir cihazdan elde edilen belirsizlik değerleri primer standartlara göre mutlaka daha yüksek olacaktır. Uygulanan basıncı belirlemek için bir referans transdüser veya manometre kullanıldığı zaman kalibrasyon yöntemi sekonder bir

yöntem olmaktadır. Şekil 1.12 ile örnek bir sekonder statik basınç kalibrasyon düzeneği verilmiştir.



Şekil 1.12. Sekonder sistem ile statik basınç kalibrasyon düzeneği basit gösterimi

Yine aynı şekilde dinamik basınç üreten bir sistemde, referans bir dinamik basınç sensörüne karşılık test edilecek dinamik basınç sensörü kalibre edilebilir ve bu tür bir kalibrasyon sekonder olarak adlandırılır. Fakat dinamik basınç sistemi ile üretilen basınç hesaplanabilirse bu basınç sistemde referans dinamik basınç olarak adlandırılır ve test edilecek dinamik basınç sensörü ile kıyaslanır. Bu tür bir kalibrasyon ise primer seviye dinamik basınç kalibrasyonu olarak adlandırılır.

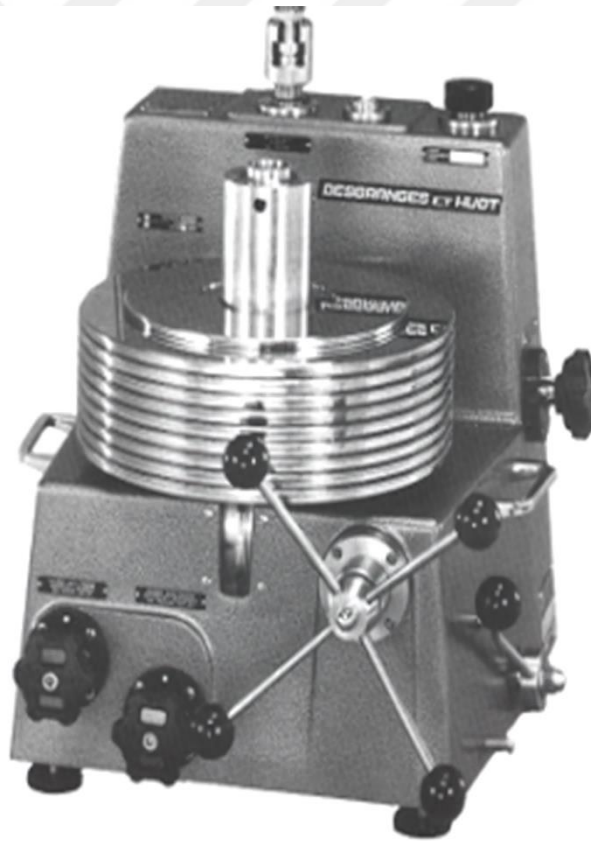
1.3.3. Statik kalibrasyon

Statik basınç kalibrasyonu alanı dinamik basınç kalibrasyonunun aksine oldukça iyi gelişmiştir. Farklı basınç ölçüm modları (mutlak, bağıl ve fark) ve farklı basınç genlik rejimleri (düşük vakum, vakum, orta basınç, yüksek basınç) için birçok özel kalibrasyon yöntemi mevcuttur. Ölü ağırlık test cihazı (deadweight), birkaç kPa ile yaklaşık 1 GPa basınç aralıklarında gaz ve hidrolik yağ ortamlarında hesaplanabilir basınçları elde edebilmek üzere sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 1.13).

Yüzeyi çok iyi işlenmiş A_{eff} efektif alanına sahip pistonun altına uygulanan akışkan basıncı, akışkan içerisinde serbestçe yüzen piston üzerindeki F kuvvetiyle dengede olduğu zaman oluşturulan basınç $p = F / A_{\text{eff}}$ 'e eşit olmaktadır.

Birincil seviye pistonlu basınç standartları düşük belirsizlik ve yüksek doğruluğa sahip olduklarından ölçüm biliminde sıklıkla tercih edilmektedirler. Pistonlu basınç standartları kullanılarak basınç oluşturmak için belirli bir kütle seti kullanılmaktadır. Bu şekilde basınç oluşturulurken karşılaşılan en önemli güçlüklerden biri kütle setlerinin

piston üzerine yüklenme biçimidir. Cihazın en yüksek çalışma aralığına ulaşmak için kütle setinin içinde bulunan tüm kütleleri sırasıyla piston üzerine yerleştirmek gerekmektedir. Bu işlem her bir basınç değeri için ayrı ayrı uygulanmaktadır. Bu şekilde her bir basınç noktası için ayrı ayrı oluşturulan basınç değerinde kullanılan kütle setlerinin yüklenme aşaması hem fiziksel güç gerektirmekte hem de oldukça zaman almaktadır. Bu durumun yanı sıra mutlak olarak yapılan ölçümlerde her bir basınç noktası için sistem vakumlanmakta ve artık gaz basıncı değerinin belli bir seviyeye inmesi beklenmektedir. Bu sebeplerden ötürü pistonlu basınç standartları ile yapılan kalibrasyonlar, kalibratörler ile gerçekleştirilen kalibrasyonlara nazaran daha fazla zaman almaktadır. Zaman kayıplarını en aza indirmek ve maliyetlerin düşürülmesi için otomatik kalibrasyona yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Yılmaz ve Hamarat, 2018) (DH Instruments, 2007) (Fluke, 2010).



Şekil 1.13. Deadweight kalibrasyon cihazı

Bu kapsamda ikinci seviye basınçölçer cihazlarının ve kalibratörlerin mutlak ve bağıl modda kalibrasyonları birinci seviye pistonlu basınç standartları kullanılarak tam otomatik olarak gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 1.14).



Şekil 1.14. AMH-38 ve PG7601 Platformu

Basınç ölçüm sistemlerinin statik kalibrasyonu için diğer ekipmanlar basınç kontrolörleri ve taşınabilir kalibratörler olarak adlandırılan sistemlerdir. Bu tür sistemler, kalibre edilecek cihaza uygulanan gerçek basıncı belirlemek için aynı anda hem kalibre edilecek cihaza hem de referans transdüser veya manometreye basınç göndererek karşılaştırma prensibine dayanmaktadır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Basınç kontrolcüsü

Bu sistemler genellikle ölü ağırlık test cihazlarına kıyasla daha az doğrudur ancak çalışma kolaylığı ve kalibrasyonun çok daha hızlı gerçekleştirilebilirliği açısından büyük avantajlara sahiptirler.

1.3.4. Dinamik kalibrasyon

Son kırk yıl içinde basınç dönüştürücüleri için dinamik kalibrasyon yöntemleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Bu alandaki en erken çalışmalar Amerika Birleşik Devletleri uzay programları içinde ihtiyaç duyulan doğru basınç ölçümleri için gerçekleştirilmiş gibi görünmektedir. 1970 ve 1980 yılları arasında çok fazla çalışma rapor edilmemesine rağmen 1990'lı yıllar boyunca dinamik basınç kalibrasyonu alanında önemli yeni bilgiler sunulmuştur. Modern yanmalı motorlarda, proses kontrollerinde ve havacılık uygulamalarında performans optimizasyonu için dinamik basınç transdüserlerine olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Dinamik basınç kalibrasyonu için çeşitli periyodik ve periyodik olmayan yöntemler mevcuttur. Çoğu durumda basınç üreticisi tarafından oluşturulan basıncı ölçmek için dinamik karakteri çok iyi bilinen bir referans basınç transdüseri kullanılmaktadır. Periyodik ve periyodik olmayan basınç üretimi arasında seçim yapılırken, gerçek ölçüm durumuna en çok benzeyen basınç üretimini seçmek önemlidir. Basınç transdüseri sadece harmonik basınç ölçümü için kullanılacaksa basınç kalibrasyonu için harmonik periyodik basınç üreticisi kullanmak daha mantıklıdır. Diğer taraftan, eğer basınç transdüseri ani darbeli basınç ölçümü için kullanılacaksa, periyodik olmayan bir basınç üreticisi kullanmak daha uygun olacaktır (Hjelmgren, 2002) (Gu ve ark., 2019) (Salminen ve ark., 2018).

1.3.4.1. Periyodik basınç üreticileri

Periyodik basınç üreticilerinde üretilen basınç harmonik, kare dalga veya diğer herhangi bir periyodik fonksiyon gibi bir periyodik bir fonksiyondur. Bu tür cihazlara örnek vermek gerekirse akustik şok üreticisi, hoparlör, siren, dönen vana, sarsıcı tabanlı ataletsel yükleme sistemleri, sarsıcı tabanlı doğrudan kuvvet yükleme sistemleri ve piston silindir sürekli durum üreticileri olarak sıralanabilir (Hjelmgren, 2002).

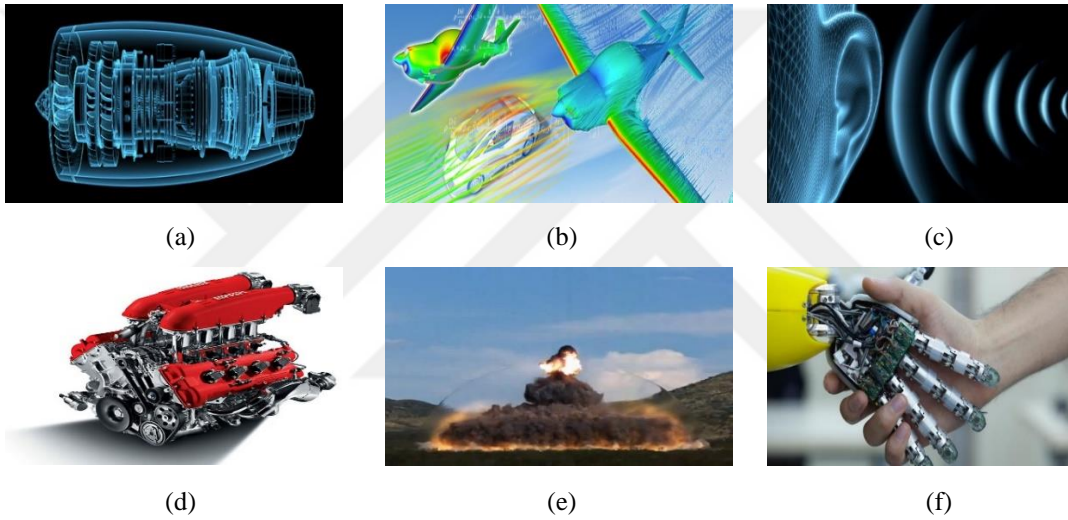
1.3.4.2. Periyodik olmayan basınç üreticileri

Periyodik olmayan basınç üreticileri tek durumlu basınç adımları veya basınç fonksiyonlarını oluşturmaktadırlar. Genellikle transdüserin transfer fonksiyonunu bulmak için frekans-etki alanı teknikleri kullanılmaktadır. Oluşturulan dinamik basınç

bilgisi ile Fourier dönüşümü belirlenebilir. Ölçüm sinyalinde de Fourier dönüşümü belirlenebilir. İki dönüşümün kullanılmasıyla transdüser transfer fonksiyonu basit bir bölümlerle belirlenebilir. Periyodik olmayan basınç üreticileri şu şekilde sıralanabilir; şok tüpleri, hızlı açma cihazı, Aronson şoksuz basınç adım üreticisi, ölü ağırlık test cihazıyla ya da diğer yöntemlerle negatif adım ve son olarak serbest düşen kütle (Hjelmgren, 2002).

1.4. Dinamik Basınç Uygulama Alanları

Ürün geliştirme, tanımlama ve problem çözümü, üretim süreçlerinin kontrolü, ürün bakım ve onarımı gibi birçok alanda hassas dinamik basınç ölçümleri gereklidir. Dinamik basınç ölçümünün uygulama alanlarından bazıları Şekil 1.16 ile belirtilmiştir.



Şekil 1.16. Bazı dinamik basınç uygulama alanları, (a) turbo makineler, (b) aerodinamik, (c) akustik, (d) içten yanmalı motorlar, (e) patlama dalgaları, (f) robotik

1.4.1. Turbo makineler

Turbo makineler, akışkan akış alanı ile mekanik bıçaklar arasındaki dinamik etkileşimin kullanımıyla enerjinin sisteme aktarıldığı bir cihaz olarak tanımlanmaktadır. Kompresör, türbin, pompa ve fan gibi turbo makineler, enerji santrallerinde ve havacılıkta kullanılan jet motorlarında bulunan buhar ve gaz türbinlerinin önemli bileşenlerindedir.

1.4.2. Akustik

Akustik basınç veya ses basıncı, atmosfer basıncı üzerine yerleştirilmiş düşük genlikli basınç salınımları olarak tanımlanabilir. Ses basıncı seviyeleri genellikle desibel (dB) cinsinden ifade edilmektedir. Ses basıncı ölçümü, bina ve araçlarda iç gürültü, araç

ve tesislerden gelen dış gürültü ve ev makinelerinin neden olduğu gürültülere kadar çok sayıda uygulamada görülmektedir.

1.4.3. Aerodinamik

Binaların ve diğer yapıların mühendisliğinde, uzay aracı, uçak ve diğer araçların tasarımında aerodinamik kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir. Aerodinamik kuvvetlerin dağılımının ayrıntılı bir resmini elde etmek için zamana bağlı basınç alanı gerekmektedir. İnşaatların ve araçların tasarım ve gelişimi sırasında öncelikle rüzgâr tünellerinde deneyler yapılmaktadır. Dinamik basınç ölçümleri bazen köprü için yapılırken bazen de bir manevra aracı gerçekleştirilebilir.

1.4.4. Üretim prosesleri

Kalıba döküm, plastik endüstrisinde kullanılan enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon gibi üretim süreçlerini optimize etmek için dinamik basınç ölçümleri gerçekleştirilmektedir.

1.4.5. İçten yanmalı motorlar

İçten yanmalı motorlar geliştirilirken ana hedefler arasında yakıt ekonomisinin sağlanması ve sağlık için tehlike arz eden emisyon miktarının azaltılması yer almaktadır. Bu yüzden yakıt ekonomisine ve düşük veya yüksek emisyon seviyelerine yol açan süreçleri daha iyi anlayabilmek için silindirleri incelemek gereklidir ve bu da yanma odasında gerçekleştirilen dinamik basınç ölçümü ile elde edilebilir.

1.4.6. Diğer otomotiv uygulamaları

Silindirlerin dinamik basınç ölçümü dışında otomotiv endüstrisinde karşılaşılan diğer birçok dinamik basınç uygulaması da mevcuttur. Bunlardan biri egzoz sistemi basıncının ölçümüdür. Bu basınç düşük emisyon ve iyi bir yakıt ekonomisi elde etmek için silindire enjekte edilen yakıt miktarını belirleyen bir kontrol parametresi olarak kullanılmaktadır. Başka bir uygulama ise dizel motorlar için yakıt enjeksiyon basıncı ölçümüdür. Yüksek verimli motorlara olan talep, enjeksiyon basınçlarının 200 MPa değerinin üzerine çıkmasına yol açmıştır. Otomotiv endüstrisinde dinamik basınç ölçümlerinin diğer uygulamaları fren basıncının ölçülmesi, yağlama sisteminde yağ basıncı ve şanzıman bileşenlerindeki yağ basıncıdır.

1.4.7. Akışkan güç ve kontrol uygulamaları

Hidrolik ve pnömatik bileşenler genellikle nesnelere hareketlerinin kontrol edilmesi istendiğinde kullanılmaktadırlar. Tipik bileşenler motorlar, pompalar, şanzımanlar, aktüatörler ve vanalar olarak verilebilir. Bu bileşenleri geliştirmek ve performanslarını izlemek için dinamik akışkan basıncının ölçülmesi gereklidir. Hidrolik uygulamalarda basınç genlikleri GPa mertebelerine ulaşabilmektedir. Normal çalışma sırasında frekanslar oldukça düşük olmakla beraber belirli fenomenleri yakalamak için ölçüm bant genişliğinin 10 kHz değerinin üzerinde olması gerekebilir. Bunun bir örneği kavitasyondan dolayı basınç yüklemesinin ölçülmesidir. Kaviteasyon yüklemesi, çöken kaviteasyon kabarcıklarının neden olduğu yüksek yoğunluklu tekrarlayan etkilerden oluşmaktadır. Basınç yüklemesinin yükselme süresi dört mikrosaniyelik olabilmekte ve genlik değeri 10 GPa'a kadar ulaşabilmektedir. Pnömatik uygulamalarda ise bileşenlerin genlik ve frekans gereksinimleri daha düşük olmaktadır.

1.4.8. Tıp ve ergonomi uygulamaları

Tıp ve ergonomi uygulamaları içinde dinamik basınç ölçümleri kapsamında ortaya çıkan birkaç uygulama vardır. Tıpta kan basıncı ölçümlerinde, sistolik ve diyastolik basınçların iki ortak sabit durum değerlerine ek olarak dinamik basınç bileşeni çok fazla bilgi içerdiği bilinmektedir (Cook, 1999). Bir diğer alan ise operasyon sonrası ve travma sonrası hastaların hastalık tanısı ve izlemidir. Bu alanlarda özel tek kullanımlık frekans ihtiyacı 20 Hz değerine kadar olan yeni nesil basınç dönüştürücüler artmıştır. Ergonomide bazı operasyonlar sırasında el ve alet arasındaki toplam kuvveti ölçmenin yanı sıra basınç dağılımı ölçümüne bir ilgi mevcuttur (Del Prete ve ark., 2001). Yürüyüş analizinde yürüyüş sırasında ayak basıncı ölçümü ortopedi uzmanları tarafından yapılmaktadır. Biyomekanikte ise yürüme gibi yavaş süreçler veya otomotiv kazası sırasında gibi ani hareketler sırasında vücut parçaları arasındaki veya ayak ve zemin gibi bir vücut parçası arasındaki dinamik basınçları ölçmeye yönelik bir ilgi söz konusudur. Ortopedik implantların optimizasyonu ve gelişimi dinamik basınç ölçümleri ile kolaylaştırılmaktadır.

1.4.9. Patlama dalgaları

Patlayıcıların patlamasının birincil sonucu, hava patlama dalgası veya sualtı patlama dalgası olarak bilinen bir basınç darbesinin yayılmasıdır. Bu dinamik basıncın ölçümü iki farklı açıdan önemlidir. İlk olarak, patlayıcı geliştiriciler maksimum ve

yönlendirilmiş yıkıcı etkiler elde etmek istemektedirler. İkinci olarak, askeri ve sivil barınak geliştiriciler hava patlaması ve yer şoku yüklemesine karşı dayanacak yapılar elde etmek istemektedirler. Serbest havada patlayıcıların test edilmesi sırasında, basınç genliği birkaç yüz MPa değerlerine ulaşırken şok dalgası yükselme zamanları mikro saniye değerinin altında olabilmektedir (Clark, 1989) (McLean ve Box, 2000).

1.4.10. Balistik

Silah, top, füze ve mühimmat gibi silah sistemleri geliştirilirken dinamik basınç ölçülümüne ihtiyaç vardır. Bazı sensör tipleri, değiştirilmemiş bir mermi kılıfı aracılığıyla doğrudan silah odası basıncının ölçümelerine izin vermektedir. Olası basınç genlikleri yaklaşık yüz kHz frekans içeriği ile 800 MPa değerlerine ulaşabilmektedir (Riegebauer,1992).

1.4.11. Robotik uygulamalar

Robotik uygulamalarında, manipüle edilen nesne üzerinde bir manipülatör tarafından uygulanan kuvvet dağılımını bilmek uygulama çalışma açısından oldukça faydalı olmaktadır. Bu tür uygulamalarda basınç haritası sensörleri kullanılmakta olup karşılaşılan frekanslar oldukça düşüktür (Del Prete ve ark., 2001).

1.5. Motivasyon ve Tezin Amacı

Basınç, kuvvet ve tork gibi mekanik büyüklüklerin, ölçüm sonucunun zamanla değişim gösterdiği birçok ölçüm uygulaması bulunmaktadır. Ancak bu tür uygulamalarda kullanılan basınç dönüştürücülerin izlenebilirlikleri günümüzde statik yöntemlere dayanmaktadır. Birçok ölçüm ve kontrol sürecinde, zamana bağlı olarak değişen yani dinamik parametrelerin ölçülebilmesi gerekli hale gelmiştir. Bu tez çalışmasında malzeme darbe dayanım test makinelerinde uygulanan kütleyi belirli bir yükseklikten test edilecek numune üzerine düşürme yöntemi geliştirilerek birincil seviye dinamik basınç oluşturması amaçlanmıştır. Bu yöntemde düşen kütle, 5000 bar dinamik basınç değerinde güvenli çalışacak biçimde tasarlanan ölçüm başlığı üzerinde bulunan efektif alanı bilinen bir piston silindir ünitesine çarpmakta ve ani darbeden kaynaklanan anlık ivme değişimi lazer interferometre ile hesaplanmaktadır. Ölçüm başlığı içerisinde bulunan sıvı, elde edilen anlık basıncı ölçüm başlığına bağlı olan test sensörüne iletmektedir. Böylece hesaplanan referans dinamik basınç ile test sensöründen elde edilecek olan veriler karşılaştırılmaktadır. Gerçekleştirilecek çalışmalarda elde edilecek referans dinamik

basınç aralığının 500 bar değerinden 3000 bar değerine kadar genişletilmesi, tekrarlanabilir ölçümlerin alınması için sistem üzerinde geliştirmeler yapılması, ölçüm başlığı dolun süresinin kısaltılması ve kolay dolun için tasarım çalışmaları yapılması, ölçüm hatalarını ve belirsizliklerini en aza indirmek için ivme değerinin daha hassas bir biçimde ölçülebilmesi için gerekli çalışmaların gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Tüm bu çalışmalar sonucunda elde edilecek primer ölçüm sistemi ile özellikle savunma sanayii gibi öncelikli alanlarda düşük belirsizlik ve yüksek doğrulukta kalibrasyonlar gerçekleştirmek ve bu alandaki yurtdışı bağımlılığını ortadan kaldırabilmek bizim için başlıca motivasyon kaynağıdır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Dinamik basınç sensörleri statik ve dinamik ölçüm koşulları altında farklı karakteristikler sergilemektedirler (Damion, 1992). Yüksek basınç ölçümlerinin temel amacı, güvenilir ve doğru ölçüm sonuçlarından emin olmanın başlangıç koşulu olduğu çalışma basıncı değerinde basınç sensörlerinin dinamik özelliklerinin ve performanslarının ne olduğunu değerlendirmektir (Yu ve ark., 2011). Bir basınç dönüştürücünün veya bir ölçüm sisteminin dinamik kalibrasyonu, sensör ile beraber bu ölçüm sistemi zinciri içinde yer alan optik kablo, sinyal şartlandırıcı ve sinyal yükseltici gibi parçaların, yeterli ve uygun doğruluk değeri ile dinamik olarak değerlendirilmesini de kapsamaktadır (Alberto ve ark., 2006). Frekans analizi ve geçici tepki analizi yöntemleri, dinamik özellikleri belirlerken kullanılan geleneksel yöntemlerdir (Zhang ve Hong-Yan, 2012). Dinamik basınç kalibrasyonunda bir ölçüm sistemi kullanılmalıdır. Bu sistem, zamanla değişen, güvenilir ve kontrol edilebilir bir şekilde ve değeri iyi bilinen dinamik basınç oluşturmalıdır. Oluşturulan bu basınç dalgası, dönüştürücülerin kalibrasyonunda referans basınç değeri olarak alınır. Kullanılan dinamik referans basınç sistemi hem kalibrasyon prosedürü hem de test cihazı sensörünün tipi üzerinde bir etkiye sahiptir (Alberto ve ark., 2006). Literatüre bakıldığında, dinamik kalibrasyonla ilgili ilk çalışma raporlarının 1960'larda yayınlandığı görülmektedir (Coulter, 1967). Daha sonra, Instrumentation, Systems and Automation tarafından yeniden basılan sensörlerin dinamik kalibrasyonu üzerine, basınç sensörlerinin kalibrasyon yöntemlerini açıklayan bir kılavuz yayınlanmıştır (ISA, 2002) (ANSI, 1972). Dinamik basınç kalibrasyonu için henüz bir yöntem ve prosedür standardizasyonu mevcut değildir. Dinamik basınç kalibrasyonlarında ölçüm belirsizliklerin tahmini, bu alandaki başlıca çalışılması gereken konuların başında gelmektedir. Dinamik basınç dönüştürücü için en önemli zorluklardan biri, ölçümlerde yüksek bir güven seviyesi ile farklı frekanslar için referans basınç değerini bulabilmektir (Santos, 2012) (Diniz ve ark., 2003). Genel olarak, dinamik basınç üreteçleri periyodik ve periyodik olmayan tipler olarak sınıflandırılır. Periyodik olmayan üreteçler çoğunlukla, basamak (step) tipi bir sinyal üretirken, periyodik üreteçler genellikle sinüs tipinde sinyalleri üretir. Şok tüpü ve hızlı açılan valfler, periyodik olmayan jeneratörlere örnektir ve basamak tipi sinyal üretirler (Kobata ve Ooiwa, 2000). Sinyal kısa yükselme süresine ve büyük genliğe sahiptir. Karakteristik olarak birkaç yüz kilo Hertz bant genişliğine sahiptir. Basamak basıncının geçici yanıtında bant genişliği artar. Birkaç mikrosaniye zaman aralığında sinyal sabit bir duruma yakınsar (Wang ve

ark., 2009). Periyodik jeneratörlerin çoğu, düşük genliğe ve düşük frekansa sahip periyodik olarak pnömatik basınç sinyalleri üretir. Periyodik jeneratörler, emniyet valfi, pompa ve orantılı servo valfler (Zhang ve ark. 2012) gibi periyodik fenomenler altında kullanılan bir sensörün veya ekipmanın dinamik etki özelliklerini incelemek için uygundur. Düşük basınç sensörleri ve dinamik mikrofonların kalibrasyonu için bir akustik şok jeneratörü geliştirilmiştir. Örneğin, düşük akustik frekansta ve genlikte hoparlör, dinamik basınç oluşturucu amacıyla seçilebilir. Bu amaçla, Dibe Lius ve Minten (1983) tarafından 2 mbar basınç genliğine kadar bir mikrofon kullanılarak ölçüm düzeneği önerilmiştir. Siren ayarlı boşluklu osilatör, mikrofonların ve diğer düşük ve orta basınçlı dönüştürücülerin kalibrasyonunda kullanılmak üzere periyodik basınç dalgaları oluşturan bir cihazdır. Dönen bir valf kullanarak basınç değiştirilebilir ve iki veya daha fazla kalibrasyon değeri arasında kalibrasyon sensörüne verilebilir. Sonuç olarak, yaklaşık olarak dikdörtgen bir basınç dalga formu oluşturulur (Dibelius ve Minten, 1983) (Schweppe, 1963).

Weyer ve Schod (1971), iyileştirilmiş bir döner valf türü üzerinde çalışmışlardır. Bu basınç üreticinin 5 kHz'e kadar kullanılması planlanmıştır. Hilten ve ark. (1976) sinus şeklinde dinamik basıncı elde etmek için başka bir düzene sahiptir. Sıvı dolu bir tüpü vardır ve tüp elektro dinamik sarsıcı armatürüne monte edilmiştir.

Del Prete ve ark. (2001) bir titreşim sarsıcı ve bir yük hücresi kombinasyon kurulumu göstermişlerdir. Bu kombinasyonda dinamik basınç transdüserlerinin kalibrasyonunda kullanılmak üzere temel bir deney düzeneği elde etmek için aktüatör ile sensör arasında temas alanı mevcuttur.

Şok tüpü, dinamik basınç dönüştürücülerinin kalibrasyonu için başka bir yöntemdir. Tüpün bir ucundaki yüzeyin ortasında test edilecek bir basınç dönüştürücü yer alır. 1,4 MPa basınç aralığına kadar tek veya çift diyafram kullanan bir basınçlandırma sistemi vasıtasıyla çalışır (Bartoli ve ark., 2012).

Diğer bir yöntem ise uygulanan basıncı negatif yönde aniden boşaltma yöntemidir. Bu yöntemde, referans cihaz olarak bir pistonlu basınç standardı kullanılır ve referans basınç birim alan başına düşen kuvvet olarak hesaplanır. Sistem hemen basınçlandırıldıktan sonra, basınç hattı aniden atmosfere açılarak hattaki basınç tahliye edilir ve dinamik basınç sensöründe eşzamanlı bir negatif basınç düşüşü sağlanır (Durgut ve Koçaş, 2008).

Hem negatif hem de pozitif basınç oluşturmak için hızlı açılan valf mekanizmaları mevcuttur. Bazı çalışmalara göre (Schweppe, 1963) (Paniagua ve Dénos, 2002) hızlı

açılan valf mekanizmaları yaklaşık 10 kHz'e kadar dinamik kalibrasyon yapabilir. Basınç kaynağı olarak kullanılan valf mekanizmaları tarafından üretilen basınç ile referans sensör cevap zamanı arasında bir oran olması önerilmektedir ve bu oran beşte birden fazla olmamalıdır (ANSI, 1972). Düşük frekanslarda, gazla çalışan hızlı açılan bir valf mekanizması şok tütünün bir uzantısı olarak düşünülebilir (Damion, 1992). Bilim adamlarının çoğu, hassas olarak oluşturulmuş bir basınç elde etmenin oldukça zor olduğu kanaatinde dirler. Bunun nedeni referans bir sensöre ihtiyaç bulunmasıdır. Kütle doğrudan basınç sensörüne düştüğünde, sensörün ürettiği cevap, sensörün tüm algılama elemanı üzerindeki basınç dağılımı gibi aynı olmayabilir (Schweppe, 1963). Oluşan basınç yarım sinüs ve parabol sinyali şeklinde ve birkaç ms (milisaniye) mertebesinde dir (Bean, 1994).

Bazı dinamik basınç sistemleri "kütle düşürme" ilkesine göre çalışır. Bu metotta test edilecek sensöre, sensörün temas ettiği basınç iletim sıvısı aracılığıyla bir basınç darbesi iletilir. Bu darbe, piston üzerine düşürülen kütlenin ve hacim içinde sıkışan sıvının etkisiyle oluşmaktadır (Lally, 1991). Çekiç / kütle sistemi konfigürasyonunda, test sensörü kapalı bir hazne veya hazne içindeki bir piston ve silindir ünitesinin yakın kısmına monte edilir. Piston silindiri ayrıca sıvıyla dolu bir rezervuara da monte edilmiştir. Sıvı, gliserin gibi pratik olarak sıkıştırılmaz bir yağdır. Kılavuzlu veya serbest düşen bir kütle piston üzerine düşer. Oluşturulan basınç darbesi test sensörüne ulaşır. Kütle ilk düşüşünden sonra ribaund sistemi ile yakalanır. Riegeabuer (1992), birincil seviye kalibrasyon için kütle düşürme yöntemini kullanmıştır. Lally (1991), piezoelektrik sensör kullanarak bir piston-silindir manifoldundaki kütle düşüşünden kaynaklanan hidrolik basınç darbelerini ölçmek için bir kurulum gerçekleştirmiştir. Momma ve Lichtarowicz (1994), 4 mm ila 7 mm çapındaki çelik bilyelerin 10 mm'den 50 mm'ye farklı yüksekliklerden sensöre düşürüldüğü basit bir kalibrasyon tekniği göstermişlerdir. Shipunov (1999) alternatif bir yöntemi göstermektedir. Bu yöntemde çelik bilyalar doğrudan basınç sensörünün üzerine bırakılmıştır. Kong ve ark. (1999), referans olarak basınç sensörünü değiştiren doğru bir kuvvet sensörü kullanmışlardır.

Hjelmgren (2002) dinamik basınç metrolojisi ile ilgili detaylı bir literatür taramasını içeren çalışma notları yayınlamıştır. Bu notlar içinde hem dinamik basınç oluşturan deney düzenekleri hem de dinamik basınçların endüstride uygulama alanları ile ilgili bilgiler vermiştir.

Salminen ve ark. (2018) dinamik basınçlar için kütle düşürmeli metot prensibi ile 10 MPa'dan 400 MPa'a kadar ($k=2$) düzeyinde %1,5 belirsizlik düzeyinde çalışan dinamik basınç standardı ile ilgili çalışmalar yapmışlardır. Modern yanmalı motorlarda,

üretim süreçlerinde ve havacılık uygulamalarındaki performansı optimize etmek için, doğru ve güvenilir dinamik basınç ölçümlerine ihtiyaç vardır. Hızlı basınç değişimleri, bu uygulamalardaki dinamik basınç dönüştürücülerinin artan sıcaklıklara maruz kalmalarına neden olmaktadır. Her iki durumda da dinamik basınç dönüştürücülerin hassasiyeti etkilenmektedir. Bu nedenle, dönüştürücüler, çalışma ortamına karşılık gelen koşullarda kalibre edilmelidir. Bu ihtiyaçlara cevap vermek için Salminen ve ark. (2020) geliştirdikleri kütle düşürmeli birincil seviye dinamik basınç standardı üzerinde kontrol ve düşen ağırlığın ölçülmesi, basınç aralığının 3 MPa yanmalı motor aralığına uzatılması ve dinamik basınç transdüserleri için bir ısıtma seçeneği uygulanması gibi bazı noktalarda geliştirme yapmışlardır.

Bruns ve ark. (2013), geliştirdikleri sistemde, basınç darbesi ile sıkışan basınç iletim sıvısının kırılma indisi değişimini sistem üzerine yerleştirilen lazer vibrometre ile ölçerek elde edilen referans basıncı hesaplamışlardır. Bu sistem de dinamik referans basınç standardı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak Slanina ve ark. (2020) sıkışan sıvının kırılma indisinde ortaya çıkan değişimde gözlemlendiği gibi, sıvıların adyabatik ve izotermal sıkıştırması arasındaki farkı araştırmışlardır. İncelenen sıvılar sebacate, gliserol ve sudur. Pratik nedenlerden dolayı düşük ağırlıklı kütlelerin kullanıldığı dinamik basınç ölçümleri için sebacate en uygun ölçüm sıvısı olarak değerlendirilmektedir. Bilgiç ve Durgut (2015), dinamik basınç kalibrasyonlarında dinamik sensörlerin çıkış sinyallerinin parabol şekline uydurulması ile bu sensörlerde elde edilen maksimum tepe değerlerinde oluşabilecek kayıpların giderilmesi konusunda çalışmışlardır.

Durgut ve ark. (2017) tarafından, malzeme test makinasına piston-silindir aparatı montajı yapılmış ve bu makina ikincil seviye bir dinamik basınç kaynağı olarak kalibrasyonlarda kullanılmıştır. Yaptıkları diğer bir çalışmada da malzeme test makinası yardımıyla yapılan dinamik basınç kalibrasyonlarında ölçüm sonucu üzerindeki belirsizlik değerinin analizi gerçekleştirilmiştir (Durgut ve ark., 2016).

Bartoli ve ark. (2012) Avrupa Birliği Araştırma Fonu (EMRP) destekli projelerinde, basınç, tork ve kuvvet alanında izlenebilir dinamik kalibrasyonlar yapmak amacıyla referans cihaz geliştirme çalışmaları yapmışlardır ve ülkelerin ulusal metroloji enstitüleri alanında bilgi ve tecrübe değişimi sağlanarak dinamik büyüklüklerin kalibrasyonu alanında uygulama kılavuzları ve rehber dokümanlar yayınlanması çalışmalarını başlatmışlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Statik basınç dönüştürücü ile dinamik basınç dönüştürücü arasındaki temel fark, farklı akışkan koşullarındaki basıncı ölçebilme yeteneklerinde yatmaktadır. Statik basınç transdüserleri, statik veya sabit akış koşullarında sabit ve sabit basıncı ölçmek için uygundur; dinamik basınç transdüserleri ise sıvı akışındaki basınç dalgalanmalarını ve hızlı basınç değişikliklerini ölçmek için kullanılır. Şok tüpü (Bartoli ve ark., 2012), hızlı açılan bir valf (Choi ve ark., 2013) kullanan kademeli basınç üretici gibi dinamik bir basınç ölçüm sisteminde basınç darbesi elde etmenin çeşitli yöntemleri vardır; bunlardan biri de kütle düşürme yöntemidir.

Birincil seviye bir sistemde referans dinamik basıncı, piston silindir ünitesi efektif alan değeri, lazer interferometre tarafından ölçülen ivme değeri, düşen kütle ağırlık değeri ve yerel yerçekimi ivmesi parametreleri kullanılarak operatör tarafından hesaplanmalıdır. Hesaplama parametrelerinden, piston-silindir ünitesine bağlı efektif alan değerinin ve düşen ağırlığın pistonu çarptığı noktada ölçülen maksimum ivme değişiminin daha hassas bir dinamik basınç değeri hesaplanabilmesi için oldukça iyi bilinmesi gerekir. Özellikle lazer interferometrenin aldığı ivme sinyallerinde oluşan yüksek gürültü nedeniyle ivmenin maksimum olduğu noktada doğru veriyi almak zordur. Bu problem, doğru bir kesme frekansı değeri olan bir alçak geçiren filtre ile çözülebilir. Ancak bu durumda bile bazı frekanslar çakışabilir (Salminen ve ark., 2018). Hızlanma sinyaline iyi seçilmiş kesme frekansı değerine sahip bir alçak geçiren filtre uygulandığında iyi bir yaklaşım elde edilebilir. Bu çalışmanın bir parçası olarak, lazer interferometreden elde edilen ve referans dinamik basınç hesabında kullanılan ivme sinyalleri üzerinde alçak geçiren filtre seçimi ve uygulaması yapılacaktır.

Bu parametrelerin yanı sıra ölçüm başlığında kullanılan sıvının, pistonun ve silindir ünitesinin uyumluluğu da incelenmesi gereken diğer önemli faktörlerdir. Sıkıştırılmış bir akışkanın kırılma indisinin değişimi üzerine yapılan bir çalışmada, akışkanların adyabatik ve izotermal sıkıştırması arasındaki fark araştırılmıştır. İncelenen sıvılar sebacate, gliserol ve sudur. Çalışmada sebacate, düşük ağırlıklı kütleler kullanılarak yapılan dinamik basınç ölçümleri için en uygun ölçüm sıvısı olarak değerlendirilmiştir (Slanina ve ark., 2020). Ancak farklı çalışmalarda ölçüm başlığında kullanılan sıvı olarak gliserol tercih edilmiştir (Salminen ve ark., 2018) (Salminen ve ark., 2020). Bu parametrenin tekrarlanabilir ölçümler üzerindeki etkisinin araştırılması için ölçümlerde kullanılan her iki akışkanın da deneylerle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ölçümlerde kullanılan ortam sıvısının etkisinin yanı sıra dinamik basınç ölçüm sistemimizde kullanılmak ve etkisini gözlemlemek amacıyla tasarlayıp ürettiğimiz anma çapı 10 mm olan beş adet piston ve beş adet silindir bulunmaktadır. Öyle ki, belirli bir basınca ulaşmak için elektromıknatıstan nominal olarak belirlenen kütle salınım yüksekliği, piston ile silindir arasındaki boşluktan basınç altında sıvı sızıntısı nedeniyle her düşüşten sonra değişebilmektedir. Bu durum ölçüm kolaylığı ve tekrarlanabilirlik açısından arzu edilen bir durum değildir. Üretilen piston ve silindirlere bir set denemeler sırasında zarar gördüğünden dört adet piston ve dört adet silindir ile çalışmalara devam edilmiştir. Bu yüzden tez çalışmasında tasarlanarak üretilen dört adet piston ve dört adet silindirin birbiri ile uyumu da incelenecektir.

Ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek diğer bir faktör, lazer interferometrede veri toplanırken kullanılan örnekleme frekansıdır. Normalde, daha yüksek örnekleme frekansı seçimlerinin daha iyi sonuçlar üretmesi beklenir, ancak daha yüksek örnekleme frekansları, daha hızlı dönüştürücüler ve daha fazla depolama alanı gerektirir. Bu nedenle araştırmacıların her uygulamanın avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmesi gerekmektedir. Örnekleme frekansı çok yüksek tutulduğunda gürültü oranı artar, çok düşük tutulursa sinyalin gerçek tepe değerini yakalayamama riski ortaya çıkar. Bu doğrultuda bu çalışmada incelenmek üzere 10 kHz, 25 kHz, 50 kHz ve 100 kHz olmak üzere dört örnekleme frekansı değeri belirlenmiştir.

Belirlenen tüm parametrelerin ölçüm sonuçlarına etkisinin incelenebilmesi için toplam 128 farklı deneyin yapılması gerekmektedir. Her denemede 5 tekrar yapılacağı göz önüne alındığında toplam ölçüm sayısı 640 olacaktır. Bu durum zaman ve maliyet açısından değerlendirildiğinde oldukça zahmetli görünmektedir. Bu bağlamda deneylerde Taguchi yöntemi kullanılacaktır. Taguchi yöntemi, farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasındaki en iyi kombinasyonun belirlenmesinde oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Her parametrenin her seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için çok fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu kullanılarak çok daha az sayıda deneysel çalışma ile sonuca ulaşmak mümkündür (Karna ve Sahai, 2012) (Taguchi, 1993). Yukarıda belirtilen parametrelerin belirlenmesinde Taguchi yöntemi kullanılarak 128 deney yerine sadece 16 deney ile optimum parametreler seçilebilmektedir, ölçüm sayısı olarak değerlendirdiğimizde ise 640 ölçüm yerine sadece 80 ölçüm olmaktadır. Hesaplanacak ivme sinyalleri olarak değerlendirdiğimizde ise üç lazer interferometre kanalı için toplam 1920 sinyal verisi yerine 240 sinyal verisi ile optimum parametreler belirlenebilecektir.

Taguchi yöntemi ile parametre çalışması gerçekleştirilirken bununla beraber kalibreli bir referans dinamik basınç sensörü yardımıyla ölçümler alınacaktır. Kalibreli referans dinamik basınç sensörü ile karşılaştırma yapabilmek için lazer interferometrelerden elde edilen sinyaller 2.dereceden 6. dereceye kadar polinomsal eğri uydurma yöntemi kullanılarak düzenlenecektir. Elde edilen sinyallerin mutlak maksimum değerleri ile referans dinamik basınç değerleri hesaplanacaktır. Hem normal sinyal, hemde polinomsal eğri uydurma yöntemi ile elde edilen ivme sinyallerinin mutlak maksimum değerleri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerleri ile kalibreli referans dinamik basınç sensörü yardımıyla elde edilen basınç değerleri karşılaştırılacaktır. Karşılaştırmalar lazer interferometrelerin üç kanalı içinde ayrı ayrı verileceği gibi üç kanaldan da elde edilen ivme değerlerinin ortalaması kullanılarak ayrıca değerlendirilecektir.

Tez kapsamında kullanılacak materyal ve uygulanacak yöntemler özetle Tablo 3.1 ile sırasıyla verilmiştir.

Tablo 3.1. Tez kapsamında kullanılacak materyal ve uygulanacak yöntemlerin özet gösterimi

| | |
|---|--|
| 1 | Serbest düşen kütle yöntemi ile dinamik basınç kalibrasyon cihazının çalışma prensibinin verilmesi |
| 2 | Sistemde kullanılan ölçüm başlığının tasarım ve üretiminin anlatılması |
| 3 | Ölçüm başlığı üzerinde kullanılan piston ve silindirlerin tasarım ve üretiminin anlatılması |
| 4 | Ölçüm başlığı üzerinde kullanılan bağlantı parçalarının tasarım ve üretiminin anlatılması |
| 5 | Ölçüm başlığı, piston ve silindir montajının verilmesi |
| 6 | Lazer interferometrik sistem bileşenlerinin verilmesi |
| 7 | Lazer interferometrik sistemin ayarlanması ve ölçümler için hazır hale getirilmesi |
| 8 | Piston ve silindir ünitesine ait efektif alan hesaplama metodunun belirlenmesi |
| 9 | Deneylerde kullanılan ortam sıvılarının tanıtılması ve özelliklerinin verilmesi |

| | |
|----|--|
| 10 | Taguchi metodu ile dinamik basınç standardında kullanılacak bazı parametrelerin belirlenmesi |
| 11 | Ölçümlerde kullanılacak olan dinamik basınç sensörlerin ve diğer ekipmanın tanıtılması ve özelliklerinin verilmesi |

3.1. Serbest Düşen Kütle Yöntemi İle Dinamik Basınç Kalibrasyon Cihazının Çalışma Prensibi

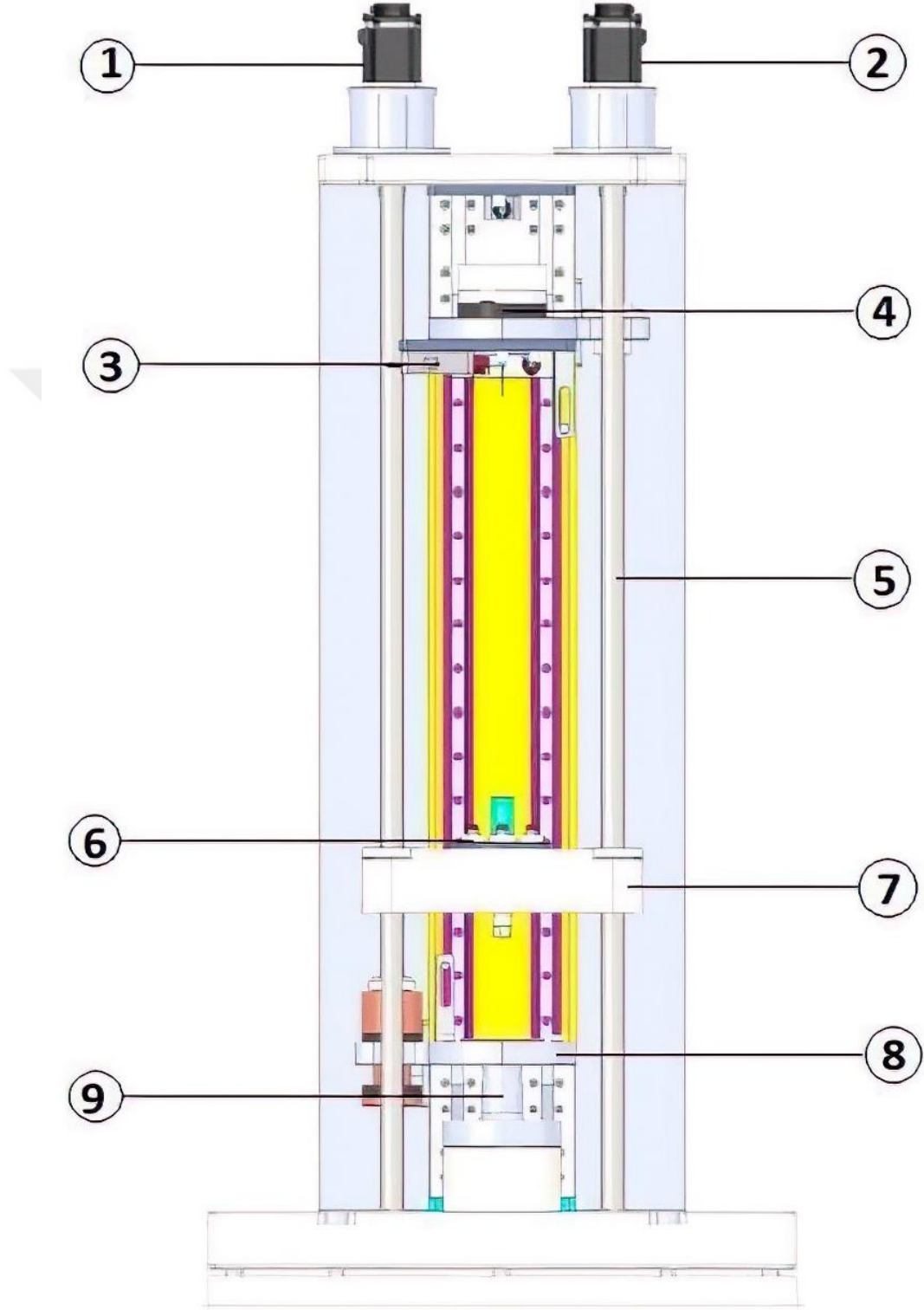
Birincil seviye olarak tasarlanmış bir dinamik basınç ölçüm sisteminde, servo motorlar, lazer interferometrik sistem, elektromıknatis, kılavuz çubuklar, düşme ağırlığı, ribaund sistemi, ölçüm başlığı, piston ve silindir ünitesi vb. gibi çeşitli bileşenler bulunmaktadır. Şekil 3.1 ile ağırlık düşürme yöntemiyle geliştirilen birincil seviye dinamik basınç ölçüm sisteminin şematik gösterimi verilmiştir.

Sistemde kullanılan servo motorlardan biri ile kütle, elektromıknatis tarafından belirli bir yüksekliğe kaldırılarak piston üzerinde serbest düşüşe bırakılır. Referans standart cihaz, enerjinin korunumu fizik yasasına göre serbest düşen kütle prensibiyle çalışır. Düşen ağırlık sistemi, serbest düşüş sırasında serbest düşen kütlenin kazandığı hareket enerjisini bir piston üzerine düşerek aktarır ve bu odayı dolduran akışkanın aktardığı bu anlık kuvvet ile piston aynı odaya bağlı test sensörlerine iletilir ve böylece düşen kütlenin enerjisi kalibre edilecek test sensörlerine ulaşır. Sistem kalibrasyon amacıyla kullanılmak üzere test basıncını, pistonun üzerine hızlıca düşen yataklanmış kütle ve pistonun da üzerine gelen bu etkiyi temas ettiği akışkana ilemesiyle üretir. Hidrolik akışkan içinde artan basınç birkaç yüz MPa değerine kadar ulaşmaktadır ve yüksek basınçlı dinamik test sensörlerinin hızlı ve doğru bir biçimde kalibre ve test edilmesini sağlamaktadır. Elde edilen enerji ve dolayısıyla basınç değeri, düşen kütlenin düşme yüksekliğinin değiştirilmesi ile değişmektedir ve ayarlanmaktadır. Oluşturulan referans dinamik basınç ise Eşitlik (3) yardımıyla (Salminen ve ark., 2018) hesaplanır.

$$p = \frac{m_{\text{toplam}}(g + a)}{A_{\text{eff}}} \quad (3)$$

Burada p hesaplanacak dinamik basınç değeri, m_{toplam} lazer retroreflektörlerinin üzerinde bulunduğu düşen kütle ile ölçüm başlığındaki yağ ve pistonu ait toplam kütle değeri, g yerel yerçekimi ivmesi değeri, a ise düşen ağırlığın pistonu ilk çarptığı anda lazer interferometreden elde edilen sinyalindeki maksimum ivme değişimidir. A_{eff} ise

piston ve silindir ünitesinin boyutsal ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan efektif alan değeridir.



Şekil 3.1. Serbest düşen kütle yöntemi ile dinamik basınç ölçüm sistemi şematik görünümü ((1 ve 2)- Servo motorlar, 3-Lazer interferometre, 4-Elektromıknatıs, 5-Mil, 6-Lazer retroreflektör, 7-Yataklanmış düşen kütle, 8-Ribaund sistemi, 9-Ölçüm başlığı)

Şekil 3.1’de şematik görünümü verilen primer seviye referans dinamik basınç standardının Şekil 3.2 ile üretimi ve montajı yapılmış hali görülmektedir.



Şekil 3.2. Dinamik basınç kalibrasyon sistemi

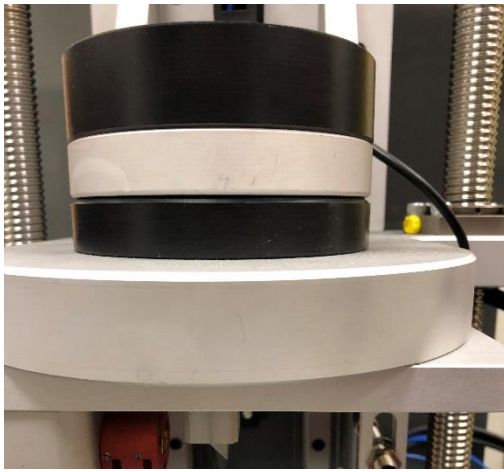
Dinamik basınç ölçüm sistemi farklı birimlerden oluşmaktadır. Başlıca üniteler arasında, servo motorların (Şekil 3.3 (a)), yataklanmış kütlelerin (Şekil 3.3 (b)) ve elektromıknatısın (Şekil 3.4 (a)) bulunduğu gövde, piston ve test sensörlerinin bağlandığı içine basınç iletim akışkanının konulduğu ölçüm başlığı (Şekil 3.4 (b)) ve buna bağlı veri toplama sistemi bulunmaktadır. Serbest düşen kütle yaklaşık 9 kilogram kütle değerine sahiptir. Serbest düşen kütle istenilen yüksekliğe bir elektromıknatıs kullanılarak çıkartılır. Düşme yüksekliği programlanabilir mantık kontrolcüsünün arayüzünde yazılan programdan girilmektedir. Düşen kütle iki adet kılavuz çubuk (Şekil 3.5 (a)) ile yataklanmaktadır. Bu yataklama çubukları düşen kütle pistona olabildiğince dikey çarpmasını sağlamak ve neredeyse tüm hareket enerjisi bu şekilde pistona aktarılmaktadır. Ayrıca kütle yataklanmış olması serbest düşme deneyini her ölçüm için bir önceki ile aynı şartlarda oluşturmasını sağlamaktadır ve bu sayede tekrarlanabilir ölçümler alınabilmektedir. Bazı durumlarda pistona ilk kez çarpan kütle tekrar çarpmasını engellemek için ribaund sistem (Şekil 3.5 (b)) adı verilen bir parça kullanılmaktadır. Primer seviyedeki dinamik basınç kalibrasyon cihazlarında ivmenin hassas bir biçimde elde edilebilmesi için lazer interferometre cihazı kullanılmaktadır. Lazer interferometreler (Şekil 3.6 (a)) elektromıknatıs altındaki gövdeye sabitlenmiştir. Lazer ışığının yansıtıldığı retroreflektörler (Şekil 3.6 (b)) ise hareketli serbest düşen kütle üzerine sabitlenmiştir. Lazer interferometre serbest düşen kütle zamana karşı konum bilgisini ölçmekte ve buna bağlı veri toplama sistemi de düşen kütle ivme sinyalini de vermektedir. Bu bilgiler ışığında lazer tabanlı veri toplama sisteminin oluşturduğu sinyalden elde edilen ivme değerinin kullanılmasıyla toplam elde edilen kuvvetin pistonun efektif alan değerine bölünmesiyle net basınç hesaplanabilmektedir.



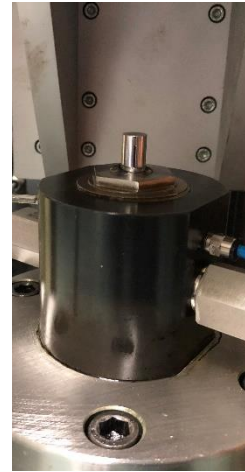
(a)

(b)

Şekil 3.3. Servo motorlar (a) ve serbest düşen kütle (b)

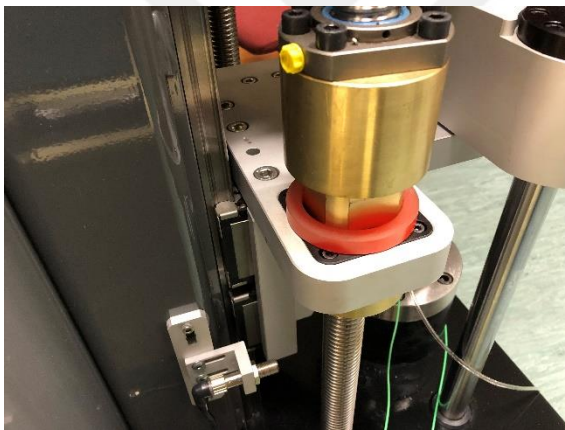


(a)



(b)

Şekil 3.4. Elektromıknatis (a), ölçüm başlığı, piston ve silindir (b)



(a)



(b)

Şekil 3.5. Kılavuz miller (a) ve ribaund sistem (b)



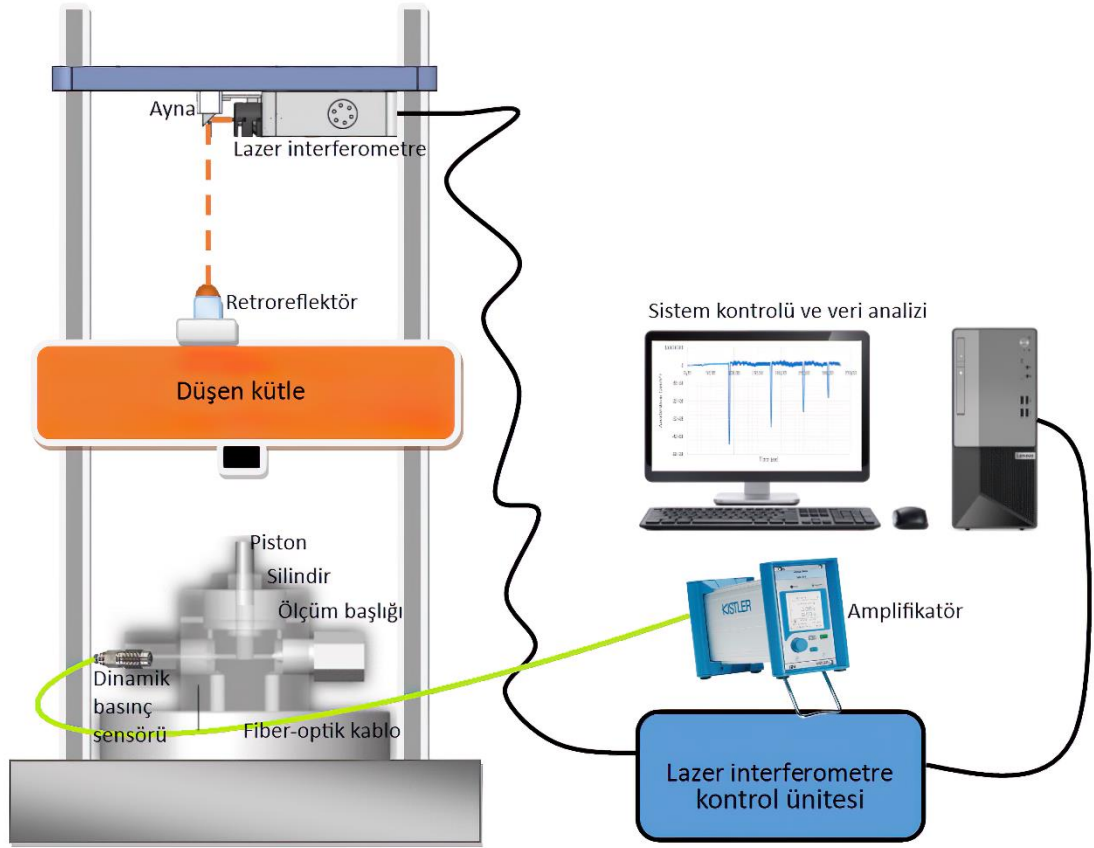
(a)



(b)

Şekil 3.6. Lazer interferometre (a) ve retroreflektör (b)

Sistemin çalışma prensibi ile serbest düşen kütle yöntemi ile referans dinamik basıncı belirleyebilmek için gerekli parametrelerden biri olan mutlak maksimum ivme değerinin elde edilmesi Şekil 3.7 ile şematize edilmiştir.

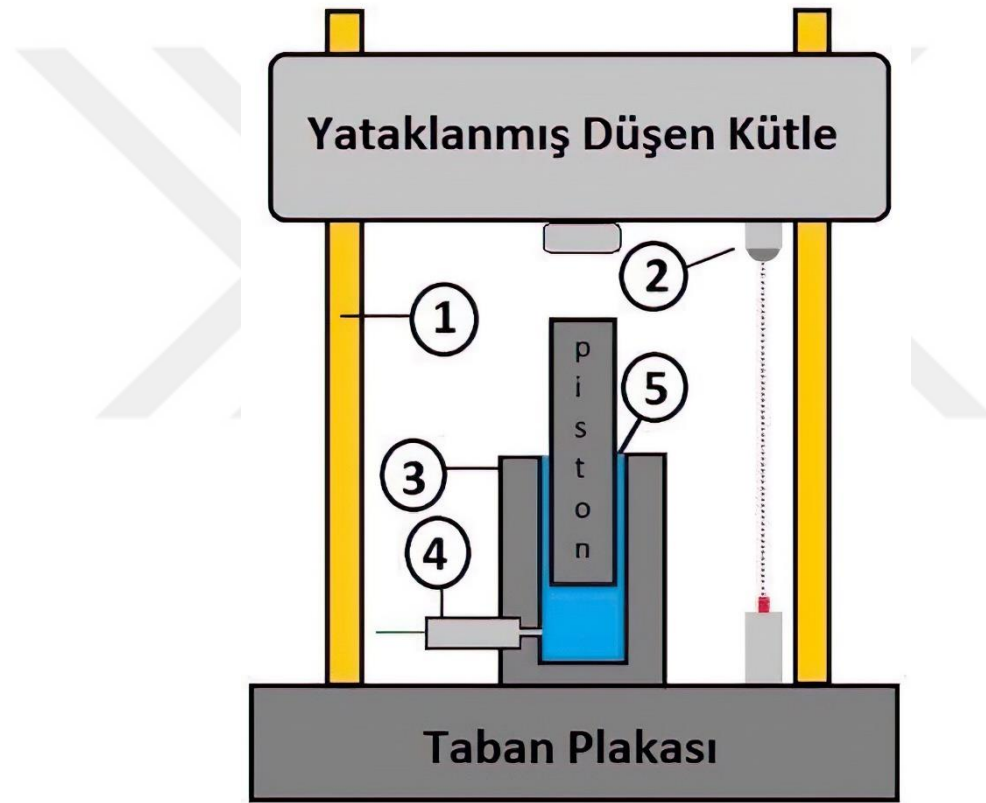


Şekil 3.7. Sistemin çalışma prensibinin basit şematik gösterimi

Şekil 3.7 ile verilen şematik gösterimde serbest düşen kütle belirli bir yükseklikten piston üzerine düşürülürken lazer interferometre sistemi ile veriler toplanmaktadır. Kütlelerin pistona çarptığı ilk anda ivmenin genliği mutlak maksimum değerine ulaşır. Bu ivme sinyali gürültüyü kaldırmak için bazı işlemlerden geçirildikten sonra referans basınç hesabında kullanılır hale gelir. Diğer taraftan Eşitlik 3'e göre referans basıncı hesaplamak için, kütlelerin düştüğü piston ve silindir ünitesinin efektif alan değerinin hesaplanması gerekmektedir. Dinamik basınç test sensöründen elde edilen veriler ise amplifikatör yardımıyla okunmaktadır. Bu sayede hesaplanan referans dinamik basınca karşılık test dinamik basıncı karşılaştırılır.

3.2. Ölçüm Başlığı, Piston ve Silindirler

Serbest düşen kütle prensibi ile geliştirilen dinamik basınç standardı, enerjinin korunumu fizik yasasına göre çalışmakta olup kütlelerin potansiyel enerjisinden hareket enerjisi elde etmekte ve bu hareket enerjisinden de referans basınç oluşturulmaktadır. Serbest düşen kütlelerin kazandığı hareket enerjisi, efektif alan değeri bilinen bir pistonun üzerine düşerek aktarılır ve piston aktarılan bu anlık kuvveti aynı hazneye bağlanmış olan test sensörüne, hazne içerisinde bulunan ortam sıvısı vasıtasıyla iletir. Bu şekilde düşen kütlelerin enerjisi, kalibrasyonu gerçekleştirilecek olan test sensörüne ulaşır. Söz konusu sistem elemanları Şekil 3.8 ile detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.8. Ölçüm başlığının basit şematik gösterimi (1-Düşen kütle için kılavuz milleri, 2-Lazer interferometre, 3-Ölçüm başlığı ve piston-silindir ünitesi, 4-Dinamik basınç test sensörü, 5-Basınç iletim ortam sıvısı)

Tez kapsamında yüksek basınçlarda güvenli çalışabilecek ölçüm başlığı, piston ve silindir tasarım ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve üretimler iki farklı set halinde gerçekleşmiştir. İlk sette gözden kaçan bazı durumlar ikinci sette iyileştirilmiştir. Bu kapsamda birincil seviye dinamik basınç ölçüm sisteminde kullanılmak üzere ilk sette birer adet ölçüm başlığı, piston ve silindir tasarım ve üretimi gerçekleştirilmiş ikinci sette ise bir ölçüm başlığı ve beş piston ve beş silindir tasarlanmış ve üretilmiştir. İkinci sette

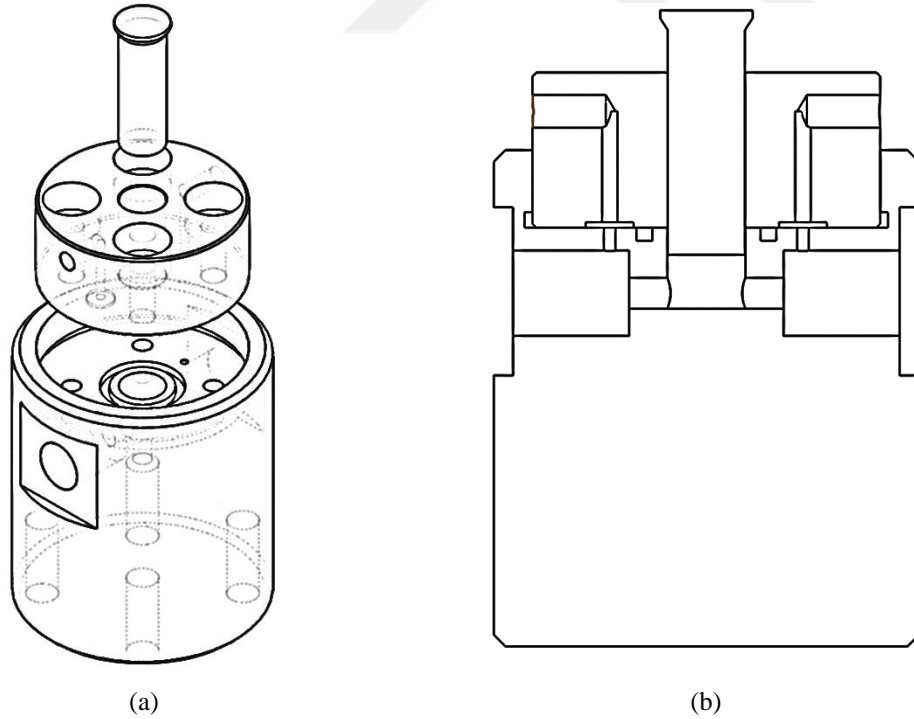
piston ve silindirlerin beş parça halinde üretilmesinin nedeni tekrarlanabilir ölçümler sağlayabilecek en uygun kombinasyonun belirlenmesidir. Bu sayede ölçüm sırasında piston ile silindir arasındaki boşluktan sızan sıvı miktarının azaltılması amaçlanmaktadır. Ayrıca farklı tipteki dinamik basınç sensörlerinde ölçüm başlığına sorunsuzca uyumlu bir şekilde bağlanabilmesi için bağlantı parçaları tasarım ve üretimi de gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki alt başlıklarda sırasıyla ölçüm başlığı, piston-silindir, bağlantı parçaları tasarım ve üretimleri gösterilmiştir.

3.2.1. Ölçüm başlığı, piston ve silindir tasarım ve üretimi

Sistemde kullanılmak üzere iki farklı ölçüm başlığı, piston ve silindir seti çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk tasarımda gözden kaçan bazı detaylar ikinci tasarımla beraber iyileştirilmiştir.

3.2.1.1. Birinci ölçüm başlığı, piston ve silindir

Şekil 3.9 ile ilk olarak tasarlanan ölçüm başlığı, piston ve silindirin üç boyutlu modeline ait patlatma görünümü ve kesit görünümü bir arada verilmiştir.



Şekil 3.9. İlk tasarlanan ölçüm başlığı, piston ve silindir, patlatma görünümü (a), kesit görünümü (b)

Ölçüm başlığı, piston ve silindir için 303 paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Bu paslanmaz çelik malzeme günlük hayatta birçok alanda kullanılmaktadır. İyi bir korozyon direncine sahiptir ve işlenebilirliği diğer paslanmaz çelikler arasında mükemmel yakındır denilebilir. 1.4305 olarak numaralandırılır ve DIN standardına göre X8CrNiS18-9 olarak adlandırılır. Tablo 3.2 ile kimyasal özellikleri ve Tablo 3.3 ile de bazı mekanik özellikleri verilmiştir (Novak ve ark., 1977) (ASM, 1990).

Tablo 3.2. 303 paslanmaz çelik malzeme kimyasal özellikleri

| Fe | Cr | Ni | Mn | Si | Mo | P | S | C |
|------|------|-----|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| % 69 | % 18 | % 9 | % 2 maks. | % 1 maks. | % 0,6 maks. | % 0,2 maks. | % 0,15 min. | % 0,15 maks. |

Tablo 3.3. 303 paslanmaz çelik malzeme için bazı mekanik özellikler

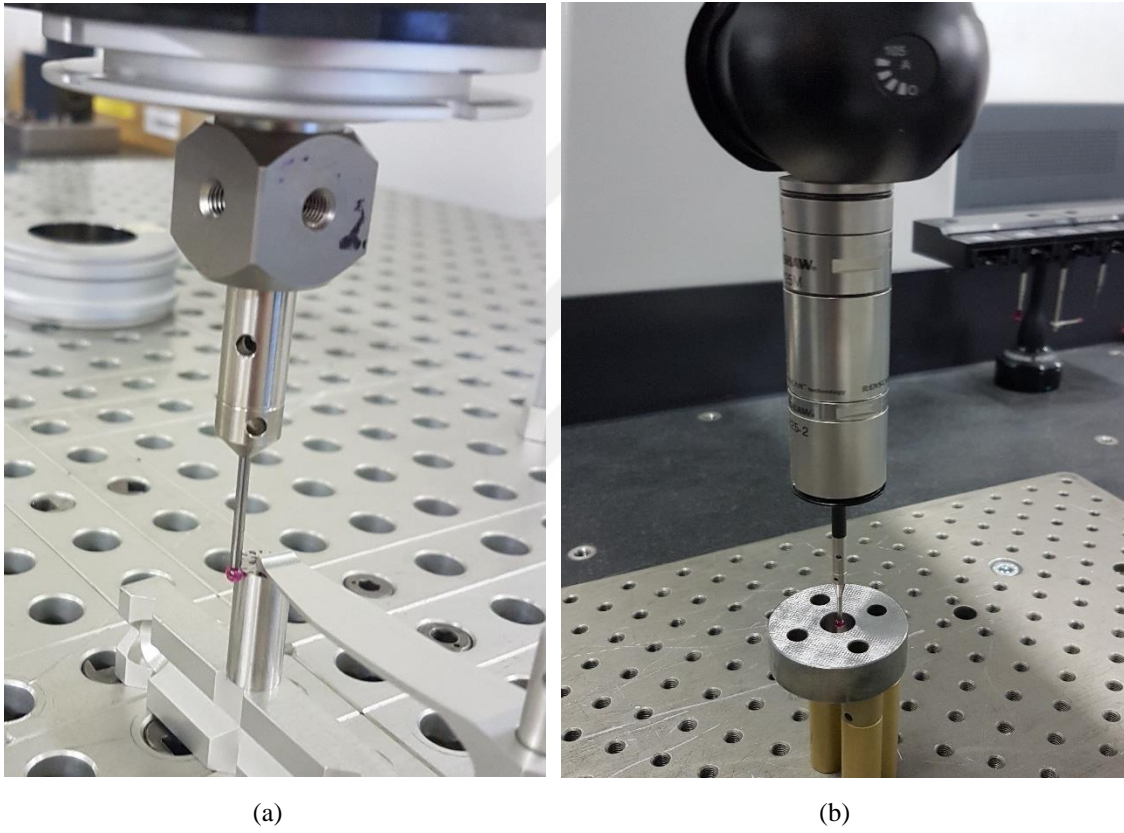
| σ_{akma} (MPa) | $\sigma_{çekme}$ (MPa) | E (GPa) | ν | ρ (kg/m ³) |
|--------------------------|---------------------------|------------|-------|--------------------------------|
| 240 | 620 | 193 | 0,25 | 8000 |

Şekil 3.10 ile üretimi tamamlanmış olan ölçüm başlığı, piston ve silindire ait fotoğraf gösterilmektedir.



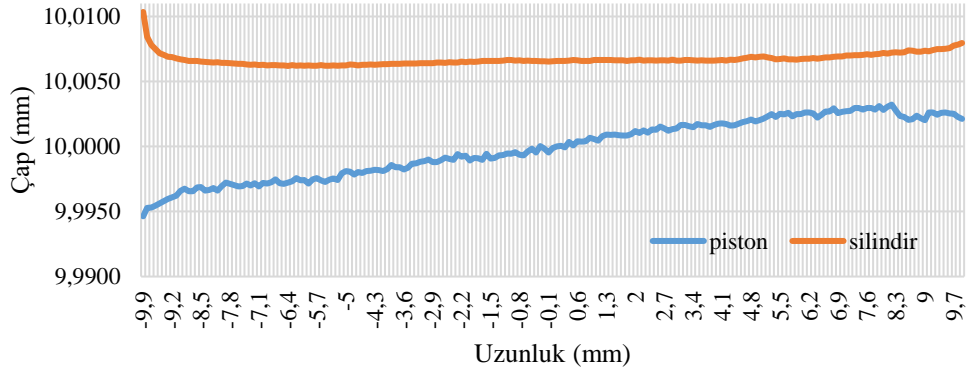
Şekil 3.10. Üretimi tamamlanmış olan ölçüm başlığı, piston ve silindir

Üretimi gerçekleştirilen piston ve silindire ait efektif alan değerinin hesaplanabilmesi için bu piston ve silindire ait boyutsal ölçümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda piston ve silindir boyutsal ölçümleri Şekil 3.11 ile gösterildiği gibi CMM tarafından gerçekleştirilmiştir. CMM ile her bir dairesel kesitte 45 derecelik aralıklarla X, Y ve Z koordinatları şeklinde 8 noktada veriler alınmıştır. Piston ve silindir yüksekliği 20 mm olup çalışma aralığı 15,5 mm olarak belirlenmiştir. 15,5 mm yükseklik boyunca her 0,1 mm’de $8 \times 3 = 24$ x, y ve z koordinatlarında veriler alınarak toplamda piston ve silindire ait $24 \times 155 = 3720$ veri elde edilmiştir.



Şekil 3.11. İlk olarak üretilen piston ve silindir için CMM ölçümleri, piston (a), silindir (b)

Piston ve silindire ait ölçüm sonuçlarını elde edebilmek için CMM’den toplanan veriler düzenlenerek, eş çalışma uzunluğu boyunca hem piston hem de silindir için yarıçap ve çap değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3.12).

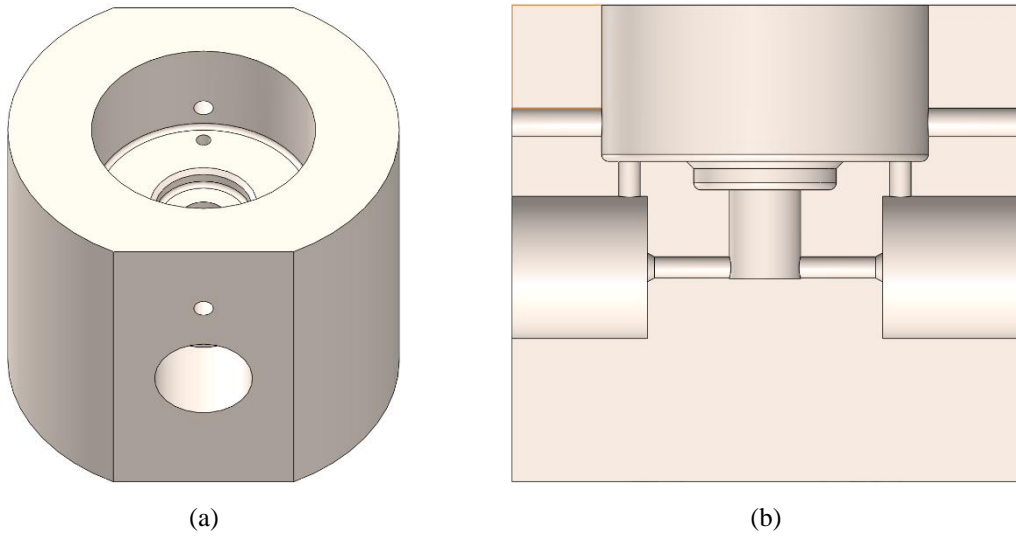


Şekil 3.12. İlk üretilen piston ve silindire ait eş çalışma uzunluğu boyunca çap değerleri

Hem piston hem de silindire ait elde edilen yarıçap değerleri ve diğer parametreler kullanılarak efektif alan hesaplama çalışması gerçekleştirilecektir. Bu kısım efektif alan hesaplama için gerekli işlemler verildikten sonra “Araştırma Sonuçları ve Tartışma” başlığı altında belirtilecektir.

3.2.1.2. İkinci ölçüm başlığı, piston ve silindirler

Yukarıda Şekil 3.10 ile gösterilen ölçüm başlığının ölçümler sırasında meydana gelen kullanım zorluğu ve tek tip sensör kullanmak gibi bir takım kısıtlamalarından dolayı daha kapsamlı ölçümler alabilmek için yeni bir ölçüm başlığı geliştirme ihtiyacı doğmuştur. Bu kapsamda geliştirilen yeni ölçüm başlığı tasarımı Şekil 3.13 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.13. İkinci olarak tasarlanan ölçüm başlığı (a), kesit görünümü (b)

Ölçüm başlığı ve silindirler için Calmax isimli malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme yüksek tokluğa, oldukça iyi aşınma direncine ve yüksek çatlama direncine sahiptir. Ayrıca diğer malzemelere kıyasla oldukça yüksek akma ve çekme mukavemeti ile de ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle yüksek bir güvenlik sunmaktadır. 1.2358 olarak numaralandırılır ve DIN standardına göre 60CrMoV18-5 olarak adlandırılır. Tablo 3.4 ile kimyasal özellikleri ve Tablo 3.5 ile de bazı mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.4. Calmax malzeme kimyasal özellikleri

| Fe | Cr | V | Mn | Si | Mo | P | S | C |
|------|-------|-------|-------|--------|-------|----------|----------|-------|
| % 92 | % 4,5 | % 0,2 | % 0,8 | % 0,35 | % 0,5 | % 0-0,03 | % 0-0,03 | % 0,6 |

Tablo 3.5. Calmax malzeme için bazı mekanik özellikler (@ 20 °C, 55 HRC)

| σ_{akma} (MPa) | $\sigma_{çekme}$ (MPa) | E (GPa) | ν | ρ (kg/m ³) |
|--------------------------|---------------------------|------------|-------|--------------------------------|
| 1400 | 2100 | 210 | 0,29 | 7770 |

Piston için ise 1045 malzeme kullanılmıştır. İndüksiyonla sertleştirilmiş olan bu malzeme mükemmel bir yüzey ve iyi bir korozyon direncine sahiptir. Krom kaplıdır, sert ve darbe dayanımı yüksektir. 1.1191 olarak numaralandırılır ve DIN standardına göre Ck45 olarak adlandırılır. Tablo 3.6 ile kimyasal özellikleri, Tablo 3.7 ile de bazı mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.6. 1045 malzeme kimyasal özellikleri

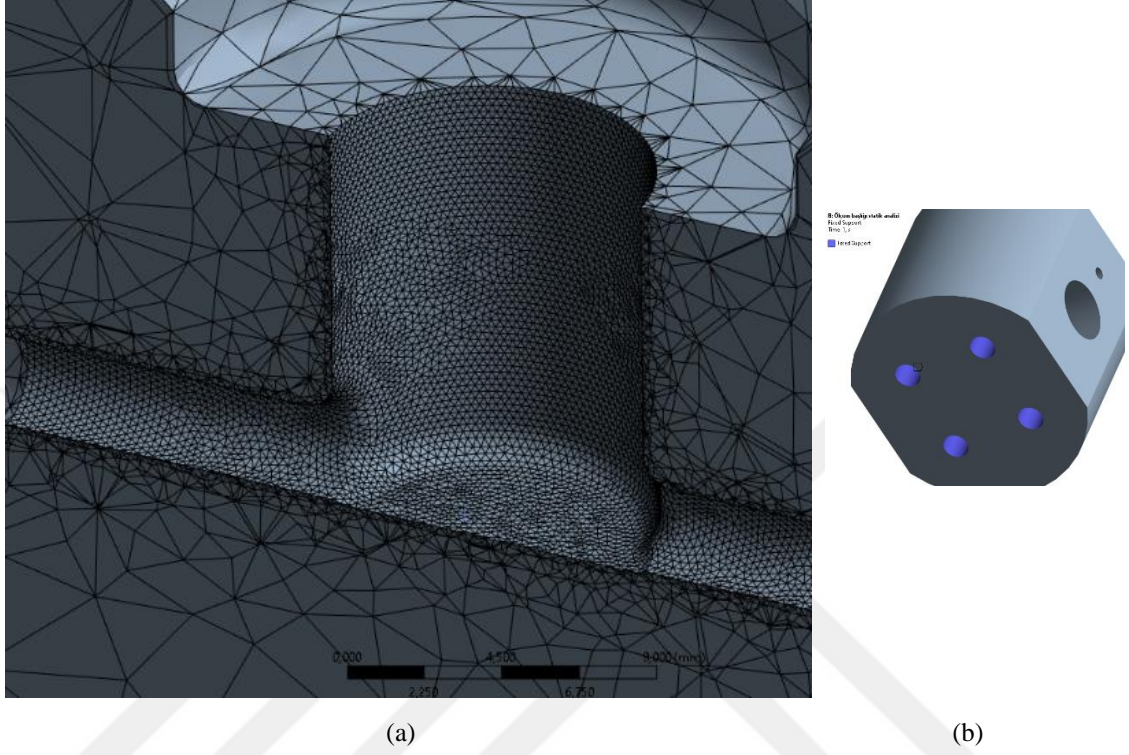
| Fe | Cr | Ni | Mn | Si | Mo | P | S | C |
|------|-------|-------|-------|-------|---------|----------|----------|-------|
| % 97 | % 0,4 | % 0,4 | % 0,8 | % 0,4 | % 0-0,1 | % 0-0,03 | % 0-0,03 | % 0,5 |

Tablo 3.7. 1045 malzeme için bazı mekanik özellikler

| σ_{akma} (MPa) | $\sigma_{çekme}$ (MPa) | E (GPa) | ν | ρ (kg/m ³) |
|--------------------------|---------------------------|------------|-------|--------------------------------|
| 490 | 700-850 | 210 | 0,29 | 7700 |

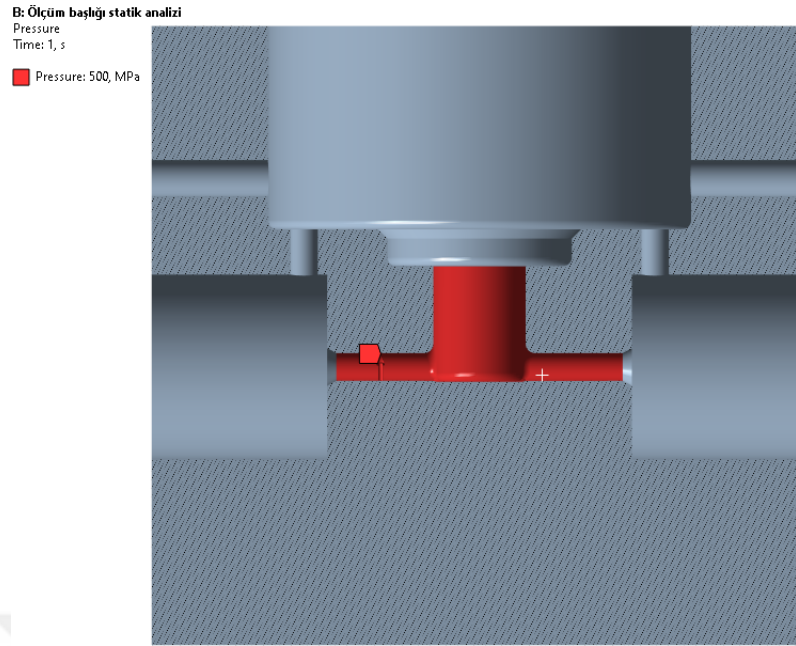
Tasarlanan yeni ölçüm başlığı için 500 MPa basınç değerinde güvenli çalışabileceğinin doğrulanması amacıyla sayısal statik analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Analiz programı olarak ANSYS kullanılmıştır. ANSYS programında

analiz girdileri belirlenirken bizim için basınca maruz kalan bölgeler daha önemli olduğundan bu kısımlara Şekil 3.14 (a) ile kesit alanında gösterildiği gibi daha küçük elemanlar kullanılarak mesh işlemi gerçekleştirilmiştir.



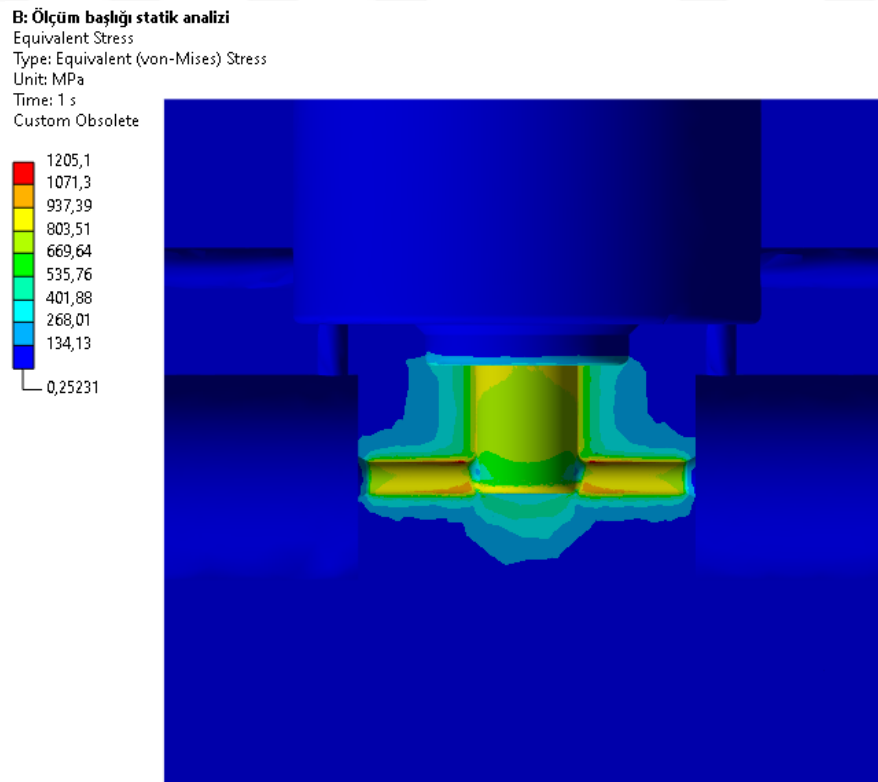
Şekil 3.14. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, mesh işlemi (a), sabit destek (b)

Basınca maruz kalan bölgelerde mesh işlemi için tanımlanan eleman boyutu 0,25 mm'dir. Diğer bölgelerde ise analiz çalışmasını kolay çözdürebilmek için daha kaba elemanlar kullanılmıştır. Ayrıca keskin köşelerde meydana gelen ve analiz sonuçlarını olumsuz yönde etkileyen tekillik etkenini olabildiğince minimuma indirebilmek için özellikle basınca maruz kalan keskin köşelerde radyus çalışması yapılmıştır. Ölçüm başlığı Şekil 3.14 (b) ile gösterildiği gibi cıvata bağlantılarının olduğu bölgelerden sabitlenmiştir. Ölçüm başlığının içerisinde bulunan kanalların maksimum 500 MPa basınç değerine maruz kalacağını düşünerek Şekil 3.15 ile kesit alanında gösterildiği gibi programa basınç değeri ataması yapılmıştır. Basınç değeri ataması yapılırken seçilen bölgeler ölçüm başlığının ortam sıvısı ile dolu olan bölgeleridir. Diğer bölgelerde ise doğrudan bir basınç etkisi bulunmamaktadır.

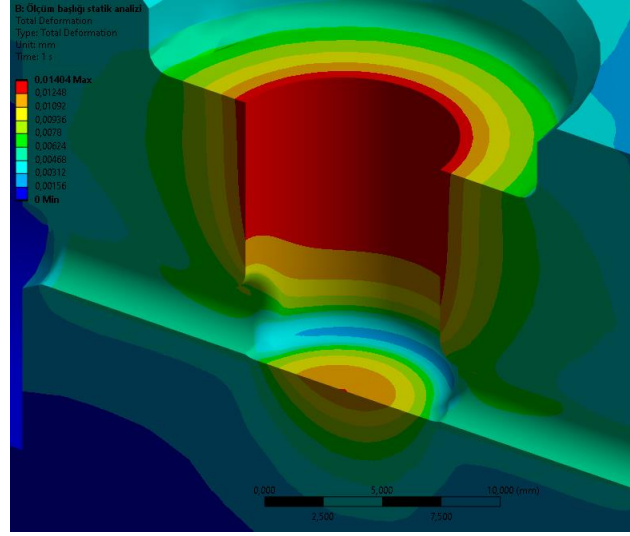


Şekil 3.15. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, basınç değerinin atanması

Belirlenen sınır şartları ve analiz girdileri ile sayısal statik analizi çözdürdüğümüzde elde ettiğimiz Von-Mises gerilme değerleri genel olarak Şekil 3.16 ile kesit alanında gösterilmiştir.

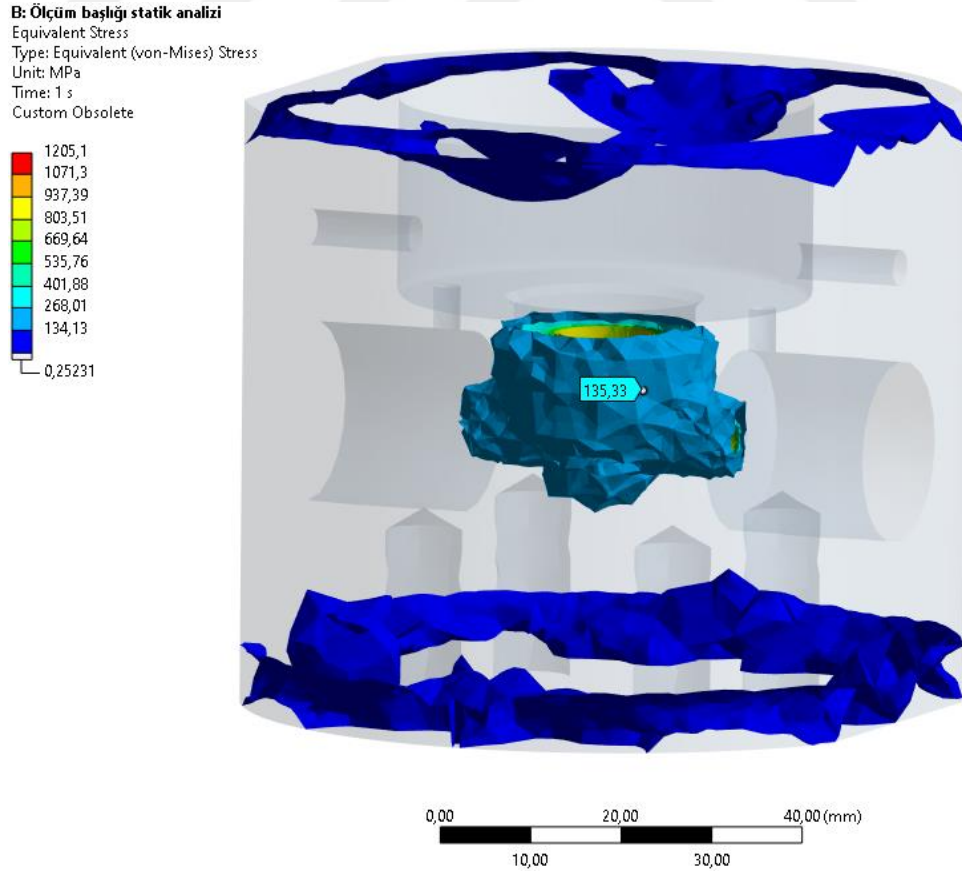


Şekil 3.16. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, Von-Mises gerilme değerleri (genel)



Şekil 3.18. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, deformasyon değerleri

Deformasyon değerleri incelendiğinde maksimum yaklaşık 14 mikronluk bir değişim gözlemlenmektedir. Ayrıca ölçüm başlığında kanalların maruz kaldığı yüksek basınç sonrası oluşan gerilmelerin içten dışa doğru dağılımı Şekil 3.19 ile verilmiştir.



Şekil 3.19. Ölçüm başlığı sayısal statik analizi, gerilme değerlerinin dağılımı

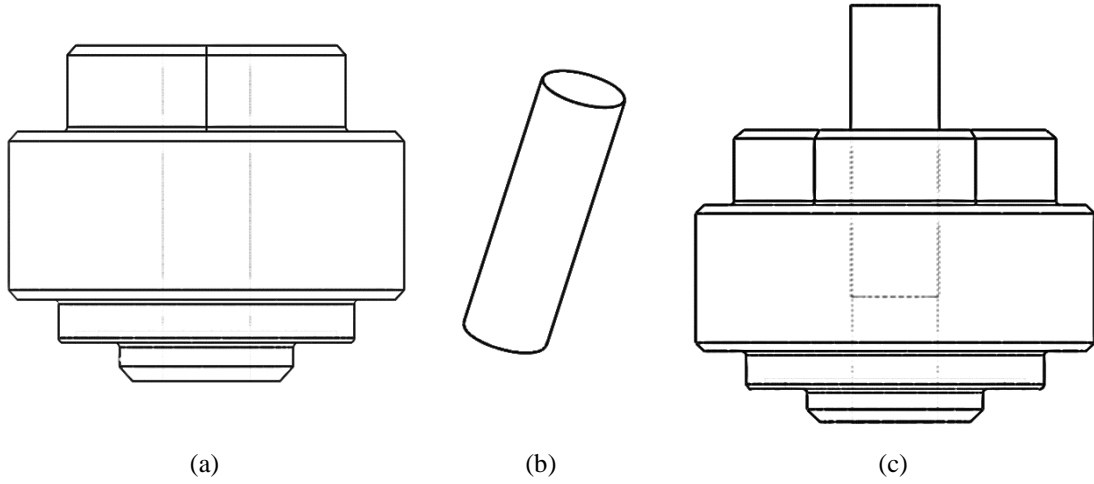
Şekil 3.19 ile verilen resme dikkat edilirse oluşan gerilme değerleri dışa doğru gitgide azalmaktadır. Öyle ki prob ile işaretlenen bölgede bile 135,33 MPa değeri görülmektedir. Bu değer ölçüm başlığının en dış bölgesinde 1-5 MPa değerlerine düşmektedir. Dolayısı ile sayısal statik analiz sonuçlarına bakılarak tasarımın 500 MPa basınç altında güvenle çalışacağı söylenebilir. Nitekim gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda bu durum doğrulanmıştır.

Tasarımı tamamlanan ölçüm başlığı için üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen ölçüm başlığı Şekil 3.20 ile verilmiştir. Üretilen ölçüm başlığına ayrıca ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlem sonucu malzeme sertlik değeri 55 HRC olmuştur.



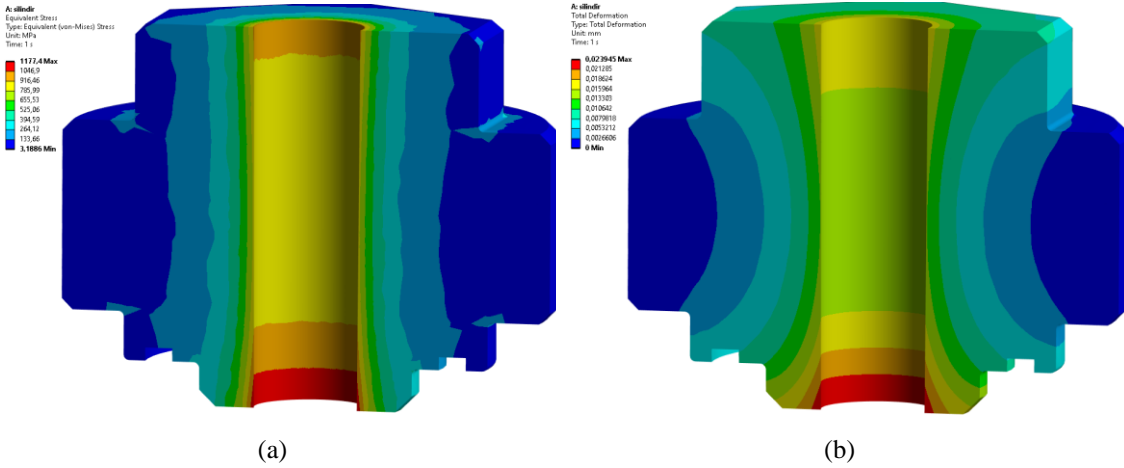
Şekil 3.20. Üretimi gerçekleştirilen ve ısıl işlem uygulanmış ölçüm başlığı

Ölçüm başlığı ile beraber 5 adet piston ve 5 adet silindir üretimi de gerçekleştirilmiştir. Bir önceki tasarımda silindirin ölçüm başlığına bağlanması için kullanılan 4 adet cıvata bağlantısının yerine yeni silindir tasarımında silindirin üst kısmı anahtar ile tutularak sıkılacak şekilde işlenmiştir. Yan yüzeylere dış açılmıştır ve ölçüm başlığına hafifçe sıkılarak montajı sağlanmaktadır. Malzeme olarak silindirde yine Tablo 3.4 ve Tablo 3.5 ile kimyasal ve bazı mekanik özellikleri verilen Calmax kullanılmıştır. Tasarlanan piston ve silindirlere ait üç boyutlu model görüntüleri Şekil 3.21 ile verilmiştir.



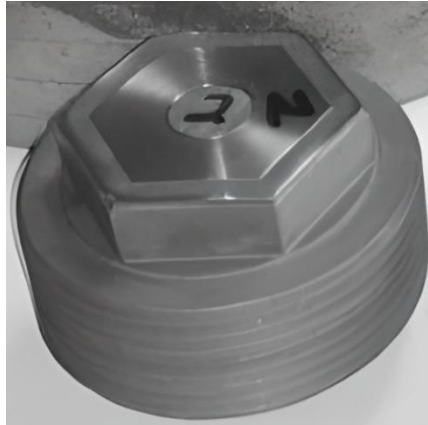
Şekil 3.21. Tasarlanan piston ve silindir, silindir (a), piston (b), piston ve silindir montajı (c)

Silindire ait sayısal statik analiz sonuçları Şekil 3.22 ile verilmiştir. Silindirin basınca maruz kalan kısmı olan iç bölgesinde meydana gelen gerilmelerin her ne kadar maksimum gerilme değeri 1117,4 MPa olsa da daha çok 900 MPa değerinde biriktiği görülmektedir. Bu da uygulanan basıncın maksimum işletme basıncı olduğu düşünüldüğünde malzemeye göre oldukça güvenli bölgedir. Deneysel çalışmalarda bu yaklaşımı doğrulamıştır.



Şekil 3.22. Silindir sayısal statik analizi, gerilme değerleri (a), deformasyon değerleri (b)

Tasarım sonrası üretimi gerçekleştirilen 2 numaralı silindir ve pistonun içi içe olduğu resim Şekil 3.23 ile verilmiştir. Ayrıca üretilen ve 1'den 5'e kadar numaralandırılan tüm piston ve silindirler toplu olarak Şekil 3.24 ile gösterilmiştir.

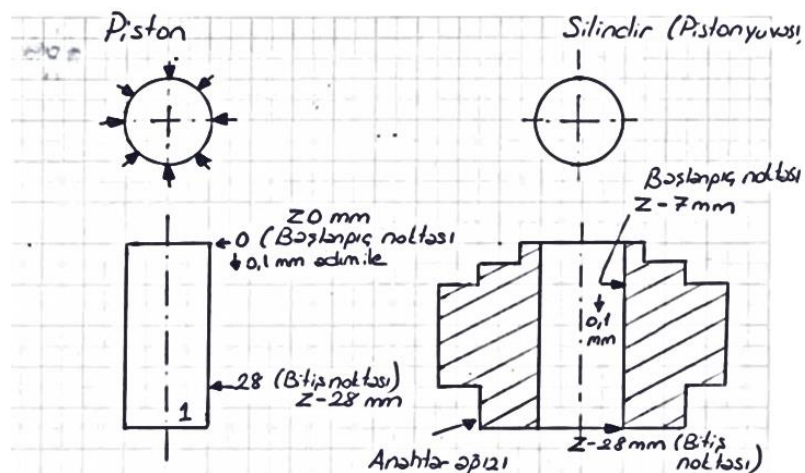


Şekil 3.23. Silindir ve piston montaj yapılmış hali



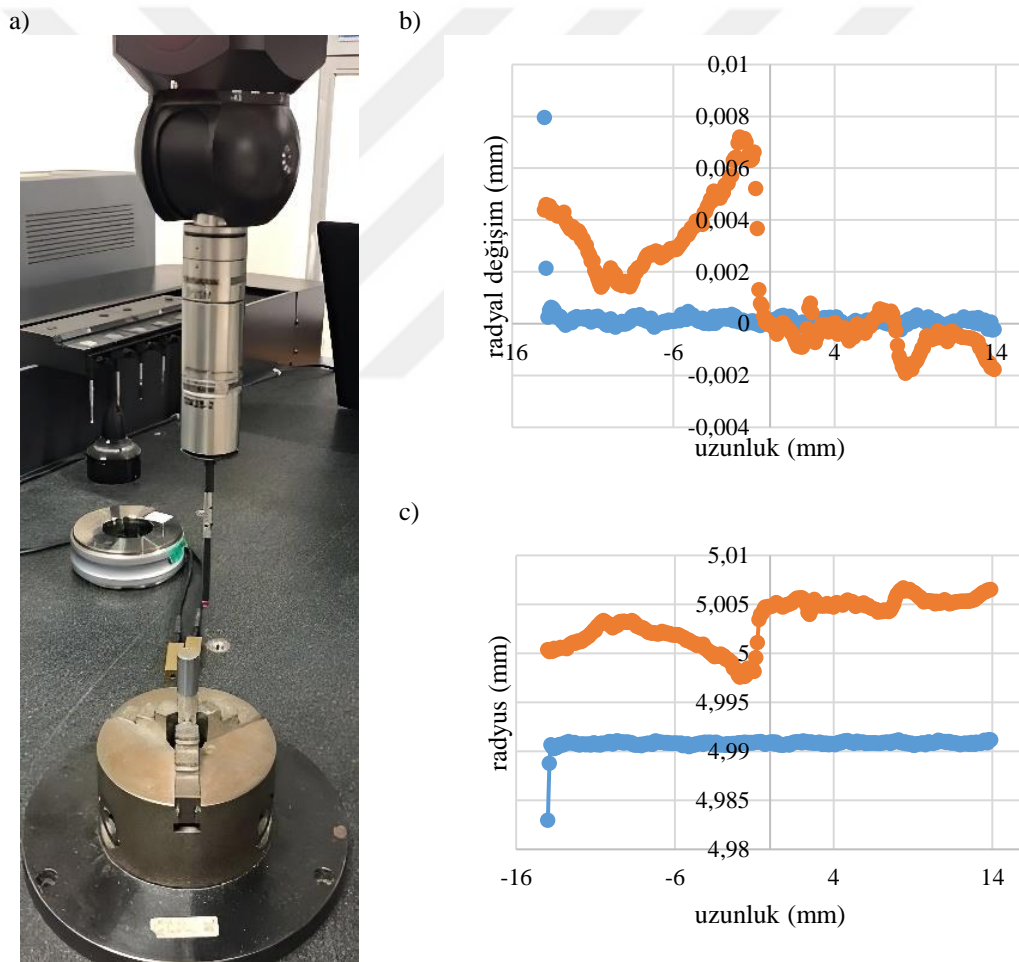
Şekil 3.24. Üretilen tüm silindir ve pistonların montaj yapılmış halleri

Dinamik referans basıncı doğru bir şekilde hesaplayabilmek için özellikle Eşitlik (3) ile belirtilen a ve A_{eff} değerlerinin çok iyi hesaplanabilmesi gereklidir. Bu kapsamda ivme ve efektif alan hesaplamaları üzerine detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, tasarım ve üretimi gerçekleştirilen piston ve silindirlere ait boyutsal ölçüm değerleri CMM ile toplanacaktır. Ölçüm için izlenecek yolu gösteren çizim Şekil 3.25 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.25. Silindir ve piston CMM ölçümleri öncesi hazırlanan uygulama çizimi

CMM ile gerçekleştirilen ölçümlerde 35 mm uzunluğunda olan piston ve silindirlerin 28 mm'lik kısımlarında ölçümler alınmıştır. Bunun sebebi sadece bu kısımlarda eş çalışma gerçekleşmesidir. Piston ve silindirler için ayrı ayrı her çapta 45'er derecelik aralıklarla 8 noktada ölçüm alınmıştır. Her bir çapta 8 noktada ölçüm tamamlandıktan sonra CMM cihazı 0,1 mm z yönünde ilerlemekte ve ölçümler 28 mm boyunca bu şekilde devam etmektedir. Her bir parça için x, y ve z koordinatlarını içeren toplamda 2240 adet ölçüm noktası bulunmaktadır. CMM ölçümlerine ait fotoğraf, 2 numaralı piston ve silindire ait radyal yer değiştirmeleri ve radyus değerlerini gösteren grafikler Şekil 3.26 ile verilmiştir.

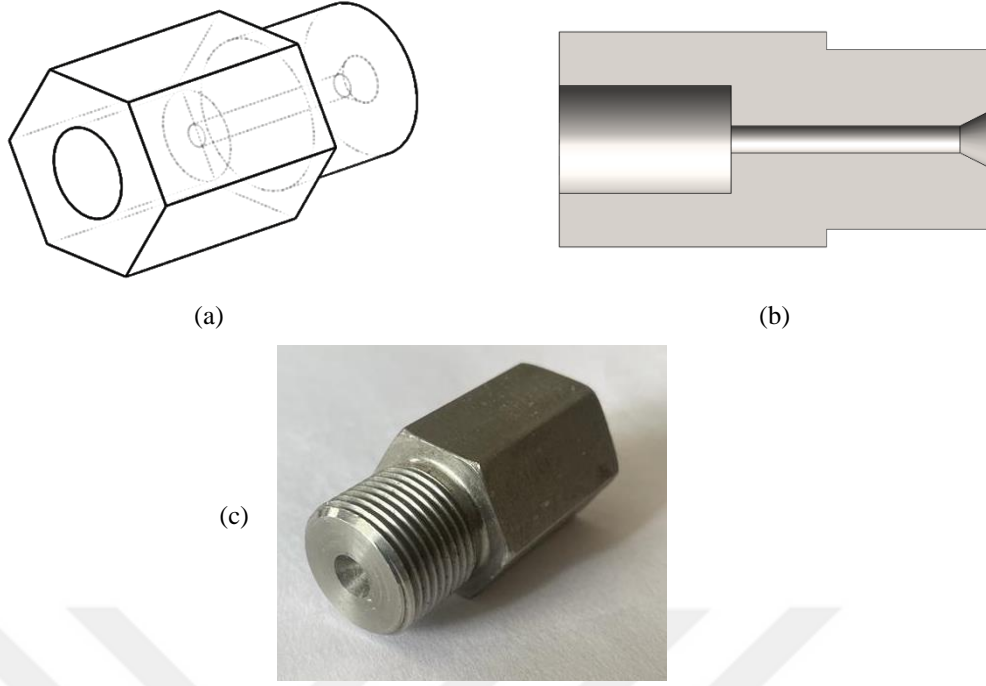


Şekil 3.26. 2 numaralı silindir ve pistonun ait CMM ölçümleri, CMM ölçümü (a), radyal yer değiştirmeler (b), radyus değerleri (c)

CMM ile elde edilen ölçüm değerlerinin hesaplarda direk kullanımı oldukça zor olduğundan ve çok fazla veri bulunduğundan öncelikle ölçüm değerleri belli bir düzene

göre sıralanmıştır. Bununla ilgili yapılan bir çalışmanın bir kısmı Şekil 3.27 ile verilmiştir.

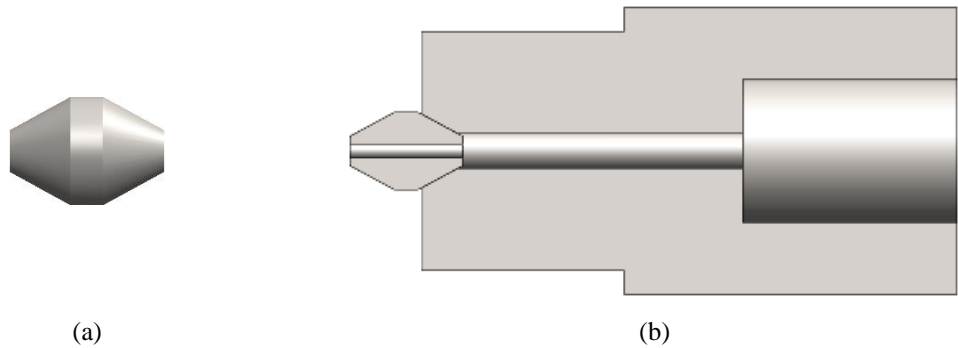
| z | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | ORTALAMA | | | | | | | | |
|-----|---------|----------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | x | y | r | x | y | r | x | y | r | x | y | r | x | y | r | x | y | r | | | | | | | |
| 0.1 | 4.98210 | 0.00006 | 4.98210 | 3.51224 | -3.52884 | 4.97881 | -0.00245 | 4.98260 | 4.98260 | -3.52884 | -3.51834 | 4.98311 | -4.98210 | 0.00116 | 4.98210 | -3.51745 | 3.53296 | 4.98540 | -0.00026 | 4.98472 | 4.98472 | 3.53024 | 3.51976 | 4.98511 | 4.98299 |
| 0.2 | 4.98791 | 0.00057 | 4.98791 | 3.51865 | -3.53352 | 4.98656 | -0.00253 | 4.98858 | 4.98858 | -3.53293 | -3.52252 | 4.98896 | -4.98819 | 0.00099 | 4.98818 | -3.52113 | 3.53678 | 4.99071 | -0.00044 | 4.99004 | 4.99004 | 3.53316 | 3.52298 | 4.98945 | 4.98581 |
| 0.3 | 4.99013 | 0.00039 | 4.99013 | 3.52108 | -3.53811 | 4.99020 | -0.00242 | 4.99057 | 4.99057 | -3.53411 | -3.52371 | 4.99054 | -4.99027 | 0.00109 | 4.99027 | -3.52291 | 3.53749 | 4.99183 | 0.00038 | 4.99115 | 4.99115 | 3.53447 | 3.52599 | 4.99081 | 4.99070 |
| 0.4 | 4.99025 | 0.00000 | 4.99025 | 3.52169 | -3.53650 | 4.99090 | -0.00220 | 4.99056 | 4.99056 | -3.53409 | -3.52319 | 4.99026 | -4.99015 | 0.00110 | 4.99015 | -3.52139 | 3.53660 | 4.99076 | 0.00030 | 4.99047 | 4.99047 | 3.53359 | 3.52550 | 4.99012 | 4.99043 |
| 0.5 | 4.99037 | 0.00102 | 4.99037 | 3.52161 | -3.53588 | 4.99041 | -0.00238 | 4.99044 | 4.99044 | -3.53397 | -3.52338 | 4.99031 | -4.99013 | 0.00112 | 4.99013 | -3.52058 | 3.53702 | 4.99049 | 0.00052 | 4.99028 | 4.99028 | 3.53391 | 3.52312 | 4.99008 | 4.99031 |
| 0.6 | 4.99049 | 0.00063 | 4.99049 | 3.52163 | -3.53647 | 4.99084 | -0.00236 | 4.99033 | 4.99033 | -3.53395 | -3.52347 | 4.99036 | -4.98971 | 0.00123 | 4.98971 | -3.52076 | 3.53693 | 4.99055 | 0.00043 | 4.99029 | 4.99029 | 3.53373 | 3.52353 | 4.99024 | 4.99035 |
| 0.7 | 4.99070 | 0.00084 | 4.99070 | 3.52145 | -3.53656 | 4.99078 | -0.00224 | 4.99032 | 4.99032 | -3.53444 | -3.52295 | 4.99033 | -4.98980 | 0.00124 | 4.98980 | -3.52094 | 3.53684 | 4.99062 | -0.00055 | 4.99071 | 4.99071 | 3.53374 | 3.52355 | 4.99026 | 4.99044 |
| 0.8 | 4.99122 | 0.00006 | 4.99122 | 3.52147 | -3.53644 | 4.99071 | -0.00263 | 4.99050 | 4.99050 | -3.53402 | -3.52314 | 4.99017 | -4.99038 | 0.00116 | 4.99038 | -3.52102 | 3.53736 | 4.99104 | 0.00017 | 4.99102 | 4.99102 | 3.53286 | 3.52256 | 4.99035 | 4.99067 |
| 0.9 | 4.99094 | 0.00037 | 4.99094 | 3.52128 | -3.53813 | 4.99035 | -0.00241 | 4.99029 | 4.99029 | -3.53400 | -3.52362 | 4.99050 | -4.99096 | 0.00147 | 4.99096 | -3.52100 | 3.53737 | 4.99103 | -0.00011 | 4.99084 | 4.99084 | 3.53408 | 3.52290 | 4.99081 | 4.99072 |
| 1 | 4.99106 | 0.00078 | 4.99106 | 3.52170 | -3.53652 | 4.99083 | -0.00259 | 4.99017 | 4.99017 | -3.53408 | -3.52341 | 4.99040 | -4.99044 | 0.00118 | 4.99044 | -3.52079 | 3.53729 | 4.99083 | 0.00020 | 4.99095 | 4.99095 | 3.53360 | 3.52399 | 4.99047 | 4.99006 |
| 1.1 | 4.99087 | 0.00050 | 4.99087 | 3.52162 | -3.53650 | 4.99086 | -0.00207 | 4.99016 | 4.99016 | -3.53427 | -3.52330 | 4.99046 | -4.99062 | 0.00130 | 4.99062 | -3.51997 | 3.53810 | 4.99083 | 0.00052 | 4.99096 | 4.99096 | 3.53372 | 3.52420 | 4.99071 | 4.99068 |
| 1.2 | 4.99129 | 0.00141 | 4.99129 | 3.52134 | -3.53749 | 4.99136 | -0.00256 | 4.99045 | 4.99045 | -3.53415 | -3.52329 | 4.99037 | -4.99071 | 0.00121 | 4.99071 | -3.52105 | 3.53731 | 4.99103 | 0.00044 | 4.99107 | 4.99107 | 3.53403 | 3.52391 | 4.99072 | 4.99088 |
| 1.3 | 4.99121 | 0.00022 | 4.99121 | 3.52205 | -3.53667 | 4.99128 | -0.00264 | 4.99043 | 4.99043 | -3.53433 | -3.52337 | 4.99055 | -4.99049 | 0.00143 | 4.99049 | -3.52083 | 3.53723 | 4.99082 | 0.00016 | 4.99119 | 4.99119 | 3.53405 | 3.52403 | 4.99082 | 4.99085 |
| 1.4 | 4.99123 | 0.00024 | 4.99123 | 3.52167 | -3.53766 | 4.99171 | -0.00132 | 4.99072 | 4.99072 | -3.53501 | -3.52265 | 4.99053 | -4.99057 | 0.00104 | 4.99057 | -3.52102 | 3.53764 | 4.99124 | 0.00018 | 4.99120 | 4.99120 | 3.53387 | 3.52424 | 4.99084 | 4.99101 |
| 1.5 | 4.99145 | 0.00025 | 4.99145 | 3.52249 | -3.53895 | 4.99179 | -0.00240 | 4.99031 | 4.99031 | -3.53399 | -3.52324 | 4.99022 | -4.99035 | 0.00126 | 4.99035 | -3.52070 | 3.53776 | 4.99110 | 0.00019 | 4.99102 | 4.99102 | 3.53389 | 3.52406 | 4.99073 | 4.99087 |
| 1.6 | 4.99146 | -0.00063 | 4.99146 | 3.52211 | -3.53723 | 4.99172 | -0.00188 | 4.99059 | 4.99059 | -3.53398 | -3.52363 | 4.99049 | -4.99014 | 0.00107 | 4.99014 | -3.52008 | 3.53767 | 4.99060 | 0.00101 | 4.99123 | 4.99123 | 3.53380 | 3.52447 | 4.99095 | 4.99090 |
| 1.7 | 4.99168 | 0.00038 | 4.99168 | 3.52203 | -3.53692 | 4.99144 | -0.00227 | 4.99038 | 4.99038 | -3.53406 | -3.52332 | 4.99033 | -4.99002 | 0.00148 | 4.99002 | -3.52066 | 3.53768 | 4.99101 | 0.00003 | 4.99124 | 4.99124 | 3.53352 | 3.52458 | 4.99083 | 4.99087 |
| 1.8 | 4.99120 | 0.00009 | 4.99120 | 3.52184 | -3.53711 | 4.99144 | -0.00275 | 4.99056 | 4.99056 | -3.53434 | -3.52290 | 4.99023 | -4.99060 | 0.00149 | 4.99060 | -3.52044 | 3.53789 | 4.99101 | 0.00035 | 4.99126 | 4.99126 | 3.53384 | 3.52440 | 4.99093 | 4.99090 |
| 1.9 | 4.99122 | 0.00041 | 4.99122 | 3.52166 | -3.53679 | 4.99109 | -0.00213 | 4.99035 | 4.99035 | -3.53402 | -3.52319 | 4.99021 | -4.98938 | 0.00161 | 4.98938 | -3.52053 | 3.53761 | 4.99087 | -0.00014 | 4.99126 | 4.99126 | 3.53366 | 3.52431 | 4.99074 | 4.99074 |
| 2 | 4.99103 | 0.00032 | 4.99103 | 3.52188 | -3.53638 | 4.99095 | -0.00211 | 4.99024 | 4.99024 | -3.53381 | -3.52327 | 4.99011 | -4.99026 | 0.00122 | 4.99026 | -3.52081 | 3.53762 | 4.99108 | -0.00012 | 4.99158 | 4.99158 | 3.53378 | 3.52422 | 4.99076 | 4.99075 |
| 2.1 | 4.99095 | 0.00013 | 4.99095 | 3.52189 | -3.53696 | 4.99131 | -0.00220 | 4.99022 | 4.99022 | -3.53399 | -3.52338 | 4.99031 | -4.99005 | 0.00144 | 4.99005 | -3.52049 | 3.53764 | 4.99087 | 0.00010 | 4.99080 | 4.99080 | 3.53389 | 3.52424 | 4.99086 | 4.99067 |
| 2.2 | 4.99157 | 0.00015 | 4.99157 | 3.52201 | -3.53675 | 4.99131 | -0.00228 | 4.99021 | 4.99021 | -3.53397 | -3.52325 | 4.99021 | -4.99003 | 0.00145 | 4.99003 | -3.52037 | 3.53775 | 4.99086 | -0.00008 | 4.99111 | 4.99111 | 3.53361 | 3.52445 | 4.99081 | 4.99076 |
| 2.3 | 4.99139 | 0.00066 | 4.99139 | 3.52213 | -3.53684 | 4.99146 | -0.00276 | 4.99060 | 4.99060 | -3.53395 | -3.52314 | 4.99012 | -4.99011 | 0.00156 | 4.99011 | -3.52006 | 3.53766 | 4.99058 | 0.00044 | 4.99112 | 4.99112 | 3.53343 | 3.52426 | 4.99054 | 4.99074 |
| 2.4 | 4.99171 | 0.00028 | 4.99171 | 3.52195 | -3.53672 | 4.99124 | -0.00224 | 4.99038 | 4.99038 | -3.53383 | -3.52332 | 4.99016 | -4.98999 | 0.00128 | 4.98999 | -3.52014 | 3.53788 | 4.99079 | 0.00025 | 4.99104 | 4.99104 | 3.53345 | 3.52438 | 4.99064 | 4.99075 |
| 2.5 | 4.99132 | 0.00069 | 4.99132 | 3.52237 | -3.53681 | 4.99160 | -0.00252 | 4.99047 | 4.99047 | -3.53372 | -3.52351 | 4.99002 | -4.98968 | 0.00149 | 4.98968 | -3.52002 | 3.53789 | 4.99071 | 0.00037 | 4.99105 | 4.99105 | 3.53346 | 3.52419 | 4.99052 | 4.99070 |
| 2.6 | 4.99154 | 0.00060 | 4.99154 | 3.52229 | -3.53650 | 4.99133 | -0.00221 | 4.99026 | 4.99026 | -3.53370 | -3.52329 | 4.99005 | -4.99006 | 0.00150 | 4.99006 | -3.52050 | 3.53771 | 4.99092 | 0.00039 | 4.99117 | 4.99117 | 3.53388 | 3.52421 | 4.99083 | 4.99077 |
| 2.7 | 4.99136 | 0.00092 | 4.99136 | 3.52199 | -3.53658 | 4.99111 | -0.00229 | 4.99044 | 4.99044 | -3.53408 | -3.52328 | 4.99031 | -4.99024 | 0.00152 | 4.99024 | -3.51998 | 3.53802 | 4.99078 | 0.00021 | 4.99128 | 4.99128 | 3.53380 | 3.52392 | 4.99057 | 4.99076 |
| 2.8 | 4.99148 | 0.00023 | 4.99148 | 3.52252 | -3.53707 | 4.99189 | -0.00207 | 4.99073 | 4.99073 | -3.53416 | -3.52337 | 4.99043 | -4.98952 | 0.00123 | 4.98952 | -3.51937 | 3.53763 | 4.99007 | 0.00012 | 4.99079 | 4.99079 | 3.53382 | 3.52373 | 4.99045 | 4.99067 |
| 2.9 | 4.99159 | 0.00034 | 4.99159 | 3.52284 | -3.53706 | 4.99211 | -0.00225 | 4.99081 | 4.99081 | -3.53405 | -3.52345 | 4.99041 | -4.98960 | 0.00145 | 4.98960 | -3.51995 | 3.53754 | 4.99041 | 0.00044 | 4.99061 | 4.99061 | 3.53374 | 3.52405 | 4.99062 | 4.99077 |
| 3 | 4.99191 | 0.00056 | 4.99191 | 3.52266 | -3.53684 | 4.99183 | -0.00224 | 4.99080 | 4.99080 | -3.53423 | -3.52324 | 4.99039 | -4.98989 | 0.00136 | 4.98989 | -3.52013 | 3.53796 | 4.99084 | 0.00026 | 4.99082 | 4.99082 | 3.53355 | 3.52426 | 4.99063 | 4.99089 |
| 3.1 | 4.99163 | 0.00057 | 4.99163 | 3.52227 | -3.53643 | 4.99126 | -0.00252 | 4.99109 | 4.99109 | -3.53381 | -3.52353 | 4.99030 | -4.99027 | 0.00157 | 4.99027 | -3.51971 | 3.53807 | 4.99062 | 0.00028 | 4.99093 | 4.99093 | 3.53367 | 3.52407 | 4.99058 | 4.99084 |
| 3.2 | 4.99125 | 0.00039 | 4.99125 | 3.52229 | -3.53641 | 4.99126 | -0.00190 | 4.99077 | 4.99077 | -3.53399 | -3.52331 | 4.99027 | -4.98995 | 0.00129 | 4.98995 | -3.52000 | 3.53789 | 4.99070 | 0.00010 | 4.99075 | 4.99075 | 3.53369 | 3.52399 | 4.99054 | 4.99069 |
| 3.3 | 4.99137 | 0.00070 | 4.99137 | 3.52231 | -3.53720 | 4.99184 | -0.00258 | 4.99096 | 4.99096 | -3.53427 | -3.52320 | 4.99039 | -4.98993 | 0.00140 | 4.98993 | -3.51998 | 3.53790 | 4.99069 | 0.00031 | 4.99046 | 4.99046 | 3.53381 | 3.52410 | 4.99070 | 4.99079 |
| 3.4 | 4.99098 | 0.00041 | 4.99098 | 3.52243 | -3.53729 | 4.99199 | -0.00226 | 4.99095 | 4.99095 | -3.53426 | -3.52369 | 4.99073 | -4.98962 | 0.00141 | 4.98962 | -3.51976 | 3.53721 | 4.99065 | 0.00033 | 4.99038 | 4.99038 | 3.53382 | 3.52401 | 4.99064 | 4.99067 |
| 3.5 | 4.99160 | 0.00043 | 4.99160 | 3.52245 | -3.53727 | 4.99199 | -0.00245 | 4.99093 | 4.99093 | -3.53414 | -3.52337 | 4.99042 | -4.98990 | 0.00133 | 4.98990 | -3.52034 | 3.53763 | 4.99075 | 0.00035 | 4.99059 | 4.99059 | 3.53364 | 3.52403 | 4.99053 | 4.99084 |
| 3.6 | 4.99162 | 0.00034 | 4.99162 | 3.52236 | -3.53746 | 4.99206 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



Şekil 3.28. Tasarım ve üretimi gerçekleştirilen geçiş adaptörü, üç boyutlu model (a), kesit görünümü (b), üretilen geçiş adaptörü (c)

3.2.2.2.Çelik conta

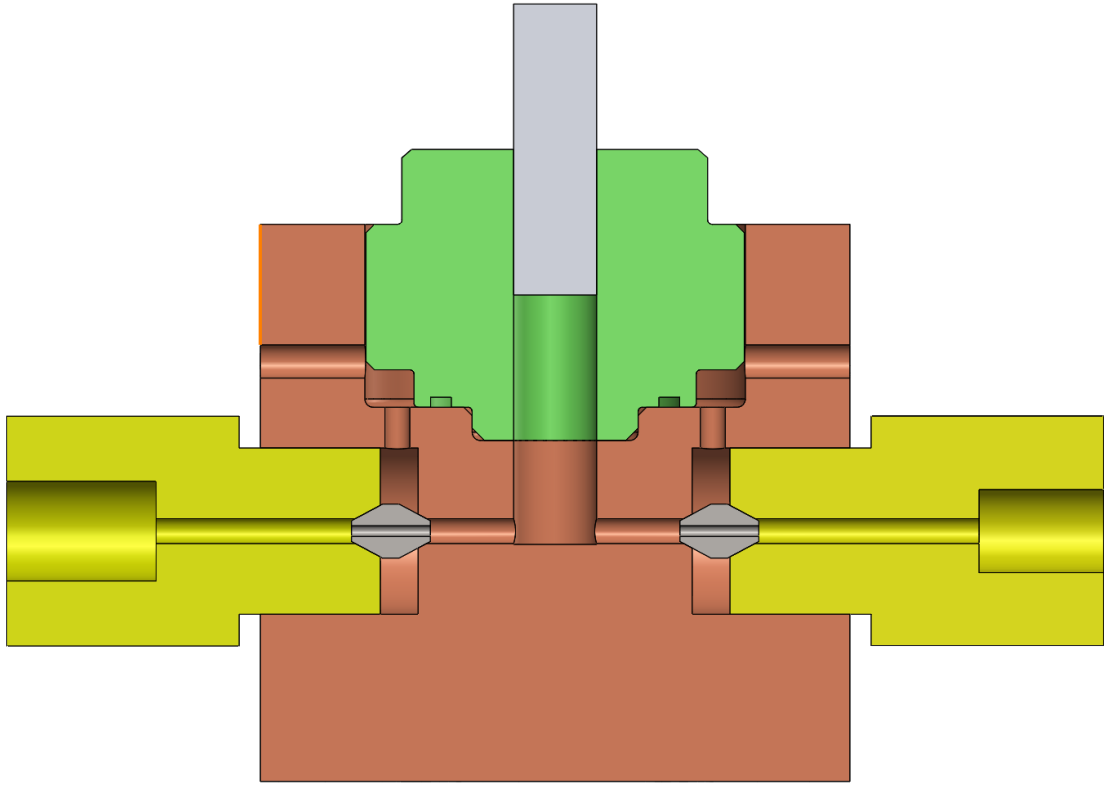
Adaptörlerle beraber kullanılacak olan çelik conta tasarım ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çelik conta geçiş adaptörü ile ölçüm başlığı arasında kullanılacaktır. Buradaki amaç iki farklı üretim olan ölçüm başlığı ve adaptörlerin birbirine bağlandıktan sonra adaptörün alın yüzeyinin ölçüm başlığına değdiği noktada meydana gelebilecek yüzey kaçıklıklarından kurtulabilmektir. Bu çelik conta (Şekil 3.29) sayesinde yüksek basınç altında meydana gelebilecek kaçaqlarında önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 3.29. Tasarım ve üretimi gerçekleştirilen çelik conta, üç boyutlu model (a), geçiş adaptörü ile montajı (b)

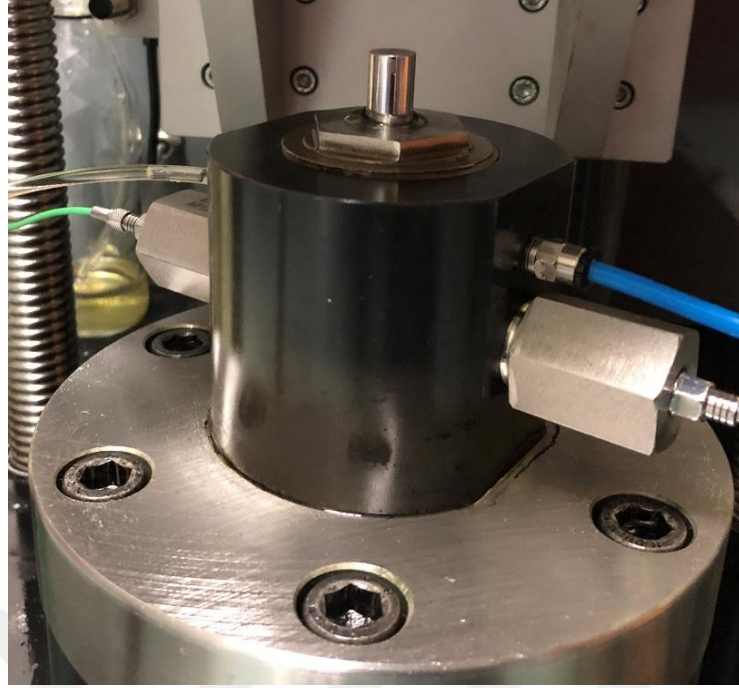
3.2.3. Üretilen ölçüm başlığı, piston-silindir ve bağlantı parçalarının montajı

Primer seviye dinamik basınç ölçüm sisteminde kullanılmak için tasarlanarak üretilen ölçüm başlığı, piston, silindir, geçiş adaptörü ve çelik contanın üç boyutlu modellerine ait montaj görüntüsünün kesit alanı Şekil 3.30 ile verilmiştir.



Şekil 3.30. Ölçüm başlığı, piston, silindir, geçiş adaptörü ve çelik contanın üç boyutlu modellerine ait montaj görüntüsünün kesit alanı

Üretilen ölçüm başlığı, piston, silindir, geçiş adaptörü ve çelik contanın montajının dinamik basınç ölçüm cihazı üzerine gerçekleşmiş hali Şekil 3.31 ile verilmiştir. Ölçümlerde kullanılacak olan dinamik basınç sensörlerinin de geçiş adaptörlerine bağlanmasıyla ve piston altından başlayarak sensörlere kadar olan kanalların ortam sıvısı ile içerisinde hava kabarcıkları kalmamasına dikkat edilerek doldurulmasıyla bu alt sistem kullanıma hazır hale gelmektedir.



Şekil 3.31. Ölçüm başlığı, piston, silindir, geçiş adaptörü ve çelik contanın dinamik basınç ölçüm sistemine montajı

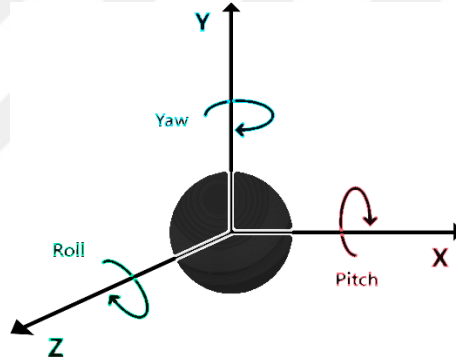
3.3. Lazer İnterferometrik Sistem

Lazer interferometreler mesafeleri belirlemek için lazer ışığının iki nokta arasında geçtiği dalga boylarının sayısını sayma prensibini kullanırlar. Bu prensiple doğrusal yer değiştirme, açısal yer değiştirme, diklik, doğrusallık, paralellik, hız, ivme ve titreşim gibi ölçümlerde kullanılabilirler. Genellikle yüksek hassasiyet isteyen ölçümler için kullanılmaktadır.

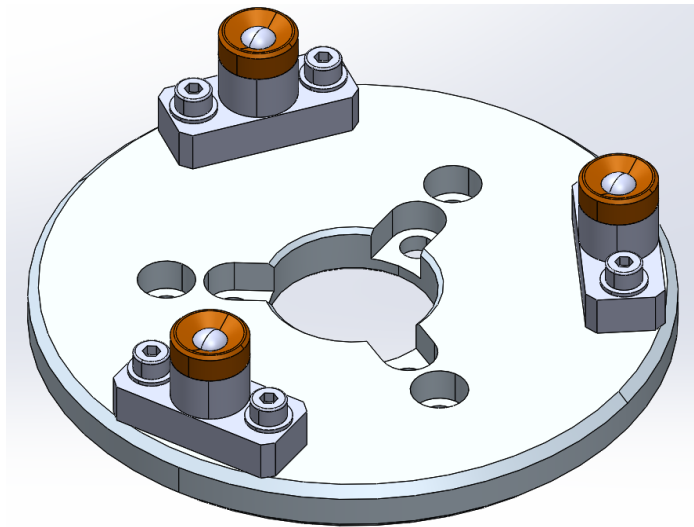
Dinamik basınç ölçüm sistemi üzerinde iki adet servo motor bulunmaktadır. Servo motorlardan bir tanesi serbest düşen kütleyi düşme olayı sona erdikten sonra arayüz programı aracılığı ile belirtilen gerekli yüksekliğe çıkaracak olan ve bu noktadan kütleyi tekrar serbest düşmeye bırakan elektromıknatısı hareket ettirmektedir. Diğer servo motor da düşen kütle pistonu ilk defa çarptıktan sonra bozucu sinyallerin önüne geçebilmek adına kütle pistonu tekrar çapmasını engelleyen tutucu sistemi (ribound sistem) hareket ettirmektedir. İlk servo motorun hareket ettirdiği elektromıknatıs kütleyi belli bir yüksekliğe çıkardıktan sonra kütle serbest düşmeye bırakılmaktadır. Bu serbest düşme ve pistonu çarpma sırasında kütle zaman karşı yer değiştirmesi lazer interferometreler kullanılarak ölçülmektedir. Ölçülen bu yer değiştirmelerin zaman karşı ikinci türevi bize ivme değerlerini vermektedir.

3.3.1. Lazer interferometre sistem bileşenleri

Dinamik basınç ölçüm sisteminde kullandığımız lazer interferometrik sistem çeşitli komponentlerden oluşmaktadır. Bunlar, lazer interferometreler, aynalar, retroreflektörler ve sinyallerin yükseltildiği ve işlendiği bir kontrol ünitesidir. Lazer interferometreler Eşitlik (3) ile verilen ivme değerinin elde edilebilmesi için kullanılacaktır. Prensip, serbest düşen ağırlığın, pistonun ve basınçlı ortamın kütesinin merkezinden elde edilen ivmenin ölçülmesiyle hesaplanabileceği söylenebilir ancak bu pratikte mümkün değildir. Serbest düşen kütle için x ekseninde oluşan dönme hareketi (pitch) ve dikey y ekseninde oluşan dönme hareketi (yaw) etkileri (Şekil 3.32), bu kütle için pistonla çarpma anında elde edilmesi gereken mutlak maksimum ivme değerinin net olarak belirlenmesinde problemlere neden olabilmektedir. Bu etkileri olabildiğince azaltabilmek için 120°'lik aralıklarla kütle üzerine yerleştirilmiş üç adet lazer interferometre ve üç adet retroreflektör (Şekil 3.33) üç farklı noktadan ölçümleri gerçekleştirecektir.

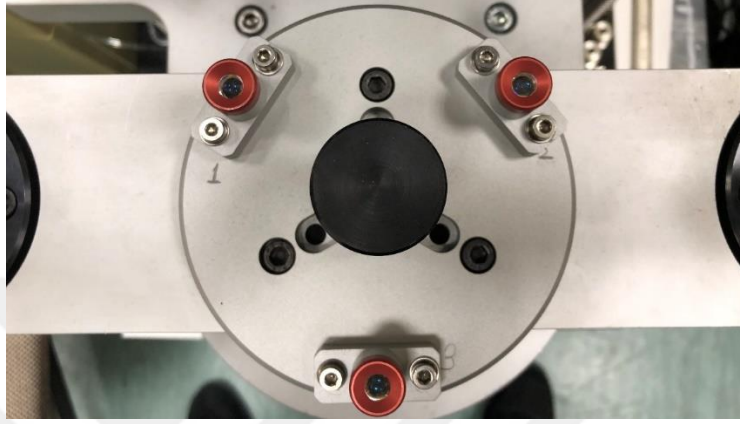


Şekil 3.32. Pitch, yaw ve roll hareketleri



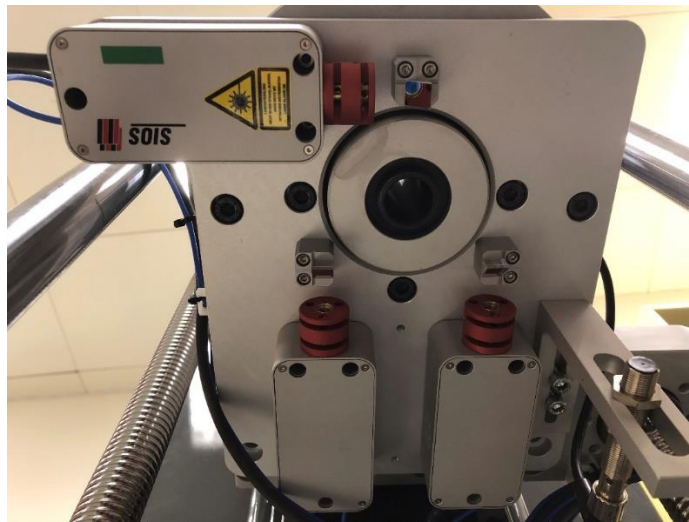
Şekil 3.33. Alüminyum plaka üzerine montajı yapılmış üç adet retroreflektör

Alüminyum parça üzerine bağlanan retroreflektörler, alüminyum parçanın serbest düşen kütle üzerine monte edilmesi ile kütleye doğrudan bağlanmış olup (Şekil 3.34), serbest düşen kütlede meydana gelen mesafe değişimlerini lazer interferometreye yansıtmaktadır.



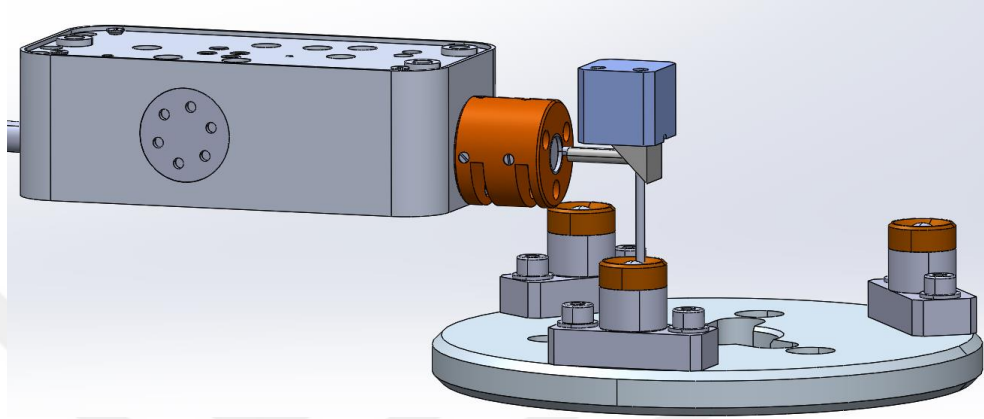
Şekil 3.34. Alüminyum plaka üzerine montajı yapılan retroreflektörlerin serbest düşen kütle üzerindeki görüntüsü

Servo motorlardan biri ile hareketi kontrol edilen ve elektromıknatısın bulunduğu alüminyum parçaya bağlı olan üç adet lazer interferometre Şekil 3.35 ile gösterilmiştir. Bu üç adet lazer interferometre kütlein serbest düşme işlemi boyunca hareketsiz bir şekilde kalmaktadır. Kütlein hareketleri, kütle üzerine bağlı olan retroreflektörler tarafından lazer interferometreye yansıtılmaktadır.



Şekil 3.35. Alüminyum parça üzerine montajı yapılan lazer interferometreler

Lazer interferometre, ayna ve retroreflektörlere ait üç boyutlu model görüntüsü Şekil 3.36 ile verilmiştir. Lazer interferometreden gönderilen lazer ışığı 45°'lik bir aynaya çarparak retroreflektöre ulaşmakta ve geri yansımaktadır. Bu şekilde mesafe değişimi hassas bir biçimde hesaplanmaktadır.

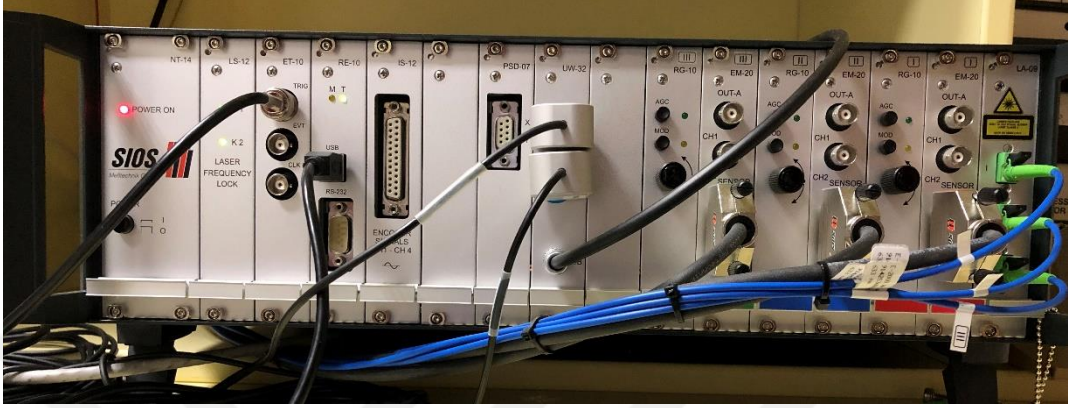


Şekil 3.36. Lazer interferometre, ayna ve retroreflektörlere ait üç boyutlu model görüntüsü

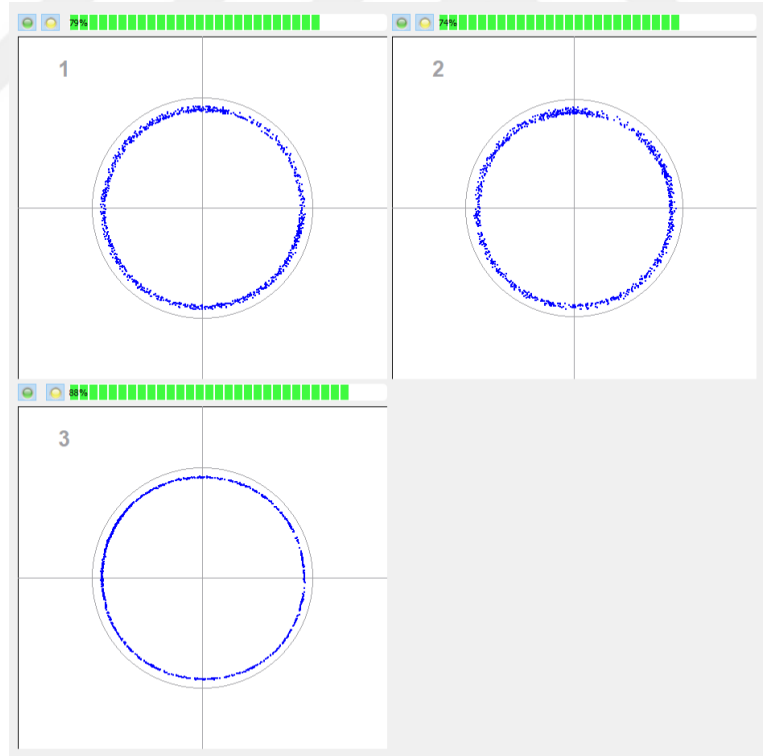
3.3.2. Lazer interferometrik sistemin ayarlanması ve ölçümler için hazır hale getirilmesi

Primer seviye dinamik basınç ölçüm sisteminde bulunan üç adet lazer interferometrenin ölçümler öncesi sistem üzerinde ayarlarının yapılması gereklidir. Bunun için öncelikle lazer interferometre, ayna ve retrereflektörler sisteme sıkıca bağlanır. Lazer interferometre ayarlarını yapabilmek için SIOS firmasının bir yazılımı olan RE-10 USB isimli program kullanılmaktadır. Lazer interferometrelerin fiberoptik kablo ile bağlı olduğu kontrol ünitesi (Şekil 3.37) tarafından toplanan veriler bilgisayara aktarılır ve yazılım aracılığı ile retroreflektör üzerindeki yansımadan kaynaklı sinyal kalitesini göstermektedir. Burada dikkat etmek gereken bir konu, kontrol ünitesi üzerinde bulunan lazer frekans kilidi kısmında bulunan K1 ve K2 ışıklarının ayar işleminden önce yanıyor olduğunun gözlemlenerek doğrulanmasıdır. Kontrol ünitesi açıldıktan sonra bu işlem biraz zaman alabilmektedir. Bu işlem gerçekleşmeden yapılacak ayar işlemleri geçersiz olacaktır. Bu durum, lazer interferometre üzerinde iki farklı düzeltmenin, aynaların konumundaki düzeltmenin ve retroreflektörlerin konumu üzerinde yapılan düzeltmelerin zorluğu düşünüldüğünde gerek zaman gerek emek açısından önem arz etmektedir. Üç ayrı kanal içinde ayar işlemi aynı anda yapılabilir. Şekil 3.38 ile gösterildiği gibi üç kanal içinde göstergenin yeşil alanda kalması ölçümler için yeterlidir.

Burada dikkat edilmesi gereken diğ er bir konu bu ayarın retroreflektörlerin bulunduğu kütlenin, piston üzerinde bulunduğu konumdan başlayarak maksimum çalışma mesafesi boyunca yapılmasıdır. Lazer interferometre ve retroreflektörler arasında farklı mesafelerdeki sinyal davranışı değişebilmektedir.



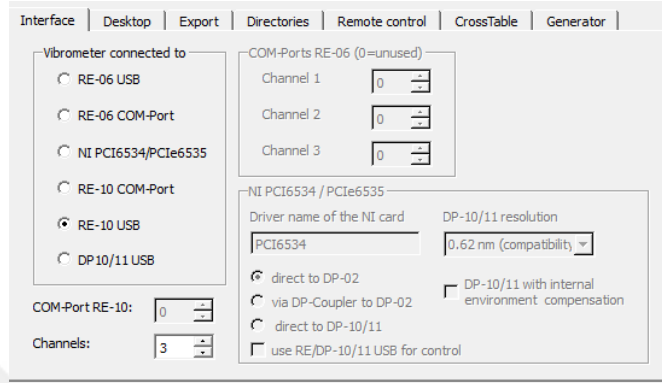
Şekil 3.37. Lazer interferometrelerin bağlı olduğu kontrol ünitesi



Şekil 3.38. RE-10 USB programı ile elde edilen üç ayrı kanala ait sinyallerin gösterimi

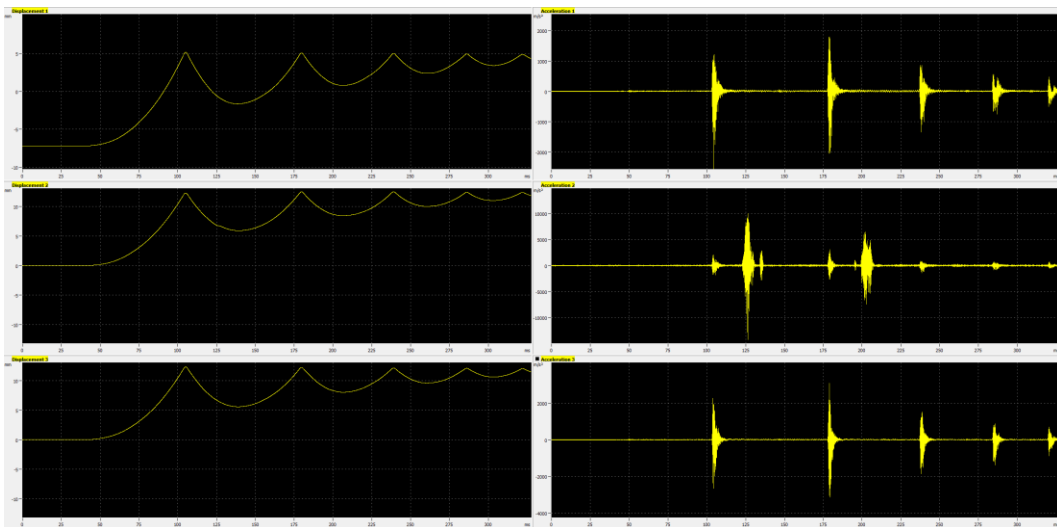
Sistem üzerinde bulunan lazer interferometrelerin ayarlama işlemleri tamamlandıktan sonra yine SIOS firmasının bir başka yazılım olan InfasVibro isimli

program çalıştırılarak burada da lazer interferometreleri bilgisayara tanıtmak ve bazı parametreleri belirlemek için bir takım ayarlar gerçekleştirilir. Özellikle “common settings” kısmına giriş yaptıktan sonra “interface” bölümünde interferometrenin bağlı olduğu bölüm ve kanal sayısı belirtilmelidir (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. RE-10 USB programı ile elde edilen üç ayrı kanala ait sinyallerin gösterimi

Yine Şekil 3.39 ile gösterilen “common settings” menüsünün “desktop” bölümünde bulunan ilgili kısımdan InfasVibro programında ana ekranda gösterilecek olan gözlemlemek istediğimiz pencere sayısını tanımlayabiliriz. Şekil 3.40 ile InfasVibro isimli programın gerekli ayarları yapıldıktan ve örnekleme sayısı ve frekansı belirlendikten sonra örnek bir deney sonrası oluşan yer değiştirme ve ivme grafikleri gösterilmektedir. Soldaki tarafta alt alta bulunan üç grafik yer değiştirmeyi, sağ taraftakiler ise ivme değişimlerini göstermektedir. Tüm grafikler başarılı bir şekilde elde edilebiliyorsa lazer interferometrelerin ayar işlemleri tamamlanmıştır.



Şekil 3.40. InfasVibro isimli programdan bir kesit

3.4. Piston ve Silindir Ünitesi İçin Efektif Alan Hesaplama Metodu

Primer seviye dinamik basınç ölçüm sisteminde Eşitlik (3) ile gösterildiği gibi referans basıncı hesaplayabilmek için gerekli parametrelerden biri piston ve silindir ünitesine ait efektif alan değeridir. Bu değer ne pistonu ne de silindire ait olmayıp piston ve silindir arasındadır (Dadson ve ark., 1982). Efektif alan hesabı için farklı yöntemler mevcuttur.

3.4.1. Karşılıklı dengeleme metodu (cross-float)

Ülkeler, Ulusal metroloji enstitülerinde veya yetkin kalibrasyon laboratuvarlarında genellikle Şekil 3.41 ile örnek bir kurulumun gösterildiği gibi cross-float olarak adlandırılan karşılıklı dengeleme metodunu kullanmaktadırlar. Bu metotta karşılıklı olarak kurulumları gerçekleştirilmiş iki adet ölü ağırlık test cihazı (deadweight tester) bulunmaktadır. Bunlardan biri laboratuvarın kullandığı referans kütleler ve referans piston silindir ünitesinden oluşmaktadır. Diğer ölü ağırlık test cihazı ise efektif alanı belirlenmek istenen piston silindir ünitesini ve piston silindir ünitesi üzerine yüklenen kütleleri içermektedir.



Şekil 3.41. Karşılıklı dengeleme metodu için kurulumu gerçekleştirilmiş sistem

Bu metotta laboratuvar şartlarında belirli bir müddet şartlandırılmış olan her iki ölü ağırlık test cihazı birbirine ve bir basınç kaynağına bağlı durumdadır. Birbirleri ile

arasında bulunan hatta bir vana bulunmaktadır. Öncelikle bu vana kapalı durumdayken yani her iki sistemin birbiri ile bağlantısı bulunmazken sistemler basınç kaynağını kullanarak sırası ile basınç ile yüklenirler. Bu basınç nominal olarak piston silindir ünitesi ve üzerinde bulunan kütle değerlerinin oluşturduğu basınca yakındır. Öncelikli amaç kütlelerin, kütle taşıyıcının ve pistonun serbest bir biçimde silindir içinde yüzme seviyesinde dönmelerini sağlamaktır. Buradaki düşünce dışarıdan herhangi bir etkinin basınç hesabına bir etkisinin olmadığını garanti altına alınmasıdır. Her iki cihazda bulunan kütlelerin doğal düşme hızları bir lazer mesafe ölçüm cihazı ile kaydedilir ve daha sonra cihazlar arasında bulunan vana açılarak her iki sistem birbirine bağlanmış olur. Burada iki sistemden birinin kütlesi düşmeye başlarken diğeri yükselir ve operatör yükselen kütleyle genellikle 5 mg'dan 50 g değerine kadar hassas ağırlıklar (Şekil 3.42) yükleyerek sistemleri dengelemeye çalışır. Bu dengeleme çalışması her iki sistemde daha önce kaydedilen doğal düşme hızlarına yaklaşıncaya ve stabil oluncaya kadar devam eder.



Şekil 3.42. Karşılıklı dengeleme metodu için kullanılan örnek bir hassas ağırlık seti

Sistem temel olarak basınç eşitliği prensibini kullanır. Yani $p_{\text{referans}} = p_{\text{test}}$ ilkesi kullanılmaktadır. Burada $p_{\text{referans}} = F_{\text{referans}} / A_{\text{referans}}$ ve $p_{\text{test}} = F_{\text{test}} / A_{\text{test}}$ olarak belirtilir. Bu şekilde eşitlik şu şekilde yazılabilir, $F_{\text{referans}} / F_{\text{test}} = A_{\text{referans}} / A_{\text{test}}$. Yeni eşitlikte dört adet parametremiz vardır ve bunlardan iki tanesi yani referans kütlelerin oluşturduğu referans kuvvet değeri ve referans alan değeri bilinmektedir. Test cihazına ait diğer iki parametreden biri olan test kuvvet değeri test için kullanılan kütlelerin referans değerlere karşı ölçümleri yapılarak elde edilir. Eşitlikte bilinmeyen parametre olarak geriye sadece test cihazına ait efektif alan değeri kalır. Eşitliği kullanabilmek için öncelikle yukarıda belirtilen karşılıklı dengeleme işleminin tamamlanması gerekir. Sonuç olarak test

cihazına ait atmosferik basınç altında ve 20 °C sıcaklık değeri altında efektif alan değerinin hesaplanması için Eşitlik (4) kullanılır.

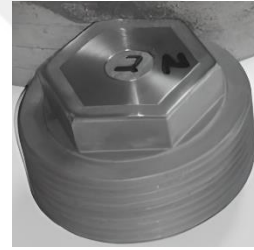
$$(A_{0,20})_{\text{test}} = \frac{F_{\text{test}}}{F_{\text{referans}}} \cdot \frac{(A_{0,20})_{\text{referans}} \cdot (1 + \lambda_{\text{referans}} \cdot p) \cdot [1 + (\alpha + \beta)_{\text{referans}} \cdot (t_{\text{referans}} - 20)]}{(1 + \lambda_{\text{test}} \cdot p) \cdot [1 + (\alpha + \beta)_{\text{test}} \cdot (t_{\text{test}} - 20)]} \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te α ve β değerleri sırasıyla piston ve silindire ait ısıl genleşme katsayılarını belirtmektedir ve birimleri °C⁻¹ dir. t değerleri ise ölçüm sırasında kaydedilen piston sıcaklık değerleridir ve birimleri °C' dir. λ değerleri basınç distorsiyon katsayısı olup birimi MPa⁻¹ dir ve p değeri MPa cinsinden nominal basınç değeridir.

Ölü ağırlık test cihazlarında kullanılan tipik bir piston-silindir ünitesi Şekil 3.43 (a) ile gösterilmiştir. Şekil 3.43 (b) ise primer seviye dinamik basınç ölçüm sisteminde kullanılan piston-silindir ünitesi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.43. Piston ve silindir üniteleri, ölü ağırlık test cihazında kullanılan (a), dinamik basınç ölçüm sisteminde kullanılan

Primer seviye dinamik basınç ölçüm sisteminde referans dinamik basınç hesaplamak için kullanacağımız piston-silindir ünitesine ait efektif alan değerini elde etmek için karşılıklı dengeleme metodu kullanılamamaktadır. Bunun en önemli nedeni üretilen piston-silindir ünitelerinin karşılıklı dengeleme metodunda olduğu gibi sisteme bağlanamaması ve üzerine güvenli bir şekilde referans kütlelerin yüklenememesi olarak belirtilebilir. Sonuç olarak karşılıklı dengeleme metodu ile hassas bir şekilde efektif alan

değeri hesaplanabilirken bu yöntemde kullanılmayacak olan piston silindirlere efektif alan hesabı için boyutsal ölçümleri kullanmak gibi farklı bir yöntem mevcuttur.

3.4.2. Boyutsal ölçümler yardımıyla piston-silindir ünitesi efektif alan değerinin belirlenmesi

Bu yöntemde efektif alan hesabı için karşılıklı dengeleme metodunda olduğu gibi herhangi bir başka basınç standardına ihtiyaç bulunmamaktadır. Boyutsal ölçümler, mutlak çap ölçümü, doğrusalık ölçümü ve yuvarlaklık ölçümlerini kapsamaktadır. Boyutsal ölçümlerdeki asıl amaç piston ve silindire ait yarıçap değerlerini elde edebilmektir. Mutlak çap ölçümleriyle belirli kesitlerde çap değerleri elde edilirken doğrusalık ve yuvarlaklık yani form ölçümleri ile belirlenen kesitlerdeki çap değerinden sapma değerleri bulunmaya çalışılır. Tez çalışmasında ise piston ve silindirlere ait yarıçap değerlerini belirleyebilmek için CMM kullanılmıştır. CMM ile orjin belirlendikten sonra 45°'şer derece aralıklarla x,y ve z koordinatlarını içeren veriler toplanmış ve z eksenine boyunca ölçülen uzunluk değerine ulaşıncaya kadar CMM 0,1 mm aralıklarla hareket etmiştir. Bu şekilde her bir dairesel kesit için 8 noktada yarıçap değeri elde edilmiştir. Dairesel kesitlerden elde edilen yarıçap değerlerinin ortalaması efektif alan hesabında z eksenine karşılık gelen bölümlerde kullanılmıştır (Molinar ve ark., 1999). Boyutsal ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan yarıçap veya çap değerleri ile farklı yöntemlerle efektif alan değeri hesaplanabilir (Molinar ve ark., 2005).

3.4.2.1. Mutlak çap ölçümleri ile efektif alan hesabı

Mutlak çap ölçümleri kullanılarak piston ve silindire ait efektif alan değerini hesaplayabilmek için gerçekleştirilen mutlak çap ölçümlerinin ortalaması alınır ve piston ve silindir için ayrı ayrı yarıçap değerleri elde edilir. Elde edilen ortalama yarıçap değerleri kullanılarak Eşitlik (5) ile piston ve silindire ait alanlar hesaplanır.

$$A = \pi.r^2 \quad (5)$$

Piston ve silindir ünitesine ait efektif alan değeri ise Eşitlik (6) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$A_0 = \frac{A_{\text{piston}} + A_{\text{silindir}}}{2} \quad (6)$$

3.4.2.2. Mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri ile efektif alan hesabı

Bu yöntemde ise mutlak çap ölçümleri ve form ölçümleri birlikte değerlendirilerek hesaplanmış olan yarıçap değerlerinin ortalaması kullanılarak bir önceki başlıkta belirtildiği gibi Eşitlik (5) yardımıyla hem piston hem de silindire ait alan değerleri bulunur. Daha sonra Eşitlik (6) ile piston ve silindir ünitesine ait efektif alan değeri hesaplanabilir (Molinar ve ark., 2005).

3.4.2.3. Dadson Teorisi

Dadson teorisine göre efektif alan değeri piston ve silindir alanlarından farklı olup piston ve silindir arasında yer almaktadır ve Eşitlik (7) ile tanımlanmaktadır (Dadson ve ark., 1982).

$$A_0 = \pi r_0^2 \left[1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{r_0 l} \int_0^l (u(x) + U(x)) dx \right] \quad (7)$$

Burada A_0 , piston-silindir ünitesinin sıfır basınçtaki efektif alan değeri, r_0 pistonun yarıçap değeri, h_0 değeri $z=0$ noktasında piston ve silindir arasındaki radyal boşluk, l ise pistonun ve silindirin eş çalışma uzunluğudur. $u(x)$ ve $U(x)$ değerleri sırasıyla piston ve silindirin z eksenini boyunca radyal yer değiştirmelerini temsil etmektedir.

Dadson teorisinde Eşitlik (7)'de bulunan sayısal integral değerinin hesaplanmasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan biri Simpson'un 3/8 kuralıdır (Dadson ve ark., 1982). Eşitlik (7)'de $z = l/2$ için yani piston ve silindirin ortası için aynı çalışma uzunluğu boyunca r_0 ve h_0 değerlerini belirlediğimizde formüldeki integral değeri değişmeyecektir. Bu durumda Eşitlik (7)'de yer alan integral değeri Eşitlik (8)'de verildiği şekliyle kullanılabilir.

$$I = \int_{-1/2}^{1/2} (u(x) + U(x)) dx = I_1 + I_2 \quad (8)$$

Eşitlik (8) ile verilen I değeri I_1 ve I_2 şeklinde bölünerek sırasıyla Eşitlik (9) ve Eşitlik (10)' da gösterilmektedir.

$$I_1 = \int_{-1/2}^{1/2} (u(x))dx \quad (9)$$

$$I_2 = \int_{-1/2}^{1/2} (U(x))dx \quad (10)$$

Simpson 3/8 kuralına göre sırasıyla Eşitlik (11) ve Eşitlik (12)'de verilen denklemlere göre I_1 ve I_2 değerlerini hesaplayabiliriz.

$$I_1 = w \sum_{i=0}^n \frac{u(x_i) + 3u(x_{i+1}) + 3u(x_{i+2}) + u(x_{i+3})}{8} \quad (11)$$

$$I_2 = w \sum_{i=0}^n \frac{U(x_i) + 3U(x_{i+1}) + 3U(x_{i+2}) + U(x_{i+3})}{8} \quad (12)$$

Eşitlik (11) ve Eşitlik (12)'de w , veri bölümünün genişliğidir ($w = x_i - x_{(i-1)}$), n , veri noktalarının sayısıdır, $u(x_i)$ ve $U(x_i)$, sırasıyla i 'nci bölümdeki piston ve silindirin yarıçap değeri ile referans piston ve silindir yarıçapı arasındaki farklardır. Tez çalışmasında kullanılan piston ve silindirler için gerçekleştirilen CMM ölçümlerinde z eksenini boyunca 0,1 mm'lik hareketlerle eşit aralıklarla ilerlendiğinden w değeri değişmemektedir fakat eğer ölçümler z eksenini boyunca eşit aralıklarla gerçekleşmeseydi o halde I_1 ve I_2 değerlerini Eşitlik (13) ve Eşitlik (14) ile hesaplayabiliriz.

$$I_1 = \sum_{i=1}^n h_i \frac{u(x_i) + u(x_{i-1})}{2} \quad (13)$$

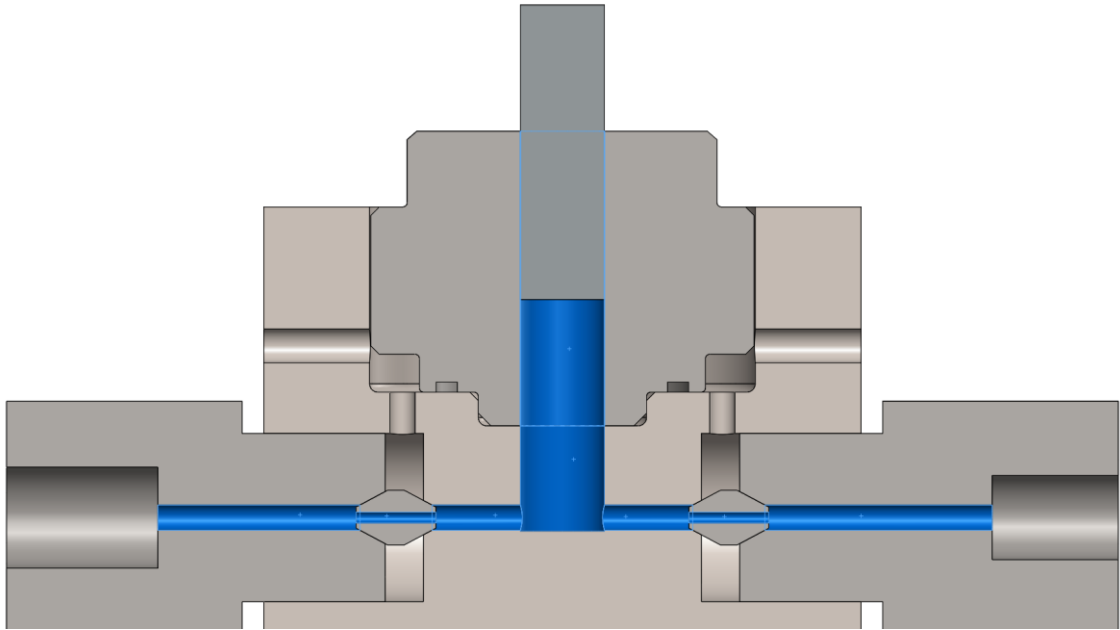
$$I_2 = \sum_{i=1}^n h_i \frac{U(x_i) + U(x_{i-1})}{2} \quad (14)$$

Burada h_i veri bölümü genişliği olup $h = x_i - x_{(i-1)}$ şeklinde hesaplanmaktadır. Dikkat edileceği üzere bütün h değerleri birbirinden farklıdır.

Tez çalışmasında 0,1 mm'lik eşit aralıklarla hareket edildiğinden piston ve silindirler için efektif alan hesaplamalarında Eşitlik (11) ve Eşitlik (12) yardımıyla elde edilen Eşitlik (7) kullanılacaktır.

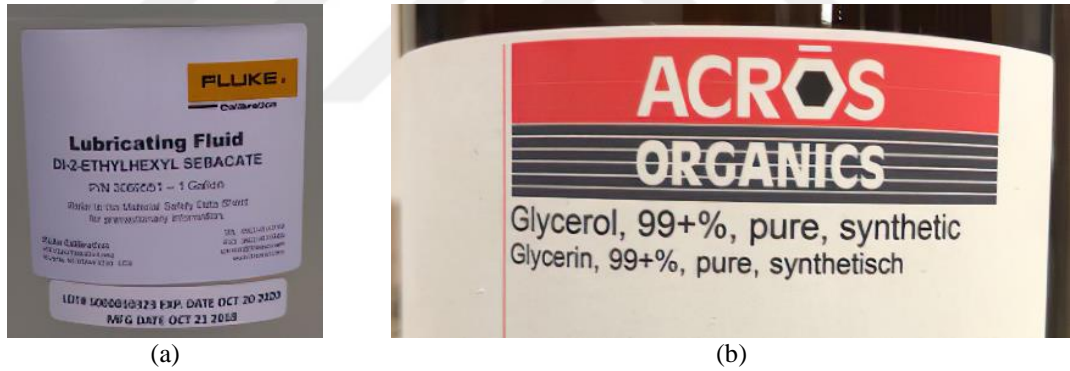
3.5. Deneylede Kullanılan Ortam Sıvıları

Primer sistem dinamik basınç ölçüm sistemi bileşenlerinden biri olan ölçüm başlığı içerisinde, piston altından başlayarak test edilecek olan dinamik basınç sensörlerinin ölçüm başlığına bağlı ve basınca maruz kalan diyafram kısmına kadar olan bölüm ortam sıvısı ile doldurulmaktadır. Bu sıvı, serbest düşen kütle tarafından pistonu iletilen enerjiyi dinamik basınç sensörlerine iletmektedir. Ortam sıvısının bir bölümü de silindir içerisinde bulunmaktadır. Bunun sebebi 35 mm çap değerine sahip pistonun 15 mm'lik bölümünün serbest düşen kütlenin çarpması için silindirin dışında bırakılmasıdır. Doğal olarak dışarıya çıkan piston hacmi kadar silindirin içinde ortam sıvısı ile dolu bir hacim oluşmaktadır. Ayrıca yine dinamik basınç sensörlerinin bağlandığı basınca maruz bölge uzunluk değerinin 30 mm olduğu adaptörleri de dikkate almak gereklidir. Adaptörler ile ölçüm başlığı arasında bulunan çelik conta içerisindeki küçük hacimde de ortam sıvısı bulunmaktadır. Ölçüm başlığı, silindir içi, adaptör ve çelik contalarda ortam sıvısı ile dolu olan ve basınca maruz kalan bölgeler montaj kesit alanında Şekil 3.44 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.44. Ölçüm başlığında ortam sıvısı ile dolu olan bölgenin kesit görüntüsü

Basınçlı ortamın sıkıştırılabilirliği farklı sıvılar kullanıldığında sıvıların özelliğine de bağlı olarak değişmektedir. Ortam sıvısının sıkıştırılabilirlikteki bu değişiklik aynı zamanda basınç darbesinin süresini de yani periyodunu da değiştirmektedir. Bu süre yaklaşık 3 ms değerinden 6 ms değerine kadar değişebilmektedir. Basınç darbesinin toplam süresi değiştikçe farklı titreşim modlarının genlikleri de değişmekte ve kütle merkezi ile üç adet lazer interferometre ölçüm noktaları arasındaki ivme farkı da değişmektedir. Bu durum ayrıca ortam sıvısındaki hava kabarcıklarının miktarına da bağlıdır. Ortam sıvısında dolum işlemi sonrası fazla miktarda hava kabarcığı bulunmasından dolayı piston silindir içerisinde elle kontrol edildiğinde bile yukarı aşağı hareket edebilmektedir. Oysa dolum anında basınca maruz kalacak tüm hacimler içinde hava kabarcıklarını önleyici çalışmalar gerçekleştirilerek yapılan dolumlarda, piston silindir içerisinde rahatça dönmekte fakat yukarı veya aşağı hareket etmemektedir. Arzu edilen durum bu şekildedir. Dikkatli bir şekilde dolum yapılmayan ölçümlerde yüksek basınçlara çıkmakta oldukça güçlük çekilmektedir. Şekil 3.45 ile deneylerde kullanılan ortam sıvıları gösterilmiştir.



Şekil 3.45. Deneylerde kullanılan ortam sıvıları, gliserol (a), sebacate (b)

Şekil 3.45 ile verilen ortam sıvılarına ait viskozite ve yoğunluk değerleri Tablo 3.8 ile gösterilmiştir.

Tablo 3.8. Gliserol ve sebacate için bazı özellikler

| Ortam sıvısı | Viskozite (@ 20 °C) | Yoğunluk (@ 20 °C) |
|--------------|---------------------|------------------------|
| gliserol | 1412 Pa·s | 1261 kg/m ³ |
| sebacate | 9 mPa·s | 912 kg/m ³ |

3.6. Taguchi Metodu ile Parametrelerin Belirlenmesi

Primer seviye dinamik basınç ölçüm sistemi için üretilen ölçüm başlığında kullanılacak olan piston, silindir ve ortam akışkanına karar verilmelidir. Bu kapsamda elimizde kullanabileceğimiz dört adet piston, dört ayrı silindir ve iki ayrı ortam sıvısı bulunmaktadır. Bu parametrelerin doğru belirlenebilmesi ölçüm kolaylığı açısından çok önemlidir. Ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek bir diğer faktörde lazer interferometrede veriler toplanırken kullanılan örnekleme frekansıdır. Öyle ki örnekleme frekansı çok yüksek tutulunca gürültü oranı o derece artmakta ve uygulama arayüzündeki veri toplama sınırı sebebiyle serbest düşen kütlenin pistona çarptığı darbe anını kaçırabilme riski oluşmaktadır. Çok düşük tutulunca da sinyalin gerçek pik değerinin kesilmesi riski oluşmaktadır. Bu açıdan da 10 kHz, 25 kHz, 50 kHz ve 100 kHz olmak üzere 4 adet örnekleme frekansı değeri belirlenmiştir. Tablo 3.9 ile belirlenmesi gereken parametreler verilmiştir.

Tablo 3.9. Belirlenmesi gereken parametreler

| | | | | |
|-----------------|----------|----------|--------|---------|
| Piston | p2 | p3 | p4 | p5 |
| Silindir | s2 | s3 | s4 | s5 |
| Frekans | 10 kHz | 25 kHz | 50 kHz | 100 kHz |
| Ortam | gliserol | sebecate | | |

Tablo 3.9 ile belirtilen parametrelere göre hepsini ayrı ayrı kullanacak şekilde bir çalışma yapılacak olursa toplamda 128 adet deney gerçekleştirmek gerekmektedir. Böyle bir durumda kesirli faktöriyel tasarımı olan Taguchi Metodu uygulanması daha verimli ve kolay olacaktır. Taguchi yöntemi farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından en iyi kombinasyonu saptamak için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar için oldukça fazla deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu kullanılarak çok daha az sayıda deneysel çalışmayla sonuca ulaşmak mümkündür. Taguchi deney tasarımı aşamaları Tablo 3.10 ile belirtilmiştir.

Tablo 3.10. Taguchi deney tasarım aşamaları

| | |
|---|--|
| 1 | Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin seçilmesi |
| 2 | Faktör düzeylerinin seçilmesi |
| 3 | Uygun ortogonal düzenin seçilmesi |
| 4 | Faktör veya etkileşimlerin kolonlara atanması |
| 5 | Testlerin yapılması |
| 6 | Sonuçların analiz edilmesi |
| 7 | Doğrulama deneylerinin yapılması |

Bu çalışmadaki amacımız dinamik basınç ölçüm sisteminden aldığımız basınç değerlerinin hem gerçeğe yakın değerler olması hem de düşük belirsizlik değerleri elde edebilmek için standart sapmanın ve ortalamanın belli bir hedef değerde olmasını sağlamaktır. Taguchi metodunda deney tasarımı yaparken farklı piston, silindir, frekans ve ortam sınırları, dinamik basınca etki eden faktörler olarak belirlenmiştir. Bu dört değişik faktörden, pistonda farklı efektif alana sahip olan dört seviye, silindirde farklı efektif alana sahip olan dört seviye, farklı frekansta dört seviye (10 kHz, 25 kHz, 50 kHz ve 100 kHz), ortam sıvısı gliserol ve sebacate olmak üzere iki seviye olarak belirlenmiştir. Belirlenen faktör ve seviyeler Tablo 3.11 ile gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Taguchi deney tasarımında kullanılan faktör ve seviyeler

| Faktör | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 | Seviye 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| Piston | p2 | p3 | p4 | p5 |
| Silindir | s2 | s3 | s4 | s5 |
| Frekans | 10 kHz | 25 kHz | 50 kHz | 100 kHz |
| Ortam | gliserol | sebacate | | |

Farklı pistonlar ve farklı silindirlerin karışmaması için üzerlerine lazer ile numaralandırma yapılmıştır. Piston ve silindir seviyeleri sırasıyla p2, p3, p4, p5 ve s2, s3, s4, s5 olarak belirlenmiştir. Taguchi deney tasarımında normal şartlarda probleme uygun ortogonal diziler serbestlik derecelerine göre belirlenmektedir ancak burada faktörler arasında eşit sayıda seviye olmadığından dolayı özel karışık seviye tasarımları kullanılmaktadır. Bu diziler arasında bize en uygun olan 3 faktörün 4 seviyeli olduğu ve 4. faktörün de 2 seviyeli olduğu L_{16} ortogonal dizisidir. Bu şekilde oluşturulan Taguchi deney tasarımı Tablo 3.12 ile verilmiştir.

Tablo 3.12. Taguchi deney tasarımı

| No | Piston | Silindir | Frekans (kHz) | Ortam |
|----|--------|----------|---------------|----------|
| 1 | p2 | s2 | 10 | gliserol |
| 2 | p2 | s3 | 25 | gliserol |
| 3 | p2 | s4 | 50 | sebacate |
| 4 | p2 | s5 | 100 | sebacate |
| 5 | p3 | s2 | 25 | sebacate |
| 6 | p3 | s3 | 10 | sebacate |
| 7 | p3 | s4 | 100 | gliserol |
| 8 | p3 | s5 | 50 | gliserol |
| 9 | p4 | s2 | 50 | gliserol |
| 10 | p4 | s3 | 100 | gliserol |
| 11 | p4 | s4 | 10 | sebacate |
| 12 | p4 | s5 | 25 | sebacate |
| 13 | p5 | s2 | 100 | sebacate |
| 14 | p5 | s3 | 50 | sebacate |
| 15 | p5 | s4 | 25 | gliserol |
| 16 | p5 | s5 | 10 | gliserol |

Tablo 3.12 değerlendirildiğinde uygun parametrelerin belirlenebilmesi için normal şartlarda 128 deney icra edilmesi gerekirken Taguchi metodunda kullanılan deney tasarımı ile sadece 16 deney ile bu parametrelerin belirlenmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca ölçüm işleminde her deney beş kere tekrarlanarak istatistiksel olarak sonuçların güvenilirliği sağlanacaktır.

3.7. Doğrulama Deneylerinde Kullanılacak Olan Diğer Bileşenler

Ölçümler sırasında aynı zamanda kalibreli dinamik basınç dönüştürücüleri kullanılmıştır. Bunun amacı tez kapsamında geliştirilen birincil seviye dinamik basınç ölçüm standardı kullanılarak elde edilen veriler yardımıyla hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin, ölçüm başlığına bağlanan kalibreli dinamik basınç sensörleri ile doğrulanacak olmasıdır. Bu kapsamda ölçümlerde kullanılacak olan dinamik basınç dönüştürücüler Şekil 3.46 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.46. Deneylerde kullanılan dinamik basınç dönüştürücüleri, Kistler 6229AK (a), Kistler 6213BK (b)

Şekil 3.46 ile gösterilen dinamik basınç sensörlerinin kalibrasyon işlemi üretici firma olan Kistler firması tarafından gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.46 (a) ile gösterilen Kistler 6229AK dinamik basınç sensörü 5000 bar maksimum çalışma basınç değerine sahiptir ve kalibrasyon sonuçları Tablo 3.13 ile verilmiştir.

Tablo 3.13. Kistler 6229AK dinamik basınç sensörü için kalibrasyon sonuçları

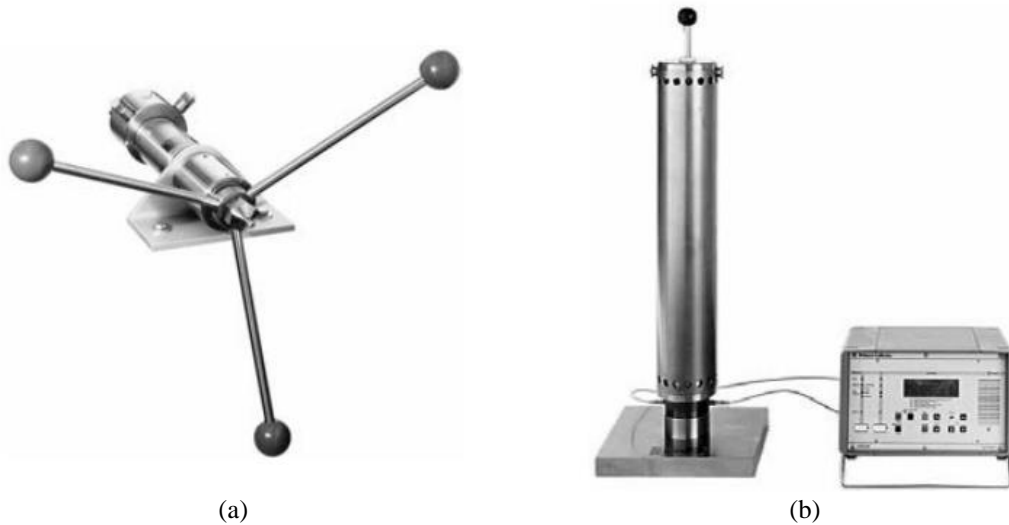
| Kalibre Edilen Aralık (bar) | Hassasiyet Değeri (pC/bar) | Ölçüm Belirsizliği (k=2) (%) |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 100 | -2,295 | ±0,67 |
| 200 | -2,332 | ±0,67 |
| 400 | -2,372 | ±0,67 |
| 600 | -2,385 | ±0,67 |
| 800 | -2,394 | ±0,67 |
| 1000 | -2,400 | ±0,72 |
| 1500 | -2,411 | ±0,72 |
| 2000 | -2,417 | ±0,72 |
| 3000 | -2,420 | ±0,72 |
| 4000 | -2,423 | ±0,72 |
| 5000 | -2,426 | ±0,72 |

Şekil 3.46 (b) ile gösterilen Kistler 6213BK dinamik basınç sensörü 8000 bar maksimum çalışma basınç değerine sahiptir ve kalibrasyon sonuçları Tablo 3.14 ile verilmiştir.

Tablo 3.14. Kistler 6213BK dinamik basınç sensörü için kalibrasyon sonuçları

| Kalibre Edilen Aralık (bar) | Hassasiyet Değeri (pC/bar) | Ölçüm Belirsizliği (k=2) (%) |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 100 | -1,174 | ±0,71 |
| 200 | -1,180 | ±0,71 |
| 500 | -1,184 | ±0,71 |
| 1000 | -1,188 | ±0,71 |
| 2000 | -1,191 | ±0,67 |
| 3000 | -1,188 | ±0,67 |
| 4000 | -1,185 | ±0,67 |
| 5000 | -1,184 | ±0,67 |
| 6000 | -1,187 | ±0,67 |
| 7000 | -1,190 | ±0,67 |
| 8000 | -1,188 | ±0,67 |

Birincil seviye dinamik basınç ölçüm standardında kullanılacak olan dinamik basınç sensörlerinden deneyler sırasında elde edilen veriler Kistler 6907B model kalibratör ile toplanacaktır. Bu kalibratör iki farklı modda çalışmaktadır. Birinci mod kalibratör modu, ikinci mod ise pik modudur. Kalibratör modunda yine Kistler ürünü olan 6904 model hidrolik basınç üretici veya 6905A model yüksek hidrolik basınç üretici kalibrasyon cihazları ile birlikte kullanılmaktadır (Şekil 3.47 (a)). Pik modunda ise Kistler 6909 model darbe basınç üretici ile birlikte kullanılmaktadır (Şekil 3.47 (b)).

**Şekil 3.47.** Kistler 6907B kalibratörü ile beraber kullanılan cihazlar, Kistler 6905A (a), Kistler 6909 (b)

Şekil 3.47 (a) ile gösterilen sistemde bir adet referans dinamik basınç sensörüne karşılık bir adet dinamik basınç test sensörü kalibre edilmektedir. Her iki sensörde fiber optik kablolarla Kistler 6907B kalibratöre bağlıdır ve kalibratörde bilgisayara bağlıdır. Bilgisayardaki yazılım aracılığıyla öncelikle referans dinamik basınç sensörüne ait kalibrasyon sertifikasındaki hassasiyet katsayı değerleri ilgili basınç değerine karşılık yazılıma tanıtılır. Yazılım için gerekli diğer parametrelerde girildikten sonra cihaz üzerindeki kol belirli bir hızda çevrilir ve kalibratör takip edilir. Kol çevrildikçe basınç değeri de yükselecek ve istenilen basınç değerine ulaşıncaya kadar ölçüm tamamlanacaktır. Başarılı bir ölçüm sonrası test sensörüne ait hassasiyet değerleri yazılım tarafından otomatik olarak hesaplanacaktır. Şekil 3.47 (b) ile gösterilen sistemde ise genel olarak adımlar aynı gibidir fakat bu ölçümde Kistler 6907B kalibratörün pik moduna alınması gereklidir. Öyle ki siyah topuzdan tutarak yukarı çıkarılan ve serbest düşmeye bırakılan kütlelerin enerjisi sensörlere ulaştığında kalibratör üzerinde sadece kaydedilen en yüksek basınç değeri görüntülenir ve kullanıcı tarafından sıfırlanana kadar sabit kalır. Tez çalışmasında da bu yöntem kullanılmaktadır. Yani Kistler 6907B kalibratör pik modundadır ve dinamik basınç sensörlerinden gelen pC cinsinden sinyalleri bar biçiminde bir basınç değerine dönüştürerek ekrana yazdırır. Tez çalışmasında deneylerde kullanılacak olan dinamik basınç sensörü, hesaplanacak referans basınç değerlerini doğrulamak amaçlı kullanılacağından bu sensörlere ait kalibrasyon sertifikalarından elde edilen hassasiyet katsayıları (Tablo 3.13 ve Tablo 3.14) ilgili basınç değerlerinde ayrı ayrı kalibratör üzerinde tanımlanmalıdır. Ölçümlerde kullandığımız Kistler 6907B model kalibratör Şekil 3.48 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.48. Kistler 6907B kalibratör

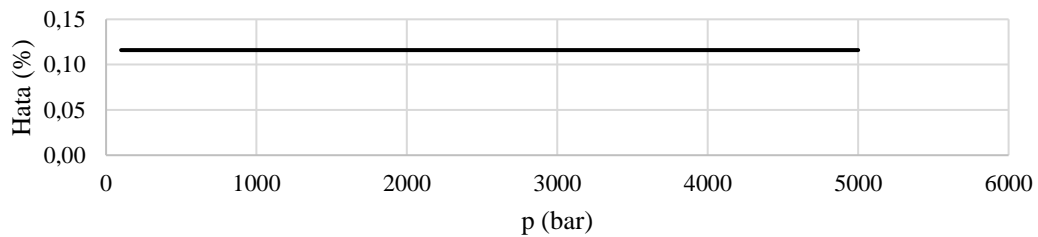
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Referans Dinamik Basınç Hesabı

Birincil seviye dinamik basınç ölçüm standardı kullanılarak gerçekleştirilecek ölçümlerde referans dinamik basıncı hesaplayabilmek için gerekli parametreler Eşitlik (3) ile verilmiştir. Formülde referans basıncı hesaplayabilmek için dört adet parametrenin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bunlar dinamik basınç sensöründe diyaframa kadar olan toplam kütle değeri, yerel yerçekimi ivmesi değeri, lazer interferometrelerden elde edilen mutlak maksimum ivme değerleri ve piston-silindir ünitesine ait efektif alan değeridir. Bu dört parametre yardımıyla referans dinamik basınç değeri belirlenebilecek ve ölçüm hesaplamalarında kullanılabilir. Kütle değeri, efektif alan ve ivme değerlerindeki değişimin referans dinamik basınç hesabındaki etkileri üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Kütle değerindeki 10 g'lık değişikliğin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Kütle değerindeki 10 g değişikliğin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi

| p | A | m | g | a | Δp | |
|----------|-----------------|----------|------------------|------------------|------------|------|
| bar | mm ² | kg | m/s ² | m/s ² | bar | % |
| 4406,039 | | 8,620219 | | | 0 | 0 |
| 4406,550 | | 8,621219 | | | 0,511128 | 0,01 |
| 4407,061 | | 8,622219 | | | 1,022257 | 0,02 |
| 4407,572 | | 8,623219 | | | 1,533385 | 0,03 |
| 4408,083 | | 8,624219 | | | 2,044514 | 0,05 |
| 4408,594 | 78,45 | 8,625219 | 9,80231 | 4000 | 2,555642 | 0,06 |
| 4409,105 | | 8,626219 | | | 3,066770 | 0,07 |
| 4409,616 | | 8,627219 | | | 3,577899 | 0,08 |
| 4410,128 | | 8,628219 | | | 4,089027 | 0,09 |
| 4410,639 | | 8,629219 | | | 4,600156 | 0,10 |
| 4411,150 | | 8,630219 | | | 5,111284 | 0,12 |



Şekil 4.1. Kütle değerindeki 10 g değişikliğin farklı nominal basınç değerlerinde referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi

Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 ile verilen grafiğe dikkat edilirse toplam kütle değerindeki her 1 g'lık değişim hesaplanan dinamik basınç üzerinde yaklaşık % 0,01 oranında hataya sebep olacaktır. 10 g'lık değişimde ise bu oran yaklaşık olarak % 0,12 olmaktadır ve nominal basınç değerine bağlı olarak değişmemektedir.

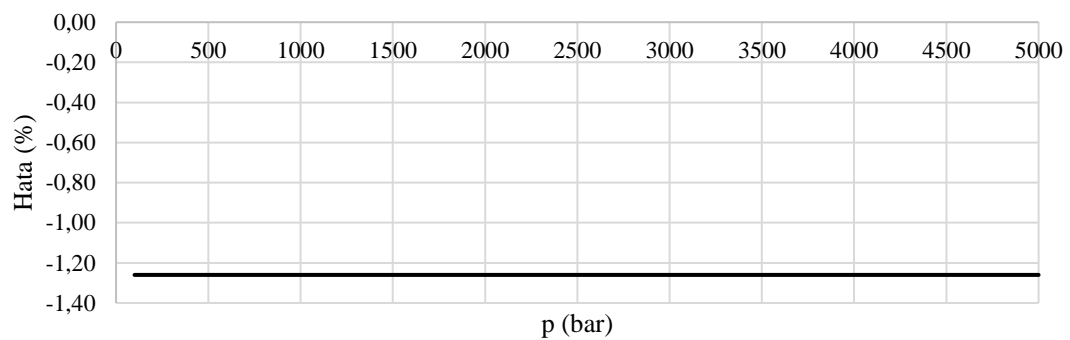
Aynı şekilde efektif alan hesabında yapılacak 1 mm² değerindeki sapmanın referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkileri farklı nominal basınç değerleri için Tablo 4.2 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Efektif alan değerindeki 1 mm²'lik değişimin farklı nominal basınç değerlerinde referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi

| p bar | A mm ² | m kg | g m/s ² | a m/s ² | Δp bar | % |
|----------|----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|-------|
| 100,00 | 78,35 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | 0,00 | 0,00 |
| 99,87 | 78,45 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -0,13 | -0,13 |
| 99,75 | 78,55 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -0,25 | -0,25 |
| 99,62 | 78,65 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -0,38 | -0,38 |
| 99,49 | 78,75 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -0,51 | -0,51 |
| 99,37 | 78,85 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -0,63 | -0,63 |
| 99,24 | 78,95 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -0,76 | -0,76 |
| 99,12 | 79,05 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -0,89 | -0,89 |
| 98,99 | 79,15 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -1,01 | -1,01 |
| 98,87 | 79,25 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -1,14 | -1,14 |
| 98,74 | 79,35 | 8,619219 | 9,802310 | 81,10 | -1,26 | -1,26 |
| 483,82 | 78,35 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | 0,00 | 0,00 |
| 483,21 | 78,45 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -0,62 | -0,13 |
| 482,59 | 78,55 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -1,23 | -0,25 |
| 481,98 | 78,65 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -1,85 | -0,38 |
| 481,37 | 78,75 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -2,46 | -0,51 |
| 480,75 | 78,85 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -3,07 | -0,63 |
| 480,15 | 78,95 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -3,68 | -0,76 |
| 479,54 | 79,05 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -4,28 | -0,89 |
| 478,93 | 79,15 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -4,89 | -1,01 |
| 478,33 | 79,25 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -5,49 | -1,14 |
| 477,73 | 79,35 | 8,619219 | 9,802310 | 430,00 | -6,10 | -1,26 |
| 1935,9 | 78,35 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | 0,0 | 0,00 |
| 1933,5 | 78,45 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -2,5 | -0,13 |
| 1931,0 | 78,55 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -4,9 | -0,25 |
| 1928,6 | 78,65 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -7,4 | -0,38 |
| 1926,1 | 78,75 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -9,8 | -0,51 |
| 1923,7 | 78,85 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -12,3 | -0,63 |
| 1921,2 | 78,95 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -14,7 | -0,76 |
| 1918,8 | 79,05 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -17,1 | -0,89 |
| 1916,4 | 79,15 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -19,6 | -1,01 |
| 1914,0 | 79,25 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -22,0 | -1,14 |
| 1911,5 | 79,35 | 8,619219 | 9,802310 | 1750,0 | -24,4 | -1,26 |
| 3003,0 | 78,35 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | 0,0 | 0,00 |

| | | | | | | |
|--------|-------|----------|----------|--------|-------|-------|
| 2999,2 | 78,45 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -3,8 | -0,13 |
| 2995,4 | 78,55 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -7,6 | -0,25 |
| 2991,6 | 78,65 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -11,5 | -0,38 |
| 2987,8 | 78,75 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -15,3 | -0,51 |
| 2984,0 | 78,85 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -19,0 | -0,63 |
| 2980,2 | 78,95 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -22,8 | -0,76 |
| 2976,4 | 79,05 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -26,6 | -0,89 |
| 2972,7 | 79,15 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -30,4 | -1,01 |
| 2968,9 | 79,25 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -34,1 | -1,14 |
| 2965,2 | 79,35 | 8,619219 | 9,802310 | 2720,0 | -37,8 | -1,26 |
| 3861,1 | 78,35 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | 0,0 | 0,00 |
| 3856,2 | 78,45 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -4,9 | -0,13 |
| 3851,3 | 78,55 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -9,8 | -0,25 |
| 3846,4 | 78,65 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -14,7 | -0,38 |
| 3841,5 | 78,75 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -19,6 | -0,51 |
| 3836,6 | 78,85 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -24,5 | -0,63 |
| 3831,8 | 78,95 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -29,3 | -0,76 |
| 3826,9 | 79,05 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -34,2 | -0,89 |
| 3822,1 | 79,15 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -39,0 | -1,01 |
| 3817,3 | 79,25 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -43,8 | -1,14 |
| 3812,4 | 79,35 | 8,619219 | 9,802310 | 3500,0 | -48,7 | -1,26 |
| 4999,7 | 78,35 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | 0,0 | 0,00 |
| 4993,3 | 78,45 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -6,4 | -0,13 |
| 4987,0 | 78,55 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -12,7 | -0,25 |
| 4980,6 | 78,65 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -19,1 | -0,38 |
| 4974,3 | 78,75 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -25,4 | -0,51 |
| 4968,0 | 78,85 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -31,7 | -0,63 |
| 4961,7 | 78,95 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -38,0 | -0,76 |
| 4955,4 | 79,05 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -44,3 | -0,89 |
| 4949,2 | 79,15 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -50,5 | -1,01 |
| 4942,9 | 79,25 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -56,8 | -1,14 |
| 4936,7 | 79,35 | 8,619219 | 9,802310 | 4535,0 | -63,0 | -1,26 |

Şekil 4.2 ile de efektif alandaki 1 mm^2 'lik değişimin farklı nominal basınç değerlerindeki referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Efektif alan değerindeki 1 mm^2 'lik değişikliğin farklı nominal basınç değerlerinde referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisinin grafiksel gösterimi

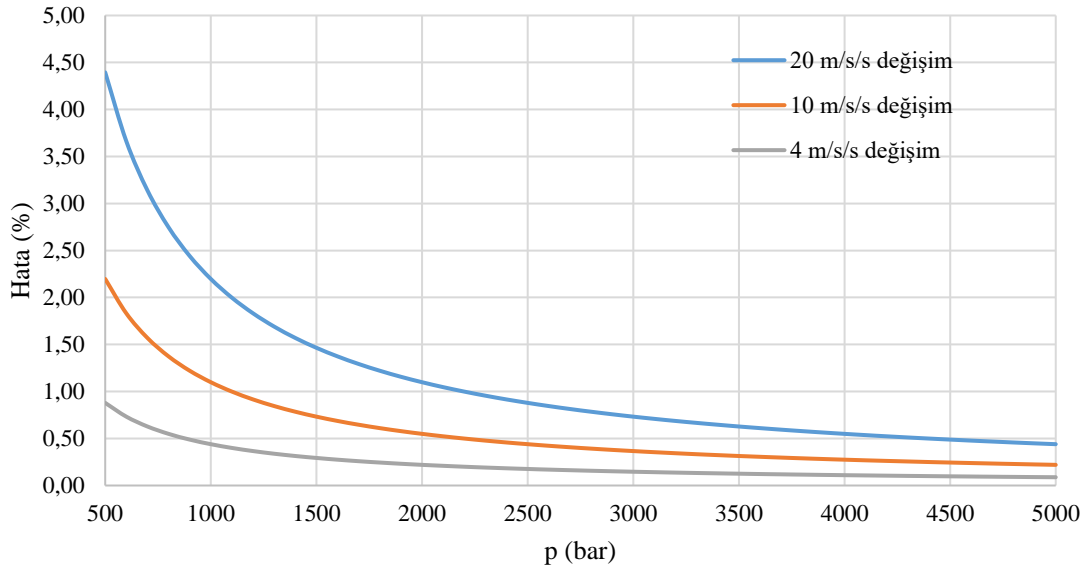
Tablo 4.2 ve Şekil 4.2 incelendiğinde efektif alan değerindeki her 0,1 mm²'lik değişimde, hesaplanan referans basınç üzerinde yaklaşık % 0,1'lik bir sapma meydana gelmektedir. Bu sapma değeri efektif alandaki değişim 1 mm² olduğunda nominal basınç değerine göre değişmemekle beraber yaklaşık % 1,3 gibi bir değere ulaşmaktadır.

Lazer interferometrelerden elde edilen ivme sinyalleri üzerinde mutlak maksimum ivme tayini gerçekleştirirken gerçekleştirilebilecek hatalardan dolayı, referans basınç hesaplanırken meydana gelebilecek sapma değerleri 100 bar nominal basınç değeri için Tablo 4.3 ile gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Lazer interferometrelerden elde edilen ivme değerlerindeki 20 m/s²'lik değişimin 100 bar nominal basınç değerindeki referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi

| p | A | m | g | a | Δp | |
|------------|-----------------------|-----------|------------------------|------------------------|------------|----------|
| bar | mm² | kg | m/s² | m/s² | bar | % |
| 100,3120 | | | | 81,5 | 0 | 0 |
| 102,5093 | | | | 83,5 | 2,197359 | 2,19 |
| 104,7067 | | | | 85,5 | 4,394718 | 4,38 |
| 106,9040 | | | | 87,5 | 6,592076 | 6,57 |
| 109,1014 | | | | 89,5 | 8,789435 | 8,76 |
| 111,2988 | 78,45 | 8,61914 | 9,80231 | 91,5 | 10,98679 | 10,95 |
| 113,4961 | | | | 93,5 | 13,18415 | 13,14 |
| 115,6935 | | | | 95,5 | 15,38151 | 15,33 |
| 117,8908 | | | | 97,5 | 17,57887 | 17,52 |
| 120,0882 | | | | 99,5 | 19,77623 | 19,71 |
| 122,2856 | | | | 101,5 | 21,97359 | 21,91 |

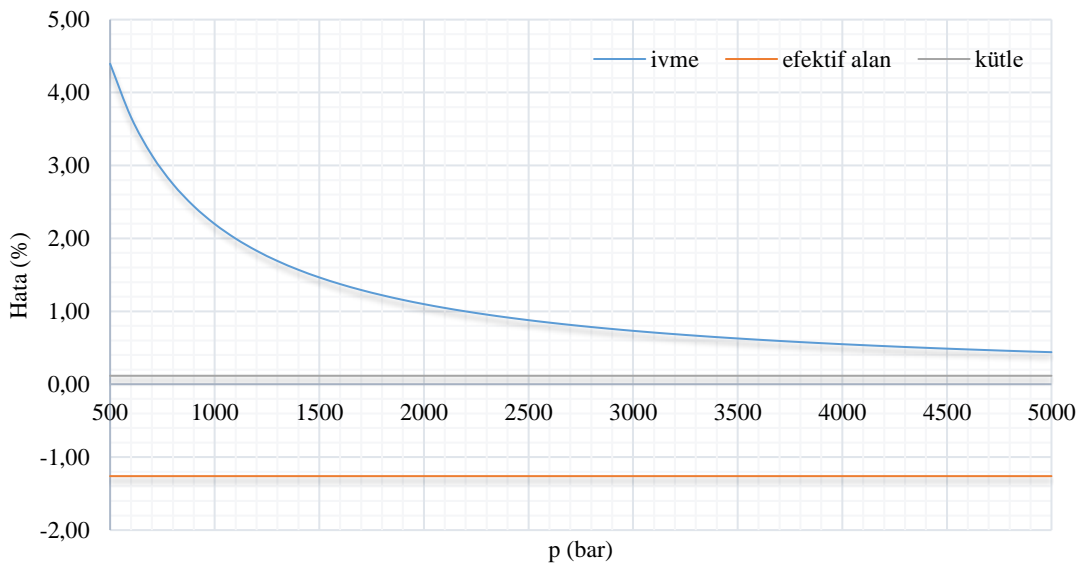
Şekil 4.3 ile de ivme değerlerindeki farklı oranlardaki değişimlerin farklı nominal basınç değerleri üzerinde meydana getireceği sapsmalar belirtilmiştir.



Şekil 4.3. İvme değerlerindeki farklı oranlardaki değişimlerin farklı nominal basınç değerleri üzerinde meydana getireceği sapmaların grafiksel gösterimi

Şekil 4.3 ile verilen grafiğe dikkat edilirse ivme değerlerindeki değişimlerin referans dinamik basınç üzerindeki etkisi düşük basınçlarda çok daha fazla belirgin olmaktadır. 500 bar nominal basınç değerinde 20 m/s²'lik bir ivme hatasının referans basınç hesabı üzerinde yaklaşık olarak % 4,5 değerinde sapmaya yol açtığı görülmektedir.

Kütle, efektif alan ve ivme değerlerindeki değişimin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisini toplu olarak gösteren grafik ise Şekil 4.4 ile verilmiştir.



Şekil 4.4. Kütle, efektif alan ve ivme değerlerindeki değişimin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisinin grafik üzerinde topluca gösterimi

4.1.1. Toplam kütle değerinin belirlenmesi

Eşitlik (3)'te verilen m_{toplam} değeri Eşitlik (15) ile gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$m_{\text{toplam}} = m_{\text{al.kütle}} + m_{\text{retroset}} + m_{\text{retrosetvida}} + m_{\text{piston}} + m_{\text{ortam_sıvısı}} \quad (15)$$

Eşitlik (15)'te $m_{\text{al.kütle}}$, serbest düşen alüminyum kütle değerini göstermektedir. m_{retroset} , serbest düşen alüminyum kütle üzerine monte edilmiş olan alüminyum plaka ve üzerindeki retroreflektörlerin kütle değeridir. $m_{\text{retrosetvida}}$, alüminyum plakayı serbest düşen kütleye bağlayan vidaların kütle değerleridir. m_{piston} , pistonun kütle değeri olup m_{ortam} ise bir kısmı ölçüm başlığı içerisinde, bir kısmı silindir içerisinde ve bir kısmı da adaptörlerin içerisinde bulunan ortam sıvısı kütle değeridir. Tablo 4.4 ile kütle değerleri birlikte verilmiştir.

Tablo 4.4. Referans dinamik basınç hesabında kullanılan kütle değerlerinin gösterimi

| $m_{\text{al.kütle}}$ | m_{retroset} | $m_{\text{retrosetvida}}$ | m_{piston} | $m_{\text{ortam_sıvısı}}$ | m_{toplam} |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| g | g | g | g | g | g |
| 8247,72 | 335,778 | 13,157 | 21,485 | 1,07867 | 8619,22 |

Tablo 4.4 ile verilen m_{ortam} değeri hesabı yapılırken ölçüm başlığı, silindir ve adaptörlere ait üç boyutlu modellerden faydalanılmıştır. Üç boyutlu modellerin kesit alanlarından ortam sıvısı ile dolu olan kısım uzunlukları ve çap değerleri tespit edilerek ortam sıvısının bu bölümlerdeki hacmi hesaplanmıştır. Hacim değerinin, ortam sıvısının yoğunluk değeri ile çarpılmasıyla da kütle değeri elde edilmiştir.

Deneylerde normal şartlarda toplam kütle değerinin değişmemesi beklenir fakat ortam sıvısı her deneyde piston ve silindir arasındaki boşluk miktarı ve darbe şiddetine bağlı olarak az miktarda piston ve silindir arasından dışarıya sızmaktadır. Bu durum hesaplarda kullanılan kütle değeri üzerinde azalmaya yol açmaktadır. Bu azalma miktarı pistonun silindir içerisine batma mesafesi gözönüne alınarak değerlendirilmektedir ve ölçüm belirsizliği kısmında verilerek belirsizlik bütçesine dahil edilecektir.

4.1.2. Yerel yerçekimi ivme değerinin belirlenmesi

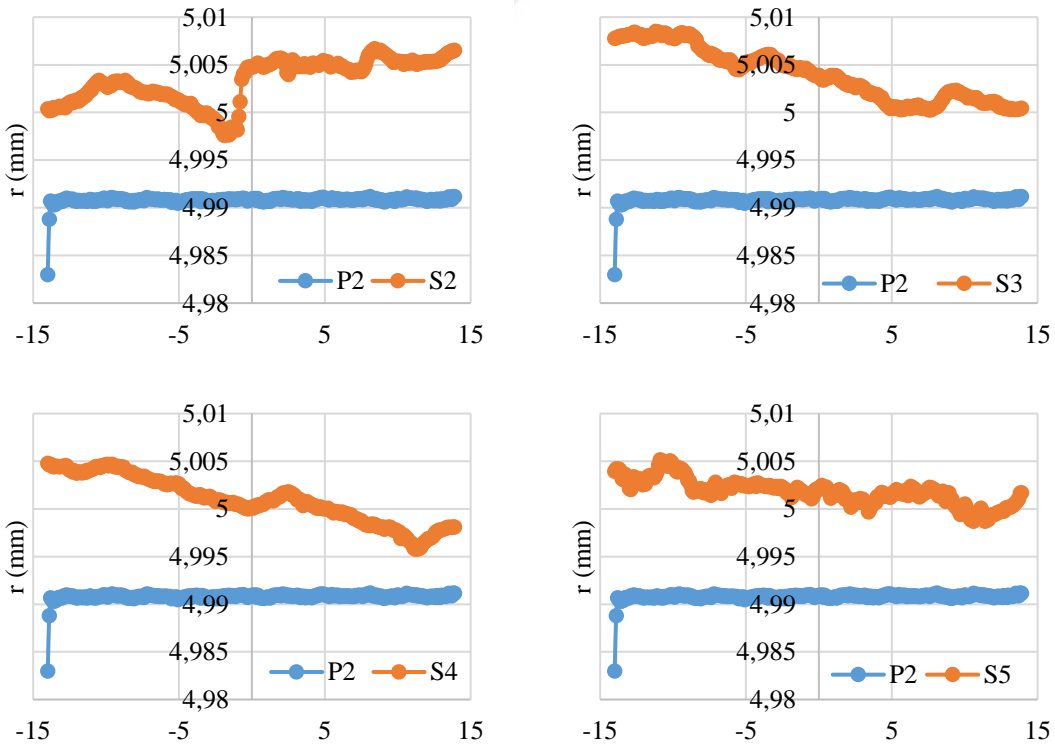
Yer çekimi ivmesi yaklaşık olarak $9,81 \text{ m/s}^2$ değerinde olup birimi g 'dir. Hava direncinin varlığı göz önünde bulundurulmadığında serbest düşen bir kütlenin hızı her saniye yaklaşık olarak 9,81 metre artmaktadır. 1901 yılında Ölçüler ve Ağırlıklar Genel Konferansı tarafından standart yerçekimi ivme değeri $9,80665 \text{ m/s}^2$ olarak belirlenmiştir. Fakat bu değer belirli bir yere ait olmayıp, dikkatlice hesaplanmış bir ortalama değer değildir. Dolayısıyla gerçek bir yerel yerçekimi ivme değeri bilinmiyorsa veya yerçekimi ivme değerindeki değişiklik çokta önemli değilse kullanılacak bir değerdir (Taylor ve Thompson, 2001). Yerel yer çekimi ivme değeri genel olarak enlem, yükseklik gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Her ne kadar yerel yer çekimi ivme değerindeki yaklaşık $0,01 \text{ m/s}^2$ 'lik değişimlerin tez çalışmasında gerçekleştirilen referans dinamik basınç hesapları üzerinde çok çok düşük bir etkisi olmasına karşın bu kapsamda da doğru değeri kullanmak adına laboratuvar ortamında ve birincil seviye dinamik basınç ölçüm standardının bulunduğu konumda Şekil 4.5 ile gösterildiği gibi mutlak gravimetre cihazı ile TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Akustik Laboratuvarı tarafından yerel yer çekimi ivme değeri belirlenmiştir. Bu kapsamda tez çalışmasında çeşitli hesaplamalarda da kullanılacak olan yerel yer çekimi ivme değeri $11 \mu\text{Gal}$ belirsizlik değeriyle $980230976,1 \mu\text{Gal}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değer $9,802309761 \text{ m/s}^2$ ivme değerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.5. Mutlak gravimetre cihazı ile yerel yer çekimi ivme değeri belirleme çalışması

4.1.3. Piston ve silindir ünitelerine ait efektif alan hesapları

Birincil seviye dinamik basınç ölçüm standardında referans dinamik basınç değerinin hesaplanabilmesi için tasarım ve üretimleri gerçekleştirilen piston ve silindir ünitelerine ait efektif alan değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu kapsamda 4 adet piston ve 4 adet silindir için 16 farklı efektif alan hesabı yapılmıştır. Hesaplanan efektif alan değerleri Tablo 3.12 ile verilen Taguchi deney tasarımında da kullanılacaktır. Piston ve silindirler için gerçekleştirilen CMM verilerinden x, y koordinatları kullanılarak elde edilen yarıçap değerleri z eksenini boyunca değerlendirilip farklı kombinasyonlarda kıyaslandığında piston yarıçap değerlerinin oldukça birbirine yakın olduğu görülmektedir. Silindir yarıçap değerlerinde ise 15 mikrometre kadar değişim bulunmaktadır. Bunun sebebi pistonun krom kaplamalı olarak 10 milimetre çapında hazır malzeme olarak temin edilmesidir. Daha önce de belirtildiği gibi piston malzemesi oldukça iyi yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Silindirde ise üretim kaynaklı farklılıklar bulunmaktadır. 2 numaralı pistonun yarıçap değerlerine karşı 2, 3, 4 ve 5 numaralı silindirlerin yarıçap değerlerinin oluşturduğu farklı kombinasyonlar Şekil 4.6 ile verilmiştir.



Şekil 4.6. 2 numaralı pistonun yarıçap değerlerine karşı 2, 3, 4 ve 5 numaralı silindirlerin yarıçap değerlerinin oluşturduğu farklı kombinasyonlar

Piston yüzey pürüzlülüğü çok iyi olduğundan neredeyse tüm pistonlar bu ölçekte birbirine yakın değerlerde görünmektedir, bu yüzden grafiklerde sadece silindir yarıçap değerlerindeki farklılıklara dikkat çekilmiştir. Şekil 4.6 ile verilen grafiklerde x eksenini ile piston ve silindirlerin eş çalışma uzunluk değeri olan 28 milimetre değeri esas alınarak gösterilmiştir. Grafiklerde silindir ve piston arasındaki boşluğun farklı bölümlerde yaklaşık 5 ila 20 mikrometre olarak değiştiği gözlemlenmektedir.

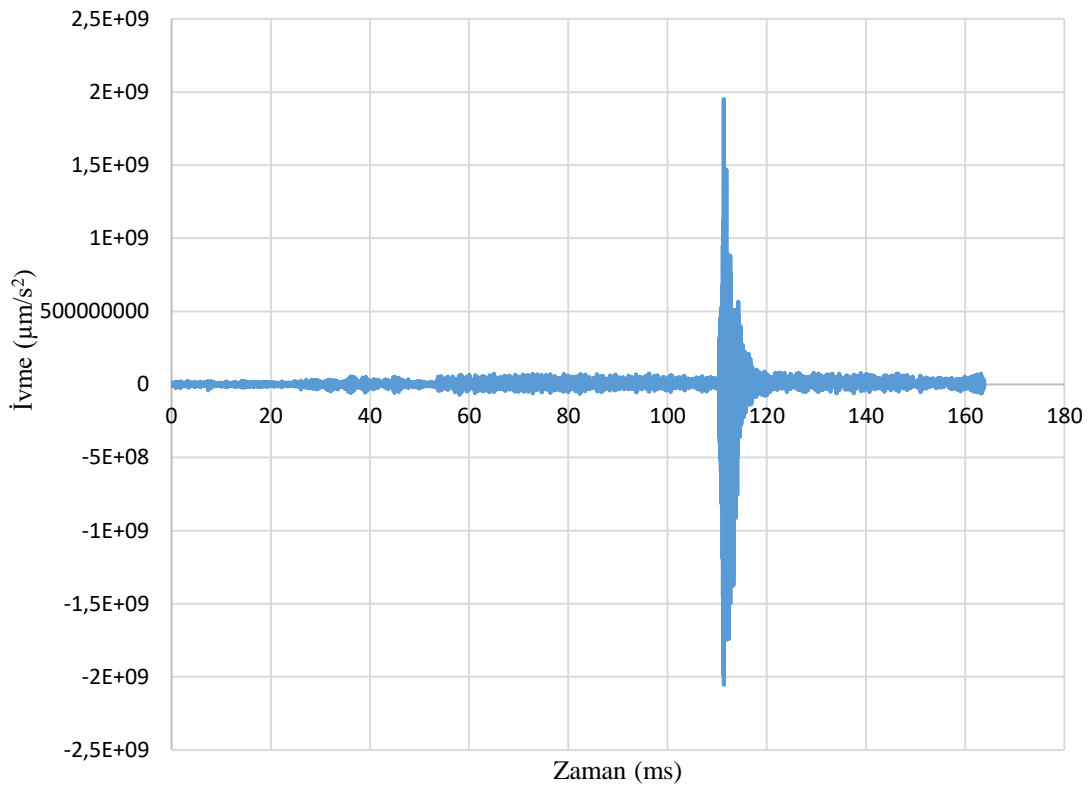
Piston ve silindir ünitelerine ait efektif alan değerlerini hesaplamak için 3.4.2.3 bölüm başlığı altında Eşitlik (7) ile $A_0 = \pi r_0^2 \left[1 + \frac{h_0}{r_0} + \frac{1}{r_0 l} \int_0^l (u(x) + U(x)) dx \right]$ olarak gösterilen Dadson teorisi kullanılmıştır. Eşitlik (7) içerisinde bulunan integral değerini hesaplayabilmek için Eşitlik (11) $I_1 = w \sum_{i=0}^n \frac{u(x_i) + 3u(x_{i+1}) + 3u(x_{i+2}) + u(x_{i+3})}{8}$ ve Eşitlik (12) $I_2 = w \sum_{i=0}^n \frac{U(x_i) + 3U(x_{i+1}) + 3U(x_{i+2}) + U(x_{i+3})}{8}$, den faydalanılmıştır. Eşitlik (7)'de integral değerinin dışında belirtilen diğer parametreler, r_0 pistonun yarıçap değeri, h_0 değeri $z=0$ noktasında piston ve silindir arasındaki radyal boşluk değeri, l ise pistonun ve silindirin eş çalışma uzunluk değeridir. Eşitlik (11) ve Eşitlik (12)'de ise w değeri veri bölümünün genişliğini göstermektedir. Farklı piston ve silindir kombinasyonları için belirlenen parametreler ve bu parametrelerle hesaplanan efektif alan değerleri Tablo 4.5 ile verilmiştir.

Tablo 4.5. Farklı piston ve silindir kombinasyonları için belirlenen parametreler ve bu parametrelerle hesaplanan efektif alan değerleri

| | w | r_0 (mm) | h_0 (mm) | l (mm) | I_1 | I_2 | I | A_0 (mm ²) |
|-------------|-----|------------|------------|----------|-------|--------|--------|--------------------------|
| p2s2 | 0,1 | 4,991 | 0,014 | 28,0 | 0,003 | 0,041 | 0,04 | 78,50 |
| p2s3 | 0,1 | 4,991 | 0,013 | 28,0 | 0,003 | -0,001 | 0,002 | 78,46 |
| p2s4 | 0,1 | 4,991 | 0,009 | 28,0 | 0,003 | -0,020 | -0,02 | 78,39 |
| p2s5 | 0,1 | 4,991 | 0,011 | 28,0 | 0,003 | 0,012 | 0,01 | 78,44 |
| p3s2 | 0,1 | 4,992 | 0,013 | 28,0 | 0,002 | 0,041 | 0,04 | 78,51 |
| p3s3 | 0,1 | 4,992 | 0,009 | 28,0 | 0,002 | -0,020 | -0,02 | 78,40 |
| p3s4 | 0,1 | 4,992 | 0,009 | 28,0 | 0,002 | -0,020 | -0,02 | 78,40 |
| p3s5 | 0,1 | 4,992 | 0,011 | 28,0 | 0,002 | 0,012 | 0,01 | 78,45 |
| p4s2 | 0,1 | 4,992 | 0,013 | 28,0 | 0,019 | 0,041 | 0,06 | 78,52 |
| p4s3 | 0,1 | 4,992 | 0,012 | 28,0 | 0,019 | -0,001 | 0,02 | 78,48 |
| p4s4 | 0,1 | 4,992 | 0,008 | 28,0 | 0,019 | -0,020 | -0,001 | 78,41 |
| p4s5 | 0,1 | 4,992 | 0,010 | 28,0 | 0,019 | 0,012 | 0,03 | 78,46 |
| p5s2 | 0,1 | 4,991 | 0,014 | 28,0 | 0,006 | 0,041 | 0,05 | 78,50 |
| p5s3 | 0,1 | 4,991 | 0,009 | 28,0 | 0,006 | -0,020 | -0,01 | 78,40 |
| p5s4 | 0,1 | 4,991 | 0,009 | 28,0 | 0,006 | -0,020 | -0,01 | 78,40 |
| p5s5 | 0,1 | 4,991 | 0,011 | 28,0 | 0,006 | 0,012 | 0,02 | 78,45 |

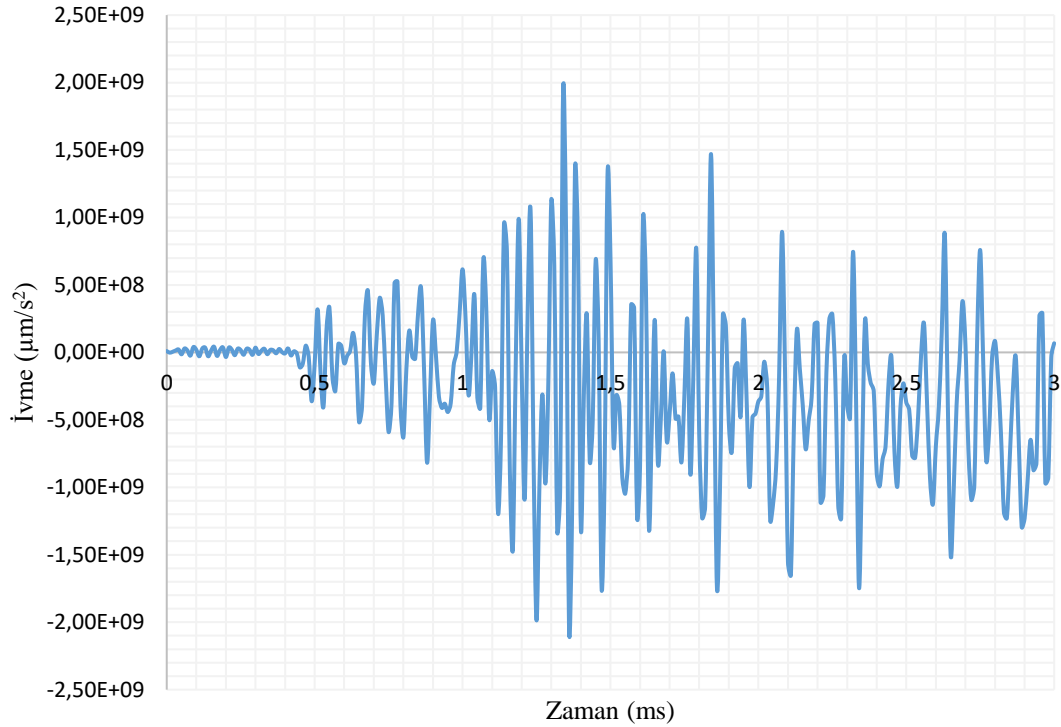
4.1.4. Lazer interferometrelerden elde edilen ivme sinyallerinin analizi

Birincil seviye dinamik basınç ölçüm standardı ile referans dinamik basıncı doğru bir şekilde hesaplayabilmek için gerekli önemli parametrelerden efektif alan değerlerinin hesaplamalarından sonra diğer önemli bir parametre olan sinyalin pik yaptığı noktadaki mutlak maksimum ivme değerini doğru bir şekilde hesaplamak gerekmektedir. Laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmalarda ve Şekil 4.4 ile gösterildiği gibi referans dinamik basınç hesabını etkileyen en önemli parametrenin a değeri olduğu belirlenmiştir. Öyle ki Şekil 4.3 ile de gösterildiği gibi 500 bar basınç değerinde ivmedeki 10 m/s^2 lik bir değişim yaklaşık olarak % 2'lik bir hataya sebep olmaktadır. Bu yüzden lazer interferometrelerden elde edilen ivme sinyalleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve optimum ivme değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.7 ile kütle piston üzerine düşürülüp pistona çarparken, alçak geçişli filtreleme (LPF) kullanılmadan lazer interferometrenin bir kanalından elde edilen, zamana karşı ivme değerlerini gösteren bir sinyal örneği gösterilmektedir.



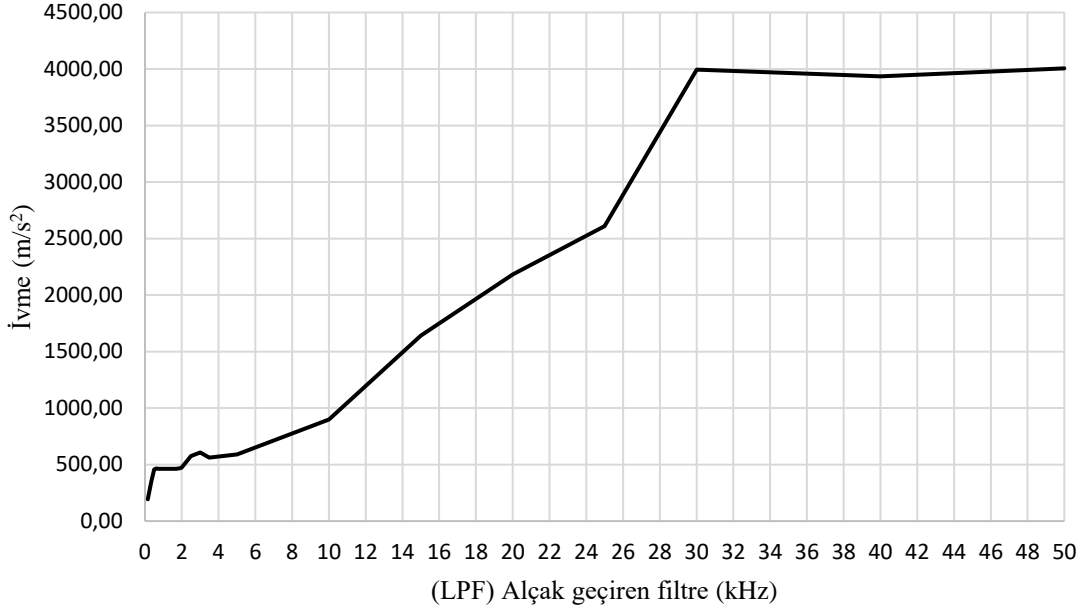
Şekil 4.7. Alçak geçişli filtre (LPF) kullanılmadan lazer interferometrenin bir kanalından elde edilen ivme sinyali örneği

Şekil 4.7 ile gösterilen sinyale tepe noktasından yaklaşırsak yeni sinyal Şekil 4.8 ile gösterildiği gibi olmaktadır.



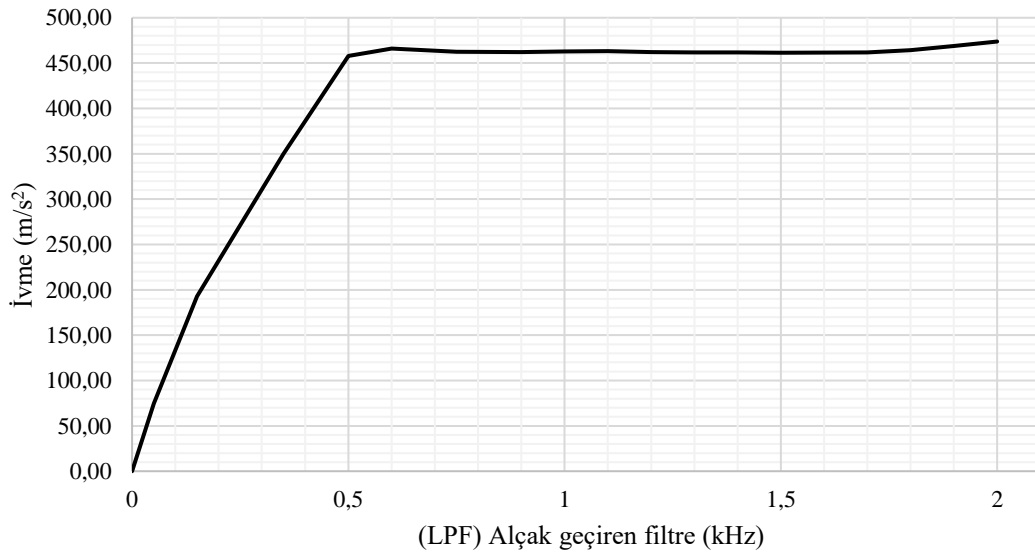
Şekil 4.8. Alçak geçişli filtre (LPF) kullanılmadan lazer interferometrenin bir kanalından elde edilen örnek sinyalin pik yaptığı noktadan yakınlaştırılmış görünümü

Sinyallerde her zaman bazı istenmeyen bileşenler bulunabilir. İstenmeden iletilen bu tür sinyallere parazit sinyaller veya gürültü adı verilmektedir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 ile gösterilen grafiklerde açıkça görüldüğü gibi mutlak maksimum ivme değeri çok yüksektir ve sinyal üzerindeki gürültü nedeniyle böyle bir sinyalden aradığımız tepe değerini hesaplamak mümkün olmamaktadır. Yani sinyalin uygun bir alçak geçiren filtre ile filtrelenmesi gerekmektedir. Ancak burada başka bir sorun vardır, uygun bir kesme frekansının belirlenebilmesi. Alçak geçiren filtreler, uygulandığı sinyalde belirlenen frekansın altındaki tüm değerleri geçiren, üstündeki değerleri zayıflatan filtrelerdir. Bu nedenle mutlak maksimum ivme değerinin doğru hesaplanabilmesi için sinyaldeki önemli ivme verilerinin kaybolmaması gerekmektedir ve bunun için en uygun kesme frekansı belirlenmelidir. Lazer interferometrelerden elde edilen ivme sinyalleri üzerindeki gürültü faktörünü minimize edebilmek ve bu nedenle alçak geçiren filtrelerde kullanılacak olan kesme frekansını belirlemek için yapılan çalışma Şekil 4.9 ile gösterilmiştir.



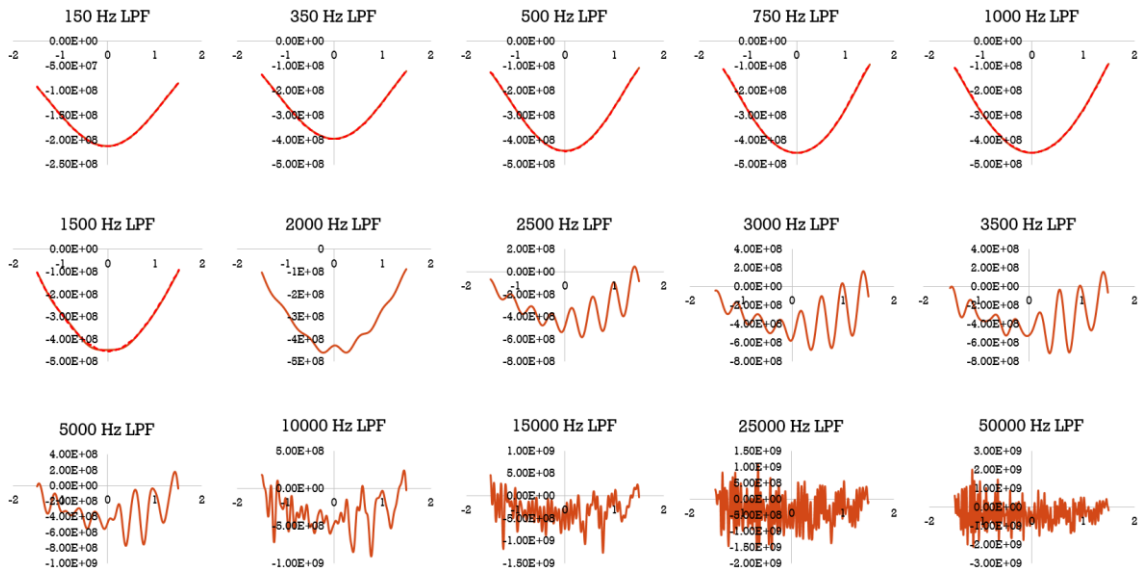
Şekil 4.9. Alçak geçiren filtre (LPF) için kesme frekansı (cut-off) belirleme çalışması

Şekil 4.9 ile verilen grafikte lazer interferometre ile elde edilen ivme sinyallerine farklı kesme frekanslarına sahip alçak geçiren filtreler uygulanarak mutlak maksimum noktadaki ivme değerleri incelenmiştir. Şekil 4.10 ile de Şekil 4.9 ile verilen grafik değerlerinden elde edilen (0-2) kHz aralığında alçak geçiren filtrelere karşı mutlak maksimum ivme değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.10. (0-2) kHz aralığında alçak geçiren bir filtre (LPF) için kesme frekansının (cut-off) belirlenmesi.

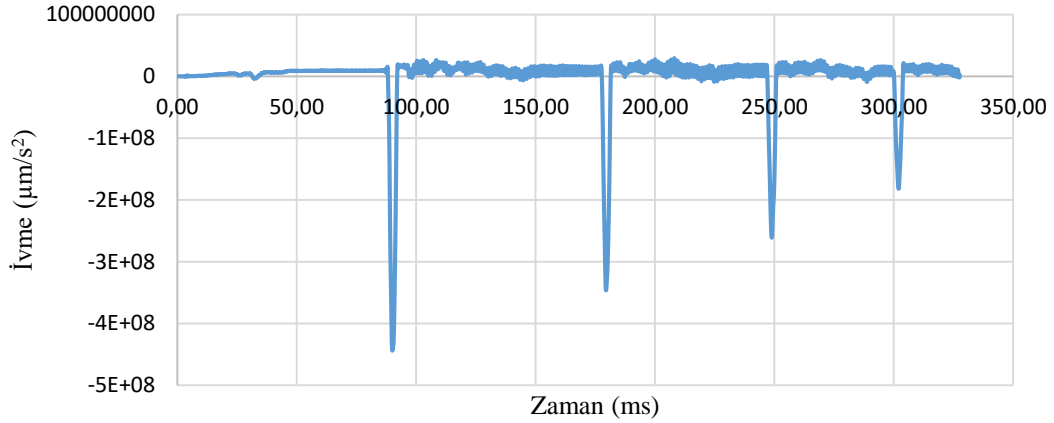
Şekil 4.10 ile verilen grafikten elde edilen verilere göre ivme tespit çalışmalarında kullanılacak olan kesme frekansı değeri 1500 Hz olarak belirlenmiştir. Birincil seviye dinamik basınç ölçüm standardında kullanılacak bizim için önemli olan aralık, alçak geçiren filtre kesme frekansı değeri değıştikçe çok fazla değışmeyen aralıktır (Elkarous ve ark., 2016). Ancak burada bir diğeri önemli husus, düşük kesme frekans değerine sahip bir alçak geçiren filtre seçildiğinde sinyal gürültü oranının azalması ve tepe noktasındaki gerçek mutlak maksimum ivme verisinin kaybolma riskinin artmasıdır. Bu nedenle düşük kesme frekans değerine sahip alçak geçiren filtre değerlerinde, verilerde çok fazla değışiklik olmasa bile farklı sinyaller ve örnekleme frekansları için durumun değışebileceği unutulmamalıdır. 1500 Hz kesme frekans değerine sahip alçak geçiren filtre değerinin üzerinde örneğin 2000 Hz'de mutlak maksimum ivme verilerindeki değışim henüz başlamamıştır ancak Şekil 4.10 ile verilen grafikte görüldüğü gibi bu nokta neredeyse değışimin başladığı sınır noktasıdır. Ayrıca Şekil 4.9 ile verilen grafikte olduğu gibi alçak geçiren filtre kesme frekans değeri arttıkça veride önemli bir gürültü faktörü ortaya çıkmakta ve sinyalden doğru veriyi almak neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Farklı kesme frekans değerleri kullanılarak alçak geçiren filtreler ile filtrelenen örnek bir sinyalin tepe formunu ve değerlerini gösteren grafik Şekil 4.11 ile verilmiştir.



Şekil 4.11. Farklı alçak geçiren filtre kesme frekans değerleriyle filtrelenen sinyalin tepe formunu ve değerlerini gösteren grafik

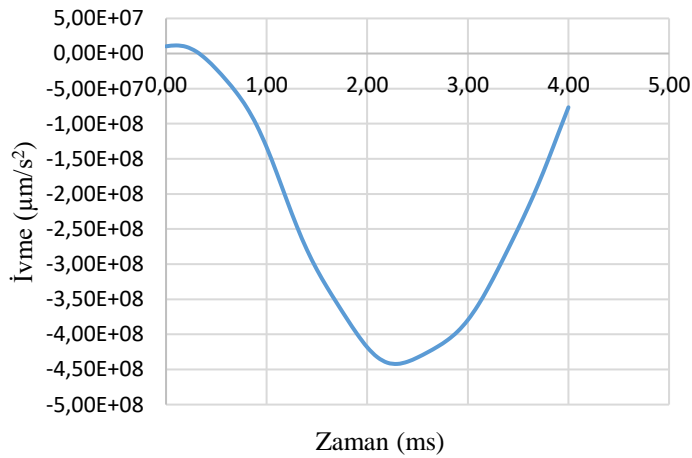
Şekil 4.11 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi 1500 Hz değerinden sonraki kesme frekansı değeri kullanılarak alçak geçiren filtre uygulanmış sinyaller giderek bozulmaya başlamaktadır. Bu nedenle 1500 Hz kesme frekansına sahip alçak geçiren

filtre tez çalışmamız kapsamında birincil seviye dinamik basınç standardımız için uygundur. Lazer interferometrenin bir kanalından elde edilen bir başka sinyali ele alırsak ve bu sinyale 1500 Hz kesme frekans değerine sahip bir alçak geçiren filtre uygularsak elde edilen yeni sinyal Şekil 4.12 ile gösterildiği gibidir.



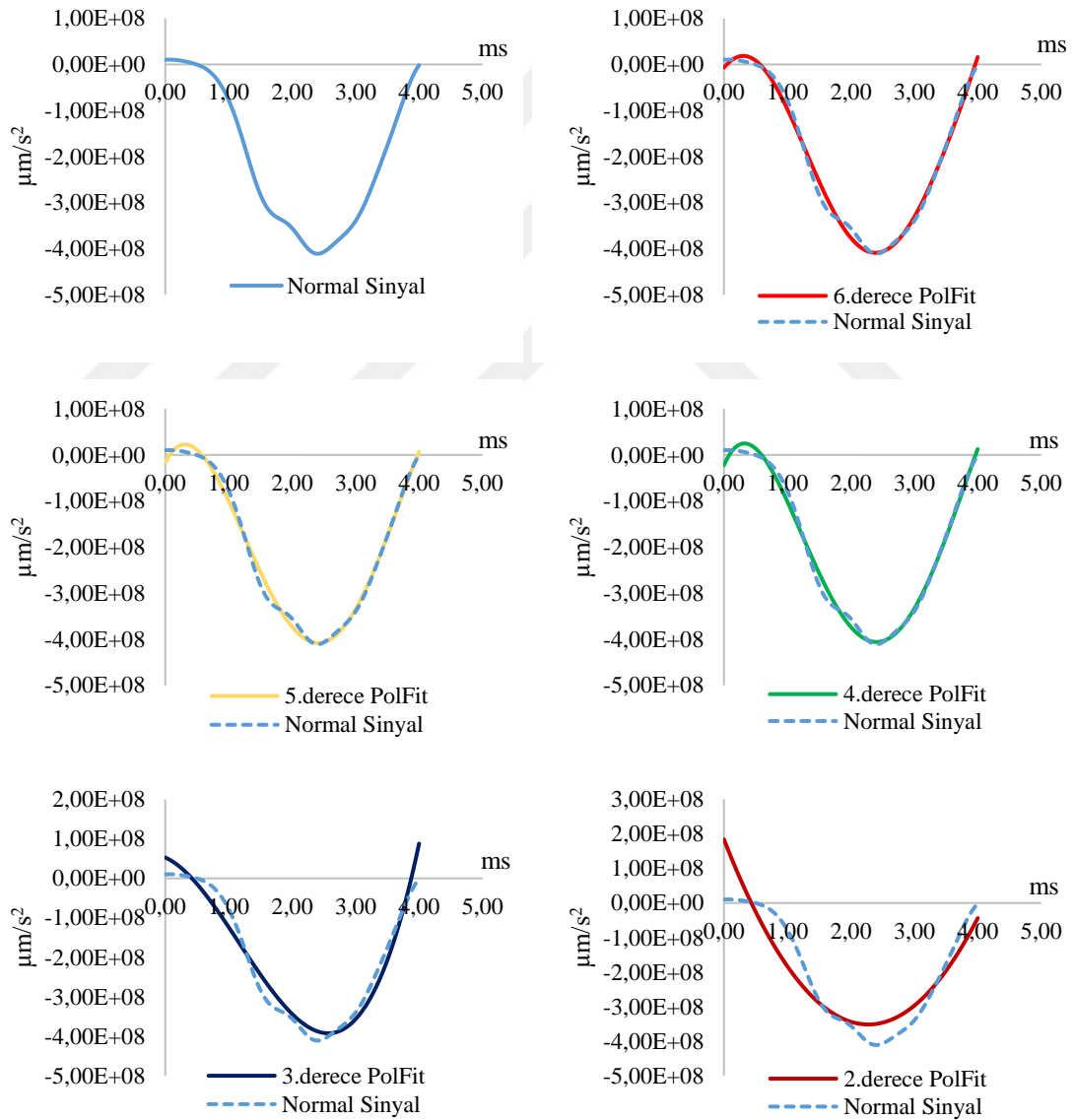
Şekil 4.12. Lazer interferometrenin bir kanalından ele edilen 1500 Hz kesme frekans değerine sahip alçak geçiren filtre uygulanmış örnek bir ivme sinyali

Şekil 4.12 ile verilen grafikteki ivme sinyalinin mutlak maksimum noktasını daha da büyütürsek sinyalin bu tepe noktasını daha yakından görebilir ve şeklini inceleyebiliriz. Şekil 4.13 ile verilen grafikte Şekil 4.12 ile gösterilen grafikteki ivme sinyalinin mutlak maksimum noktasının yakınlaştırılmış kısmı yaklaşık 4 ms zaman diliminde pencereleştirilerek gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Şekil 4.12 ile gösterilen grafikteki ivme sinyalinin mutlak maksimum noktasının yakınlaştırılmış kısmı

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda lazer interferometrelerden elde edilen ivme sinyalleri 1500 Hz kesme frekansı değerine sahip alçak geçiren filtre kullanılarak analiz edilmiştir. Tez kapsamında ayrıca Şekil 4.13 ile verilen sinyalde görüldüğü gibi sinyallerde kısmen form bozukluğu görülmektedir. Bu durumun referans dinamik basınç üzerinde etkisi olup olmadığının araştırılması için sinyallerin mutlak maksimum olduğu aralıklar pencereyenerek 2. dereceden 6. dereceye kadar polinomsal eğri uydurma yöntemi ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Polinomsal eğri uydurma yöntemi ile düzeltme yapılmış bir ivme sinyaline ait farklı derecelerdeki durumlar Şekil 4.14 ile verilmiştir.



Şekil 4.14. Aynı pik bölgesine uygulanan farklı derecelerdeki eğri uydurma grafikleri (1500 Hz LPF uygulanmıştır)

Şekil 4.14 ile gösterilen grafiklerde kullanılan katsayı değerleri Tablo 4.6 ile verilmiştir.

Tablo 4.6. Şekil 4.14 ile gösterilen grafiklerde kullanılan katsayı değerleri

| x^6 | x^5 | x^4 | x^3 | x^2 | x | o |
|---------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| 2280116 | -28954438 | 119025065 | -109966942 | -234062090 | 161330000 | -6841007 |
| | -1593049 | -5223419 | 154383880 | -496794362 | 264871802 | -16211665 |
| | | -21153905 | 210955868 | -581338514 | 312704912 | -22366962 |
| | | | 41724624 | -146891692 | -71232428 | 52696224 |
| | | | | 103456054 | -470790769 | 184218916 |

Tablo 4.6 ile verilen katsayı değerlerinin kullanımı ile ilgili örneğin 6. dereceden polinomsal eğri uydurma yöntemi ile işlem yapmış olalım. Buradaki kullanım Eşitlik (16) ile gösterildiği şekilde olacaktır.

$$y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + o \quad (16)$$

Eşitlik (16)'da y değeri 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi kullanılarak hesaplanacak olan ivme değerini göstermektedir. x değeri ise ms cinsinden zaman değeridir. Bu formül sinyal süresi boyunca ayrı ayrı uygulanır ve elde edilen yeni ivme değerlerinden yeni sinyal çizdirilir. Eşitlik (16)'da verilen katsayıların Tablo 4.6 üzerindeki kullanımı da Tablo 4.7 ile verilmiştir. Farklı derecelerde hesaplamalar içinde aynı yöntem kullanılmaktadır.

Tablo 4.7. 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi için kullanılan katsayılar

| a | b | c | d | e | f | o |
|----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|----------|
| 2280116 | -28954438 | 119025065 | -109966942 | -234062090 | 161330000 | -6841007 |

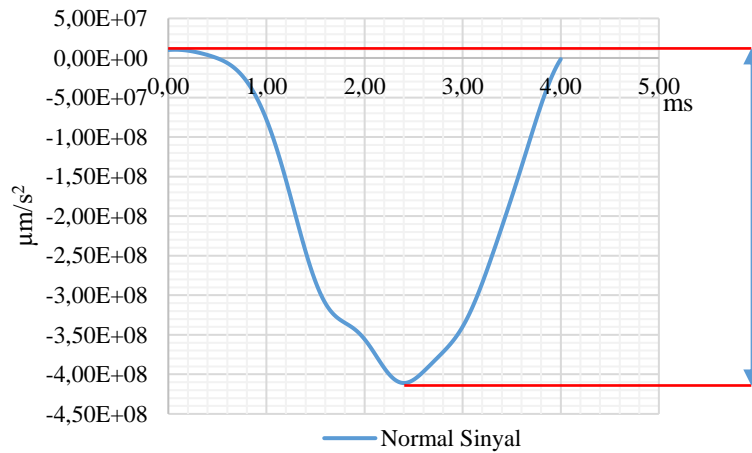
Şekil 4.14 ile verilen yaklaşım tez çalışması kapsamında elde edilen bütün ivme sinyallerinin her birinden elde edilen katsayılarından faydalanılarak ivme sinyallerine ayrı

ayrı uygulanmıştır. Referans dinamik basınç hesaplarında da bu yaklaşımlar kullanılarak kıyaslama amaçlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsamda Şekil 4.14 ile verilen ivme sinyallerinde referans dinamik basınç hesabında kullanılacak olan sinyallerin negatif yönde pik yaptığı noktadaki ivme değerleri normal sinyal ve 2. dereceden 6. dereceye kadar polinomsal eğri uydurma yöntemleriyle beraber Tablo 4.8 ile verilmiştir.

Tablo 4.8. Şekil 4.14 ile gösterilen grafiklerden elde edilen negatif yöndeki pik değerleri

| Normal | 6.derece | 5.derece | 4.derece | 3.derece | 2.derece |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² |
| -410,95 | -408,88 | -408,02 | -405,97 | -392,31 | -351,38 |

Tablo 4.8 ile verilen değerler Şekil 4.14 ile verilen grafikte x ekseninden başlayarak hesaplanan ivme değerleridir. Sinyalin negatif yönde olması tamamen lazer interferometrelerin konumlandırılmalarıyla ilgilidir. Fakat Şekil 4.14 ile verilen grafikler dikkatle incelenirse serbest düşen kütlenin pistonu çarpmasından önce yerçekimine bağlı olarak yukarı (pozitif) yönlü bir ivmelenme görülmektedir. Bu değer yerel yerçekimi ivme değeri olması gerekmektedir. Fakat gerek serbest düşmeye başlayan kütle ile kılavuz miller arasındaki sürtünme gerekse sinyaldeki gürültü faktöründen dolayı bu değer aşağı ya da kısmen yukarı yönlü değişebilmektedir. Çarpmadan önceki bu ivme değeri ölçülmezse ve hesaba katılmazsa referans basınç hesabı güvenilir olmayacaktır. Bu kapsamda tez çalışmasında gerçekleştirilen ölçümlerde referans dinamik basınç hesabı yapılırken ivme sinyallerinden elde edilen ve Şekil 4.15 ile gösterildiği gibi tepe noktasından tepe noktasına (peak to peak) durum dikkate alınmıştır.



Şekil 4.15. İvme sinyali üzerinde mutlak maksimum ivme değerinin belirlenmesinde dikkate alınan noktaların gösterimi

Şekil 4.14 ile verilen grafiklerden elde edilen ve Tablo 4.8 ile gösterilen ivme değerleri, Şekil 4.15 ile verilen grafikteki noktalar baz alınarak hesaplandığında ve Tablo 4.8 ile gösterilen ivme değerleri ile kıyaslandığında Tablo 4.9 ile verilen değerler elde edilmektedir.

Tablo 4.9. İvme sinyali üzerinde farklı noktalarda ivme hesabı

| | Normal | 6.derece | 5.derece | 4.derece | 3.derece | 2.derece |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² |
| Tablo 4.8 | -410,95 | -408,88 | -408,02 | -405,97 | -392,31 | -351,38 |
| Peak to peak | -421,35 | -427,30 | -430,69 | -430,83 | -480,18 | -535,60 |
| Fark | -10,40 | -18,42 | -22,67 | -24,86 | -87,88 | -184,22 |

Tablo 4.9 ile verilen değerlerden normal sinyal üzerinden elde edilen ivme değerleri incelendiğinde eğer tepe noktasından tepe noktasına (peak to peak) durum dikkate alınmazsa mutlak olarak 10,4 m/s²'lik bir ivme değeri kaybıyla referans dinamik basınç hesabı gerçekleştirilecektir. Bu durum Şekil 4.3 ile verilen grafik dikkate alındığında 500 bar gibi bir basınç değerinde referans dinamik basınç hesabında yaklaşık % 2'lik bir hataya sebep olacaktır.

Daha önce Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35 ile de gösterildiği gibi serbest düşen kütle üzerine monte edilmiş olan alüminyum plakada 120 derece açı ile yerleştirilmiş üç adet lazer interferometre bulunmaktadır ve serbest düşen kütlenin zamana karşı konum bilgilerini ölçerek buradan üç farklı kanaldan da ivme sinyallerini vermektedir. Üç ayrı konumda bulunan bu lazer interferometrelerden alınan veriler serbest düşen kütlenin pistonu çarpma anında eğilmesi nedeniyle biraz farklılıklar göstermektedir. Fakat genel olarak sinyaller arasındaki zamansal kayma mikro saniyeler mertebesinde olup genlik farkları ise üç ayrı lazer interferometrenin birbiri arasında değerlendirmesine ve nominal basınç değerine göre % 0,5 ile % 2 arasında değişmektedir. Lazer interferometrelerden elde edilen ivme sinyallerindeki bu farklılık referans dinamik basınç hesapları ayrı ayrı değerlendirildiğinde de az miktarda farklılık göstermektedir. Fakat bu sorun üç farklı kanaldan elde edilen mutlak maksimum ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak rahatlıkla aşılmaktadır. Bu kapsamda tez çalışmasında referans dinamik basınç hesaplarında baz alınacak asıl değerler lazer interferometrelerin üç kanalından da alınan

verilerin ortalamaları olacaktır. Bununla beraber deneylerden elde edilen veriler üç kanalda ortalamaları olacağı gibi üç kanaldan elde edilen veriler de ayrıca paylaşılacaktır.

Gerçekleştirilen deneylerde daha önce Şekil 3.46 ile gösterilen Kistler üretimi olan piezoelektrik prensibi ile çalışan Kistler 6229AK (5000 bar) ve Kistler 6213BK (8000 bar) dinamik basınç sensörleri kullanılmıştır. Taguchi deney tasarımı dikkate alınarak gerçekleştirilen deneylerde Kistler 6229AK dinamik basınç sensörü ile alınan dinamik basınç verileri, hesaplanan referans dinamik basınç değerleri ile karşılaştırılmak amacıyla kullanılmıştır.

4.2. Taguchi Metodu Kullanılarak Optimum Parametre Belirleme Çalışması

Referans dinamik basınç hesabı için gerekli olan tüm parametreler belirlendikten sonra daha önce Bölüm 3.6 ile anlatılan Taguchi Metodu ile Parametrelerin Belirlenmesi çalışmasında gerekli olan gözlem değerleri gerçekleştirilen referans dinamik basınç hesaplarıyla elde edilmiştir. Taguchi deney tasarımında belirtilen farklı faktör ve seviyelerine ait deneylerde referans dinamik basınç hesabında kullanılan ivme değerleri Tablo 4.10 ile verilmiştir. Sonuçların güvenilirliği açısından deney tasarım sırasında bulunan her bir ölçüm beş kere tekrar edilmiştir.

Tablo 4.10. Taguchi deney tasarımı ölçümlerinde elde edilen ivme değerleri

| Taguchi Deney Tasarım Sırası | 1.ölçüm | 2.ölçüm | 3.ölçüm | 4.ölçüm | 5.ölçüm | Ortalama |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² | m/s ² |
| 1 | 464.32 | 461.79 | 461.65 | 463.55 | 465.63 | 463.39 |
| 2 | 467.81 | 457.52 | 459.06 | 458.29 | 460.61 | 460.66 |
| 3 | 464.52 | 461.96 | 464.36 | 470.06 | 470.10 | 466.20 |
| 4 | 469.93 | 467.53 | 469.94 | 475.44 | 479.87 | 472.54 |
| 5 | 463.35 | 458.12 | 455.95 | 456.51 | 457.79 | 458.34 |
| 6 | 478.97 | 468.53 | 464.68 | 461.89 | 465.84 | 467.98 |
| 7 | 475.31 | 465.06 | 474.71 | 478.07 | 481.97 | 475.03 |
| 8 | 453.16 | 453.37 | 459.61 | 469.14 | 474.56 | 461.97 |
| 9 | 325.80 | 326.87 | 328.05 | 330.96 | 332.62 | 328.86 |
| 10 | 330.72 | 332.70 | 335.07 | 337.48 | | 333.99 |
| 11 | 330.79 | 325.41 | | 325.62 | 324.87 | 326.67 |
| 12 | 339.17 | 332.99 | 333.63 | 335.78 | 335.74 | 335.46 |
| 13 | 349.60 | 361.29 | 372.56 | | | 361.15 |
| 14 | 364.04 | 368.79 | 392.45 | | | 375.09 |
| 15 | 343.88 | 356.36 | 364.31 | 370.41 | 379.63 | 362.92 |
| 16 | 336.23 | 339.66 | 345.80 | 352.51 | 360.24 | 346.89 |

Tablo 4.10 ile verilen değerler için Taguchi deney tasarımında belirtilen 16 farklı deneyde sonuçların güvenilirliği açısından 5'er kez tekrar yapılarak toplam 80 ölçüm alınmıştır. Alınan her ölçümde de üç adet lazer interferometre kanalı bulunmakta ve bu kanallar ayrı ayrı analiz edilmektedir. Tablo 4.10 ile verilen değerler lazer interferometrenin üç kanalından da elde edilen değerlerin ortalamasıdır ve bu değerler mutlak olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak toplamda 240 farklı veri incelemesi sağlanmıştır. Bu verilerden farklı ölçümlerde altında deneyler sonrası gerçekleştirilen ivme analizlerinde ivme değerinde pik durumun yakalanamadığı tespit edilmiş ve bu yüzden hesaplamalara katılmamıştır. Ancak referans basınç değerleri hesaplanırken tekrarlanan ölçümlerin ortalamaları kullanılacağından sonuçlar bu durumdan etkilenmeyecektir.

Tablo 4.10 ile verilen ivme değerleri kullanılarak referans dinamik basınç değerleri hesaplanmıştır ve Taguchi metodu ile gerçekleştirilen çalışmada gözlem değerleri olarak Tablo 4.11 ile verilmiştir.

Tablo 4.11. Gözlem değerleri

| Taguchi Deney Tasarım Sırası | 1.ölçüm | 2.ölçüm | 3.ölçüm | 4.ölçüm | 5.ölçüm |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | bar | bar | bar | bar | bar |
| 1 | 520,82 | 518,01 | 520,64 | 526,90 | 526,95 |
| 2 | 519,78 | 514,03 | 511,65 | 512,26 | 513,68 |
| 3 | 383,69 | 376,91 | 377,61 | 379,98 | 379,93 |
| 4 | 380,23 | 384,00 | 390,74 | 398,12 | 406,61 |
| 5 | 394,59 | 407,43 | 419,80 | | |
| 6 | 368,96 | 370,14 | 371,44 | 374,64 | 376,46 |
| 7 | 521,25 | 518,47 | 518,31 | 520,40 | 522,69 |
| 8 | 532,99 | 521,73 | 532,34 | 536,03 | 540,32 |
| 9 | 526,61 | 523,98 | 526,62 | 532,66 | 537,52 |
| 10 | 536,79 | 525,32 | 521,09 | 518,04 | 522,37 |
| 11 | 374,38 | 368,47 | | 368,70 | 367,87 |
| 12 | 388,52 | 402,24 | 410,97 | 417,66 | 427,79 |
| 13 | 410,46 | 415,68 | 441,65 | | |
| 14 | 374,38 | 376,56 | 379,17 | 381,81 | |
| 15 | 525,11 | 513,79 | 515,48 | 514,64 | 517,19 |
| 16 | 508,67 | 508,90 | 515,76 | 526,24 | 532,18 |

Taguchi deney tasarımı ile belirtilen deneylerden elde edilen gözlem değerleri hesaplandıktan sonra bu değerler Minitab programında gerekli alana girilmiş ve analiz gerçekleştirilmiştir. Taguchi metodu, sinyal-gürültü (S/N) oranını tercih edilen kalite özelliği olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni ortalama azaldıkça standart sapma değerinin de azalması veya bunun tam tersidir. Bu nedenle Taguchi metodunda standart sapma yerine ölçülebilir bir değer olarak sinyal gürültü oranı kullanılmaktadır (Ghani ve ark., 2004). Sinyal gürültü oranı, gürültünün yanıt üzerindeki etkisini en aza indiren kontrol faktörü ayarlarını belirlemek için kullanılabilen bir sağlamlık ölçüsüdür. Sinyal faktörü sistemden alınan gerçek değeri, gürültü faktörü ise deneysel tasarıma dahil edilemeyen ancak test sonucunu etkileyen faktörleri ifade etmektedir. Gürültü kaynakları, istenilen performans özelliklerinin hedef değerden sapmasına neden olan değişkenlerin tamamıdır. Dolayısıyla S/N oranındaki gürültü faktörlerini ifade eden N değeri ne kadar küçük olursa, istenilen hedef değere o kadar yakın olur. Başka bir deyişle bu analizin amacı S/N oranını maksimuma çıkarmaktır. Minitab programı, Taguchi deney tasarımındaki her kontrol faktörü seviyesi kombinasyonu için ayrı bir sinyal gürültü (S/N) oranı hesaplamaktadır. Gerçekleştirilecek çalışmanın amacına bağlı olarak farklı S/N oranları arasında seçim yapmak gerekmektedir. Statik tasarımlar için Minitab programı farklı S/N oranları sağlamaktadır. Bunlar; en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal değer en iyi olarak sıralanabilir. Bu S/N oranlarından bu çalışma için en uygun olanı Eşitlik (17) ile verilen, nominal değer en iyi durumdur.

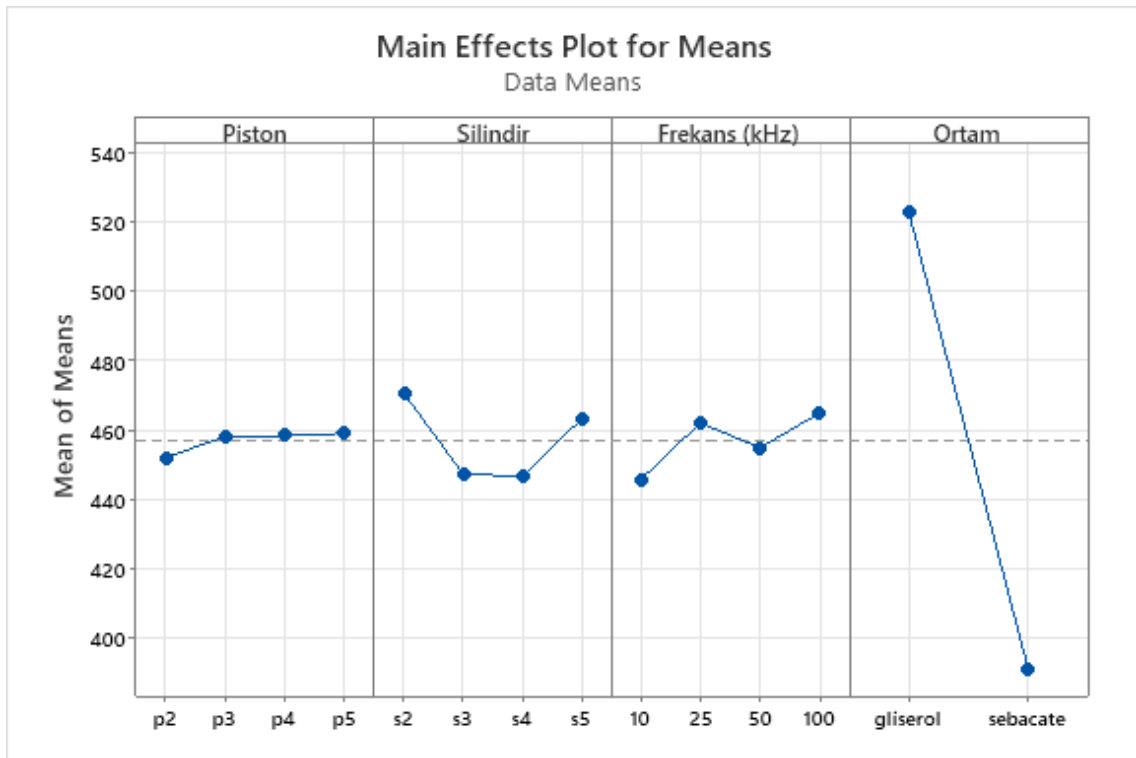
$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{s^2} \right) \quad (17)$$

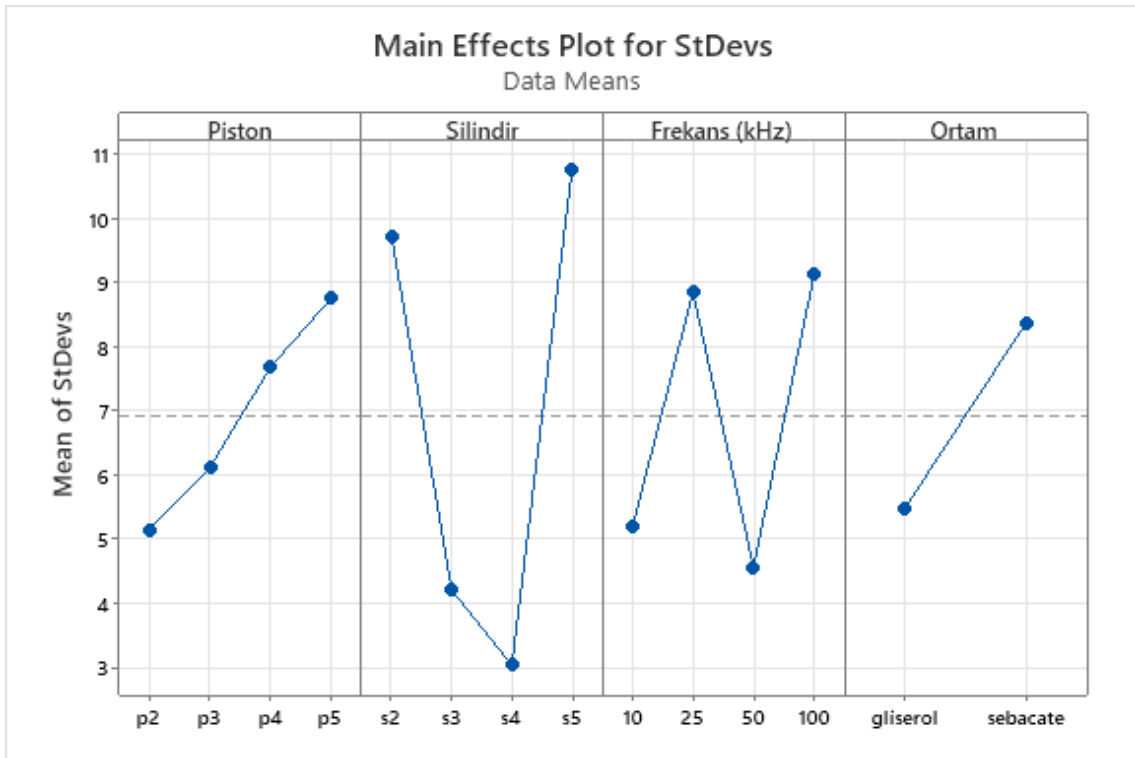
Eşitlik (17)'de S sinyal, N gürültü, \bar{Y} verilen faktör seviyesi kombinasyonu için yanıtların ortalaması ve s^2 verilen faktör seviyesi kombinasyonu için yanıtların varyansdır. Tablo 3.12 ile verilen deney tasarımı ve Tablo 4.11 ile verilen gözlem değerleri kullanılarak Minitab programı ile her seviye için hesaplanan S/N değerlerinin ortalamaları Tablo 4.12 ile verilmiştir.

Tablo 4.12. S/N değerlerinin ortalamaları

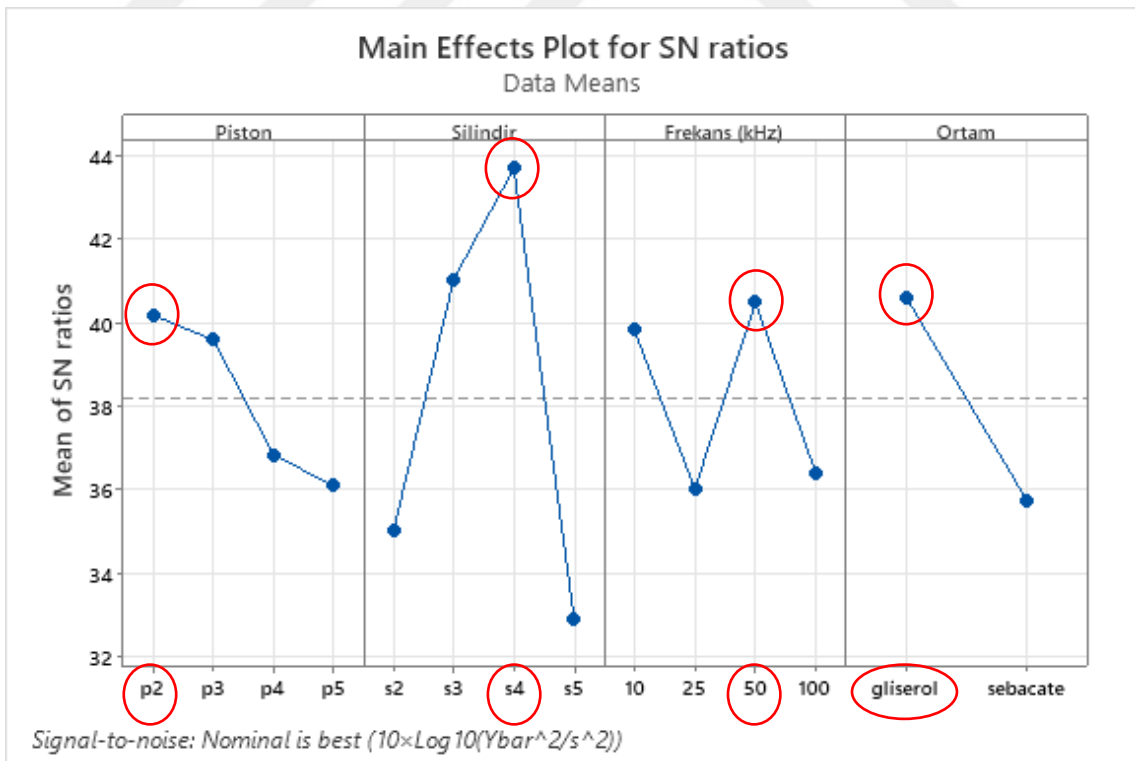
| Seviye | Piston | Silindir | Frekans | Ortam |
|--------|--------|----------|---------|-------|
| 1 | 40.17 | 35.03 | 39.82 | 40.59 |
| 2 | 39.59 | 41.04 | 36.01 | 35.75 |
| 3 | 36.83 | 43.70 | 40.48 | |
| 4 | 36.09 | 32.92 | 36.37 | |

Tablo 4.12 ile verilen değerlere dikkat edildiğinde Taguchi deney tasarımında belirtilen faktörler ilk satırda ve bu faktörlere ait seviyeler ilk sütunda gösterilmiştir. Taguchi metodunda S/N oranındaki gürültü faktörlerini ifade eden N değerinin küçük olması ve dolayısıyla S/N oranının maksimum olması beklenmektedir. Tablo 4.12 ile verilen değerler incelendiğinde sinyal gürültü oranı (S/N) en yüksek olan parametrelerin, piston faktörünün 1 numaralı seviyesi olan p2, silindir faktörünün 3 numaralı seviyesi olan s4, frekans faktörünün 3 numaralı seviyesi olan 50 kHz ve ortam faktörünün 1 numaralı seviyesi olan gliserol olduğu görülmektedir. Ayrıca yine Minitab programı ile analiz sonucu elde edilen grafikler Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ile verilmiştir.

**Şekil 4.16.** Seviye ortalamaları grafiği



Şekil 4.17. Standart sapmaların ortalamalarının grafiği



Şekil 4.18. Sinyal gürültü oranlarının ortalamalarının grafiği

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 ile verilen grafiklerde standart sapma düştükçe sinyal gürültü oranının arttığına dikkat edilmelidir. Veriler üzerinde ayrıca yine Minitab programı ile varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Varyans analizinde amaç, belirlenen performans karakteristiğini seçilen faktörlerin ve seviyelerinin nasıl etkilediğini incelemektir. Bununla beraber elde edilen sonuçların istatistiki olarak güvenilirliği de ölçülebilmektedir. Varyans analizi sonuçları Şekil 4.19 ile verilmiştir.

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
| Piston | 3 | 147.5 | 49.2 | 0.61 | 0.668 |
| Silindir | 3 | 2405.8 | 801.9 | 10.02 | 0.092 |
| Frekans | 3 | 496.0 | 165.3 | 2.07 | 0.343 |
| Ortam | 1 | 20020.9 | 20020.9 | 250.12 | 0.004 |
| Error | 2 | 160.1 | 80.0 | | |
| Total | 12 | 59067.2 | | | |

Şekil 4.19. Varyans analizi sonuçları

Şekil 4.19 ile verilen tabloda F değerleri incelendiğinde en büyük değer ortam faktörü olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre, en etkili parametrenin ortam ve en etkisiz parametrenin ise piston faktörü olduğu anlaşılmaktadır. P değerinin sıfıra yakın olması, parametrelerin etkinliğinin fazla olduğu anlamına gelmektedir. P değerlerinin 0,05'ten küçük olduğu işlemin güvenilirlik oranı % 95'dir.

4.3. Hesaplanan Referans Basınç Değerleri ile Değeri İyi Bilinen Dinamik Basınç Sensörü Değerlerinin Karşılaştırılması

Tablo 4.11 ile verilen gözlem değerleri için belirlenen referans dinamik basınç hesabında kullanılan ivme değerleri için daha önce de bahsedildiği gibi hem normal sinyal üzerinde hem de normal sinyalden elde edilen 2. dereceden 6. dereceye kadar polinomsal eğri uydurma yöntemiyle elde edilen yeni sinyaller üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan referans dinamik basınç değerleri bir başka kalibreli referans dinamik basınç sensörü ile doğrulandığından ivme sinyallerinin tüm formları bu dinamik basınç sensör verileri ile kıyaslanmıştır. Tablo 4.13 ile karşılaştırmalarda kullanılacak olan hesaplanan referans dinamik basınç değerleri paylaşılmıştır.

Tablo 4.13. Hesaplanan ortalama basınç değerleri

| Normal Sinyal bar | 6.derece fit bar | 5.derece fit bar | 4.derece fit bar | 3.derece fit bar | 2.derece fit bar |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 520,22 | 525,34 | 529,56 | 529,08 | 551,56 | 640,41 |
| 517,24 | 518,25 | 524,97 | 524,81 | 544,98 | 627,02 |
| 522,66 | 530,11 | 531,71 | 532,87 | 569,01 | 638,20 |
| 529,48 | 533,55 | 533,16 | 537,53 | 589,27 | 661,78 |
| 514,28 | 514,73 | 514,33 | 520,09 | 566,33 | 629,79 |
| 524,72 | 518,45 | 517,99 | 526,41 | 578,18 | 641,79 |
| 532,68 | 534,95 | 536,66 | 539,28 | 583,82 | 663,12 |
| 518,35 | 528,40 | 530,57 | 531,35 | 564,77 | 636,16 |
| 372,32 | 373,79 | 373,93 | 375,04 | 405,34 | 454,36 |
| 377,98 | 379,15 | 380,06 | 380,75 | 411,12 | 470,22 |
| 369,85 | 372,22 | 372,34 | 374,19 | 406,64 | 451,48 |
| 379,62 | 377,21 | 377,87 | 378,82 | 411,83 | 468,36 |
| 407,27 | 412,17 | 420,04 | 421,31 | 444,78 | 505,31 |
| 422,60 | 430,83 | 437,11 | 439,49 | 429,60 | 520,25 |
| 409,44 | 418,63 | 425,48 | 427,31 | 454,15 | 508,59 |
| 391,94 | 397,50 | 401,78 | 402,24 | 420,51 | 494,65 |

Tablo 4.13 ile verilen değerlerde her hücre üç farklı lazer interferometre kanalından alınan 5'er adet ivme verisi kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç hesabının ortalamasıdır. Dolayısıyla her hücre aslında 15 farklı referans dinamik basınç hesabının ortalamasını temsil etmektedir ve Tablo 4.13 ile verilen değerlerde polinomsal eğri uydurma yöntemiyle elde edilen ivme değerlerinden hesaplanan referans dinamik basınç verileriyle beraber toplamda 1440 veriden yararlanılmıştır. Tablo 4.13 ile verilen hesaplanan referans dinamik basınç değerleri ile ölçümlerde doğrulama amaçlı kullanılan Kistler marka 6229AK model kalibreli bir dinamik basınç sensörü (Şekil 3.46 (a)) arasındaki farkların birimsel gösterimleri Tablo 4.14 ile verilmiştir.

Tablo 4.14. Karşılaştırma değerleri farklarının bar birimi cinsinden gösterimi

| Normal Sinyal | 6.derece fit | 5.derece fit | 4.derece fit | 3.derece fit | 2.derece fit | 6229AK |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| bar | bar | bar | bar | bar | bar | bar |
| 2,42 | 7,54 | 11,76 | 11,28 | 33,76 | 122,61 | 517,80 |
| 4,64 | 5,65 | 12,37 | 12,21 | 32,38 | 114,42 | 512,60 |
| -7,14 | 0,31 | 1,91 | 3,07 | 39,21 | 108,40 | 529,80 |
| 1,28 | 5,35 | 4,96 | 9,33 | 61,07 | 133,58 | 528,20 |
| 3,48 | 3,93 | 3,53 | 9,29 | 55,53 | 118,99 | 510,80 |
| 6,72 | 0,45 | -0,01 | 8,41 | 60,18 | 123,79 | 518,00 |
| -0,32 | 1,95 | 3,66 | 6,28 | 50,82 | 130,12 | 533,00 |
| -15,25 | -5,20 | -3,03 | -2,25 | 31,17 | 102,56 | 533,60 |
| -6,08 | -4,61 | -4,47 | -3,36 | 26,94 | 75,96 | 378,40 |
| -1,77 | -0,60 | 0,31 | 1,00 | 31,37 | 90,47 | 379,75 |
| -7,15 | -4,78 | -4,66 | -2,81 | 29,64 | 74,48 | 377,00 |
| 2,42 | 0,01 | 0,67 | 1,62 | 34,63 | 91,16 | 377,20 |
| -7,06 | -2,16 | 5,71 | 6,98 | 30,45 | 90,97 | 414,33 |
| -5,40 | 2,83 | 9,11 | 11,49 | 1,60 | 92,25 | 428,00 |
| -8,36 | 0,83 | 7,68 | 9,51 | 36,35 | 90,79 | 417,80 |
| -4,66 | 0,90 | 5,18 | 5,64 | 23,91 | 98,05 | 396,60 |

Tablo 4.14 ile verilen değerlerde son sütuna bakılırsa Kistler 6229AK dinamik basınç sensör verileri görülmektedir. Bu değerler Şekil 3.48 ile gösterilen Kistler 6907B kalibratöründen ölçümler sırasında alınan değerlerdir. Her ölçüm için nominal basınç değerine karşılık gelen ve Tablo 3.13 ile verilen hassasiyet katsayıları kalibratöre tanımlanmıştır. Böylece Kistler 6229AK dinamik basınç sensör verileri kalibrasyon sertifikasındaki düzeltmeler yapılarak elde edilmiştir. Kistler 6229AK sensör verilerinin bulunduğu sütundaki her değerde Tablo 4.13 ile verilen değerlerde olduğu gibi 15 farklı değerlerin ortalamasıdır. Fark değerleri ölçümler sırasında hesaplanan ve Tablo 4.13 ile verilen referans dinamik basınç değerlerinin ortalamalarından Kistler 6229AK dinamik basınç sensör değerlerinin ortalamalarının çıkartılmasıyla elde edilmiştir.

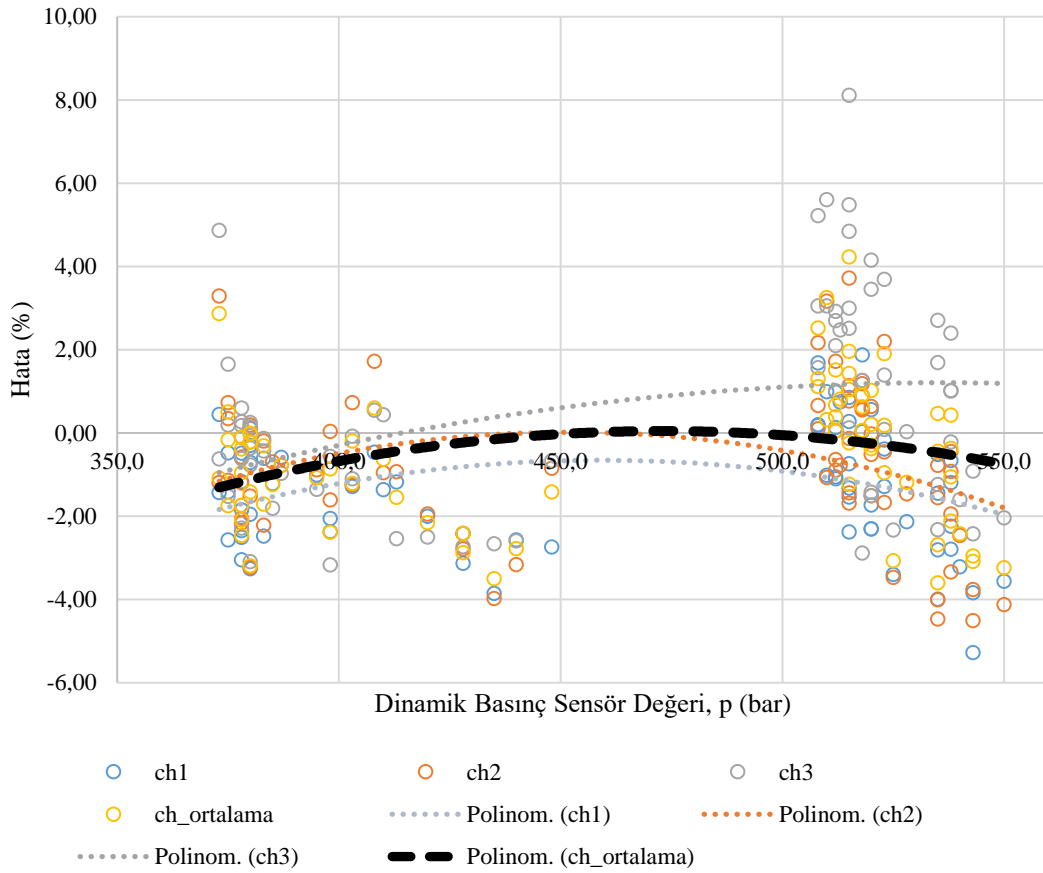
Tablo 4.15 ile verilen değerler ise Tablo 4.14 ile verilen değerlerin yüzdesel gösterimidir.

Tablo 4.15. Karşılaştırma değerleri farklarının yüzdesel gösterimi

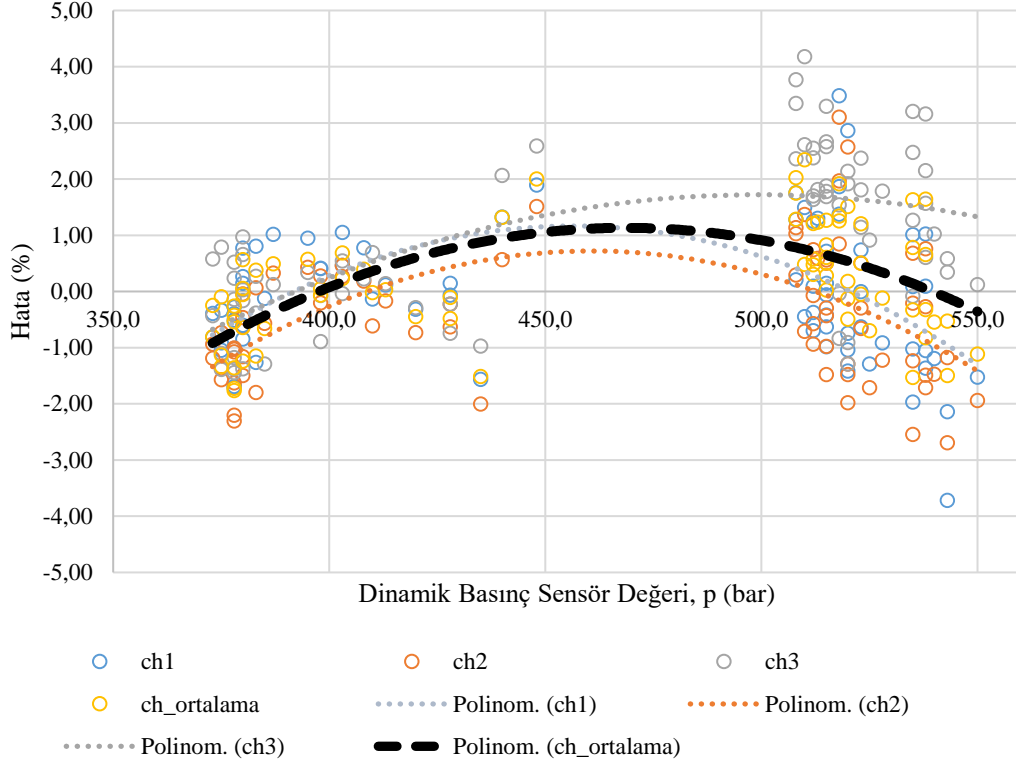
| Normal Sinyal | 6.derece fit | 5.derece fit | 4.derece fit | 3.derece fit | 2.derece fit |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| % | % | % | % | % | % |
| 0,47 | 1,46 | 2,27 | 2,18 | 6,52 | 23,68 |
| 0,91 | 1,10 | 2,42 | 2,38 | 6,32 | 22,33 |
| -1,30 | 0,08 | 0,38 | 0,60 | 7,42 | 20,48 |
| 0,27 | 1,03 | 0,95 | 1,79 | 11,59 | 25,30 |
| 0,68 | 0,77 | 0,69 | 1,82 | 10,87 | 23,30 |
| 1,30 | 0,09 | 0,00 | 1,63 | 11,62 | 23,90 |
| -0,05 | 0,36 | 0,68 | 1,17 | 9,54 | 24,41 |
| -2,84 | -0,96 | -0,55 | -0,41 | 5,85 | 19,23 |
| -1,60 | -1,22 | -1,18 | -0,89 | 7,12 | 20,07 |
| -0,47 | -0,16 | 0,08 | 0,26 | 8,26 | 23,82 |
| -1,89 | -1,27 | -1,24 | -0,74 | 7,86 | 19,76 |
| 0,65 | 0,00 | 0,18 | 0,43 | 9,18 | 24,16 |
| -1,66 | -0,50 | 1,39 | 1,69 | 7,31 | 22,03 |
| -1,23 | 0,64 | 2,13 | 2,67 | 0,45 | 21,65 |
| -1,98 | 0,19 | 1,83 | 2,25 | 8,67 | 21,80 |
| -1,17 | 0,22 | 1,29 | 1,40 | 6,10 | 24,72 |

Tablo 4.15 ile verilen değerler incelendiğinde normal yani polinomsal eğri uydurma yöntemi uygulanmamış sinyaller kullanılarak elde edilen ivme değerleriyle hesaplanan referans dinamik basınç değerleri yüzdesel olarak Kistler 6229AK dinamik basınç sensörü ile elde edilen değerlere çok yakın görünmektedir. Polinomsal eğri uydurma yöntemi kullanılarak elde edilen ivme sinyal verileriyle hesaplanan referans dinamik basınç değerleri ise dinamik basınç sensörü ile yüzdesel olarak kıyaslandığında 6. dereceden 2. dereceye doğru giderek kötüleşmeye başlıyor. Fakat özellikle 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi yardımıyla elde edilen değerlerin normal sinyallerden

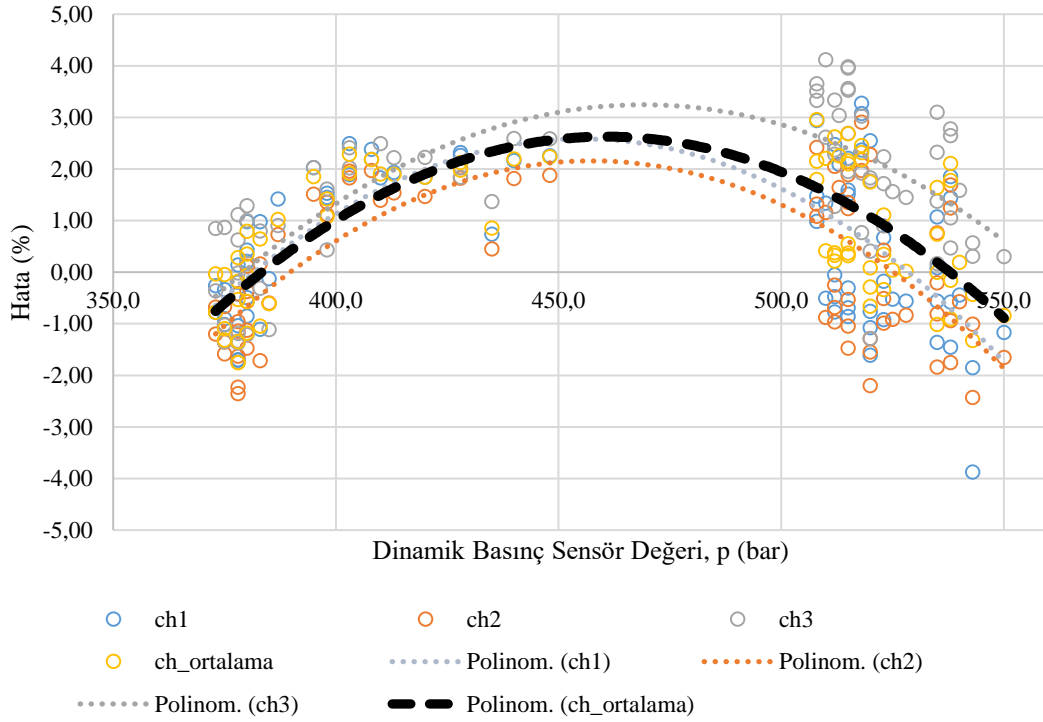
elde edilen değerlere çok yakın olduğu görülüyor. Fakat bu durumu daha iyi anlayabilmek ve netleştirebilmek için Tablo 4.15 ile verilen değerler yetersiz görünmektedir. İlk bakışta 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi yardımıyla elde edilen değerlerin $\% \pm 2$ içinde olduğu görülmektedir. Normal sinyallerden elde edilen değerlere bakıldığında bir ölçüm ortalamasının $\% \pm 2$ dışına çıktığı fakat diğer sonuçların çok iyi olduğu görülmektedir. Bu kapsamda ölçümlerde üç lazer interferometre kanalından da elde edilen verilerin kullanılmasıyla hesaplanan referans dinamik basınç değerleriyle beraber bu değerlerin ortalamaları da birlikte verilerek tüm değerler için eğilim çizgileri çizdirilmiştir. Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 ile sırasıyla normal sinyal, 6. derece, 5. derece, 4. derece, 3. derece ve 2. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi ile elde edilen ivme değerleri kullanılarak hesaplanmış referans dinamik basınç değerleri tüm verileri içerecek şekilde verilmiştir. Her bir grafikte üç lazer interferometre kanalı ve üç kanalın ortalamaları ile hesaplanmış toplamda 320 referans dinamik basınç verisinin dinamik basınç sensörüne karşı farkları gösterilmiştir.



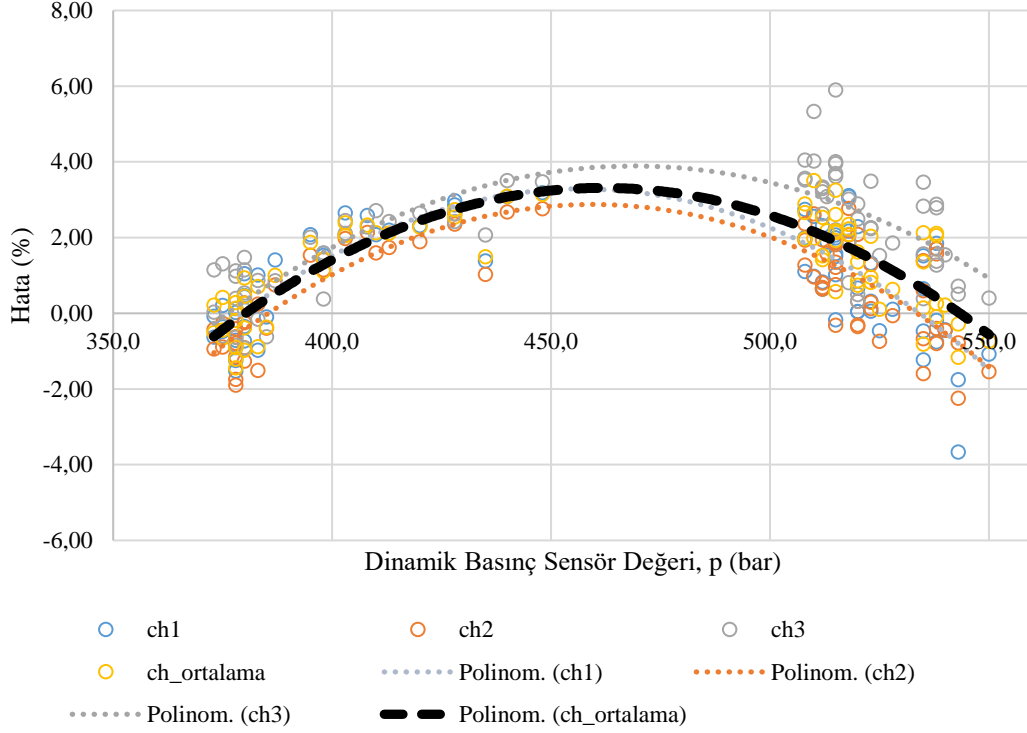
Şekil 4.20. Normal sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları



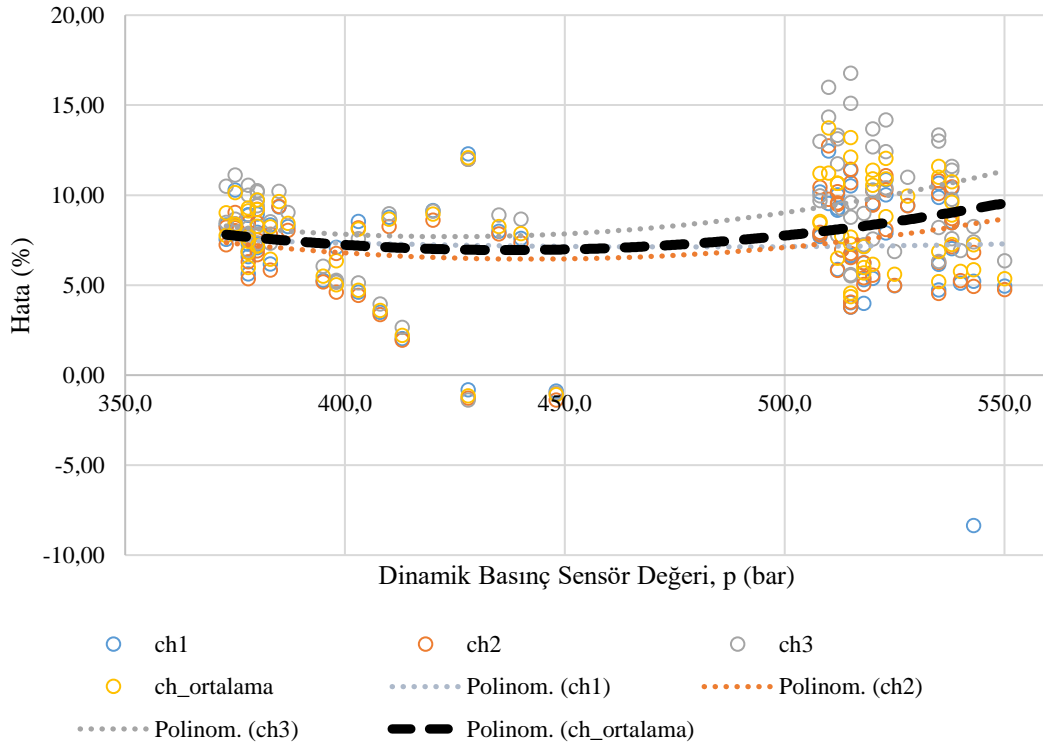
Şekil 4.21. 6.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları



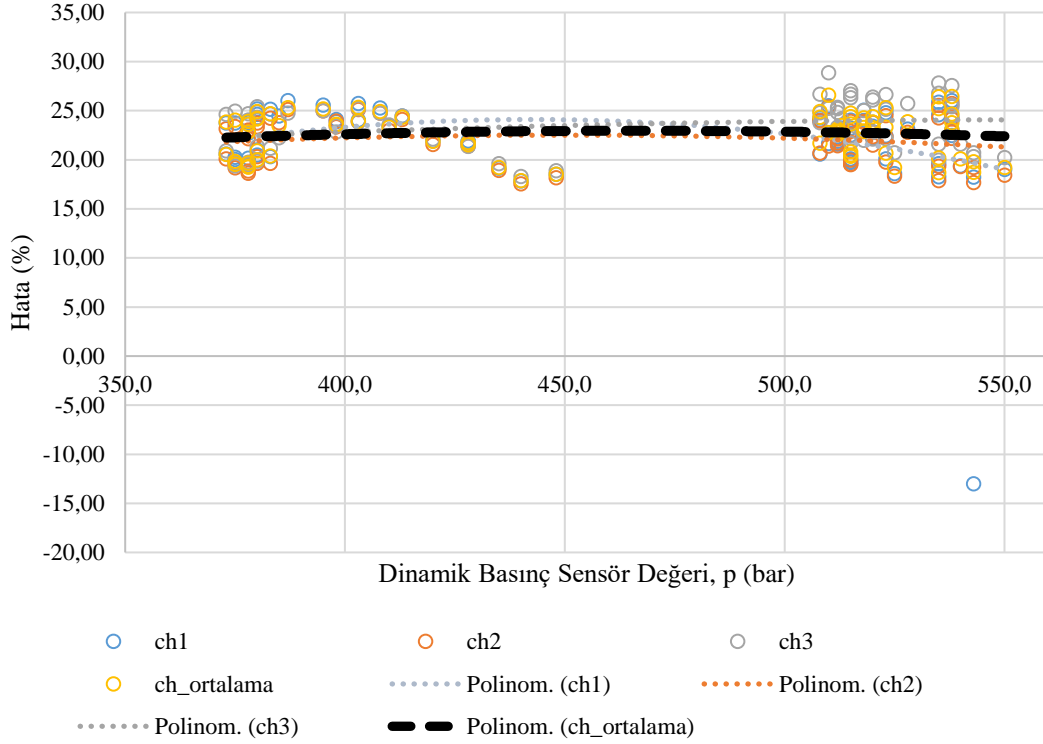
Şekil 4.22. 5.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları



Şekil 4.23. 4. derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları



Şekil 4.24. 3. derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları



Şekil 4.25. 2.derece eğri uydurulmuş sinyaller ile elde edilen ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları

Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 ile verilen grafikler incelendiğinde normal sinyal ile elde edilen ortalama ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hataları (Şekil 4.20) eğilim çizgisine bakıldığında y ekseninde (% hata) sifıra daha çok yakınsamaktadır. Her ne kadar normal ivme sinyallerinin formları serbest düşen kütlelerin pistonu çarptığı basınç darbesi anında bozuluyor olsa da polinomsal eğri uydurma yöntemi kullanılmadan da oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir.

6.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hatalarına (Şekil 4.21), çizdirilen eğilim çizgisi üzerinden bakılırsa eğilim çizgisinin y ekseninde (% hata) genellikle $\% \pm 1$ aralığında olduğu görülmektedir. Fakat Şekil 4.20 ile verilen grafikteki ortalamalara ait eğilim çizgisi ile kıyaslandığında y ekseninde sifıra çok az bir bölgede yakınsamaktadır.

5.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hatalarına (Şekil 4.22), çizdirilen eğilim çizgisi üzerinden bakılırsa hataların $\% -1$ ile $\% +3$ arasında değiştiği gözlemlenmektedir.

4.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hatalarına (Şekil 4.23), çizdirilen eğilim çizgisi üzerinden bakılırsa hata değerinin % 4'e kadar çıktığı görülmektedir.

3.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hatalarına (Şekil 4.24), çizdirilen eğilim çizgisi üzerinden bakılırsa bu değer % 7 ila % 10 arasında değişmektedir.

2.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hatalarına (Şekil 4.25), çizdirilen eğilim çizgisi üzerinden bakılırsa hata değeri % 20'den fazla olmaktadır.

Sonuçlar gösteriyor ki normal sinyal ile elde edilen ortalama ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin hata oranları çok düşük ve sıfır hataya yakınsadığı bölge geniştir. Bu yüzden gerçekleştirilecek çalışmalarda normal sinyal üzerinden elde edilen ivme verileriyle çalışmak konusunda bu veriler üzerinden bakıldığında bir problem gözükmemektedir. Fakat en az normal sinyal kadar 6.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerleri de hata değerleri göz önüne alındığında oldukça iyi görünmektedir. Bu yüzden daha çok bu iki yöntem üzerinde yoğunlaşmakta fayda görülmektedir.

4.4. (500-3000) bar Basınç Aralığında Gerçekleştirilen Dinamik Basınç Ölçümleri

Tez kapsamında 500 bar basınç değerinden 3000 bar basınç değerine kadar serbest düşen kütle yöntemiyle çalışan birincil seviye dinamik basınç standardı ile ölçümler alınmıştır. Ölçümlerde Şekil 3.46 ile gösterilen 5000 bar maksimum basınç değerine sahip Kistler 6229AK (Şekil 3.46 (a)) ve 8000 bar maksimum basınç değerine sahip Kistler 6213BK (Şekil 3.46 (b)) dinamik basınç sensörleri kullanılmıştır.

Ölçümlere başlamadan önce lazer interferometrenin üç kanalı içinde ölçüm öncesi gerekli ayarlar yapılmıştır. Ölçüm başlığı daha önce Taguchi metodu ile parametre çalışması sonucu belirlenen gliserol sıvısı ile içerisinde hava kabarcığı bırakılmamasına özen gösterilerek doldurulmuş ve dinamik basınç sensörleri de ölçüm başlığına sensör teknik özelliklerinde belirtilen sıkma tork değerlerine (Kistler 6229AK: 20 Nm, Kistler 6213B: 40 Nm) dikkat edilerek bağlanmıştır. Ölçüm başlığına daha önce yine Taguchi

metodu ile parametre çalışması sonucu belirlenen 2 numaralı piston (p2) ve 4 numaralı silindir (s4) dolun aşamasında takılmıştır. Ölçümlere başlamadan önce pistonun silindir içerisinde serbestçe dönebiliyor olmasına dikkat edilmiştir. Bu adım ölçümün doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Eğer piston silindir içerisinde serbestçe dönmüyorsa veya ölçüm öncesi bunun kontrolü yapılmadıysa ölçümlerin doğruluğundan söz etmek doğru olmaz. Bunun sebebi, serbest düşen kütlenin pistonu çarpması sonucu tüm enerjiyi dinamik basınç sensörüne aktaramayacak olmasıdır. Normal koşullarda beklenen durum şu şekildedir; serbest düşen kütle pistonu çarpar, piston bu enerjiyi ortam sıvısına aktarır, ortam sıvısı da ölçüm başlığına bağlı olan test edilecek dinamik basınç sensörüne aktarır. Eğer piston silindir içerisinde serbestçe hareket etmiyorsa bu durum çarpma anında piston ile silindir arasında serbest düşen kütleden aktarılan enerjinin bir kısmının sönmelenmesi anlamına gelmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi elbette serbest düşen kütle pistonu düşme anındaki eğilmelerden dolayı dik bir şekilde çarpmamaktadır, bu durumda çarpma anında piston üzerinde kuvvetin bileşenlerine ayrılacağı anlamına gelir, yani istenmeden de olsa mutlaka piston ve silindir arasında kısmi sürtünme meydana gelecektir. Fakat bu durum serbest düşen kütle ile piston arasındaki çarpma noktasını değiştirmek için piston ve silindirin bağlı olduğu ölçüm başlığı konumu değiştirilerek gözlemlenebilir ve optimize edilebilir. Optimize edilmiş bir yerleşimle çarpma sonrası piston ile silindir arasındaki sürtünmenin ihmal edilebilir düzeyde ve belirsizlik dahilinde olduğu değerlendirilmektedir.

Ölçüm öncesi mekanik ayarlamalar tamamlandıktan sonra bilgisayar üzerinde bulunan programlar vasıtasıyla öncelikle serbest düşme yapacak kütle, elektromıknatıs ile belirli bir mesafe yükseltilir ve burada serbest düşme için hazır tutulur. Bu işlem tamamlandıktan sonra lazer interferometre için örnekleme frekansı değeri ve örnekleme sayısı girilir. Burada yine dikkat edilecek durum lazer interferometrenin bu tür çok kısa sürede çok yüksek genliklerin oluştuğu ölçümler için sınırlı veri toplama kapasitesi sebebiyle veri toplama işleminin kütlenin elektromıknatıstan ayrıldığı anda başlayabilmesini sağlamaktır. Bunun için dinamik basınç sistemini kontrol eden programda ve lazer interferometre kontrolcüsü üzerinde tetik sinyali ile veri toplanacak şekilde ayarlamalar gerçekleştirilmiştir. Bu sayede dinamik sistemi kontrol eden program üzerinden kütleyi bırak komutu verildiğinde aynı zamanda tetik sinyali de verilmekte ve lazer interferometre tarafından veriler toplanmaya başlanmaktadır.

(500-3000) bar basınç aralığında gerçekleştirilen dinamik basınç ölçümleri için serbest düşen kütle yöntemiyle çalışan birincil seviye dinamik basınç standardı ile alınan

ölçümlerde kullanılan parametreler Tablo 4.16 ile verilmiştir. Ölçümler (500-1000-2000-3000) bar basınç değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Her basınç kademesinde lazer interferometrenin üç kanalı da kullanılarak üçer kez ölçüm alınmıştır. Bu kısımda sadece 500 bar değerindeki 1. ölçüm sonuçları ve 3000 bar basınç değerindeki 3. ölçüm sonuçları paylaşılmıştır. Diğer basınç değerlerindeki sonuçlar EK-1 ile EK-20 arasında verilmiştir.

Ölçümlerde Tablo 4.16 ile verilen dinamik basınç sensörlerinin hassasiyet katsayısı değerleri (Tablo 3.13 ve Tablo 3.14) ilgili basınç kademesine karşılık Şekil 3.48 ile gösterilen Kistler 6907B kalibratöre tanımlanmıştır ve sensörlerden elde edilen veriler bu kalibratörden okunarak kaydedilmiştir.

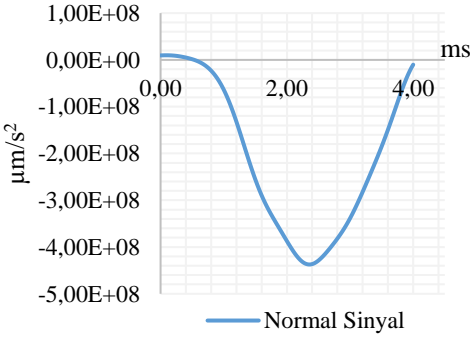
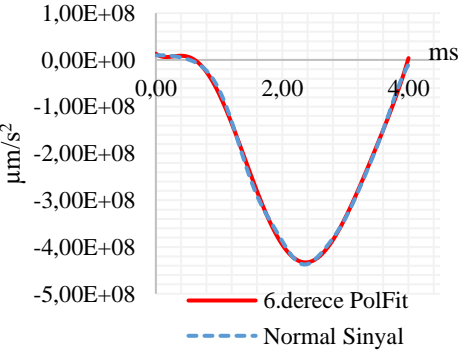
Tablo 4.16. (500-3000) bar basınç aralığı için serbest düşen kütle yöntemiyle çalışan birincil seviye dinamik basınç standardı ile alınan ölçümlerde kullanılan parametreler

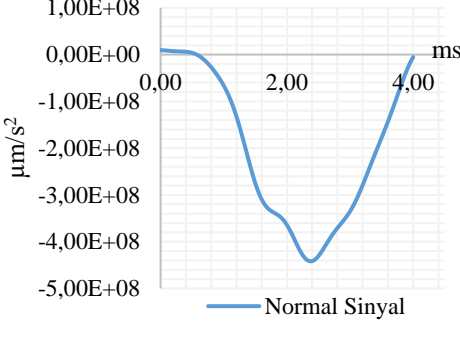
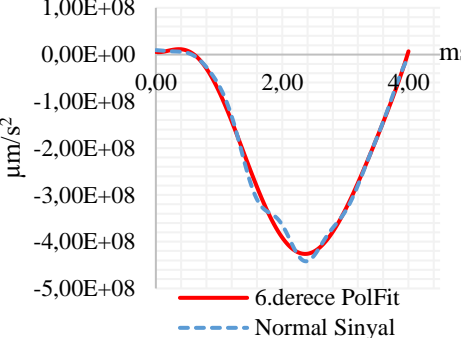
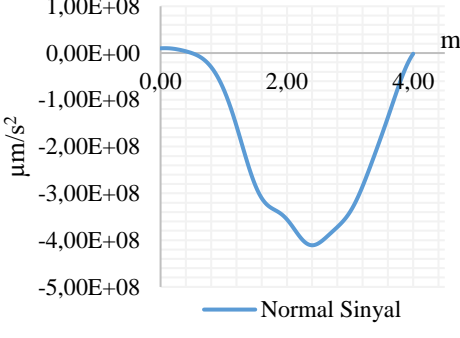
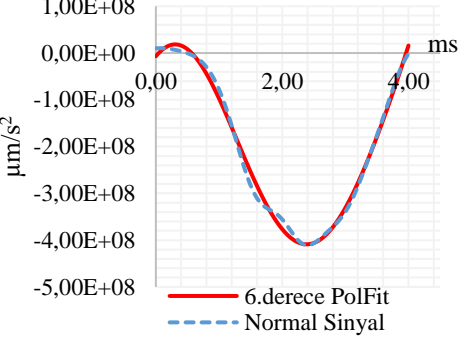
| | | |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Piston | p2 | |
| Silindir | s4 | |
| Frekans | 50 kHz | |
| Örnek sayısı | 16384 | |
| Ortam sıvısı | Gliserol | |
| Dinamik basınç sensörü 1 | Kistler 6229AK (5000 bar) | Sıkma tork değeri : 20 Nm |
| Dinamik basınç sensörü 2 | Kistler 6213BK (8000 bar) | Sıkma tork değeri : 40 Nm |

4.4.1. 500 bar basınç değerinde dinamik basınç ölçümleri

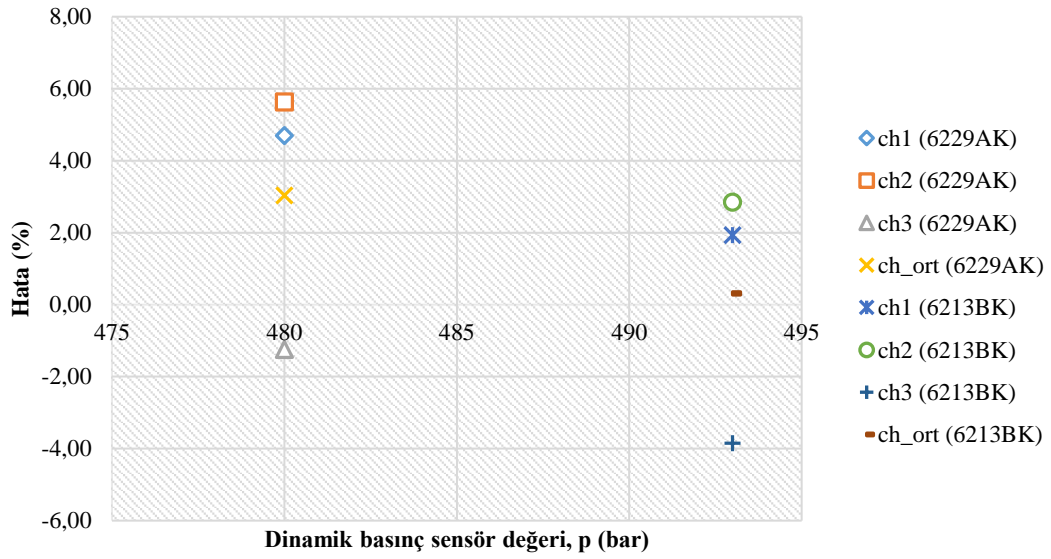
4.4.1.1. Birinci ölçüm sonuçları

Tablo 4.17. 500 bar basınç değeri 1. ölçüm için serbest düşen kütle yöntemiyle çalışan birincil seviye dinamik basınç standardı ile alınan ölçümlerde elde edilen değerler

| | | |
|----------------|---|--|
| Kanal 1 |  |  |
| | $ a_{maks} = 447,27 \text{ m/s}^2$ | $ a_{maks} = 446,28 \text{ m/s}^2$ |
| | $p_{ref} = 502,56 \text{ bar}$ | $p_{ref} = 501,47 \text{ bar}$ |

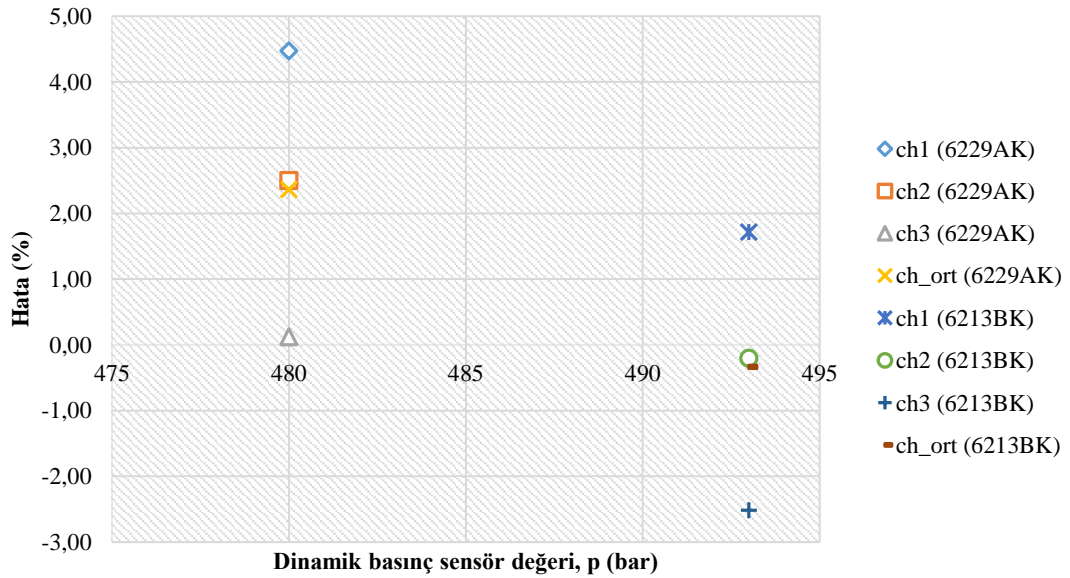
| | | | |
|---|--|---|-------------------------------------|
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 451,37 \text{ m/s}^2$ | $ a_{maks} = 437,67 \text{ m/s}^2$ | |
| | $p_{ref} = 507,07 \text{ bar}$ | $p_{ref} = 492 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 421,35 \text{ m/s}^2$ | $ a_{maks} = 427,30 \text{ m/s}^2$ | |
| | $p_{ref} = 474,05 \text{ bar}$ | $p_{ref} = 480,60 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 440,00 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 494,56 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 437,08 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 491,35 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 480,00 bar | Kistler 6213BK | 493,00 bar |

Tablo 4.17 ile verilen grafik ve değerlere baktığımızda her bir lazer interferometre kanalından elde edilen ivme sinyallerine pik noktasından 1500 Hz kesme frekansı değerinde alçak geçiren filtre uygulanarak yaklaşılmış ve mutlak maksimum ivme değerleri gösterilmiştir. Her bir kanaldan elde edilen mutlak maksimum ivme değerleri ile referans dinamik basınç değerleri hesaplanmıştır. Üç lazer interferometre kanalından elde edilen mutlak maksimum ivme değerleri ve bu değerlerle hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin ortalamaları ve ayrıca ölçümler sırasında kullanılan dinamik basınç sensörlerine ait basınç değerleri Tablo 4.17 ile gösterilmiştir. Ölçümlerde kullanılan dinamik basınç sensör değerlerine karşılık normal ivme sinyallerinden elde edilerek hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmalar yüzdesel olarak Şekil 4.26 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.26. 500 bar basınç değeri 1. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)

6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi (polfit) uygulanmış ivme sinyallerinden elde edilerek hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmalar yüzdesel olarak Şekil 4.27 ile gösterilmiştir.

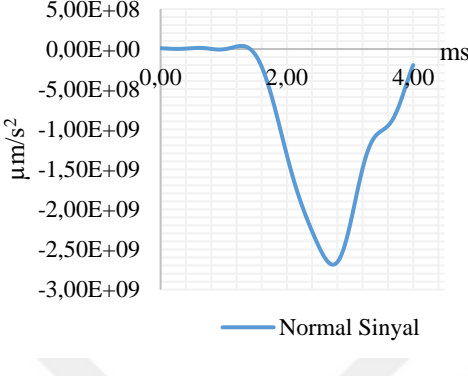
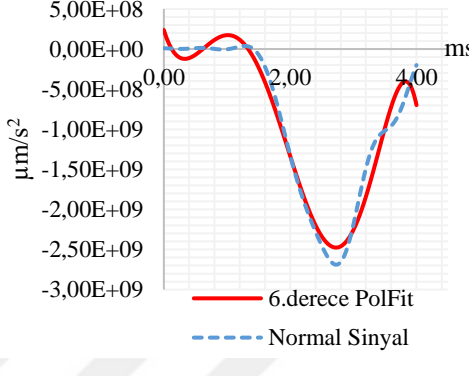
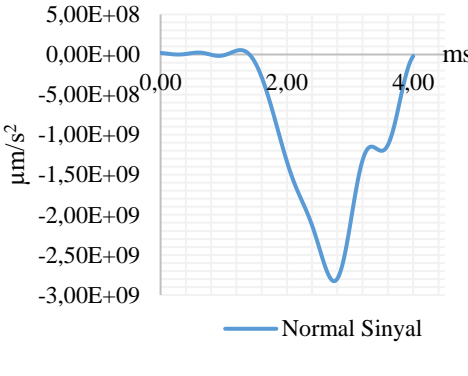
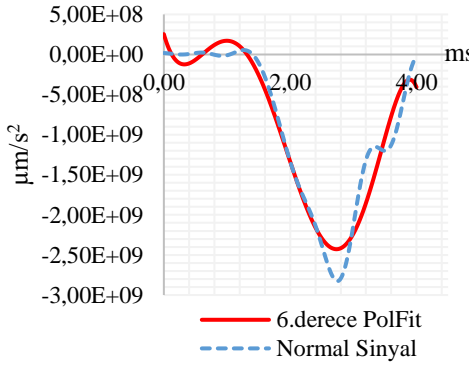
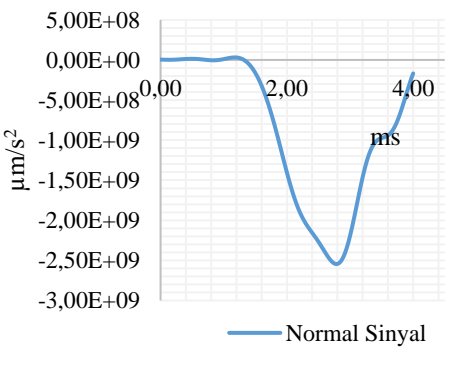
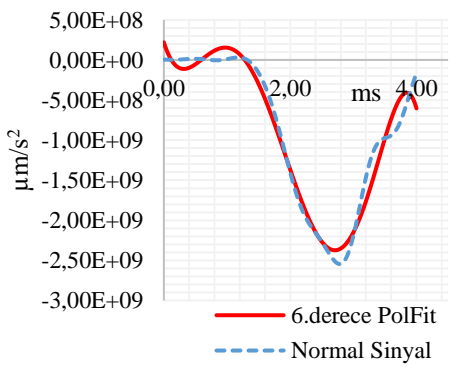


Şekil 4.27. 500 bar basınç değeri 1. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)

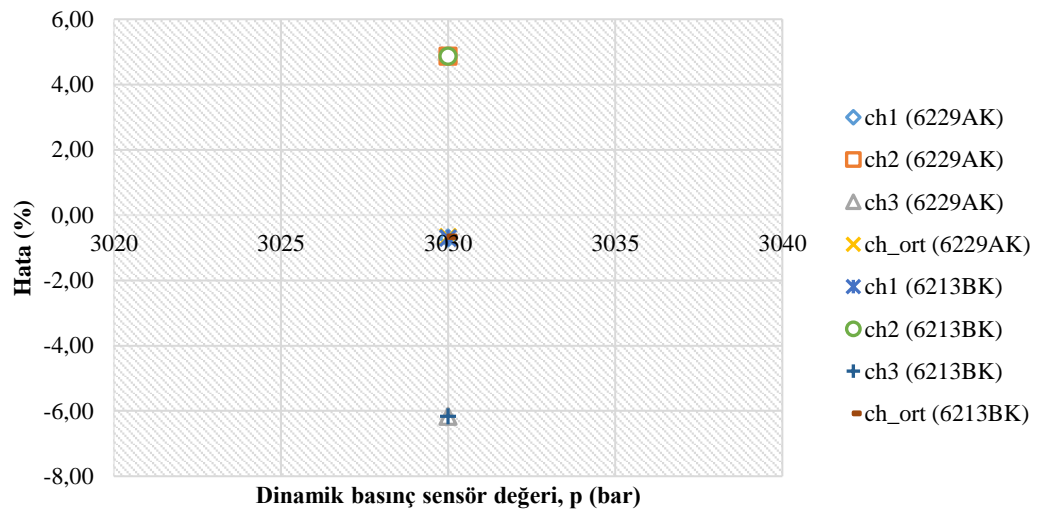
4.4.2. 3000 bar basınç değerinde dinamik basınç ölçümleri

4.4.2.1. Üçüncü ölçüm sonuçları

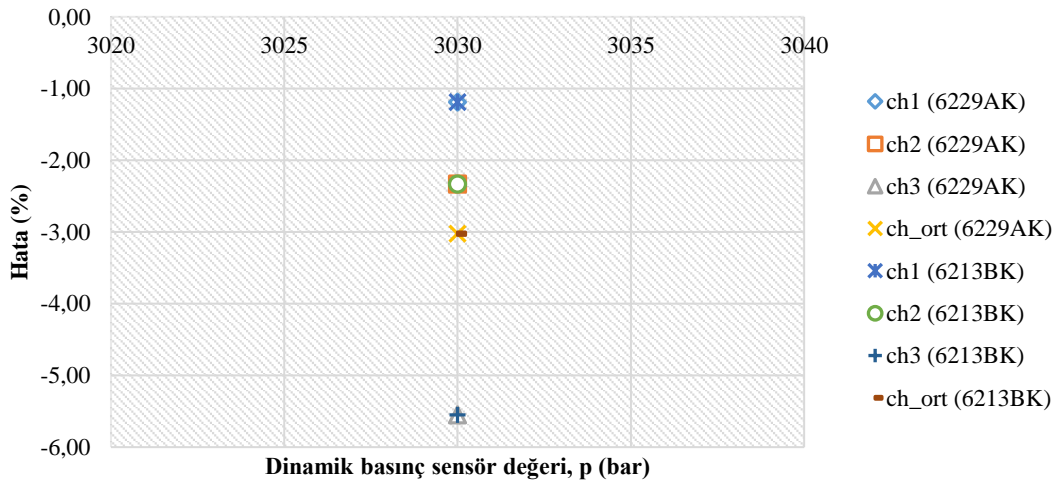
Tablo 4.18. 3000 bar basınç değeri 3. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2726,64 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3008,75 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2713,19 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2993,97 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2880,23 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3177,63 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2681,78 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2959,43 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2576,20 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2843,34 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2593,03 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2861,84 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 2727,69 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 3009,90 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 2662,67 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 2938,41 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 3030,00 bar | Kistler 6213BK | 3030,00 bar |

3000 bar basınç değerinde üçüncü ölçüm için üç lazer interferometre kanalından elde edilen mutlak maksimum ivme değerleri ve bu değerlerle hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin ortalamaları ve ayrıca ölçümler sırasında kullanılan dinamik basınç sensörlerine ait basınç değerleri Tablo 4.18 ile gösterilmiştir. Ölçümlerde kullanılan dinamik basınç sensör değerlerine karşılık normal ivme sinyallerinden elde edilerek hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmalar yüzdesel olarak Şekil 4.28 ile gösterilmiştir. 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi (polfit) uygulanmış ivme sinyallerinden elde edilerek hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmalar ise yüzdesel olarak Şekil 4.29 ile gösterilmiştir.



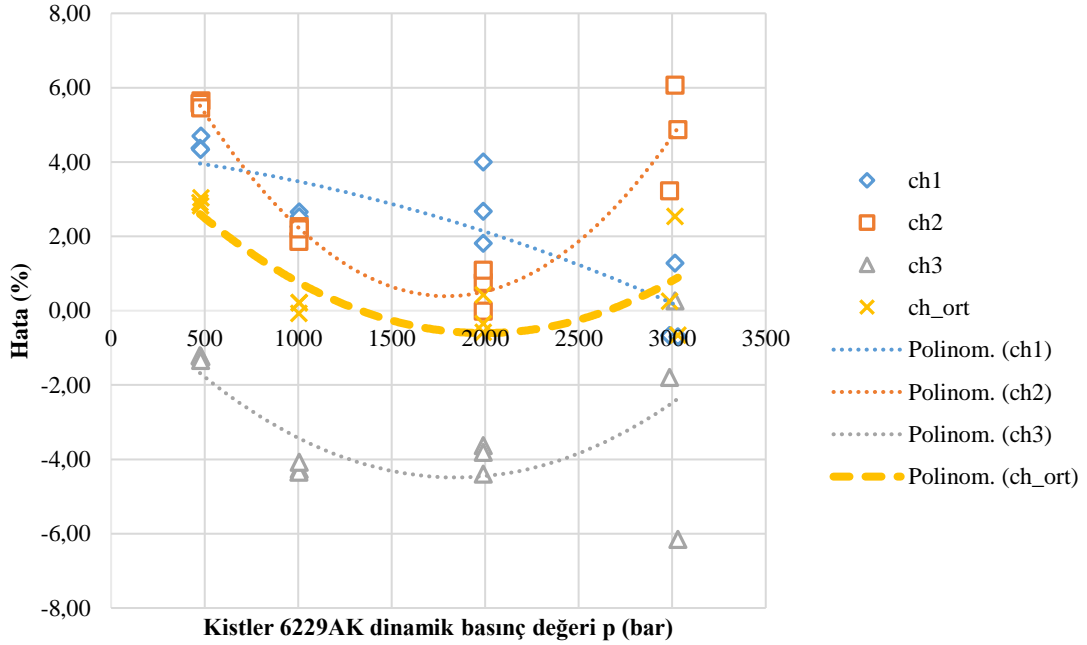
Şekil 4.28. 3000 bar basınç değeri 3. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)



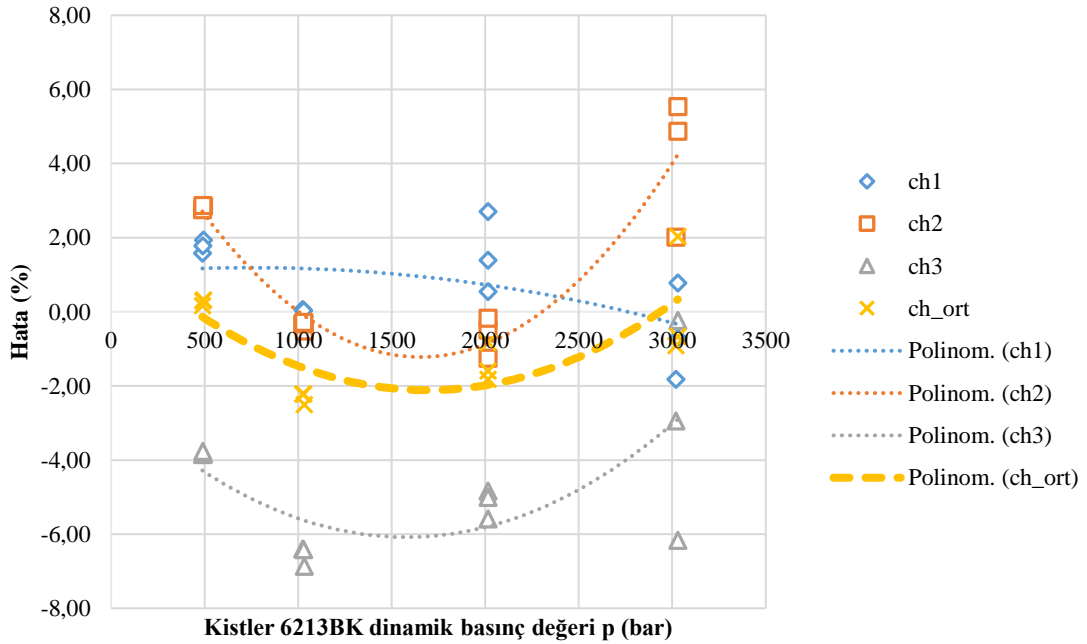
Şekil 4.29. 3000 bar basınç değeri 3. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)

4.4.3. Toplu sonuçlar

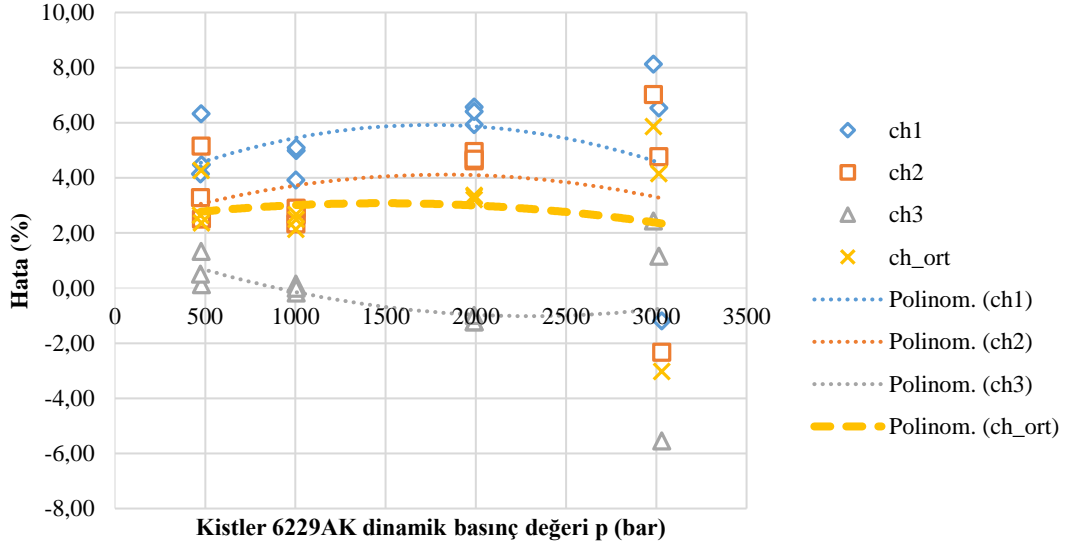
(500-3000) bar ölçüm aralığında gerçekleştirilen dinamik basınç ölçüm sonuçları toplu olarak Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33 ile verilmiştir.



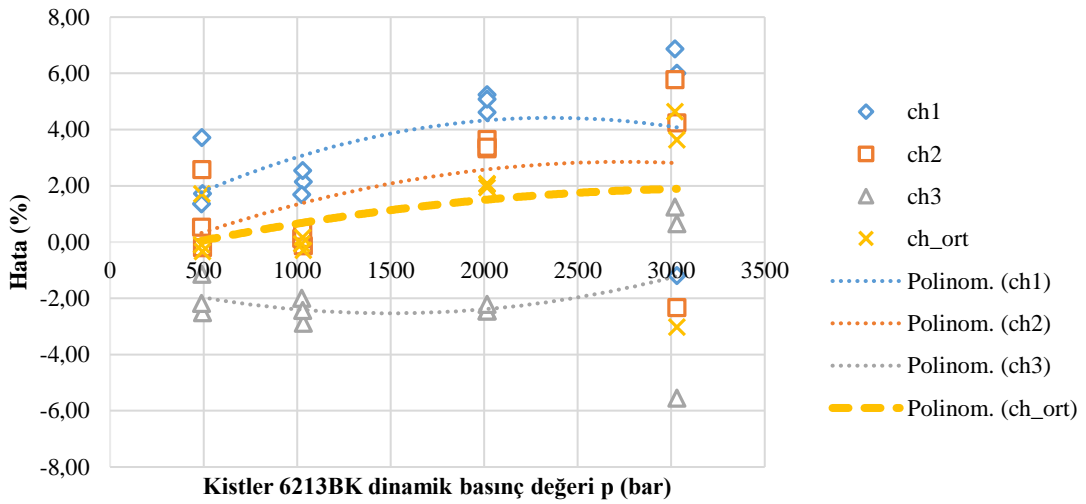
Şekil 4.30. Kistler 6229AK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)



Şekil 4.31. Kistler 6213BK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (normal sinyal için)



Şekil 4.32. Kistler 6229AK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)



Şekil 4.33. Kistler 6213BK ve hesaplanan referans dinamik basınç farklarının yüzdesel gösterimi (6. derece polfit için)

Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33 birlikte incelendiğinde 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi kullanılarak elde edilen değerlerdeki sapma miktarları normal sinyallerden elde edilen değerlere kıyasla oldukça yüksek görünmektedir. Bu yüzden 6. derece polinomsal eğri uydurma yönteminin kullanılmasının sonuçlar açısından çok sağlıklı olmadığı değerlendirilmektedir ve normal sinyallerin çeşitli basınç değerlerindeki farklı form bozukluklarında bile oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

4.4.4. Ölçüm belirsizliği

Ölçümlerde hesaplanan referans dinamik basınç değerleri için bileşik belirsizlik değerleri (u_b) Eşitlik (18) yardımıyla bulunmaktadır (Jgcm, 2008).

$$u_b = \sqrt{u_{m_{toplam}}^2 + u_{A_{eff}}^2 + u_a^2 + u_d^2} \quad (18)$$

Eşitlik (18)'de $u_{m_{toplam}}$, dinamik basınç standardında kullanılan serbest düşen kütle ve üzerindeki diğer parçalardan (retroreflektörler vb.), pistonun kütesinden ve ortam sıvısının kütesinden gelen belirsizlik değeridir. u_a , lazer interferometre ile elde edilen ivme sinyallerinden gelen belirsizlik değeridir. $u_{A_{eff}}$, piston ve silindir ünitesine ait efektif alan değerinden gelen belirsizlik değeridir. u_d ise dinamik basınç sensörleri ile gerçekleştirilen ölçümlerdeki sonuçların dağılımı şeklinde nitelendirilebilir. Serbest düşen kütlenin ve pistonun ağırlığının belirsizliği oldukça küçük olduğundan bunların etkisi göz ardı edilebilir fakat ortam sıvısının her atış sonrası piston ve silindir arasındaki boşluktan sızarak dışarı çıkmasından dolayı bu etkinin kütle ile ilgili en önemli belirsizlik bileşeni olduğu söylenebilir. Yine de kütlenin belirsizlik değeri ivme ile ilgili belirsizlik bileşenlerine nazaran % 0,2 gibi oldukça küçük bir değerdir. Piston silindir ünitesine ait efektif alan değerinin belirsizliği CMM ile gerçekleştirilen ölçümlerdeki belirsizlikleri ve basınç altındaki değişimlerini içermektedir. Fakat bu etkilerden kaynaklanan belirsizlik değeri genellikle atmosfer basıncında % 0,04 civarı olmakla beraber ölçümlerde basınç altında % 0,15 ile sınırlandırılabilir. Ölçümlerdeki en etkili belirsizlik bileşeni lazer interferometreden elde edilen ivme sinyalindeki belirsizliktir. Öyle ki çarpma anındaki mutlak maksimum ivme değerini doğru hesaplayabilmek için kütlenin eğilme ve bükülme yapmadan kesin dik bir şekilde pistonu çarpması, piston ile silindir arasında serbest düşen kütlenin eksen kaçıklığından kaynaklı darbe anında sürtünme olmaması ve sistemde mekanik titreşimlerin olmaması gerekmektedir. İvmeden gelen belirsizlik değeri aslında bu etkilerden kaynaklanan belirsizlik değeridir ve Eşitlik (19) ile tanımlanabilir (Salminen ve ark., 2020).

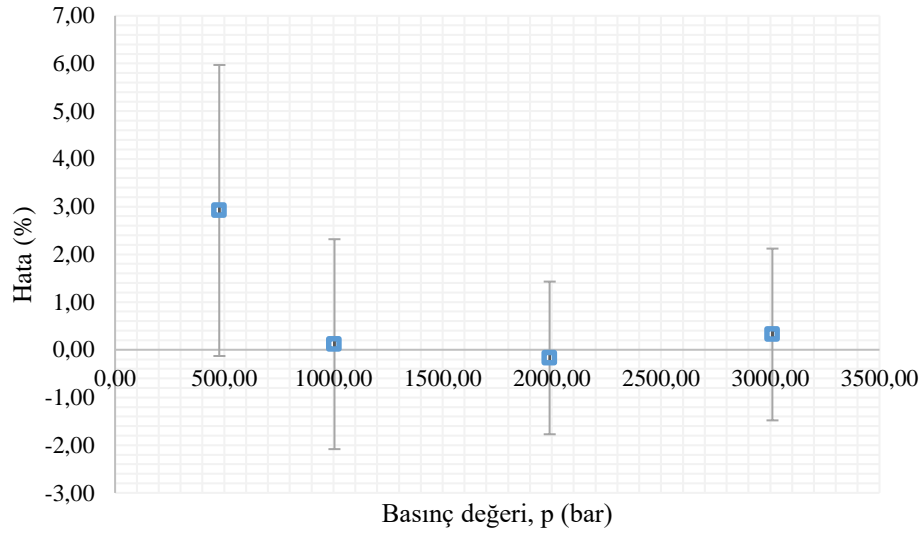
$$u_a = \sqrt{u_{a_1}^2 + u_{a_2}^2 + u_{a_3}^2} \quad (19)$$

Eşitlik (19)'da u_{a_i} mekanik titreşimlerin, u_{a_e} serbest düşen kütlenin düşme sırasında eğilme ve bükülmesinden kaynaklı düzensizliklerin, u_{a_s} ise kütlenin pistonla dik bir şekilde çarpmasından dolayı piston ve silindir arasındaki sürtünmenin ivme sinyali üzerindeki belirsizlik bileşenlerini oluşturmaktadır. Mekanik titreşimler sonucu meydana gelen gürültülerden kaynaklanan belirsizlik, mutlak maksimum ivme değerlerinin alçak geçiren filtrede kullanılan farklı kesme frekanslarına karşı gösterdiği değişimlerle değerlendirilebilir. Serbest düşen kütlenin düşme anında eğilmesinden kaynaklanan belirsizlik değeri, her üç lazer interferometreden ölçülen ivme değerleri arasındaki fark göz önüne alınarak değerlendirilebilir. Piston silindir ünitesinde meydana gelen sürtünme, serbest düşen kütlenin düşme esnasındaki esnek kaçıklığından dolayı pistonla dik olarak çarpmamasından kaynaklıdır. Bu sürtünme etkisini en aza indirmek için piston ve silindir arasında ortam sıvısı bulunmasına yani pistonun ortam sıvısına batırılarak silindire takılmasına özen gösterilir. Yine de bu etkinin belirsizlik dahilinde % 0,5 olduğu kabul edilebilir. Dinamik basınç sensörleri ile gerçekleştirilen ölçümlerdeki sonuçların dağılımından kaynaklanan belirsizlik değeri ise hesaplanan referans dinamik basınç değerleri ile dinamik basınç sensör değerlerinin dağılımını içermektedir ve genel olarak % 0,4 ile % 2 arasında değişmektedir. Bu dağılım özellikle yine serbest düşen kütlenin düşme anındaki eğilmesinden kaynaklanmaktadır. 500 bar nominal basınç değeri için ölçüm belirsizliği bileşenlerine ait standart belirsizlik değerleri, bu değerlerden elde edilen bileşik belirsizlik değeri ve $k=2$ (% 95 güvenilirlik seviyesi) için genişletilmiş belirsizlik değeri Tablo 4.19 ile verilmiştir.

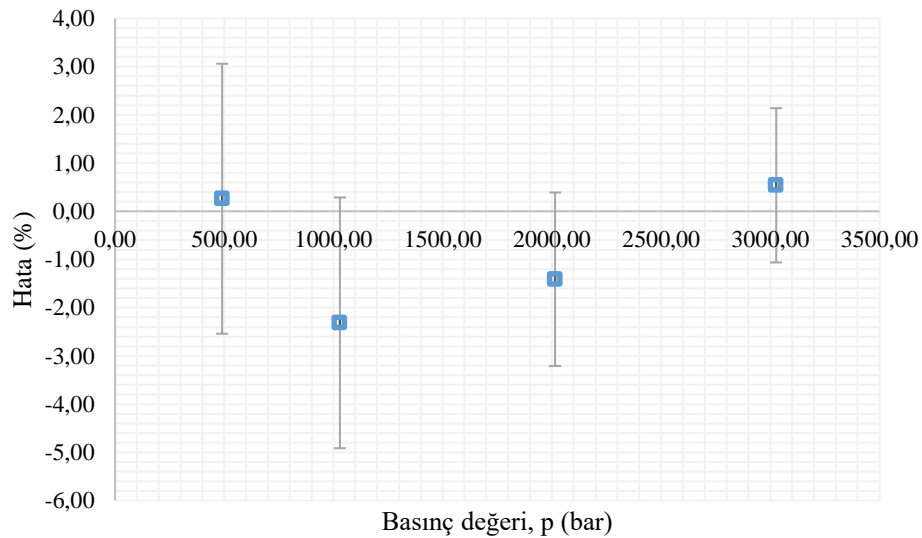
Tablo 4.19. 500 bar basınç değeri için ölçüm belirsizlikleri

| Belirsizlik bileşenleri | $u_{m_{optlam}}$ | $u_{A_{eff}}$ | u_d | u_{a_i} | u_{a_e} | u_{a_s} |
|---------------------------------|------------------|---------------|-------|-----------|---|-----------|
| Standart belirsizlik değeri (%) | 0,2 | 0,1 | 0,7 | 0,3 | 1,2 | 0,5 |
| | | | | | Bileşik belirsizlik değeri (u_b) (%) | 1,52 |
| | | | | | Genişletilmiş belirsizlik değeri ($2 \times u_b$) (%) | 3,05 |

Şekil 4.34 ile Kistler 6229AK Şekil 4.35 ile Kistler 6213BK dinamik basınç sensörleri ile gerçekleştirilmiş olan (500-3000) bar basınç aralığındaki dinamik basınç ölçümlerinde serbest düşen kütle yöntemiyle çalışan birincil seviye dinamik basınç standardı kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin arasındaki farkların yüzdesel gösterimleri ölçüm belirsizlikleri ile beraber verilmiştir.



Şekil 4.34. Kistler 6229AK ile gerçekleştirilen (500-3000) bar aralığındaki dinamik basınç ölçümlerinde elde edilen değerlerin ölçüm belirsizlikleri ile gösterimi



Şekil 4.35. Kistler 6213BK ile gerçekleştirilen (500-3000) bar aralığındaki dinamik basınç ölçümlerinde elde edilen değerlerin ölçüm belirsizlikleri ile gösterimi

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Serbest düşen kütle yöntemi ile birincil seviye dinamik basınç standardı geliştirilmesi isimli bu tez çalışmasında otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi alanlarda sıklıkla kullanılan dinamik basınç sensörlerinin test sensörü olarak kullanıldığı ve referans dinamik basıncın ilgili fizik yasalarına göre hassas bir şekilde hesaplandığı ve bu sayede test edilecek dinamik basınç sensörüne ait hata ve belirsizlik değerlerinin elde edildiği endüstriyel bir dinamik basınç ölçüm cihazı tasarlanarak üretilmiştir. Ayrıca yine dinamik basınç standardında kullanılan 5000 bar basınç değerinde güvenle çalışan ölçüm başlığı, silindir, piston ve bağlantı parçaları tasarım ve üretimleri de bu kapsamda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm başlığı ve silindir tasarımları kapsamında gerçekleştirilen yapısal statik analizlerde maksimum çalışma koşullarında ölçüm başlığında meydana gelen gerilme değerlerinin bölgesel olarak (500-900) MPa aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde bu değer silindirde 900 MPa olarak dağılım göstermektedir. Bu değerler, kullanılan malzemenin 55 HRC'deki akma mukavemet değeri olan 1400 MPa göz önüne alındığında tasarımın maksimum çalışma basıncında güvenli bölgede kaldığını göstermektedir.

Tez çalışmasında, ölçüm sisteminin konumlandırılmasından başlayarak, piston silindir uyumu, ölçüm başlığı içerisinde serbest düşen kütlelerin pistonla çarpmasından sonra basıncı dinamik basınç sensörlerine aktaracak olan ortam sıvısı seçimi, lazer interferometre hassas ayarlamaları ve tez kapsamında değerlendirilen vb. diğer ön hazırlıklara dikkat edilerek referans dinamik basınç hesabını etkileyen kütle, efektif alan ve ivme parametreleri üzerinde detaylı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Piston ve silindirlere ait efektif alan hesabı Dadson teorisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Efektif alan değeri farklı basınç değerlerinde değişmekle beraber bu değişimin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi % 0,1 değerinde belirsizlik dahilindedir.

Referans dinamik basınç hesabında kullanılan toplam kütle değeri, serbest düşen kütle, kütle üzerinde bulunan alüminyum plaka üzerindeki retroreflektör ve vidalarının kütleleri, pistonun kütlesi ve piston altından başlayarak dinamik basınç sensörlerine kadar olan alandaki ortam sıvısı kütlesinden oluşmaktadır. Normal şartlarda kütle değerinin değişmemesi beklenmekle beraber buradaki en büyük belirsizliğin her ölçümde piston ile silindir arasındaki boşluktan dışarı sızan ortam sıvısı kütlesi olduğu fakat bu durumun

referans dinamik basınç hesabı açısından belirsizlik dahilinde olduğu ve toplam kütlede gelen belirsizlik değerinin % 0,2 ile sınırlı olduğu değerlendirilmektedir.

Taguchi metodu kullanılarak gerçekleştirilen parametre belirleme çalışmasında 2 numaralı piston (p2), 4 numaralı silindir (s4), 50 kHz frekans değeri ve ortam sıvısı olarak da gliserolün dinamik basınç standardında tekrarlanabilir ölçümler açısından kullanılabilir en uygun parametreler olduğu belirlenmiştir.

Sistemde üç adet lazer interferometre kullanılmıştır. Bunun sebebi serbest düşen kütlede pistonun çarpması sırasında mutlak maksimum ivme değerlerini elde ederken kütlede merkezindeki ivme değeri ile tek lazer interferometre kanalından elde edilen ivme değerinin kütlede düşme anındaki hafif eğilmesi kaynaklı farklı olmasıdır. Bu sebeple 120° aralıklarla 360°'ye üç adet lazer interferometre yerleştirilmiş ve eğilmeden kaynaklı ölçüm hatalarını minimize etmek için her üç kanaldan elde edilen ivme değerlerinin ortalamasından mutlak maksimum ivme değerleri türetilmiştir. 120 derece aralıklarla yerleştirilen lazer interferometrelerle yapılan bu çalışma sonucu elde edilen veriler ve uygulamadaki bu yöntemin referans dinamik basınç hesabı üzerindeki etkisi göz önüne alındığında literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Sistemde meydana gelen titreşimler kaynaklı ivme sinyallerindeki gürültü faktöründen dolayı ivme sinyallerine alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Alçak geçiren filtrede kullanılan kesme frekans değerini belirleyebilmek için ayrıca çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu değerin 1500 Hz olabileceği saptanmıştır. 1500 Hz kesme frekansına sahip alçak geçiren filtre uygulanmış ivme sinyallerine bakıldığında yarım sinüs formuna benzer bir form görülmekle beraber ivme sinyallerinde özellikle tepe noktalarında çeşitli basınç değerlerinde de değişen form bozuklukları görülmüştür. Bu form bozukluklarının referans dinamik basınç hesabında kullanılan ve en etkili parametre olan mutlak maksimum ivme değeri üzerindeki etkisini görebilmek için çalışma boyunca gerçekleştirilen tüm ölçümlerde elde edilen ivme sinyallerine ayrıca 6. dereceden başlayarak 2. dereceye kadar polinomsal eğri uydurma yöntemi kullanılarak düzeltmeler gerçekleştirilmiş ve tüm düzeltmeler, düzeltme yapılmamış normal sinyaller ile beraber karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. 6.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin yüzdesel hatalarına çizdirilen eğilim çizgisi üzerinden bakıldığında eğilim çizgisinin y ekseninde (% hata) genellikle % ± 1 aralığında değiştiği görülmüştür. Fakat ortalamalara ait eğilim çizgisi ile kıyaslandığında y ekseninde sıfıra çok az bir bölgede yakınsamıştır. 5.derece polinomsal eğri uydurma

yöntemiyle elde edilen grafikte hataların % -1 ile % +3 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. 4.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle elde edilen grafikte hata değerinin % 4'e kadar çıktığı görülmüştür. 3.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle elde edilen grafikte bu değer % 7 ila % 10 arasında değişmiştir. 2.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle elde edilen grafikte ise hata değeri % 20'den fazla değerlere ulaşmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki normal sinyal ile elde edilen ortalama ivme verileri kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin hata oranları çok düşük ve sıfır hataya yakınsadığı bölge çok geniştir. Bu yüzden gerçekleştirilen ölçümlerde normal sinyal üzerinden elde edilen ivme verileriyle çalışarak referans dinamik basınç hesaplamak konusunda bir problem gözükmemektedir. Fakat en az normal sinyal kadar 6.derece polinomsal eğri uydurma yöntemiyle oluşturulan sinyallerden elde edilen ivme verilerinin ortalamaları kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerleri de hata değerleri göz önüne alındığında oldukça iyi görünmektedir. Bu yüzden daha çok bu iki yöntem üzerinde durulmuş ve (500-3000) bar aralığında gerçekleştirilen dinamik basınç ölçümlerinde normal sinyal ve 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiş sinyaller kullanılmıştır. Ölçümlerde ayrıca iki farklı kalibreli dinamik basınç sensörü (Kistler 6229AK ve Kistler 6213BK) kullanılmıştır. Ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde normal sinyaller kullanılarak elde edilen ivme değerlerinden hesaplanan referans dinamik basınç değerleri, 6. derece polinomsal eğri uydurma yöntemi ile elde edilmiş sinyallerden daha etkili görülmektedir. Her ne kadar 500 bar değerinde bu durum çok iyi anlaşılmasa da basınç değeri arttıkça sonuç grafikleri incelendiğinde bu farklılık açık şekilde belli olmaktadır. Bu şekilde çalışmalar kapsamında elde edilen ivme sinyallerindeki form bozukluklarının tepe noktasının belirlenmesi aşamasında bir problem teşkil etmediği anlaşılmıştır ve bu bilgi ayrıca literatüre sağlayacağı katkı açısından değerlidir.

Normal sinyaller kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin bulunduğu sonuç grafikleri incelendiğinde ise 3000 bar basınç değeri dışında genellikle tekrarlanabilir ölçümler alındığı görülmektedir. Bu farklılığın da sınır değer olan 3000 bar için kütlelerin olabildiğince yüksekte bırakılması ve düşme anında ivme sinyallerinde oluşan gürültü, kütlelerin eğilmesi kaynaklı sinyal bozukluğu ve piston ile silindir arasındaki düşme anında kütlelerin eksen kaçıklığı nedeniyle meydana getirdiği sürtünme kaynaklı kayıplar olabileceği değerlendirilmektedir.

Sonuçlardan görüldüğü üzere özellikle ivme sinyalleri üzerindeki belirsizlikler referans dinamik basınç hesabı üzerinde önemli ölçüde etkilidir. Serbest düşen kütlede

düşme esnasında oluşan eğilmelerin ivme sinyallerinde tepe noktasında oluşturduğu kaybın, sistemde üç adet lazer interferometre kullanımı ile olabildiğince önüne geçilmiştir. Bu sayede her üç kanaldan da farklı ivme verileri okunsa da bu üç kanaldan elde edilen mutlak maksimum ivme değerlerinin ortalaması kullanılarak hesaplanan referans dinamik basınç değerlerinin başarılı olduğu görülmüştür.

Kistler 6229AK ve Kistler 6213BK dinamik basınç sensörleri ile gerçekleştirilen ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde 500 bar nominal basınç değeri için ortalama % 1,5 değerinde sapma ve % ± 3 belirsizlik değeri görülmektedir. 1000 bar için bu değerler sırasıyla % -1 ve % $\pm 2,4$, 2000 bar için sırasıyla % -0,75 ve % $\pm 1,7$, 3000 bar için sırasıyla % 0,4 ve % $\pm 1,7$ olmaktadır.

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular kullanılarak, ölçüm sisteminde gerçekleştirilecek bazı iyileştirmeler ile referans dinamik basınç hesabını etkileyen ivme değerlerinin daha hassas bir şekilde hesaplanabileceği değerlendirilmektedir. Öyle ki alüminyum yerine çelik malzeme ile daha ağır bir kütle kullanımı yüksek basınçlara çıkarken kullanılan yükseklik değerini daha aşağı çekecek ve bu sayede kütle daha kısa mesafeden piston üzerine bırakılarak titreşim ve eğilme durumları minimize edilebilecektir. Fakat bu durumda daha düşük basınçları elde etmekte problem yaşanabilecektir. Bu yüzden piston ile serbest düşen kütle arasında sönümleyici kauçuk bir malzeme kullanılabilir. Referans dinamik basınç hesabı doğrudan ivme değerine bağlı olduğundan ivmedeki bu sönümlenme lazer interferometreden ölçülen ivme değerleri temel alındığı ve hesaba katıldığı sürece ihmal edilebilir ve belirsizlik düzeyindedir.

Benzer şekilde kütlenin serbest düşme sırasındaki eğilme miktarını azaltmak ve bundan kaynaklı ivme verisi kayıplarının önüne geçmek adına kütleyi yataklayan kılavuzlarla arasındaki boşluğu azaltarak eğilme miktarı da azaltılabilir fakat bu durum yine sürtünme kaynaklı kayıplara neden olacaktır. Bu sürtünme olayı, istenmeyen harici bir kuvvete neden olsa da ölçüm sonuçları bu durumdan etkilenmeyecektir. Bunun nedeni, biraz önce bahsedildiği gibi referans dinamik basınç hesabının, çarpmanın neden olduğu ivme değişimine göre belirlenmesidir. Dolayısıyla sabit bir ek sürtünme kuvvetinin ivmelenmedeki değişimi etkilemeyeceği değerlendirilmektedir ve belirsizlik dahilindedir.

Dinamik basınç ölçümlerinde test edilecek sensör ile gerçekleştirilecek çalışmalarda her bir ölçüm noktasında tekrar sayısını artırarak daha hassas sonuçların elde edilebileceği de ayrıca değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışması kapsamında, yüksek basınçlar için dinamik basınç sensörlerinin birincil seviye kalibrasyon ihtiyaının yurtdışında gerçekleştirilmesinden kaynaklı, gerek stratejik açıdan gerekse zaman ve maliyet kaybının önüne geçecek serbest düşen kütle yöntemi ile birincil seviye dinamik basınç ölüm standardı geliştirilmiş ve TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Basınç Laboratuvarı bünyesinde kullanıma sunulmuştur. Tez çalışmasında verilen bulgular ve öneriler ışığında sistemde gerekli iyileştirmeler sağlanarak düşük belirsizlik ile daha düşük basınçlardan daha yüksek basınç değerlerine çıkılabileceği öngörülmekle beraber özellikle referans dinamik basınç değerinde en önemli parametre olan ivme değerlerindeki tepe noktalarının belirlenmesi ynndeki alışmaların literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.



KAYNAKLAR

- Alberto, C. G. C. D., Alessandro, B. S. O., João, N. S. V., & Fernando, J. R. N. (2006). Dynamic calibration methods for Pressure sensors and development of standard devices for dynamic pressure. XVIII Imeko World Congress Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil
- AMH-38™/AMH-100™ Automated Mass Handling System for PG7000 Piston Gauges Operation and Maintenance Manual. (2007). DH Instruments
- ASM International. Handbook Committee. (1990). Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys (Vol. 1). ASM International.
- Barbera, B., & Molinar, G. F. (1991). A survey of pressure measurements under dynamic conditions in Italy. Proceedings EUROMET seminar on Dynamic Pressure, ENSAM-Paris, France, pp. 1-7
- Bartoli, C., Beug, M. F., Bruns, T., Elster, C., Esward, T., Klaus, L., ... & Schlegel, C. (2012). Traceable dynamic measurement of mechanical quantities: objectives and first results of this european project. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 3(3), 127-135.
- Bean, V. E. (1994). Dynamic pressure metrology. Metrologia, 30(6), 737-741.
- Bilgic, E., & Durgut, Y. (2015). Effects of waveform model on sensitivity values of transducers used in mechanical dynamic measurements. Acta Phys. Pol. A, 128, B-267
- Bruns, T., Franke, E., & Kobusch, M. (2013). Linking dynamic to static pressure by laser interferometry. Metrologia, 50(6), 580.
- Choi, I. M., Yang, I., & Woo, S. Y. (2013). High dynamic pressure standard based on the density change of the step pressure generator. Metrologia, 50(6), 631.
- Clark, C. (1989). The practice of dynamic pressure measurement. Measurement and Control, 22(10), 298-301.
- Cook, J. (1999). Fundamentals of Sensor Technology: Pressure “. Proceedings of the Sensor Expo, Baltimore, Maryland, USA, 401-415.
- Coulter, A. G. (1967). Dynamic calibration of pressure transducers at the BRL Shock Tube facility. Memorandum Report no 1843. Terminal Ballistics Laboratory.
- Dadson, R. S., Lewis, S. L., & Peggs, G. N. (1982). The Pressure Balance: Theory and Practice. HMSO.
- Damion, J. P. (1992). Workshop on the measurement of transient pressure and temperature. (Edited by V. E. Bean and G. J. Rosasco), NISTIR 4828, Gaithersburg, MD, National Institute of Standards and Technology, pp. 182-194

- Del Prete, Z., Monteleone, L., & Steindler, R. (2001). A novel pressure array sensor based on contact resistance variation: Metrological properties. *Review of Scientific Instruments*, 72(2), 1548-1553.
- Dibelius, G., & Minten, G. (1983). Measurement of unsteady pressure fluctuations using capillary tubes. In *Proceedings of the 7th symposium on measuring techniques for transonic and supersonic flow in cascades and turbomachines*, Aachen, Germany (pp. 17-1).
- Diniz, A. C. G. C., Vianna, J. N. S., & Neves, F. J. (2003). *Calibração dinâmica de sensores de pressão: métodos e meios*. Laboratório de Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Durgut, Y., & Koçaş, İ. (2008). Dinamik basınç dönüştürücülerinin kalibrasyon metotları. VII. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, İzmir
- Durgut, Y., Bağcı, E., Akşahin, E., & İnce, A. T. (2017). An investigation on characterization of dynamic pressure transducers using material impact test machine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39, 3645-3655.
- Durgut, Y., Bilgiç, E., Akşahin, E., Fank, S., Bağcı, E., İnce, A. T., & Aydemir, B. (2016). Uncertainty Evaluation for Dynamic Pressure Measurements.
- Elkarous, L., Robbe, C., Pirlot, M., & Golinval, J. C. (2016). Dynamic calibration of piezoelectric transducers for ballistic high-pressure measurement. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 7(2), 201.
- Ghani, J. A., Choudhury, I. A., & Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of materials processing technology*, 145(1), 84-92.
- Gu, T., Shang, F., Kong, D., & Xu, C. (2019). Absolute quasi-static calibration method of piezoelectric high-pressure sensor based on force sensor. *Review of Scientific Instruments*, 90(5).
- Hilten, J. S., Lederer, P. S., Vezzetti, C. F., & Mayo-Wells, J. F. (1976). Development of dynamic calibration methods for pogo pressure transducers (No. NBS-TN-927).
- Hjelmgren, J. (2002). *Dynamic measurement of pressure.-A literature survey*. SP Measurement Technology, SP REPORT : 34
- Hunt, A. (1998). *Standards for the measurement of dynamic force, torque and pressure*. Andrew Hunt Consultants Ltd.
- International Bureau of Weights and Measures, Taylor, B. N., & Thompson, A. (2001). *The international system of units (SI)*. Gaithersburg, MA, USA: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.

- ISA--The Instrumentation, Systems, and Automation Society. (2002). ISA-37.16. 01-2002: A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers. Instrumentation, Systems and Automation Society.
- Jcgm, J. C. G. M. (2008). Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement. Int. Organ. Stand. Geneva ISBN, 50, 134.
- Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. International journal of engineering and mathematical sciences, 1(1), 1-7.
- Kobata, T., & Ooiwa, A. (2000). Method of evaluating frequency characteristics of pressure transducers using newly developed dynamic pressure generator. Sensors and Actuators A: Physical, 79(2), 97-101.
- Kong, D., Zhu, M., Li, Y., & Sun, H. (1999). A new force-testing method for direct calibration of dynamic pressure. In Proceedings of the ISTM/99 3rd international symposium on test and measurement (pp. 1006-1009).
- Lally, J. F. (1991). Dynamic step-pressure calibration. Proceedings from the NIST Workshop on the Measurement of Transient Pressure and Temperature, Gaithersburg, Maryland, USA, pp. 104-119
- McLean, A., & Box, P. (2000). Calibrating air blast transducers with the PCB dynamic pressure pulse calibrator. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory.
- Methods and formulas for analyze taguchi design. (<https://support.minitab.com/en-us/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>)
- Molinar, G. F., Rebaglia, B., Sacconi, A., Legras, J. C., Vailleau, G. P., Schmidt, J. W., ... & Jusko, O. (1999). CCM key comparison in the pressure range 0.05 MPa to 1 MPa (gas medium, gauge mode). Phase A1: Dimensional measurements and calculation of effective area. Metrologia, 36(6), 657.
- Molinar, G., Bergoglio, M., Sabuga, W., Otal, P., Ayyildiz, G., Verbeek, J., & Farar, P. (2005). Calculation of effective area A0 for six piston–cylinder assemblies of pressure balances. Results of the EUROMET Project 740. Metrologia, 42(6), S197.
- Momma, T., & Lichtarowicz, A. (1994). A new calibration method for dynamically loaded transducers. Fluid Measurement and Instrumentation 1994, 103-107.
- Novak, C. J., Peckner, D., & Bernstein, I. M. (1977). Handbook of stainless steels. McGrwa-Hill, New York.
- Optik Ölçümler ve İnterferometreler. (<https://web.itu.edu.tr/gulmezt/Metroloji/Metroloji%20Bolum%207.pdf>)
- Paniagua, G., & Dénos, R. (2002). Digital compensation of pressure sensors in the time domain. Experiments in fluids, 32(4), 417-424.

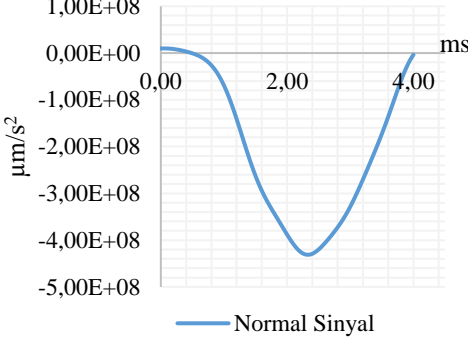
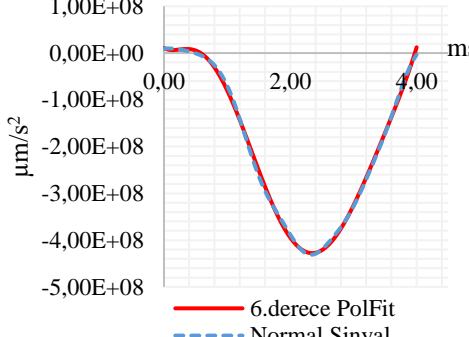
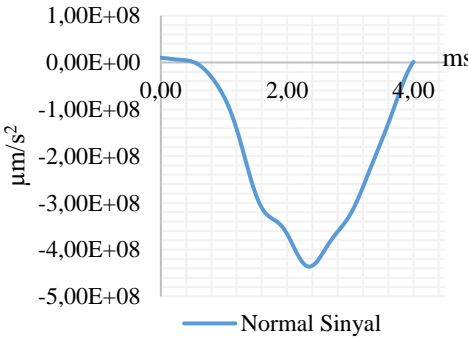
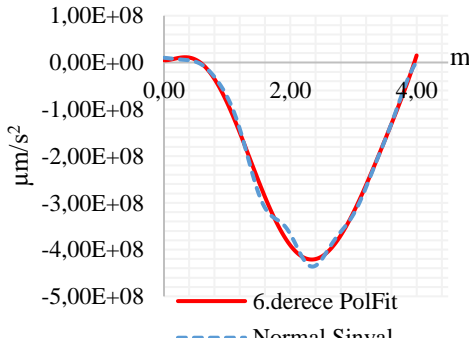
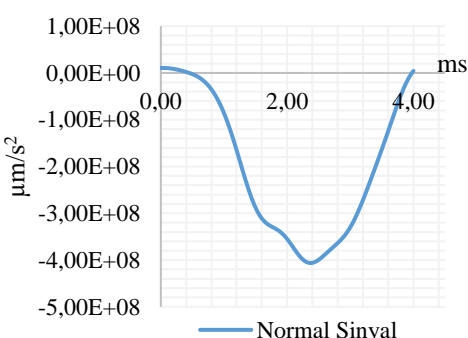
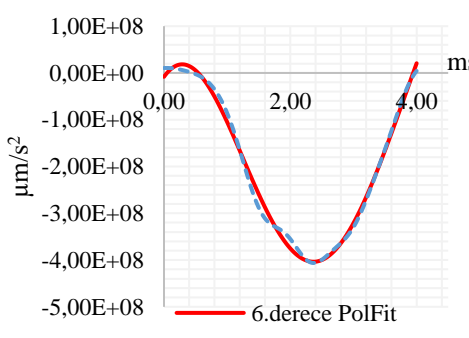
- PG-7000-AMH Automated Mass Handling for PG7000™ Piston Gauges. (2010). Fluke (USA)
- Riegebauer, J. (1992). Dynamic pressure calibrator. In Proceedings, Workshop on the measurement of transient pressure and temperature, NISTIR (Vol. 4828, pp. 151-182).
- Salminen, J., Högström, R., Saxholm, S., Lakka, A., Riski, K., & Heinonen, M. (2018). Development of a primary standard for dynamic pressure based on drop weight method covering a range of 10 MPa–400 MPa. *Metrologia*, 55(2), S52.
- Salminen, J., Saxholm, S., Hämäläinen, J., & Högström, R. (2020). Advances in traceable calibration of cylinder pressure transducers. *Metrologia*, 57(4), 045006.
- Santos, Â. M. N. D. (2012). Efeitos dinâmicos na medição: problemas em metrologia dinâmica e medição por coordenadas.
- Schwepe, J. L. (1963). Methods for the dynamic calibration of pressure transducers (No. 67). US Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- Shipunov, A. V. (1999). Determination of the dynamic characteristics of piezoelectric pressure transducers and a comparative analysis of methods. *Measurement Techniques*, 42(10), 959-961.
- Slanina, O., Quabis, S., Derksen, S., Herbst, J., & Wynands, R. (2020). Comparing the adiabatic and isothermal pressure dependence of the index of refraction in a drop-weight apparatus. *Applied Physics B*, 126, 1-10.
- Taguchi, G. (1993). Robust technology development. *Mechanical Engineering-CIME*, 115(3), 60-63.
- The American Society of Mechanical Engineers. (1972). ANSI B88. A guide for the dynamic calibration of pressure transducers. New York, pp.28
- Uddeholm Calmax. (<https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/37/2017/09/Tech-Uddeholm-Calmax-EN.pdf>)
- Vim, I. S. O. (2004). International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM). International Organization, 2004, 09-14.
- Wang, S. H., Tsung, T. T., & Han, L. L. (2009). Hydraulic square-wave pressure generator with a specific rotating valve. *Measurement*, 42(5), 672-677.
- Weyer, H., & Schodl, R. (1971). Development and testing of techniques for oscillating pressure measurements especially suitable for experimental work in turbomachinery. *ASME Journal of Basic Engineering*, pp. 603-609
- Yılmaz, R., & Hamarat, A. (2018). Otomatik kütle yüklemeli pistonlu basınç standardı ile referans basınç uygulaması. *Academic Perspective Procedia*, 1 (1), 603-611. DOI: 10.33793/acperpro.01.01.113

- Yu, Z., Hong-yan, Z., Jing, Z., & Dong-xing, P. (2011, August). The dynamic calibration method of high-pressure transducer under high-static pressure. In 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC) (pp. 1403-1406). IEEE.
- Zhang, Y., Zu, J., & Zhang, H. Y. (2012). Dynamic calibration method of high-pressure transducer based on quasi- δ function excitation source. *Measurement*, 45(8), 1981-1988.

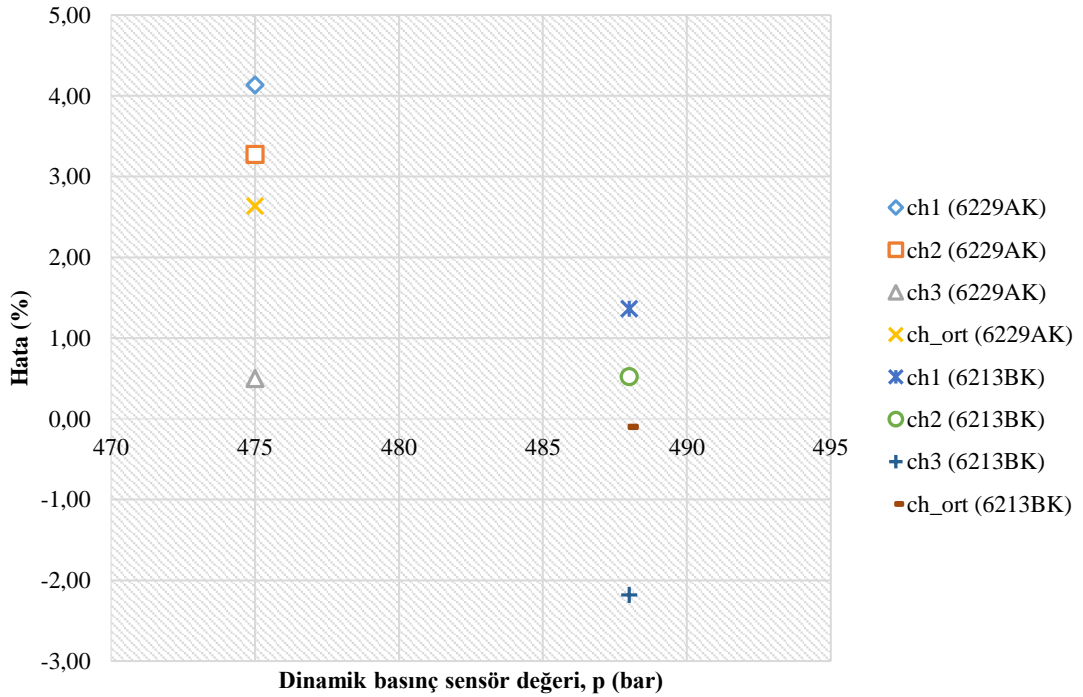
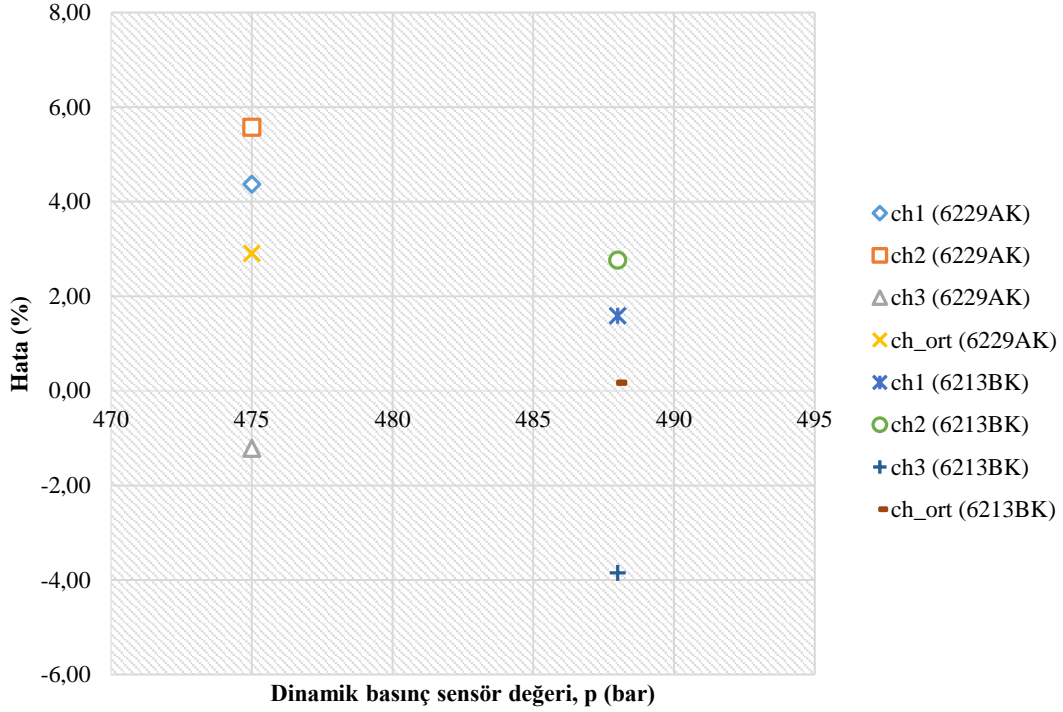


EKLER

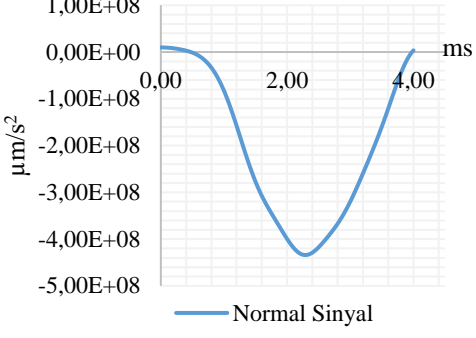
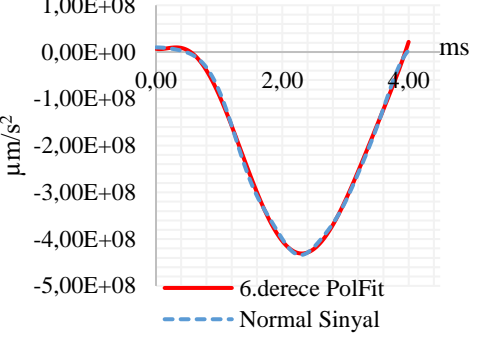
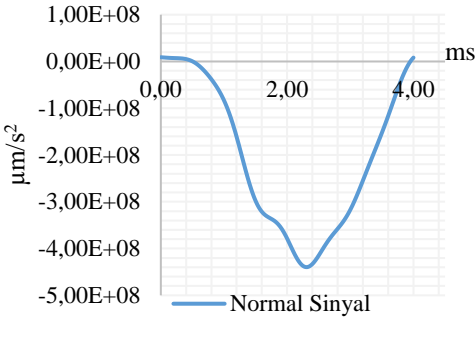
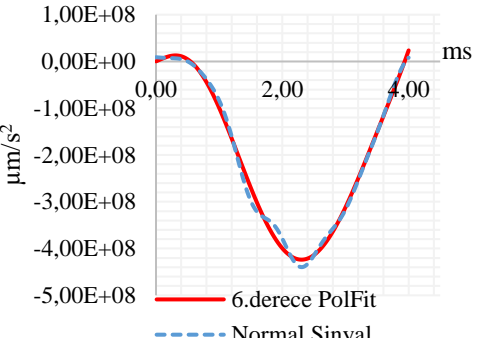
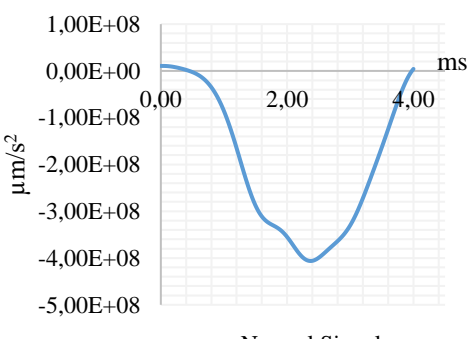
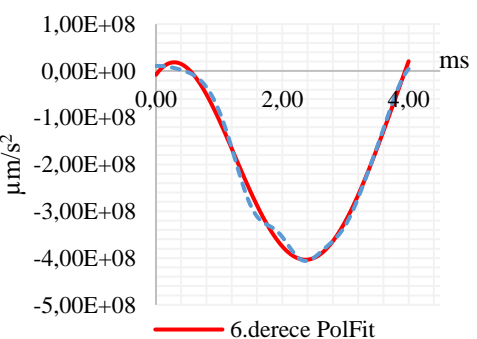
EK-1 500 bar basınç değeri 2. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|-------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 441,08 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 495,75 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 440,08 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 494,65 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 446,28 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 501,47 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 436,36 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 490,56 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 416,95 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 469,22 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 424,36 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 477,37 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 434,77 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 488,81 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 433,6 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 487,53 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 475,00 bar | Kistler 6213BK | 488,00 bar |

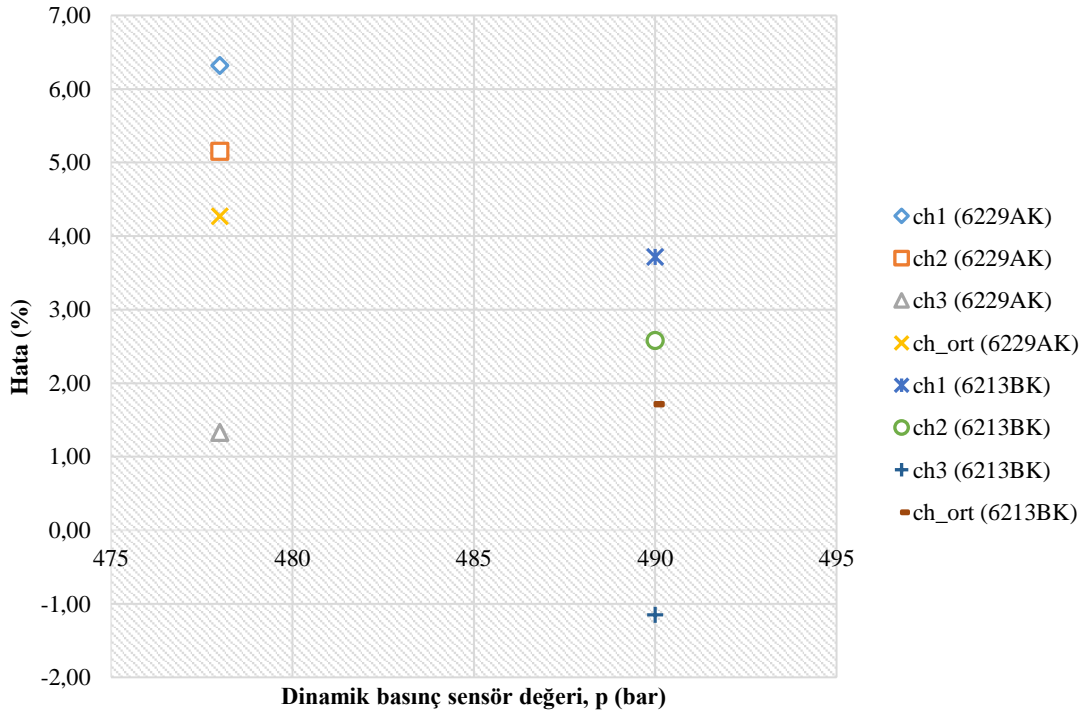
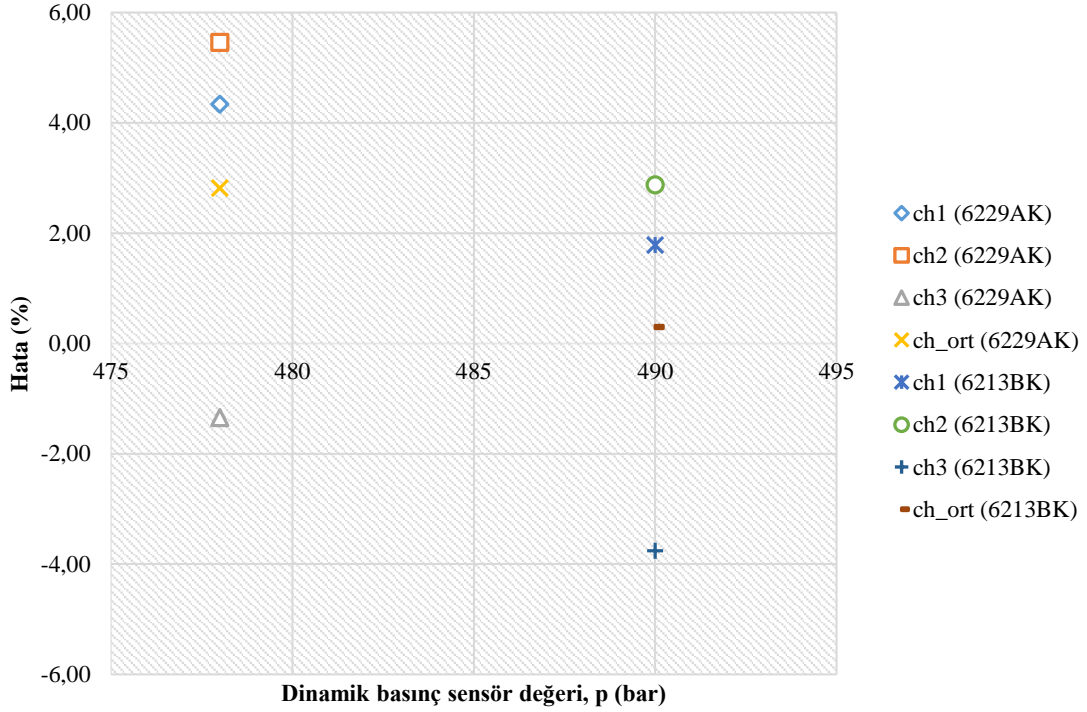
EK-2 500 bar basınç değeri 2. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



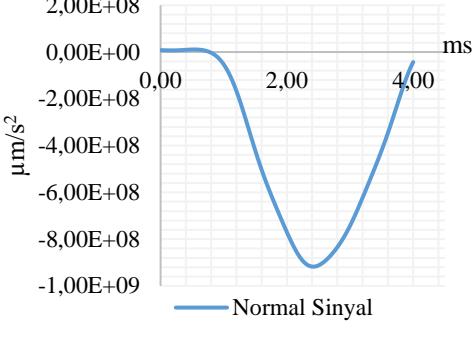
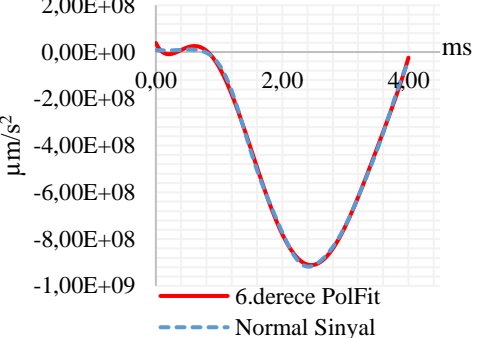
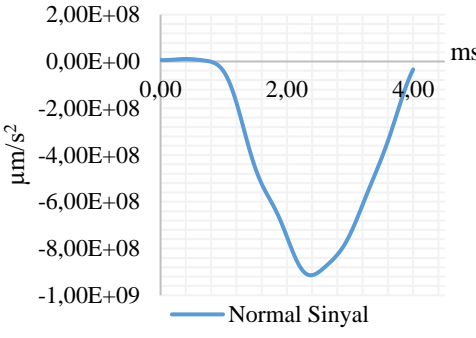
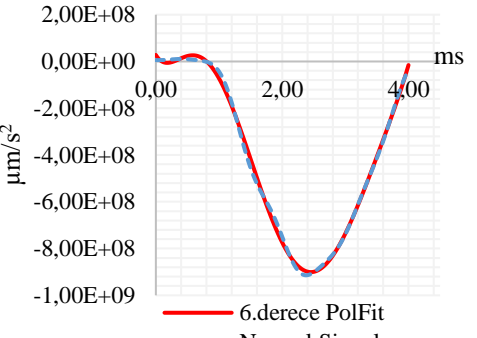
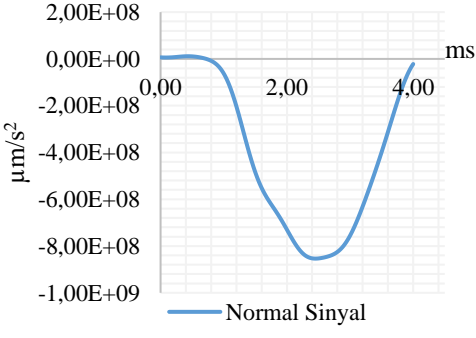
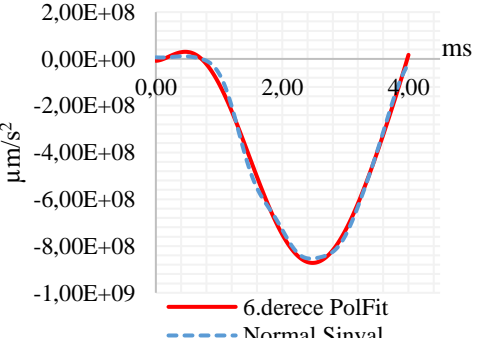
EK-3 500 bar basınç değeri 3. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|-------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 443,79 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 498,73 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 452,42 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 508,22 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 448,65 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 504,08 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 447,35 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 502,64 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 419,09 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 471,57 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 430,72 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 484,36 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 437,18 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 491,46 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 443,5 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 498,41 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 478,00 bar | Kistler 6213BK | 490,00 bar |

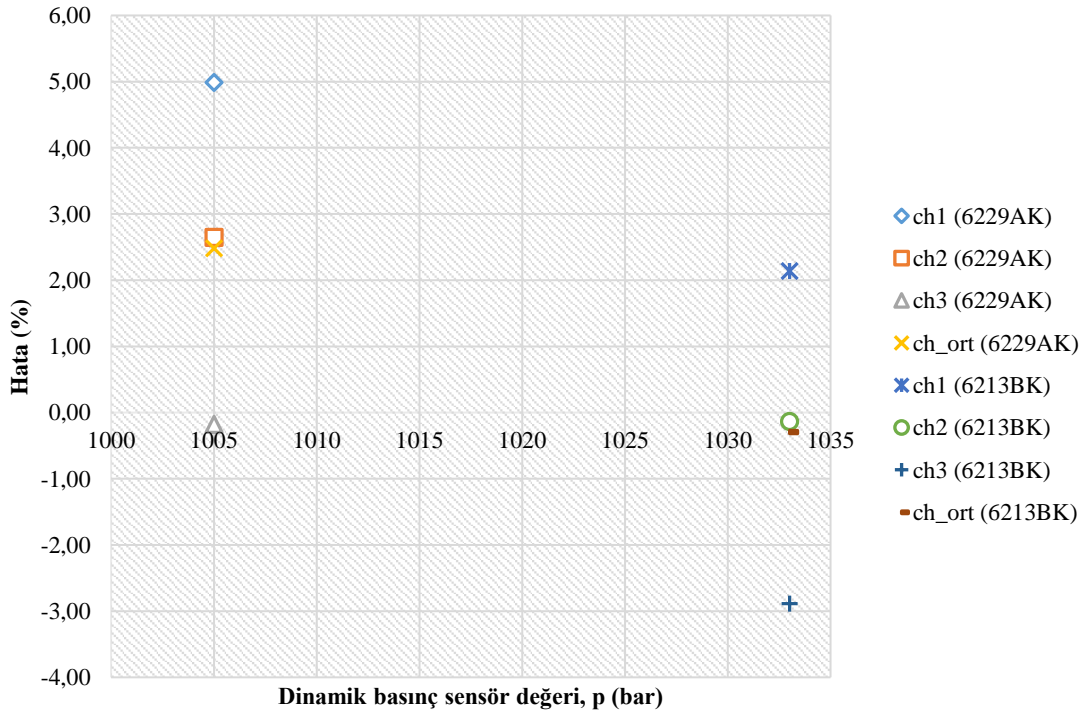
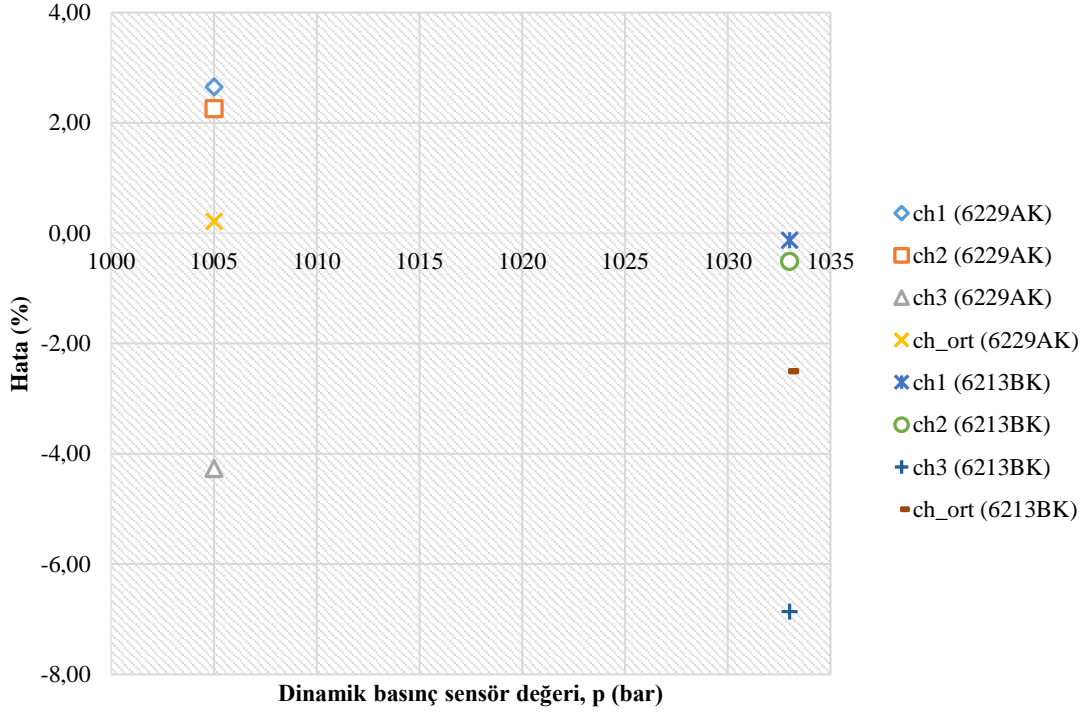
EK-4 500 bar basınç değeri 3. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



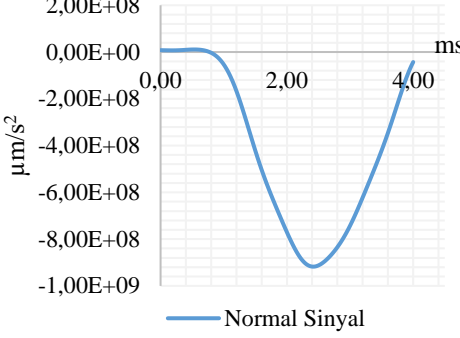
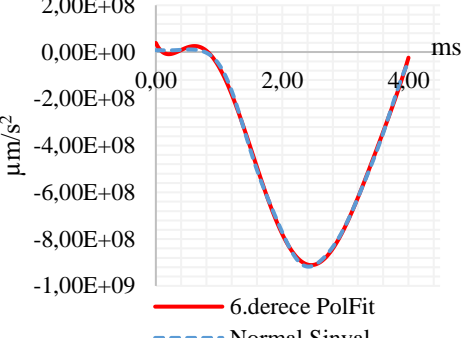
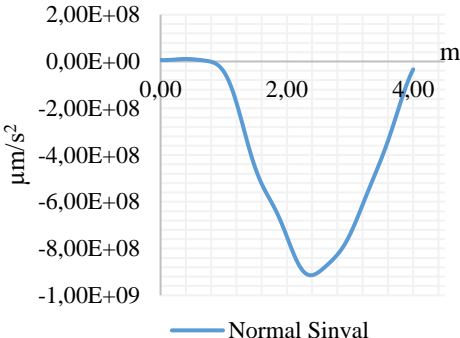
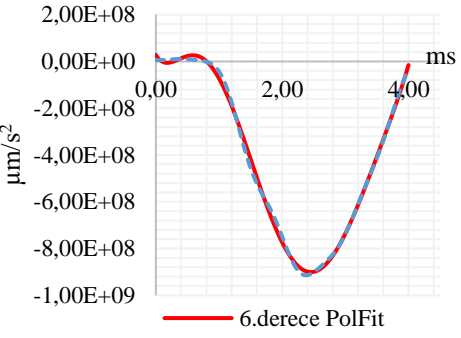
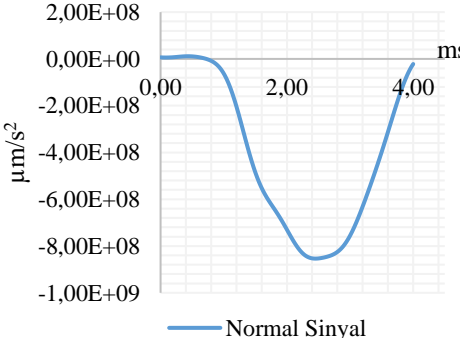
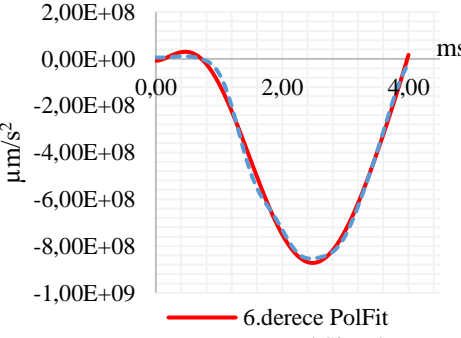
EK-5 1000 bar basınç değeri 1. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 928,49 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1031,66 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 949,82 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1055,12 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 924,88 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1027,70 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 928,44 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1031,61 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 865,22 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 962,10 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 902,62 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1003,21 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 906,20 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1007,15 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 926,96 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1029,98 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 1005,00 bar | Kistler 6213BK | 1033,00 bar |

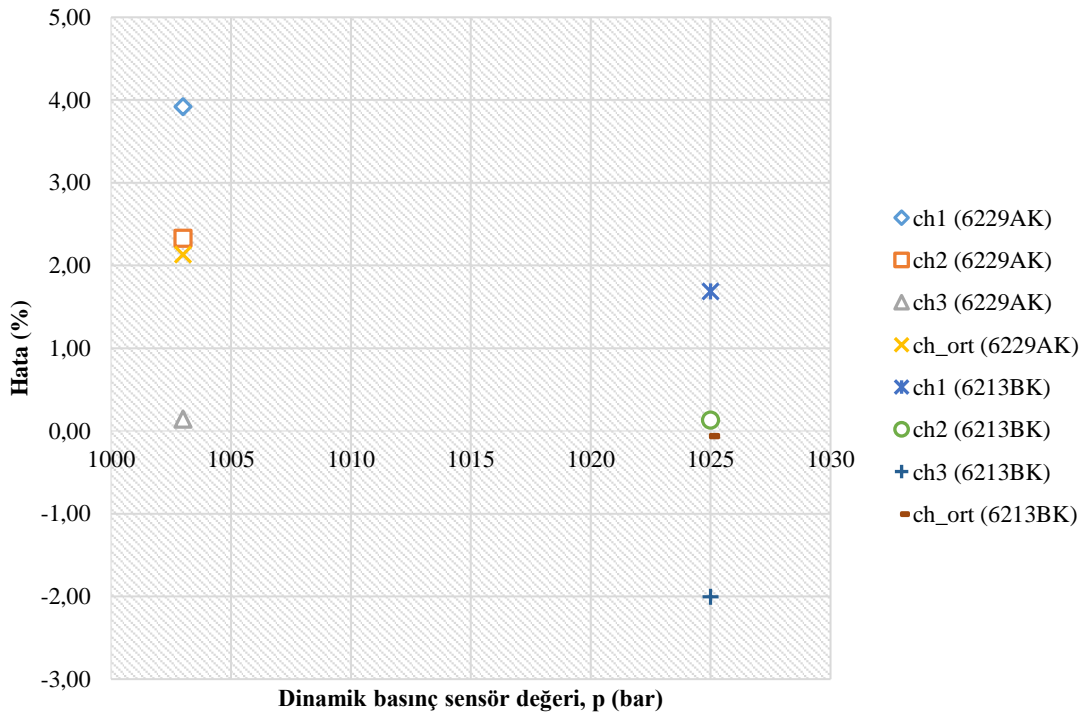
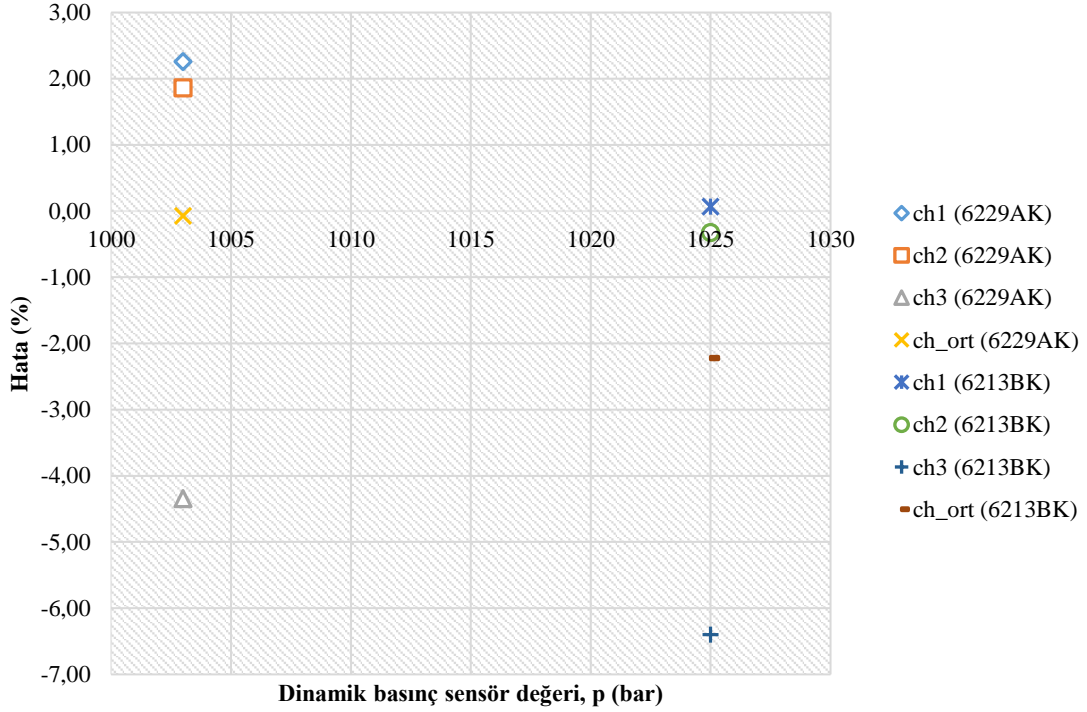
EK-6 1000 bar basınç değeri 1. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



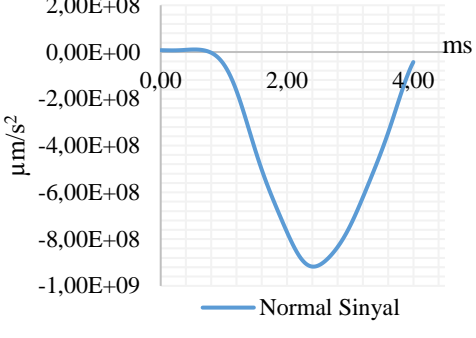
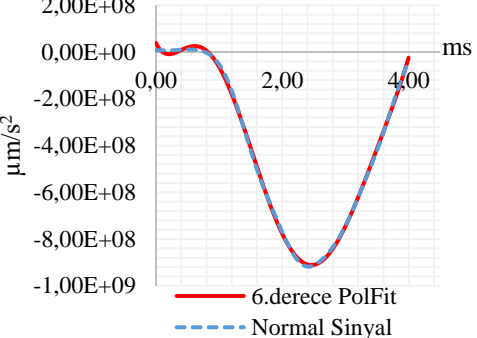
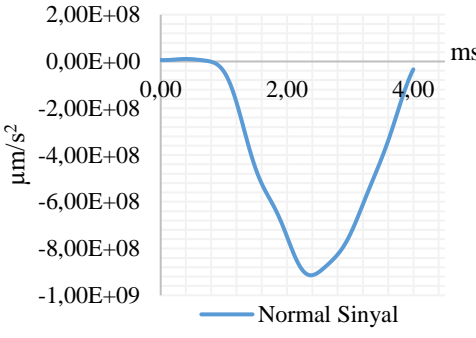
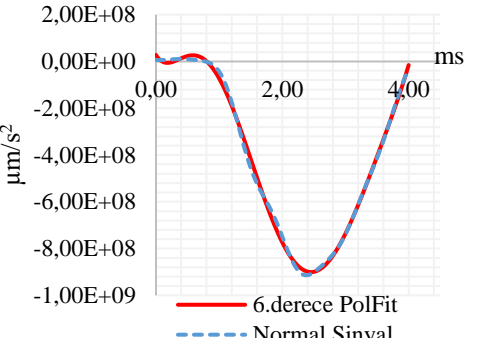
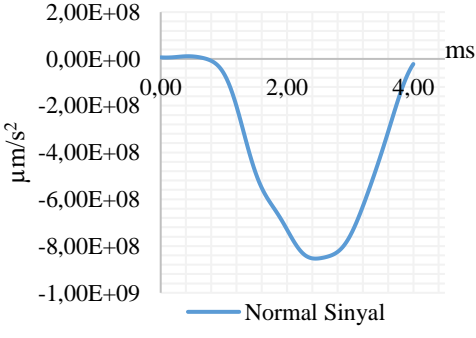
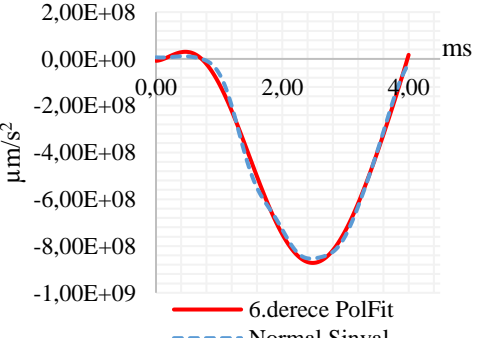
EK-7 1000 bar basınç değeri 2. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 923,03 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1025,66 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 938,17 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1042,31 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 919,41 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1021,68 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 923,67 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1026,36 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 862,78 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 959,42 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 903,74 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1004,45 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 901,74 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1002,25 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 921,86 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1024,37 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 1003,00 bar | Kistler 6213BK | 1025,00 bar |

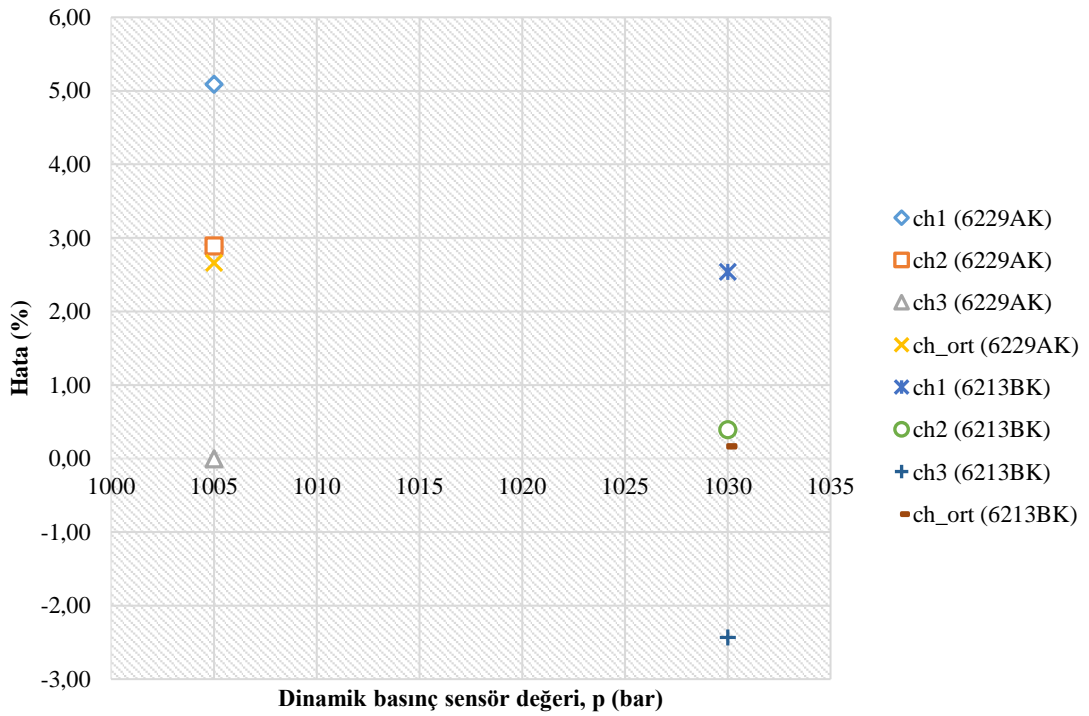
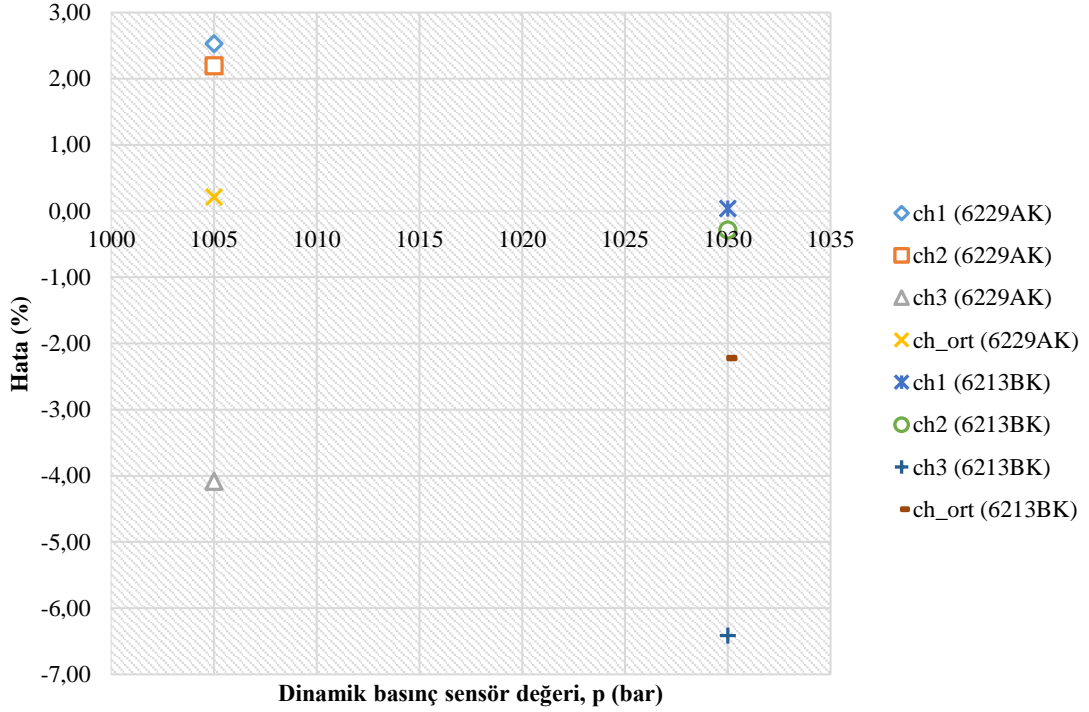
EK-8 1000 bar basınç değeri 2. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



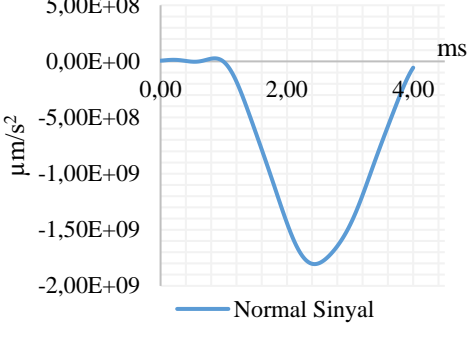
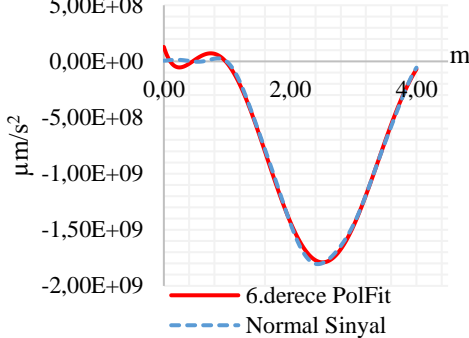
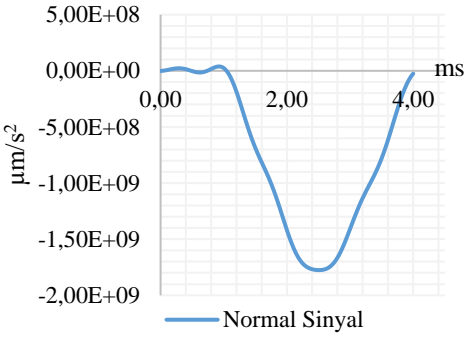
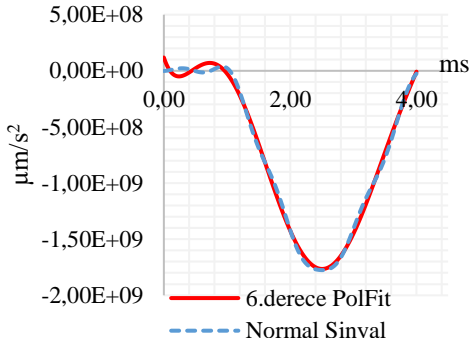
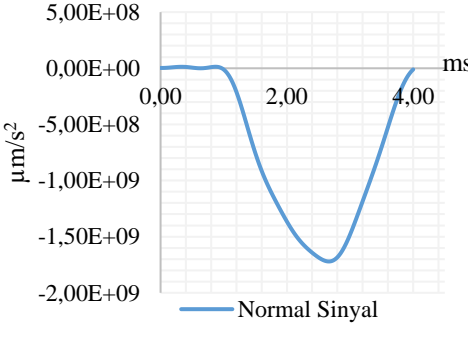
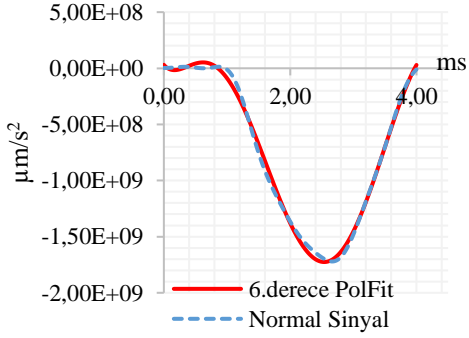
EK-9 1000 bar basınç değeri 3. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 927,34 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1030,40 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 950,76 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1056,15 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 924,31 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1027,06 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 930,67 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1034,06 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 866,91 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 963,95 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 904,20 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1004,96 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 906,18 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1007,14 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 928,55 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1031,72 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 1005,00 bar | Kistler 6213BK | 1030,00 bar |

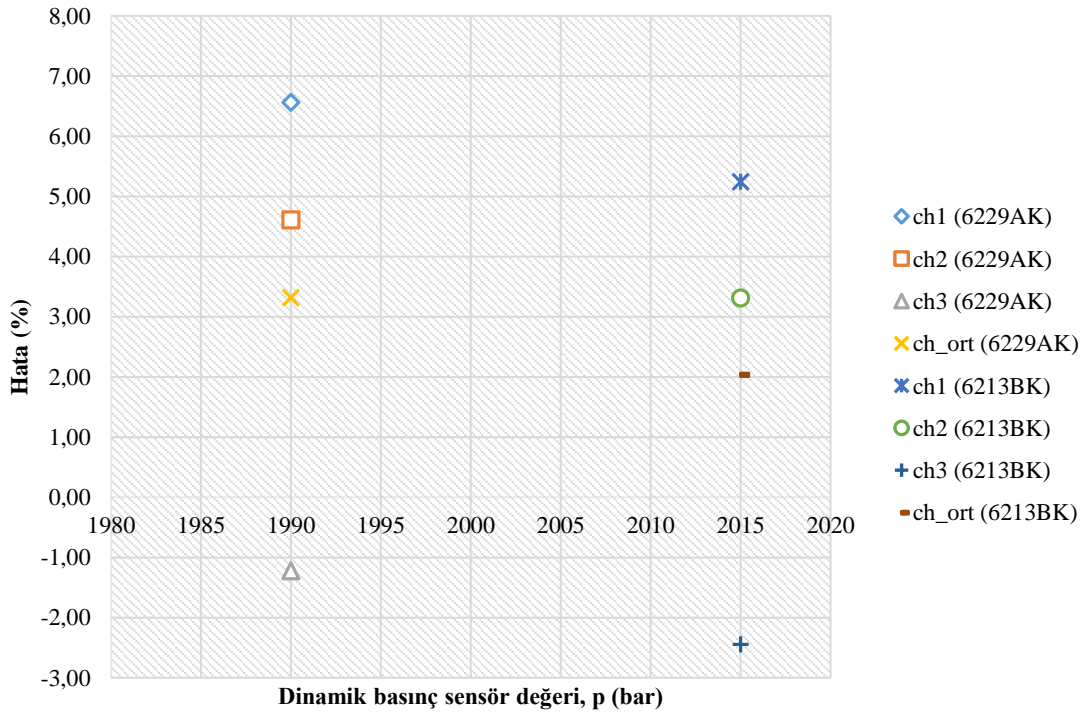
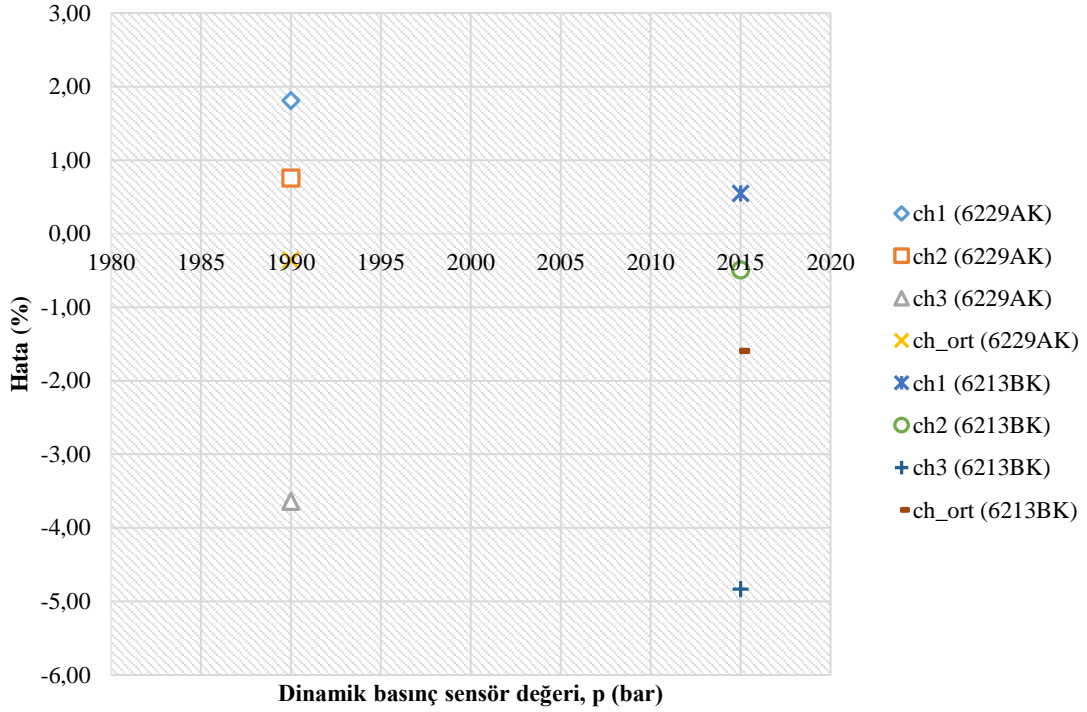
EK-10 1000 bar basınç değeri 3. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



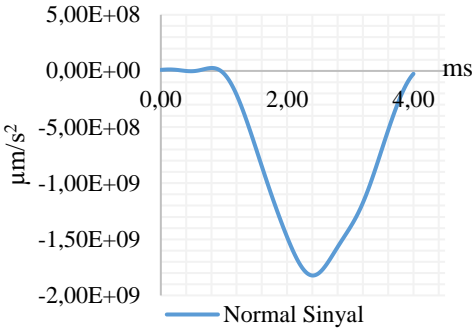
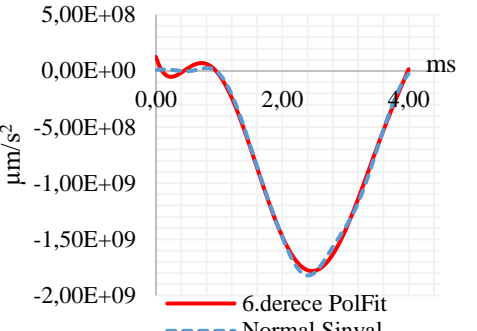
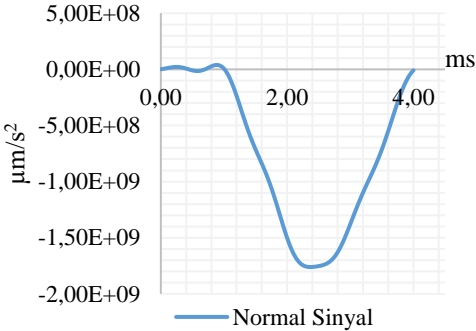
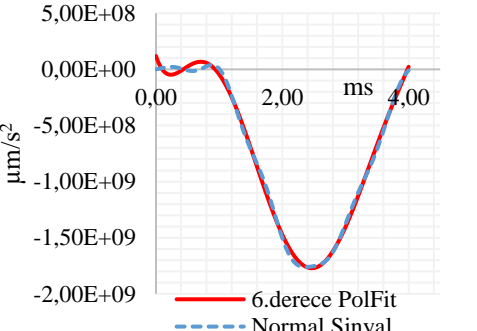
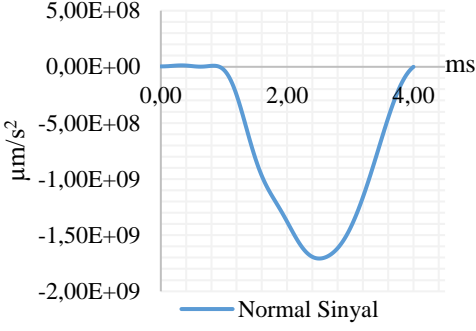
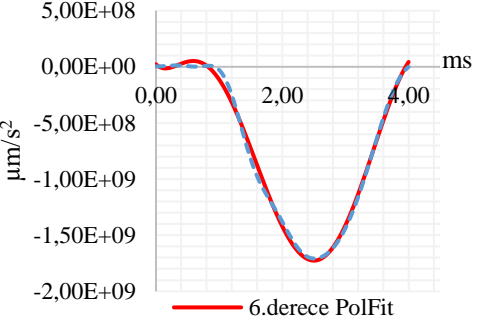
EK-11 2000 bar basınç değeri 1. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 1832,91 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2026,08 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1918,92 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2120,66 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 1813,83 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2005,11 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1883,57 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2081,78 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 1734,28 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1917,64 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1778,00 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1965,70 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 1793,67 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1982,94 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 1860,16 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 2056,05 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 1990,00 bar | Kistler 6213BK | 2015,00 bar |

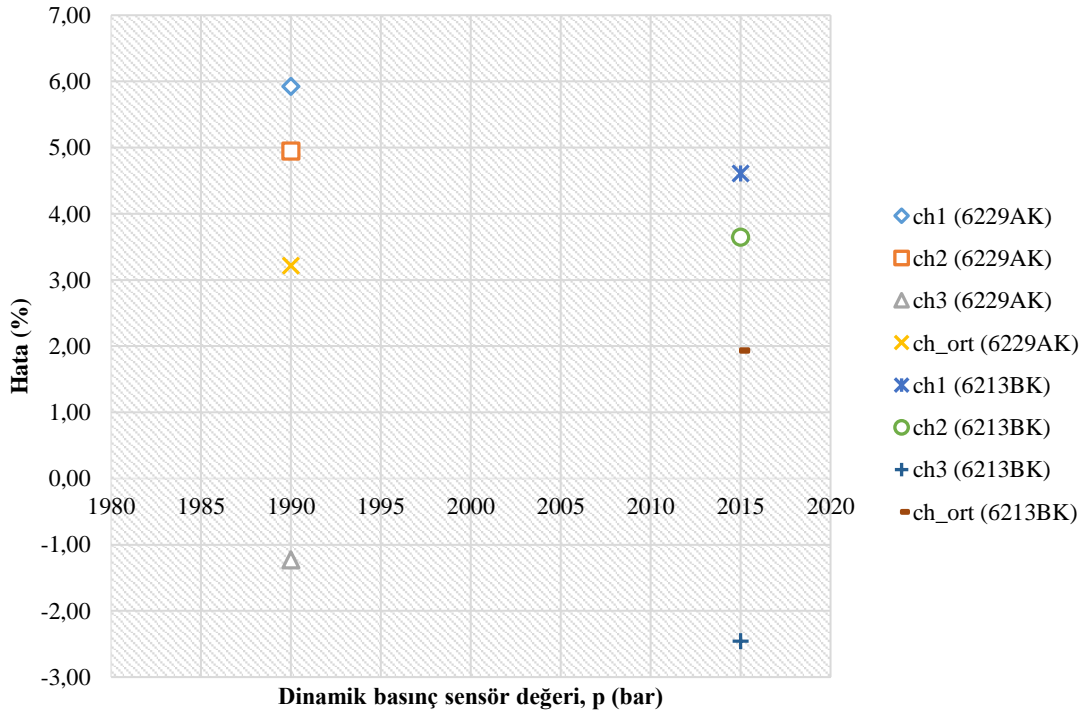
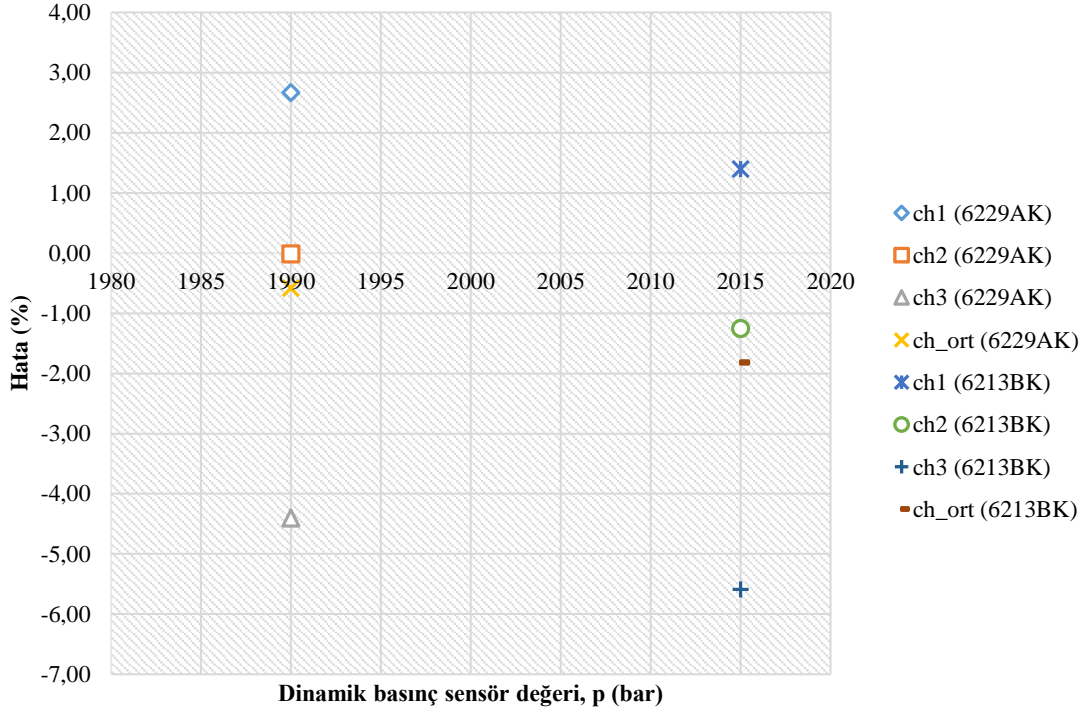
EK-12 2000 bar basınç değeri 1. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



EK-13 2000 bar basınç değeri 2. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 1848,42 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2043,13 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1907,33 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2107,90 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 1799,87 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1989,76 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1889,67 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2088,49 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 1720,44 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1902,42 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1777,83 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1965,53 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 1789,59 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1978,44 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 1858,27 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 2053,97 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 1990,00 bar | Kistler 6213BK | 2015,00 bar |

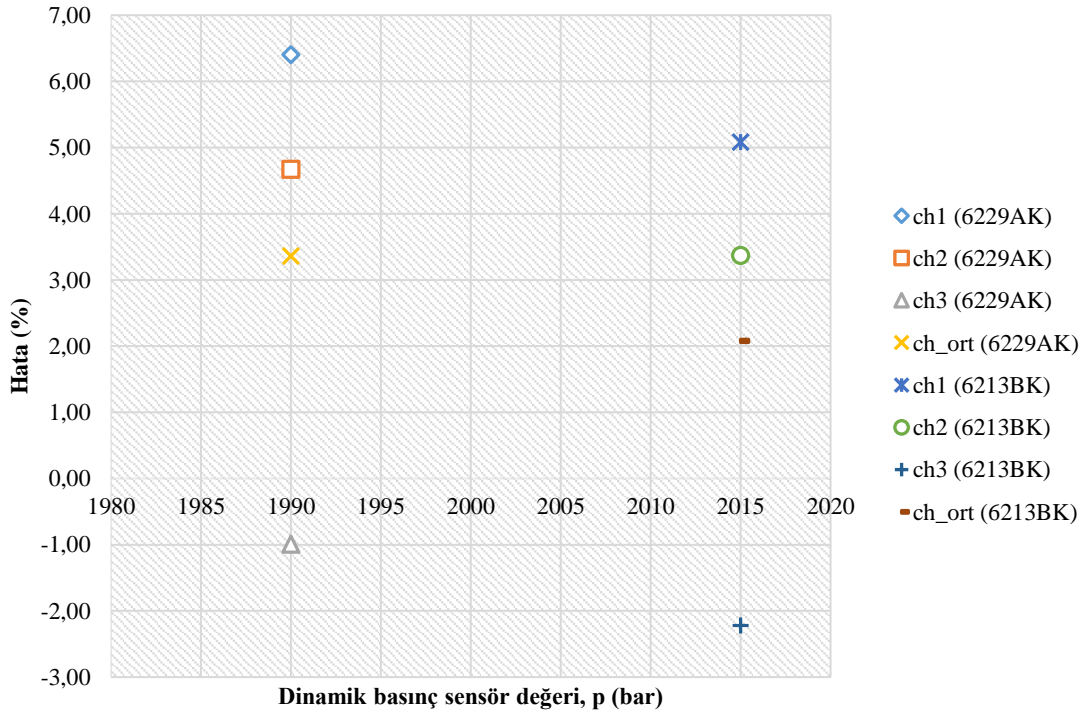
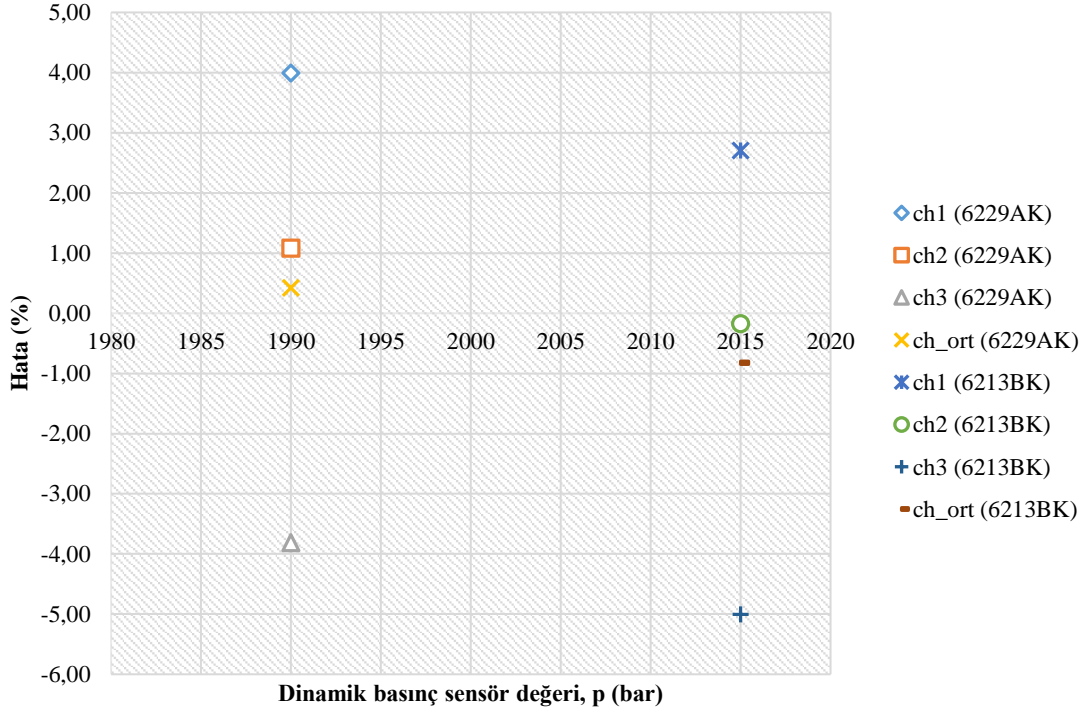
EK-14 2000 bar basınç değeri 2. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



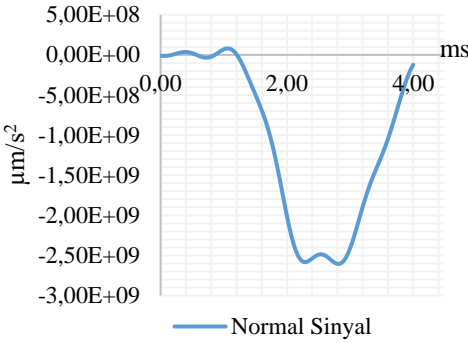
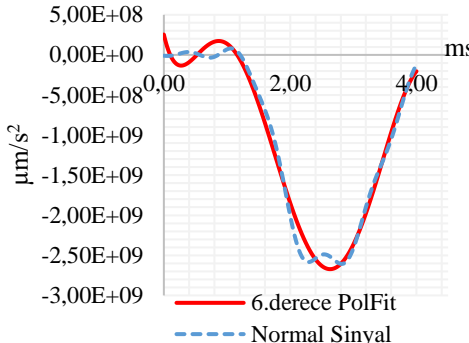
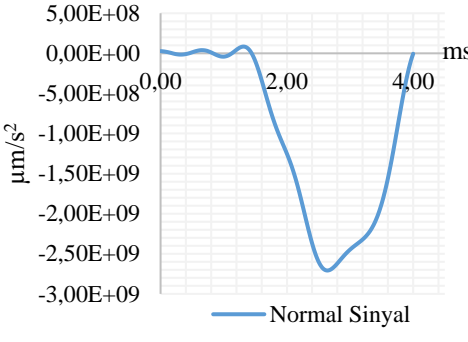
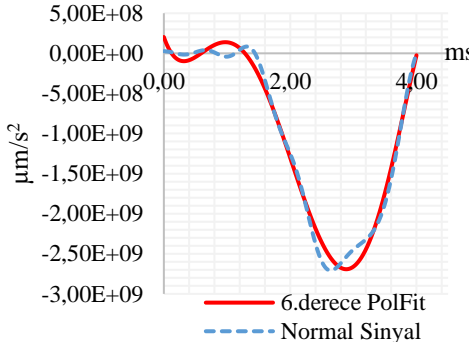
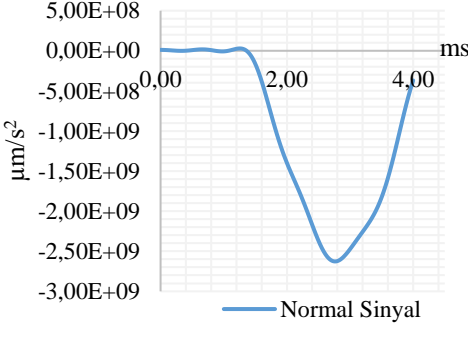
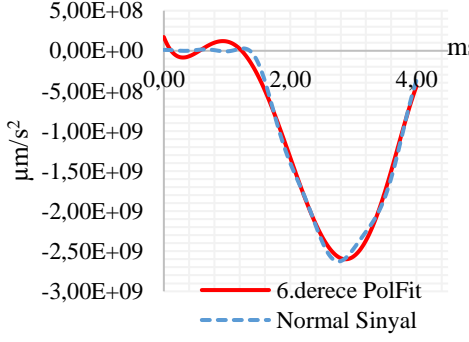
EK-15 2000 bar basınç değeri 3. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|---|--------------------------------------|
| Kanal 1 | | | |
| | $ a_{maks} = 1872,40 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2069,51 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1915,96 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2117,39 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 | | | |
| | $ a_{maks} = 1819,71 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2011,57 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1884,61 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2082,93 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 | | | |
| | $ a_{maks} = 1731,12 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1914,16 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 1782,18 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 1970,30 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 1807,74 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 1998,41 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 1860,92 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 2056,88 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 1990,00 bar | Kistler 6213BK | 2015,00 bar |

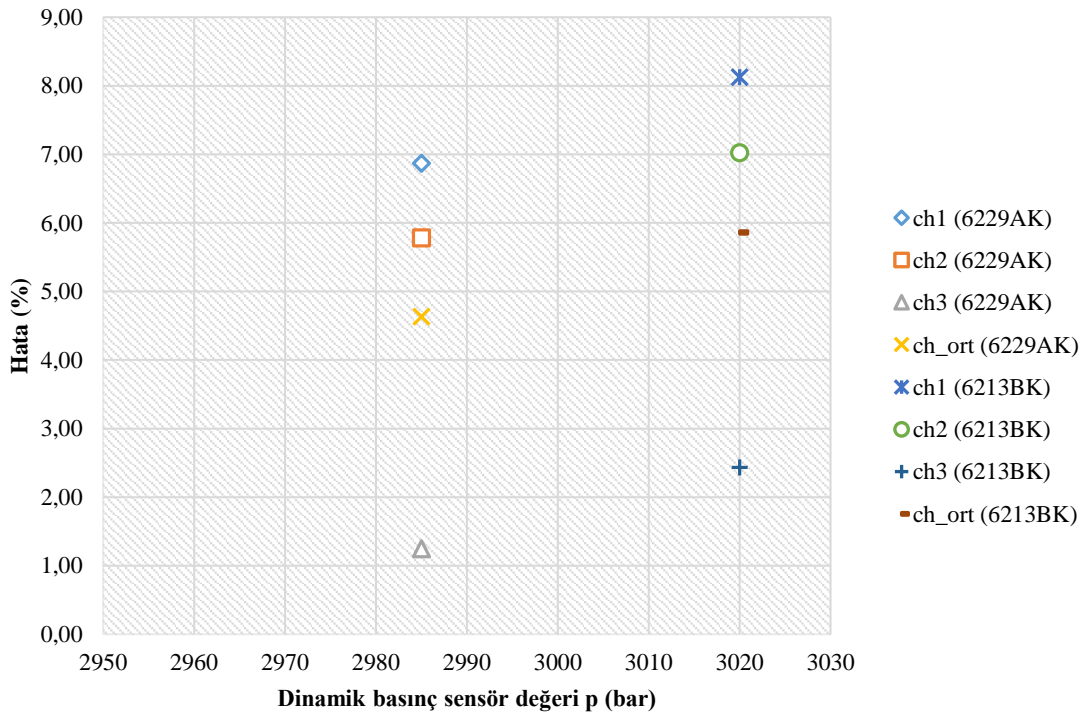
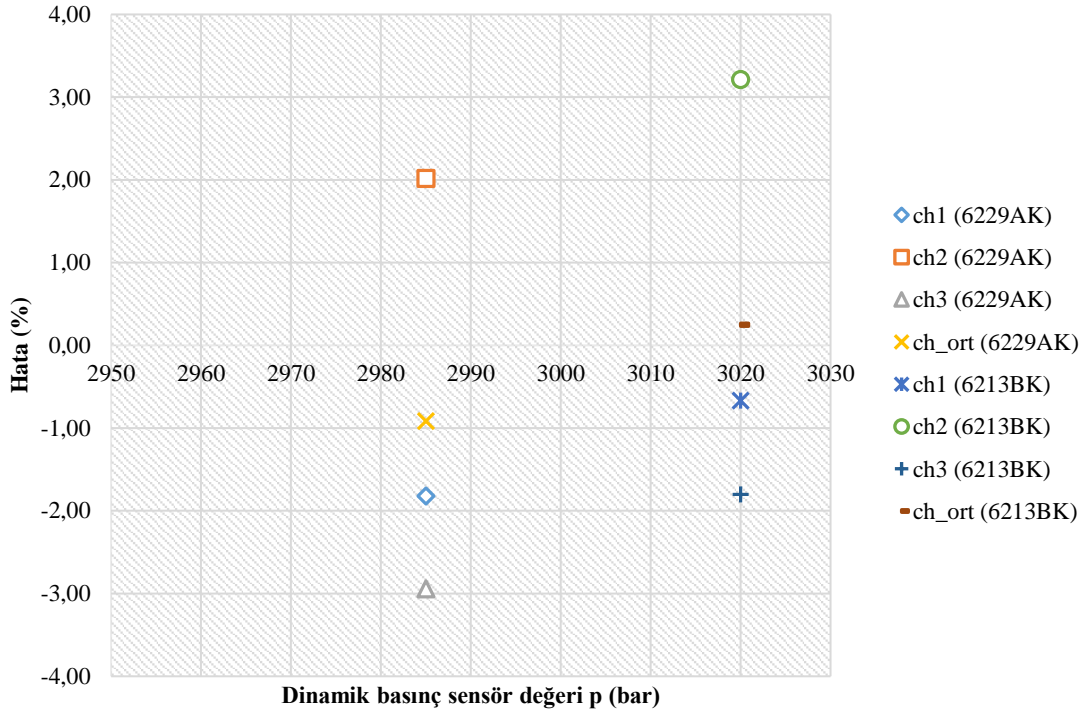
EK-16 2000 bar basınç değeri 3. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



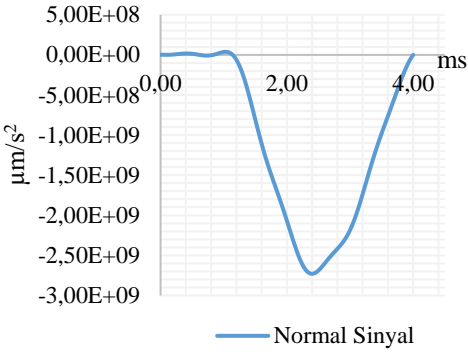
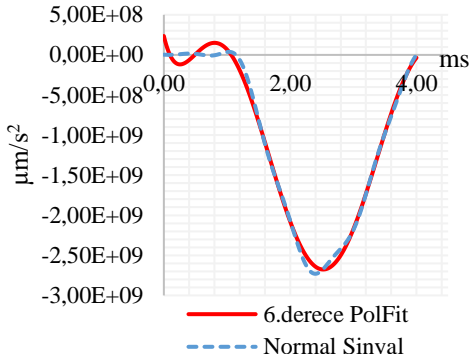
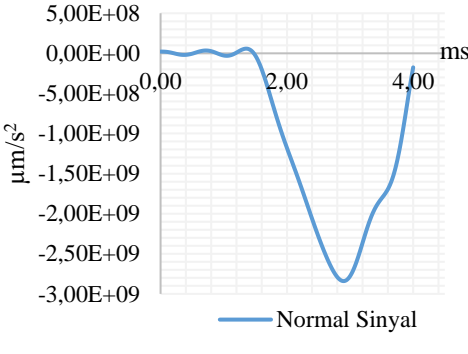
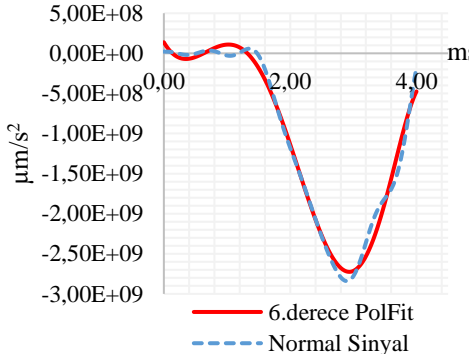
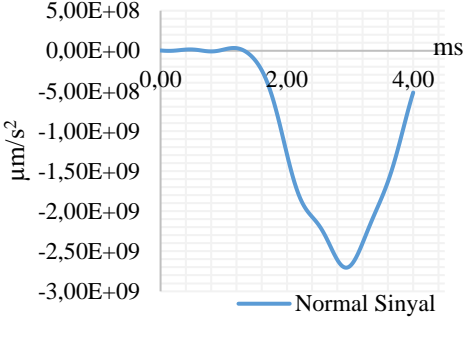
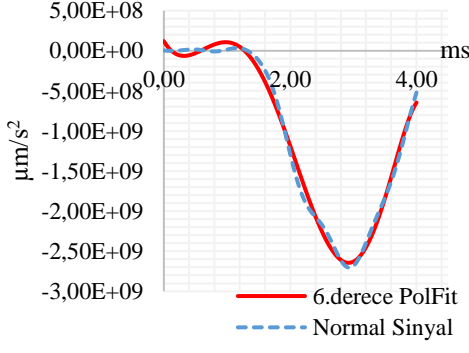
EK-17 3000 bar basınç değeri 1. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2686,91 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2965,06 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2925,59 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3227,50 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2792,34 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3080,98 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2895,65 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3194,57 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2656,10 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 2931,19 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2771,13 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3057,67 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 2711,78 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 2992,41 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 2864,12 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 3159,91 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 2985,00 bar | Kistler 6213BK | 3020,00 bar |

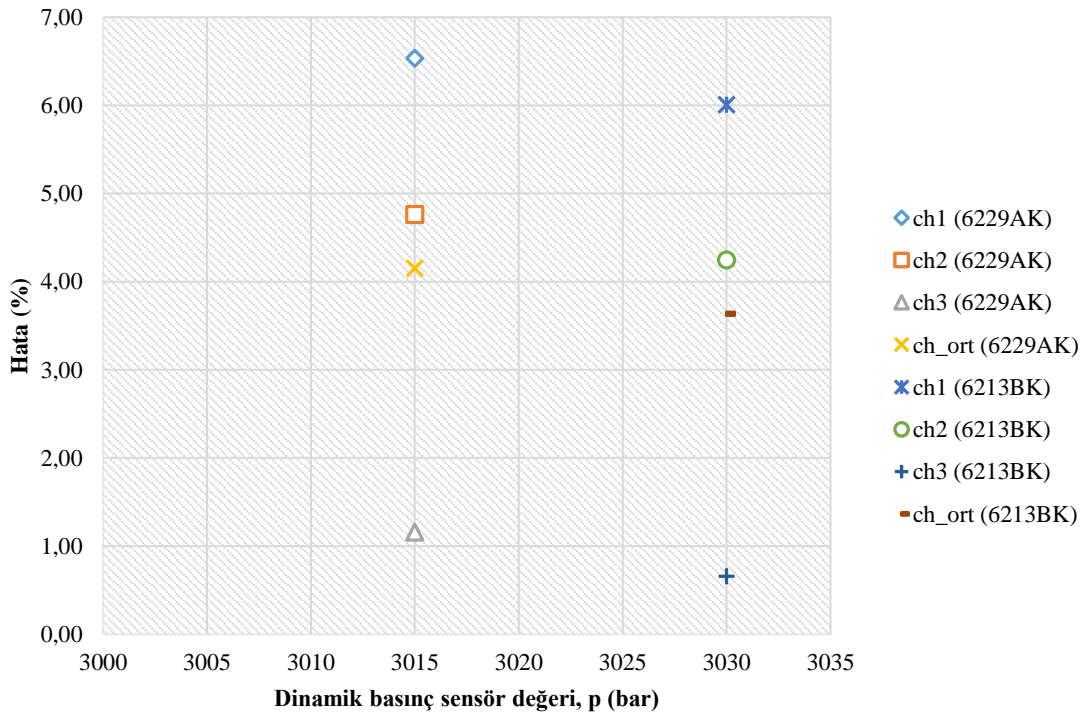
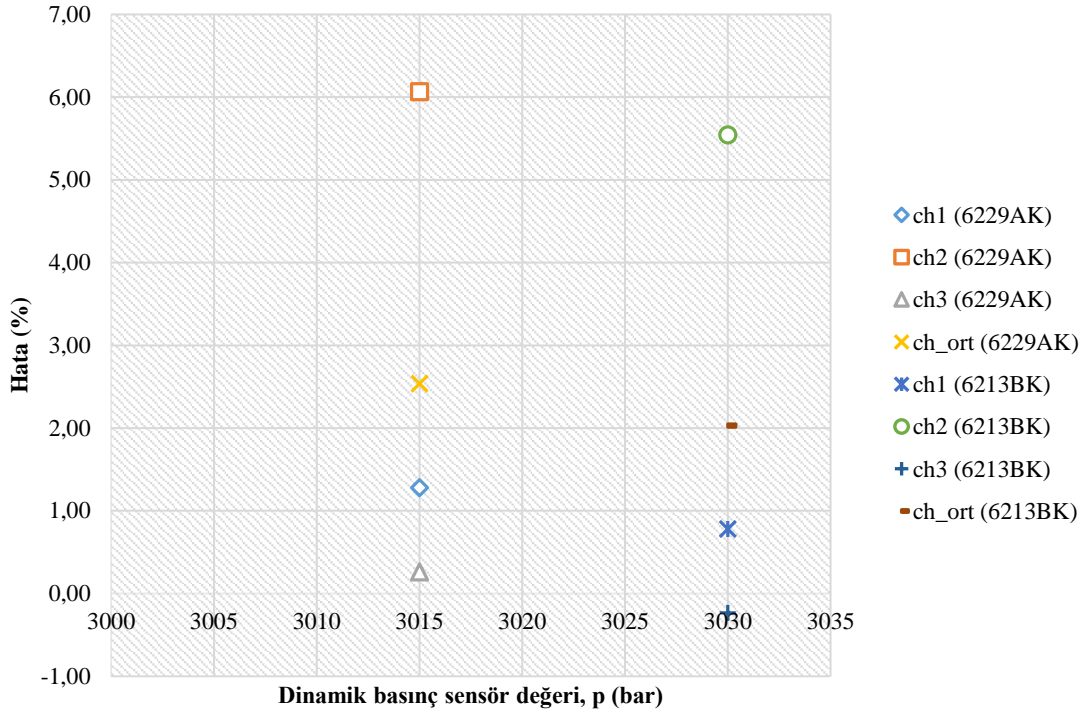
EK-18 3000 bar basınç değeri 1. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



EK-19 3000 bar basınç değeri 2. ölçüm için elde edilen değerler

| | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Kanal 1 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2767,15 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3053,62 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2911,49 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3212,00 \text{ bar}$ | |
| Kanal 2 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2898,73 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3197,96 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2862,94 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3158,61 \text{ bar}$ | |
| Kanal 3 |  |  | |
| | $ a_{maks} = 2739,53 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3022,93 \text{ bar}$ | $ a_{maks} = 2764,09 \text{ m/s}^2$ $p_{ref} = 3049,93 \text{ bar}$ | |
| Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | | Ortalama a_{maks} ve p_{ref} | |
| $ a_{maks_ort} = 2801,90 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 3091,50 \text{ bar}$ | $ a_{maks_ort} = 2846,17 \text{ m/s}^2$ | $p_{ref_ort} = 3140,18 \text{ bar}$ |
| Kistler 6229AK | 3015,00 bar | Kistler 6213BK | 3030,00 bar |

EK-20 3000 bar basınç değeri 2. ölçüm için dinamik basınç sensör değerlerine karşılık hesaplanan referans dinamik basınç değerlerine ait sapmaların yüzdesel gösterimi (normal sinyal için (üstte), 6.derece polfit için (altta))



EK-21 (500-3000) bar ölçüm aralığı genel sonuçları (Kistler 6229AK ile (üstte), Kistler 6213BK ile (altta))

| Ölçüm Noktası | SR. NO. | Hesaplanan Referans Dinamik Basınç Değerleri | | Dinamik Basınç Farkı Değerleri | | | | Kistler |
|---------------|---------|--|----------|--------------------------------|----------|--------|----------|---------|
| | | Normal | 6.derece | Normal | 6.derece | Normal | 6.derece | |
| bar | | bar | bar | bar | bar | % | % | bar |
| 500 | 1 | 494,56 | 491,35 | 14,56 | 11,35 | 3,03 | 2,37 | 480,0 |
| | 2 | 488,81 | 487,53 | 13,81 | 12,53 | 2,91 | 2,64 | 475,0 |
| | 3 | 491,46 | 498,41 | 13,46 | 20,41 | 2,82 | 4,27 | 478,0 |
| | ort | 491,61 | 492,43 | 13,94 | 14,76 | 2,92 | 3,09 | 477,67 |
| 1000 | 1 | 1007,15 | 1029,98 | 2,15 | 24,98 | 0,21 | 2,49 | 1005,0 |
| | 2 | 1002,25 | 1024,37 | -0,75 | 21,37 | -0,07 | 2,13 | 1003,0 |
| | 3 | 1007,14 | 1031,72 | 2,14 | 26,72 | 0,21 | 2,66 | 1005,0 |
| | ort | 1005,51 | 1028,69 | 1,18 | 24,36 | 0,12 | 2,43 | 1004,33 |
| 2000 | 1 | 1982,94 | 2056,05 | -7,06 | 66,05 | -0,35 | 3,32 | 1990,0 |
| | 2 | 1978,44 | 2053,97 | -11,56 | 63,97 | -0,58 | 3,21 | 1990,0 |
| | 3 | 1998,41 | 2056,88 | 8,41 | 66,88 | 0,42 | 3,36 | 1990,0 |
| | ort | 1986,60 | 2055,63 | -3,40 | 65,63 | -0,17 | 3,30 | 1990,00 |
| 3000 | 1 | 2992,41 | 3159,91 | 7,41 | 174,91 | 0,25 | 5,86 | 2985,0 |
| | 2 | 3091,50 | 3140,18 | 76,50 | 125,18 | 2,54 | 4,15 | 3015,0 |
| | 3 | 3009,90 | 2938,41 | -20,10 | -91,59 | -0,66 | -3,02 | 3030,0 |
| | ort | 3031,27 | 3079,50 | 21,27 | 69,50 | 0,71 | 2,33 | 3010,00 |

| Ölçüm Noktası | SR. NO. | Hesaplanan Referans Dinamik Basınç Değerleri | | Dinamik Basınç Farkı Değerleri | | | | Kistler |
|---------------|---------|--|----------|--------------------------------|----------|--------|----------|---------|
| | | Normal | 6.derece | Normal | 6.derece | Normal | 6.derece | |
| bar | | bar | bar | bar | bar | % | % | bar |
| 500 | 1 | 494,56 | 491,35 | 1,56 | -1,65 | 0,32 | -0,33 | 493,0 |
| | 2 | 488,81 | 487,53 | 0,81 | -0,47 | 0,17 | -0,10 | 488,0 |
| | 3 | 491,46 | 498,41 | 1,46 | 8,41 | 0,30 | 1,72 | 490,0 |
| | ort | 491,61 | 492,43 | 1,28 | 2,10 | 0,26 | 0,43 | 490,33 |
| 1000 | 1 | 1007,15 | 1029,98 | -25,85 | -3,02 | -2,50 | -0,29 | 1033,0 |
| | 2 | 1002,25 | 1024,37 | -22,75 | -0,63 | -2,22 | -0,06 | 1025,0 |
| | 3 | 1007,14 | 1031,72 | -22,86 | 1,72 | -2,22 | 0,17 | 1030,0 |
| | ort | 1005,51 | 1028,69 | -23,82 | -0,64 | -2,31 | -0,06 | 1029,33 |
| 2000 | 1 | 1982,94 | 2056,05 | -32,06 | 41,05 | -1,59 | 2,04 | 2015,0 |
| | 2 | 1978,44 | 2053,97 | -36,56 | 38,97 | -1,81 | 1,93 | 2015,0 |
| | 3 | 1998,41 | 2056,88 | -16,59 | 41,88 | -0,82 | 2,08 | 2015,0 |
| | ort | 1986,60 | 2055,63 | -28,40 | 40,63 | -1,41 | 2,02 | 2015,00 |
| 3000 | 1 | 2992,41 | 3159,91 | -27,59 | 139,91 | -0,91 | 4,63 | 3020,0 |
| | 2 | 3091,50 | 3140,18 | 61,50 | 110,18 | 2,03 | 3,64 | 3030,0 |
| | 3 | 3009,90 | 2938,41 | -20,10 | -91,59 | -0,66 | -3,02 | 3030,0 |
| | ort | 3031,27 | 3079,50 | -27,59 | 139,91 | -0,91 | 4,63 | 3026,67 |

EK-22 Ölçümlerde elde edilen ortalama dinamik basınç değerleri ve hesaplanan ortalama referans dinamik basınç değerleri farklarının yüzdesel gösterimi (normal sinyal için) (Kistler 6229AK (üstte), Kistler 6213BK (altta))

