



**AÇILI KAPLAMALI YÜZEYLERİN KAPLAMA
KALİTESİNİN SONOTRODE CİHAZI KULLANILARAK
AKUSTİK KAVİTASYON YÖNTEMİYLE
BELİRLENMESİ İÇİN TEST METODU GELİŞTİRME**

Harun DURSUN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇILI KAPLAMALI YÜZEYLERİN KAPLAMA KALİTESİNİN SONOTRODE
CİHAZI KULLANILARAK AKUSTİK KAVİTASYON YÖNTEMİYLE
BELİRLENMESİ İÇİN TEST METODU GELİŞTİRME**

Harun DURSUN

Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN
(Danışman)

Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL
(İkinci Danışman)
(Uludağ Üniversitesi)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

BURSA – 2019
TEZ ONAYI

Harun DURSUN tarafından hazırlanan “AÇILI KAPLAMALI YÜZEYLERİN KAPLAMA KALİTESİNİN SONOTRODE CİHAZI KULLANILARAK AKUSTİK KAVİTASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ İÇİN TEST METODU GELİŞTİRME” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN

Başkan : Doç. Dr. Gökhan SEVİLGEN
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Rukiye ERTAN
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Üye : Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa
Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

12/05/2019

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../.....

Harun DURSUN

ÖZET

Yüksek Lisans/Doktora Tezi

AÇILI KAPLAMALI YÜZEYLERİN KAPLAMA KALİTESİNİN SONOTRODE CİHAZI KULLANILARAK AKUSTİK KAVİTASYON YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ İÇİN TEST METODU GELİŞTİRME

Harun DURSUN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan Sevilgen

İkinci Danışman: Prof. Dr. M. İhsan Karamangil (Uludağ Üniversitesi)

Common rail sistemi günümüz dizel motorlarında kullanılan yüksek teknoloji bir yakıt enjeksiyon sistemidir. Performans, verimlilik, gürültü oluşumu ve emisyon oluşumu ele alındığında diğer yakıt besleme sistemlerinden daha üstün özelliklere sahiptir. Ancak performans, verimlilik ve emisyon hedeflerini yakalanması için yakıt sistemi basınçları geçmişten günümüze sürekli artmıştır. Artan yakıt sistemi basıncı enjektör ömrünü negatif etkilediği için bu etkilere karşı kritik parçalarda ilave önlemler alınmaktadır.

Bu tez çalışması ile enjektörde yüksek basınç bölgesi ile alçak basınç bölgesi arasında valf görevini yerine getiren ve yüksek basınç farkının ortaya çıkardığı kaviteasyona en çok maruz kalan parçalardan biri olan valf parçasının kaplama kalitesinin tayini için akustik kaviteasyon yöntemiyle yeni bir ölçüm metodu geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasında valf parçası için mevcut kaplama kalitesi testleri olan HF (Haftung-Adhesion Test), Scratch testi gibi yöntemlerin yetersiz kaldığı, valf parçasının saha şartlarına daha uygun bir metot olan akustik kaviteasyona maruz bırakılarak, homojenlik kontrolünün de yapılabildiği ve değerlendirme riskini minimize eden yeni bir test metodu geliştirilmiştir. İlk aşamada sonotrode cihazının oluşturduğu kaviteasyon bulutunun karakteristiği incelenmiştir. İkinci aşamada basit bir geometriye sahip alüminyum numunelerle sonotrode başlığı arasında farklı mesafelerde testler yapıp kaviteasyon bulutunun mesafeye bağlı etkileri incelenmiştir. Sonraki aşamada valf parçası ile aynı testler yapılarak en yüksek aşınmanın elde edildiği optimum mesafe belirlenip son aşamada kaplama kalitesinin ayırt edilebileceği sınırlar belirlenmiştir.

Test sonuçları değerlendirildiğinde common rail enjektörün en kritik parçalarından biri olan valf parçasının kaplama kalitesi değerlendirilmesine yönelik saha şartlarına uygun yeni bir test metodu geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonotrode, akustik, titreşim, kaviteasyon, kaviteasyon test metodu

2019, xiii + 59 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

TEST METHOD DEVELOPMENT FOR DETERMINATION OF THE COATING
QUALITY OF COATED ANGLED SURFACES WITH ACOUSTIC CAVITATION
METHOD BY USING THE SONOTRODE DEVICE

Harun DURSUN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Gökhan Sevilgen

Second Supervisor: Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL (Uludağ Üniversitesi)

Common rail system is a high-tech fuel injection system used in today's diesel engines. Compared to the other injection systems, the common rail system has advantages in terms of performance, efficiency, noise generation and emissions. However, fuel system pressures have continued to increase from the past to the present, in order to achieve performance, efficiency and emission targets. Since increased fuel system pressure has a negative effect on the injector life, additional measures are taken in critical parts.

In this study, it is aimed to develop a new test method by acoustic cavitation method for the determination of the coating quality of the valve piece which is one of the most exposed parts of the cavitation caused by the high pressure difference between the high pressure zone and the low pressure zone in the injector.

In this study, since the existing coating quality tests of the valve piece such as HF (Haftung-Adhesion Test), Scratch test are inadequate, a new test method has been developed that can control homogeneity and minimizes the risk of evaluation by using acoustic cavitation which is a more suitable method considering the field conditions. In the first step, the cavitation cloud characteristics formed by the sonotrode device were investigated. In the second step, the tests were carried out at distance varies between the aluminum samples with a simple geometry and the sonotrode head. The cavitation cloud effects on the distance were examined. In the next step, the same tests were carried out with the valve piece and the optimum distance with the highest wear was determined. In the final stage, the limits for distinguishing coating quality were appointed.

According to the test results, a new test method for the evaluation of the coating quality of the valve part which is one of the most critical parts of the common rail injector has been developed in accordance with the field conditions.

Key words: Sonotrode, acoustic, vibratory, cavitation, cavitation test method
2019, viii + 59 pages.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ve tezin oluŐması aşamasında değerli bilgi ve zamanını benimle paylaşan saygıdeğer hocalarım ve danıŐmanlarım Prof. Dr. M. İhsan Karamangil'e ve Doç. Dr. Gökhan Sevilgen'e, kısıtlı zamanlarını ayırarak tezin oluŐmasında yardımcı olan BOSCH AR-GE bölümünden değerli müdürlerim Suat Ayyıldız'a, Ceyhun Bahtiyar'a ve Dr. Cristian Meisl'a, yüksek lisans eğitimim süresince desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Harun DURSUN

.../.../.....



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Common Rail Dizel Enjeksiyon Sisteminin İşlevi.....	3
2.1.1 Common rail yakıt enjeksiyon sistemi.....	3
2.1.2 Common rail solenoid enjektörleri.....	5
2.1.3. Valf parçası.....	6
2.2. Kavitasyon.....	9
2.3. Ses.....	10
2.3.1. Akustik kavitasyon.....	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Deneysel sistem.....	15
3.1.1. Sonotrode cihazı.....	15
3.1.2. Yüksek hızlı kamera.....	19
3.1.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	19
3.1.4. Beyaz ışık interferometresi (WLI).....	21
3.1.5. Stereomikroskop (Olympus).....	22
3.1.6. Hassas terazi.....	23
3.2. Deney prosedürü.....	23
4. BULGULAR.....	28
4.1. Yüksek hızlı kamera sonuçları.....	28
4.2. Düz alüminyum parçalarla yapılan testler.....	31
4.3. Valf parçasıyla yapılan testler.....	40
4.4. Çalışma süresinin ve kaplama kalitesi değerlendirmesinin tayini.....	47
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	54
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	59

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A [μm]	Sonotrode başlık genliği
d [mm]	Sonotrode başlığı ile numune arasındaki mesafe
f [Hz]	Sonotrode başlık frekansı
h [mm]	Sonotrode başlığının suya batırılma derinliği
T [$^{\circ}\text{C}$]	Saf su sıcaklığı

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Amerika Test ve Malzeme Topluluğu
CR	Common rail (ortak hat)
CRI	Common rail enjektörü
HC	Hidrokarbon
HF	Yapışma testi
MI	Ana püskürtme
OHW	Karayolu dışı
PI	Ön püskürtme
PoI	Arka püskürtme
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
VGA	Video grafik dizisi
WLI	Beyaz ışık interferometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Common rail yakıt sisteminin ana bileşenleri (Bosch).....	4
Şekil 2.2. Solenoid enjektörünün kesit resmi ve bazı elemanları (Bosch).....	5
Şekil 2.3. CRI2-16 OHW enjektörüne ait valf parçası ve üzerinde çalışılacak bölge (Bosch).....	7
Şekil 2.4. Solenoid enjektörün yüksek basınç ve alçak basınç bölgeleri (Bosch).....	8
Şekil 2.5. Hidrodinamik kavitasyon ve kaynama olayının faz diyagramında gösterimi (Homa 2017).....	9
Şekil 2.6. Düşük ve yüksek frekanslı sesler ile düşük ve yüksek genlikli seslere örnekler.....	11
Şekil 2.7. Ultra ses kavitasyon yöntemiyle baloncuk oluşumu ve çökme evresi (Lauterborn ve Bolle 1975).....	12
Şekil 3.1. Sonotrode cihazı direkt metot şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.2. Tez çalışmasında kullanılan sonotrode cihazı indirekt metot şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.3. ASTM G32-10 standartlarına göre test düzeneği ve parametreleri.....	18
Şekil 3.4. Akustik kavitasyon cihazının test parametreleri.....	19
Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskopunun şematik görüntüsü (https://www.slideshare.net/iuslu/taramal-elektron-mikroskobu , 2013).....	20
Şekil 3.6. Beyaz ışık interferometresi şematik görüntüsü (https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/white-light-interferometry/ , 2007).....	21
Şekil 3.7. Stereomikroskop şematik görüntüsü (https://www.leica-microsystems.com/science-lab/the-history-of-stereo-microscopy-part-iii/ , 2007).....	22
Şekil 3.8. Akustik kavitasyon cihazında oluşan baloncuk bulutunun konik yapısı (Moussatov ve ark. 2002).....	24
Şekil 3.9. 16.0 mm çapa sahip düz alüminyum silindirik parça.....	25
Şekil 3.10. İki farklı kaplama kalitesine sahip test numunesi için kaplama kalite farklılığının görüldüğü test süresi.....	26
Şekil 4.1. Baloncuk bulutunun şekli a) yüksek hızlı kameradan alınan görüntü b) görüntüden türetilen baloncuk bulutunun boyutları.....	29
Şekil 4.2. Tüm test koşulları için düz alüminyum parçaların baloncuk bulutu içindeki konumu.....	30
Şekil 4.3. Tüm test koşulları için valf parçalarının baloncuk bulutu içindeki konumu ..	30
Şekil 4.4. Alüminyum parçalar için Durum – 1 / d = 2 mm Olympus sonuçları.....	31
Şekil 4.5. Alüminyum parçalar için Durum – 2 / d = 3.0 mm Olympus sonuçları.....	33
Şekil 4.6. Alüminyum parçalar için Durum – 3 / d = 4 mm Olympus sonuçları.....	34
Şekil 4.7. Alüminyum parçalar için Durum – 4 / d = 5 mm Olympus sonuçları.....	35
Şekil 4.8. Alüminyum parçalar için Durum – 5 / d = 6 mm Olympus sonuçları.....	37
Şekil 4.9. Tüm durumlar için iki farklı test süresinde elde edilen ortalama erozyon miktarları.....	38
Şekil 4.10. Tüm durumlar için saatte “tüketilen toplam enerji [Wh].....	39
Şekil 4.11. Tüm durumlar için akustik kavitasyonun 90 dakika sonundaki etki alanı..	40
Şekil 4.12. Valf parçasında incelenecek bölgesi olan bilyenin oturma alanı.....	40

Şekil 4.13. Valf parçaları için Durum – 1 / d = 2 mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları.....	41
Şekil 4.14. Valf parçaları için Durum – 2 / d = 3 mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları.....	42
Şekil 4.15. Valf parçaları için Durum – 3 / d = 4 mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları.....	43
Şekil 4.16. Valf parçaları için Durum – 4 / d = 5 mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları.....	44
Şekil 4.17. Valf parçaları için Durum – 5 / d = 6 mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları.....	45
Şekil 4.18. Valf parçası deneylerinin tüm durumları için seçilen birer parçanın 45 dakika deney süresi sonucunda oluşan erozyon bölgeleri.....	46
Şekil 4.19. Valf parçası deneylerinin tüm durumları için seçilen birer parçanın 135 dakika deney süresi sonucunda oluşan erozyon bölgeleri.....	46
Şekil 4.20. Valf parçası fonksiyonel bölgesi 0 dk, 30 dk ve 45 dk test sonrası : (1) Taramalı mikroskop sonucu (2) WLI tarama fotoğrafları (3) Aşınma bölgelerinin WLI tarama fotoğrafı.....	48
Şekil 4.21. Valf parçası fonksiyonel bölgesi: (1) Taramalı mikroskop sonucu (2) WLI tarama fotoğrafları (3) Aşınma bölgelerinin WLI tarama fotoğrafı.....	49
Şekil 4.22. Valf parçası fonksiyonel bölgesindeki aşınmanın zamana bağlı değişimi .	50
Şekil 4.23. 5 adet kötü kaplama kalitesine sahip valf parçasının fonksiyonel bölgeleri WLI tarama fotoğrafları	51
Şekil 4.24. 15 adet iyi kaplama kalitesine sahip valf parçasını temsilen seçilen 5 adet valf parçasının fonksiyonel bölgeleri WLI tarama fotoğrafları	52
Şekil 4.25. İyi ve kötü kaplama kalitesine sahip valf parçalarının zamana bağlı aşınma yüzdeleri.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Düz alüminyum parçalar için test parametreleri.....	26
Çizelge 3.2. Valf parçaları için test parametreleri.....	27
Çizelge 4.1. Durum – 1 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri.....	32
Çizelge 4.2. Durum – 2 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri.....	34
Çizelge 4.3. Durum – 3 ve Durum - 4 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri	36
Çizelge 4.4. Durum – 5 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri.....	38
Çizelge 4.5. Valf parçası fonksiyonel bölgesindeki aşınma değerleri	51



1. GİRİŞ

Günümüzde sanayinin tüm sektörlerinde tasarım, üretim maliyetinin yanı sıra kalite ve dayanıklılık da gerek müşterilerin gerekse üretici firmaların ana hedeflerinden bazılarıdır. On yıllardır hızla artan otomobil talepleri ile birlikte otomotiv sektöründeki rekabette büyük bir artış meydana gelmiştir. Rekabet ortamıyla birlikte, otomotiv sektöründe geliştirme faaliyetleri hızlanmış ve birçok sektörde teknolojinin gelişmesine önayak olmuştur. Otomotiv pazarında söz sahibi olabilmek ve pazar payını arttırabilmek için üretim maliyetlerini, sürelerini düşürmek ve beklentileri tam anlamıyla karşılaması elzem hale gelmiştir.

Otomotiv sektörünün hızla büyümesiyle milyonlara ulaşan otomobil sayısı çevre hassasiyetlerini arttırmış, çeşitli regülasyonların ve kısıtlamaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Özellikle 1990 yılından sonra açıklanan emisyon kısıtlamaları ve bu kısıtlamaların ciddi anlamda denetlenmesi, Ar-Ge faaliyetlerini tetiklemiş ve ileri teknoloji ürünlerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Geline noktada birçok çalışma yapılmış ve performans, verimlilik ve regülasyonlar çerçevesinde düşük emisyon miktarlarını sağlayan Common Rail Dizel Enjeksiyon Sistemleri ortaya çıkmıştır.

Common rail dizel yakıt enjektörleri yüksek basınç altında çalışan ve hassas toleranslarda üretilmiş birçok parçadan meydana gelir. Performans, verimlilik ve emisyon hedeflerinin yakalanması için yakıt sistemi basıncı geçmişten günümüze sürekli olarak artmıştır. Ancak artan yakıt sistemi basınç değerleri, enjektör ömrünü olumsuz etkileyen ve zamanla çalışma performansını düşüren birçok faktörün ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bunların en etkili olanlarından bir tanesi de kavitasyondur. Kaviteasyon, sabit ortam sıcaklığında hızlı basınç düşüşünün sonucunda ortaya çıkar.

Üzerinde çalışılan valf parçaları, enjektörde yüksek basınç bölgesi ile alçak basınç bölgesini birbirinden ayıran ve kaviteasyon etkisine en çok maruz kalan parçalardan bir tanesidir. Valf parçaları, kaviteasyonun etkisini azaltılmak veya minimuma indirmek için çok katmanlı Cr alaşımıyla kaplanmaktadır. Valf parçasına uygulanan çok katmanlı kaplama şu an için üretimi devam eden CRI2.16 tipindeki (~1600 bar) arazi dışı araçlarda

(Off High-Way (OHW)) kullanılmakta olup, gelecekte daha yüksek basınçlı enjektörlerin valf parçalarına da uygulanması hedeflenmektedir.

Kaplama kalitesinin ölçümü için HF (Haftung-Adhesion Test), Scratch testi gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu testlerde kaplamanın homojen olup olmadığını kontrol etmek oldukça zor ve yetersiz kalmaktadır. Kaplamanın mevcut yöntemlerle sadece noktasal ya da çizgisel olarak test edilmesi, heterojen kaplama dağılımında kaplamanın kalitesi ve öngörülen çalışma süresinin yanlış değerlendirilmesine neden olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, kaplama kalitesi değerlendirmesi saha şartlarına daha uygun bir metot olan akustik kaviteye maruz bırakarak, homojenliğin kontrolünü de sağlayan ve değerlendirme riskini en aza indirgeyen yeni bir test metodu geliştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Common Rail Dizel Enjeksiyon Sisteminin İşlevi

Bu bölümde, dizel solenoid enjektörünün en kritik komponentlerinden biri olan valf parçasında rastlanan kavitasyon problemi oluşumunun irdelenmesi için common rail dizel enjeksiyon sistemi, solenoid enjektörü ve üzerinde çalışılacak olan valf parçasının geometrisi ve fonksiyonları hakkında bilgi verilmiştir. Valf parçası kaplamasında oluşabilecek kavitasyon erozyonunun valf parçasında ve dolaylı olarak enjektörde fonksiyonel anlamda ne gibi değişikliklere neden olabileceği ile ilgili yorum yapılmıştır.

2.1.1 Common rail yakıt enjeksiyon sistemi

Common rail enjeksiyon sistemi, silindir içine direkt enjeksiyon sistemidir ve benzinli motorlarda da direkt enjeksiyon (DI) diye adlandırılır. Common rail, bütün dizel yakıt enjektörlerine dağıtılacak yakıtın ortak bir taşıyıcısı işlevi görür. Bağımsız bir yüksek basınç pompası tarafından devamlı olarak yakıtla beslenmektedir. Bunun bir sonucu olarak eski dizel yakıt sistemlerinden farklı olarak her bir püskürtme için yakıt basıncı tekrar biriktirilmek zorunda kalınmaz. Bu da uygun yakıt basıncının motor devrinden bağımsız olarak sağlanmasına olanak verir. Ayrıca püskürtme işlemi yüksek basınçlarda yapılabildiği için çoklu püskürtmeye de olanak sağlar. (BOSCH Diesel Motor Management 2002). Çoklu püskürtme döngüsü öncül püskürtme (PI), ana püskürtme (MI) ve arka püskürtme (PoI) olarak üç ana püskürtmeye ayrılır. Öncül püskürtme aracın sessiz çalışması için, ana püskürtme ideal güç verimi için, arka püskürtme ise emisyonları düşürmek için kullanılır ve püskürtme sayısı çalışma koşullarına göre belirlenir. 1. Common rail solenoid enjektörleri bir döngüde maksimum 8 püskürtme sayısına çıkabilmektedir.

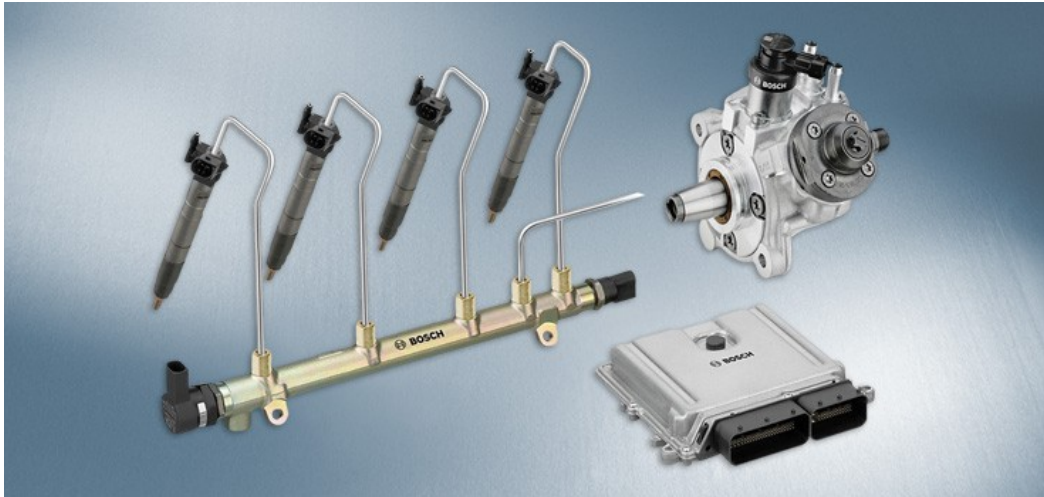
Common rail sisteminin en önemli özelliği yakıt püskürtmesi ile yüksek basınç oluşumunun birbirinden bağımsız olarak kontrol ediliyor olmasıdır. Common rail, bağımsız bir yüksek basınç pompasıyla istenilen basınç seviyesine ulaşır ve enjektörlerle common rail sistemi arasında iletimi sağlayan borular vasıtasıyla enjektörlere uygun

basınç ve miktarda yakıtı iletir. Sistemdeki yüksek basınç seviyesi, püskürtme miktarı, püskürtme sayısı, püskürtme süresi ve devir sayısı elektronik kontrol ünitesi (ECU) tarafından sensörler yardımıyla belirlenir ve iletilir.

Common rail dizel yakıt sisteminin, konvansiyonel dizel yakıt sistemlerine göre sağladığı avantajlar (Piancastelli ve ark. 2014) :

- Püskürtme basınçlarının motor devrinden bağımsız olması
- Yüksek atomizasyona bağlı olarak hava-yakıt karışımını iyileştirir,
- Çoklu püskürtmeye imkan sağlar,
- Çok küçük püskürtmelere izin verir,
- Püskürtmenin başlangıç ve bitiş zamanının elektronik kontrol ünitesi vasıtasıyla seçilebilir,
- Püskürtme başlangıç ve bitişlerinin esnek olarak seçilebilir, (Euro regülasyonları)
- Düşük yakıt sarfiyatı ve düşük emisyonlar sağlar,
- Çalışma koşullarının zor olduğu durumlarda özellikle soğukta daha esnek çalışır,

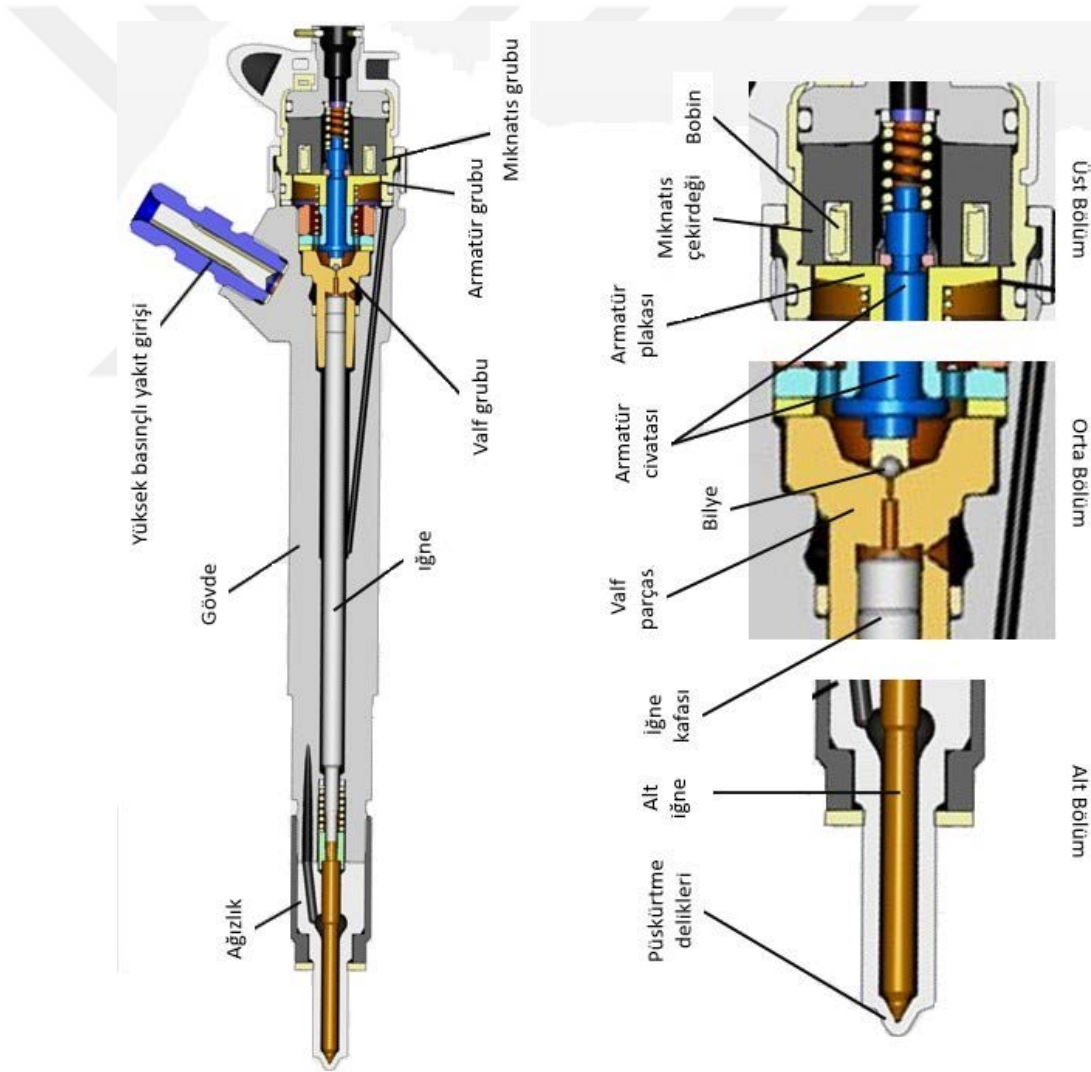
Common rail dizel yakıt sisteminin ana bileşenleri (yüksek basınç pompası, rail, enjektör, iletim boruları ve elektronik kontrol ünitesi) Şekil 3.1’de yer almaktadır.



Şekil 2.1. Common rail yakıt sisteminin ana bileşenleri (Bosch)

2.1.2 Common rail solenoid enjektörleri

Common rail solenoid enjektörlerinin çalışma prensibi temel olarak yüksek basınç bölgesi ile alçak basınç bölgesini ayıran bir valf parçası ve valf parçasına oturan bilyenin sağladığı sızdırmazlık ve bu sızdırmazlığın manyetik kuvvet ile ortadan kaldırılmasından faydalanarak kumanda edilir. Solenoid enjektörü Şekil 3.2’de görüldüğü gibi iğnenin kapattığı püskürtme deliklerinin bulunduğu alt bölüm, sızdırmazlığın sağlandığı iğnenin üst bölümünün bulunduğu orta bölüm ve manyetik kuvvet uygulayarak bilyenin yukarıya doğru hareketini, dolayısıyla sızdırmazlığın kaldırılmasını sağlayan solenoid bölgesi olarak üç ana bölüme ayrılabilir.



Şekil 2.2. Solenoid enjektörünün kesit resmi ve bazı elemanları (Bosch)

Enjektör kapalı durumda iken üzerinde bulunan yayın kuvvetiyle birlikte bilye, valf parçasına oturur ve yüksek basınçlı yakıtın alçak basınçlı bölgeye geçmesini engeller. Yüksek basınçlı bölgeyi kendi içinde ikiye ayırabiliriz: Püskürtme deliklerini kapatan iğnenin oturduğu ağızlık bölgesi ve sızdırmazlığın sağlandığı bölgenin hemen altında bulunan kontrol hacim bölgesi. Bu iki bölgede bulunan basınç, iğnenin alt ve üst tarafından iğneye basınç kuvveti uygular. Enjektör kapalı olduğu durumda iğnenin sızdırmazlık bölgesinin hemen altında bulunan üst tarafındaki basınç kuvveti, ağızlık tarafından gelen basınç kuvvetinden daha yüksektir. Bu yüzden iğne yukarı doğru hareket etmez ve püskürtme delikleri kapalı kalır.

Sızdırmazlığı sağlayan bilye, armatür civatası ile armatür plakasıyla eşzamanlı hareket eder. Armatür plakasının üstüdeyse manyetik alan oluşturmak için bobinler ve mıknatıs çekirdeği bulunur. Enjektör açık duruma getirilmek istendiğinde, pinler vasıtasıyla bobinlere akım verilerek armatür plakasını yukarıya çekecek manyetik alan oluşur. Yukarıya çekilen armatür plakasıyla birlikte armatür civatası ve bilye de yukarı doğru hareket ederek sızdırmazlığın bozulmasını sağlar. Yüksek basınç bölgesindeki yakıt çok hızlı bir şekilde yukarıya çıkmaya başlar ve valf parçasının hemen altındaki bölgede basınç hızlıca düşer. Böylece iğnenin alt ve üst tarafındaki basınç kuvveti dengesi tersine dönerek iğne yukarı doğru hareket eder ve püskürtme deliklerinden yakıt silindire püskürtülür.

2.1.3. Valf parçası

Solenoid enjektörün püskürtme prensibinden anlaşılacağı gibi valf parçasının enjektörün fonksiyonelliğini yerine getirebilmesi için kritik önemi vardır. Valf parçası yüksek basınç ile alçak basıncı ayıran bölgede olduğundan, enjektör açıldığında kavitasyon erozyonuna maruz kalmaktadır. Kavitasyon erozyonuna maruz kalan valf parçasında, bilyenin oturduğu yüzeydeki parçaların zamanla aşırı miktarda malzeme kaybı olmasıyla beraber sızdırmazlık görevini yerine getirememeye başlar. Sızdırmazlık yüzeyinin bozulmasıyla beraber valf parçasının altında bulunan kontrol hacminin basıncı enjektör kapalı olsa dahi sızdırmadan dolayı azalmaya başlayacaktır. Kontrol hacmindeki basınç düşüşü iğnenin alt ve üst yüzeyindeki basınç dengesini bozarak enjektörün erken açmasına, hatta

tetiklenmese dahi açılmasına neden olabilir. Bu riskler göz önüne alındığında enjektör istenilenden fazla püskürtebilir ve yüksek yakıt sarfiyatına, motorun çok zengin yakıt-hava karışımıyla çalışmasına, HC emisyonunun artmasına neden olabilir. Tüm riskler düşünüldüğünde valf parçasının enjektör için ne denli kritik olduğu ortaya çıkmaktadır.

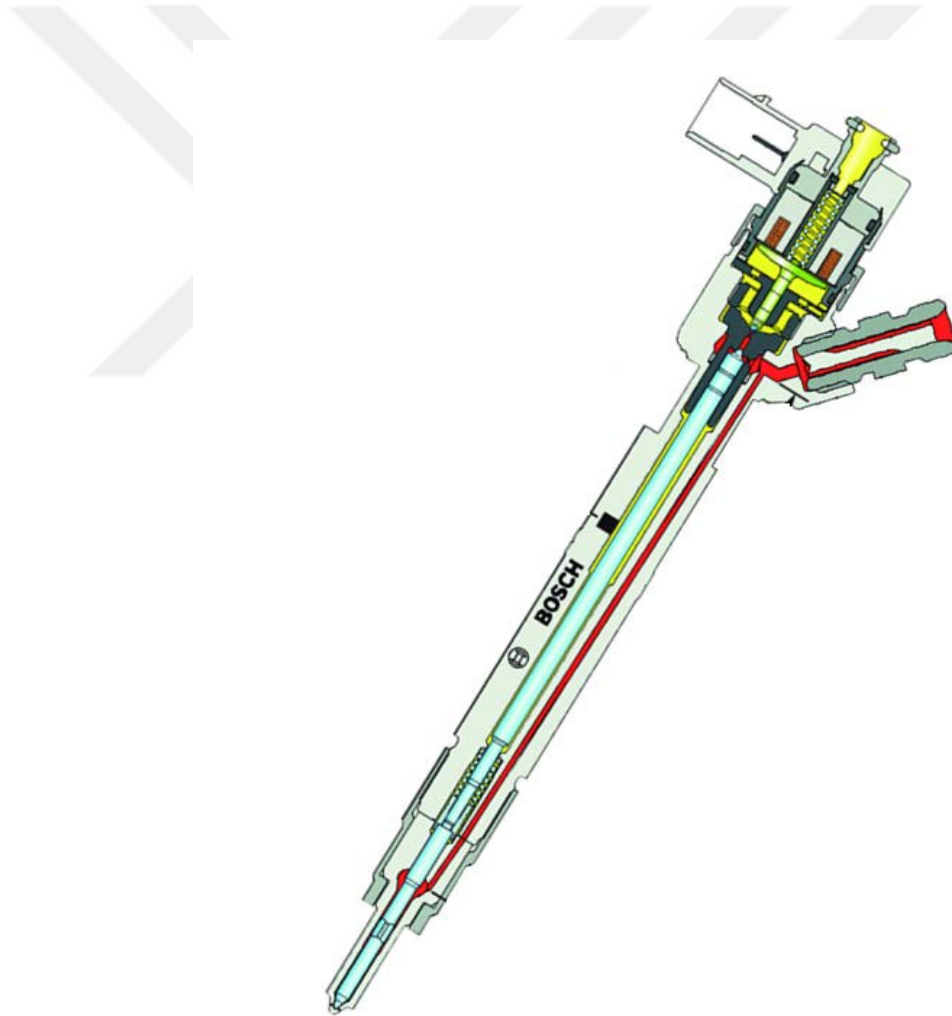
İstem dışı sızdırmazlık kayıplarının olası sonuçları göz önüne alındığında, bilyenin valf parçasına oturduğu yüzeyin kavitasyon erozyonuna karşı dayanıklı olmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple birçok çalışma ve validasyon çalışmaları yürütülerek oturma bölgesinde kavitasyon erozyonunu engellemek veya minimuma indirmek için bu bölge Cr alaşımıyla çok katmanlı olarak kaplanmaktadır. Şekil 3.3'te valf parçası üzerinde kaplamaya işlemi uygulanan ve bu tez çalışması kapsamında kavitasyona uğratılacak bölge gösterilmiştir.



Şekil 2.3. CRI2-16 OHW enjektörüne ait valf parçası ve üzerinde çalışılacak bölge (Bosch)

Tez çalışmasına konu edilen valf parçası, enjektörde kavitasyon etkisine en çok maruz kalan parçalardan biridir. Çok yüksek basınç değerlerinde çalışan dizel yakıt enjektörleri oldukça hassas tolerans aralıklarında imal edilmiş ve montajı gerçekleştirilmiş birçok parçadan oluşmaktadır. Günümüzde enjektörler 2700 bar püskürtme basınçlarına kadar

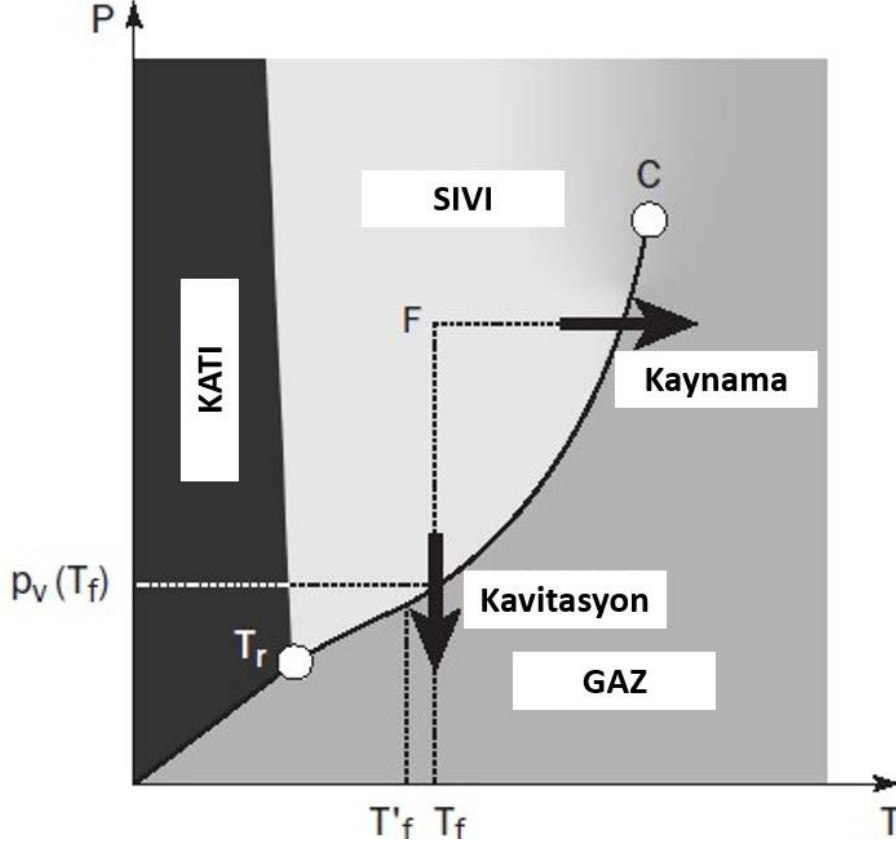
çıkılabilmektedir. Yüksek basınca maruz kalan her bir parçanın ömrü boyunca bir problem oluşturmaksızın görevini yerine getirmesi beklenmektedir. Enjektörde yüksek basınç bölgesi ile alçak basınç bölgesini birbirinden ayıran valf parçası bu etkiye en çok maruz kalan kritik parçalardan bir tanesidir. Çünkü artan basınç farkı kavitasyon şiddetini de arttırmaktadır. Şekil 3.4'te yüksek basınç bölgeleri kırmızı, alçak basınç bölgeleri ise sarı renk ile gösterilmiştir (Crua ve Heikal 2014). Valf parçasının kaplamalı yüzeyine oturan bir bilye ile yüksek basınç hattı ile alçak basınç hattı birbirinden ayrılmaktadır. Kavitasyonun valf parçasının oturma yüzeyinde zamanla meydana getireceği bir hasar sızdırmazlık problemi oluşturacağı için enjektörün püskürtme basınçlarını ve karakteristiğini tamamen bozacaktır.



Şekil 2.4. Solenoid enjektörün yüksek basınç ve alçak basınç bölgeleri (Bosch)

2.2. Kavitasyon

Kavitasyon, sabit ortam sıcaklığında basınç düşüşüne maruz kaldığında bir sıvının buhar fazının oluşum süreci olarak tanımlanır (Franc ve Michel 2003). Şekil 3.5'te görüldüğü gibi kavitasyonu sıvı sıcaklığının artmasıyla değil basınç değişimiyle gerçekleşmektedir. Bu yüzden kavitasyon, aynı zamanda soğuk buharlaşma olarak da tanımlanır.



Şekil 2.5. Hidrodinamik kavitasyon ve kaynama olayının faz diyagramında gösterimi (Homa 2017)

Kavitasyon pek çok yolla meydana gelebilir. Genellikle 4 grupta incelenir:

1. Ultrasonik kavitasyon, bir titreşim kaynağından ya da dönüştürücüden yayılan ses dalgalarının sıvı içerisinde oluşturduğu negatif ve pozitif basınç bölgelerinin salınım etkisi altında oluşur ve büyür. Sıvı içerisinde

kabarcıkların oluşumu, büyümesi ve ani bir şekilde patlaması aşamalarından oluşan olay kavitasyon olarak isimlendirilir (Suslick 1990).

2. Hidrodinamik kavitasyon: Sistem geometrisinin kaynaklı hız değişimleri kullanılarak elde edilen basınç değişimleri ile oluşturulur.
3. Optik kavitasyon: Yüksek yoğunluklu ışınların (lazer) sıvı sürekliliğini kesen fotonlarıyla oluşur.
4. Parçacık kavitasyonu: Temel parçacık yayılımı tarafından oluşturulur. Örnek olarak; kabarcık odasında olduğu gibi bir nötron yayılımının sıvıyı kesmesi verilebilir.

Tez kapsamında gerçekleştirilecek deneyler akustik kavitasyon yöntemini uygulayan ve 20 kHz frekansta titreşen bir kafaya sahip cihaz olan sonotrode ile yapılacaktır.

2.3. Ses

Ses, kulağımız tarafından algılanan periyodik basınç değişimlerinin toplamı olarak adlandırılabilir. Fiziksel anlamda ses, üç temel faz olan katı, sıvı ve gaz ortamlarda bir maddenin moleküllerinin titreşme sonucu meydana gelir.

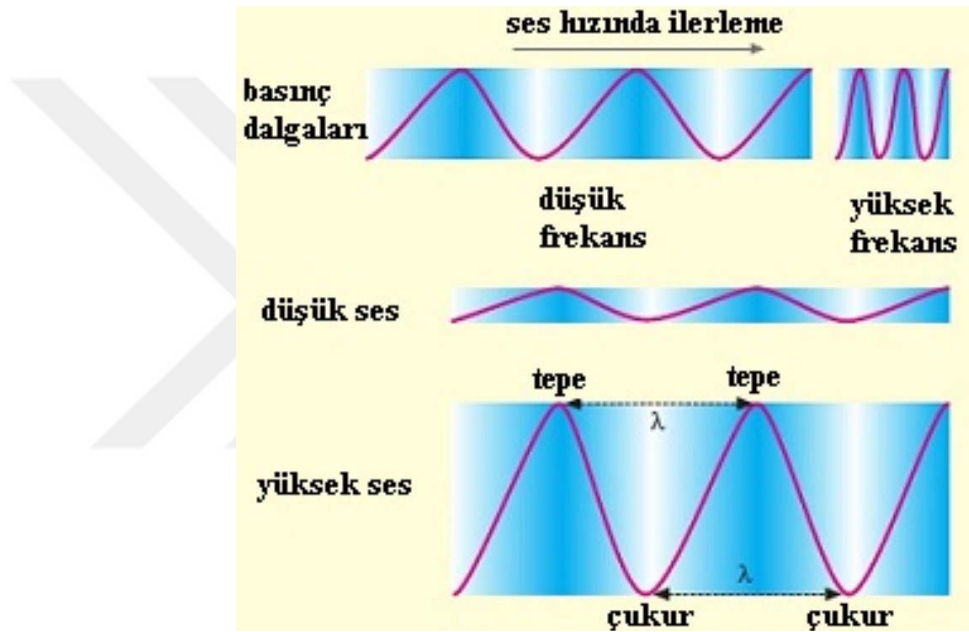
Ses bir periyoda, frekansa, hıza ve boya sahip olan bir basınç dalgasıdır ve saniye başına oluşan titreşim sayısına sesin frekansı denir. Ses frekans birimi Hertz (Hz)'dir. Sesin hızı da ortama göre değişiklik gösterebilir (Bohn 1988). Örneğin, havadaki ses hızı 340 m/s iken sudaki hızı 1484 m/s'dir. Ses hızlarının değişik ortam şartlarındaki hızına bakarsak, molekül taneciklerinin sıkılaştıkça ses hızının arttığını söyleyebiliriz.

Sesler frekanslarına göre, infrasonik, ultrasonik ve megasonik olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılmıştır.

- İnfrases (Düşük frekanslı ses): İnfra ses ismiyle tanımlanan ses frekansları 16 ile 20 Hz arasındaki sesleri kapsar. İnsan kulağının 20 ile 20000 Hz arasındaki sesleri duyduğunu göz önüne alırsak infrasesler insanlar tarafından algılanmazlar.

- Ultrasonik (Yüksek frekanslı ses): Ultra ses, frekansı 20 kHz'in üzerindeki seslerdir. Dolayısıyla insan kulağı algılayamaz.
- Megases (Çok yüksek frekanslı ses): Mega ses, frekansı 800 kHz'ten büyük olan ve MHz seviyeleriyle ölçülen çok yüksek frekanslı seslerdir.

Şekil 3.6'da farklı frekansa ve genliğe sahip seslere örnekler verilmiştir.

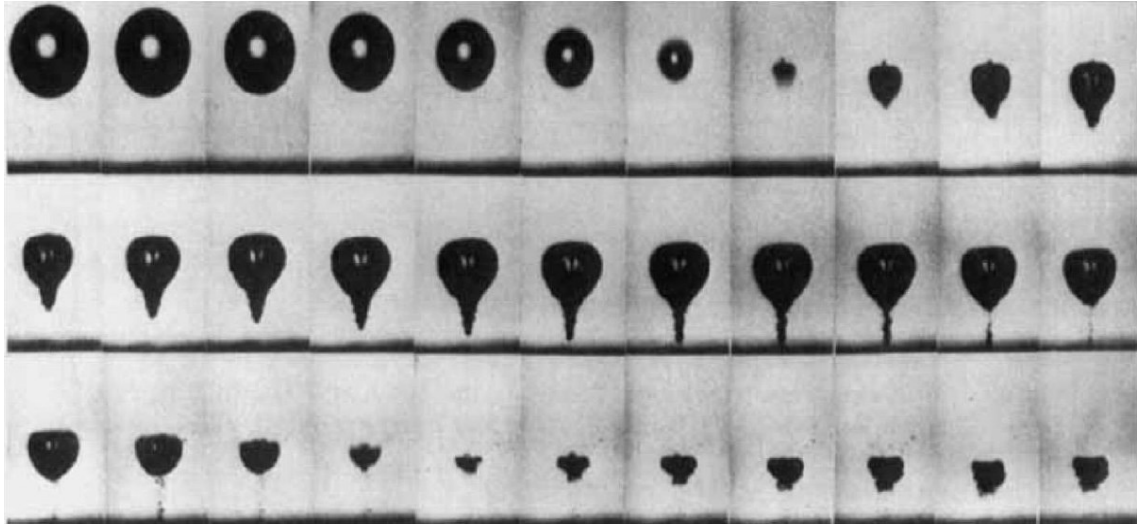


Şekil 2.6. Düşük ve yüksek frekanslı sesler ile düşük ve yüksek genlikli seslere örnekler

2.3.1. Akustik kavitasyon

Akustik kavitasyon, önceki bölümde tanımlandığı gibi bir titreşim kaynağının ya da dönüştürücünün sıvı içerisinde oluşturduğu ses dalgalarının, pozitif ve negatif basınç bölgeleri oluşturarak sıvı içerisinde baloncuklar meydana getirmesidir. Bir sıvının içine yüksek frekanslarda (ultra ses) çalışan bir titreşim kaynağı yerleştirildiğinde, titreşim kaynağının oluşturduğu ters basınç alanları sıvı içerisinde baloncukların oluşmasına, büyümesine ve son olarak da çökmesine neden olur.

Baloncuk, sıvı içindeki basıncın baloncuk oluşma basıncının altına düştüğünde oluşur. Daha sonra oluşan kabarcık, lokal olarak basıncın daha düşük olduğu bölgelere ilerledikçe büyümeye devam eder. Baloncuğun büyümesi, baloncuğun sıvı içerisinde ulaştığı lokal bölge ile basınçları eşitlenene kadar devam eder. Baloncuğun sıvı içerisinde ulaştığı bölgenin basıncı, baloncuk basıncının üzerine çıkmaya başladığında ise cidardan başlayarak yoğunlaşmaya başlayarak cidar yüzeyinin en zayıf noktasından parçalanmaya başlar. Parçalanmayla birlikte baloncuğun sıvı içerisindeki hacmi, içerisinde bulunduğu sıvı ile dolmaya başlar ve bir mikro jet oluşur. Mikro jet çok hızlı bir biçimde baloncuğun içine geçerek baloncuğun diğer tarafından çıkar. Böylelikle baloncuk çökmüş olur ve baloncuğun basıncından çok daha yüksek bir basınç ortaya çıkar (Xu ve ark. 2009, Luo ve ark. 2016). Açığa çıkan basınç vasıtasıyla oluşan enerji çok kısa bir zamanda ve konsantre halde gerçekleşir. Bu denli yüksek enerji açığa çıkaran bir mikro jet herhangi bir yüzeye etki ederse o yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Anlatılan işlem uzun süre devam ettirilebilirse, mikro çatlaklar büyüyerek makro çatlaklara ve son olarak o yüzeyde malzeme kaybına neden olabilir (Lautern ve Bolle 1975, Goh ve ark. 2014, Hattori ve Maeda 2010). Bu problem pompalar, gemi pervaneleri ve valfler gibi birçok mühendislik parçasında meydana gelebilir (Kjølle 2001, Santa ve ark. 2011).



Şekil 2.7. Ultra ses kavitasyon yöntemiyle baloncuk oluşumu ve çökme evresi (Lautern ve Bolle 1975)

Modern ‘Common Rail’ sistemler, Magneti Marelli, Centro Ricerche Fiat ve Elasis işbirliğiyle geliştirilmiştir. Robert Bosch GmbH tarafından seri üretime yönelik geliştirme ve iyileştirme işlemlerinin tamamlanması için satın alındı ve 1997 yılında dünyada ilk olarak binek otomobillere uygun olarak üretildi. 1999 yılında 1600 bar, 2004 yılında 1800 bar, 2007 yılında 2000 bar, 2011 yılında 2200 bar, 2014 yılında 2200 bar ve mevcut durumda ise 2500 bar ve üzeri basınçlarda püskürtebilen yeni nesil common rail enjektörler geliştirilmiştir.

N. Kayakol (2015), solenoid valf enjektörlerindeki valf yuvası bölgesinde akış karakteristiğinin, yakıt akışının yüksek basınçtan düşük basınç bölgelerine ilerlemesinin kabarcıklar yarattığını ve bu bölgedeki kavitasyon erozyonunun ana sebebinin bu basınç farkından ortaya çıkan kabarcıkların anlık olarak aşırı yüksek basınç oluşturmalarından dolayı oluştuğundan tespit etmiştir.

A. Krella, A. Czyniewski (2005), Cr-N kaplamalı çeliğin kuluçka süresinin kaplamasız çeliğe nazaran %50 daha uzun olduğunu ve kuluçka süresinin uzamasının temel sebeplerinin kaplamanın yüksek sertliği ve yüksek kaplama adezyonu olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca Cr-N kaplamanın çoğunlukla delaminasyon kaynaklı hasar gördüğünü ortaya koymuştur.

ASTM G32-10 (2010), titreşen başlık kullanılarak kavitasyon erozyonu elde etmeye yönelik standartları yayınlamıştır ve Sonotrode cihazı bu standartlara uygun olarak geliştirilmiştir.

S. Mottyl ve ark. (2014), başlık ile numune arasındaki farkı uzaklıklar için incelemeler yapmıştır. Düşük uzaklıklar için baloncuk bulutunun dar ve daha yüksek uzaklıklar için koni şekline dönüştüğünü tespit etmişlerdir.

V.Cojocar, V. C. Campain, D. F. Verde (2015), direkt ve endirekt sonotrode metodlarını karşılaştırmış ve numunenin sonotrode başlığına bağlı olduğu direkt metoduyla çok daha yüksek kavitasyon erozyonu elde edildiğini ancak bağlanan numunenin sonotrode titreşim sisteminin frekansına etki ettiğini göstermiştir.

Literatür araştırmalarında görüldüğü üzere yüksek basınçla çalışan hidrolik sistemlerde kavitasyon erozyonu bilinen bir fenomendir ve çok yaygındır. Kavitasyon erozyonunu engellemek ya da minimize etmek adına birçok farklı yöntem mevcuttur. Common rail dizel enjektörlerinde kaplama yapılarak bu fenomeni minimuma indirmek amaçlanmıştır. Kaplama kalitesinin test edilmesi için mevcut yöntemlerin yetersiz kalması üzerine saha şartlarına daha uygun olan akustik kavitasyon yöntemi kullanılarak, başlık ve numune arasındaki mesafenin baloncuk bulutuna etkisi de incelenerek yeni bir test metodu geliştirilmiştir ve elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında sonotrode cihazının oluşturduğu baloncuk bulutu incelenmiş, baloncuk bulutunun başlık ile numune arasındaki mesafeye bağlı aşınmaları gözlemlenmiş ve Bosch dizel enjektörlerinde kullanılan valf parçasında benzer parametreler kullanılarak açılı yüzeyde kaplama kalitesinin değerlendirilmesi için yeni bir test metodu geliştirilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

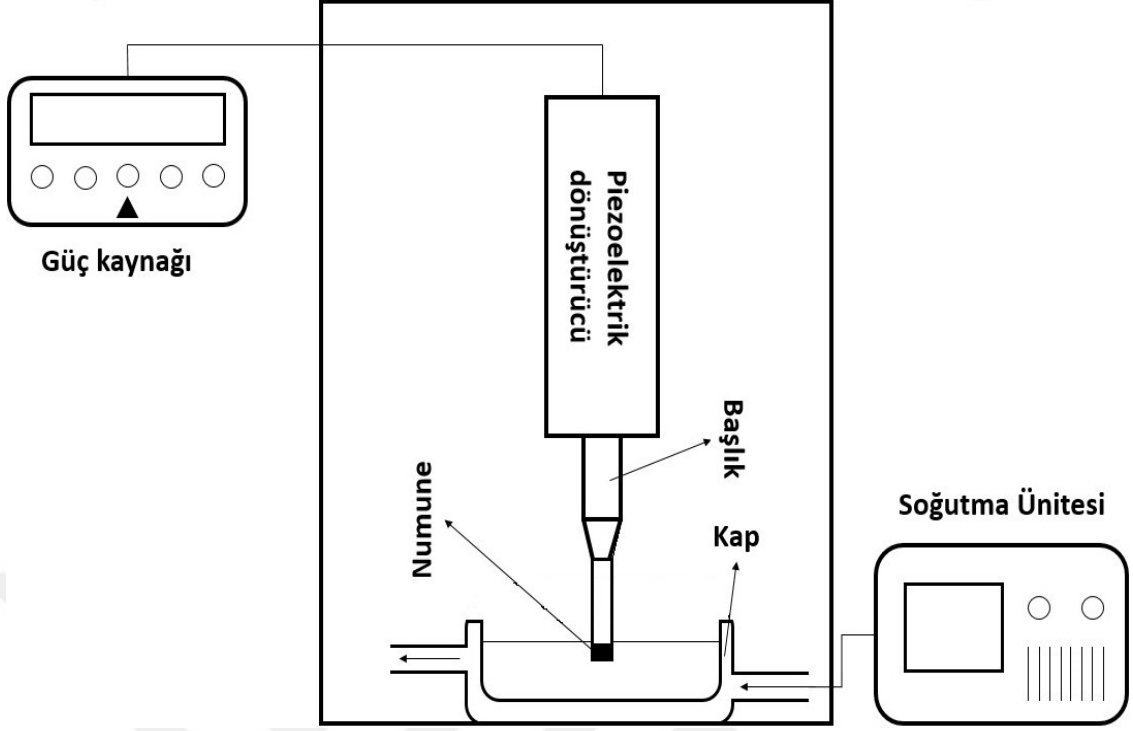
3.1. Deneysel sistem

Tez çalışmasında uygulanacak yöntemler sırasıyla, akustik kaviteasyon cihazının numune üzerinde uygulanması, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ya da ışık mikroskobu (Olympus) yardımıyla erozyona uğratılmış bölgelerin görüntülenmesi ve test öncesi ve sonrasında hassas terazide ölçümünün alınmasıdır. İki adet mikroskop kullanılmasının sebebi, test kapsamında kullanılan alüminyum parçalar ve valf parçası görüntülerinin farklı mikroskoplarda daha iyi tespit edilebilmesidir. Sonuç olarak test sonrası elde edilen erozyon bölgelerinin yakından çekilmiş resimleri ve test edilen parçanın ağırlık kaybı elde edilmiş ve değerlendirme bu yöntemlerin kombinasyonları ile yapılmıştır.

3.1.1. Sonotrode cihazı

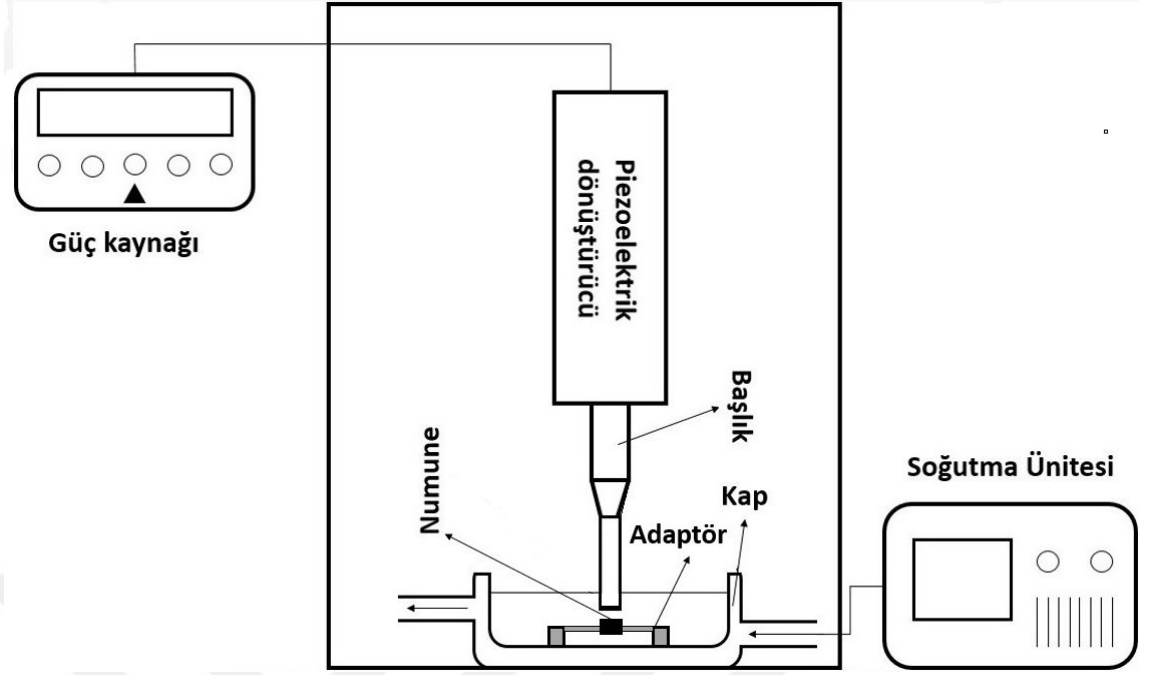
Sonotrode cihazı, ultra ses frekansında titreşen bir başlığın sıvı içerisine daldırılıp suni olarak kaviteasyon elde edilmesini sağlayan bir akustik kaviteasyon sağlayıcısıdır (Zurita ve ark. 2018). Kaviteasyon cihazı güç kaynağı, piezoelektrik dönüştürücü, başlık, kap ve soğutma ünitesi olmak üzere beş temel bileşenden oluşmaktadır. Güç kaynağı piezoelektrik dönüştürücüyü beslemek için, piezoelektrik dönüştürücü ise elektrik enerjisini mekanik titreşime çevirmek için kullanılır. En önemli komponentlerden olan başlık mekanik titreşimin genliğini yükseltme işlevi görür. Soğutma ünitesi ise sıvının operasyon sıcaklığını ayarlamak ve sabit tutmak için sisteme eklenmiştir. Akustik kaviteasyon cihazının (i) direkt metot ve (ii) endirekt metot olmak üzere iki ayrı uygulama yöntemi vardır (Lupinca ve ark. 2014, Cojocar ve ark. 2015).

Numunenin başlığa monte edilip sıvının içinde başlıkla beraber yüksek frekansta hareket ettirildiği yöntem direkt metottur. Direkt metot yönteminin uygulandığı test düzeneğinin şematik gösterimini Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



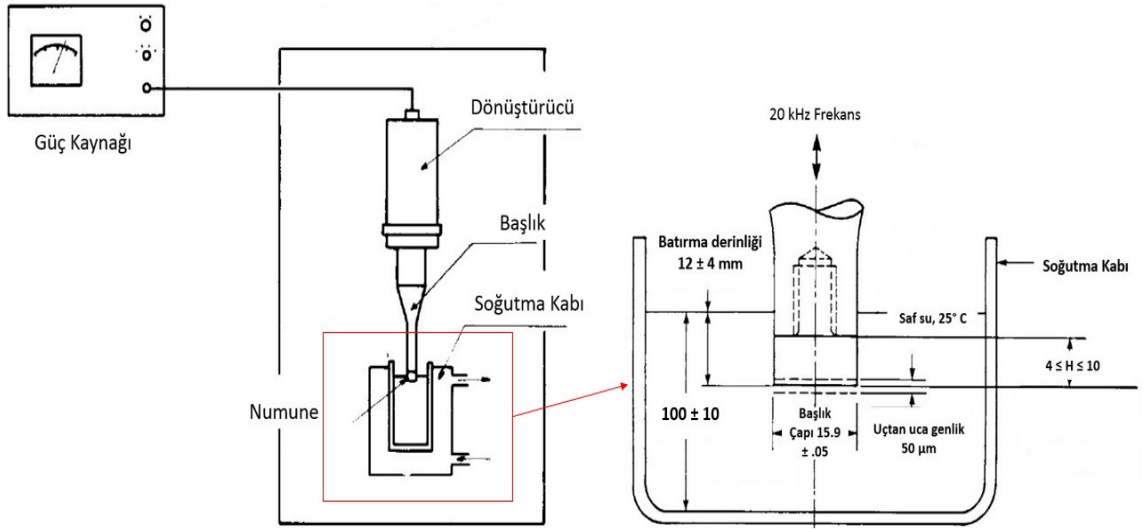
Şekil 3.1. Sonotrode cihazı direkt metot şematik gösterimi

Tez çalışmasında kullanılan endirekt metot uygulamalarında ise numune, başlık ile arasında mesafe kalacak şekilde kap içindeki fikstürde sabitlenir. Şekil 3.9'daki şematik gösterimden anlaşıldığı gibi bu yöntemde sıvı içerisinde sadece başlık hareket eder ve numune sabit kalır. Endirekt metodun zorluğu, başlık ile numune arasındaki akış karakteristiğinin kontrol edilmesinin karmaşıklığından gelir.



Şekil 3.2. Tez çalışmasında kullanılan sonotrode cihazı indirekt metot şematik gösterimi

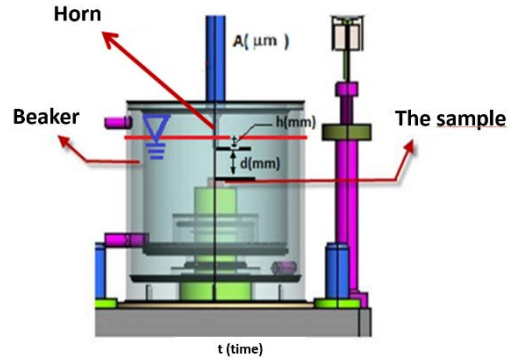
Akustik kavitasyon cihazının standart test düzeneği şeması Amerika Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) tarafından ASTM G32-10’da tanımlanmıştır (Anonim 2010). Şekil 3.10’da ASTM tarafından belirlenen sonotrode cihazı standart test düzeneği ve test parametreleri gösterilmektedir. Görüleceği üzere test düzeneği standartları sadece direkt metot için belirtilmiştir. ASTM G32-10 standartlarına göre piezoelektrik dönüştürücü güç kaynağı tarafından beslenir ve aldığı sinyalleri 20 kHz’lik frekansta mekanik titreşimlere dönüştürür. Dönüştürücünün altında bulunan ve kaptaki suyun içine yerleştirilen 16 mm çapa sahip başlık, vida mekanizmasıyla piezoelektrik dönüştürücüye monte edilmiştir ve onunla birlikte yekpare hareket eder. Başlık genellikle saf titanyum malzemeden üretilir ve en önemli özelliklerinden biri titreşim genliğini artırıcı yönde bir etkiye sahip olmasıdır. Sıvının içinde yüksek frekansta ve 50 µm genlikte hareket eden başlık sıvıda baloncuklar oluşmasına ve mikro jet süreçlerinin gerçekleşmesine neden olur. Direkt metotta kolayca monte edebilmek için numuneler genelde vida şeklinde üretilir. Ancak bunun en büyük dezavantajlarından biri talep edilen geometrinin monte edilmesinde oluşan zorluklar ya da sınırlardır.



Şekil 3.3. ASTM G32-10 standartlarına göre test düzeneği ve parametreleri

Günümüzde endirekt metot için bir standart prosedür veya test düzeneği tanımlanmamıştır. Bu yüzden endirekt metot uygulaması için oluşturulan test düzeneği ve parametreler ihtiyaca göre oluşturulmuş ve test edilecek numunelere göre farklılıklar göstermiştir (Bordeasu ve ark. 2005, Fatjo ve ark. 2010). Tez çalışmasında kullanılan test düzeneği, mümkün olduğu kadar ASTM G32-10 standartlarına uygun şartlarda oluşturulmuştur. Testlerde sıvı olarak ASTM standartlarına uygun olacak şekilde saf su seçildi ve sıcaklığı 25° C’de sabit tutulmuştur. Suyun kap içindeki yüksekliği 100 ± 10 mm ve başlığın suya batırılma derinliği 12 ± 4 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Titreşim frekansı da ASTM G32-10 standartlarına uygun olarak sabit ve 20 kHz olarak seçilmiştir. Test edilecek numuneler ve kullanılacak yöntem hakkında yapılan araştırmalar sonucunda, Şekil 3.11’de görüleceği gibi ASTM G32-10 standartlarına uygun olmayan iki parametre belirlenmiştir. Başlık çapı, numunenin yüzeyinin tamamen kapsanması ve daha verimli çalışması göz önüne alınarak 16 mm yerine 22 mm olarak seçilmiştir. Başlık çapının 22 mm seçilmesiyle birlikte başlık genliği 50 µm’den 54 µm’ye yükselmiştir.

Test Parametreleri	Değer
Sabit Parametreler	
Genlik (A)	54 μm
Frekans (f)	20 kHz
Sıvı Sıcaklığı (T)	25°C
Başlık çapı	22 mm
Batırılma derinliği (h)	12 mm
Su yüksekliği	100 mm



Şekil 3.4. Akustik kavitasyon cihazının test parametreleri

Bu tez çalışmasında yapılacak deneyler için kullanılan endirekt metodun uygulandığı sonotrode cihazının çalışma prensibini özetleyecek olursak; güç kaynağı piezoelektrik dönüştürücüyü 20 kHz frekans ve belirlenen şiddette sinyallerle besler, dönüştürücü ise sinyalleri piezo malzemeler yardımıyla mekanik salınımlara çevirir. Mekanik salınımlar sıvı içine daldırılmış olan saf titanyumdan imal edilmiş başlığa iletilir ve başlık titreşimin genliğini yükseltir. Bu titreşim hareketi, sıvı içerisinde negatif ve pozitif basınç alanları oluşturarak baloncukların oluşumu, büyümesini ve çökmesini sağlar. Baloncuklar test edilecek fonksiyonel yüzeye akış hareketleri sonucu iletilir ve mikro jetlerin çökmesi sonucu açığa çıkan yüksek enerjiyle fonksiyonel bölgeden malzeme koparılır. (Usta ve Aktas 2017)

3.1.2. Yüksek hızlı kamera

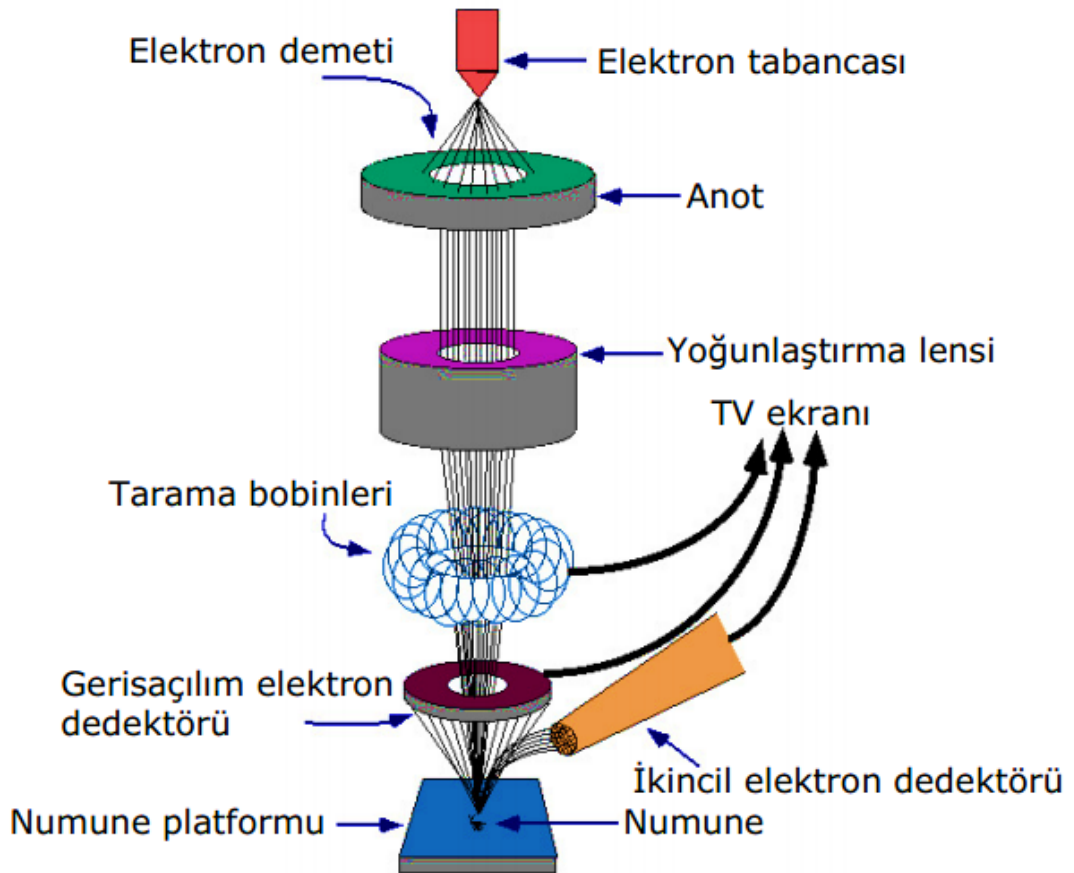
Bu tez çalışmasında VGA çözünürlüğünde saniye başına 636 kare kaydedebilme özelliğine sahip yüksek hızlı kamera, sonotrode başlığının tarafından saf suda oluşturulan baloncuk bulutunun şeklini ve karakteristiğini görüntülemek için kullanılmıştır.

3.1.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu akustik kavitasyon testinden çıkan valf parçalarının erozyona uğrayan bölgelerinin tespiti için kullanılmıştır. Cr alaşımlı kaplama valf parçası yüzeyinden daha koyu renkte olduğu için kaplamanın katmanlarının kalktığı bölge ya da

tamamen erozyona uğratılmış bölgeler taramalı elektron mikroskopuyla kolaylıkla tespit edilebilmiştir.

Taramalı elektron mikroskopunun optik kolunda; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, demeti toplamakta ve yönlendirmekte kullanılan kondansatör ve objektif mercekleri, demet çapını sınırlamakta kullanılan apertürler, numune yüzeyini taraması için demeti uygun şekilde saptıran tarama bobinleri vardır. Optik kolon alttan numune ocağına açılır. Burada üç boyutta hareket edebilen numune kızağı, demet-numune etkileşimi sonucu oluşan değişik sinyallere duyarlı algılayıcılar bulunur. Mikroskopun elektronik donanımı ise flaman akımı, mercek akımı ve uyarma gerilimini kararlı tutarken, algıcılardan gelen sinyalleri işleyerek numunenin değişik özelliklerini yansıtan görüntüler oluşturur (<https://www.slideshare.net/avanishthenewton/sem-and-tem?related=1>, 2013).

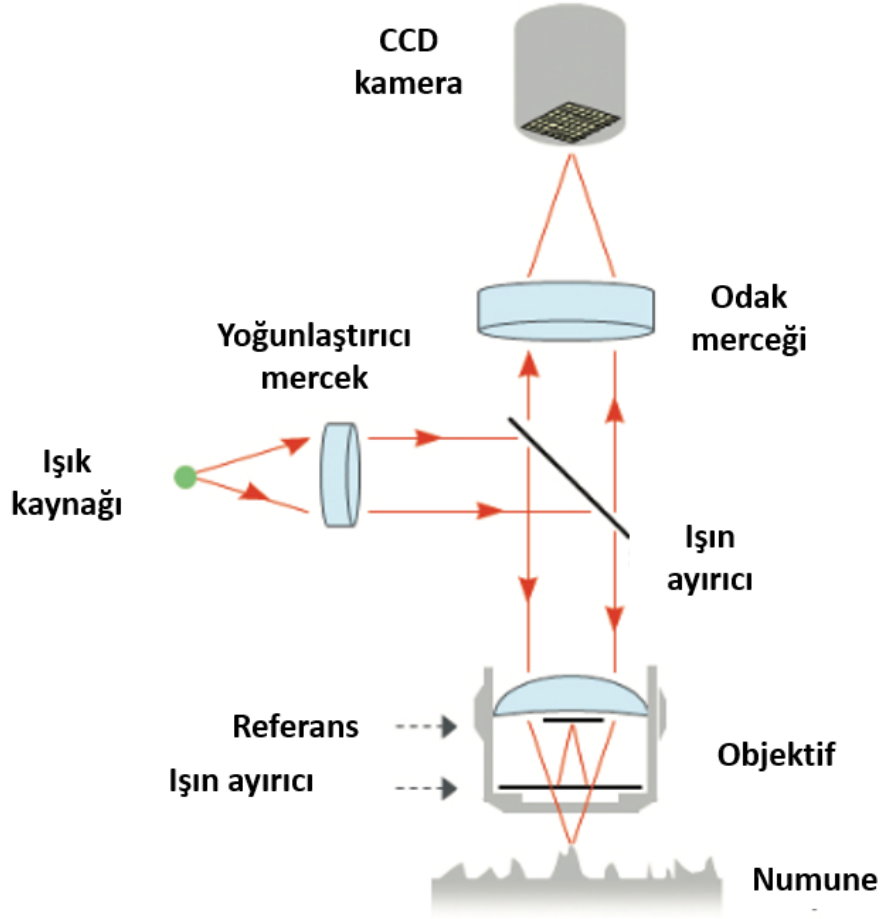


Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskopunun şematik görüntüsü (<https://www.slideshare.net/iuslu/taramal-elektron-mikroskobu>, 2013)

3.1.4. Beyaz ışık interferometresi (WLI)

Işık girişimi, ışığın hedef nesne yüzeyinden belirli bir noktaya kadar kat ettiği mesafelerde bir fark olduğunda meydana gelir. Beyaz ışık interferometresi bu olguyu kullanarak bir nesnenin yüzey profilini çıkarabilir.

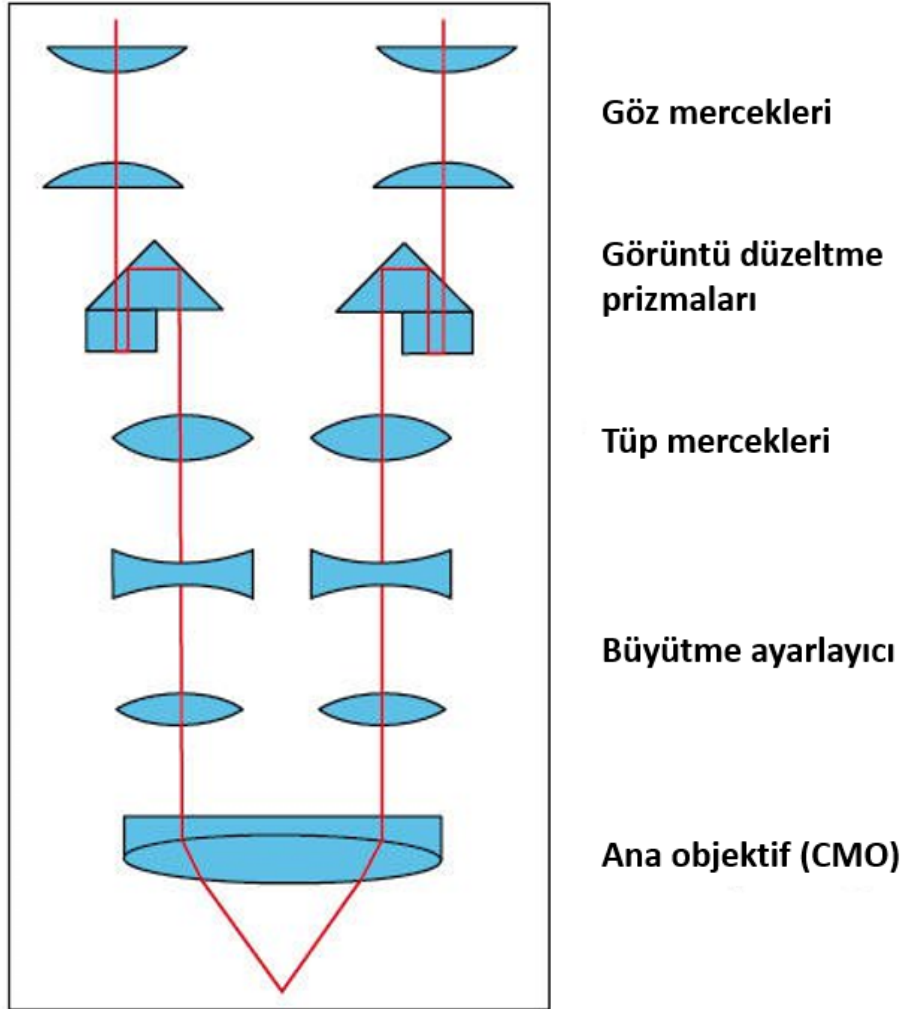
Bu tez çalışmasında, valf parçasının yüzeyinin taranıp 3 boyutlu şekilde yansıtılmasında ve uygun arayüz yardımıyla uygulanan yükseklik filtreleri yardımıyla kaplamadan aşınan alanın hesabı için kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Beyaz ışık interferometresi şematik görüntüsü (<https://www.nanoscience.com/techniques/optical-profilometry/white-light-interferometry/>, 2007)

3.1.5. Stereomikroskop (Olympus)

Stereo mikroskoplar sanayide yaygın olarak kullanılan çok çeşitli yakınlaştırma seçenekleri olan pratik bir mikroskoptur. Sağ ve sol göz için iki ayrı optiği bulunur ve bu sayede üç boyutlu görüntüler elde edilebilir. Bu çalışmada, alüminyum parçalar erozyona uğrasa da taramalı elektron mikroskopuyla erozyona uğratılmış bölgelerin gözlemlenmesi daha zordur. Bu durumda ışık mikroskopuyla bu bölgeler, taramalı elektron mikroskopuna nazaran daha hızlı ve kaliteli bir şekilde görüntülenebilmektedir.



Şekil 3.7. Stereomikroskop şematik görüntüsü (<https://www.leica-microsystems.com/science-lab/the-history-of-stereo-microscopy-part-iii/>, 2007)

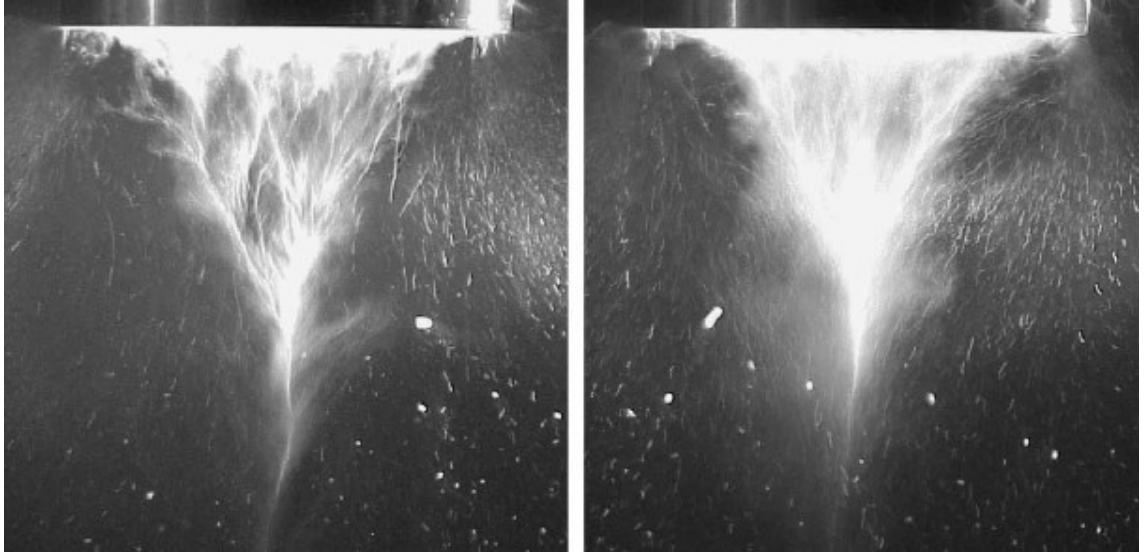
3.1.6. Hassas terazi

Numunelerin test öncesi ve sonrasındaki ağırlıkları ölçülerek akustik kavitasyon testi boyunca erozyonun oluşturduğu kütle kaybını tespit edebilmek amacıyla hassas terazi kullanılmıştır. Ölçüm güvenilirliğini arttırmak için sadece mikroskoplardan alınan erozyona uğratılmış bölgelerin resminin yanında sonuç değerlendirmesinin güvenilirliğini arttırmak için hassas teraziden alınan ağırlık kaybı ölçümlerinden de faydalanılmıştır. Ölçüm yapılan terazinin modeli Mettler Toledo AX 205 olup okunabilirliği 0,01 mg'dır.

3.2. Deney prosedürü

Test prosedürü belirlenirken akustik kavitasyon cihazının endirekt metodu uygulaması ile ilgili yeterli bilgi, çalışma ve tecrübe mevcut olmadığından öncelikle yüksek hızlı kamera ile baloncuk bulutunun görüntülenmesi sağlanacaktır.

Moussatov ve ark. (2002) 20 mm'lik başlık kullandığı ultrasonik kavitasyon cihazıyla yaptıkları çalışmada, Şekil 3.15'te görüleceği gibi baloncuk bulutunun başlık yüzey cidarından başlayarak koni şeklini aldığını ve dal benzeri mikro yapıların değişirken koni şeklinin makro yapısını koruduğunu belirtmişlerdir. Yüksek hızlı kamera ile yapılacak görüntüleme sonucunda, tez aşamasında kullanılacak akustik kavitasyon cihazının da Şekil 3.15'te görülen makro yapıda olmasını beklenmektedir.

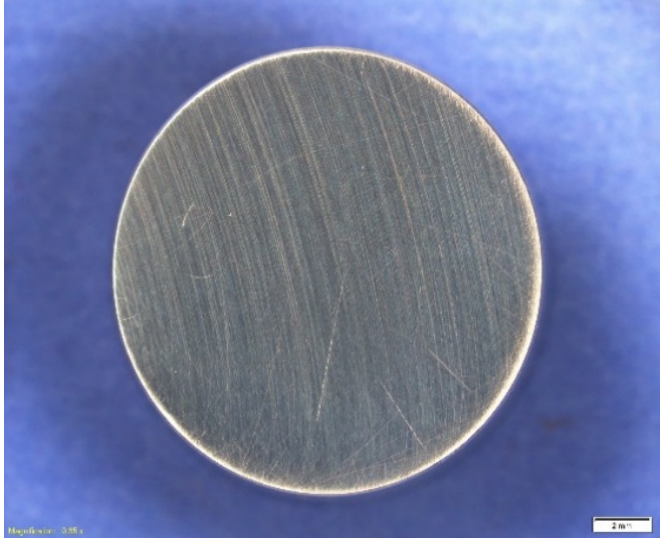


Şekil 3.8. Akustik kavitasyon cihazında oluşan baloncuk bulutunun konik yapısı (Moussatov ve ark. 2002)

Baloncuk bulutunun sınırlarının belirlenmesinin ardından test prosedürü beş temel adım üzerinde yürütülmüştür:

1. Yüksek hızlı kamera ile baloncuk bulutunun görüntülenmesi
2. Düz alüminyum parçalarla yapılan testler
3. Valf parçalarıyla yapılan testler
4. Çalışma süresinin ve kaplama kalitesi değerlendirmesinin tayini

Kavitasyon alanının incelenebilmesi, stabilitesinin kontrolü ve geometrik etkilerin elimine edilebilmesi için direkt valf parçalarıyla çalışmak yerine ön çalışma olarak 16 mm çapa ve 8 mm kalınlığa sahip Şekil 3.16'da görülen düz alüminyum parçalarla test yapılmıştır. Alüminyum parçalarla yapılan testlerde maksimum kavitasyon erozyonunu ve ağırlık kaybını homojen bir şekilde sağlayan başlık ile numune arasındaki mesafe tayin edilecektir. Her bir mesafe çalışması için cihazın tekrar edebilirliğini de değerlendirebilmek adına üçer adet düz alüminyum parça kullanılmıştır. Test süreleri 45'er dakikalık adımlar halinde toplamda 90 dakika olarak belirlenmiştir. Her işlem adımında parçaların ağırlıkları ölçülüp ağırlık kayıpları ortaya çıkarılmıştır.

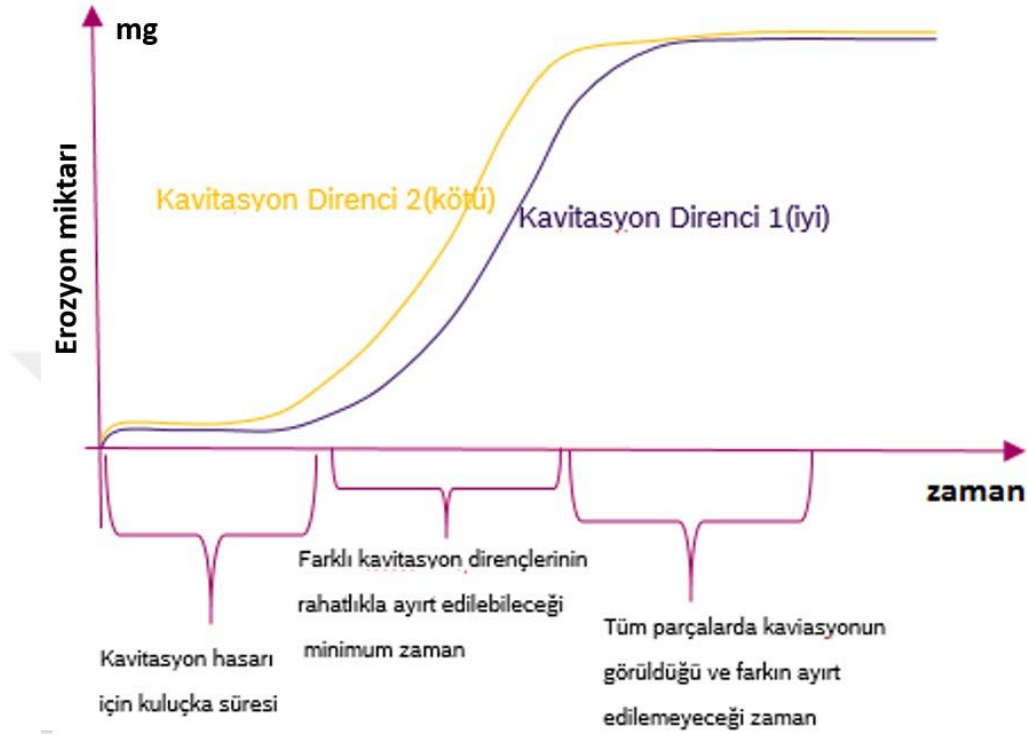


Şekil 3.9. 16.0 mm çapa sahip düz alüminyum silindirik parça

İkinci aşamada, alüminyum parçalara uygulanan testlerde kullanılan parametreler valf parçasına da uygulanacaktır. Değerlendirmeler sonucunda optimum kaviteasyon erozyonunu sağlayan başlık ile numune arasındaki uzaklık belirlenmiş olacak ve kalite değerlendirmesi bu uzaklıkla yapılacaktır. Valf parçasıyla yapılan çalışma alüminyum parçalarla yapılan çalışmalar gibi üçer adet valf parçasıyla gerçekleştirilecek ve test süreleri de benzer olacaktır.

Akustik kaviteasyonun valf parçası için belirlenen optimum uzaklık için iyi ve kötü kalitedeki kaplamaların tespitinin yapılabileceği minimum süre belirlenecektir. Numunelerde kaviteasyon erozyonu görebilmek için öncelikle Şekil 3.17'ye benzer kuluçka süresi olarak tabir ettiğimiz, malzemenin yorulduğu bir süreç gerekmektedir. Eğer çalışma süresi kuluçka sürecinden daha kısa seçilirse iyi ve kötü kaplama kalitesine sahip parçalarda fark edilemeyecek kadar küçük erozyonlar meydana gelir. Bu durumda parça ya da malzeme kalitesinin iyi ya da kötü olarak değerlendirilmesi imkansız olmaktadır. Benzer şekilde numuneler olması gerekenden daha uzun süre akustik kaviteasyon cihazında teste tabii tutulursa tüm parçalarda büyük erozyon miktarlarına ulaşılır. Her parçada büyük erozyonlar meydana gelmesi durumunda ise yine iyi ve kötü parçalar arasındaki farkı gözlemlemek zorlaşır ya da imkansızlaşır. İki kaplama arasındaki kalite farkının tespit edilebildiği minimum süreyi bulmak hem kalite

değerlendirmesinin güvenilirliği hem de çalışma zamanından kazanmak için kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.10. İki farklı kaplama kalitesine sahip test numunesi için kaplama kalite farklılığının görüldüğü test süresi

Çizelge 3.1. Düz alüminyum parçalar için test parametreleri

Test Parametreleri	Değer	Test Parametreleri	Değer (d)	Parça Sayısı	Test Süresi
Sabit Parametreler		Başlık ile parça arasındaki farklı uzaklıklar			
Genlik (A)	54 μ m	Durum - 1	2 mm	3 adet	45dk+45dk
Frekans (f)	20 kHz	Durum - 2	3 mm	3 adet	45dk+45dk
Sıvı Sıcaklığı (T)	25°C	Durum - 3	4 mm	3 adet	45dk+45dk
Başlık çapı	22 mm	Durum - 4	5 mm	3 adet	45dk+45dk
Batırılma derinliği (h)	12 mm	Durum - 5	6 mm	3 adet	45dk+45dk
Su yüksekliği	100 mm				

Çizelge 3.2. Valf parçaları için test parametreleri

Test Parametreleri	Değer	Test Parametreleri	Değer (d)	Parça Sayısı	Test Süresi
Sabit Parametreler		Başlık ile parça arasındaki farklı uzaklıklar			
Genlik (A)	54 µm	Durum – 1	2 mm	3 adet	45dk+90dk
Frekans (f)	20 kHz	Durum – 2	3 mm	3 adet	45dk+90dk
Sıvı Sıcaklığı (T)	25°C	Durum – 3	4 mm	3 adet	45dk+90dk
Başlık çapı	22 mm	Durum – 4	5 mm	3 adet	45dk+90dk
Batırılma derinliği (h)	12 mm	Durum – 5	6 mm	3 adet	45dk+90dk
Su yüksekliği	100 mm				

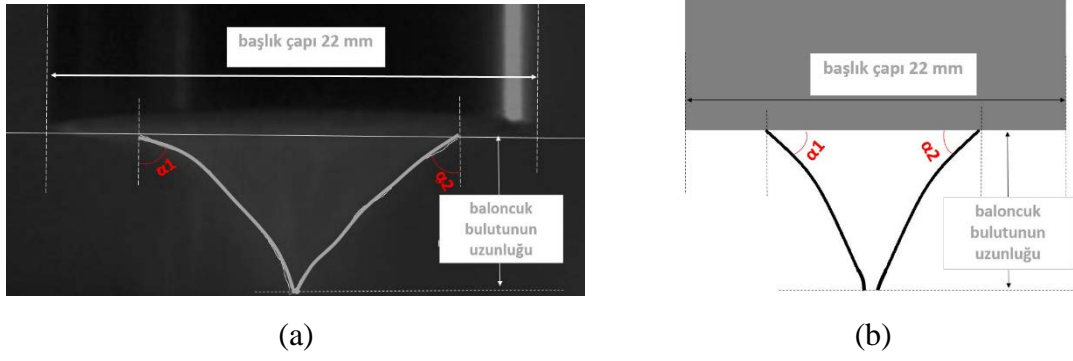
4. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında düz alüminyum parçalarla yapılan testlerde ağırlık kaybı olarak karşımıza çıkan erozyon miktarı, erozyon alanı büyüklüğü ve görsel olarak değerlendirilen erozyon homojenliği olmak üzere iki ana değerlendirme kriteri vardır. Valf parçası testlerinde ise bu değerlendirme kriterlerine ek olarak kavitasyon erozyonunun fonksiyonel bölgeyi kapsamaması ve başlık ile numune arasındaki mesafenin fonksiyonel bölgenin valf parçasının üst yüzeyine mesafesi dikkate alınarak valf parçasına ek işlem gerektirip gerektirmeyeceği olarak iki adet fazladan değerlendirme kriteri eklenmiştir. Ancak alüminyum parçaların değerlendirme kriterlerinden biri olan ağırlık kaybı, valf parçalarının ağırlığı hesaba katıldığında fark edilemeyecek kadar küçük olduğundan ağırlık kaybı kontrol edilemeyecektir.

Test prosedüründe belirlenen testlerin uygulanabilmesi için 15 adet testte kullanılacak ve 5 adet yedek olacak şekilde toplam 20 adet düz alüminyum parça üretilmiş ve aynı sayıda enjektörde kullanılmaya hazır valf parçası seri hattan temin edilmiştir.

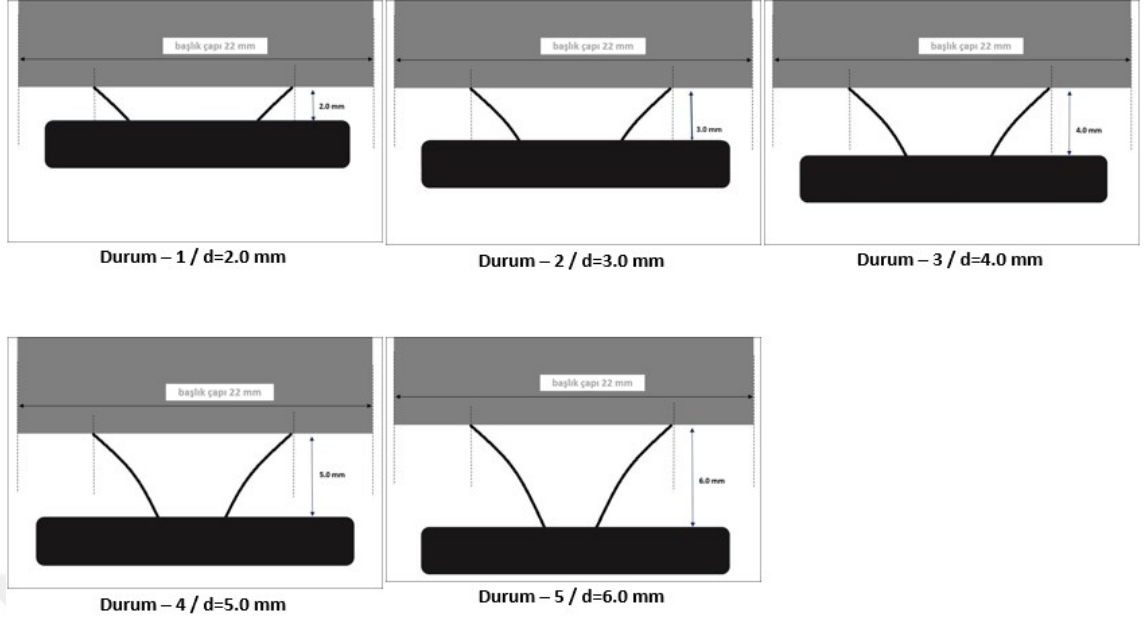
4.1. Yüksek hızlı kamera sonuçları

Test prosedüründe bahsedildiği gibi akustik kavitasyon cihazının oluşturduğu baloncuk bulutu karakteristiğinin belirlenebilmesi için öncelikle bir yüksek hızlı kamera vasıtası ile görüntü alınmıştır. Uygulamada kullanılan yüksek hızlı kamera saniye başına 636 kare kaydedebilme özelliğine sahiptir.

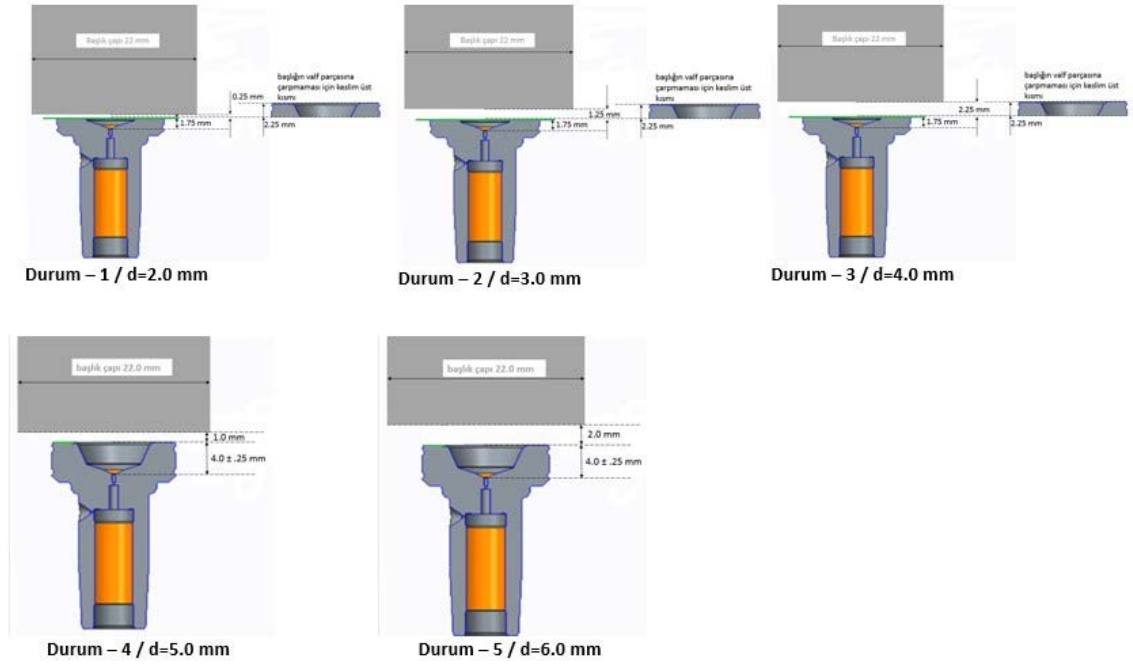


Şekil 4.1. Baloncuk bulutunun şekli a) yüksek hızlı kameradan alınan görüntü b) görüntüden türetilen baloncuk bulutunun boyutları

Şekil 4.1'deki görüntülerin, başlık ile numune arasındaki farklı mesafeler için alüminyum parçaların ve valf parçaların baloncuk bulutu içerisindeki şematik konumu Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Valf parçasının fonksiyonel bölgesi ile üst yüzeyi arasındaki mesafenin 4,0 mm olması nedeniyle durum 1, 2 ve 3 için bu test normal şartlarda uygulanamamaktadır. Bu yüzden valf parçasının üst kısmından 2,25 mm uzunluktaki kısım kesilmiş, böylece tüm durumlar için testin uygulanabilirliği sağlanmıştır. Valf parçasının üst kısmını kesmenin deney sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Durum 4 ve 5 için geometrik kısıtlama mevcut olmadığından ve 2,25 mm uzunluktaki üst kısmın kesilmesinin test sonuçlarına etkisinin daha önceki tecrübelerle dayanarak göz ardı edilmesine karar verilmiştir.



Şekil 4.2. Tüm test koşulları için düz alüminyum parçaların baloncuk bulutu içindeki konumu

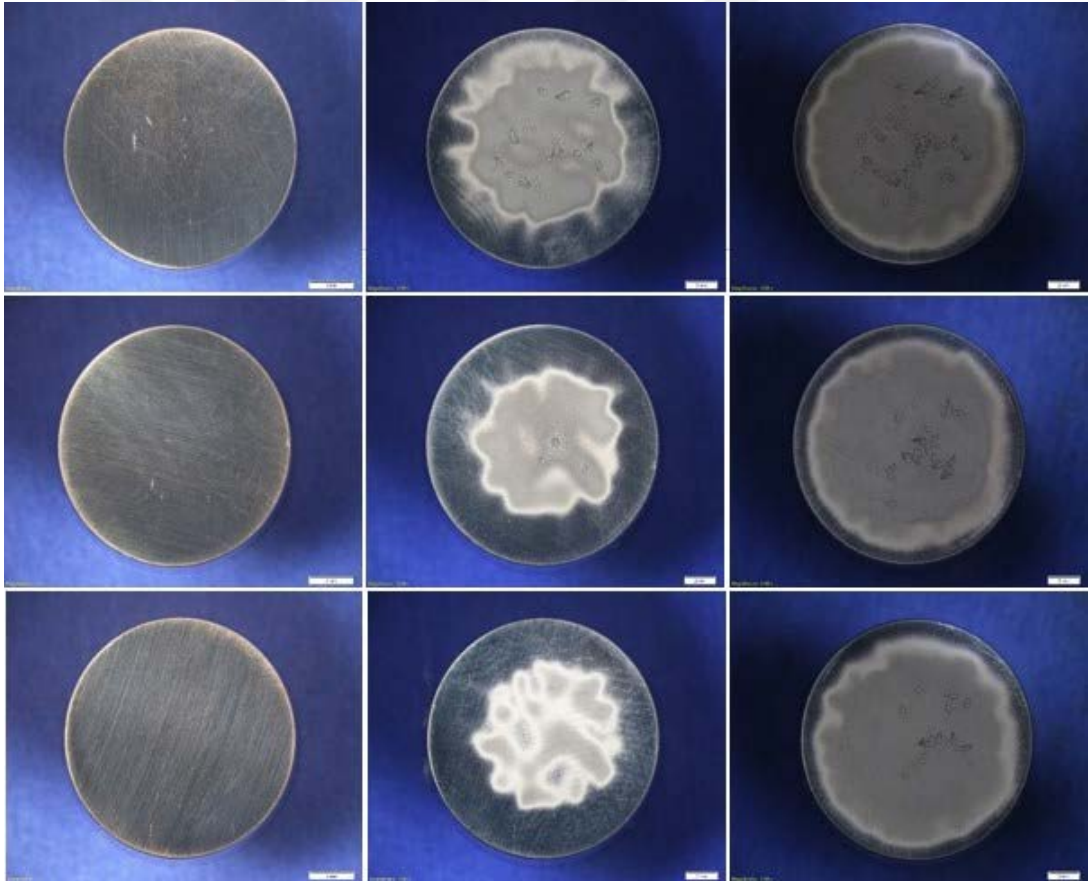


Şekil 4.3. Tüm test koşulları için valf parçalarının baloncuk bulutu içindeki konumu

4.2. Düz alüminyum parçalarla yapılan testler

Düz alüminyum parçalar, tüm dış etkenlerin yok edilmesi veya en aza indirgenmesi için aynı makine tezgahında ve aynı şartlarda imal edilmiştir. Test prosedüründe bahsedildiği gibi düz yüzeyli alüminyum parçaların çapı 16,0 mm ve kalınlığı 8,0 mm'dir. Alüminyum numune çapının seçiminde tez çalışmasının nihai amacı olan valf parçasına uygun parametreler belirlenmesi hedefine uygun olarak valf parçası emsal alınmıştır. Kalınlık tercihi ise sıvı kabının içinde bulunan fikstür göz önüne alınarak seçilmiştir.

Her bir durum için üç alüminyum numune kullanılmıştır ve test öncesi, sonrası sonuçlarının yer aldığı Olympus sonuçları gösterilmiştir. Ayrıca her bir adımda oluşan kütle kayıpları da verilmiştir.



a. 0 dk

b. 45 dk

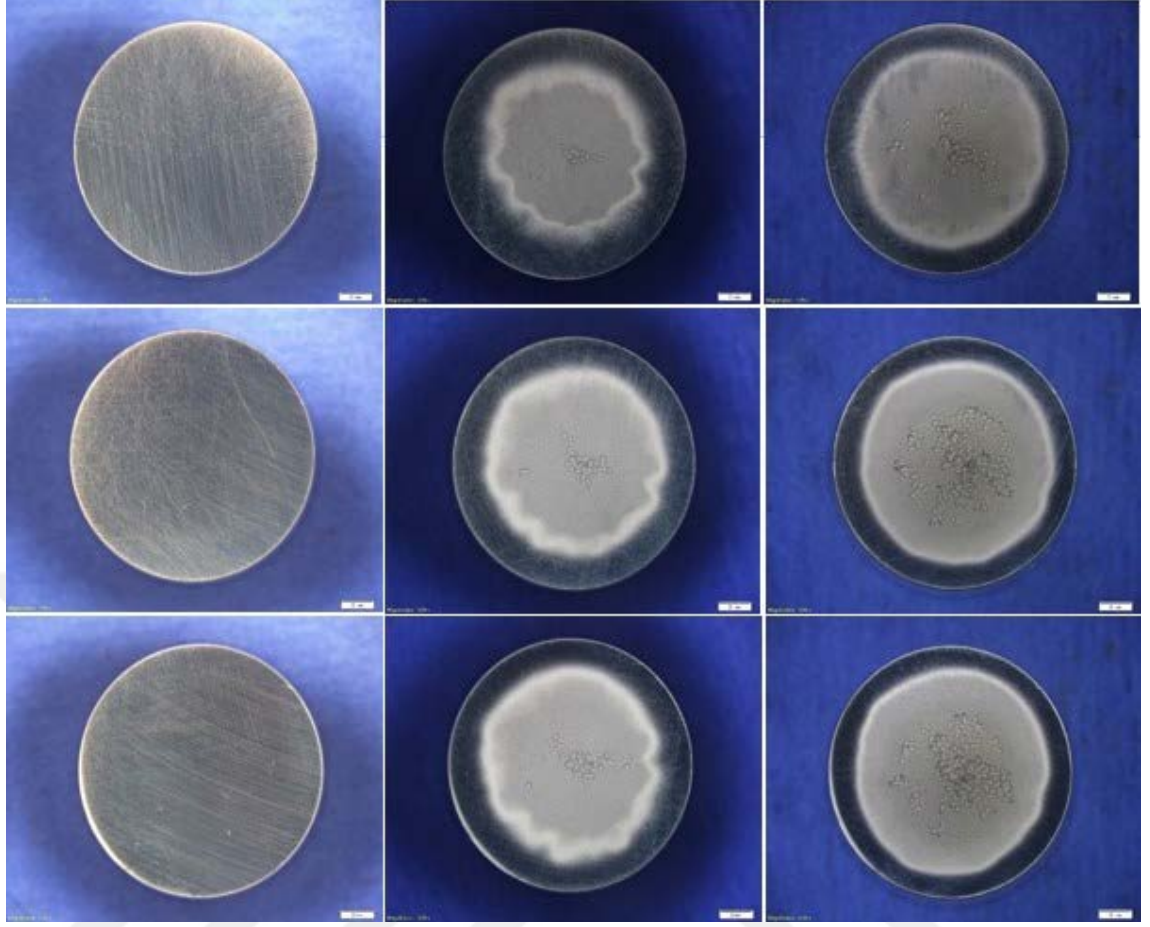
c. 90 dk

Şekil 4.4. Alüminyum parçalar için Durum – 1 / d = 2 mm Olympus sonuçları

Olympus sonuçlarında kavitasyonun etkisini, akustik kavitasyonun nüfuz ettiği bölge ve erozyonun görüldüğü bölge olarak ikiye ayrılabilir (Şekil 4.4). Akustik kavitasyonun etki ettiği bölge açık renkle görülen bölgedir. Erozyonun olduğu bölgeler ise kütle kaybının yaşandığı bölgeler olarak tanımlanabilir. Durum – 1 için sonuçları irdelenecek olursak ilk 45 dakikalık çalışma periyodunda düz alüminyum numunede kavitasyon erozyonuna bağlı ağırlık kaybı ortalama 0.40 mg olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). Akustik kavitasyonun ilk 45 dakikada etki ettiği bölgeler düzensiz görünmekle beraber erozyona uğrayan bölgelerin de buna paralel olarak düzensiz bir dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir. İkinci 45 dakikalık çalışma periyodun da ise ilk periyoda göre çok daha fazla ağırlık kaybı olmuş ve ortalama 0,73 mg ağırlık kaybı tespit edilmiştir. Ayrıca akustik kavitasyonun etki ettiği bölgelerin daha düzenli hale geldiği ve daire şeklinde bir makroyapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu etki altındaki alan neredeyse alüminyum parçanın tüm yüzeyini kapsamıştır.

Çizelge 4.1. Durum – 1 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri

Durum - 1 / d=2 mm				
Toplam ağırlık kaybı (mg)				
Parçalar	0-45 dakika	45-90 dakika	Toplam	
1	0,60	0,90	1,50	
2	0,40	0,70	1,10	
3	0,20	0,60	0,80	
<i>Ortalama</i>	0,40	0,73	1,13	



a. 0 dk

b. 45 dk

c. 90 dk

Şekil 4.5. Alüminyum parçalar için Durum – 2 / d = 3 mm Olympus sonuçları

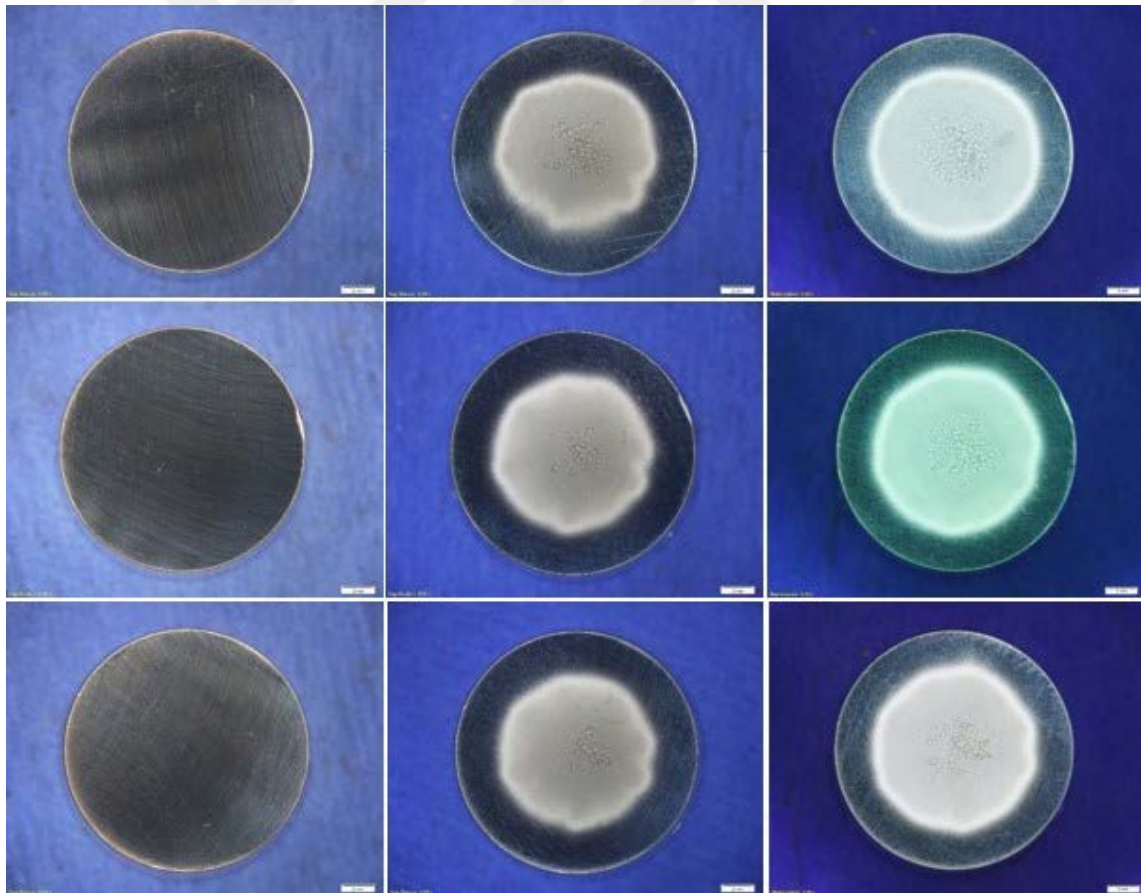
Şekil 4.5'te Durum – 2 için ilk 45 dakikalık periyotta malzemede ki ağırlık düşüşleri ortalama 0,77 mg olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.2). Akustik kavitasyonun etki ettiği alanları inceleyecek olursak nispeten düzenli ve daireye yakın bir şekil oluşturmuştur. Erozyona uğrayan bölgeler alüminyum parçanın merkezine yakın gerçekleşmiştir. İkinci periyotta ise üç alüminyum parçanın ağırlık kaybı ortalaması ilk 45 dakikalık periyodun iki katından daha fazla gerçekleşmiş ve 1,63 mg olarak tespit edilmiştir. Kavitasyonun etki ettiği alan ise ilk 45 dakikadan daha büyük ve daha net görünen bir daire şeklini almıştır.

Durum – 1 ile Durum – 2 sonuçlarını kıyaslırsak, erken safha ölçümleri için 3 mm'lik mesafe 2 mm'lik mesafeye nazaran daha düzenli bir etki alanına ve neredeyse iki katı yüksek erozyon miktarına sahiptir. Ek olarak erozyona uğrayan bölgelerin de merkeze daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. 90 dakika sonuçlarına göre 3 mm mesafe için etki

alanının daha küçük olduğu ancak erozyona uğramış bölgelerin merkez etrafına doğru kaydığı tespit edilmiştir. Erozyon miktarlarına bakacak olursak, Durum – 2’de çok daha yüksek erozyon miktarına rastlanmıştır. Ancak her iki durum için de erozyona uğramış bölgelerin dağılımlarının homojen olmadığı anlaşılmıştır.

Çizelge 4.2. Durum – 2 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri

Durum - 2 / d=3 mm			
Toplam ağırlık kaybı (mg)			
Parçalar	0-45 dakika	45-90 dakika	Toplam
1	0,70	1,30	2,00
2	0,80	1,80	2,60
3	0,80	1,80	2,60
<i>Ortalama</i>	0,77	1,63	2,40

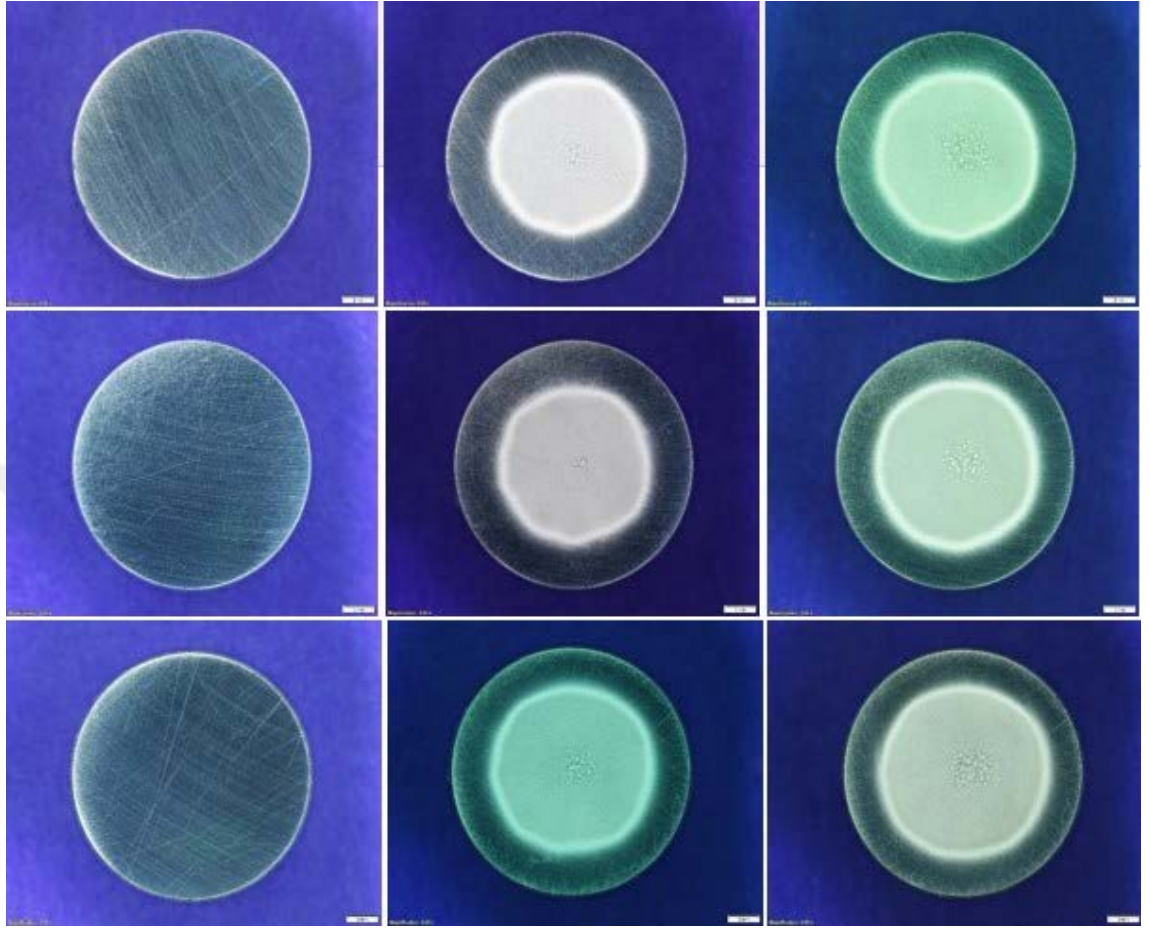


a. 0 dk

b. 45 dk

c. 90 dk

Şekil 4.6. Alüminyum parçalar için Durum – 3 / d = 4 mm Olympus sonuçları



a. 0 dk

b. 45 dk

c. 90 dk

Şekil 4.7. Alüminyum parçalar için Durum – 4 / $d = 5$ mm Olympus sonuçları

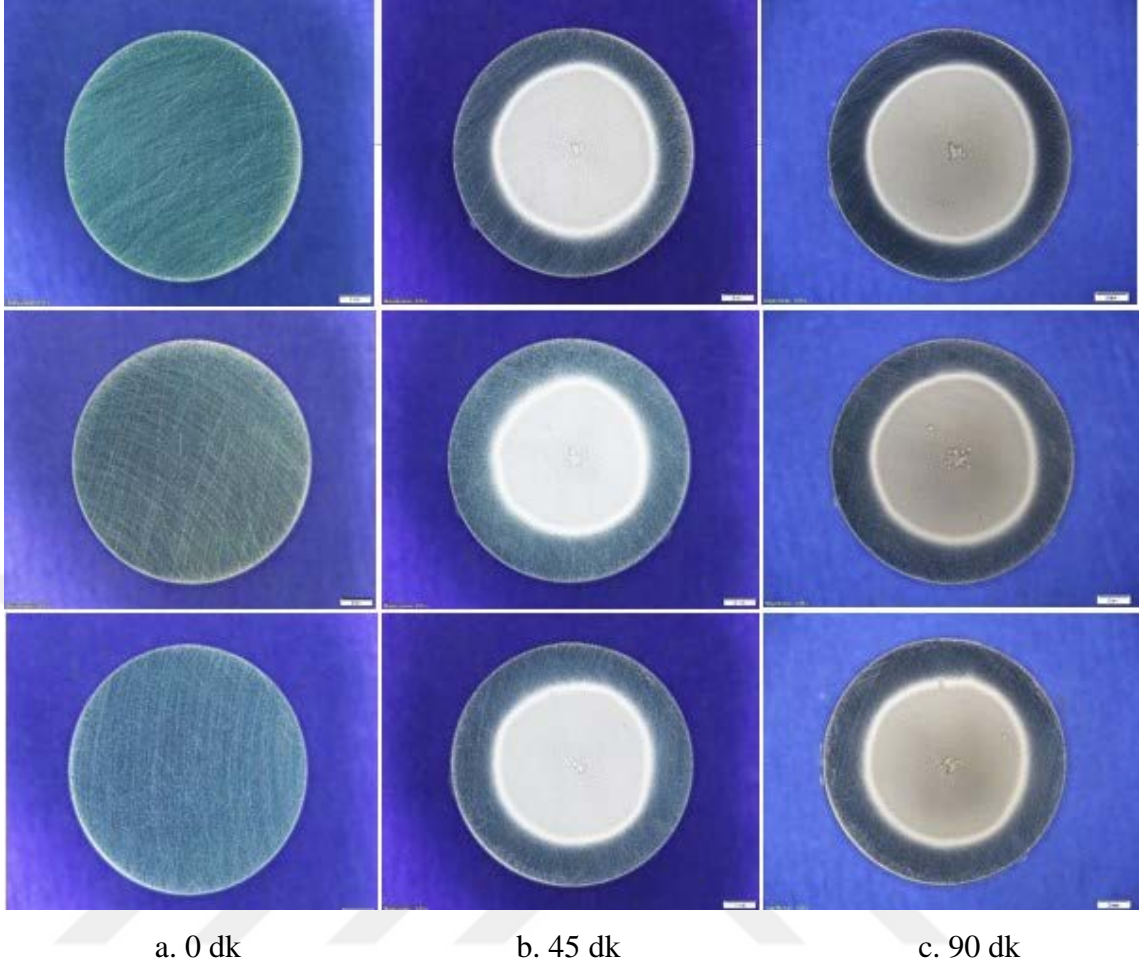
Şekilde 4.6 ve Şekil 4.7’de görüleceği gibi Durum – 3 ilk 45 dakikalık ölçüm periyodu sonuçlarına göre erozyona uğrama miktarı 1.30 mg ve akustik kavitasyonun etki ettiği alan daire şeklindedir (Çizelge 4.3). Erozyona uğrayan bölgeler merkezin etrafında dağılmış ve düzenli görünmektedir. 90 dakika sonuçlarında diğer ölçümlerdeki sonuçlara benzer olarak ilk 45 dakikalık periyodun yaklaşık iki katı kadar ağırlık kaybı olmuştur ve ortalama 2,63 mg’dır. Durum – 4’ün ilk 45 dakikalık sonuçlarını irdelersek akustik kavitasyonun etki alanının önceki durumlarla benze şekilde dairesel bir alan oluşturduğunu ve erozyon miktarının ortalama 0,80 olarak ölçüldüğü görülebilir. 90 dakika sonuçlarında etki edilen alan tamamen dairesel bir şekil almıştır ve ağırlık kaybı

da 1,87 mg olarak gerçekleşmiştir. Erozyon bölgeler alüminyum parçanın merkezi etrafında düzenli şekilde toplanmıştır.

Durum – 3 ve Durum – 4 sonuçları kıyaslanacak olursa ilk göze çarpan erozyon miktarlarının düşmesidir. Her iki durum için de etki alanı dairesel bir şekil almıştır ve erozyona uğrayan bölgeler alüminyum parçanın merkezinde toplanmıştır. Durum – 4 için akustik kaviteye maruz kalan bölgenin Durum – 5'e göre biraz daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.3. Durum – 3 ve Durum - 4 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri

	Durum - 3 / d=4 mm			Durum - 4 / d=5 mm		
	Toplam ağırlık kaybı (mg)			Toplam ağırlık kaybı (mg)		
Parçalar	0-45 dakika	45-90 dakika	Toplam	0-45 dakika	45-90 dakika	Toplam
1	1,70	2,80	4,50	0,90	1,90	2,80
2	0,80	2,20	3,00	1,30	0,80	2,10
3	1,40	2,90	4,30	0,20	2,90	3,10
<i>Ortalama</i>	1,30	2,63	3,93	0,80	1,87	2,67



Şekil 4.8. Alüminyum parçalar için Durum – 5 / $d = 6$ mm Olympus sonuçları

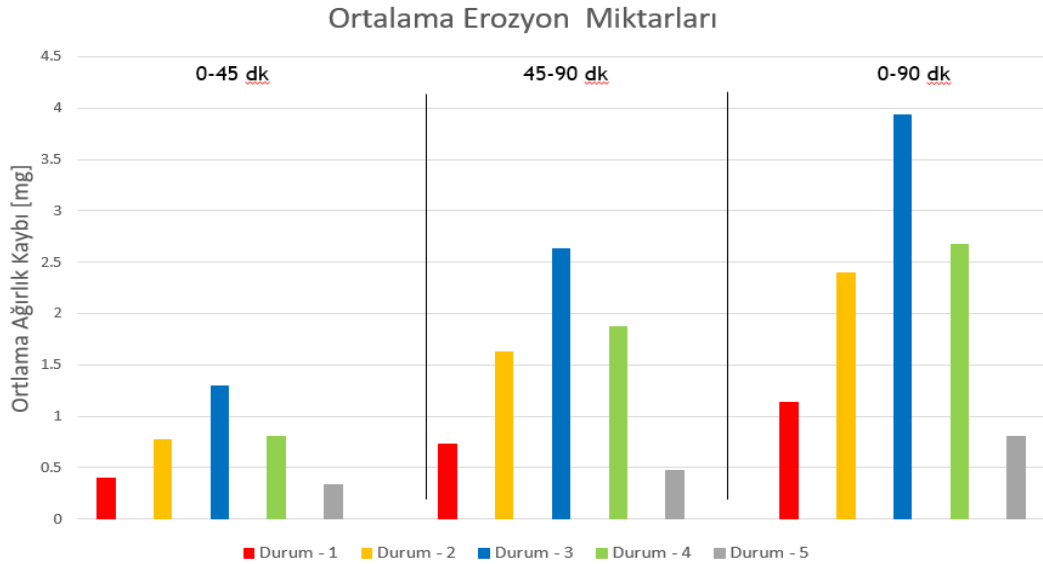
Alüminyum parçalarla yapılan maksimum uzaklık çalışması olan Durum – 5'in ilk 45 dakika sonuçlarına göre erozyon miktarı ortalama 0.33 mg olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.4). Akustik kavitasyonun etki ettiği bölge daha önceki durumlarda gözlemlendiği gibi daireseldir ve erozyonlar daha çok noktasal olarak merkezde tespit edilmiştir (Şekil 4.8). İkinci 45 dakikalık ölçümde kavitasyonun etki alanı neredeyse değişmemiş ve dairesel şeklini korumuştur.

Erozyon miktarı olarak bakacak olursak ilk 45 dakikaya nazaran fazla değişiklik olmamış ve 0.47 mg gerçekleşmiştir. Akustik kavitasyonun etki ettiği alan diğer durumlara nazaran daha küçük kalmıştır.

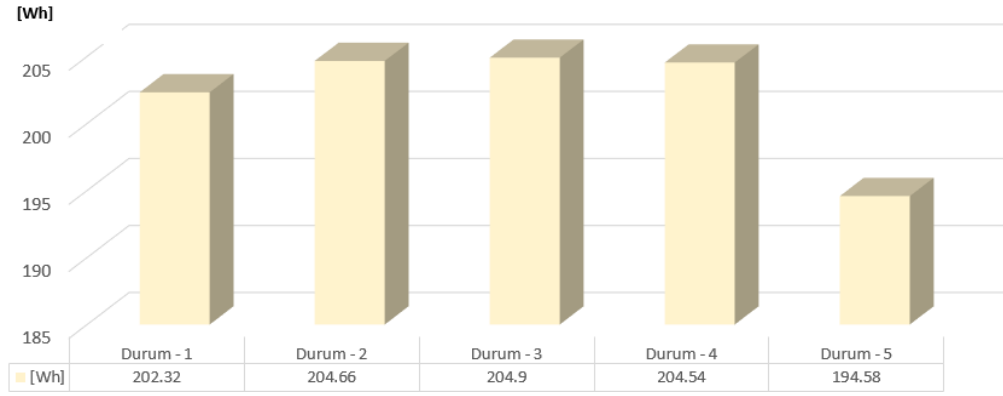
Çizelge 4.4. Durum – 5 için ölçülen ağırlık düşüş değerleri

Durum - 5 / d=6.0 mm			
Toplam ağırlık kaybı (mg)			
Parçalar	0-45 dakika	45-90 dakika	Toplam
1	0,30	0,40	0,70
2	0,40	0,70	1,10
3	0,30	0,30	0,60
<i>Ortalama</i>	0,33	0,47	0,80

Tüm çalışmalar için iki farklı test periyodunda elde edilen ortalama ve toplam ağırlık kayıpları Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu sonuçlardan hareketle, 90 dakikalık periyot sonucunda ortalama erozyon miktarları 0,80 mg’dan 3,93 mg’a arasında gerçekleşmiştir. Durum – 1 ve Durum – 5’te elde edilen erozyon miktarları birbirine yakın seyrederken, Durum – 2 ile Durum – 4’te de sonuçlar benzerlik göstermektedir. En yüksek erozyon miktarına her periyotta Durum – 3’te ulaşılmıştır. Ek olarak, bu deneysel çalışmanın sonucundan başlık ile numune yüzey mesafe belirlenirken enerji tüketiminin, test süresinin ve maksimum homojen aşınma alanının dikkate alınması gerektiği rahatlıkla söylenebilir.

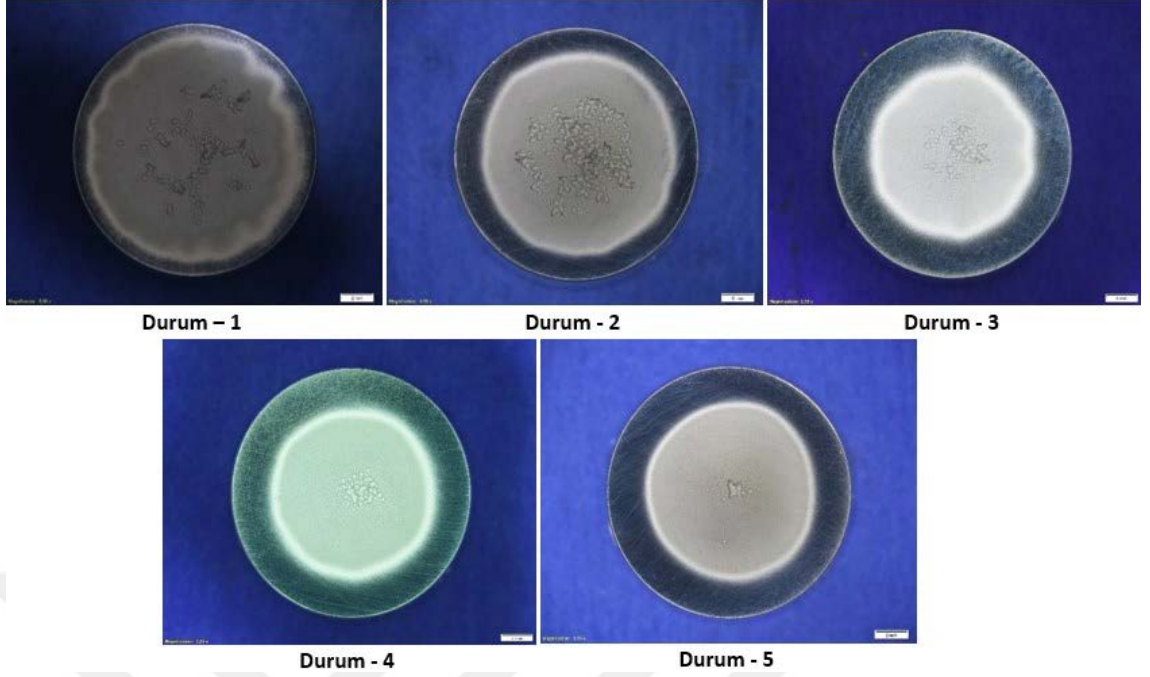


Şekil 4.9. Tüm durumlar için iki farklı test süresinde elde edilen ortalama erozyon miktarları



Şekil 4.10. Tüm durumlar için tüketilen toplam enerji [Wh]

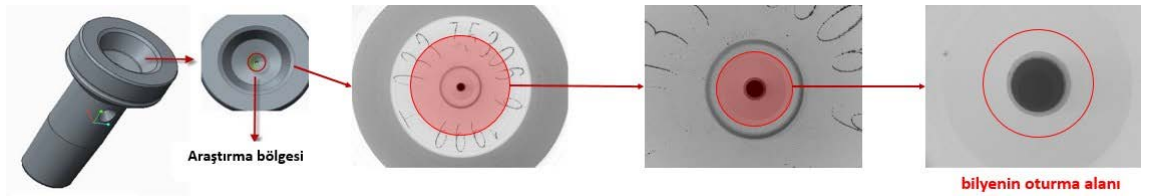
Tüm durumlar için 90 dakikalık test sonunda akustik kavitasyonun etki ettiği bölgeler Şekil 4.11’de görülmektedir. Her durum için etki alanları incelendiğinde başlığın alüminyum parçadan uzaklaştıkça 4 mm’ye kadar etki alanının azaldığı görülmektedir. Ancak 4 mm’den sonra etki alanının çok az değiştiği tespit edilmiştir. Erozyona uğrayan bölgeler mesafe arttıkça merkeze daha yakın hale gelmekte ancak 5 mm’den sonra erozyon miktarı noktasal olarak gerçekleşmektedir. Durum – 3 ve Durum – 4 için erozyona uğrayan bölgelerin homojen olduğu söylenebilirken, Durum – 1 ve Durum – 2 için daha heterojen bir erozyon bölgesi gözlemlenmektedir. Durum – 5 için ise bu değerlendirme, erozyonun noktasal gerçekleşmesinden dolayı söz konusu değildir. Tüm durumlar için sonuçları incelendiğinde aynı mesafe için benzer sonuçlar edilmiştir ve düzeneğin çalışmasının stabil olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. Tüm durumlar için akustik kaviteasyonun 90 dakika sonundaki etki alanı

4.3. Valf parçasıyla yapılan testler

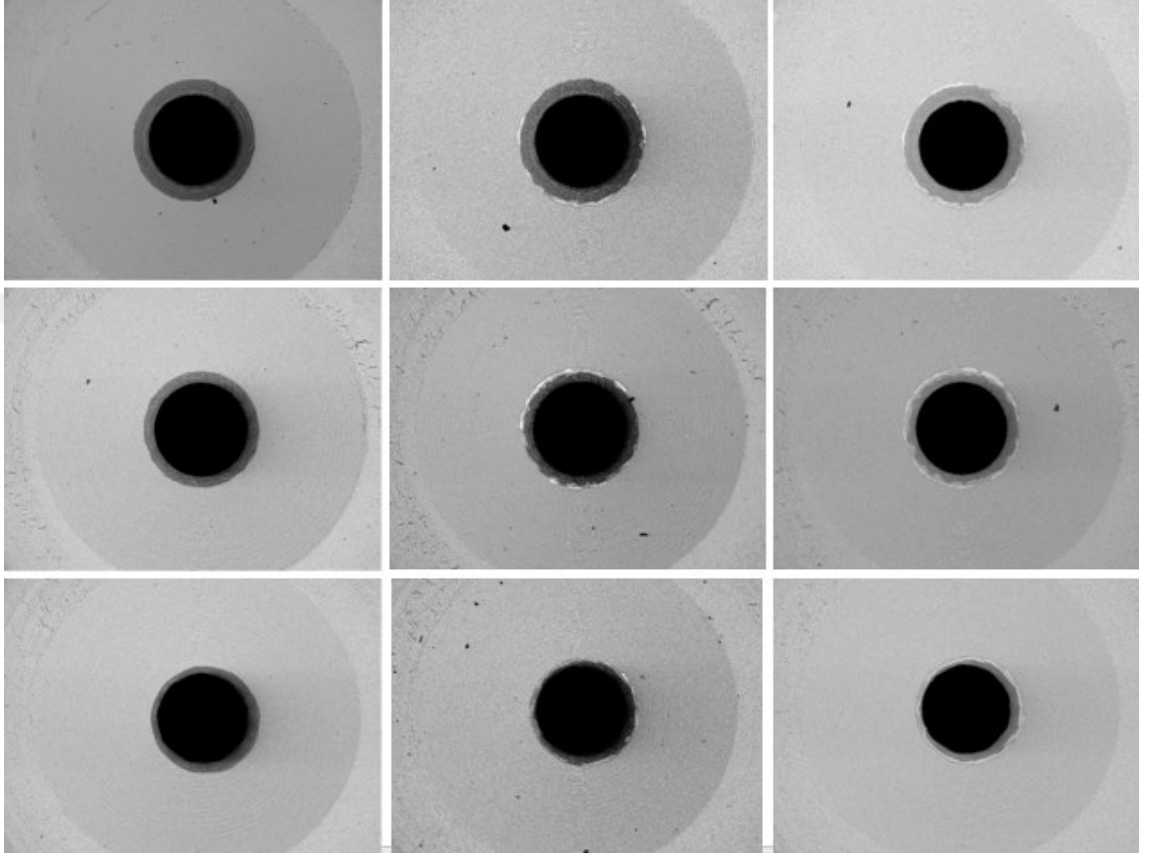
Tez çalışmasında kullanılan valf parçaları birebir CRI2-16 OHW enjektörlerde kullanılan parçalar olup seri hattan temin edilmiştir. Tüm dış etkileri minimize etmek için hepsi aynı kaplama süreci içinde kaplanmış valf parçaları seçilmiş olup her durum için 3'er tane valf parçası kullanılmıştır. Valf parçasında incelenecek bölge sızdırmazlık için en kritik bölge olan bilyenin valf parçasına oturma alanıdır. Valf parçalarında bilyenin oturduğu fonksiyonel alan Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Valf parçasında incelenecek bölgesi olan bilyenin oturma alanı

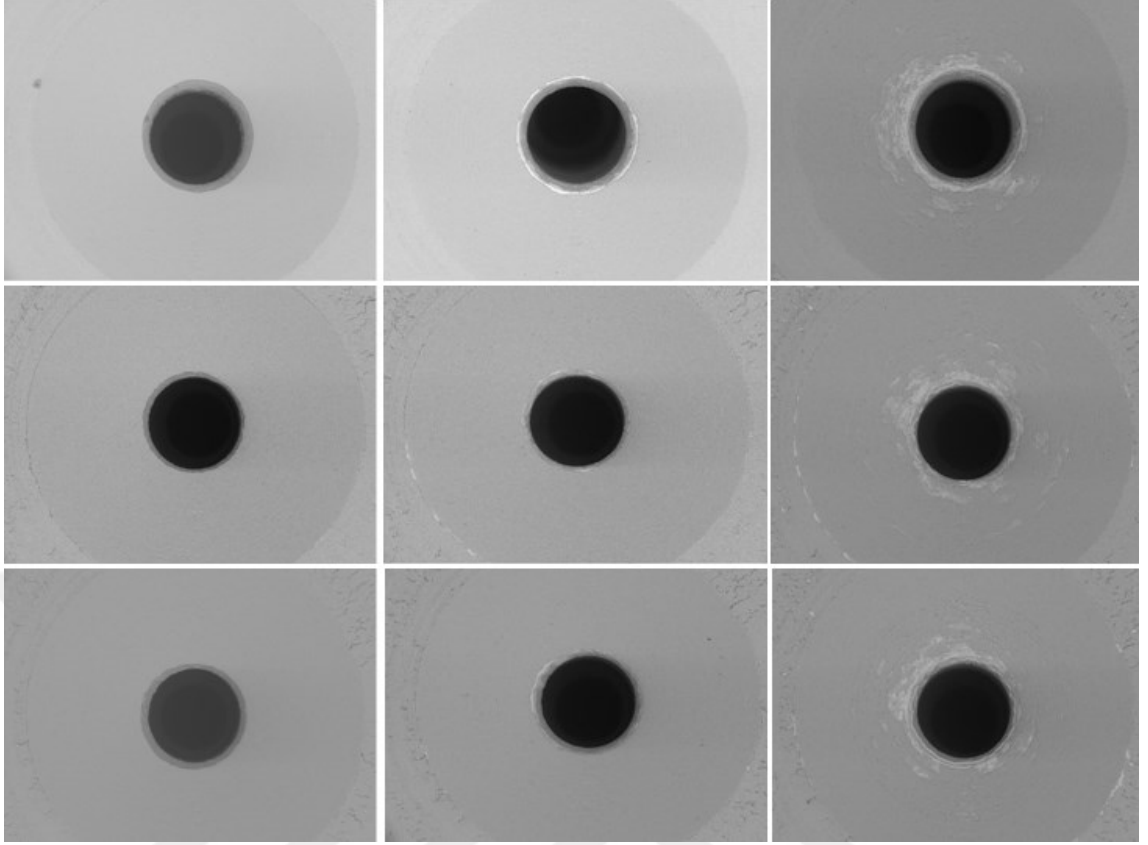
Her bir durum için test öncesi ve sonrası sonuçlarının yer aldığı Olympus sonuçları gösterilmiştir. Valf parçasıyla yapılan çalışmalarda hassas teraziyle de ölçüm yapılmak

istenmiştir. Ancak valf parası üzerinde akustik kaviteasyondan etkilenip erozyona uğrayan bölgenin ağırlığı, hassas terazi ile ölçülebilecek kadar yüksek olmadığı için valf parçalarında erozyon miktarı çalışması yapılamamıştır. Değerlendirme sadece taramalı elektron mikroskobu tarafından çekilen fotoğraflarla yapılacaktır.



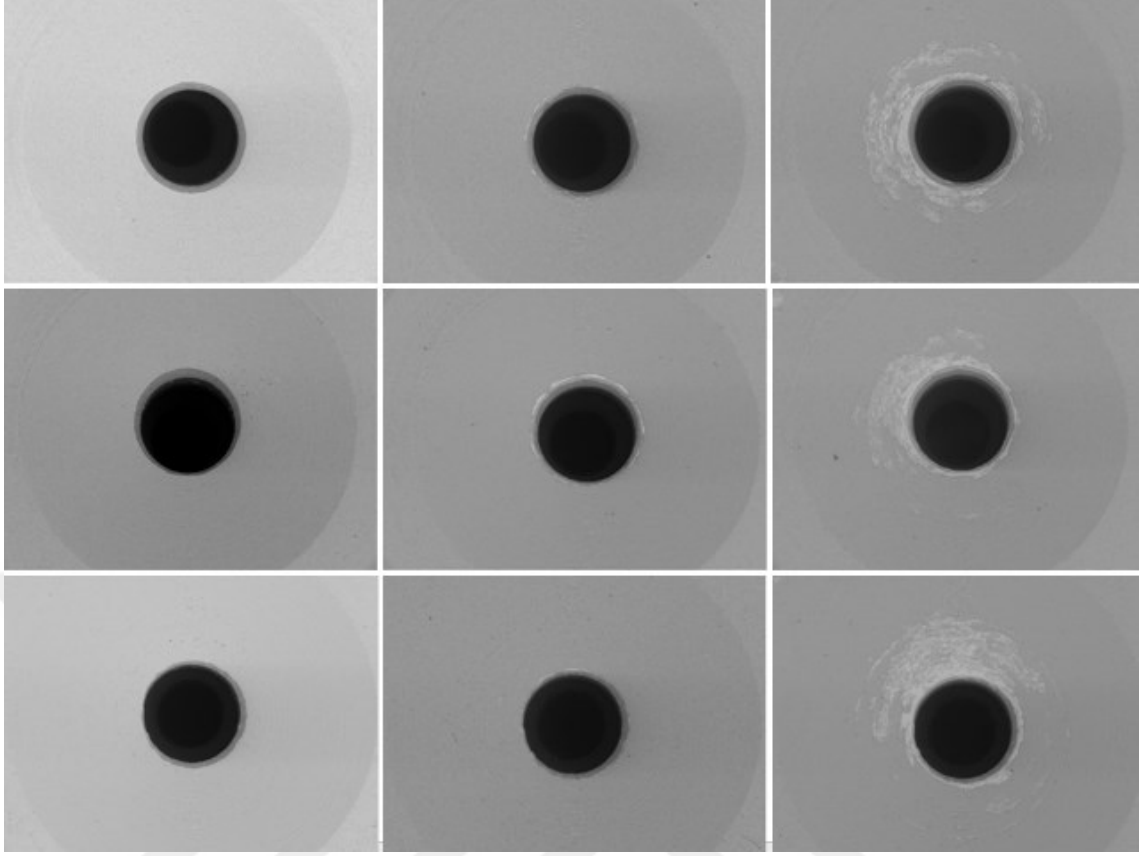
Şekil 4.13. Valf parçaları için Durum – 1 / $d = 2$ mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları

Valf parçası ile yapılan Durum – 1 deneyinin sonuçlarına göre, başlık ile valf parçası arasındaki mesafenin 2 mm olduğu durumda neredeyse hiç erozyon olmamıştır (Şekil 4.13). Erozyonun az da olsa gözlemlenebildiği tek yer kaplamanın en zayıf olan bölgesi olarak bilinen bilyenin kapattığı deliktir. Hiç erozyona rastlanmamasının nedeni mikrojet oluşturmak için yeterli mesafe olmaması, geometrinin akustik kaviteasyon alanına etkisi yada cihazda oluşan herhangi bir komplikasyon olabileceği düşünülmektedir.



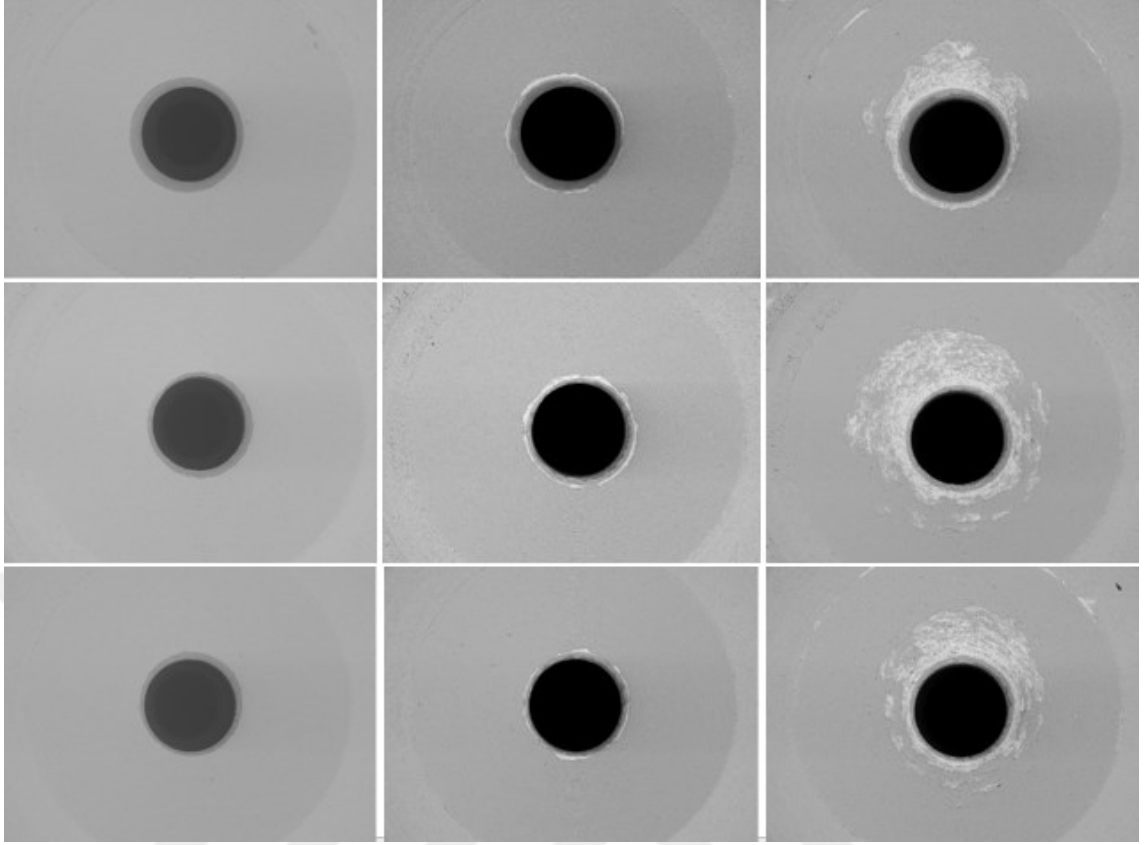
Şekil 4.14. Valf parçaları için Durum – 2 / $d = 3$ mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları

Valf parçası ile başlık arasındaki mesafenin 3 mm olduğu durum için sonuçlar 2 mm'lik çalışmanın sonuçlarına kıyasla daha gözlenebilirdir (Şekil 4.14). İlk 45 dakikalık çalışma periyodunda herhangi bir erozyona rastlanmazken, 135 dakikalık çalışma sonucunda fonksiyonel bölgede nispeten kısıtlı bir alanda erozyonlar oluşmuştur. Oluşan erozyonlar genelde deliğin çevresinde olup istenilen erozyon miktarının altında kalmıştır. Erozyon dağılımına bakıldığında homojen bir dağılım gözlemlenmemekle birlikte erozyona uğramaya başlayan bölgeler incelendiğinde bir süre daha deneye devam edilmesi durumunda homojen bir dağılım gözlemleneceği tahmin edilmektedir.



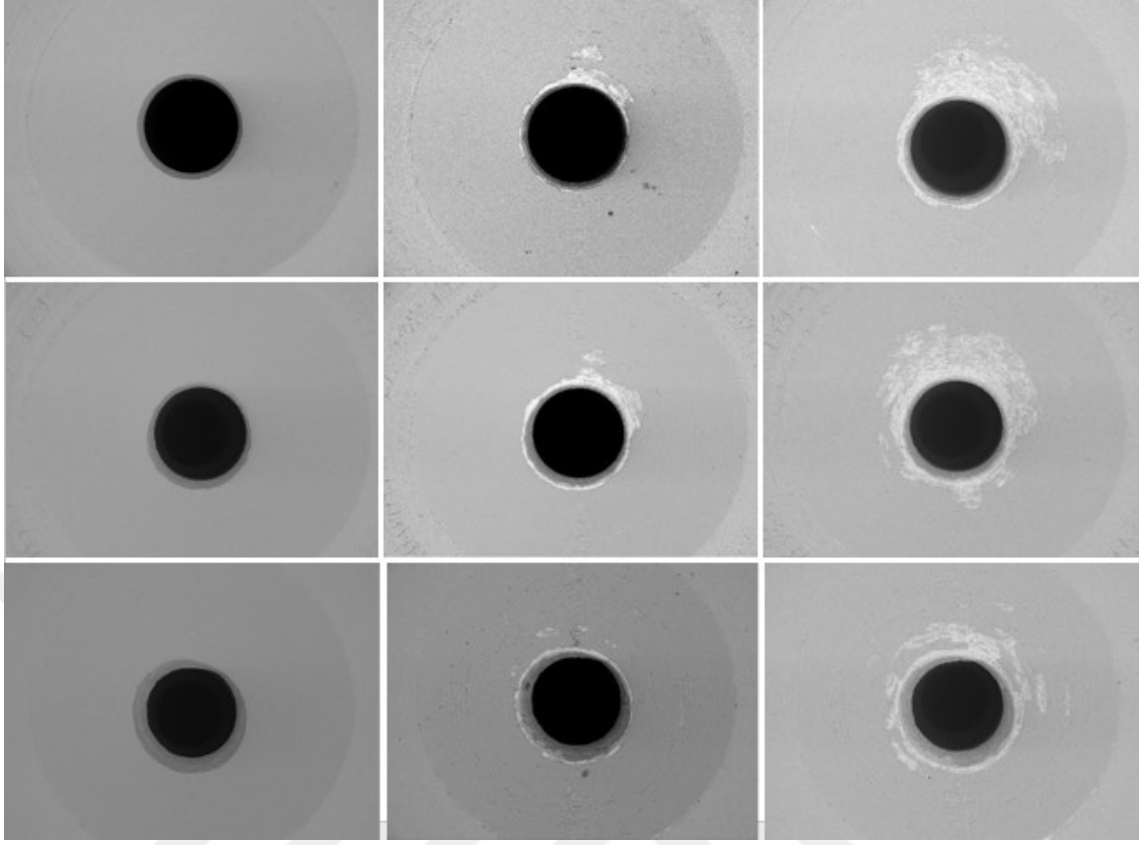
Şekil 4.15. Valf parçaları için Durum – 3 / $d = 4$ mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları

Valf parçası çalışmasının 4 mm mesafe için yapılan çalışmasının sonuçlarını irdeleyecek olursak, ilk iki duruma göre erozyonun çok daha iyi bir seviyede olduğu söylenebilmektedir (Şekil 4.15). Erozyona uğrayan bölgeler nispeten daha büyük bir alanı kapsıyor ve bilyenin oturduğu yüzeye de temas ediyor. İlk 45 dakika deneyinde daha önceki durumlarla benzer olarak erozyona rastlanmasa da ardından yapılan 90 dakikalık deneyde erozyon miktarları gözle görülür şekilde artış göstermiştir. Diğer durumlarla benzer şekilde erozyon delik etrafında toplanmıştır. Erozyon dağılımları incelenirse homojen bir dağılım olmadığı rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Bunun muhtemel sebebi kaplamanın o bölgede daha zayıf olmasıdır.



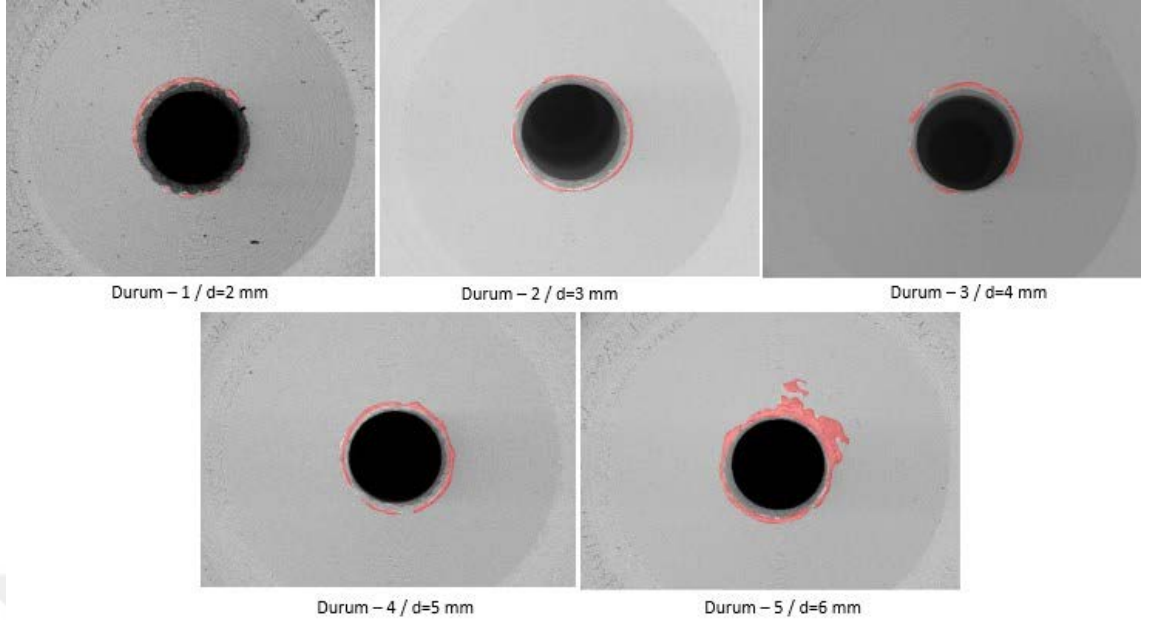
Şekil 4.16. Valf parçaları için Durum – 4 / $d = 5$ mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları

Valf parçası çalışmasının 5 mm'lik mesafe için yapılan çalışmasının taramalı elektron mikroskobu sonuçları irdelenecek olursa, ilk 45 dakika sonucunda diğer tüm durumlarla benzer şekilde sadece delik etrafında hafif erozyonlar gözlenmektedir (Şekil 4.16). 135 dakika sonucunda ise erozyon bölgesi büyük bir alanı kaplamakta olup genelde bir yönde ilerlemiştir. Tüm durumlar gibi bu mesafede de erozyon heterojen bir dağılım göstermiştir. Erozyona uğrayan bölgeler bilyenin oturduğu yüzeye kadar ilerlemiştir ve bu durum çalışmadan beklentiler göz önüne alındığında olumlu görünmektedir.

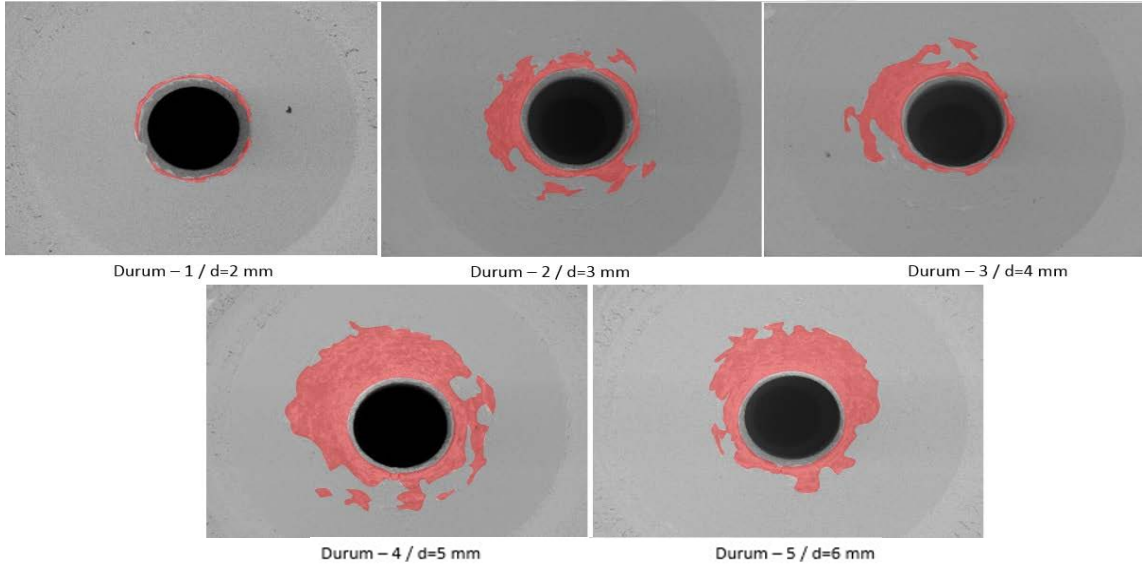


Şekil 4.17. Valf parçaları için Durum – 5 / $d = 6$ mm taramalı elektron mikroskobu sonuçları

Valf parçası ile üçüncü aşama çalışmasının son adımı olan 6 mm mesafe ile yapılan çalışma sonuçlarına göre, ilk 45 dakikada diğer durumlara göre kıyasla daha büyük bir bölgeyi de kapsasa erozyon gözlemlenmiştir (Şekil 4.17). Bu periyotta gözlemlenen erozyon yine en zayıf bölge olan delik etrafında oluşmuştur ve erozyon dağılımı bir yönde ilerlemiştir. 135 dakika sonunda oluşan erozyon bölgeleri ilk üç durumdan daha büyük bir alanı kapsamakta olup dördüncü duruma yakın miktardadır. Erozyon delik etrafında şekillenmiş olup diğer tüm durumlardaki gibi daha çok tek yönde ilerlediği gözlemlenmiştir. Bu yüzden homojen bir erozyon dağılımına rastlanmamıştır.



Şekil 4.18. Valf parçası deneylerinin tüm durumları için seçilen birer parçanın 45 dakika deney süresi sonucunda oluşan erozyon bölgeleri



Şekil 4.19. Valf parçası deneylerinin tüm durumları için seçilen birer parçanın 135 dakika deney süresi sonucunda oluşan erozyon bölgeleri

Tüm durumlar için 45 dakikalık test sonunda akustik kaviteasyonun etki ettiği bölgeler Şekil 4.18’de görülmektedir. Tüm durumlar göz önünde bulundurulduğunda kaviteasyon erozyonu bilyenin kapattığı delik etrafında başlamıştır. Bu durumun sebebi, kaplamanın

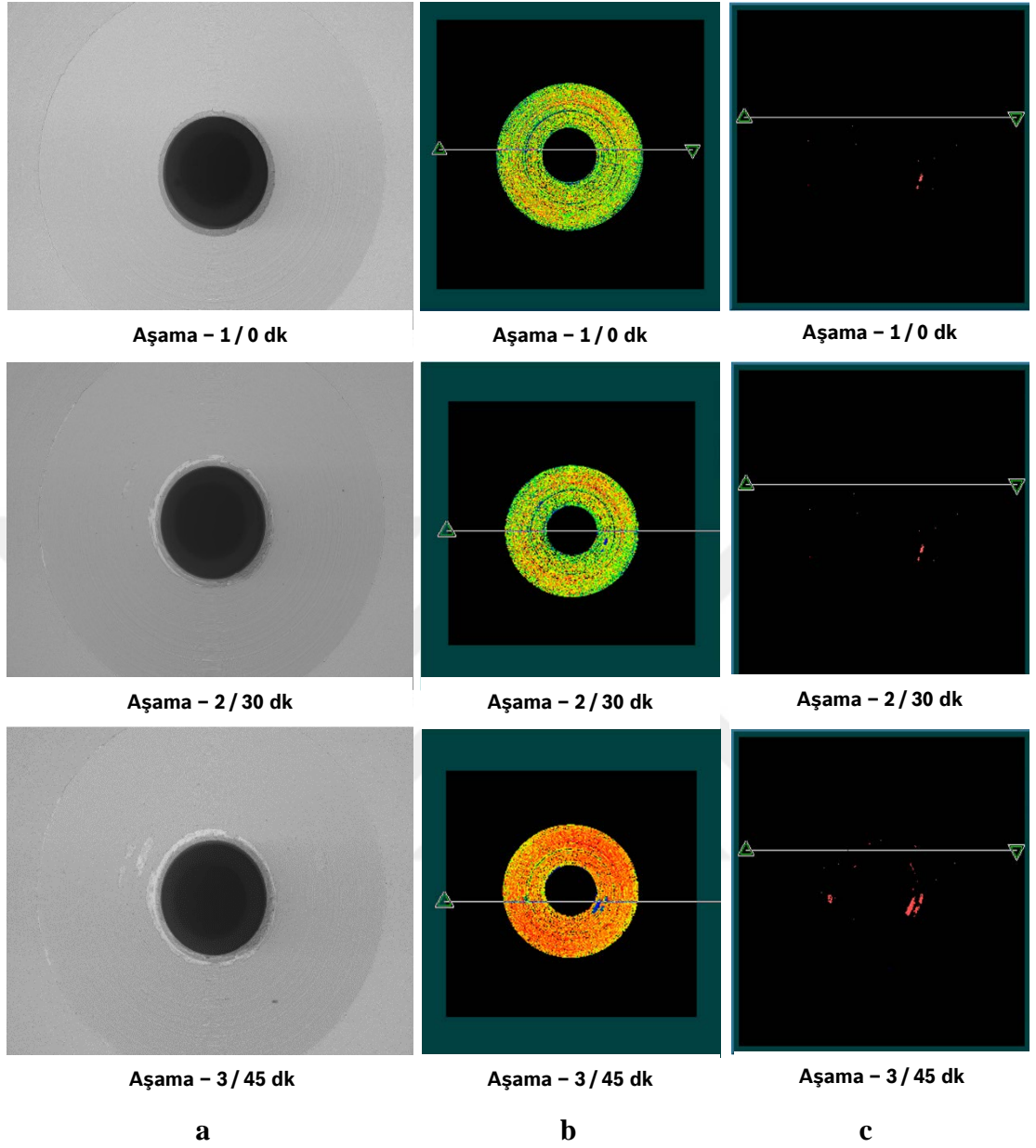
en zayıf olduğu yerin delik etrafında olmasıdır. Çalışma yapılan her bir uzaklık için 45 dakika sonuçları incelendiğinde en yüksek kavitasyon erozyonu Durum-5 / d=6 mm çalışmasında gözlemlenmiştir. Alüminyum parçalarla yapılan testlerde uzaklık arttıkça kavitasyon erozyonunun ortada toplandığını ve aşınmanın diğer çalışmalara kıyasla orta bölgelerde daha güçlü olduğu gözlemlenmişti. Valf parçası çalışmasında da bununla paralel sonuçlar çıkmıştır. Durum-5'te delik etrafında kavitasyon erozyonu daha fazla oluşmuştur.

Tüm durumlar için 135 dakika çalışma sonuçları Şekil 4.19'da görülmektedir. Her uzaklık için kavitasyon erozyon alanı incelendiğinde başlığın oturma yüzeyine mesafesi 5 mm'ye kadar arttığı gözlemlenmiştir. Ancak 5 mm'den sonra kavitasyon erozyon alanının nispeten azaldığı tespit edilmiştir.

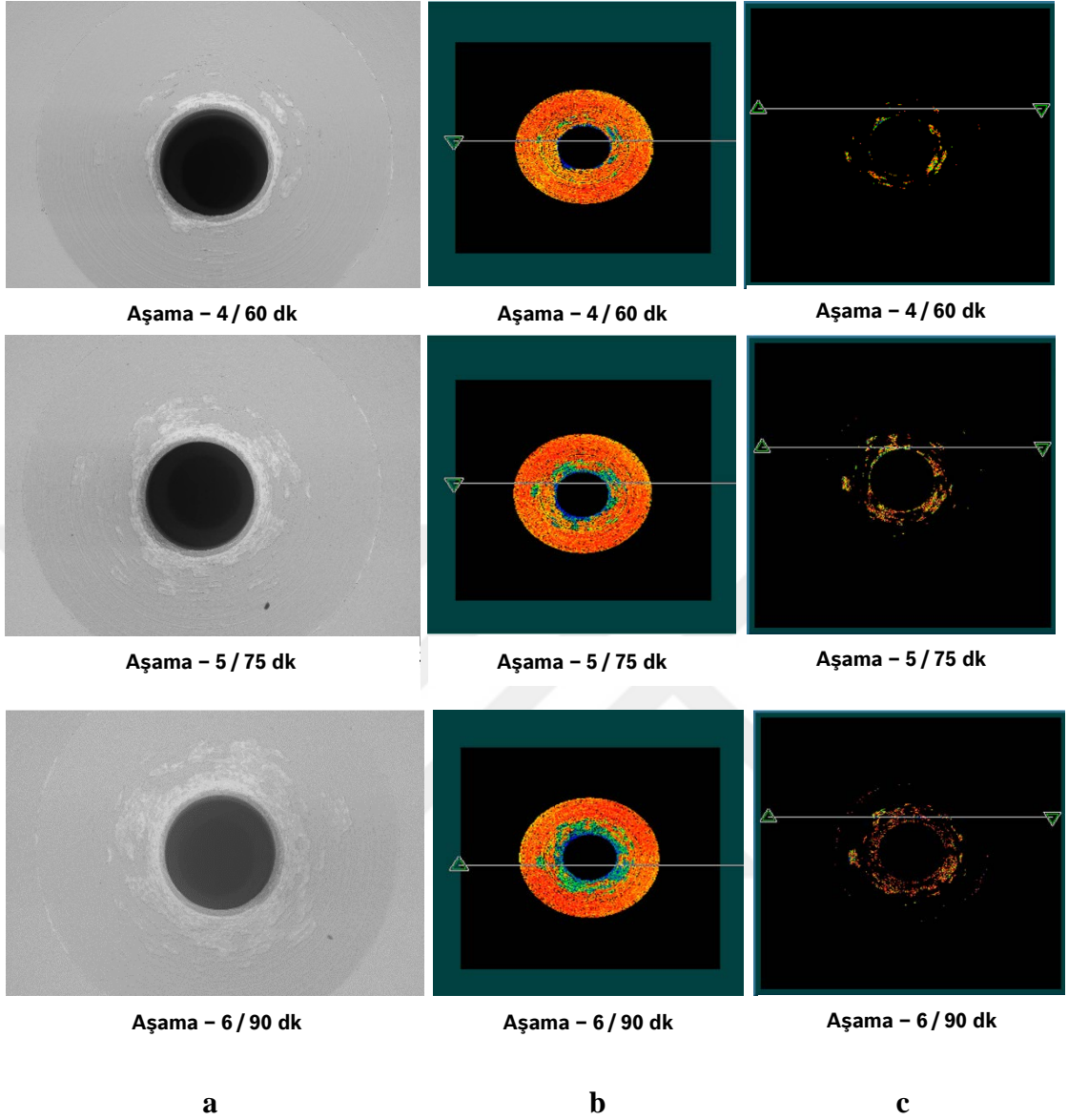
Valf parçalarıyla yapılan testler sonucunda maksimum kavitasyon erozyonunu sağlayan mesafeye Durum-4 / 5 mm'de rastlanmıştır ve sonraki çalışmalarda kullanılacak mesafe olarak belirlenmiştir.

4.4. Çalışma süresinin ve kaplama kalitesi değerlendirmesinin tayini

Önceki çalışmada valf parçası için optimum uzaklık belirlenmiştir ve 5 mm'dir. Bu çalışmada ise iyi ve kötü kaplama kalitesine sahip parçaların ayırt edilebilmesi için gereken optimum süre ve belirlenen optimum süre için aşınma yüzde sınırı belirlenecektir. Daha önce bahsedildiği gibi numunelerde kavitasyon erozyonu görebilmek için kuluçka süresi olarak tabir ettiğimiz aşınmanın yok denecek kadar az olduğu yorulma süreci vardır. Çalışma süresi kuluçka süresinin içinde olduğu durumlarda kavitasyon erozyonu ihmal edilebilecek kadar düşük olacaktır. Benzer şekilde çalışma süresinin çok yüksek olması durumunda ise tüm parçalarda yüksek kavitasyon erozyonları gözlemlenecek ve aşınma miktarı ayırt edilemeyecek kadar birbirine yakın olacaktır. Tüm bu sebeplerden dolayı çalışma süresinin optimize edilmesi kritik önemdedir.



Şekil 4.20. Valf parçası fonksiyonel bölgesi 0 dk, 30 dk ve 45 dk test sonrası : a) Taramalı mikroskop sonucu, b) WLI tarama fotoğrafları, c) Aşınma bölgelerinin WLI tarama fotoğrafı

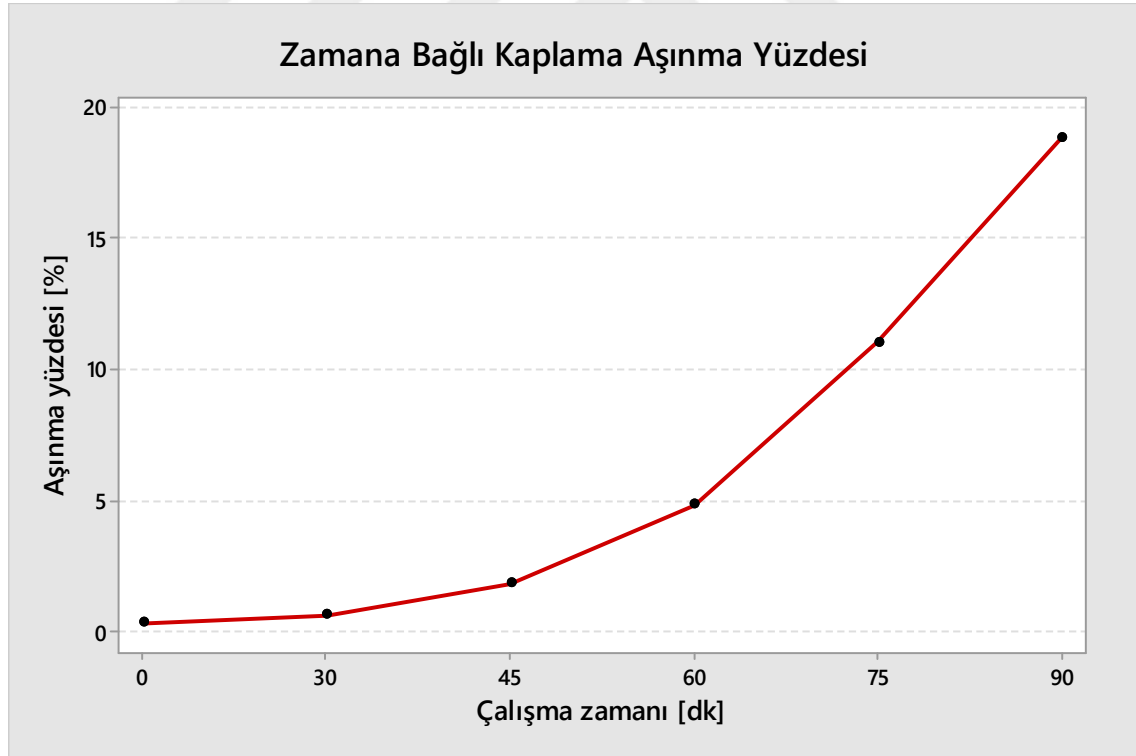


Şekil 4.21. Valf parçası fonksiyonel bölgesi 60 dk, 75 dk ve 90 dk test sonrası: a) Taramalı mikroskop sonucu, b) WLI tarama fotoğrafları, c) Aşınma bölgelerinin WLI tarama fotoğrafı

Optimum test süresinin belirlenmesi ve iyi – kötü kaplama kalitesi aşınma sınırının tayin edilmesi için tedarikçiden kötü kaplama kalitesine sahip valf parçaları istenmiştir. Kaplama prosesleri ile kasten değişiklik yapılarak 5 adet kötü kaplama kalitesine sahip valf parçası temin edilmiştir. Kötü kaplamaya sahip valf parçası sayısı, proses maliyetleri dikkate alınarak düşük sayıda tutulmuştur.

Valf parçaları ile yapılan bu testlerde 15 adet iyi ve 5 adet kötü kaplama kalitesine sahip toplamda 20 adet valf parçası kullanılmıştır. Her bir valf parçasının sonotrode cihazında çalışması öncesinde ve 30 dakika, 45 dakika, 60 dakika, 75 dakika ve 90 dakika sonunda sırasıyla SEM fotoğrafları alınmıştır ve ardından WLI ile yüzey taraması yapılmıştır. Şekil 4.20'de yapılan çalışmanın bir parça için örneği görünmektedir. Şekil 4.20 a'da valf parçası fonksiyonel yüzeyinde test süresine bağlı olarak artan aşınma rahatlıkla söylenebilmektedir. Şekil 4.20 b'de ise aynı valf parçası için WLI ile taranan yüzey ve Şekil 4.20 c'de de taranan yüzeye kaplama kalınlığı ölçüsünde filtre uygulanarak sadece aşınan yüzey gösterilmiştir.

Şekil 4.21'de ve Çizelge 4.5'de valf parçası fonksiyonel yüzeyindeki aşınma yüzdesinin test süresi ile değişimi gösterilmiştir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi kaplamanın aşınma yüzdesi belirli bir süre için oldukça düşüktür. Bu evreye kuluçka evresi adı verilir ve iyi – kötü kaplama kalitesinin ayrıştırılması bu bölgede oldukça zordur.

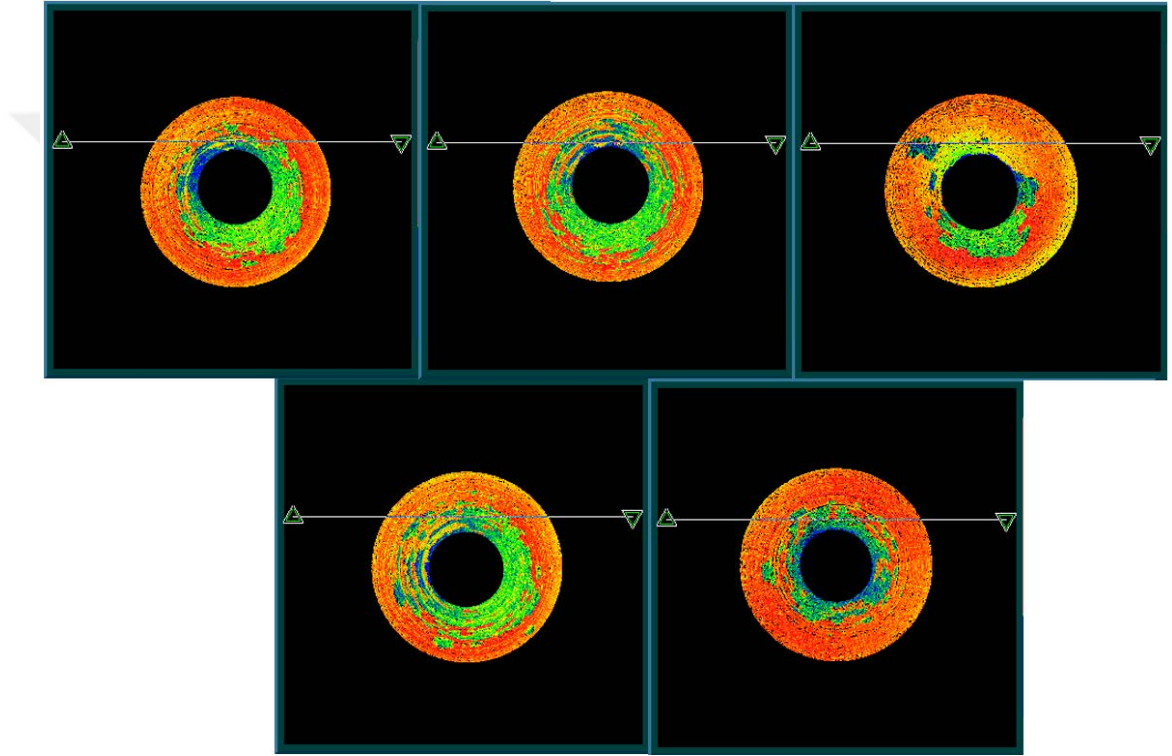


Şekil 4.22. Valf parçası fonksiyonel bölgesindeki aşınmanın zamana bağlı değişimi

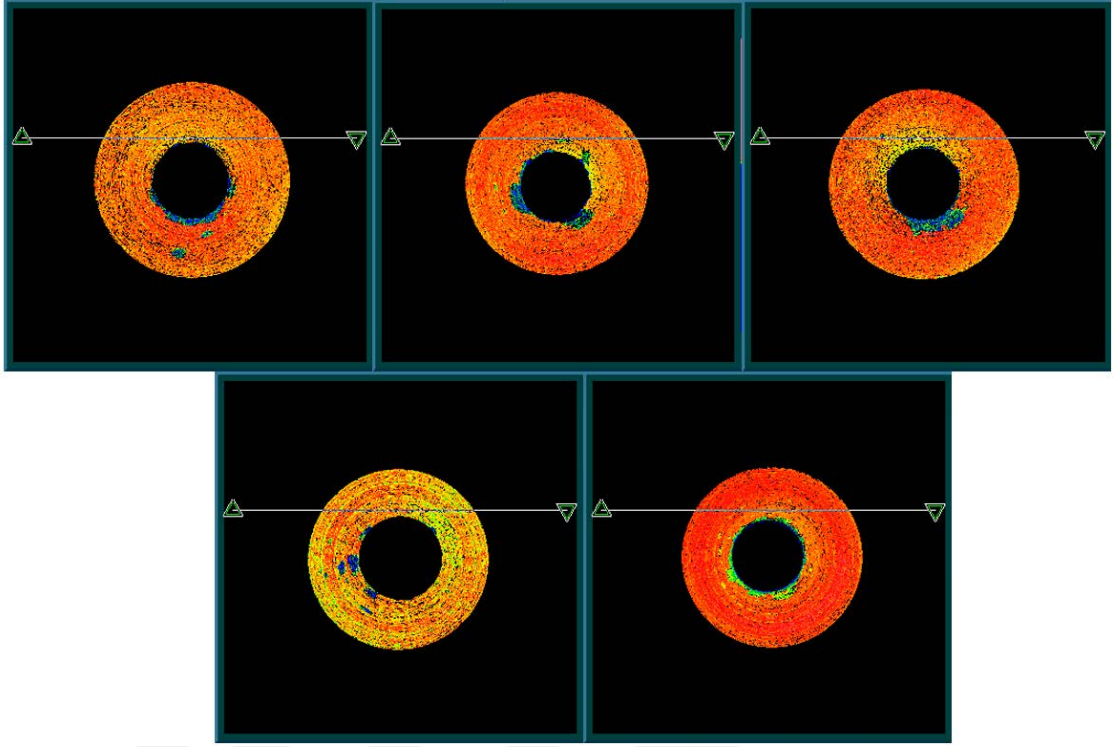
Çizelge 4.5. Valf parçası fonksiyonel bölgesindeki aşınma değerleri

Çalışma süresine bağlı kaplama aşınma yüzdesi

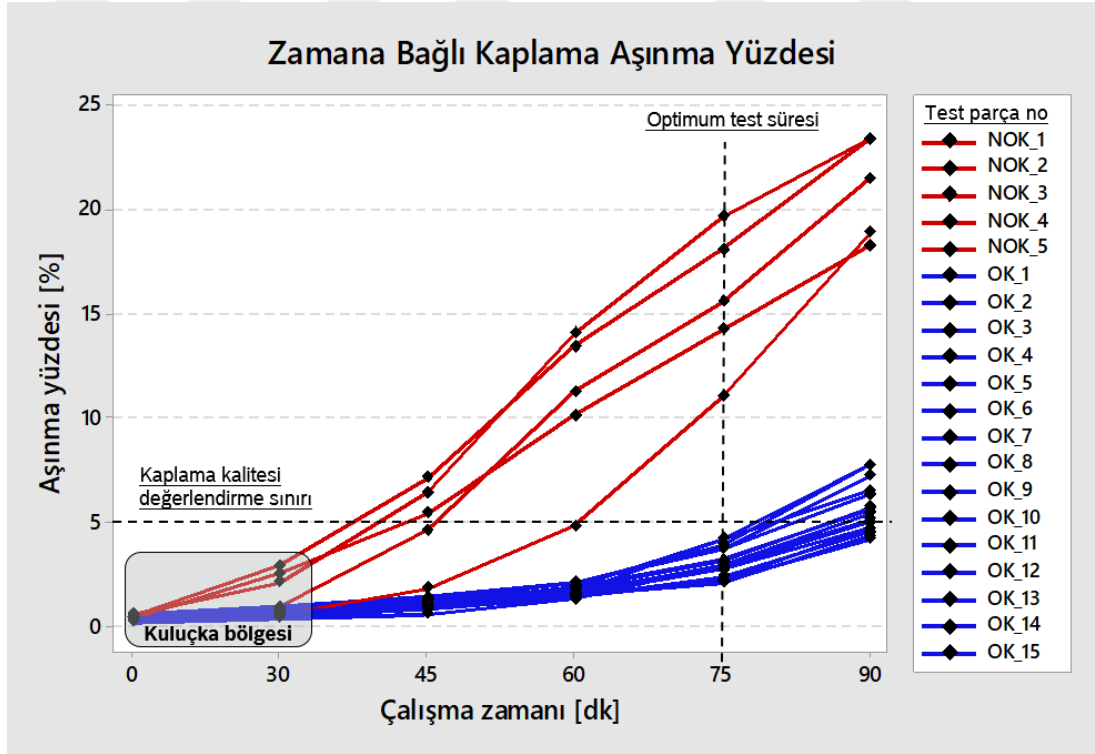
Çalışma süresi [dk]	0 dk	30 dk	45 dk	60 dk	75 dk	90 dk
Aşınma yüzdesi [%]	0,30	0,60	1,80	4,80	11,00	18,80



Şekil 4.23. 5 adet kötü kaplama kalitesine sahip valf parçasının fonksiyonel bölgeleri WLI tarama fotoğrafları



Şekil 4.24. 15 adet iyi kaplama kalitesine sahip valf parçasını temsilen seçilen 5 adet valf parçasının fonksiyonel bölgeleri WLI tarama fotoğrafları



Şekil 4.25. İyi ve kötü kaplama kalitesine sahip valf parçalarının zamana bağlı aşınma yüzdeleri

5 adet kötü ve 15 adet iyi kaplama kaliteli valf parçalarıyla yapılan çalışmada, Şekil 4.24'de görüleceği gibi ilk 30 dakikada aşınmanın birbirine yakın ve çok düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölge kuluçka bölgesi olarak tayin edilmiştir.

45 dakika sonucunda ise iyi – kötü kaplama kaliteli parçalar ayrılmaya başlamıştır. Ancak Şekil 4.24'de açıkça görüleceği gibi 1 adet kötü kaplama kaliteli parça iyi kaplama kaliteli parçalara çok yakındır. 60 dakika sonuçlarında ise iyi ve kötü kaplama kaliteli parçalar ayrılmıştır. Ancak 1 adet kötü parçanın aşınma yüzdesi iyi kaplama kaliteli parçalara yakın seyretmektedir ve kaplama kalitesi değerlendirme sınırının tayini için yeterli güvenli alan mevcut değildir. 75 dakika sonucunda tüm iyi ve kötü kaplama kaliteli valf parçaları ayrılmış ve aşınma yüzdeleri arasında gözle görülür bir fark ortaya çıkmıştır. 90 dakikalık test neticesinde iyi ve kötü kaplama kaliteli parçaların ayrışması kuvvetlenmiş ve kaplama aşınma yüzdeleri arasındaki fark da artmıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tartışma bölümünde sonotrode başlık mesafesinin kavitasyon erozyonuna etkisi etkisi, deneyler sonucunda elde edilen iyi – kötü kaplama kalitesini ayırımının yapılabileceği optimum test süresi ve kaplama kalitesi değerlendirme sınırına yorum getirilmiştir.

Alexei Moussatov ve ark. (2002) yaptığı çalışmada ortaya çıkan konik baloncuk bulutu yapısı Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bu tez çalışmasında kullanılan akustik kavitasyon cihazında da gözlemlenmiştir. Şekil 4.2’de gösterilen farklı mesafelerde alüminyum parçaların konik baloncuk bulutu içindeki konumlarına bakıldığında, başlık ile alüminyum numune arasındaki mesafe arttıkça baloncuk bulutunun numune üzerindeki etki alanının azalacağı öngörüsü kısmen gerçekleşmiştir.

Konik baloncuk bulutunun alüminyum numuneler üzerindeki etki alanı mesafe ile ters orantılı olsa da aşınma miktarına bakıldığında 2 mm’den 4 mm’ye kadar aşınma miktarı artmakta ve homojenleşmekte, 4 mm’den yüksek mesafeler içinse homojenlik değişmese de aşınma miktarı azalmaktadır.

Valf parçaları ile yapılan çalışmalarda, alüminyum numunelere uygulanan parametrelerin test süresi dışında aynı uygulanmıştır. Valf parçalarının fonksiyonel bölgesindeki kaplama malzemesinin çok daha sert olması, test süresinin arttırılmasına neden olmuştur. Ek olarak, direkt olarak alüminyum numunelerle yapılan çalışmaların sonucu olarak çıkan 4 mm optimum mesafenin valf parçalarına uygulanmama sebebi, valf parçasının geometrik olarak silindirik alüminyum parçalardan çok daha komplike bir parça olması ve geometri etkilerinin optimum mesafeyi değiştirebileceğinin öngörülmesidir.

Valf parçalarıyla yapılan testlerde parametre fark etmeksizin görülen ortak nokta aşınmanın her durum için valf parçasının ortasındaki delik etrafında başlamasıdır. Valf parçası ortasındaki deliğin etrafı kaplamanın en zayıf olduğu bölgedir. Dolayısıyla kaplama aşınmasının bu bölgeden başlamaktadır.

Şekil 4.19'da görülebileceği gibi valf parçalarındaki aşınma 2 mm'den 5 mm'ye kadar artmaktadır. Ancak 5 mm'den sonra azalma eğilimindedir. Aşınmalar valf parçasının ortasındaki delik çevresinde başlayıp fonksiyonel bölgeye ilerlemektedir.

Nihai test süresinin belirlenmesinde iyi ve kötü kaplama kaliteli valf parçalarının açık bir şekilde ayırt edilebilmesi için gerekli aşınma farkının sağlanması da önemlidir. Şekil 4.24'te görüleceği gibi test süresi arttıkça iyi ve kötü kaplama kaliteli valf parçalarının ayırt edilebilirliği artmıştır. 30 dakika test süresi sonunda tüm valf parçaları için aşınma yüzdeleri birbirine yakındır ve bu süre kuluçka süresi olarak tanımlanmıştır. 45 dakika ve 60 dakikalık testler sonunda iyi – kötü kaplama kalitesine sahip parçalar ayrılmıştır. Ancak 1 adet kötü kaplama kalitesine sahip parça ile iyi kaplama kalitesine sahip parçanın aşınma yüzdeleri arasındaki fark yeterli düzeyde değildir. 75 dakika ve 90 dakikalık test süresi sonucunda iyi ve kötü kaplama kalitesine sahip parçalar arasındaki ayrışma daha da artmış ve aşınma yüzdeleri arasındaki fark yeterli düzeye ulaşmıştır. Her iki test süresi de bu test metodu için uygundur. Ancak 75 dakikalık süre hem enerji sarfıyatı açısından hem de maliyet açısından daha uygun bulunmuştur.

Bu deneysel çalışma ile birlikte sonotrode başlık mesafesinin kavitasyon erozyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz. Hem silindirik alüminyum parçalar için hem de valf parçaları için belirli bir mesafeye kadar mesafe arttıkça aşınma miktarı artmaktadır. Alüminyum numuneler için bu mesafe 4 mm iken valf parçası için 5 mm'dir ve bu mesafeler aynı zamanda her biri için sonotrode başlığı ile numune arasındaki optimum mesafelerdir.

Valf parçaları için tayin edilen sonotrode başlığı ile fonksiyonel yüzey arasındaki optimum mesafe olan 5 mm için iyi ve kötü kaplama kalitesine sahip valf parçalarıyla yapılan testler sonucunda kalite farkının tespit edilebileceği optimum test süresi 75 dakika olarak belirlenmiştir.

Optimum test süresi göz önüne alındığında iyi ve kötü kaplama kalitesine sahip valf parçalarının tespitinde aşınma miktarı %5 'in altında olan valf parçaları iyi olarak değerlendirilecekken, %10 'un üzerinde aşınma miktarına sahip valf parçaları kötü olarak değerlendirilecektir. %5 - %10 arasında aşınma miktarına sahip valf parçaları ise operatör

tarafından tekrar değerlendirilecektir. Böylece valf parçası kaplama kalitesi değerlendirmesinde insan kaynaklı hatalar büyük oranda düşürülmüş ve iř gücünden kazanç sağlanmış olacaktır.



KAYNAKLAR

- Anonim, 2010.** Standart test method for cavitation erosion using vibratory apparatus, 2010. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Anonim, 2011.** Scanning electron microscopy. Non science instruments, <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy>-(Erişim tarihi: 12.02.2019).
- Bohn, D.A. 1988.** Environmental effect on the speed of sound. *Audio Engineering Society*, 36(4):223-231
- Bordeasu, I., Popoviciu, M.O., Balasoiu, V. 2005.** Contributions of Correlations of the Cavitation Erosion Parameter 1/MDPR with the Functional Parameters of Laboratory Station. *FME Transactions*, 33(1):21-24
- Cojocaru, V., Campian, V.C., Frunzaverde, D. 2015.** A comparative analysis of the methods used for testing the cavitation erosion resistance on the vibratory devices. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 77(4):257-262
- Crua, C., Heikal, M.R. 2014.** Time-resolved fuel injector flow characterisation based on 3D laser Doppler vibrometry. *Measurement Science and Technoogy*, 25(12):125301 1-9
- Fatjo, G., Perez, A.T., Hadfield, M. 2010.** Experimental study and analytical model of the cavitation ring region with small diameter ultrasonic horn, *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(1):73–79
- Franc, J.P., Michel, J.M. 2003.** Fundamentals of cavitations. Joseph Fourier University of Grenoble, France, 291 s.
- Goh, B.H.T., Ohl, S.W., Klaseboer, E., Khoo, B.C. 2014.** Jet orientation of a collapsing bubble near a solid wall with an attached air bubble. *Physics of Fluids*, 26(4):221–240
- Hattori, S., Maeda, K. 2010.** Logistic curve model of cavitation erosion progress in metallic materials, *Wear*, 268(7-8):855–862
- Homa, D. 2017.** Cavitation phenomenon research for different flow conditions. *World Scientific News*, 73(1):2-11
- Kayakol, N. 2015.** CFD modeling of cavitation in solenoid valves for diesel fuel injection. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 89(8):413:424
- Kjølle, A. 2001.** Hydropower in Norway. Norwegian University of Science and Technology, Norway, 185 s.
- Krella, A., Czyżniewskib, A. 2005.** Cavitation erosion resistance of Cr–N coating deposited on stainless steel. *Wear*, 260(11-12):1324-1332
- Lautern, W., Bolle, H. 1975.** Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighbourhood of a solid boundary. *Journal of Fluid Dynamics*, 72(2):931-399
- Luo, J., Xu, W.L., Li, R. 2016.** High-speed photographic observation of collapse of two cavitation bubbles. *Science China Technological Sciences*, 59(11):1707–1716
- Lupinca, C.I., Nedeloni, M. 2014.** Comparative study regarding the cavitation erosion behaviour of Cu and Al alloys. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 3(2):95-99
- Mottyl, S., Skoda, R. 2014.** Numerical 3D flow simulation of attached cavitation structures at ultrasonic horn tips and statistical evaluation of flow aggressiveness via load collectives. 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015), 6 – 10 Aralık 2015, EPFL Lausanne, Switzerland.
- Moussatov, A., Granger, C., Dubus, B. 2003.** Cone-like bubble formation in ultrasonic cavitation field. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10(4-5):191-195

- Piancastelli, L., Frizziero, L., Donnici, G. 2014.** The common-rail fuel injection technique in turbocharged di-diesel-engines for aircraft applications. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(12):2493-2499
- Robert Bosch GmbH. 2002.** BOSCH Diesel Motor Management. Ed: Robert BOSCH GmbH 3.Auflage, pp:56-57
- Santa, J.F., Blanco, J.A., Giraldo, J.E., Toro, A. 2011.** Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings, *Wear*, 271(9-10):1445-1453
- Suslick, K.S. 1990.** Sonochemistry. *Science*, 247(4949):1439-1445
- Usta, O., Aktas, B. 2017.** An experimental study to detect cavitation erosion for different coated surfaces. 5th International Conference on Advance Model Measurements Technologies for The Maritime Industry (AMT'17), 11-13 Ekim 2017, Glasgow, UK
- Xu, R., Zhao, R., Cui, Y., Lu, J., Ni, X. 2009.** The collapse and rebound of gas-vapor cavity on metal surface. *Optik*, 120(3):115–120.
- Yuning, Z., Zhongdong, Q., Dazhuan, W., Guoyu, W., Yulin, W., Shengcai, L., Zurita, O., Godínez, F., Navarrete, M. 2018.** Ultrasonic cavitation structures in a conical vessel. 10th International Cavitation Symposium (CAV2018), 14-16 Mayıs 2018, Baltimore, Maryland, USA.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Harun DURSUN
Doğum Yeri ve Tarihi : Sarıkaya / 28.04.1989
Yabancı Dil : İngilizce, Almanca

Eğitim Durumu
Lise : Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi, 2007
Lisans : Uludağ Üniversitesi, MMF Otomotiv Mühendisliği
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Robert Bosch GmbH – 01.10.2015 tarihinden itibaren.

İletişim (e-posta) : harun.dursun@tr.bosch.com
Yayımları : **Dursun, H., Sevilgen, G., Karamangil, M.İ. 2019.** The experimental investigation of the cavitation erosion of a float aluminum part by using sonotrode test device. *Materiali in Tehnologije / Materials and Technology*, 53(5): tbd (will be published in Sept. 2019)