

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MANGAN ALÜMİNYUM BRONZUNDAN İMAL GEMİ
PERVANE MALZEMESİNİN KAVİTASYON EROZYONU
DAYANIMININ BİLYALI DÖVME YÖNTEMİYLE
İYİLEŞTİRME ÇALIŞMASI

SEDAT CAN TİNİ

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MANGAN ALÜMİNYUM BRONZUNDAN İMAL GEMİ
PERVANE MALZEMESİNİN KAVİTASYON EROZYONU
DAYANIMININ BİLYALI DÖVME YÖNTEMİYLE
İYİLEŞTİRME ÇALIŞMASI

SEDAT CAN TİNİ

Prof. Dr. Adalet ZEREN	
Danışman,	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK	
Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI	
Jüri Üyesi,	Düzce Üniversitesi
Doç. Dr. Egemen AVCU	
Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Eray ABAKAY	
Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.11.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

Beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2022-2964 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Sedat Can TİNİ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Sedat Can TİNİ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu doktora tez çalışması, çalışma şartlarında kavitasyonun zararlı etkileri altında çalışan gemi pervane malzemesi Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımının bilyalı dövme yöntemiyle kavitasyon erozyonu aşınma direncini geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalarım süresince yol gösteren ve teşvik eden saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Adalet ZEREN'e; tez izleme komitesinde yer alarak yürüttüğümüz akademik çalışmalarda değerli bilgi ve fikirleriyle desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK ve Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu süreçte karşılaştığımız her türlü zorlukta bilgi ve tecrübeleriyle bizlere destek olan Doç. Dr. Egemen AVCU ve ekip arkadaşları Dr. Öğr. Üyesi Eray ABAKAY, Dr. Öğr. Üyesi Yasemin YILDIRAN AVCU, Dr. Öğr. Üyesi Funda GÜL KOÇ ile Arş. Gör. Emirhan ÇALIM'a; uygulama, imalat ve test aşamalarında tersane imkân ve olanaklarını sağlayan MSB İstanbul Tersanesi Komutanı Tümamiral R. Erdinç YETKİN'e; değerli müdürlerim Yük. Kim.Müh. Serap SUNDU ve Yük. Müh. Binbaşı Burak BİGE'ye ve kıymetli ustalarım Bayram DURU, Deniz KAYA, Ayhan KOCABAŞ, Aziz CANKURT, Yalçın IŞIK ve İlhan UZUN'a en içten şükran, sevgi ve saygılarımı sunarım. Çalışmamıza maddi katkılarından dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne de ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak, sabrıyla ve desteğiyle her zaman yanımda olduğunu hissettiren sevgili eşim Betül YÜCEL TİNİ'ye, motivasyon kaynağım canım oğlum Deniz Cemil TİNİ'ye ve beni yetiştiren değerli aileme sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Kasım – 2024

Sedat Can TİNİ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAVİTASYON VE YÜZEY İŞLEMLERİ OLGUSU	5
2.1. Kaviteasyonun Zararlı Etkileri	5
2.1.1. Kaviteasyon Erozyonu	6
2.2. Malzemelerin Kaviteasyon Erozyonu Özelliklerinin İncelenmesi	7
2.2.1. Kaviteasyon Erozyonu Testleri ASTM G134-95.....	9
2.3. Metalik Malzemelerin Yüzey Mekanik Tasarımı.....	13
2.3.1. Bilyalı Dövme İşlemi	14
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	18
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
4.1. Malzeme	30
4.1.1. Test çalışmaları ve Metalografik İncelemeler için Hazırlanan Numuneler	32
4.2. Yöntemler	34
4.2.1. Yüksek Basıncılı Kaviteasyon Su Jeti Erozyon Yöntemi	35
4.2.2. Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi	40
4.2.3. Bilyalı Dövme Yöntemi	41
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	43
5.1. Kütle Kaybı ve Erozyon Hızı Değişimi Bulguları.....	43
5.2. Taguchi Analizi Bulguları	54
5.2.1. Minitab Programı ile Kütle Kaybı Analizi	64
5.3. Kaviteasyon Hücum Açısı Etkisi Bulguları	69
5.4. Bilyalı Dövme İşlemi Bulguları.....	73
5.4.1. Mikroyapı İncelemesi Bulguları.....	75
5.4.1.1. Orijinal Numune Mikroyapı Özellikleri.....	75
5.4.1.2. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulanmış Numune Mikroyapı Özellikleri	78
5.4.2. Vickers Sertlik İncelemesi Bulguları	81
5.4.2.1. Orijinal Numune Vickers Sertlik Ölçümleri	82
5.4.2.2. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulanmış Numune Vickers Sertlik Ölçümleri ve Sertlik Haritası	86
5.4.3. Bilyalı Dövme İşlemi Sonrası Kaviteasyon Erozyonu Aşınma Etkisi	92
5.5. İleri Karakterizasyon İncelemesi Bulguları	97
5.5.1. Yüzey Topografyası İncelemeleri	97
5.5.2. Yüzey Morfolojisi İncelemeleri	111

5.5.2.1. Orijinal Numune Kaviteasyon Erozyonu SEM İncelemeleri.....	111
5.5.2.2. Bilyalı Dövmeye İşlemi Uygulanmış Numunelerin SEM İncelemeleri.....	118
5.5.2.3. Bilyalı Dövmeye Sonrası Kaviteasyon Erozyonu SEM İncelemeleri.....	119
5.5.3.EDS Analizi.....	123
5.5.3.1. Haritalama (Map) Analizi	124
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
6.1. Kaviteasyon Erozyonu Sonuçları	128
6.2. Bilyalı Dövmeye Sonuçları	130
6.3. Karakterizasyon Analizleri Sonuçları.....	132
6.3.1.Kaviteasyon Erozyonu Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü ve Topografyası Sonuçları.....	133
6.3.2.Kaviteasyon Erozyonu Sonrası Yüzey Morfolojisi Sonuçları	134
6.3.3.Bilyalı Dövmeye Sonrası Yüzey Morfolojisi Sonuçları	135
6.3.4.Bilyalı Dövmeye İşlemi Uygulanmış Numunelerin Kaviteasyon Erozyonu Sonrası Yüzey Morfolojisi Sonuçları.....	135
6.4. Gelecek Çalışmalar için Öneriler.....	136
KAYNAKLAR.....	138
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	150
ÖZGEÇMİŞ.....	151

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Saf suyun basınç-sıcaklık diyagramı	5
Şekil 2.2.	Kavitasyon oluşumu.....	6
Şekil 2.3.	Gemi pervane kanat yüzeyi hasar morfolojisi (a) portakal kabuğu soyulması; (b) hafif erozyona ilerleme ve (c) bir miktar tam nüfuzla birlikte şiddetli erozyon.	7
Şekil 2.4.	Kavitasyon su jeti şematik diyagramı	12
Şekil 2.5.	Yerel plastik deformasyon üretmek için tipik dövme yöntemlerinin şematik gösterimi (a) bilyalı dövme (b) kavitasyon ile dövme (c) lazer ile dövme	13
Şekil 2.6.	Yüzey mekaniği tasarımı kavramı	14
Şekil 2.7.	Kalıntı gerilme oluşumunun şematik gösterimi a) dövme işlemi sonrası görülen değişimler b) plastik şekil değişimi, c) Herzt basıncı sonrası değişim	16
Şekil 2.8.	a) Bilyalı dövme yöntemi ve b) plastik deformasyon şematik gösterimi	16
Şekil 3.1.	Enerji spektrumu ve kavitasyon erozyonu ile ilişkisi	18
Şekil 3.2.	Momma tez çalışması su jeti kavitasyon erozyonu test düzeneği.....	20
Şekil 3.3.	SEM görselleri (a) eğim açısı 0°, (b) 60° ve (c) 90°, (d) farklı eğim açılarındaki çukur sayısı ve boyutu.....	21
Şekil 3.4.	(a) Testlerden önce paslanmaz çelik, (b) 80 dakika sonra titreşimli test cihazı ile aşınma görseli.....	22
Şekil 3.5.	Farklı eğim açılarıyla numunelere çarpan kavitasyon jetinin optik kamera görüntüleri.....	23
Şekil 3.6.	(a) Kavitasyon test odası (b) numune ve nozul arası mesafe (c) eğimli numune şematik gösterimleri.....	24
Şekil 3.7.	Nozul çapının erozyon oranına olan etkisinin optik ve SEM mikroskobu görüntüleri.....	24
Şekil 3.8.	Kavitasyon deneyleri sonrasında bilyalı dövülmüş alaşımlar için 3B analiz ve kesit morfoloji görselleri.....	26
Şekil 3.9.	Kavitasyon erozyonu sonrası döküm MAB'ın farklı solüsyon ve sürelerde yüzey morfolojileri.....	27
Şekil 3.10.	Kavitasyon deneyleri sonrası yüzey morfolojileri ve kütle kaybı; (a) dövülmemiş ve (b) 3,5 dk bilyalı dövülmüş.....	28
Şekil 3.11.	Kavitasyon erozyon testleri sonrası SEM kesitleri; (a) bilyalı dövmesiz (b) 5 saniye boyunca 1 bar (c) 10 saniye boyunca 2 bar ve (d) 10 saniye boyunca 3 bar bilyalı dövme işlemleri.....	29
Şekil 4.1.	MAB-CU4 alaşımı döküm aşaması basamakları (a) döküm aşaması (b) beş kanatlı gemi pervanesi.....	31
Şekil 4.2.	(a) Otomatik zımparalama ve (b) parlatma işlemi (c) kesit incelemesi için kesme işlemi	33
Şekil 4.3.	Tasarım, imalat, montaj ve test aşamaları.....	36
Şekil 4.4.	Test düzeneği CAD tasarımları.....	37
Şekil 4.5.	Testlerin gerçekleştiği cihazın şematik diyagramı.....	38
Şekil 4.6.	Kavitasyon su jeti erozyonu test düzeneği imalat ve montaj aşaması sonrası görselleri	39
Şekil 4.7.	Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi	42

Şekil 4.8.	Bilyalı dövme test cihazının 3 boyutlu gösterimi (a) bilyalı dövme tezgâhı (b) dövme işlemi test esnası	42
Şekil 5.1.	Erozyon testleri sonrası Numune 1 görselleri	46
Şekil 5.2.	Erozyon testleri sonrası Numune 8 görselleri	47
Şekil 5.3.	Erozyon testleri sonrası Numune 1 kümülatif (a) kütle kaybı grafiği (b) hacim kaybı grafiği	48
Şekil 5.4.	Erozyon testleri sonrası Numune 8 kümülatif (a) kütle kaybı grafiği (b) hacim kaybı grafiği	48
Şekil 5.5.	Erozyon testleri sonrası Numune 1 kümülatif (a) kütleli erozyon oranı (mg/sa) (b) hacimsel erozyon oranı (mm ³ /sa) grafiği	49
Şekil 5.6.	Erozyon testleri sonrası Numune 8 kümülatif (a) kütleli erozyon oranı (mg/sa) grafiği (b) hacimsel erozyon oranı (mm ³ /sa) grafiği	49
Şekil 5.7.	Erozyon testleri sonrası Numune 1 yüzey pürüzlülüğü değişimleri (a) R _a (µm) (b) R _q (µm) (c) R _z (µm) (d) R _{3z} grafikleri	50
Şekil 5.8.	Erozyon testleri sonrası Numune 8 yüzey pürüzlülüğü değişimleri (a) R _a (µm) (b) R _q (µm) (c) R _z (µm) (d) R _{3z} grafikleri	50
Şekil 5.9.	Erozyon testleri sonrası Numune 1 mikroskop görüntüleri a) Nikon SMZ 745T Stereo b) Nikon MA100N tip endüstriyel mikroskop cihazı	51
Şekil 5.10.	Erozyon testleri sonrası Numune 8 mikroskop görüntüleri a) Nikon SMZ 745T Stereo b) Nikon MA100N tip endüstriyel mikroskop cihazı	51
Şekil 5.11.	Farklı kavite sayısındaki erozyon görüntüleri	53
Şekil 5.12.	Kavite baloncuklarının saçılma görüntüleri (a) Numune 8 σ=0,005 (b) Numune 1 σ=0,006	53
Şekil 5.13.	Kavite erozyonu parametrelerinin kütle kaybı üzerindeki etkisi	57
Şekil 5.14.	Taguchi deneyleri sonrası kavite erozyonu görselleri	58
Şekil 5.15.	1 ve 2 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri	59
Şekil 5.16.	3 ve 4 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri	60
Şekil 5.17.	5 ve 6 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri	61
Şekil 5.18.	7 ve 8 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri	62
Şekil 5.19.	9 nolu Taguchi deneyi mikroskop görüntüsü	63
Şekil 5.20.	Ortalama S/N oranı grafikleri	66
Şekil 5.21.	Taguchi kütle kaybı analizi tahmini değer ile gerçek değerler arasındaki fark	69
Şekil 5.22.	Farklı kavite hücum açıları meydana gelen oluşan kavite erozyonu görselleri	70
Şekil 5.23.	Farklı kavite hücum açıları test esnası görüntüleri	70
Şekil 5.24.	Farklı kavite hücum açıları 1 nolu erozyon testi mikroskop görüntüleri	71
Şekil 5.25.	Farklı kavite hücum açıları 2 ve 3 nolu erozyon testleri mikroskop görüntüleri	72
Şekil 5.26.	Farklı kavite hücum açısı değişimi a) kütle ve b) hacim kaybı grafikleri	73

Şekil 5.27.	Dövme işlemleri için kullanılan paslanmaz çelik bilyaların SEM görüntüleri dövme işlemi (a) öncesi (b) sonrası	74
Şekil 5.28.	Bilyalı dövme işlemi sonrası numune görselleri (a) öncesi (b) sonrası	74
Şekil 5.29.	Döküm MAB-CU4 alaşımının optik mikroskop ile yüzey mikroyapısı	76
Şekil 5.30.	Döküm MAB-CU4 alaşımının optik mikroskop ile kesit mikroyapısı	76
Şekil 5.31.	Döküm MAB-CU4 alaşımının XRD spektrumları	78
Şekil 5.32.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune yüzey optik mikroskop görüntüsü	78
Şekil 5.33.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune kesit optik mikroskop görüntüsü.....	79
Şekil 5.34.	Bilyalı dövülmemiş ve dövülmüş numunelerin XRD spektrumları	80
Şekil 5.35.	MAB alaşımı kesit mikroyapı bilyalı dövme (a) öncesi (b) sonrası	81
Şekil 5.36.	Kullanılan (a) Vickers sertlik cihazı (b) optik mikroskop cihazı.....	82
Şekil 5.37.	(a) HV/0,2/10 yüzey mikroyapısı (b) HV/0,5/10 yüzey mikroyapısı	83
Şekil 5.38.	Orijinal numune HV/0,2/10 kesit mikroyapısı.....	83
Şekil 5.39.	MAB-CU4 alaşımı numunesi sertliğinin derinliğe bağlı değişimi	85
Şekil 5.40.	Bilyalı dövme işlemi uygulanan MAB-CU4 alaşımı sertliğinin derinliğe bağlı değişimi.....	89
Şekil 5.41.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımı sertliğinin derinliğe bağlı değişimini gösteren iki boyutlu sertlik haritası.....	89
Şekil 5.42.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımının HV/0,2/10 kesit mikroyapısı	90
Şekil 5.43.	Bilyalı dövülmüş numunelerin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası görselleri ($P_1=150$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,006$, (a) 30° (b) 90° kavitasyon hücum açısı)	93
Şekil 5.44.	Bilyalı dövülmüş numunelerin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası görselleri ($P_1=200$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,005$, (a) 30° (b) 90° kavitasyon hücum açısı)	94
Şekil 5.45.	Huvitz HDS-5800 3B optik profilometre cihazı	99
Şekil 5.46.	Yüzey topografyası makro ve mikro aşınma izlerinin şematik gösterimi	100
Şekil 5.47.	Kavitasyon su jeti erozyonu uygulamaları (a) hidrodinamik basınçlarının gösterimi (b) kavitasyon hücum açılarında aşınan numunelerin gösterimi	102
Şekil 5.48.	90° hücum açısındaki makro incelemeler (a) aşınma izi topografik yüzey haritası (b) aşınma bölgesinin merkezinde $8 \times 8 \text{ mm}^2$ ’lik bir bölgede alınmış 2 boyutlu topografik yüzey haritası (c) aşınma izi topografik yüzey haritasının çizgisel pürüzlülük profili (d) aşınma bölgesinin merkezinde $8 \times 8 \text{ mm}^2$ ’lik bir bölgede 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü.....	103

Şekil 5.49.	30° hücum açısındaki makro incelemeler (a) aşınma izinin topografik yüzey haritası (b) aşınma bölgesinin merkezinde 8x8 mm ² 'lik bir bölgede alınmış 2 boyutlu topografik yüzey haritası (c) aşınma izi topografik yüzey haritasının çizgisel pürüzlülük profili (d) aşınma bölgesinin merkezinde 8x8 mm ² 'lik bir bölgede 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü.....	104
Şekil 5.50.	Aşınma izlerinin 90° hücum açısındaki aşınma bölgesine yakın mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri.....	105
Şekil 5.51.	Aşınma izlerinin 90° kavitasyon hücum açısındaki aşınma bölgesi merkezine yakın bölgelerdeki mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri	106
Şekil 5.52.	Aşınma izlerinin 30° kavitasyon hücum açısındaki aşınma bölgesine yakın bölgelerdeki mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri.....	107
Şekil 5.53.	Aşınma izlerinin 30° kavitasyon hücum açısındaki aşınma bölgesi merkezine yakın bölgelerdeki mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri	108
Şekil 5.54.	Yüzey morfolojisi makro ve mikro aşınma izlerinin şematik gösterimi	112
Şekil 5.55.	90° kavitasyon hücum açısında aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi (a) aşınma merkezine yakın 500x büyütülmüş makro görüntü (b) tane sınırındaki çatlaklar ve tane sınırı yakınındaki kavitasyon çukurları (c) tanelerin içinde ve tane sınırlarında oyuk oluşumu (d) tane sınırının içinde oyuk oluşumu.....	114
Şekil 5.56.	90° kavitasyon hücum açısında hasar gören SEM görüntüleri (a) aşınma bölgesinin 1000x büyütülmüş makro görüntüsü (b) tane içlerindeki ve (c) tane sınırlarındaki çukurlar.....	116
Şekil 5.57.	30° kavitasyon hücum açısında aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi (a) 30x büyütülmüş makro görüntüsü (b) aşınma bölgesi (c) tane içlerindeki kavitasyon çukurları (d) tane sınırı hasarı (e) tane içlerinde oyuk oluşumu	117
Şekil 5.58.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune yüzeyinin SEM görüntüleri a) 250x b) 1000x c) 2000x d) 5000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları.....	119
Şekil 5.59.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a)100x b)500x c)1000x d)2000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (30° hücum açısı ve $\sigma=0,006$ kavitasyon sayısı)	120
Şekil 5.60.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a) 100x b) 250x c) 500x d) 2000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (90° hücum açısı ve $\sigma=0,006$ kavitasyon sayısı)	120

Şekil 5.61.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a) 100x b) 2000x c) 500x d) 2000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (30° hücum açısı ve $\sigma=0,005$ kavitasyon sayısı)	121
Şekil 5.62.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a) 100x b) 500x c) 500x d) 1000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (90° hücum açısı ve $\sigma=0,005$ kavitasyon sayısı)	121
Şekil 5.63.	EDS Harita analizi (a) 30° kavitasyon hücum açısındaki bölgenin SEM görüntüleri (b) Al (c) Mn (d) Fe (e) Ni (f) Cu element haritası	125
Şekil 5.64.	30° kavitasyon hücum açısında alınan EDS analiz bölgeleri.....	126



TABLolar DİZİNİ

Tablo 4.1.	Alman Loydu bakır alaşımları kimyasal bileşimi (% kütlece)	30
Tablo 4.2.	Pervaneler için alaşımlı bakır dökümlerin mekanik özellikleri	30
Tablo 4.3.	Döküm MAB alaşımı elementel analizi (% kütlece)	31
Tablo 4.4.	Otomatik zımparalama ve parlatma parametreleri	33
Tablo 4.5.	Tam faktöriyel deney tasarımı tablosu	40
Tablo 4.6.	Taguchi analizi parametre ve seviyeleri	41
Tablo 4.7.	Taguchi L9 ortogonal dizime göre yapılacak deney sayısı	41
Tablo 4.8.	Dövme için kullanılan paslanmaz çelik bilya özellikleri	42
Tablo 5.1.	Erozyon testleri öncesi özellikleri (Numune 1)	43
Tablo 5.2.	Erozyon testleri öncesi özellikleri (Numune 8)	43
Tablo 5.3.	Kavitasyon erozyonu test parametreleri (Numune 1)	44
Tablo 5.4.	Kavitasyon erozyonu test parametreleri (Numune 8)	44
Tablo 5.5.	Kavitasyon su jeti erozyonu Numune 1 test sonuçları	45
Tablo 5.6.	Kavitasyon su jeti erozyonu Numune 8 test sonuçları	45
Tablo 5.7.	Taguchi deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği koşullar	54
Tablo 5.8.	Taguchi deneyleri sonrası kütle ve hacim kaybı ile erozyon oranı değişim değerleri	55
Tablo 5.9.	Taguchi deneyleri sonrası yüzey pürüzlülük değerleri değişimi	55
Tablo 5.10.	Sinyal/Gürültü (S/N) oranları ve ortalamaları	64
Tablo 5.11.	S/N oranı değerleri sonucu oluşan cevap tablosu	65
Tablo 5.12.	Varyans (ANOVA) analizi	67
Tablo 5.13.	Varyans (ANOVA) model özeti	68
Tablo 5.14.	Taguchi kütle kaybı analizi tahmini kütle kaybı ve deneysel kütle kaybı değerleri	68
Tablo 5.15.	Numunelerin test öncesi özellikleri	69
Tablo 5.16.	Farklı kavitasyon hücum açısı kavitasyon erozyon testi sonuçları	71
Tablo 5.17.	Bilyalı dövme işlemi test çalışmaları ön parametrik değerleri	75
Tablo 5.18.	HV/0,2/10 Vickers yüzey sertlik ölçümleri	84
Tablo 5.19.	HV/0,5/10 Vickers yüzey sertlik ölçümleri	84
Tablo 5.20.	HV/0,2/10 Vickers kesit sertlik ölçümleri	84
Tablo 5.21.	HV/0,2/10 ortalama Vickers kesit sertlik ölçümleri	85
Tablo 5.22.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune HV/0,2/10 Vickers kesit sertlik ölçümleri	87
Tablo 5.23.	Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune HV/0,2/10 ortalama Vickers kesit sertlik ölçümleri	90
Tablo 5.24.	Bilyalı dövme işlemi sonrası kavitasyon su jeti erozyonu test parametreleri	92
Tablo 5.25.	Bilyalı dövme işlemi sonrası kavitasyon su jeti erozyonu test sonuçları	92
Tablo 5.26.	EDS analiz bölgeleri elementel bileşen değerleri (% kütlece)	123

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Δ_m	: Numunelerin ilk ağırlıkları ile test sonrası ağırlıkları farkı (m)
C_d	: Deşarj katsayısı
P_0	: Akışın uniform olduğu yerdeki mutlak basınç (Pa)
P_1	: Giriş basıncı (Pa)
P_2	: Çıkış basıncı (Pa)
P_m	: Kavitasyonun olduğu yerdeki mutlak basınç (Pa)
P_v	: Akışkan buharlaşma basıncı
v_0	: Akışın uniform olduğu yerdeki hız (m/s)
Δp	: Nozul meme boyunca basınç farkı
A	: Nozul meme alanı
C	: Sıcaklık birimi (°)
d	: Numune çapı (mm)
D_{nozul}	: Nozul çapı
EH	: Erozyon hızları (gr/dk)
L	: Uzunluk
m	: Kütle
n	: Test sayısı
N	: Gürültü faktörü
q	: Dinamik basınç
Q	: Akış debisi
R_{3z}	: Ölçülen uzunluktaki üçüncü en yüksek pik-vadi uzunluğunun ortalama değerleri
R_a	: Ortalama çizgisel pürüzlülük (μm)
R_q	: Karelerinin ortalamasının karekökü (RMS) pürüzlülüğü (μm)
R_t	: Pürüzlülüğün filtre edilmiş halinin en yüksek tepesi ile en düşük çukurun arasındaki düşey mesafedir (μm)
R_z	: Ölçülen uzunluktaki en yüksek beş tepe ile en derin beş çukurun mutlak değerlerinin ortalaması (μm)
S	: Sinyal değeri
S_a	: Ortalama alansal pürüzlülük (μm)
S_{off}	: Stand off distance, Nozul ile numune arasındaki mesafe
S_v	: Tarama gösterilen alandaki en derin vadi derinliği (μm)
S_z	: Tarama gösterilen alandaki en yüksek tepe en düşük vadi mesafesi (μm)
t	: Numune kalınlığı (mm)
T	: Suyun sıcaklığı
t	: Test süreleri
V	: Hacim
Y	: Ölçülen karakteristik değeri
ΔP	: Statik basınç
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
σ	: Kavitasyon katsayısı
v	: Nozul meme çıkışı su hızı

Kısaltmalar

ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ASME	: American Society of Mechanical Engineers (Amerikan Mekanik Mühendisliği Kurumu)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
BAP	: Bilimsel Araştırma Projeleri
BCC	: Body Centered Cubic (Hacim Merkezli Kübik)
BSE	: Back Scatter Electron (Geri Saçılan Elektronlar)
CP	: Cavitation Peening (Kavitasyon Dövme)
CPP	: Controller Propeller Pitch (Piç Kontrollü Pervane)
CSP	: Cavitation Shotless Peening (Kavitasyon Darbesiz Dövme)
CU1	: Mangan Bronz
CU2	: Mangan Demir Bronz
CU3	: Nikel Alüminyum Bronz
CU4	: Manganez Alüminyum Bronz
EDS	: Energy Dispersive X Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X Işını Spektroskopisi)
EH	: Erozyon Hızı
FCC	: Face Centered Cubic (Yüzey Merkezli Kübik)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik)
KHA	: Kavitasyon Hücum Açısı
Kİ	: Katmanlı İmalat
KS	: Kavitasyon Sayısı
LP	: Laser Penning (Lazer Dövme)
MAB	: Manganez Alüminyum Bronz
Mpa	: Megapaskal
NAB	: Nikel Alüminyum Bronz
NNM	: Nozul ile Numune Arası Mesafe
PHV	: Propeller Hull Cavitation (Pervane Tekne Kavitasyonu)
PVDF	: Piezoelektrik Folyo
S/N	: Signal/Noise (Sinyal/Gürültü Oranı)
SE	: Secondary Electron (İkincil Elektronlar)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SP	: Shot Peening (Bilyalı Dövme)
SPI	: Shot Peening Intensities (Bilyalı Dövme Yoğunluğu)
WCP	: Water Cavitation Peening (Sulu Kavitasyon Dövme)
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Difraksiyon Spektroskopisi)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
YPD	: Yüzey Pürüzlülük Değişimi

MANGAN ALÜMİNYUM BRONZUNDAN İMAL GEMİ PERVANE MALZEMESİNİN KAVİTASYON EROZYONU DAYANIMININ BİLYALI DÖVME YÖNTEMİYLE İYİLEŞTİRME ÇALIŞMASI

ÖZET

Bu çalışmada, kavitasyonun zararlı etkisi altında çalışan gemi pervane malzemesi Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımının, bilyalı dövme yöntemi ile yüzeyinde oluşturulan plastik deformasyon sonucu kavitasyon erozyonu aşınma davranışı incelenmiştir. Farklı kavitasyon hücum açılarında (30°, 60° ve 90°) testlerin uygulanmasına izin veren özgün bir test donanımıyla döküm alaşımının kavitasyon erozyon davranışı ortaya çıkarılmıştır. Başlangıçta, farklı kavitasyon sayılarına göre kütle kaybındaki değişim ve kavitasyon erozyonunu etkileyen parametreler Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Literatürde daha önce bu yöntemle çalışılmamış olup kavitasyon hücum açısının, %69,07 oranıyla kavitasyon erozyonu üzerinde en etkin parametre olduğu analiz edilirken giriş basıncının 150 bardan 200 bara çıkarılması kütle kaybını ~%15 artırmıştır. Referans numunelerde görülen bu değişimler üzerine numunelerin yüzey ve yüzey altı özellikleri, bilyalı dövme yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Dövülen numunelerin kesit derinliğine bağlı sertlik değerleri azalarak (290 HV'den 150 HV'ye) yaklaşık 250 mikron derinliğinde sertleştirilmiş yüzey tabakası elde edilmiştir. Kavitasyon erozyonu testleri sonrasında ise 150 bar giriş basıncında dövülmemiş yüzeylere göre ~%22 daha düşük kütle kaybı aşınma oranı sağlanırken, 200 bar giriş basıncında bu oran her iki yüzey için yaklaşık olarak aynı olarak ölçülmüştür. Ortaya çıkan değişimler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3B optik profilometri yöntemleriyle incelenmiştir. Bu detaylı incelemeler sonucunda, kavitasyon erozyonu hasarları ağırlıklı olarak tane sınırları içerisinde meydana geldiği, hasar mekanizmasının, yüzeyin özellikle tane sınırlarında korozyonun da eşlik ettiği şiddetli plastik deformasyon nedeniyle yüzeyden malzemenin uzaklaştırılmasıyla gerçekleştiği düşünülmektedir. Bilyalı dövme işlemi ile kavitasyon erozyonu direncinin artması ise yakın yüzeyde meydana gelen plastik deformasyona bağlı olarak artan yüzey sertliğine, tane incelmesine ve yönlendirme mekanizmalarına atfedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Bakır Alaşımları, Deniz Ortamı, Triboloji, Yüzey Modifikasyonları.

A STUDY ON IMPROVEMENT OF CAVITATION EROSION RESISTANCE OF MANGANESE ALUMINUM BRONZE SHIP MATERIAL BY SHOT PEENING METHOD

ABSTRACT

In this study, the cavitation erosion wear behavior of the ship propeller material Manganese Aluminum Bronze (MAB-CU4) alloy, operating under the harmful effects of cavitation, as a result of plastic deformation created on its surface by shot peening method was investigated. The cavitation erosion behavior of the casting alloy was revealed with a innovative test rig that allowed tests at different cavitation attack angles (30°, 60° and 90°). Initially, the changes in mass loss with respect to different cavitation numbers and the parameters affecting cavitation erosion were evaluated using the Taguchi Design of Experiments (DoE) method. While the cavitation angle of attack, which has not been studied with this method before in the literature, was found to be the parameter with the greatest effect on cavitation erosion with a rate of 69.07%, increasing the inlet pressure from 150 bar to 200 bar increased the mass loss by ~15%. Following these changes observed in the reference samples, the surface and subsurface properties of the samples were improved using the shot peening method. The hardness values of the peened samples decreased depending on the section depth (from 290 HV to 150 HV) and a hardened surface layer of approximately 250 microns in depth was obtained. After cavitation erosion tests, a ~22% lower mass loss wear rate was achieved compared to unpeened surfaces at 150 bar inlet pressure, while this rate was measured to be approximately the same for both surfaces at 200 bar inlet pressure. The resulting changes were examined by scanning electron microscopy (SEM) and 3D optical profilometry. As a result of these detailed investigations, it is thought that the damage mechanism occurs by the removal of material from the surface due to severe plastic deformation accompanied by corrosion, especially at the grain boundaries, while cavitation erosion damage occurs predominantly within the grain boundaries. The increase in cavitation erosion resistance with shot peening was attributed to increased surface hardness, grain refinement and orientation mechanisms due to plastic deformation occurring at the near surface.

Keywords: Wear, Copper Alloys, Marine Environment, Tribology, Surface Modifications.

1. GİRİŞ

Gemilerde istenen gücün ana makineden pervaneye kadar aktarılmasını sağlayan sistemlere ana tahrik sistemi denir. Bu sistemlerin çalıştığı bölgelerde akış alanının düzensiz olması; shaft kuvvetlerinde dalgalanmalara ve pervane tarafında indüklenen basınç alanlarında benzer değişimleri meydana getirerek kavitasyon olayını meydana getirmektedir. Kavitasyon olayı ile ortaya çıkan baloncuklar, basıncın daha yüksek olduğu bölgelere geldiğinde patlayarak, boşalan yerlere akışın nüfuz etmesine neden olur. Böylece yüzey üzerinde şiddetli basınç darbeleri oluşarak malzeme yüzeyinde kavitasyon erozyonu aşınması tetiklenir. Ortaya çıkan aşınma; arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının fonksiyon dışı kalmalarının nedenlerini teşkil etmektedir. Kavitasyon erozyonunun neden olduğu malzeme kayıpları ise gemi pervanesinin hasar almasına gürültü, titreşim ve performans kaybına neden olarak geminin planlanandan önce havuza çıkmasına ve bakım, onarım işlerinin daha erken yapılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle tasarımcıların kavitasyon ve kavitasyon kaynaklı olayları kontrol altına almak, tahminde bulunmak ve sonuçları analiz etmek için iyi bir tasarım metoduna ve yeni nesil inceleme yöntemlerine sahip olmaları gerekmektedir.

Bakır alaşımlarının önemli özelliklerinin başında yüksek aşınma, mukavemet, korozyon ve kavitasyon dayanımı ile düşük yoğunluk, manyetik geçirgenlik, kıvılcım çıkartmama gibi özellikleri gelmektedir (Fonlupt ve diğ., 2005). Gemi pervanesi üretiminde istenen özellikleri karşılamak için kullanılan bakır alaşımlarının uluslararası standartlardaki kullanım şekli Mn-Bronz (C86300), Mn-Fe Bronz, Ni-Al Bronz (UNS C63200), Mn-Al Bronz (UNS95700) gibidir. Loyd kurallarına göre ise CU1, CU2, CU3, CU4 olarak standartlaştırılarak denizcilik endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadırlar (Loyd, 2009). Bahse konu alaşımların belirtilen özelliklerinin yüksek olmasının yanında kavitasyon erozyonu direnci özelliklerinin geliştirilmesi de önemli bir konudur. Bu sebeple erozyon olayının mekanizmasını iyi anlayarak problemin çözümüne ve bu alaşımları kavitasyon erozyonu aşınmasına daha dayanıklı hale getirebilmek için birçok araştırmacı ve geliştirmeci yeni çalışmalar ortaya koymuştur. Bu çalışma süreçlerinden biri de deniz suyunun aşındırıcı etkisi altında çalışan gemi pervane malzemesi özelinde yapılabilecek tasarımsal değişimler veya malzeme yüzeyinde uygulanabilecek mukavemet artırıcı yüzey işleme yöntemleri sayesinde malzeme dayanımlarının artırılmasıdır.

Standartlaştırılmış bakır alaşımları ile gemi pervanesi üretimi, genel olarak döküm ve talaşlı imalat işleri sonrası pervanenin gemiye montaj işleri ile sonlandırılmaktadır. Ancak deniz suyunun zararlı etkisinden dolayı kavitasyon kaynaklı kavitasyon erozyonu, pervaneler üzerindeki hasarın belki de en zarar verici halini oluşturmaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında kavitasyon erozyonu olgusunu daha iyi anlayarak metalik bir malzemenin yüzey mekaniğini kontrol etmek için kullanılan yöntemlerden biri olan bilyalı dövme yöntemi (Shot Peening) ile gemi pervane malzemesi alaşımının yüzey mekanik iyileştirmesi için çalışmalar uygulanmıştır. Tez çalışmasında ilk olarak kavitasyon erozyonu testleri için kullanılan ana yöntemlerden biri olan ve kavitasyon oluşumunu sağlayan yüksek basınçlı su jetinin sebep olduğu kavitasyon erozyonunun oluşturulmasına ve araştırılmasına odaklanılmıştır. Bu karmaşık sorunu ayrıntılı olarak araştırmak için detaylı bir literatür araştırması yapılmış, bunu deneysel çalışmalar ve ileri karakterizasyon araştırmaları izlemiştir. Bunun yanında testler için doktora çalışmasının sürdürülebilirliğinin, yaygınlığının ve özgün değerinin artırılması amacı ile denizcilik uygulamalarında tercih edilen ve çalışma şartlarında kavitasyonun istenmeyen etkilerine maruz kalan Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımı numuneleri döküm yöntemiyle üretilmiştir. Teorik kısımda; yapılan literatür araştırmaları sonrası kavitasyon olayının temel ilkelerinin tanımı, deneysel ve sayısal sonuçları ilişkilendirmek için tez çalışmasında kullanılacak yöntem ve bakır alaşımı malzemelerinin temel özelliklerinin anlaşılması sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda ise erozyon etkisini incelemek için ASTM G134 standartlarına uygun tasarımı ve imalatı yapılmış özgün yenilikçi bir test cihazı ile kavitasyon erozyonu testlerinin yanı sıra yüzey mekanik dayanımı arttırmak için bilyalı dövme test cihazı ile numunelerin bilyalı dövme testleri gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda çalışmanın birincil odak noktası MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu aşınma davranışını değerlendirmektir. İkincil odak nokta ise, bilyalı dövme yöntemi ile dövülen numunelerin değişen yüzey ve mekanik özelliklerine bağlı kavitasyon erozyonu testleri sonrası tribolojik davranışlarının incelenmesidir. Yöntem olarak kavitasyon erozyon testleri öncesi ve sonrasında düzenli zaman aralıklarında kütle kaybı ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ile yüzey ve kesit malzeme karakterizasyonları yapılarak aşınma görselleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunlarla birlikte, çalışmada parametrelerin çokluğu ve etkilerinin analizi için

mühendislik deneysel çalışmalarına önemli artılar sunan Taguchi tekniğinden yararlanılmıştır. Deney tasarımı sonuçları sonrası ortaya çıkan verilerin değerlendirilmesinde de Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi, Regresyon ve Varyans (ANOVA) yöntemleri kullanılmıştır. Sürecin devamında MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonuna karşı direncinin artırılması için bilyalı dövme yöntemi ile dövülmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar, bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin yüzeysel sertliği ile yüzeyden iç merkeze doğru sertlik değerlerindeki değişimleri, yüzey ve yüzeye yakın bölgelerdeki tane yapısındaki değişimleri ve yüzey morfolojisi incelemelerini kapsayan detaylı karakterizasyon çalışmaları ile devam ettirilmiştir. Son olarak bilyalı dövme işlemi ile yüzey mekaniği değiştirilmiş numunelerin kavitasyon su jeti erozyon testleri sonrası yüzey ve yüzey altı özelliklerinin karakterizasyon çalışmaları ve erozyon direncinin analiz edilmesiyle tez çalışması tamamlanmıştır. Tüm bu süreçlerde alaşımın aşınma davranışının yanında tane sınırları ve tane içleri gibi mikroyapısal özelliklerin kavitasyon erozyonu hasarı üzerindeki etkisini anlamak için hasarın mikroyapısal düzeyde araştırılması çok önemlidir. Bu nedenle, literatürde sınırlı sayıda belirtilen yöntemlerle inceleme çalışmaları bulunan MAB-CU4 alaşımının taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3 boyutlu optik profilometri yoluyla araştırılmasına yer verilmiştir.

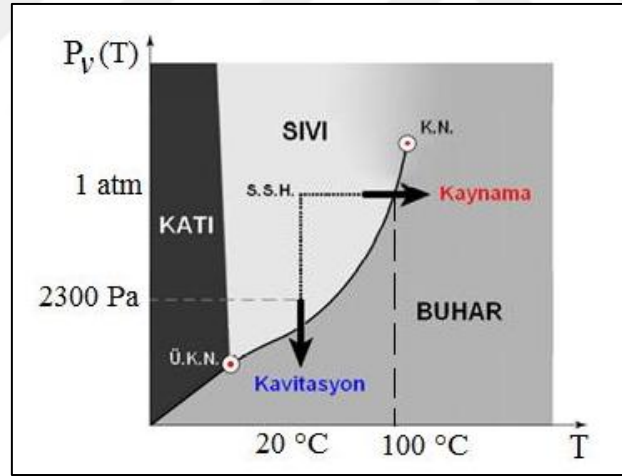
Tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde; teknolojik olarak bilyalı dövme işleminin gemi pervanesi bakır alaşımları üzerinde uygulanması çalışmalarının az sayıda olması, daha etkin kullanılabilmesi için kesit mikroyapısında meydana gelen değişimlerin ve mekanik özelliklerin gelişimini sağlayan temel mukavemet arttırıcı mekanizmaların irdelenmesi ve bilimsel ve endüstriyel alanlarda çalışmaların gerçekleştirilmiş olmaması etken olmuştur. Böylece metodolojik olarak uygulanmış strateji ve yöntemler, endüstriyel çalışmalar için de bir rehber niteliğinde olacaktır. Bununla birlikte bilyalı dövme işlemi sonrası geliştirilen kavitasyon erozyonuna olan direncin ileri mikroyapısal analiz ile ilişkilendirilmesi, yüzey ve yüzey altı özelliklerinin kontrolü ve geliştirilmesi için doğrudan kullanılabilir, güvenilir ve özgün bir yöntem olarak ortaya çıkarılmıştır. Bu yöntem, endüstriyel çalışmalarda gemi pervanesi bakır alaşımlarının kavitasyon direncinin artırılması, mikroyapısal ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve bilyalı dövme işleminin standardizasyonu konularında teknolojik çalışmalara doğrudan katkı sağlayacaktır. Bu sayede kavitasyon olayının neden olduğu gürültü, titreşim,

performans kaybı ve malzeme hasarlarının azaltılması ile deniz araçlarının ekonomik ömürlerinin arttırılması sağlanabilecektir. Bu çalışma, mikroyapısal ölçekte kavitasyon erozyon hasarını kapsamlı bir şekilde inceleyen ve MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu sırasında mikroyapısal özelliklerin erozyon hasarı üzerindeki etkisini analiz ederek bilyalı dövme yöntemini kullanan öncü çalışmalardandır.

Belirtilen bilgiler temelinde tez çalışmasının genel konusu Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımına bilyalı dövme yöntemi uygulanması sonrası ASTM G134 standartlarında kurulmuş yüksek basınçlı kavitasyon su jeti erozyonu test düzeneği ile kavitasyona maruz bırakılarak oluşan plastik deformasyon ve kavitasyon erozyonu dirençlerinin incelenmesidir. Tez çalışmasının genel amacı ise bakır alaşımının: bilyalı dövme yöntemi ile dövülmesi ve kavitasyon erozyonu sonucunda dövülmüş ve/veya erozyona maruz bırakılmış numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi inceleyerek aşınma davranışının geliştirilmesidir. Tüm bu çalışmaların mühendislik malzemelerinin kavitasyon erozyonu aşınma davranışlarının incelenmesine önemli katkılar ve yenilikler sağlayacağı değerlendirilmektedir.

2. KAVİTASYON VE YÜZEY İŞLEMLERİ OLGUSU

Kavitasyon olgusu, sistem ve makinelerin bir sıvıyla etkileşime girdiğinde hız ve basınç değişimlerine neden olan fiziksel bir olay olup akışkanlar mekaniği konusudur. Malzemenin hasar almasına neden olarak çalışma ömrünü etkileyen kavitasyon olayı pompalarda, hidrolik türbin ve dinamometrelerde, valflarda, yatak ve kaplinlerde, dizel motor sistemlerinde, gemi pervanelerinde ve hatta insan vücudunda örneğin kalp ve dizdeki eklemlerde dahi görülebilir (Carlton, 2012). Genel olarak akışkan içinde hız artışı olduğunda Bernoulli prensibine göre basınç azalımı gerçekleştikçe akışkan faz diyagramına göre akışkanın kaynama noktası düşer. Kaynama noktası bu hal içinde ortam sıcaklığına kadar gerileyebilir. Ortam sıcaklığına gelindiğinde ise içinde su buharı ve hava baloncukları içeren soğuk kaynama da denen kavitasyon olayı meydana gelir. Şekil 2.1’de kaynama ve kavitasyon faz geçişleri diyagramına göre saf suyun sıcaklığa bağlı buharlaşma basıncı eğrisinden akışkan basıncı düşürülerek veya sıcaklığı artırılarak buhar fazına geçmesinin sağlanabileceği görülmektedir (Kaya, 2020).



Şekil 2.1. Saf suyun basınç-sıcaklık diyagramı (Kaya, 2020)

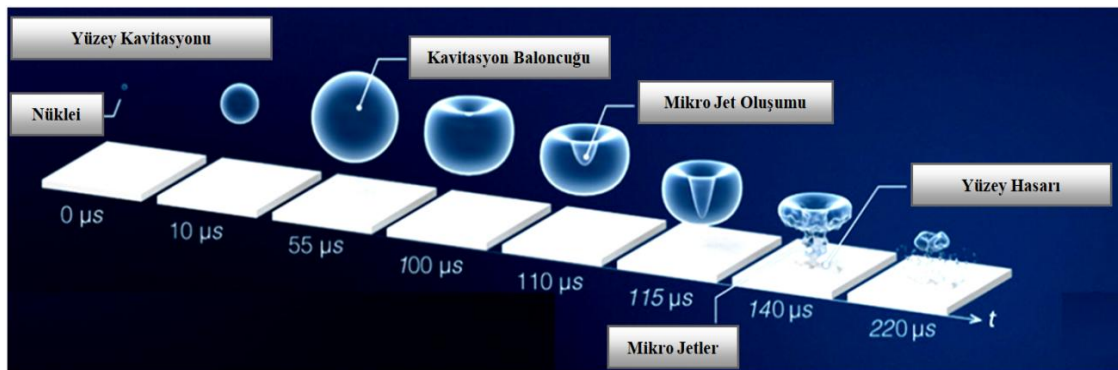
2.1. Kavitasyonun Zararlı Etkileri

Kavitasyonun zararlı etkilerinin başında gürültü, performans kaybı (itme azalması), titreşim ve aşınma (kavitasyon erozyonu) olayları gelmektedir. Gemi pervanelerinde, türbinlerde, çarklarda, vb. makine parçalarında görülen kavitasyonun zararlı etkisinin nedenleri başında kanat geometrilerinin karmaşık olması ve su akışının türbülanslı olması gelir. Hasarlar genellikle kavitasyon baloncuklarının orijinal kaynağından uzakta

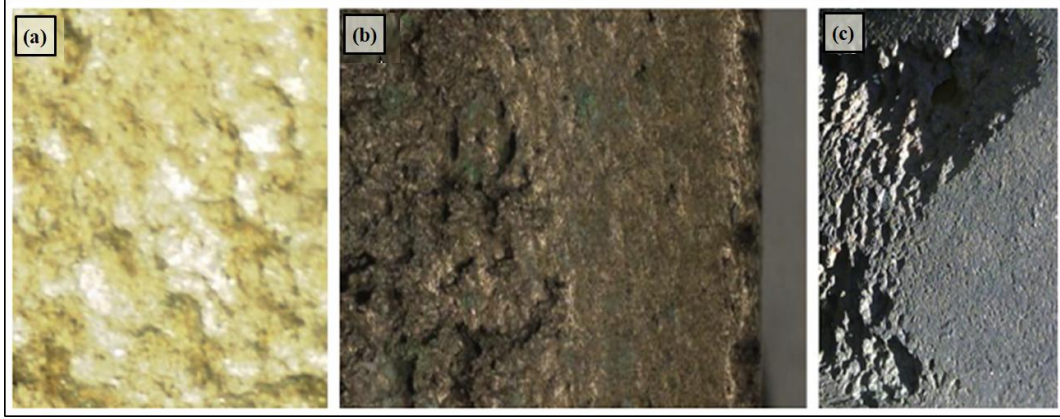
görülür ve sorunun teşhisi oldukça zordur. Örneğin, bir pervane göbeği alçak basınç noktasında oluşan kavitasyon baloncukları, kanat boyunca hareket edebilir ve merkezden yolun üçte biri kadarki alan bu hasara uğrayabilir. Ayrıca kavitasyon etkisinde oluşan gerilimler, yüzeyin yorulmasına neden olarak metal parçacıklarını yüzeyden koparabilen mikro çatlakları oluşturabilir. Yüzey altındaki oksitler veya mikro gözenekler ile boşlukların çökmesi de daha büyük bozulmalara yol açabileceğinden malzemenin yüzey dayanımı birincil öneme sahip olur (Richardson, 2016).

2.1.1. Kavitasyon Erozyonu

Kavitasyon gösteren bir akışkan içerisinde bulunan buhar baloncukları düşük basınç bölgesinde hareket ederler. Olay esnasında kavitasyon baloncukları daha yüksek basınçlı bir yere girdikçe, belirgin bir halka şekli oluşturarak içeriye doğru çökmeye başlar (Şekil 2.2). Sonuçta halka boyunca yüksek hızlı sıvı jeti malzeme yüzeyine akar. Baloncuklar katı cisimden daha uzak tarafta daha hızlı çöktüğü için sıvı jeti her zaman çevreleyen katı cisme doğru hareket eder ve şok dalgalarını oluşturur. Şok dalgalarının neden olduğu darbe basıncı genliği, malzeme mukavemet sınırlarını (ya akma gerilimi veya nihai mukavemet) oldukça kolay bir şekilde aşabilir. Ortaya çıkan şok dalgası da katı yüzeyde plastik deformasyonların oluşmasına neden olur ve ortaya çıkan malzeme erozyonunun da ana sebebine yol açar. (Brdička ve diğ., 1981; Soyama, 2020). Kavitasyon erozyonu olayı da belirli bir zaman sonra (birkaç saatten birkaç aya kadar) pervane kanadı yüzeyinde veya yüzeye yakın bir bölgede oluşursa kanat malzemesinde yerel olarak yorulmalar meydana getirebilir ve küçük parçacıklar halinde kanat yüzeyinden kopmalar başlatır. Ortaya çıkan bu olay kavitasyon erozyonu olarak nitelendirilir (Ekinci, 2007).



Şekil 2.2. Kavitasyon oluşumu (Gonzalez-Avila ve diğ., 2020)



Şekil 2.3. Gemi pervane kanat yüzeyi hasar morfolojisi (a) portakal kabuğu soyulması; (b) hafif erozyona ilerleme ve (c) bir miktar tam nüfuzla birlikte şiddetli erozyon (Carlton, 2012).

Çoğunlukla, portakal kabuğu soyulması olarak bilinen ve Şekil 2.3 (a)'da görülen kaviteasyonun neden olduğu erozyonun ilk aşamaları, gemi pervanesi çalışmaya başladıktan bir süre sonra başlayacak ve pervanenin ömrü boyunca ilerleyebilecektir. Şekil 2.3 (b)'de pervane ön kenarına yakın gelişen nispeten hafif erozyon gösterilmektedir. Daha ciddi durumlarda erozyon, ilerlemeyi bırakmadan önce malzemede hafif erozyonun ötesinde birkaç milimetre derinliğe kadar görülen hasarları ortaya çıkaracaktır. Çökme enerjilerinin yüksek olduğu pervane kanatlarında, yani şiddetli kaviteasyon saldırısı vakalarında (Şekil 2.3 (c)), aşınma olayı tüm pervane yüzeyine doğru genişleyebilecektir (Carlton, 2012).

2.2. Malzemelerin Kaviteasyon Erozyonu Özelliklerinin İncelenmesi

Farklı mühendislik malzemeleri için yapılan erozyon testleri ile numunelerin kısa bir süre içerisinde erozyona uğratılması (yüzeyinin aşındırılması) sağlanır. Tabiki de gerçek bir durumda, örnek vermek gerekirse bir gemi pervanesinde, gözle görülür mertebede erozyonun oluşumu uzun süreli kaviteasyonlu bir akışa maruz kalmasından sonra beklenir. Bu nedenle kaviteasyon erozyonunu tahmin etmek için birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu kapsamda malzemeler üzerinde kaviteasyon erozyonunu tahmin etme çalışmaları su veya farklı akışkanlar kullanılarak 1930'lu yıllardan itibaren geniş kapsamlı çalışmalar ile günümüze kadar yürütülmüştür. Kaviteasyon erozyonu konusundaki çalışmalarda öncelikli amaç, kaviteasyon erozyonunun fiziksel bir olay olarak anlaşılmasıyla birlikte etkilerine yönelik bir öngöründe bulunulabileceğinin tespit edilmesidir.

Çalışmaların başka bir diğer amaçları (Sreedhar ve diğ, 2017):

- Kavitasyon erozyonu hasarına karşı malzemeleri, kavitasyon aşınma dirençlerine göre sıralamak,
- Düzeltme faktörleri kurularak model ölçekte gerçekleştirilen testler ve tam ölçekte yapılan testler ile erozyon tahminleri arasında ilişkiler kurmak,
- Kolay test edilmiş ve test edilememiş malzemeler arasında bir korelasyon ilişkisi kurmak,
- Aşınma hasarı ile mekanik ve fiziksel özellikler arasında ilişki,
- Daha kolay erozyona uğrayan malzeme tipleri kullanarak test sürelerini azaltmak ve ortaya çıkan sonuçlar ile erozyon hızları arasındaki ilişkiler ile erozyona karşı direnç tahmininde bulunmak ve yeni modeller oluşturmaktır.

Kavitasyon ve neden olduğu aşınma mekanizmaları tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Doğal olaylara, boyuta ve sıvı ile katı arasındaki reaksiyonun gücüne bağlı olan bu olgu, erozyon direncini tek bir özellik olarak değil bir dizi karmaşık özellikler olarak ele alır. Bu nedenle, farklı test yöntemleri kullanan deneyler veya farklı koşullar kullanan testler arasındaki sonuçların tutarlılığı çok iyi değildir. Bu amaçla araştırmacılar yeni malzemeler geliştirmek, kavitasyon erozyonuna karşı dayanıklı ve aşınma olayını fiziksel olarak daha doğru bir şekilde algılamak için uğraş vermişlerdir. Ancak kavitasyon erozyonu testlerinin bilimsel bir geçerliliği ve tekrarlanabilir olması için belli bir standarda göre gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir. Bu yüzden dünyada test metodlarının standartlaşmasını sağlayan ASTM'nin (American Society for Testing and Materials, Amerikan Test ve Malzeme Kurumu) çıkarmış olduğu yöntemlerden biri de kavitasyon erozyonu aşınma testleridir. Bu hedefle kavitasyon erozyonunu ölçmek ve erozyonu tahmin etme testleri olarak ASTM, dünya çapında kabul gören ASTM G32 (ASTM G32, 2010) ve ASTM G134 (ASTM G134, 2010) standartları diye tanımlanan iki önemli test yöntemlerini ortaya çıkarmıştır. Bu durum ultrasonik testler (titreşim ekipmanların yardımıyla) ve kavitasyon erozyon testleri (su jeti ile gerçekleştirilen) ile mühendislik malzemelerinde kavitasyon olayı sonucu meydana gelen erozif aşınma hasarlarının karakteristik özelliklerini incelenebilir hale getirmeye yardımcı olmuştur (Choi ve diğ, 2012).

2.2.1. Kavitasyon Erozyonu Testleri ASTM G134-95

ASTM G134 standardı, katı malzemelerin kavitasyon erozyon direncini karşılaştırmak için kullanılan bir dizi test yöntemini içermektedir. Yöntem, mühendislik malzemelerinin kavitasyon erozyonuna karşı test koşullarını ve direnç karakteristiklerini incelemek amacıyla ASTM'nin yaygın olarak kullandığı erozyon test yöntemlerinden biridir. Kavitasyon erozyon testleri belirlenen sıcaklık ve basınç koşullarında, daha çok su akışkanı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Test yönteminde, içi akışkan ile dolu bir kavitasyon test kabında yüksek basınçlı bir pompa ve nozul vasıtasıyla numune üzerinde basınç farkı oluşturup kavitasyon oluşumunun gözlemlenmesiyle ortaya çıkan etkilerin (erozyon, gürültü vb.) incelenmesi sağlanmaktadır. Sistemin çalışma prosedürüne bakıldığında;

- İçi akışkan dolu test kabı içine monte edilmiş test numunesi yüzeyine su jeti makinesinden yüksek basınçlı şebeke suyu püskürtülür.
- Gönderilen yüksek hızdaki akış, nozul içerisine vardığında bir miktar daha hız kazanarak belirli bir nozul ile numune arasındaki (S_{off} =stand-off) mesafeden test edilecek numune yüzeyine ulaşır. Böylece, kavitasyon erozyonu aşınma testleri, çıkış basıncının akışkanın buharlaşma basıncı ile aynı değere ulaştığı andaki meydana gelen kavitasyon ile sağlanır.

Su jeti makinesinden test edilecek numuneye doğru yüksek hız ile püskürtülen akış etkisiyle zaten düşük basınçta olan test kabı akışkan basıncı, akışkanın buharlaşma basıncının altına inmektedir. Böylece test kabının içerisinde ve özellikle de test edilecek numune etrafında kavitasyon baloncuklarının ortaya çıkması gözlemlenmeye başlanır. Belli bir süre sonra ise ortaya çıkan baloncuklar numune yüzeyinde patlayarak kavitasyonun zararlı etkisi olan kavitasyon erozyonunu oluşturmaktadır. İlk kez Lichtarowicz ile başlatılan araştırmalarda, su jeti kullanılarak gerçekleştirilen kavitasyon erozyonu testlerinin amacı, malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı dirençlerini belirlemektir (Lichtarowicz, 1972, 1979). Yamaguchi ve Shimizu (1987) ve daha sonra da Momma (1991) kavitasyon su jeti test yöntemleri ile gerçekleştirdikleri başarılı çalışmalar sayesinde literatüre önemli katkılar sunmuşlardır. Son yıllarda ise devam eden çalışmalarda çok sayıda araştırmacı; su jeti yöntemiyle mühendislik

katı malzemelerin aşınma davranışlarını araştırmışlardır (Soyama ve diğ., 1999; Choi ve diğ., 2012; Jayaprakash ve diğ., 2012; Hutli ve diğ., 2018). Yapılan araştırmalar sayesinde malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı erozif direnci tahmin edilebilmiştir. Yüksek basınçlı kavitasyon su jeti ile oluşturulan kavitasyonun şiddetini etkileyen parametrelerin başında; kavitasyon kabının iç basıncı, nozuldan çıkan akışkan basıncı, akış hızı, nozul türü ve geometrisi, test süresi, test kabı iç sıcaklığı, kullanılan akışkan, numune ile nozul arasındaki mesafe, kavitasyon sayısı ve kavitasyon hücum açısı gelmektedir.

Parametre sayısının çokluğu ve kontrol edilebilir olması, kavitasyon erozyonu yönteminin malzeme davranışı üzerindeki etkisini parametrik olarak araştırmak için önemli bir inceleme ve araştırma alanı haline getirmiştir (Choi ve diğ., 2012). Bu sayede kavitasyon su jeti erozyon testleri ile numune yüzeyinde çok çeşitli boyutlarda patlayan kavitasyon baloncuk bulutlarının etkisiyle; yukarıda bahsedilen parametreler altında kavitasyon erozyonu testleri gerçekleştirilebilmiştir. Yöntemin temeli boyutsuz bir parametre olan kavitasyon sayısıdır. Bu parametre statik basıncın dinamik basınca bölünmesiyle ortaya çıkarılmış ve Lichtarowicz (1979)'in çalışmalarında anlatıldığı şekilde hesaplanmaktadır. Matematiksel olarak kavitasyon sayısı ifadesi Denklem (2.1)'deki gibidir.

$$\sigma = \frac{\Delta P}{q} \quad (2.1)$$

Burada ΔP statik basıncı, q ise dinamik basıncı ifade etmektedir ve kavitasyon sayısının bu orandan küçük olduğu zaman kavitasyon oluşumu gözlemlenmektedir. Denklem (2.2)'de kavitasyon oluşumu başlangıcını veren eşitlik yer almaktadır.

$$\sigma \leq \frac{\Delta P}{q} \quad (2.2)$$

Kavitasyon erozyonu test yöntemi temelini oluşturan Bernoulli prensibine göre daralan nozul çapından dolayı düşen basınç sonrası hız artımı görülür. Basınç düşümünün akışkan buharlaşma basıncına eşit olduğu zamanda da kavitasyon olayı gerçekleşir. Kavitasyon olayının başlangıç aşaması ise kavitasyon sayısı ile belirlenir. Denklem (2.2)'de yer alan basınç ifadeleri açıldığında Denklem (2.3)'teki ifadeye ulaşılır.

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad (2.3)$$

Bir boru deliğinde sıvı akışı Denklem (2.4)'te verilmiştir.

$$\frac{1}{2} \rho v_0^2 = P_1 - P_2 \quad (2.4)$$

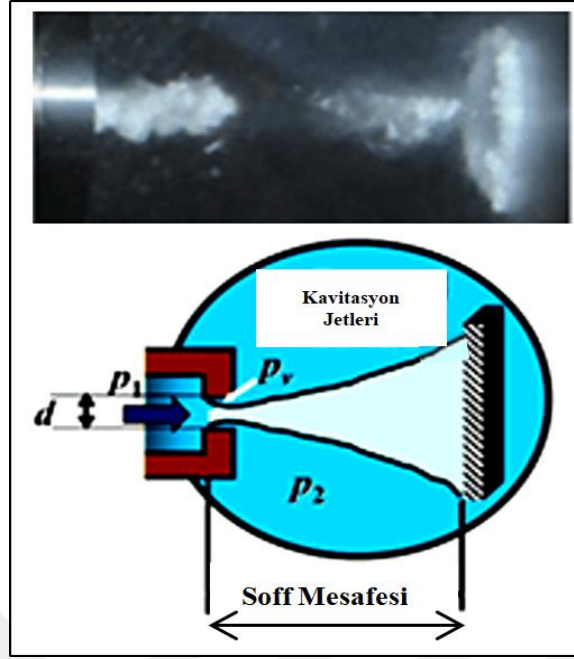
Yöntemde, yüksek hızda nozula ulaşan akışkan, nozul boyutuna göre daha da hızlanarak test kabına girmektedir. Akışkan giriş basıncı (P_1) yüksek basınç düşük hız değerindeyken, test kabı iç basıncı (P_2) düşük basınç yüksek hız değerindedir. Bu haldeki akışkan, giriş nozul basıncı (P_1) ile buharlaşma basıncı (P_v) ile ilişkili olup çıkış test kabı basıncından (P_2) ayrıdır. Basınç değişkenleri arasındaki ilişkinin ise $P_1 \gg P_2 \gg P_v$ olmasından dolayı kavitasyon sayısı Denklem (2.5)'teki haline alır (Lichtarowicz, 1979; ASTM G134, 2010).

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{P_1 - P_2} = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} = \frac{P_{iç}}{P_{giriş}} = \frac{P_{test kabı}}{P_{nozul}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.5)$$

Bu eşitliğe göre görüldüğü gibi kavitasyon erozyon testlerinde kavitasyon sayısı, testlerin yapıldığı ortamın basıncının nozuldan püskürtülen akış basıncına bölünmesi ile doğrudan hesaplanabilmektedir (Momma, 1991). Denklemde σ :kavitasyon katsayısı, P_0 :akış mutlak basınç (Pa), P_v :akışkan buhar basıncı (Pa), v_0 :akış hızı (m/s), ρ :sıvı yoğunluğu (kg/m^3), P_1 :nozula giriş basıncı (Pascal) ve P_2 :test kap içi basıncı (Pascal) ile gösterilir. Mommo (1991) çalışmasında kavitasyon erozyonu testleri için orifis tipi bir nozul kullanmıştır. Kullanılan nozul akış modelini doğrudan etkilemesinden dolayı 1,4 ve 2 mm'lik nozul imal ettirilmiş ve test süresince zımparalanmış ve parlatılmıştır. Çalışmasında akış debisi (Q) Denklem (2.6)'daki gibi hesaplanmıştır; C_d :deşarj katsayısı iken ve A :nozul meme alanı; v :nozul meme çıkışı su hızıdır. Nozul meme çıkışı su hızı (v), Bernoulli denkleminden Denklem (2.7)'deki şekilde türetilbilir; (Momma, 1991).

$$Q = C_d \cdot A \cdot v \quad (2.6)$$

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2.7)$$



Şekil 2.4. Kavitasyon su jeti şematik diyagramı

Burada ρ :kullanılan sıvının yoğunluğu ve Δp :nozul meme boyunca basınç farkıdır. Su jeti kavitasyon oluşturduğunda basınç farkı $\Delta p = P_1 - P_2$ değil, $P_1 - P_v$ 'dir. Burada P_1 , P_2 ve P_v sırasıyla su jeti giriş basıncı, test kabı iç basıncı ve buhar basıncıdır. 20 °C'deki suyun buhar basıncı $P_v = 0,0234$ bar olduğundan ve su jeti giriş basıncı (P_1) ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu kapsamda Denklem (2.8)'de C_d , deşarj katsayısının son hali verilmiştir.

$$C_d = \frac{Q}{A} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2(P_1 - P_v)}} \quad (2.8)$$

Usta (2018) tez çalışmasında nozul çapını; pompanın nozula gönderdiği suyun giriş basıncı ve debisi bilindiğinden Denklem (2.9) formülü ile belirlemiştir;

$$Q = 28,9 D_{nozul}^2 \sqrt{P_1} \quad (2.9)$$

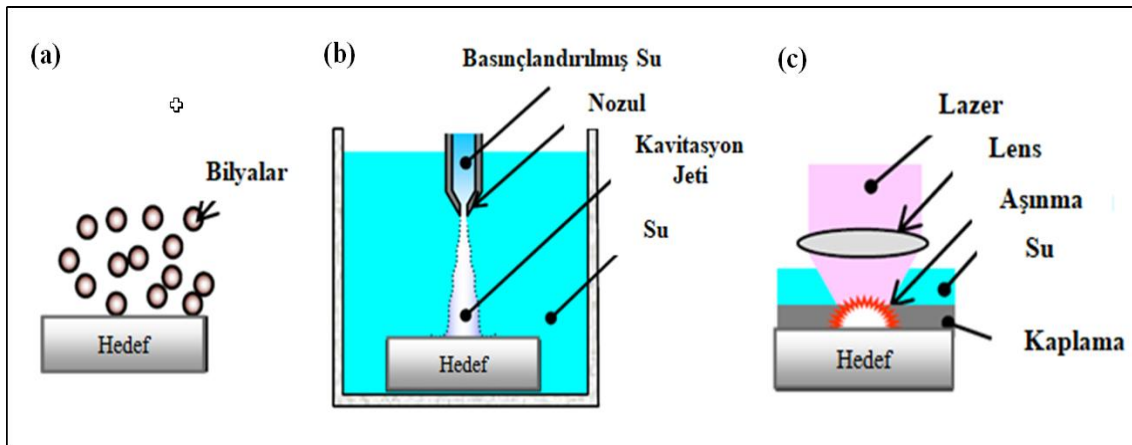
Denklemden nozulun çapı çekilirse kullanılacak nozul çapı Denklem (2.10)'daki formül ile hesaplamıştır (Usta, 2018).

$$D_{nozul} = \sqrt[4]{\frac{2,77 Q_n^2}{P_1}} \quad (2.10)$$

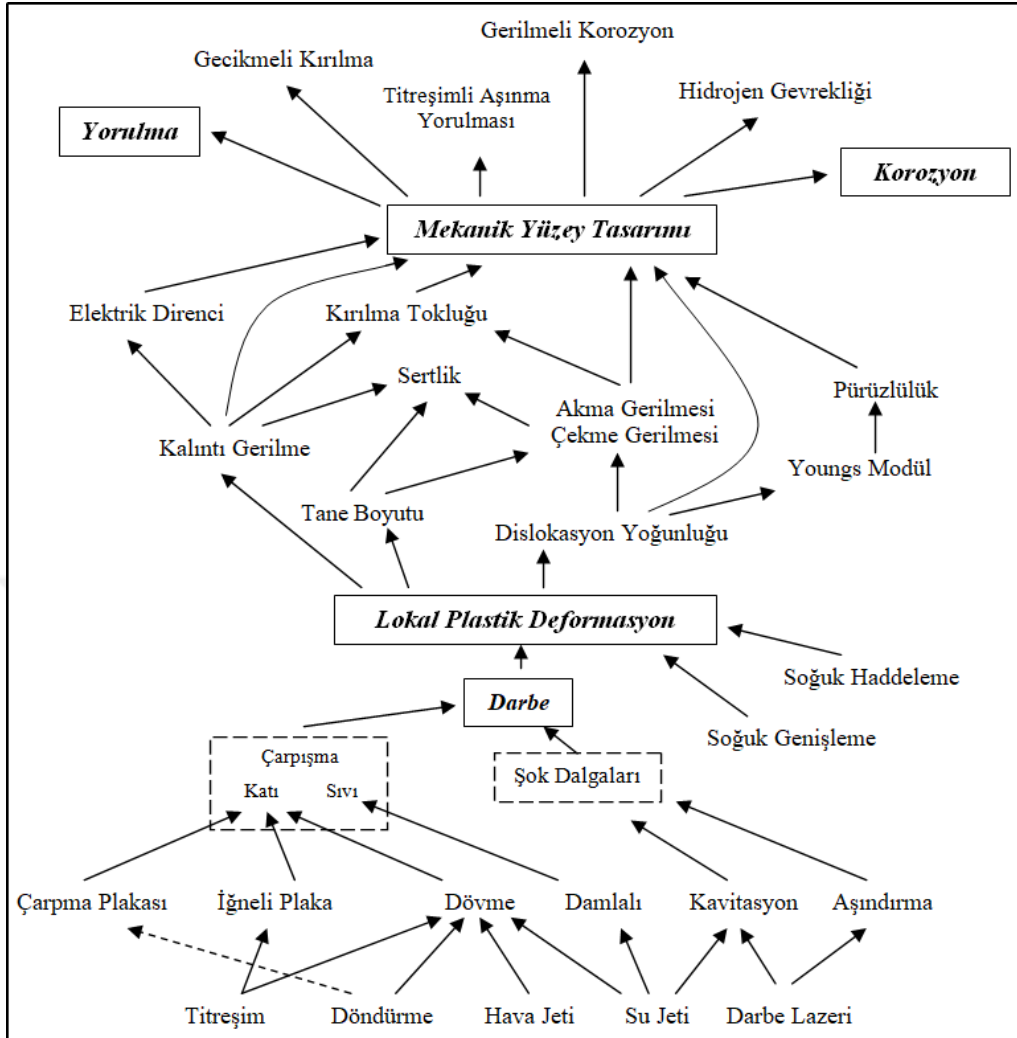
Kavitasyon su jeti erozyon test yönteminde yapılması önemli bir diğer adım ise test donanımının doğruluğunu ve çalışabilirliğini kontrol etmektir. Bu nedenle standart test koşulları altında su jeti test düzeneği ile aşınma testlerinin doğrulama ve geçerli kılma çalışması testlerinin gerçekleştirilmesi önemlidir. Böylece kavitasyon modellemesinde oluşturulan test programının geçerleme kılma (validasyon) ve doğrulama (verifikasyon) çalışmaları gerçekleştirildikten sonra sıra erozyon modellemesine geçilmesi doğru bir yol olacaktır. Tez çalışmamız için kurulan test düzeneğinin geçerli kılınması ve doğrulanması ise bu yöntemin kullanıldığı araştırmaların sonuçları ile karşılaştırılarak ve ASTM G134 standardının kümülatif kütle kaybını ve erozyon oranı grafiklerinin eldesi ile sağlanmıştır.

2.3. Metalik Malzemelerin Yüzey Mekanîği Tasarımı

Makinelerin bileşenlerinde kullanılan malzemeler özel kullanımlar için geliştirilmiş olsa da kırılma, aşınma, erozyon ve korozyon gibi hasarlar esas olarak bu bileşenlerin yüzeylerinden başlamaktadır. Bu nedenle, malzemelerin mukavemeti ve korozyon gibi olaylara dirençleri yüzey özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak yüzey özelliklerini geliştirmeye yönelik işlemlere yüzey iyileştirme, işleme, geliştirme veya modifikasyonu denir. Yüzey mekanîği tasarımı denince ise akla, en yaygın olarak bilyalı dövme yöntemi ile yapılan lokal plastik deformasyon değişikliği gelmektedir (Şekil 2.6). Bunun yanında son dönemlerde kavitasyon ve lazer dövme işlemleri ile de literatüre yeni katkılar sunularak araştırmaların geliştirilmesi ve iyileştirilmesi sağlanmıştır.



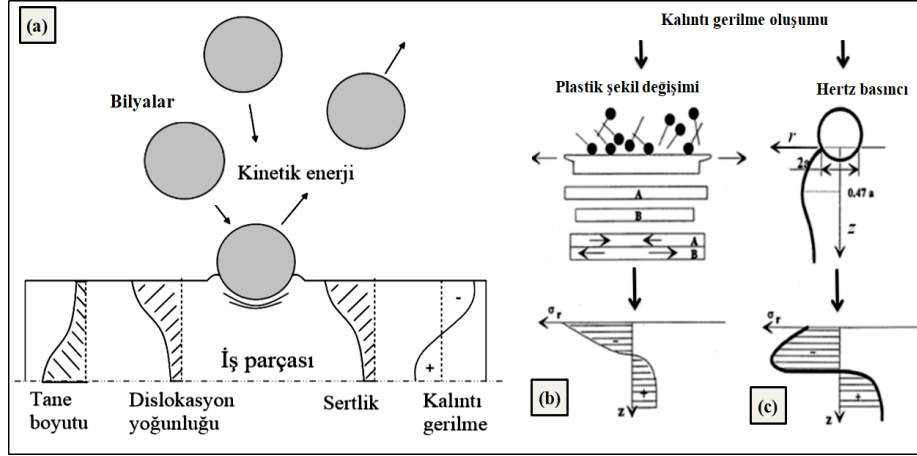
Şekil 2.5. Yerel plastik deformasyon üretmek için tipik dövme yöntemlerinin şematik gösterimi (a) bilyalı dövme (b) kavitasyon ile dövme (c) lazer ile dövme



aktarılması sağlanır (Schulze, 2006). Tekrarlı bir şekilde çarpma işlemlerinin devam etmesi durumunda malzeme özelinde yüzey ve yüzey altı özellikler değişir. Değişim gösteren özellikler ise bilyalı dövme işlemi parametrelerine ve değişkenliklerine (bilya özellikleri, hedef malzeme özellikleri, operasyon parametreleri, çevre koşulları vb.) bağlı olarak kontrol edilebilmektedir (Gariépy ve diğ., 2013; Žagar ve Grum, 2014). Bu nedenle yönteme etki eden parametrelerin iyi anlaşılması, bilyalı dövme işleminin istenen hedefler doğrultusunda en uygun şekilde uygulanabilmesi ve oluşabilecek olumsuz etkilerinin kontrol altında tutulabilmesi açısından önem arz etmektedir. Tüm bu bilgilerin ışığında bilyalı dövme, metalik malzemelerin yüzey ve yüzey altı bölgelerinde; yüzey sertliğini arttırmak, kalıntı gerilme oluşturmak, tane boyutu küçülmesini sağlamak, dislokasyon yoğunluğunu arttırmak, çatlak oluşumlarını önlemek, mikroyapı özelliklerini geliştirmek, malzemenin kristal yapısını değiştirmek ve yorulma dayanımlarını arttırmak hedefi ile çoğunlukla kullanılan soğuk şekil verme yöntemidir.

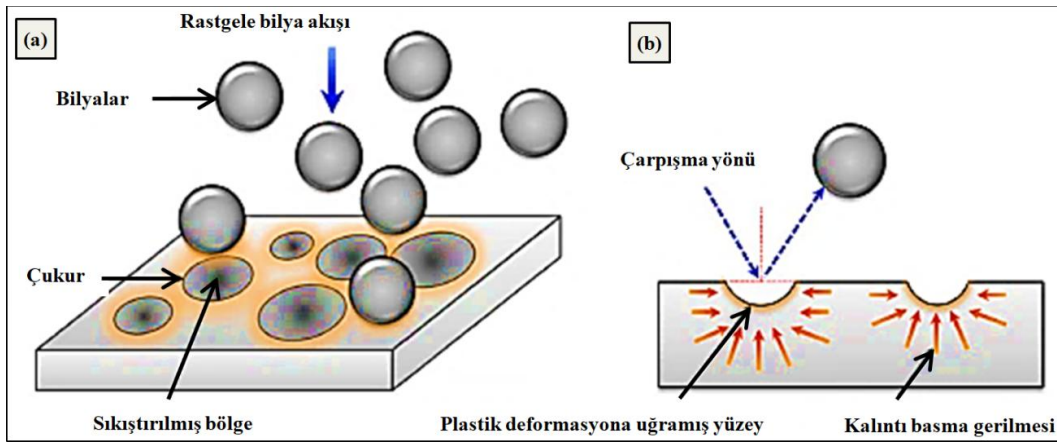
Yöntemde kullanılan bilyaların yüksek hızlar ile hedef malzeme yüzeyine çarptırılması malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olmaktadır (Gariépy ve diğ., 2013; Žagar ve Grum, 2014; Kumar ve diğ., 2019; Mhaede, 2012; Soyama, 2015). Plastik deformasyona bağlı olarak malzemenin yüzeyi ve yüzey altı bölgesinde bilyaların küçük alanda yüksek basınç yaratmaları nedeniyle oluşan Hertz basıncı ve plastik deformasyonun kombinasyonu ile kalıntı basma gerilmeleri oluşmaktadır (Kulekci ve Esme, 2014; Trško ve diğ., 2014; Mitrovic ve diğ., 2014; Xie ve diğ., 2013; Sun, 2013; Yıldiran Avcu, 2019). Bunun yanında bilyalı dövme yöntemi ile yüzey işlemi, karakteristik yüzey topografyasında dislokasyon yoğunluğunda artışa, çatlakların başlaması ve ilerlemesine sınırlar getiren yüzey tabakalarının oluşumunu sağlar (Yıldiran Avcu, 2019).

Ayrıca hedef malzeme yüzeyine tekrarlı bir şekilde çarptırılan bilyalar nedeniyle; tane incilmesi ve sertlik artışı sağlanırken ortaya çıkan plastik deformasyona bağlı olarak malzemenin yüzey pürüzlülüğünde artışa sebep olarak farklı yorulma ömrü, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin değişimi görülür (Mitrovic ve diğ., 2014; Ganesh ve diğ., 2014; Gariépy ve diğ., 2013; Žagar ve Grum, 2014; Kumar ve diğ., 2019; Mhaede, 2012).



Şekil 2.7. Kalıntı gerilme oluşumunun şematik gösterimi a) dövme işlemi sonrası görülen değişimler b) plastik şekil değişimi, c) Hertz basıncı sonrası değişim (Miao, 2010; Maawad, 2013)

Bilyalı dövme sonrasında malzemede görülen sertlik artışı, pekleşme/deformasyon sertleşmesinin bir sonucudur (Xie ve diğ., 2013; Žagar ve Grum, 2014; Altenberger, 2003). Malzeme deformasyonunun son nihai durumuna kadar ulaşması, yani dislokasyon miktarının daha fazla artmaması sonucu malzemenin deformasyona karşı direnç göstermesi olayına pekleşme denir (Gariépy ve diğ., 2013; Žagar ve Grum, 2014). Malzemenin yapısında oluşan deformasyona karşı oluşan bu direnç, mekanik özelliklerin değişmesine neden olarak akma dayanımının ve sertliğinin artışına neden olur (Kumar ve diğ., 2019; Benedetti ve diğ., 2015; Ramos ve diğ., 2016; Ferreira ve diğ., 2020). İşlem sonrası ortaya çıkan pekleşme miktarı ise tane boyut dağılımına, taneler arası ara yüzey ilişkisine, malzeme kayma bantlarına ve dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterir (Kumar ve diğ., 2019).



Şekil 2.8. a) Bilyalı dövme yöntemi ve b) plastik deformasyon şematik gösterimi (Maleki ve diğ., 2018)

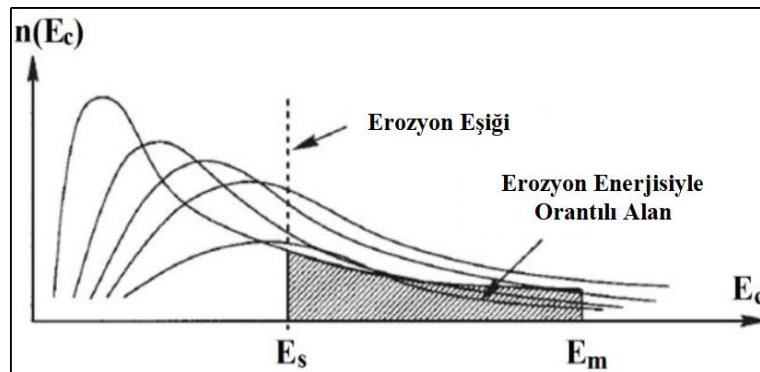
Bilyalı dövme işlemi sırasında ortaya çıkan aşırı deformasyon ile malzeme yüzey ve yüzey altı mikroyapısında gerçekleşen pek çok metalürjik mekanizma değişimi sonucunda tamamen modifiye edilen hedef malzemenin, malzeme özelliklerinin değiştirilmesi ve iyileştirilmesi sağlanır. Malzeme özelliklerine ve bilyalı dövme işlem parametrelerine bağlı olmakla birlikte ortaya çıkan bu mekanizmaların türü ve miktarı; tanelerin tekrar oryante olması, kayma bantları, nano tane oluşumları, ikizlenme, martenzitik dönüşümler, çökeltilerin kırılarak mikroyapıya dağılması olarak nitelendirilebilir (Altenberger, 2003). Ayrıca bilyalı dövme işlemi sırasında plastik deformasyon (Žagar ve Grum, 2014) ve dislokasyon artışı nedeniyle yüzey ve yüzey altı bölgesinde görülen tane incilmesi (Mitrovic ve diğ., 2014) anılan bölgelerde sertlik ve tokluk gibi mekanik özellikleri de iyileştirir. Yöntemde malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişimine neden olan mekanizmalar şu şekilde özetlenebilir;

- i) Tane incilmesi sertleşmesi: Tane incilmesi olayının gerçekleşmesiyle yüzey altı bölgede dislokasyon hareketinin yavaşlaması ve böylece tüm alaşımlar için kabul gören Hall-Petch etkisi ile mekanik özelliklerin artışı (Chamgordani ve diğ., 2018; Zhan ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2018) görülmektedir.
- ii) Orowan sertleşmesi: Mikroyapı içinde yer alan çökelti vb. partiküllerin ikincil sert fazların kırılarak tane boyutlarının azalması ve mikroyapı içerisinde homojen bir şekilde dağılmaları sonucunda dislokasyonlar ile etkileşimlerinin artması ve Orowan modeli ile dislokasyon hareketinin zorlaşmasıyla birlikte mekanik özelliklerinin artması (Zhan ve diğ., 2018; Rousseau ve diğ., 2018; Zhu ve diğ., 2018; Lin ve diğ., 2013) gerçekleşmektedir.
- iii) Gerinim sertleşmesi: Aşırı plastik deformasyona bağlı olarak yüzey ve yüzey altı mikroyapısında meydana gelen aşırı gerinim nedeni ile dislokasyon kaynaklarının aktif edilmesiyle dislokasyon yoğunluğunun artması, artan dislokasyon yoğunluğu ile artan dislokasyon-dislokasyon etkileşimleri ile dislokasyon hareketinin yavaşlaması bu mekanizmaların temelini oluşturur (Chamgordani ve diğ., 2018; Umamoto ve diğ., 2003; Unal ve diğ., 2019; Zhan ve diğ., 2018; Pour-Ali ve diğ., 2018; Van Steenkiste ve diğ., 2002).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gemi pervanesi bakır alaşımları gibi yüksek korozyon ve kavitasyon aşınmasına maruz kalan malzemelerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin çeşitli mekanik yüzey işlemleri kullanılarak geliştirilmesi günümüzde önemli bir araştırma konusudur. Bu konunun derinlemesine incelenebilmesi için mekanik yüzey işlemi gören malzemelerin yüzey altı mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin ileri karakterizasyon yöntemleri ile anlaşılması ve mikroyapı-mekanik özellik ilişkilerinin ortaya çıkarılması önem arz etmektedir. Ancak konuya yönelik gerçekleştirilen çalışmalar oldukça sınırlı olduğundan yeni araştırmalara gerek duyulmaktadır. Bu bölümde; kavitasyon erozyonu aşınma olgusuna yönelik yapılan araştırmalar, kavitasyon erozyonu oluşturulmasına yönelik çalışmalar ve dövme işlemlerine yönelik malzemelerin yüzey altı mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi konusunda araştırılmış literatür çalışmaları incelenerek doğrudan tez konusuna yönelik gerçekleştirilmiş çalışmalar yer almakta ve tartışılmaktadır.

Erozyon olgusunun oluşumu hakkında birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki ve önemlisi enerji dönüşümü yaklaşımı ile kavitasyon baloncuklarının yüksek miktarda enerji taşıdığını inceleyen araştırmalardır. Bu yaklaşıma göre kavitasyon erozyonu hasarı, erozyon potansiyelinin (E_c) belirli bir erozyon eşik değerinin (E_s) üzerine çıkmasıyla gerçekleşir ve yüzeyde herhangi bir hasar oluşturmak için minimum enerji seviyesi eşiğinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu eşik değerinin kavitasyon türüne bağlı olmayıp erozyonun gerçekleştiği yüzeyin malzeme özelliklerine bağlı olduğu da ortaya çıkarılan diğer bir sonuçtur. Şekil 3.1’de enerji spektrumu ve kavitasyon erozyonu ile ilişkisini gösterilmektedir (Li, 2012).



Şekil 3.1. Enerji spektrumu ve kavitasyon erozyonu ile ilişkisi (Li, 2012)

Soyama ve diğ. (2001), malzeme erozyonu eşik değerini kavitasyon su jeti erozyonu test düzeneği ile araştırmışlardır. Su jeti testleri ile çeşitli malzemelerin erozyon hızlarını elde etme çalışmalarında “malzeme erozyon eşik seviyesi” parametresinin önemli bir değişken olduğuna varmışlardır (Soyama ve Kumano, 2002).

Gemi pervanesi üzerindeki kavitasyonu analiz eden Tukker ve Kuiper (2004) kavitasyon olayının periyodik ve kendini tekrarladığı varsayımını ortaya çıkarmışlardır. Kavitasyon oluşumu sonrası baloncuk patlamasının erozyon oluşturacak kadar şiddetini belirleyecek üç parametre savunmuşlardır. Bunlar: kavitasyon erozyonun gerçekleşmesi için kavitasyonun katı yüzeyine yakın bir yerde meydana gelmesi, kavitasyon baloncuk patlama hızının yüksek olması, patlamanın gerçekleştiği alanın küçük olması gibi şartların taşınmasıdır. Bu nedenle pervane kanatlarında erozyon oluşumu için baloncuk patlamasının kanada yakın ve bu patlamanın kanat yüzeyinde erozyon ortaya çıkaracak kadar hızlı gerçekleşmesi gerekmektedir (Tukker ve Kuiper, 2004).

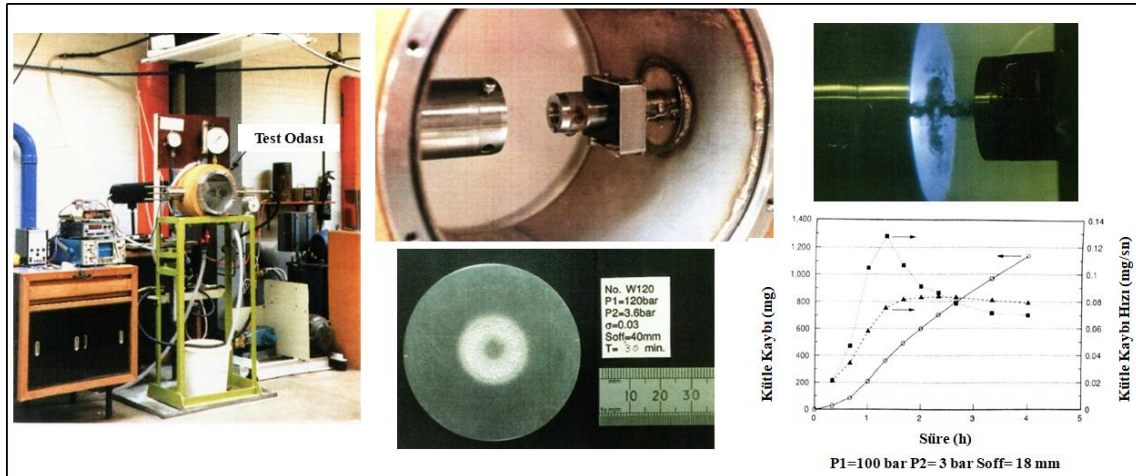
Dular ve diğ. (2006), kavitasyon tüneli testleri ile kavitasyon olayını farklı akış koşullarında incelemişler ve kavitasyon erozyonunun tahminini içeren modellemeyi hidrofoiller üzerinde çalışmışlardır. Araştırmacılar Dular’ın çalışmalarından sonra, yüksek hızlı video tekniği kullanarak boya çalışmalarıyla kavitasyon akışını incelemeye başlamışlardır (Dular ve diğ., 2006).

Petkovsek ve Dular (2013), kavitasyon erozyonunun ve kavitasyon yapılarının eş zamanlı gözlemi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Şeffaf bir venturi kesitinin yüzeyine ince bir alüminyum folyo ile aynı anda iki yüksek hızlı kamera kullanıp kavitasyon yapılarını ve folyonun yüzeyini kaydetmişlerdir (Petkovšek ve Dular, 2013). Kim ve diğ. (2014) kavitasyon erozyonu tahminleri için deneysel ve sayısal yöntemler üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında kavitasyonun neden olduğu erozyonu belirleyebilmek için önerilen test ve inceleme teknikleri anlatılmıştır (Kim ve diğ., 2014).

Araştırmacılar malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı dirençlerini inceleyebilmek için ise hidrolik, ultrasonik ve lazer kavitasyon gibi kavitasyon oluşturma yöntemleri kullanmışlardır (Soyama ve Sekine, 2010). Kavitasyon erozyonu incelemelerinde sıklıkla kullanılan ASTM G32 yöntemi ile yapılan çalışmaların başında Zhou ve Hammitt’in karbon çelik malzemesinin çeşitli sulu çözeltiler içerisindeki erozyon

oluşum hızlarını farklı sıcaklıklarda incelediği çalışma gelmektedir (Yu-Kang ve Hammitt, 1983). Bir diğer March (1987) titreşim cihazları ile ultrasonik kavitasyon erozyonu kullanılarak yapılan çalışmada ise çeşitli malzemelerin kavitasyon erozyonuna karşı dirençleri incelenmiştir (March, 1987).

Kavitasyon su jeti erozyon testleri ilk olarak Lichtarowicz tarafından uygulanmıştır (Lichtarowicz, 1972; Lichtarowicz 1979). Lichtarowicz doktora öğrencisi Momma (1991) su jeti kavitasyon erozyonu tekniği kullanarak kavitasyon yüklemesi altında alüminyum malzemelerinin erozyon sürecini incelemiştir (Şekil 3.2.) Testlerinde uzun menfezli bir nozul kullanılmış ve 80-120 bar arasında değişen basınçlı bir sistemde şebeke suyu kullanılarak testlerini gerçekleştirmiştir. Kavitasyon jetleri sonucu oluşan aşınmaya neden olan parametrelerin etkileri incelenmiş ve sonuçları önceki araştırmalarla karşılaştırmıştır. Üretilen erozyon; oluşan çukur sayımı ve basınç darbe verileri ile ilişkilendirilmiştir. Gözlenen girintiler, mikro jetin neden olduğu çukurlar nedeniyle olduğunu göstermişlerdir. Basınç darbelerini ölçmek ve saymak için ise kullandıkları piezoelektrik folyo (PVDF) ile yeni bir yük ölçüm dönüştürücüsü geliştirilmiş ve başarıyla kullanılmıştır (Momma ve Lichtarowicz, 1995; Momma, 1991).

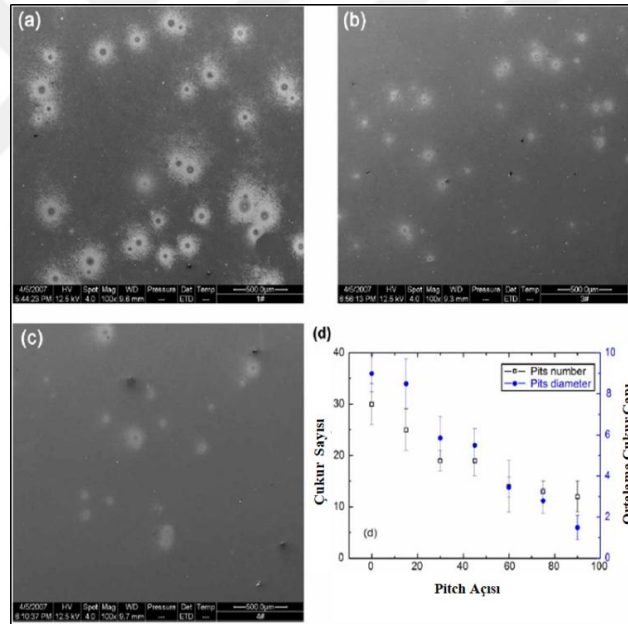


Şekil 3.2. Momma tez çalışması su jeti kavitasyon erozyonu test düzeneği (Momma, 1991)

Soyama ve Asahara (1999) kavitasyon jetinin karbon çeliğinin korozyon direnci üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kullandıkları kavitasyon jeti test düzeneği ile korozyon direncinin iyileştirilmesini göstermek için, karbon çeliğinin korozyon

özelliğini üç farklı koşulda korozyon potansiyelini ölçerek deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak kaviteasyon jeti altında karbon çeliğinin (JIS S45C) korozyon direncini geliştirilebileceğini göstermişlerdir. (Soyama ve Asahara, 1999). Daha sonra, çalışmanın devamı niteliğindeki testlerde farklı su sıcaklıklarında ve basınçlardaki erozyon oluşum değişikliklerini araştırmışlardır (Soyama, 2005).

Chen ve diğ. (2008) çelik malzeme üzerindeki kaviteasyon erozyonunu farklı eğim açılarında incelemek için ultrasonik titreşim kaviteasyon erozyon testlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, numune yüzeyinin eğim açısı arttıkça erozyon çukurlarının sayısının ve boyutunun azaldığını göstermiştir (Şekil 3.3). Bu yaklaşımın katı yüzey yakınında üretilen hidrodinamik basınçlarla ilişkili olduğu ve yüzey yakınındaki hidrodinamik etkiyi kaviteasyon baloncukların hareketinin neden olduğu hidrodinamik basınçlar ile açıklamışlardır (Chen ve diğ., 2008).



Şekil 3.3. SEM görselleri (a) eğim açısı 0°, (b) 60° ve (c) 90°, (d) farklı eğim açılarındaki çukur sayısı ve boyutu (Chen ve diğ., 2008)

Hattori ve diğ. (2010), sabit darbe yüklerinin oluşturduğu erozyonu tahmin eden modeli çeşitli kaviteasyon durumlarında ortaya çıkarmışlardır (Hattori ve diğ., 2010). Choi ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada ASTM G32 ve G134 standartlarına göre oluşturulan test düzeneklerinde alüminyum ve Nikel Alüminyum Bronz (NAB-CU3) alaşımlarının kaviteasyon erozyonu testlerini gerçekleştirerek erozyon hızı ile malzeme arasında ilişki kurmuştur (Choi ve diğ., 2012).

Soyama (2013), ASTM G134 standartlarındaki test düzeneğinde kavitasyon su jeti erozyon testlerini gerçekleştirmiş ve çeşitli malzemelerde erozyon oluşumunun nozul geometrisine bağlılığını araştırmıştır. Bu kapsamda çalışmasında erozyon oranının farklı nozul geometrisine göre değişimini ortaya çıkarmıştır (Soyama, 2013).

Laguna-Camacho ve diğ. (2013); alüminyum malzemeler kullanarak ASTM G32 test yöntemi ile erozyon testlerini yüksek hızlı ve çözünürlüklü kamera kullanılarak aşınan kısımlar ile gözlemlenmişlerdir (Şekil 3.4.). Sonuçta malzeme, test süresi, aşındırıcı katkılar, katı konsantrasyon, sıvı karakteristikleri, çarpma açıları ve baloncuk oluşumu gibi parametrelerin kavitasyon erozyonunu önemli derecede etkilediği sonucuna varmışlardır (Laguna-Camacho ve diğ., 2013).

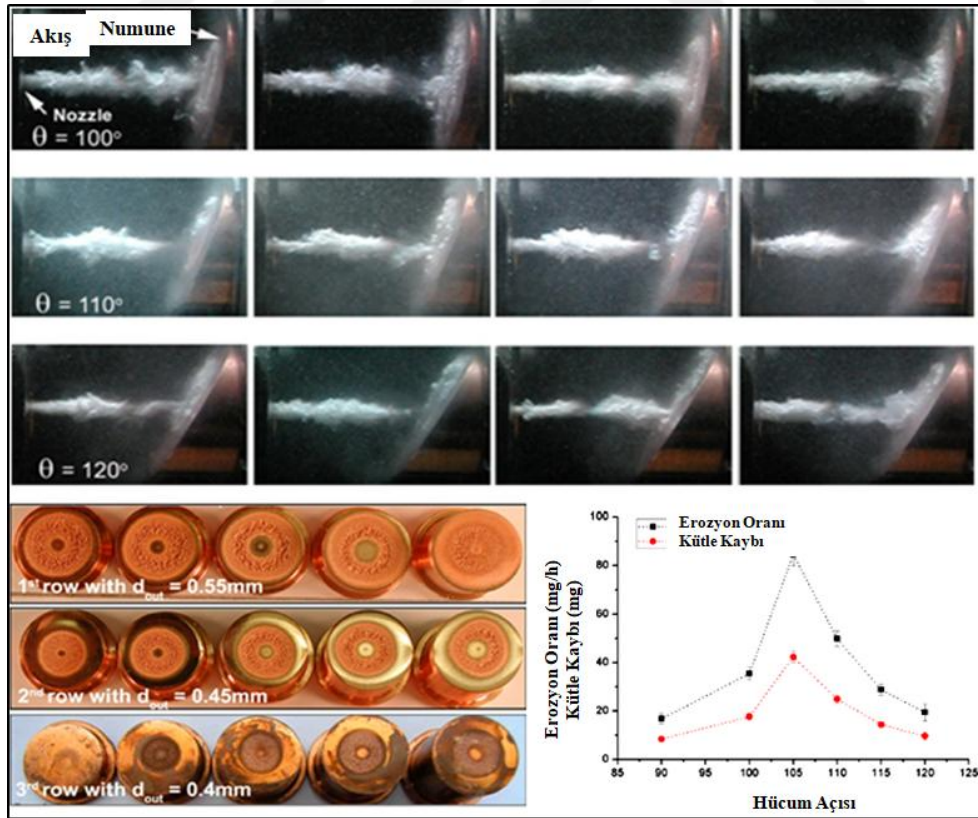


Şekil 3.4. (a) Testlerden önce paslanmaz çelik, (b) 80 dakika sonra titreşimli test cihazı ile aşınma görseli (Laguna-Camacho ve diğ., 2013)

Li ve diğ. (2016), nozul iç yüzey pürüzlülüğünün kavitasyon erozyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini, erozyon yoğunluğu ve verimliliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı yüzey pürüzlülük değerlerine sahip (0,8 μm , 1,6 μm , 3,2 μm , 6,3 μm , 12,5 μm ve 25 μm) altı adet kavitasyon nozulu kullanarak saf alüminyum (1070A) numunelerin kütle kaybı ve çeşitli giriş basınçlarında ve nozul ile numune mesafelerinde spesifik enerji tüketimi ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün, optimum mesafelerde kavitasyon erozyon yoğunluğu üzerinde ve erozyon verimliliği üzerinde büyük etkileri olabileceğini göstermiştir (Li ve diğ., 2016).

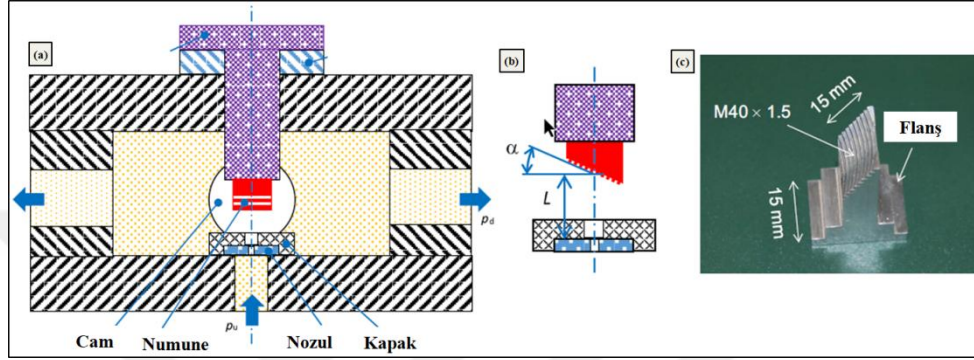
Dular (2016), ASTM G32 standartlarında oluşturduğu radyal kesitli test düzeneği ile sıcaklığın kavitasyon erozyonu üzerine etkisini alüminyum malzemeler üzerinde araştırmıştır. Çalışmalarda maksimum kavitasyon erozyonunun 60 °C su sıcaklığında ortaya çıktığı sonucuna varmıştır (Dular, 2016).

Hutli ve diğ. (2017), geometri faktörlerinin kavitasyon erozyonu üzerindeki etkisini, bakır numuneler üzerindeki kavitasyon oluşumunu yüksek basınçlı su jeti kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada kavitasyon baloncuğu çarpma açısının erozif aşınma olayı üzerindeki etkisini sunmuşlardır. Testlerinde kavitasyon jetinin çarpma açısı; nozul eksenini ile hedef yüzey arasındaki açı olarak tanımlanmıştır. Sonuçlar, kütle kaybı ve erozyon hızının, incelenen parametrelere güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermiştir. Gözlenen erozyon hasarlarının boyutu ve göreceli oluşumu (kraterlerin çapı ve derinliği) nozul çapına (d) ve nozul ile numune mesafesine bağlıdır. Farklı nozul çapları veya stand off mesafesi için elde edilen erozyon oranı arasındaki farklar ise kavitasyon balonlarının uzamsal dağılımlarındaki farklılıklara ve çökme yoğunluklarındaki farklılıklara ve kavitasyon bulutlarının dökülme ve boşalma oranlarına bağlanmıştır (Hutli ve diğ., 2013a; Hutli ve diğ., 2013b). Deneylerde numune yüzeyi eğim açısının; erozyon oranı ve erozyon paterni üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.5) (Hutli ve diğ., 2017). Gözlemleri Blake ve Gibson (1981) ve Philipp ve Lauterborn'un (1998) sonuçlarıyla da desteklenmiştir.



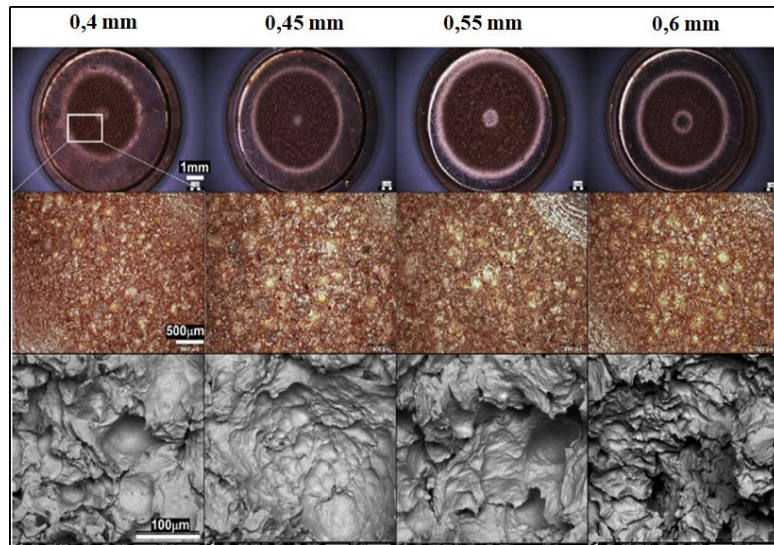
Şekil 3.5. Farklı eğim açılarıyla numunelere çarpan kavitasyon jetinin optik kamera görüntüleri (Hutli ve diğ., 2017)

Kazama ve diğ. (2015) kavitasyon çarpma yüzeyi geometrisinin etkisini incelemek için, su jeti düzeneği kullanılarak kavitasyon erozyonu testleri gerçekleştirmişlerdir. A5056 alüminyum alaşımından düz ve yivli yüzeylere (M40x1,5) ile eğimli yüzeylere sahip numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3.6.). Test sıvısı olarak 40° C’de viskozite derecesi 32 olan hidrolik yağ kullanılmıştır. Test sonuçları özet olarak geometrik parametrelere bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuşlardır (Kazama ve diğ., 2015).



Şekil 3.6. (a) Kavitasyon test odası (b) numune ve nozul arası mesafe (c) eğimli numune şematik gösterimleri (Kazama ve diğ., 2015)

Hutli ve diğ. (2018), kavitasyon su jeti ile malzeme üzerinde geometrik parametrelerin önemine ilişkin analitik ve deneysel bir çalışma sayesinde S_{off} mesafesi, boyutsuz S_{off} mesafesi ve nozul çapını inceleyen çalışmayı karakterizasyon yöntemleri gerçekleştirmişlerdir. Özetle teorik ve deneysel çalışmalardan, en yüksek aşınma meydana getiren optimal boyutsuz mesafeye varılmıştır (Hutli ve diğ., 2018).



Şekil 3.7. Nozul çapının erozyon oranına olan etkisinin optik ve SEM mikroskobu görüntüleri (Hutli ve diğ., 2018)

Peng ve diğ. (2018), alüminyum numunelerin kavitasyon erozyonu dirençlerini incelemişlerdir. Çalışmada, testler süresince oluşan kavitasyon bulutları yüksek hızlı kamera sistemi ile detaylandırılmıştır. Nozul ile numune arası mesafe (S_{off}) ile kavitasyon erozyonunun değiştiği tespit edilmiştir. Düşük S_{off} mesafesinde erozyonunun etkisiz olduğu, S_{off} mesafesi arttırıldığında belli bir mesafeye kadar erozyonunun arttığı (kavitasyon oluşumu ile baloncuk patlamasının her ikisinin de optimum derecede etkili olduğu bir nozul ile numune arası mesafesi olduğu) ve bu mesafenin üstünde erozyonunun etkisini kaybettiği belirtilmiştir (Peng ve diğ., 2018).

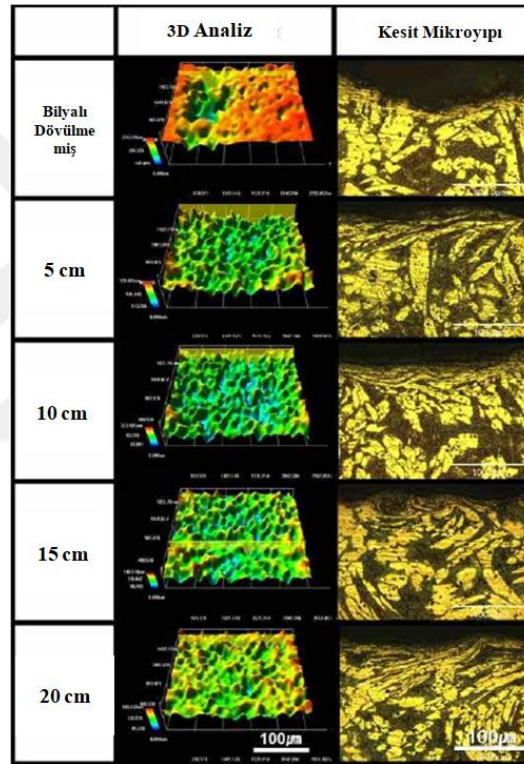
Usta (2019), doktora tezinde pervane üretiminde yaygın olarak kullanılan CU1, CU3 ve CU4 malzemelerini farklı kavitasyon parametreleri altındaki test koşullarında incelemiştir. Test edilen numunelerin mekanik özellikleri değerlendirildiğinde, erozyon açısından en dayanıklı malzemenin CU4 olması beklenmekteyken testler sonucunda, kavitasyon erozyonuna en dayanıklı olanın CU3, en az dayanıklı olanın ise CU1 olduğu saptanmıştır (Usta, 2018).

Tong Yao ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, gemi pervanesi imalatında kullanılan üç tipik bakır alaşımının Manganez Pirinç (Mn-pirinç), Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) ve Nikel Alüminyum Bronz (NAB-CU3)'un % 3,5'luk NaCl çözeltisi içindeki kavitasyon korozyon davranışı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada kavitasyon erozyonu kütle kaybı, elektrokimyasal süreç, kavitasyon erozyonu ve korozyon arasındaki sinerji ve aşınmış yüzeyin morfolojisi karakterize edilmiştir. Kavitasyon erozyon testi için ASTM G32-10 standardına uygun ultrasonik titreşimli kavitasyon cihazı kullanılmıştır. Sonuçlar, üç alaşımın 5 saatlik kavitasyon erozyonundan sonra kavitasyon direncine göre sıralama direnci: NAB>MAB>Mn-pirinç şeklinde olmuştur. Elektrokimyasal sonuçlarda ise kavitasyon erozyonu etkisi altında Mn-pirinç ve MAB'ın serbest korozyon potansiyelinin daha pozitif bir değere, aksine NAB için negatif bir değere kaydığı görülmüştür (Yao ve diğ., 2021).

Min-Su Han ve diğ. (2013) elektrokimyasal karakteristikleri ve mikroyapısal değişimleri araştırmak, bakır alaşımının dayanıklılığını iyileştirmek ve yüzey modifikasyonu için yaptıkları araştırmalarında bilyalı dövme işlemi süresini incelemişlerdir. Bilyalı dövme sonucunda yüzeyde pürüzlülük dağılmış ve bilyalı dövme süresinin artmasıyla homojenleşme olayı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, dövme

işlemi uygulanmış numuneler için sertliğin arttığını ve özellikle 3,5 dakikalık bilyalı dövme süresinin, dövülmemiş yüzeye benzer elektrokimyasal özellikler göstererek % 52 oranında bir sertlik artışı temsil ettiğini ortaya koymuşlardır (Han ve diğ., 2013a).

Min-Su Han ve diğ. (2013) çalışmalarında, kavitasyon hasarını azaltmak için bilyalı dövme işlemi parametrelerinden S_{off} mesafesi değişkeninin etkisini araştırmışlardır (Şekil 3.8.). Sonuçta, bilyalı dövme işlemi uygulamasının, tüm deneysel koşullar için dövülmemiş örneklerle kıyasla kavitasyon hasarını azalttığını ortaya koymuşlar ve optimum stand-off mesafesini 10 cm olarak belirlemişlerdir (Han ve diğ., 2013b).

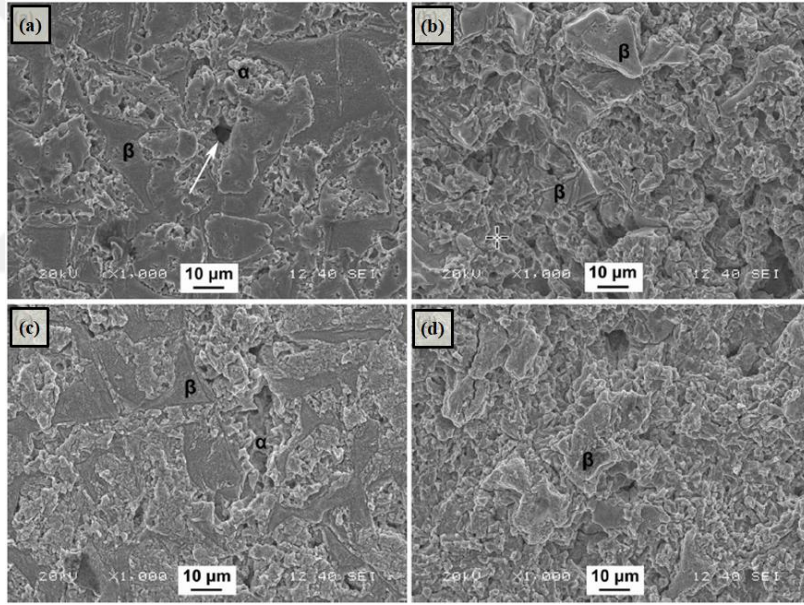


Şekil 3.8. Kavitasyon deneyleri sonrasında bilyalı dövülmüş alaşımlar için 3B analiz ve kesit morfoloji görselleri (Han ve diğ., 2013b)

Min-Su Han ve diğ. (2014)'nin yaptıkları diğer çalışmalarında, bilyalı dövme işlem basıncının Nikel Alüminyum Bronz (NAB) alaşımının elektrokimyasal ve yüzey morfolojik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. NAB-CU3 alaşımının yüzey sertliği, bilyalı dövme işlemi ile 2 ile 5 bar arasındaki tüm bilyalı dövme basınçlarında iyileştirilmiş ve 4 bar bilyalı dövme basıncında yüzey sertliğinin yükseklik değerinin yaklaşık 420 HV olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bilyalı dövme işlemi uygulanmış yüzeyler, bilya çarpışması nedeniyle çok pürüzlü bir yüzey haline gelmiştir. Deniz

suyundaki anodik potansiyodinamik polarizasyon sonucunda ise bilyalı ve bilyasız dövülmüş numuneler arasında korozyon özellikleri açısından önemli bir fark olmadığı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle optimum bilyalı dövme işlem basıncının basıncı 4 bar olarak kabul edilmiştir (Han ve diğ., 2014).

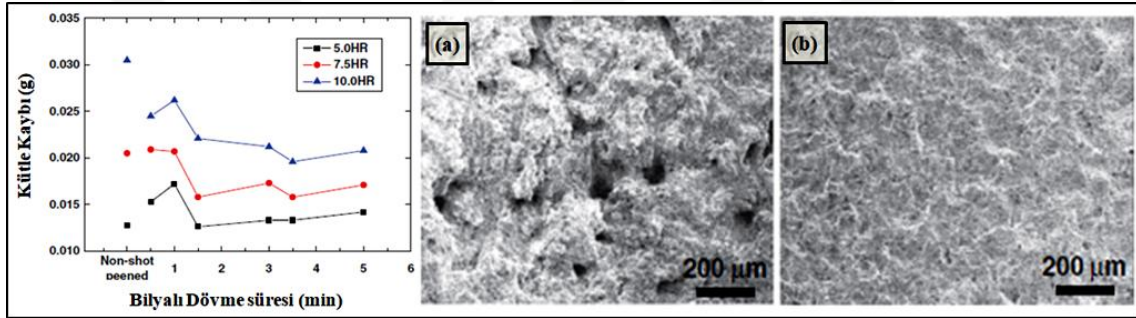
Song ve diğ. (2017), gemi pervane malzemeleri için kullanılan Nikel Alüminyum Bronz (NAB-CU3) ve Manganez Nikel Alüminyum Bronzun (MAB-CU4) korozyon ve kaviteasyon erozyonu davranışlarını; temiz ve sülfürle kirlenmiş % 3,5 NaCl içeren solüsyonlarda incelemiştir. Kaviteasyon erozyon testlerini, ASTM G32 standardına göre ultrasonik titreşimli bir cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, MAB için, NAB ile karşılaştırıldığında daha düşük korozyon ve kaviteasyon erozyon direncine sahip olması ile sonuçlanmıştır (Song ve diğ., 2017).



Şekil 3.9. Kaviteasyon erozyonu sonrası döküm MAB'ın farklı solüsyon ve sürelerde yüzey morfolojileri (Song ve diğ., 2017)

Bingjie Zhao ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada iri taneli NAB-CU3 alaşımını bilyalı dövme yöntemine tabi tutmuşlardır. NAB alaşımında çeşitli aşamaların tane inceltme mekanizmalarını ayrı ayrı inceleyerek NAB alaşımındaki çeşitli fazların (α , β ve üç intermetalik faz (κ_{ii} , κ_{iii} ve κ_{iv}) farklı tane inceltme mekanizmalarına etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, yüzeyde ciddi deformasyon katmanlarının oluştuğunu göstermiş ve NAB alaşımının mikro sertliğinin SPI (Shot Peening Intensities) ile arttığını tespit etmişlerdir (Zhao ve diğ., 2018).

Cho Park ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, Nikel Alüminyum Bronz (ALBC3-CU3) alaşımının yüzeyine, mukavemet ve kavitasyon özelliklerini iyileştirmek için bilyalı dövme işlemi uygulamışlardır. Bu nedenle kavitasyon direncinin değerlendirilmesi, hasarın kapsamının araştırılması ve kütle kaybının belirlenmesi için kavitasyon testleri gerçekleştirmişlerdir. Kavitasyon oluştu.rmak için ise modifiye edilmiş ASTM Standardı G32-92'ye uygun ultrasonik titreşimli test düzeneği kullanılmıştır. Özellikle 3,5 dakikalık bilyalı dövme sürelerinde neredeyse hiç kavitasyon hasarı gözlenmemiş olup bu sürenin kavitasyon direncinde % 35,7'lik bir gelişme sağladığı için optimum bilyalı dövme koşulu olarak kabul etmişlerdir. Sonuç olarak bilyalı dövme işlemi alaşım dayanıklılığını artırarak, basınç artık gerilimi oluşumu ve mikroyapının iyileştirilmesi yoluyla kavitasyon direncini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir (Park ve diğ., 2019).



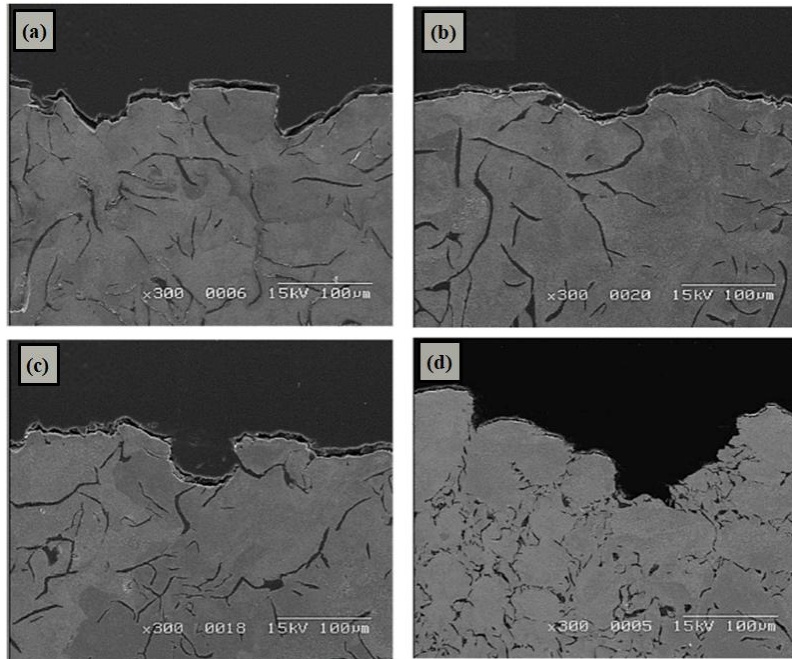
Şekil 3.10. Kavitasyon deneyleri sonrası yüzey morfolojileri ve kütle kaybı; (a) dövülmemiş ve (b) 3,5 dk bilyalı dövülmüş (Park ve diğ., 2019)

Yuting Lv ve diğ. (2019), Nikel Alüminyum Bronz (NAB-CU3) alaşımını bilyalı dövme işlemine tabi tutmuş ve SPed NAB alaşımının korozyon direnç özelliklerini sistematik olarak incelemişlerdir. Sonuçlarda, SP işleminin bilyalı dövme yoğunluğunu kontrol ederek NAB alaşımının korozyon direnci özelliklerini iyileştirebileceğini göstermişlerdir. Bununla birlikte, bilyalı dövme yoğunluğu kritik bir değeri aştığında, püskürtme ile dövülmüş numune yüzeyinde ortaya çıkan büyük çatlaklar, yongalar ve pullanma nedeniyle daha yüksek pürüzlülük değerleri, korozyon direnci özelliklerini bozabileceğini ifade etmişlerdir (Lv ve diğ., 2019).

Hirotooshi Sasaki ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada katmanlı imalat ile üretilen bir metalinin kavitasyon erozyon direncini araştırmak için ASTM G134 standartlarında bir kavitasyon jeti kullanılarak bir kavitasyon erozyon testi yapmışlardır. Elektron ısıtma yoluyla imal edilen titanyum alaşımı Ti6Al4V'nin test örneklerinin yorulma

mukavemetini iyileştirmek için çeşitli dövme yöntemleri kullanmışlardır. Yüzey işlemi uygulanmadan tasarlanmış katmanlı imalat metalinin kavitasyon erozyon direnci, dökme metalinkinden çok daha düşüktür. Sonuçta çeşitli dövme yöntemleri kullanılarak işlenen metalinin sonuçları incelediğinde ise kavitasyonlu dövme ve aşındırıcı kavitasyonlu dövme için erozyon oranının sırasıyla yaklaşık % 40 ve % 95 oranında azaldığı görülmüştür. Bu nedenle metalin kavitasyon erozyon direncinin dövme işlemi ile iyileştirilebileceğini tespit etmişlerdir (Sasaki ve diğ., 2020).

Cho Park. (2021) yaptığı çalışmada, deniz ortamı koşullarında gri dökme demirin kavitasyon erozyon direncini iyileştirmek için en uygun bilyalı dövme işlemi koşullarını araştırmıştır. Ayrıca gri dökme demirin kavitasyon erozyonu hasar mekanizması detaylı olarak tartışılmıştır. Çeşitli püskürtme basıncı ve zaman değişkenleriyle yapılan bilyalı dövme işlemi sonrası ASTM G32 standardına göre gerçekleştirilen kavitasyon erozyon testi ile yapılmıştır. İncelemelerde bilyalı dövme işleminin değişkenliklerine göre kavitasyon erozyonu hasarının eğilimi, test öncesi ve sonrası numunenin kütle kaybı oranı, yüzey ve kesit analizleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, kavitasyon aşınmasını en aza indirebilecek bilyalı dövme işlemi koşulu, püskürtme basıncının en düşük ve süresinin en kısa olduğu zamanda tespit edilmiştir (Park ve diğ., 2021).



Şekil 3.11. Kavitasyon erozyon testleri sonrası SEM kesitleri; (a) bilyalı dövmesiz (b) 5 saniye boyunca 1 bar (c) 10 saniye boyunca 2 bar ve (d) 10 saniye boyunca 3 bar bilyalı dövme işlemleri (Park ve diğ., 2021)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

Bakır alaşımları mukavemet, korozyon ve kavitasyon dayanımları nedeniyle günümüzün önde gelen endüstriyel alaşımlarını oluşturmaktadır. Alaşımlarda bakır elementinin yanı sıra kullanılan ana alaşım elementlerinin başında alüminyum, nikel, demir, silisyum ve manganez elementleri bulunmaktadır. Bu tip alaşımların kullanım alanlarından biri de denizcilik sektörü olup en yaygın uygulama alanları gemi pervaneleridir. Kullanılan pervane malzemesinin gerektirdiği özellikler ise büyük ölçüde pervanenin takıldığı geminin görev ve hizmet koşullarına bağlı olması istenir. Bununla birlikte, sahip olması gereken ve en çok arzu edilen özellikleri şöyledir (Carlton, 2012): kavitasyon ve korozyona karşı iyi direnç, deniz suyu içerisinde yüksek yorulma direnci, darbelere ve çatlak oluşumuna karşı direnç, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, kaynaklanabilirlik ve müteakip çatlaklardan kurtulma dâhil olmak üzere iyi fiyat, onarım özellikleri, dökülebilirlik ve döküm özellikleridir. Bu kapsamda denizcilik endüstrisi, istenen özellikleri karşılamak için gemi pervanesi üretiminde kullanılan bakır alaşımlarını CU1, CU2, CU3, CU4 tiplerinde sınıflandırmış ve bu alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 4.1 ve mekanik özellikleri ise Tablo 4.2'deki gibi verilmiştir (Loyd, 2009).

Tablo 4.1. Alman Loydu bakır alaşımları kimyasal bileşimi (% kütlece) (Loyd, 2009)

Alaşım Tipi	Kimyasal Bileşim (% kütlece)							
	Cu	Al	Mn	Zn	Fe	Ni	Sn	Pb
CU1 Mn Bronz	55-62	0,5-3,0	0,5-4,0	35-40	0,5-2,5	maks. 1,0	maks. 1,5	maks. 0,5
CU2 Mn-Fe Bronz	50-57	0,5-2,0	1,0-4,0	33-38	0,5-2,5	3,0-8,0	maks. 1,5	maks. 0,5
CU3 Ni-Al Bronz	77-82	7,0-11,0	0,5-4,0	maks. 1,0	2,0-6,0	3,0-6,0	maks. 0,1	maks. 0,03
CU4 Mn-Al Bronz	70-80	6,5-9,0	8,0-20,0	maks. 6,0	2,0-5,0	1,5-3,0	maks. 1,0	maks. 0,05

Tablo 4.2. Pervaneler için alaşımlı bakır dökümlerin mekanik özellikleri (Loyd, 2009)

Alaşım Tipi	Akma Sınırı (min.) $R_{p0.2}$ (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (min.) R_m (N/mm ²)	Kopma Uzunluğu (min.) A_5 (%)
CU1	175	440	20
CU2	175	440	20
CU3	245	590	16
CU4	275	630	18

Tez çalışmasında kullanılan numuneler, görev yapmakta olduğum İstanbul Tersanesi Komutanlığı döküm fabrikasında çalışma şartlarında kavitasyona maruz kalan ve mevcut durumda aktif olarak çalışan gemi pervanesi döküm alaşımından elde edilmiştir. Beş kanatlı gemi pervanesi Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımı için hazırlanan 1300 kg ağırlığındaki döküm karışımının sıcaklığı 1250 °C'ye kadar çıkartılmıştır. Kum ile gerçekleştirilen kalıp işlemi sonrası ortam koşullarında pervane bırakılmış ve soğutulmuştur (Şekil 4.1). Bu esnada döküm için tasarlanmış yolluk kısmındaki kısımdan ise testler için numune oluşturacak silindirik parça temin edilmiştir. Müteakip testere ve torna talaşlı imalat işlemleri ile temin edilen parça çap d=20 mm, kalınlık t=10 mm olarak istenilen ölçülere getirilmiştir. Tablo 4.3'te döküm bakır alaşımı numunesinin PMI Master Pro (İngiltere) marka/model cihazından alınan elementel bileşim analizi verilmiştir.

Tablo 4.3. Döküm MAB alaşımı elementel analizi (% kütlece)

Malzeme Adı	Kimyasal Element Bileşimi									
Dökme MAB	%Cu	%Mn	%Al	%Ni	%Fe	%Zn	%Pb	%Si	%Cd	%Se
	77,3	10,3	7,00	2,5	2,67	0,0715	<0,0050	0,0052	<0,0020	0,0591
	%Mg	%Cr	%Sn	%As	%Be	%Ag	%Co	%Bi	%Zr	
	0,0011	0,0123	0,0074	0,0379	<0,00101	<0,0010	0,00201	0,0068	0,0041	



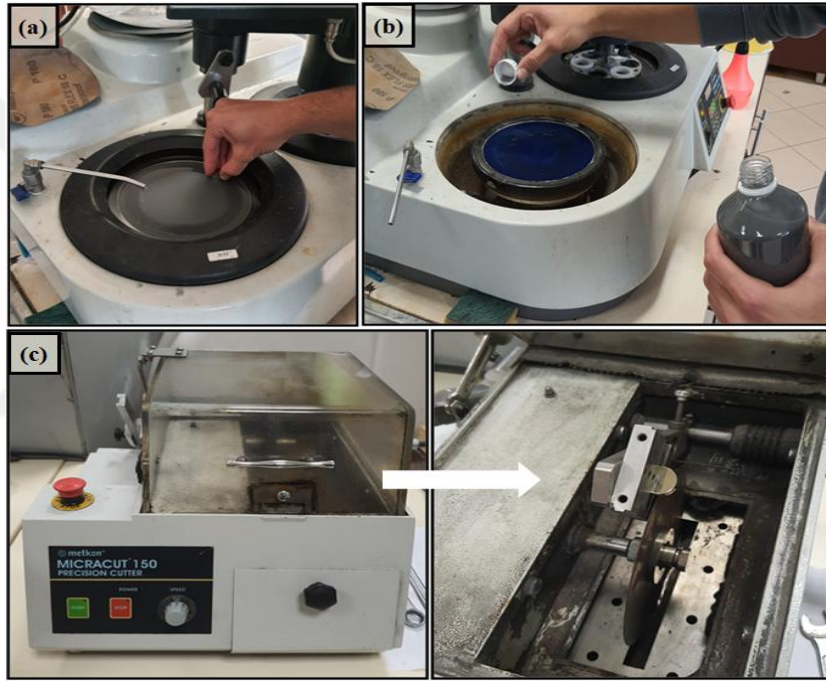
Şekil 4.1. MAB-CU4 alaşımı döküm aşaması basamakları (a) döküm aşaması (b) beş kanatlı gemi pervanesi

4.1.1. Test Çalışmaları ve Metalografik İncelemeler için Hazırlanan Numuneler

İmalat işleri sonrasında testlerde kullanılacak farklı pürüzlülük ve özellikteki numunelerin standart ve benzer özellikte olmaları önem arz etmektedir (ASTM G134, 2010). Bu nedenle talaşlı imalat işleminden çıkmış test numunelerinin yüzeydeki kesici takım izleri ve deforme olmuş pürüzlü tabakaları kaldırılarak yüzeylerinin standart hale getirilmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda aynı koşullarda kavitasyon erozyonu testlerinin gerçekleştirilmesi için tüm numunelerin yüzey zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler için zımparalama sırasında kabadan inceye doğru 320, 400, 600 ve 1000 numara zımpara kâğıtları kullanılmıştır. İnce zımparalama işleminde aşındırma kapasitesi daha az olduğundan kaba zımparalamaya göre daha uzun süre zımparalama işlemi yapılmıştır. Bir numune için yaklaşık 25 dakika kadar zımparalama işlemi yapılmıştır. Mekanik parlatma için 2400 d/dk hızla dönebilen diske bağlı branda bezi ve beze sürdüğümüz polisaj parlatma pastasından oluşan kendi tasarımı parlatma cihazından faydalanılmıştır. Parlatma işlemi aşındırıcı partiküller içeren bir pastanın belirli aralıklarla parlatma bezine sürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Parlatılan numuneler önce kir, toz, tortu ve yabancı maddelerin temizlenmesi için özel sprej ile temizlenmiş daha sonra Bondelin Sonorex (Almanya) marka ultrasonik banyo cihazında 30 °C sıcaklıkta 20 dakika boyunca etil alkol banyosu ile yıkanıp saç kurutma makinesi ile kurutularak kavitasyon erozyonu test çalışmalarına hazır hale getirilmiştir. Ayrıca kavitasyon erozyonu testleri için standardize edilen MAB-CU4 numunelerinin kütle ölçümleri ve yüzey pürüzlülük ölçümleri tekrarlı olarak alınmıştır. Alınan yüzey pürüzlülük değerleri R_a , R_q , R_z , R_{3z} ortalama değerleridir.

Kavitasyon erozyonu testleri öncesi MAB-CU4 alaşımının metalografik incelemeleri ile içyapı ve karakterizasyon çalışmaları da yapılmıştır. Bu işlemlerde ilk olarak içyapı incelemeleri için METKON Gripo 2V (Almanya) marka zımpara cihazı ile sırasıyla kabadan hassasa doğru 320, 600, 1000 ve 2500 meshlik zımparalar ile numunelerin zımparalanması sağlanmıştır (Şekil 4.2 (a)). Zımparalama işleminden sonra parlatma işlemi için sırasıyla 9, 6, 3 ve 1 μm 'lik çuha ve uygun solüsyonda (parlatma sıvısı) elmas süspansiyon kullanılmıştır (Şekil 4.2 (b)). Parlatılan numune önce su, sonra alkol ile yıkanarak saç kurutma makinesi ile kurutularak yüzey mikroyapı incelemesi dağlanmaya hazır hale getirilmiştir.

Kesit mikroyapı incelemesi için ise Metkon (Türkiye) marka kesme cihazı kullanılarak kesme işlemi ile numune alma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2 (c)). Hassas kesme işlemi sonrası kesit mikroyapı incelemeleri ve numune tutumunun daha kolay olabilmesi için soğuk bakalit kalıba alma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra soğuk bakalite alınmış MAB-CU4 numunesinin kesit yüzeylerine tekrar 320, 600, 1000 ve 2500 mesh'lik zımparalama işlemi ve 9, 6, 3 ve 1 μm uygun çuhalar ve elmas süspansiyon ile parlatma işlemleri uygulanarak, ultrasonik banyoda 15 dakika süre ile temizlenmesi sonrası dağlama işlemine geçilmiştir. Tablo 4.4'te otomatik zımparalama ve parlatma işlemlerinin uygulama parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.2. (a) Otomatik zımparalama ve (b) parlatma işlemi (c) kesit incelemesi için kesme işlemi

Tablo 4.4. Otomatik zımparalama ve parlatma parametreleri

Aşama		Uygulanan Kuvvet (N)	Dönme Hızı (dev/dk)	Numune ve Tablanın Rölatif Hareketi	Süre
Zımparalama (mesh)	320	40	300	Aynı yönlü	Derin izler kaybolana kadar
	600				
	1000				
	2500				
Parlatma (μm)	9	30	150	Zıt yönlü	8 dk
	6				6 dk
	3				4 dk
	1				4 dk

Bu çalışmaların yanında bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapı ve yüzey ve yüzey altı özelliklerinin metalografik olarak incelenmesi için gerçekleştirilen çalışmalar da yapılmıştır. Bu kapsamda hassas kesme işlemi sonrası bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin yüzey incelemelerinin yapılabilmesi için ve numune tutumunun daha kolay olması için soğuk bakalite alınmıştır. Kesit incelemeleri yapılacak numune ise sıcak bakalite alınmıştır. Soğuk bakalite alınmış MAB-CU4 alaşımı numunesinin yüzeylerindeki bilyalı dövme etkisinin kaybolmaması için hassas bir şekilde parlatma işlemi uygulanmıştır. Numune, 3 ve 1 µm elmas süspansiyon ve uygun çuhalar kullanılarak parlatılmış ve sonrasında dağlama işlemine hazırlanmıştır. Sıcak bakalite alınmış kesit mikroyapısı incelenecek numune ise ilk olarak Metkon (Türkiye) marka yarı otomatik zımpara cihazı ile sırasıyla kabadan hassasa doğru 320, 600, 1000 ve 2500 meshlik zımparalar kullanılarak içyapı incelemeleri için hazırlanmıştır. Zımparalama işleminden sonra parlatma işlemi için sırasıyla 9, 6, 3 ve 1 µm'lik çuha ve uygun solüsyonda (parlatma sıvısı) elmas süspansiyon kullanılmıştır.

Tüm bu işlemler sonrası, dağlama işlemi malzemeler için belirlenmiş dağlama çözeltileri ASM Handbook 9. Cilt, Metallography and Microstructures bölümünden seçilmiştir (Handbook, 2004). Çalışmamızda da orijinal numune (hiçbir yüzey işlemi uygulanmamış) ve bilyalı dövüldükten sonraki mikroyapı incelemeleri için Kroll dağlayıcısı hazırlanmış ve numuneler daldırılarak veya sürülerek 35 saniye süreyle dağlama işlemine tutulmuştur. Kullanılan Kroll dağlayıcı içeriği 1 ml HF, 3 ml HNO₃, 96 ml saf su karışımı içermektedir. Dağlama sonrası numuneler, su ve alkol ile yıkanmış ve reaksiyon durdurularak kurutma işlemi uygulanmıştır. Böylece numunelerin metalografik olarak hazırlıklarının yapılma işlemi tamamlanmıştır.

4.2. Yöntemler

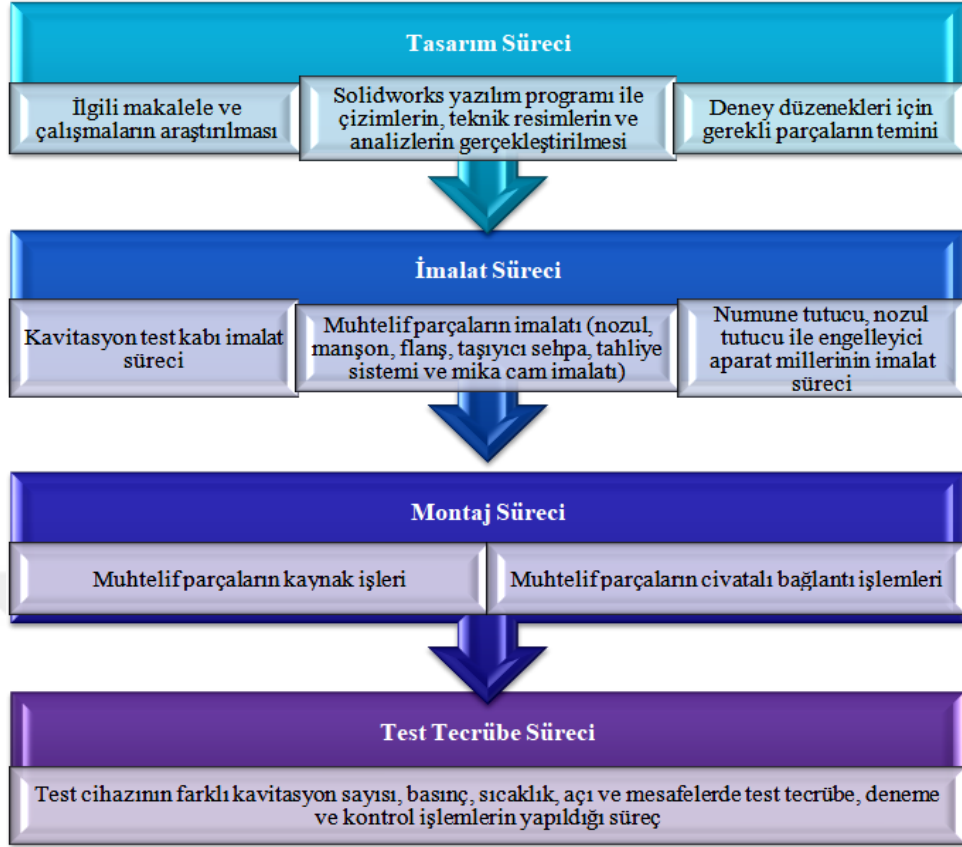
Tez çalışmasında üç farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar MAB-CU4 alaşımının, kavitasyon erozyonu aşınması etkisini incelemek için kavitasyon su jeti erozyonu yöntemi, kavitasyon erozyonunu etkileyen parametrelerin etkinliğinin irdelenmesi için Taguchi deney tasarımı yöntemi ve son olarak alaşımın yüzey ve yüzey altı bölgelerinde mekanik özelliklerin gelişimini sağlamak için bilyalı dövme yöntemleridir.

4.2.1. Yüksek Basıncılı Kaviteasyon Su Jeti Erozyon Yöntemi

Bahse konu yöntemde ASTM G134 standartlarında kurulmuş cihazda aşınma (kaviteasyon erozyonu) testlerinin yapılması gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinin tasarımı ve imalatı tarafımızca ASTM G134 standartlarında belirtilen standartlara göre hazırlanmıştır (ASTM G134, 2010). Geliştirilmiş test düzeneği; sızdırmaz çelik paslanmaz bir kap (iç çap $d=273$ mm, uzunluğu $L=300$ mm ve kalınlığı $t=32$ mm olan mika cam ile kapatılmış) olmakla beraber numunelerin farklı kaviteasyon hücum açılarında (30° , 60° ve 90°) kaviteasyona maruz bırakılmasına imkân verecek tasarım ve su jeti makinesi, sıcaklık, basınçölçer ve valfler olmak üzere yardımcı elamanlardan oluşmaktadır. Bu kapsamda cihaz tasarım ve imalat akış diyagramı Şekil 4.3'te verilmiş olup Şekil 4.4'te Solidworks yazılım programında oluşturulan tasarım süreci gösterilmiştir. Yüksek basınçlı kaviteasyon su jeti erozyonu test düzeneğinin Şekil 4.5'te ise şematik gösterimi, Şekil 4.6'da da tasarım, imalat ve montaj işleri tamamlanmış rerimlerine yer verilmiştir.

Yöntemde kaviteasyon su jeti erozyon testlerinin değişken parametrik fiziksel koşullarının başında gelen giriş basıncı (P_1), test kabı iç basıncı (P_2), akış sıcaklığı (T), test süresi (t), nozul çapı ($D_{\text{nozül}}$), nozul ile numune arasındaki mesafe (S_{off}) ve kaviteasyon sayısı (σ) değişkenlerinden yararlanılmıştır. Doktora tez çalışmasında da önce farklı nozul ile numune arasındaki mesafelerde ve kaviteasyon hücum açılarında, sonrasında da farklı kaviteasyon sayısında erozyon direnç testleri gerçekleştirilmiştir. Test cihazı tasarımından bahsetmek gerekirse; numunelerin yerleştirilmesi, değişimi ve ayarlanması için sabit kapak ve menteşe sistemi ile açılabilmesi için bir kapak donanımı şeklinde tasarlanmıştır. Bunun yanında kaviteasyon (test) kabında kullanılan ve kapaklara monteli mika camlar ile test tüpünün içinin ve kaviteasyon görsellerinin görüntülenebilmesi amaçlanmıştır.

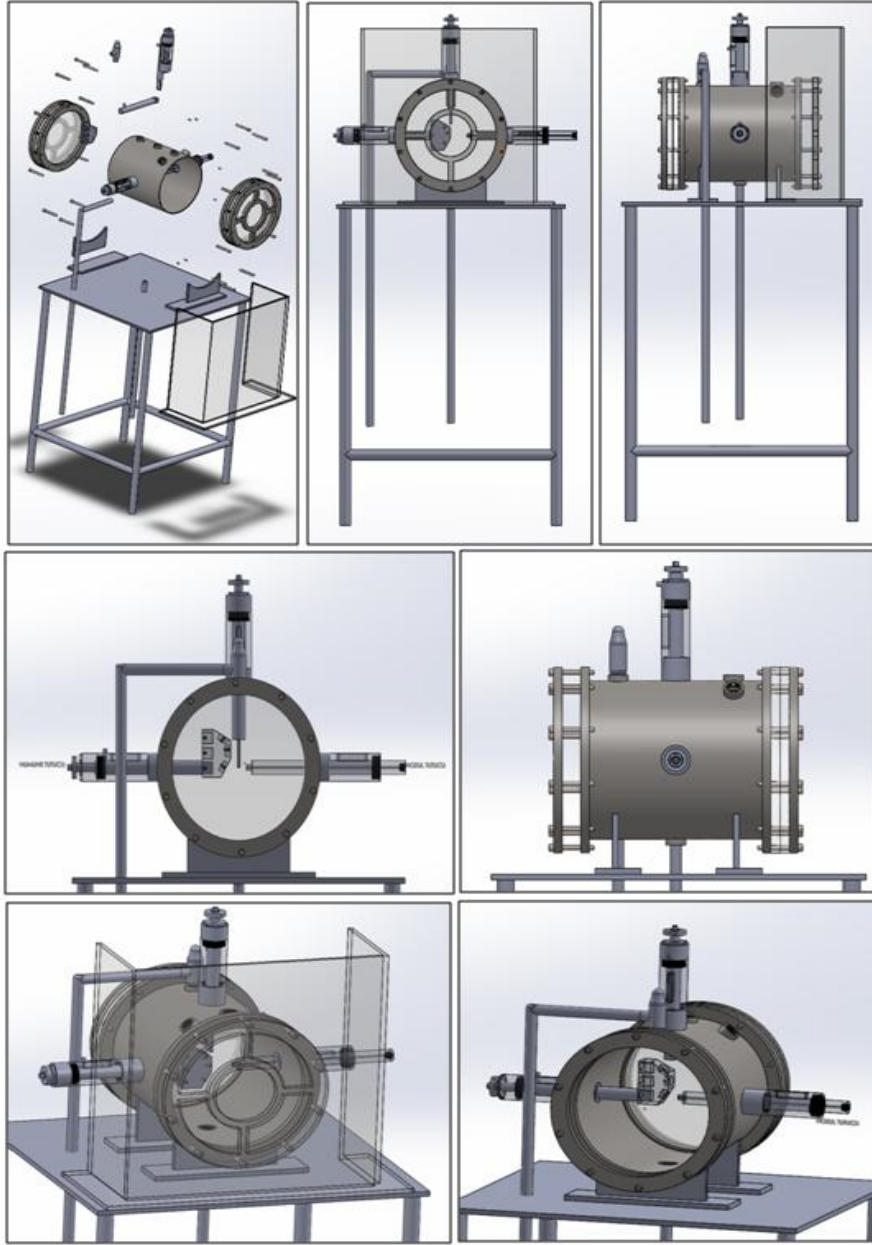
Test düzeneğinde bulunan basınçlı kabın (test kabı) içerisinde, nozul tutucu miline yüksek basınçlı su jeti; numune tutucu miline ise test numuneleri monte edilmiştir. Nozul ve numune tutucu milleri kaviteasyon test kabı içerisinde yatay mesafede hareket edebilmektedir. Aynı zamanda test numunelerinin yerleştirildiği ve 30° , 60° ve 90° kaviteasyon hücum açısına izin verebilen aparatta numune tutucu miline montelidir.



Şekil 4.3. Tasarım, imalat, montaj ve test aşamaları

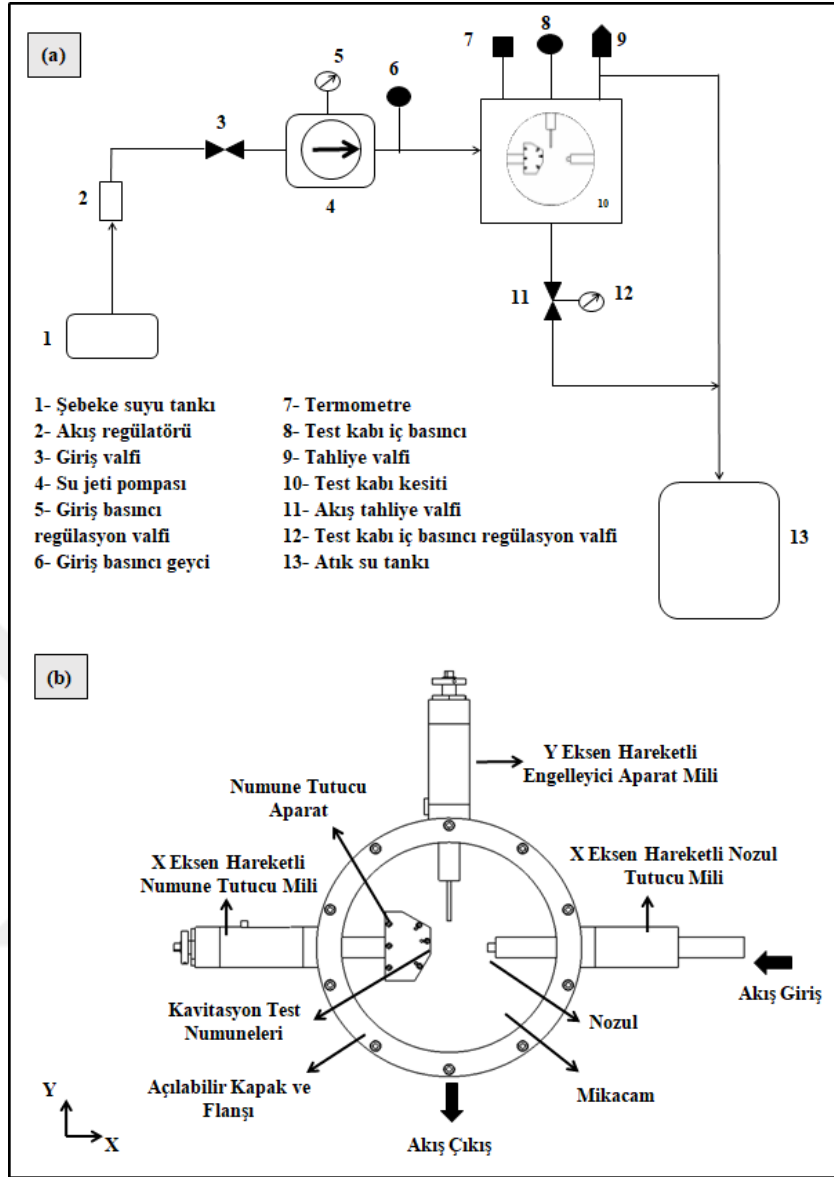
Çalışmada numune üzerindeki aşınma etkisini daha iyi analiz edebilmek için numune tutucu mili üzerine monte edilebilen ve 30°, 60° ve 90° kavitasyon hücum açılarında numunelerin kavitasyona maruz kalmasını sağlayan numune tutucu aparat imal edilmiştir. Bu sayede farklı ve özgün bir fiziksel parametre sonuçlarının elde edilmesi beklenmiştir. Testlerde kavitasyon jetinin çarpma açısı; nozul eksenine ile hedef numune yüzeyi arasındaki açı olarak tanımlanmıştır. Numune tutucu milinin, yatay ekseninde hareket edilebilmesinin sağlanması sayesinde ise nozul ile numune arasındaki istenilen mesafeler ayarlanarak test programları gerçekleştirilebilmiştir.

Engelleyici aparat mili, kavitasyon test kabı içerisindeki ortamın istenilen koşula gelene ve test koşulları sağlanana kadar dikey ekseninde hareket ettirilip nozul ile numune arasında engel oluşturması için tasarlanmıştır. Nozul tutucu mile ise imal edilmiş nozul montajı ve su jeti makinesinin bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Yüksek basınçlı pompadan nozula iletilen şebeke suyu basıncı (giriş basıncı) ve debisi bilinmektedir. Bu bakımdan test düzeneğinde kullanılan nozulun çapı Denklem (2.10)'de verilen formüller ile $d=1,5$ mm çapı olarak hesaplanmış ve imal edilmiştir.



Şekil 4.4. Test düzeneği CAD tasarımları

Test işlemlerindeki yüksek basınçlı jet akışı; pirinç silindir kafalı 5,5 kw gücündeki pompaya sahip, 15 lt/dk su debisi ve 40-200 bar çalışma basıncı olan yüksek basınçlı Lavor Hyper 1515 LP (İtalya) marka su jeti makinesi ile sağlanmıştır. Test düzeneğinde kullanılan bir diğer eleman olan tahliye (pressure relief) valf ayar mekanizması ile test kabı iç basıncının olası artması durumunda tahliye edilerek istenilen basınç değerinde tutulması hedeflenmiştir. Test kabı içerisindeki basıncın ani artmasının önlenmesi için kullanılan relief valfin tahliye basıncı 4 bar olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.5. Testlerin gerçekleştirildiği cihazın şematik diyagramı

Ayrıca test kabı iç sıcaklığı ısıölçer termometre ile ölçülmüş ve basınç geyci ile ise basınç değerleri gözlemlenmiştir. Test kabı iç basıncın ayarlanması test kabının tahliye sistemine bağlı küresel valf ile ayarlanmıştır. Böylece bakır alaşımının kaviteasyon erozyonuna olan direncini inceleyerek ortaya çıkan erozyon ve bu parametreler arasındaki veriler ile:

- Erozyon hızı (EH), test numunelerinin hassas terazi ile ölçülen kütle kaybı değerlerinin (Δ_m) test işlemi için geçen süreye (t) oranıyla Denklem (4.1)'de verilen denklem ile ortaya çıkarılmıştır (Momma ve Lichtarowicz, 1995). Böylece farklı parametreler altında kütle kaybı ve erozyon hızı değişimleri ortaya koyulmuştur.

$$EH = \frac{\Delta_m}{t} \quad (4.1)$$

- Testler sonunda numunelerde oluşan kavitasyon erozyonu görsellerinin kıyaslanması ve
- Kavitasyon su jeti erozyonu uygulanmış numunelere yüzey ve yüzey altı incelemelerinin yapılabilmesi için pürüzlülük, mikroyapı ve SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Yüksek basınçlı kavitasyon su jeti erozyonu test düzeneği kurulumu tamamlandıktan sonra MAB-CU4 alaşımı numuneleri üzerinde tez çalışması için gerekli testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler kütle kaybı ve erozyon hızları testleri; Taguchi deney tasarımı için gerçekleştirilen testler; kavitasyon hücum açısı etkisini incelemek için yapılan testler ve son olarak bilyalı dövme işlemi sonrası gerçekleştirilen kavitasyon erozyon testleridir. Ayrıca her test öncesi ve sonrası numune yüzeyleri fotoğraflanmış, gözlemlenmiş, kütle ölçümü ve yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.6. Kavitasyon su jeti erozyonu test düzeneği imalat ve montaj aşaması sonrası görselleri

4.2.2. Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi

Deney tasarımı yöntemleri mühendislik çalışmalarına önemli avantajlar sağlamaktadır (Tini ve Zeren, 2019). Deney tasarımı yaklaşımını modern yöntemlerle ele alan ve öne çıkaran Genichi Taguchi, kalite kavramını müşterinin ihtiyaçlarına uygun ve ekonomik olarak arttırmak için sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olmak üzere üç aşamadan oluşan robust tasarım kavramını geliştirmiştir. Uyguladığı yöntem üretim ve malzeme süreçlerindeki değişkenliklerin önemle ele alındığı bir metodolojidir (Savaşkan, 2003). Tez çalışmasında bu yaklaşımın detayları dikkate alınarak çeşitli parametrelerin kavitasyon erozyonu aşınma davranışı üzerindeki etkisi Taguchi yöntemi tarafından önerilen deney tasarımıyla incelenmiştir. Taguchi L₉ ortogonal dik düzen deney desenine göre elde edilen verilerin sonuçları ise Sinyal/Gürültü(S/N) oranı analizi, Regresyon, ve Varyans (ANOVA) analizi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Bunun sonucunda da tam faktöriyel deney tasarımındaki deney sayıları azaltılmıştır. Yöntem ile geçerleme kılma (validasyon) ve doğrulama (verifikasyon) çalışmaları gerçekleştirilen test cihazının farklı kavitasyon erozyonu modellerinde erozyon deneylerinin yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca tam faktöriyel deney tasarımında gereken deney sayısının sadece dokuzda biri ile hedeflenen sonuçların elde edilmesi beklenmiştir. Tablo 4.5'te tüm deneylerin yapılması durumunda ortaya çıkan deney tasarım tablosu yer almaktadır. Taguchi L₉ deney tasarımında ise bu deney işlemlerinden kısmi olarak yapılan deneyler ile sonuca ulaşmak istenmektedir. Tablo 4.6'da de bu amaçla belirlenmiş parametre ve seviyeler ile Taguchi analizi gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımı için Tablo 4.7'de yer alan L₉ ortogonal desenin sunduğu kısmi faktöriyel ile yirmi yedi adet deney gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için bu kapsamda 27 saat deney yapılmış, her deney için öncesi ve sonrasında test numunelerinin en az beş kez kütle ölçümü ve yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmıştır.

Tablo 4.5. Tam faktöriyel deney tasarımı tablosu

Parametreler ve Seviyeleri		Kavitasyon Hücum Açısı (°)								
		30			60			90		
		S _{off} (mm)								
		5	10	15	5	10	15	5	10	15
Kavitasyon Sayısı (σ)	0,006	x				x				x
	0,008			x	x				x	
	0,01		x				x	x		

Tablo 4.6. Taguchi analizi parametre ve seviyeleri

Parametre ve Seviyeler	Kavitasyon Sayısı (σ)	İç Basınç (P_2) (Bar)	Giriş Basıncı (P_1) (Bar)	S_{off} (mm)	Kavitasyon Hücum Açısı ($^\circ$)
Seviye 1	0,006	1	150	5	30
Seviye 2	0,008	1,5	180	10	60
Seviye 3	0,01	2	200	15	90

Tablo 4.7. Taguchi L_9 ortogonal dizime göre yapılacak deney sayısı

Deney Sayısı	Kavitasyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kavitasyon Hücum Açısı ($^\circ$)
1	0,006	5	30
2		10	60
3		15	90
4	0,008	5	60
5		10	90
6		15	30
7	0,01	5	90
8		10	30
9		15	60

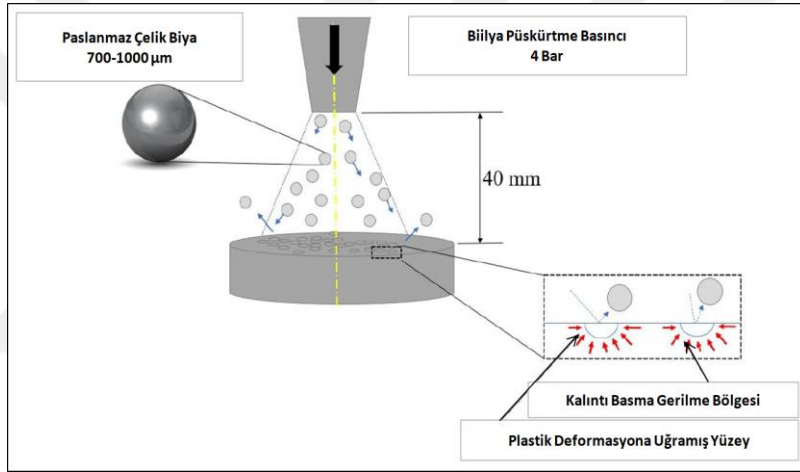
4.2.3. Bilyalı Dövme Yöntemi

Çalışmalarda bilyalı dövme (Shot Peening-SP) işlemleri Şekil 4.8’de görseli verilen kumlama makinesinde gerçekleştirilmiştir. Sistem hava kompresörü, basınçlı hava, püskürtme nozulu, bilya besleme haznesi ile birlikte bilyaların iletiminde kullanılan bağlantı elemanları ile numunelerin monte edildiği bilya dövme tablasından oluşmaktadır. Çeşitli parametreler altında püskürtülen bilyalar nozul yardımıyla numune yüzeyine çarptırılmaktadır. Test cihazı sayesinde dövme işlemi istenilen dövme süresinde, çalışma basıncında, bilya çarpma açısıyla ve nozul ile numune arası mesafesi ayarlanarak gerçekleştirilmiş olup gerçekleştirilen testlerin hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği sağlanmıştır. Çalışma kapsamında bakır alaşımı numunelere Tablo 4.8’de verilen parametreler kullanılarak dövme işlemi uygulanmıştır. Temel olarak, bilyalı dövme işlemi parametreleri mikro çatlak oluşumu veya aşırı yüzey pürüzlülüğü oluşumu gerçekleşmeden ve dövme faydalarını (yani yüzey sertliği ve mikroyapısal özellikler) en üst düzeye çıkarmak için dikkatlice seçilmiştir. Numuneler, 4 bar basınçlı hava ile püskürtülen paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak 120 saniye süre aralığında 40 mm nozul numune arası uzaklık mesafesinde bilyalı dövmeye tabi tutulmuştur. Daha sonra numuneler, bilyalı dövmenin malzeme yüzeyinde neden olduğu plastik deformasyonlardan kaynaklanan parçacıkları ve döküntüleri ortadan kaldırmak için

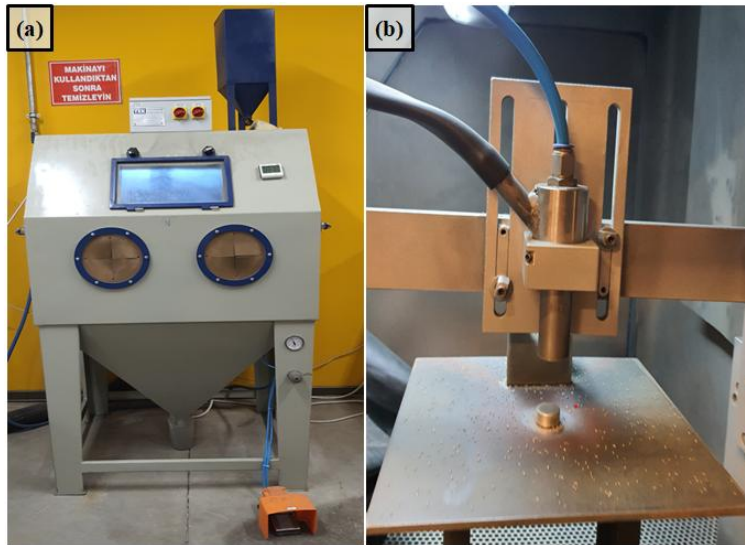
ultrasonik temizlemeye tabi tutulmuştur. Ayrıca her bir işlem öncesi ve sonrasında tüm test numunelerinin hassas terazi ile kütle ölçümlerinin de yapılması sağlanmıştır. Bilyalı dövme işlemine ilişkin parametreleri önceki araştırmalara dayanarak seçilmiştir (Yıldıran Avcu, 2019; Yıldıran Avcu ve diğ., 2020; Yıldıran Avcu ve diğ., 2021; (Chen ve Zhang, 2021; Avcu ve diğ., 2023; Avcu ve diğ., 2021).

Tablo 4.8. Dövme için kullanılan paslanmaz çelik bilya özellikleri

Bilya Türü	S60
Ortalama Çap Ölçüleri	0,7 ila 1 mm
Vickers Sertlikleri	460
Püskürtme Nozul Basıncı	4 Bar
Çarpma Açısı	90°
Etki Süresi	2 dk



Şekil 4.7. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi



Şekil 4.8. Bilyalı dövme test cihazının 3 boyutlu gösterimi (a) bilyalı dövme tezgâhı (b) dövme işlemi test esnası

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Kütle Kaybı ve Erozyon Hızı Değişimi Bulguları

Kütle kaybı ve erozyon hızı testleri için numuneler iki farklı test prosedüründe hazırlanmıştır. Bu test prosedürleri arasındaki fark, farklı giriş basınçlarında kavitasyon erozyonu dirençlerinin karşılaştırılmasıdır. Yüksek basınçlı şebeke suyu giriş basıncı, birinci test prosedüründe $P_1=150$ bar olarak; ikinci test prosedüründe ise $P_1=200$ bar olarak ayarlanarak Lavor Hyper 1515 LP (İtalya) marka su jeti makinesinden sağlanmıştır. Birinci test prosedüründe, Numune 1 düzenli aralıklarla 45 dakika boyunca toplamda 6 saat kavitasyona maruz bırakılmış ve izlenmiştir. İkinci test prosedüründe ise, Numune 8 toplam 13,5 saate kadar belirli aralıklarla kavitasyona maruz bırakılarak test kabından çıkarılmıştır. Testler 22-27 °C sıcaklığında, şebeke suyunda, 1,5 mm nozul çapı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kütle kaybı ve erozyon hızlarını değerlendirmek için kavitasyon su jeti erozyon testleri ilk olarak Numune 1 üzerinde gerçekleştirilen testler ile başlamıştır. 1 nolu numunenin Şekil 5.1’de kavitasyon erozyonu görselleri, Tablo 5.1’de özellikleri, Tablo 5.3’te test çalışması parametreleri ve Tablo 5.5’te ise test çalışmasının sonuçları verilmiştir. Kavitasyon erozyonu testleri, yüksek basınçlı su jeti makinesinin giriş basıncının (P_1) artırılması ile Numune 8 üzerinde devam ettirilmiştir. Giriş basıncının artırılması ile kavitasyon erozyonunun neden olduğu kütle kaybının değişimi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda 8 nolu numunenin Şekil 5.2’de kavitasyon erozyonu görselleri, Tablo 5.2’de test edilecek numunenin test öncesi özellikleri, Tablo 5.4’te test çalışmasının parametreleri ve Tablo 5.6’da test çalışmanın sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.1. Erozyon testleri öncesi özellikleri (Numune 1)

Test Numuneleri	Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri (μm)				Kütle Ölçümleri (m) (g)
	R_a	R_q	R_z	R_{3z}	
MAB 1 Nolu Numune	0,0721	0,0912	0,5511	0,3245	20,66889

Tablo 5.2. Erozyon testleri öncesi özellikleri (Numune 8)

Test Numuneleri	Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri (μm)				Kütle Ölçümleri (m) (g)
	R_a	R_q	R_z	R_{3z}	
MAB 8 Nolu Numune	0,1854	0,2522	1,2478	-	21,0076

Tablo 5.3. Kavitezyon erozyonu test parametreleri (Numune 1)

Test Edilen Malzeme	Test Süresi (t) (sa)	İç Basınç (P_2) (bar)	Giriş Basıncı (P_1) (bar)	Kavitezyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kavitezyon Hücüm Açısı ($^\circ$)
MAB 1 Nolu Numune	Aralıklı 6 saat	1	150	0,006	5	90

Tablo 5.4. Kavitezyon erozyonu test parametreleri (Numune 8)

Test Edilen Malzeme	Test Süresi (t) (sa)	İç Basınç (P_2) (bar)	Giriş Basıncı (P_1) (bar)	Kavitezyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kavitezyon Hücüm Açısı ($^\circ$)
MAB 8 Nolu Numune	Aralıklı 13,5 saat	1	200	0,005	5	90

Kavitezyon su jeti erozyon testleri sonrası yüzey görüntülerinin zamana bağılı değışim serisi görselleri mümkün olduğunca aynı ölçeğe getirilmeye çalışılarak elde edilmiştir (Şekil 5.1 ve Şekil 5.2). Erozyon görülen yerler incelendiğinde, kavitezyon aşınmasına maruziyet (t) arttıkça, test numunesi yüzeylerinde halka benzeri bir desen oluştuğı ve bu desenin zamanla daha belirgin hale geldiğı görülmüştür (ASTM G134, 2010). Ayrıca, erozyon halkasının karakteristiğinin zamana bağılı olarak genişlediğı anlaşılmaktadır (Şekil 5.9 ve Şekil 5.10). Şekil 5.1 (a) ve Şekil 5.2 (a) görsellerinde bulunan numunenin orijinal hali ile kavitezyon su jeti erozyonuna maruz kaldıkça ortaya çıkan yüzeylerdeki erozyon (kararma) görüntüleri ile bu olay doğrulanmaktadır.

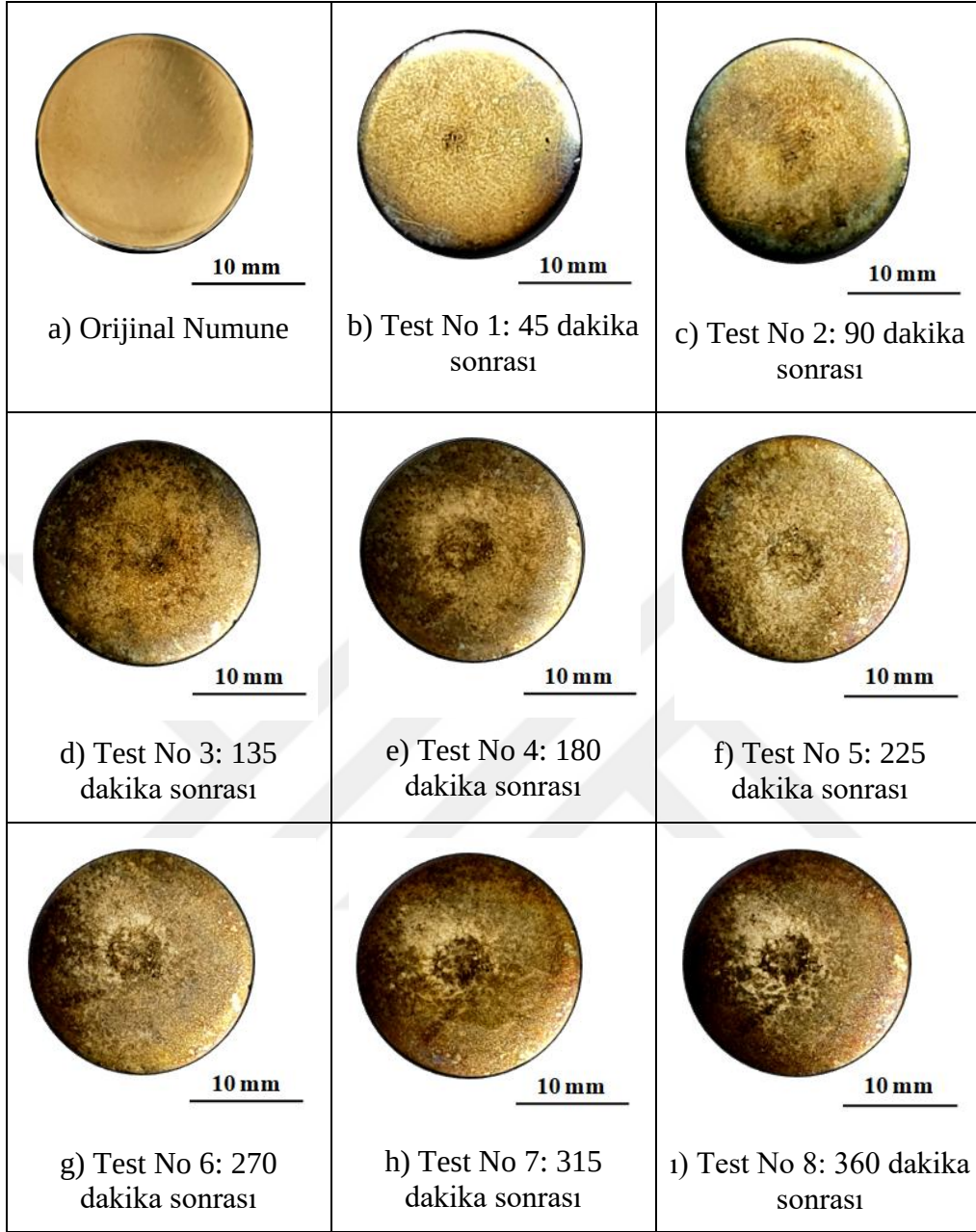
Tipik bir kavitezyon erozyonu testlerinde erozyon hızı-zaman modelinin karakteristik aşamaları ve kümülatif erozyon hızı-zaman eğrisini temsil eden parametreler ASTM G134'te belirtildiğı gibi gösterilmiştir (ASTM G134, 2010). Çalışmada kavitezyon erozyon eğrileri kütle kaybı (S Eğrisi) ve kütle kaybı oranı (erozyon hızı) olarak verilmiştir. Bu kapsamda kütle ölçümleri Mettler Toledo (İsviçre) marka hassas terazi ile ölçülmüş ve en az üç kütle ölçümü yapılarak ortalama değıerleri alınmıştır. Numunelerde belirli aralıklarla kavitezyon test kabından dikkallice çıkarılmış ve kütle kaybı ve yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Birçok araştırmacının farklı malzemeler ve test koşullarında elde etmiş oldukları kümülatif kütle kaybı ve kümülatif erozyon oranı grafikleri, yapılan test çalışmaları ile benzer sonuçlar ile ortaya çıkarılmış ve test düzeneğinin doğrulanması sağlanmıştır (Momma, 1991; Kazama ve diğ., 2015; Hutli ve diğ., 2017; Yao ve diğ., 2021).

Tablo 5.5. Kavitasyon su jeti erozyonu Numune 1 test sonuçları

Numune 1	Test No	Test Süresi (t)		Test Sonrası Kütle Ölçümü (m) (g)	Kümülatif Kütle / Hacim Kaybı			Kümülatif Erozyon Oranı		Yüzey Pürüzlülük Değerleri (μm)			
		min (dk)	h (sa)		Kütle Kaybı Δ_m (g)	Kütle Kaybı Δ_m (mg)	Hacim Farkı (ΔV) mm^3	Erozyon Oranı Hızı (mg/h)	Erozyon Oranı Hızı (mm^3/h)	R_a	R_q	R_z	R_{3z}
	0	0	0	20,6689	0	0	0	0	0	0,072	0,091	0,551	0,324
	1	45	0,75	20,6685	0,0004	0,4	0,053141011	0,533333333	0,070854682	0,138	0,188	1,347	0,784
	2	90	1,5	20,6678	0,0011	1,1	0,146137781	0,733333333	0,097425188	0,307	0,448	3,48	
	3	135	2,25	20,6671	0,0018	1,8	0,239134551	0,8	0,106282023	0,393	0,509	3,473	1,986
	4	180	3	20,6662	0,0027	2,7	0,358701827	0,9	0,119567276	0,483	0,571	3,029	2,328
	5	225	3,75	20,6659	0,003	3	0,398557585	0,8	0,106282023	0,535	0,678	3,585	2,287
	6	270	4,5	20,6658	0,0031	3,1	0,411842838	0,688888889	0,091520631	0,604	0,817	5,229	3,55
	7	315	5,25	20,6649	0,004	4	0,531410114	0,761904762	0,101220974	0,669	0,862	4,564	3,196
	8	360	6	20,6644	0,0045	4,5	0,597836378	0,75	0,099639396	0,763	0,924	4,629	3,737

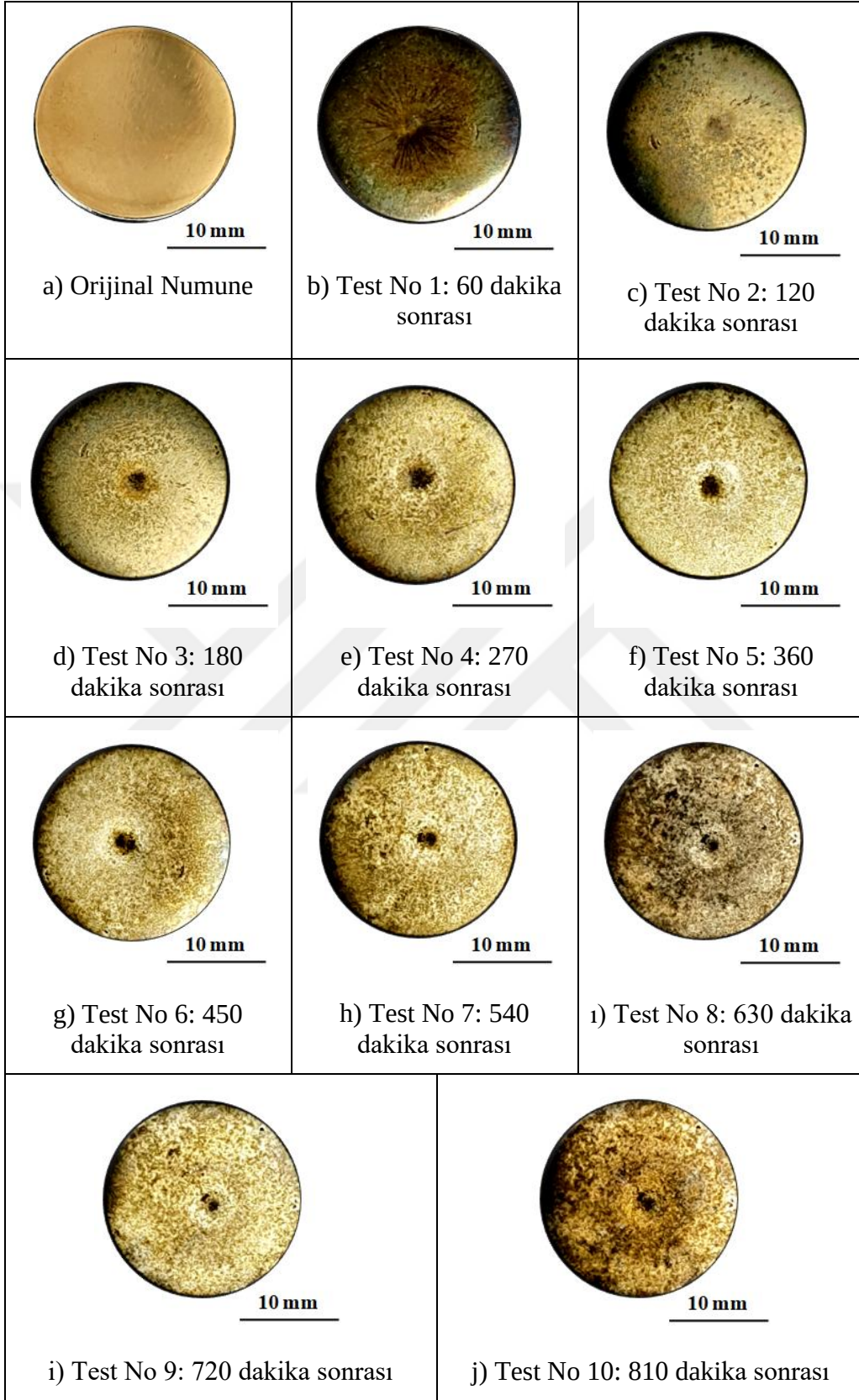
Tablo 5.6. Kavitasyon su jeti erozyonu Numune 8 test sonuçları

Numune 8	Test No	Test Süresi (t)		Test Sonrası Kütle Ölçümü (m) (g)	Kümülatif Kütle / Hacim Kaybı			Kümülatif Erozyon Oranı		Yüzey Pürüzlülük Değerleri (μm)			
		min (dk)	h (sa)		Kütle Kaybı (Δ_m) g	Kütle Kaybı (Δ_m) mg	Hacim Farkı (ΔV) mm^3	Erozyon Oranı Hızı (mg/h)	Erozyon Oranı Hızı (mm^3/h)	R_a	R_q	R_z	R_{3z}
	0	0	0	21,0076	0	0	0	0	0	0,185	0,252	1,248	0,968
	1	60	1	21,0062	0,0014	1,4	0,18599354	1,4	0,18599354	0,25	0,376	2,461	1,249
	2	120	2	21,0052	0,0024	2,4	0,318846068	1,2	0,159423034	0,395	0,598	4,543	2,117
	3	180	3	21,0045	0,0031	3,1	0,411842838	1,033333333	0,137280946	0,417	0,537	3,494	2,254
	4	270	4,5	21,0032	0,0044	4,4	0,584551125	0,977777778	0,12990025	0,58	0,759	4,293	2,666
	5	360	6	21,0024	0,0052	5,2	0,690833148	0,866666667	0,115138858	0,746	0,971	5,348	3,679
	6	450	7,5	21,0008	0,0068	6,8	0,903397193	0,906666667	0,120452959	0,8	1,082	5,698	4,054
	7	540	9	20,9994	0,0082	8,2	1,089390733	0,911111111	0,121043415	0,94	1,185	6,396	4,679
	8	630	10,5	20,9986	0,009	9	1,195672756	0,857142857	0,113873596	1,019	1,369	8,527	5,558
	9	720	12	20,9968	0,0108	10,8	1,434807307	0,9	0,119567276	1,119	1,541	8,895	6,137
	10	810	13,5	20,9952	0,0124	12,4	1,647371352	0,918518519	0,122027508	1,408	1,851	11,101	7,185



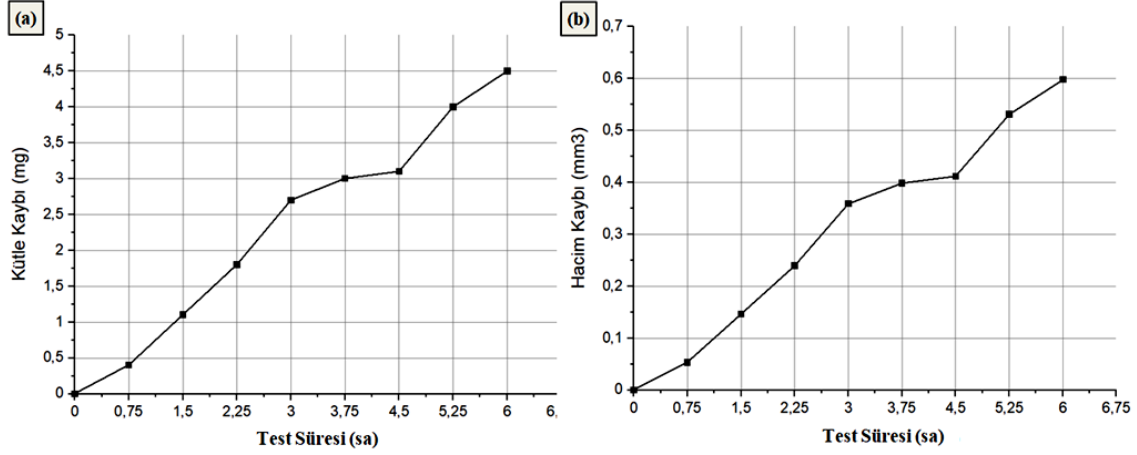
Şekil 5.1. Erozyon testleri sonrası Numune 1 görselleri

Numune 1'in Şekil 5.1 (a)'da görülen orijinal halinin (yüzey işlemi uygulanmamış), kavitasyon su jeti erozyon testlerinin 45 dakikalık süreler içinde test kabından çıkarılarak alınan görüntülerinden sonra Şekil 5.1 (ı)'da 360 dakika sonraki erozyona uğramış görseli verilmiştir. Aynı durumda Numune 8'in Şekil 5.2 (a)'da görülen orijinal numunenin kavitasyon su jeti erozyon testlerinin 60 dakikalık süreler içinde test kabından çıkarılarak alınan görüntülerinden sonra Şekil 5.2 (j)'de 810 dakika sonraki erozyona uğramış görseli verilmiştir.

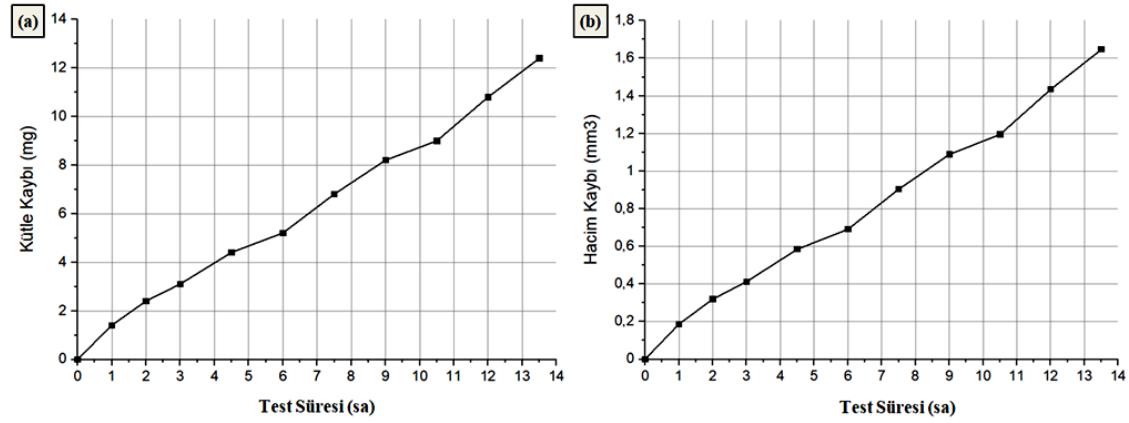


Şekil 5.2. Erozyon testleri sonrası Numune 8 görselleri

Şekil 5.3'te Numune 1'in kümülatif kütle ve hacim kayıpları grafiği, Şekil 5.4'te ise Numune 8'in kümülatif kütle ve hacim kayıpları grafiği yer almaktadır. Numunelerin hacim kayıpları yoğunluk ölçümü prensibine dayanarak yapılmıştır. Bu prensibe göre seçilen bir numunenin hassas terazi kütle değerinin silindir hacmine (taban alanı x yükseklik) bölünmesi ile elde edilmiştir. Böylece ortaya çıkan kümülatif hacim kayıplarına göre Şekil 5.3 (b) ve Şekil 5.4 (b) grafikleri elde edilmiştir.

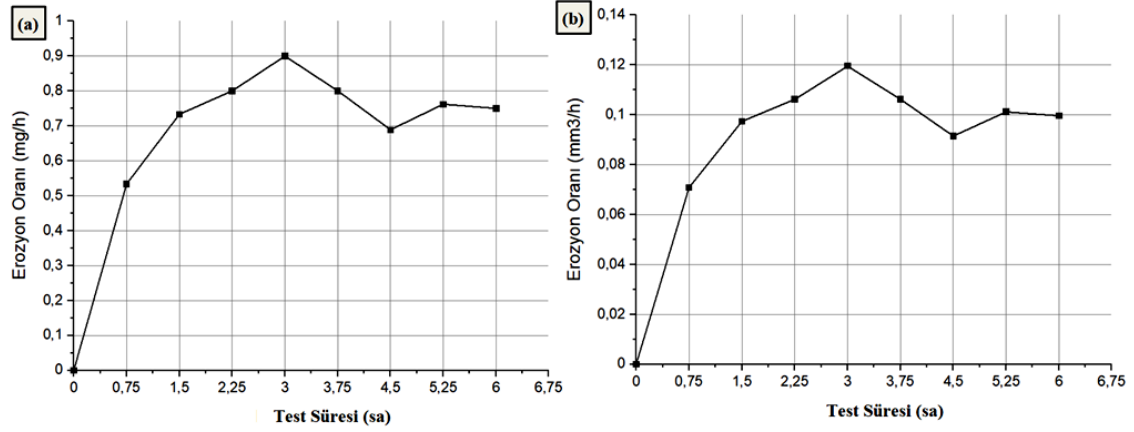


Şekil 5.3. Erozyon testleri sonrası Numune 1 kümülatif (a) kütle kaybı grafiği (b) hacim kaybı grafiği

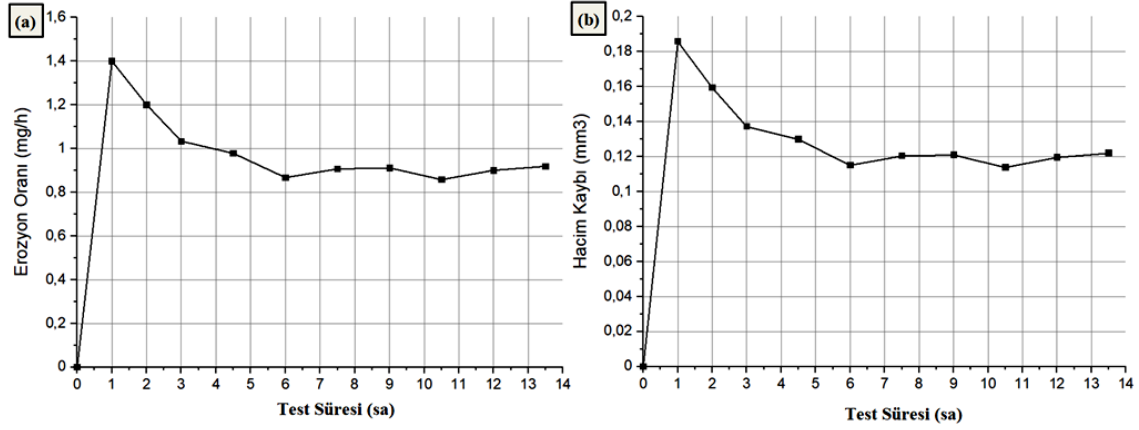


Şekil 5.4. Erozyon testleri sonrası Numune 8 kümülatif (a) kütle kaybı grafiği (b) hacim kaybı grafiği

Şekil 5.5'te Numune 1'in kümülatif kütle ve hacim kayıpları grafiği, Şekil 5.6'da da Numune 8'in kümülatif kütle ve hacim kayıpları grafiği yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde zamanla bu değerlerin kaybının arttığı görülmüştür.



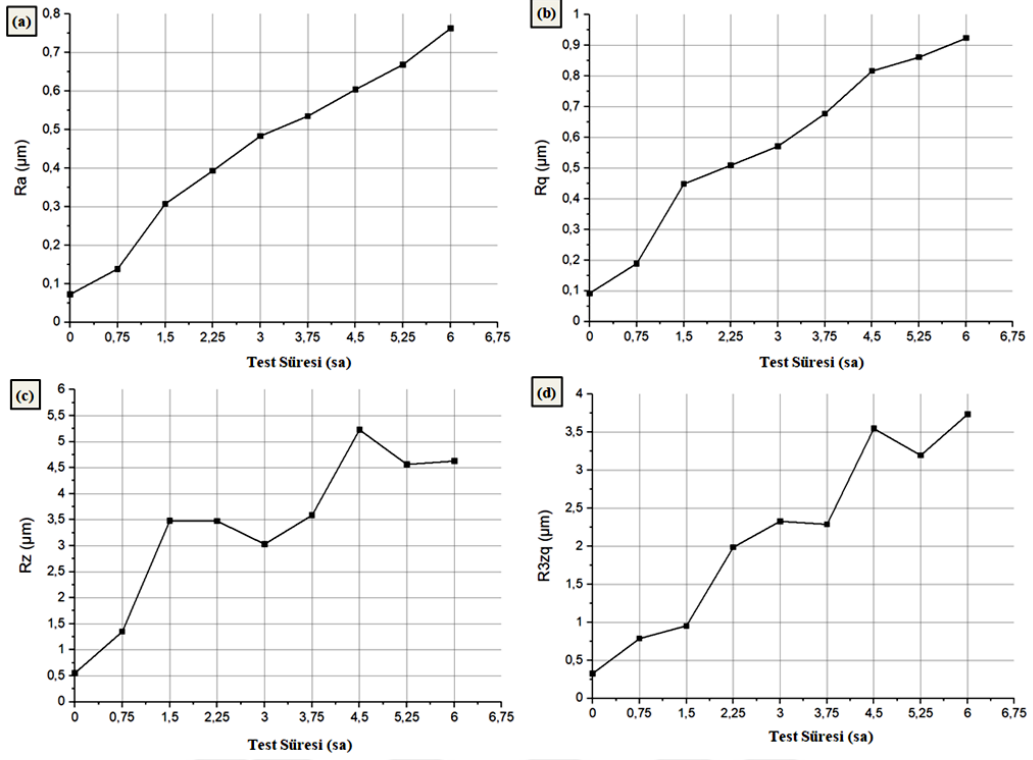
Şekil 5.5. Erozyon testleri sonrası Numune 1 kümülatif (a) kütleli erozyon oranı (mg/sa) (b) hacimsel erozyon oranı (mm³/sa) grafiği



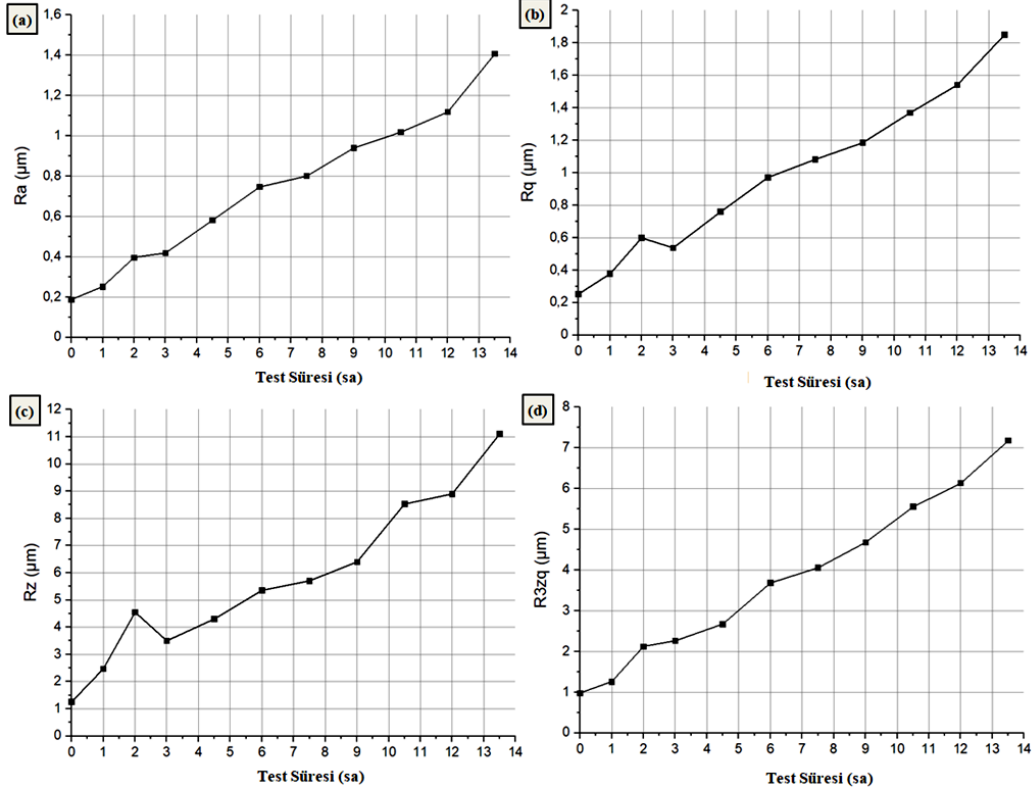
Şekil 5.6. Erozyon testleri sonrası Numune 8 kümülatif (a) kütleli erozyon oranı (mg/sa) grafiği (b) hacimsel erozyon oranı (mm³/sa) grafiği

Kavitasyon testleri sonrasında, numune yüzeyinde oluşan pürüzlülük değişimleri de incelenmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm işlemleri, aşınma bölgelerinde yapılmış ve her numune için beş farklı bölgelerden ölçüm alınarak ortalama değerleri hesaplanmıştır. Grafikler incelendiğinde, yüzey pürüzlülük değerlerinin kavitasyon erozyonuna maruz kalma süresi arttıkça artış gösterdiği görülmüştür. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de Numune 1 ve Numune 8’in yüzey pürüzlülük grafikleri yer almaktadır.

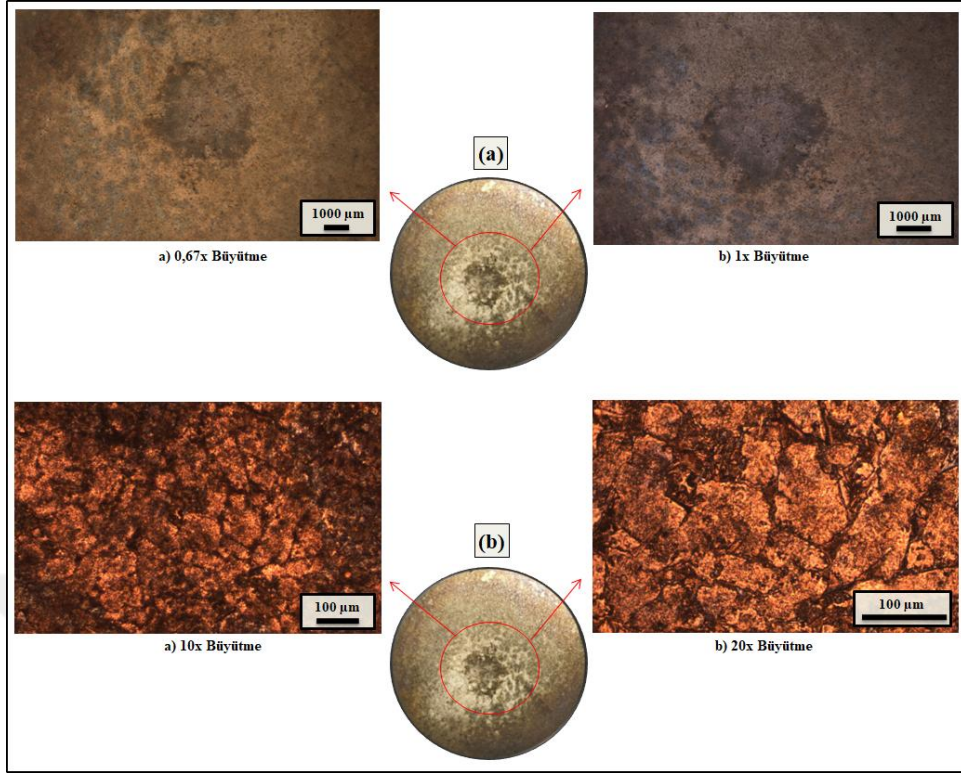
Son olarak Numune 1 ve Numune 8’in kavitasyon su jeti erozyon testleri sonrasında Nikon SMZ 745T Stereo (Japonya) ve Nikon MA100N (Japonya) tip endüstriyel mikroskop cihazları ile belirtilmiş erozyon bölgesi alanlarında çekilmiş mikroskop görüntüleri Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da yer almıştır.



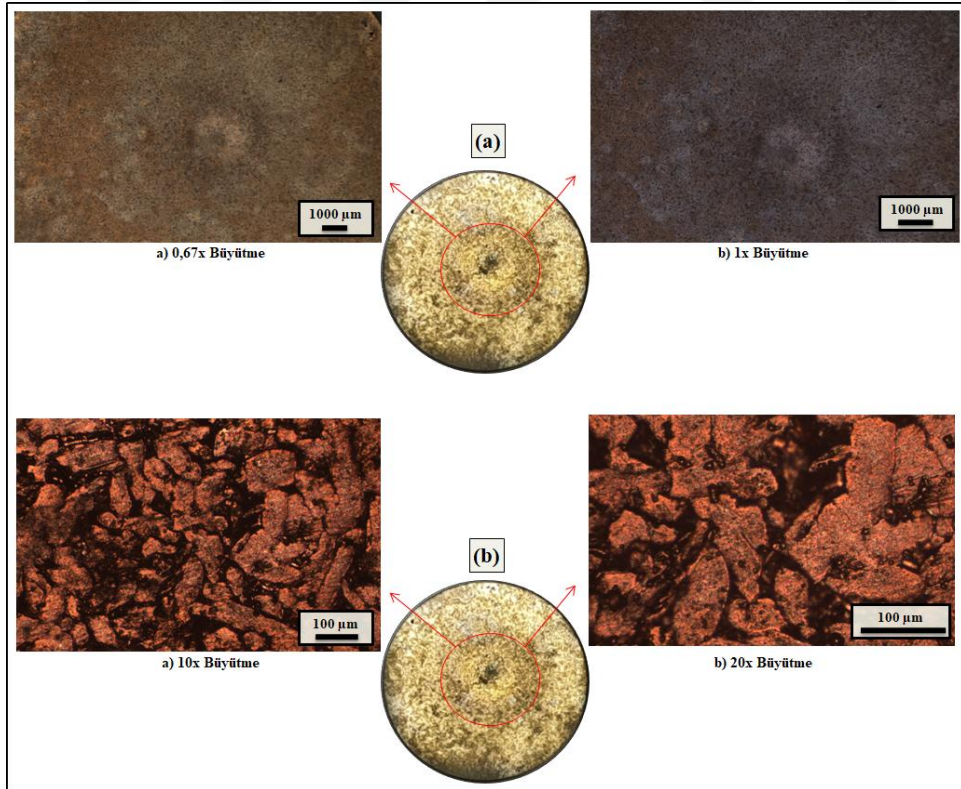
Şekil 5.7. Erozyon testleri sonrası Numune 1 yüzey pürüzlülüğü değişimleri (a) R_a (μm) (b) R_q (μm) (c) R_z (μm) (d) R_{3zq} grafikleri



Şekil 5.8. Erozyon testleri sonrası Numune 8 yüzey pürüzlülüğü değişimleri (a) R_a (μm) (b) R_q (μm) (c) R_z (μm) (d) R_{3zq} grafikleri



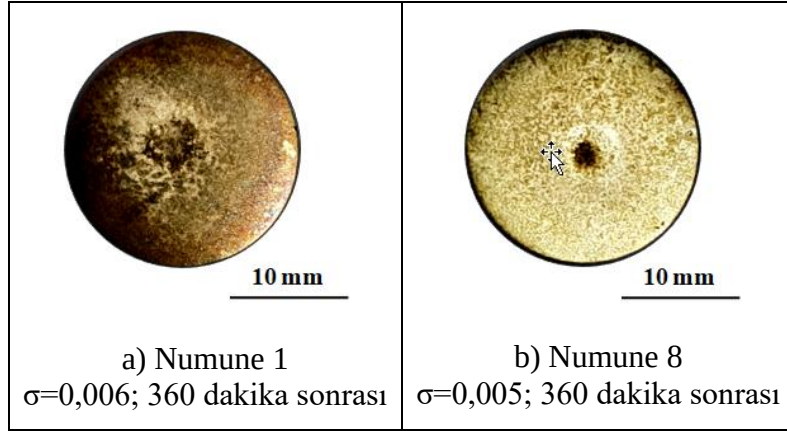
Şekil 5.9. Erozyon testleri sonrası Numune 1 mikroskop görüntüleri a) Nikon SMZ 745T Stereo b) Nikon MA100N tip endüstriyel mikroskop cihazı



Şekil 5.10. Erozyon testleri sonrası Numune 8 mikroskop görüntüleri a) Nikon SMZ 745T Stereo b) Nikon MA100N tip endüstriyel mikroskop cihazı

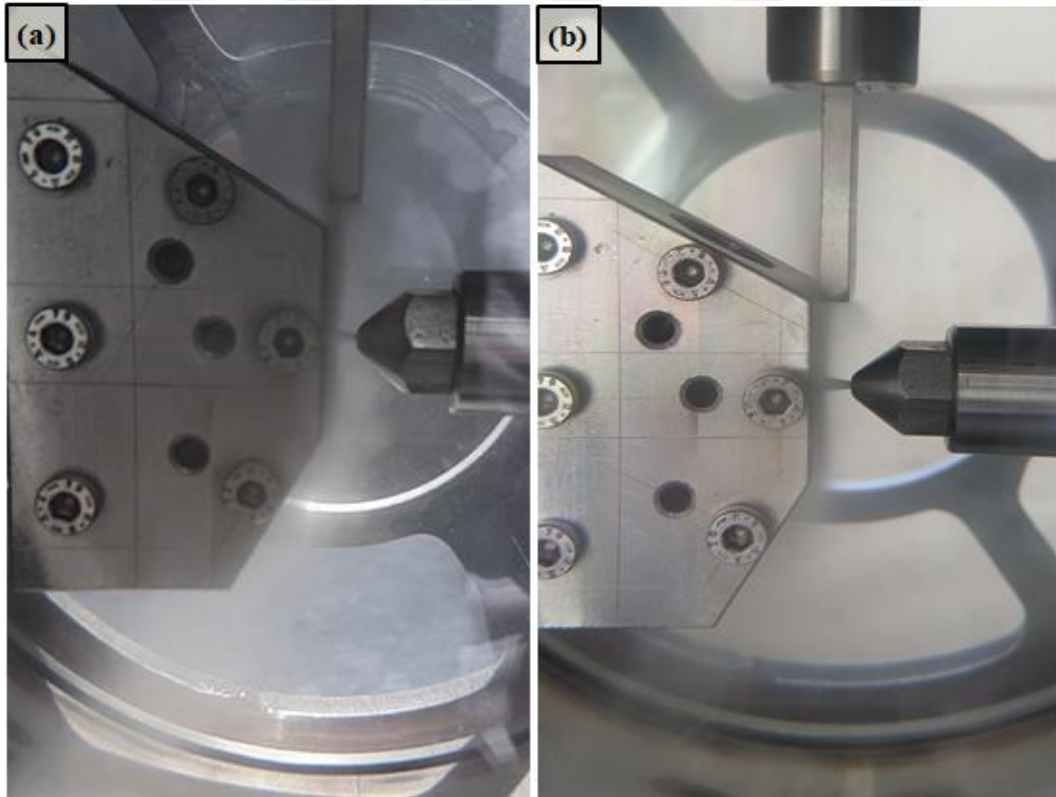
Testler sonucu ulařılan sonuçlar:

- Kaviteasyon test cihazı sonuçlarının tutarlı, tekrarlanabilir ve başarı ile çalıştığı görölmüştür. Yapılan testler ile test cihazının geçerli kılma (validasyon) ve doğrulama (verifikasyon) çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Kütle ve hacim kayıpları, numunenin kaviteasyona maruz kalma süresi (t) arttıkça artmıştır. Bunun yanında R_a , R_q , R_z ve R_{3z} pürüzlülük değerlerinde de artış görölmüştür.
- Kaviteasyon erozyonu aşınması sonrasında basınçlandırılmış şebeke suyunun çarpmış olduğu numune yüzeyi orta bölgeleri çevresinde halka biçiminde erozyon bölgelerin meydana geldiği ve zamanla (t) bu halkaların büyüyüp genişlediği tespit edilmiştir.
- Oluşan erozyon halkalarının karakteristiğinin de zamana bağlı olarak gelişim gösterdiği belirlenmiştir.
- Farklı numunelerin; 6 saat süre boyunca kaviteasyon erozyonuna maruz kalması sonucunda Numune 1’de $\Delta_m=4,5$ mg kütle kaybı görölürken (Tablo 5.5), Numune 8’de bu süre sonunda $\Delta_m=6,8$ mg kütle kaybı görölmüştür (Tablo 5.6). Bu da göstermiştir ki kaviteasyon erozyon testleri sonucunda artan giriş basıncı (P_1) ile kütle kaybı artış oranı yükselmiştir.
- Farklı numunelerin; 3 saat süre boyunca kaviteasyon erozyonuna maruz kalması sonucunda Numune 1 $\Delta_m=1,8$ mg, Numune 8 $\Delta_m=3,1$ mg kütle kaybı yaşamıştır. Bu durum Numune 8’in erozyon testleri sonucunda kütle kaybı artış hızının daha yüksek olduğunu göstermiştir.
- Farklı numunelerin; 6 saat boyunca kaviteasyon erozyonuna maruz kalması sonucunda Numune 1 yüzey pürüzlölüğü değişimi $\Delta R_a=0,691$ μm olmuş (Tablo 5.5), Numune 8 bu süre sonunda yüzey pürüzlölük değişimi $\Delta R_a=0,615$ μm olmuştur (Tablo 5.6). Artan giriş basıncı (P_1) ile yüzey pürüzlölük değişim üzerinde önemli bir fark oluşturmamıştır.
- Numune 1 (a) ve Numune 8’in (b) 6 saat süre boyunca kaviteasyon erozyonu testlerine farklı giriş basınçlarında (P_1) ve kaviteasyon sayılarında maruz kalmaları sonucunda ortaya çıkan kaviteasyon erozyonu görselleri şekil 5.11’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.11. Farklı kavitasyon sayısındaki erozyon görüntüleri

- Şekil 5.12’de (a) görselinde kavitasyon sayısı $\sigma=0,005$ (b) görselinde ise $\sigma=0,006$ ’dır. Test esnasında çekilen görsellerin incelenmesi sonucunda numune etrafında oluşan kavitasyon baloncuk saçılmalarının birbirine benzer olduğu, daha fazla kavitasyon baloncuğunun saçılmasının Numune 8 yüzeyinde olduğu görülmektedir. Aynı koşullar altında farklı σ ’na bağlı olarak kavitasyon baloncuklarının saçılmasının değiştiği görülmüştür.



Şekil 5.12. Kavitasyon baloncuklarının saçılma görüntüleri (a) Numune 8 $\sigma=0,005$ (b) Numune 1 $\sigma=0,006$

5.2. Taguchi Analizi Bulguları

Çalışmada Taguchi deney tasarımı metodolojisi dikkate alınarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği koşullar Tablo 5.7’de, elde edilen verilere göre oluşan kütle, hacim kaybı ve erozyon oranı değerleri Tablo 5.8’de yüzey pürüzlülük değerleri değişiminin deney sonuçları ise Tablo 5.9’da yer almaktadır. Ayrıca deney sonuçları kullanılarak kütle kaybı değişimi üzerine Taguchi analiz çalışmaları yapılmıştır. Çıktı parametreleri Kütle Kaybı (Δ_m) değerleri olarak Minitab yazılım programında analiz edilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde:

- En fazla kütle ve hacim kaybı $\Delta_m=4,3$ mg değeri ile 7. deney programında; en az kütle ve hacim kaybının $\Delta_m=2,2$ mg değeri ile ise 1. deney programında;
- Erozyon oranı değişimleri incelendiğinde en fazla aşınmanın saatte 1,4 mg ile 7. deney programında; en az aşınmanın saatte 1,4 mg ile 1. deney programında;
- Gemi pervanesi kanatlarında görülebilecek yüksek yüzey pürüzlülük değerleri istenmeyen durumlardır. Çünkü gemi pervanesi kanat yüzeyindeki pürüzlülük değerleri deniz içerisindeki canlıların pervane yüzeyine tutunmasına neden olmaktadır. Bu yüzden gemi pervanesi kanat imalat işlemleri minimum pürüzlülük değerlerinde işlenir. Yapılan deneyler sonucunda R_a yüzey pürüzlülük değerleri değişimleri incelendiğinde, deneyler arasında yüzey pürüzlülük değerleri değişiminin birbirine yakın olduğu görülmüştür. En fazla yüzey pürüzlülük değişimleri $\Delta R_a=0,597$ (μm), $\Delta R_q=0,298$ (μm), $\Delta R_z=0,298$ (μm) değerleri ile 6. deney programında;
- En az yüzey pürüzlülük değişimleri $\Delta R_a=0,298$ (μm), $\Delta R_q=0,298$ (μm), $\Delta R_z=0,298$ (μm) değerleri ile 2. deney programında verilen parametreler ile yapılan deneyler sonucunda ortaya çıktığı görülmüştür.

Tablo 5.7. Taguchi deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği koşullar

Malzeme	Deney Süresi (saat) (t)	Nozul Çapı (D_{nozlu}) (mm)	Sıcaklık (T) ($^{\circ}C$)	Alaşım Yoğunluk (g/cm^3)	Akışkan
Döküm MAB	3 Saat	1,5	22-27	7,52714	Şebeke suyu

Tablo 5.8. Taguchi deneyleri sonrası kütle ve hacim kaybı ile erozyon oranı değişim değerleri

Deney No	Numune No	Deney Süresi (t)		Kavitasyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kavitasyon Hücüm Açısı ($^{\circ}$)	Deney Öncesi Kütle Ölçümü (m) (g)	Deney Sonrası Kütle Ölçümü (m) (g)	Kümülatif Kütle ve Hacim Kaybı			Kümülatif Erozyon Oranı	
		dk	sa						Δ_m (g)	Δ_m (mg)	ΔV (mm ³)	Δ_{mg}/sa	Δ_{mm^3}/sa
1	15	180	3	0,006	5	30	20,5312	20,529	0,0022	2,2	0,292276	0,733333	0,097425
2	2			0,006	10	60	21,0022	20,9995	0,0027	2,7	0,358702	0,9	0,119567
3	12			0,006	15	90	20,82	20,8164	0,0036	3,6	0,478269	1,2	0,159423
4	18			0,008	5	60	20,9204	20,9178	0,0026	2,6	0,345417	0,866667	0,115139
5	3			0,008	10	90	20,7296	20,7262	0,0034	3,4	0,451699	1,133333	0,150566
6	11			0,008	15	30	20,9047	20,9022	0,0025	2,5	0,332131	0,833333	0,11071
7	19			0,01	5	90	20,9954	20,9911	0,0043	4,3	0,571266	1,433333	0,190422
8	16			0,01	10	30	20,7738	20,771	0,0028	2,8	0,371987	0,933333	0,123996
9	4			0,01	15	60	20,7521	20,7486	0,0035	3,5	0,464984	1,166667	0,154995

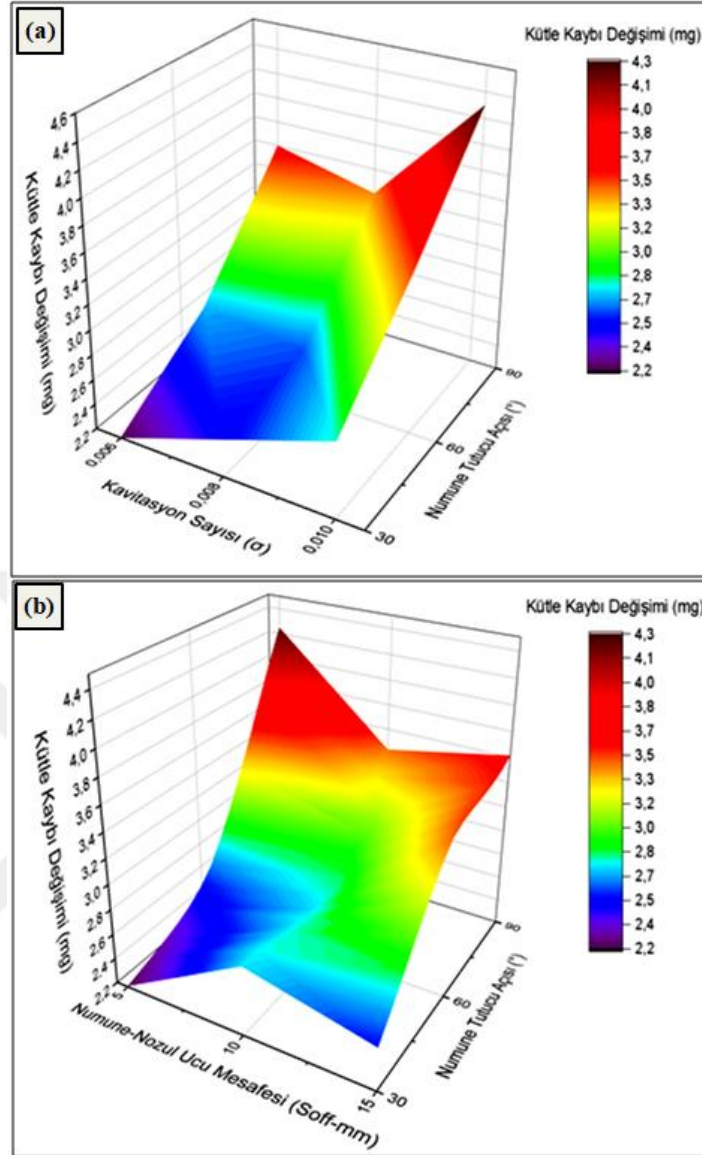
Tablo 5.9. Taguchi deneyleri sonrası yüzey pürüzlülük değerleri değişimi

D.N.	N.N	Dened Süresi (t) (sa)		Kavitasyon Sayısı (σ)	S _{off} (mm)	Kavitasyon Hücum Açısı (°)	Yüzey Pürüzlülük Değerleri Değişimi (µm)											
		dk	sa				Dened Öncesi R _a	Dened Sonrası R _a	Değişim ΔR _a	Dened Öncesi R _q	Dened Sonrası R _q	Değişim ΔR _q	Dened Öncesi R _z	Dened Sonrası R _z	Değişim ΔR _z	Dened Öncesi R _{3z}	Dened Sonrası R _{3z}	Değişim ΔR _{3z}
1	15	180	3	0,006	5	30	0,157	0,478	0,321	0,19	0,628	0,438	0,799	3,857	3,058	-	2,51	2,51
2	2			0,006	10	60	0,192	0,49	0,298	0,251	0,622	0,371	1,169	2,89	1,721	-	2,387	2,387
3	12			0,006	15	90	0,103	0,431	0,328	0,13	0,586	0,456	0,607	4,445	3,838	-	2,243	2,243
4	18			0,008	5	60	0,189	0,539	0,35	0,261	0,678	0,417	1,275	3,378	2,103	-	2,545	2,545
5	3			0,008	10	90	0,162	0,558	0,396	0,201	0,761	0,56	0,877	4,738	3,861	-	2,569	2,569
6	1			0,008	15	30	0,098	0,695	0,597	0,122	0,937	0,815	0,546	6,434	5,888	-	3,764	3,764
7	19			0,01	5	90	0,12	0,499	0,379	0,154	0,631	0,477	0,723	3,299	2,576	-	2,449	2,449
8	16			0,01	10	30	0,073	0,47	0,397	0,094	0,628	0,534	0,502	3,455	2,953	-	2,506	2,506
9	4			0,01	15	60	0,143	0,518	0,375	0,176	0,65	0,474	0,863	3,214	2,351	-	2,311	2,311

Taguchi deneyleri için önerilen parametrelerin kütle kaybı üzerindeki etkileri Şekil 5.13'te verilmiştir. Gerçekleştirilen deney koşullarına göre, kavitasyon hücum açısının arttığını kütle kaybını da yükseltmiştir. 30° kavitasyon hücum açısında en düşük kütle kaybı değişimi gözlemlenmiştir. Çünkü 30° hücum açısıyla yüzeye çarpan yüksek basınçlı jetlerin, tüm yüzeye homojen olarak nüfuz etmeden çarpmasının ardından etkisini yitirmesidir. Fakat kavitasyon hücum açısının artmasıyla, jetlerin numune yüzeyine daha dik bir doğrultuda çarpması, erozyon etkisinin artmasına neden olmuştur. Bu nedenle, 90° kavitasyon hücum açısında jetlerin yüzeye tamamen nüfuz etmesi, daha homojen bir dağılıma yol açarak daha fazla yüzey hasarına sebep olmuştur (Gonzalez-Avila ve diğ., 2020).

Hutli ve diğ. (2017) ise yaptıkları incelemeler sırasında çarpma açısına bağlı kavitasyon jetlerinin büyük bir kısmının numunenin üst kısmına kaydığını göstermişlerdir. Bu da neden farklı kısımda aşınma derecesinin ve yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek olduğunu açıklamaktadır. Bunun yanında deney koşullarına bağlı artan kavitasyon sayısının kütle kaybını etkileyerek arttırdığı görülmüştür. Çünkü farklı giriş basıncı (P_1) değeri bu durumu etkilemiştir. Bu duruma benzer nozul ile numune arasındaki mesafenin azaltılması kütle kaybının artmasını da etkilemiştir. Yüksek basınçta gönderilen şebeke suyunun numune üzerinde etkileme uzaklığı mesafesi arttıkça aşınma hasar alanları değişmiş ve genişlemiştir. Böyle bir durum aşılması gereken daha fazla erozyon eşik değeri bölgelerinin oluşumuna neden olmuştur (Hammitt, 1963; Iwai ve diğ., 1989).

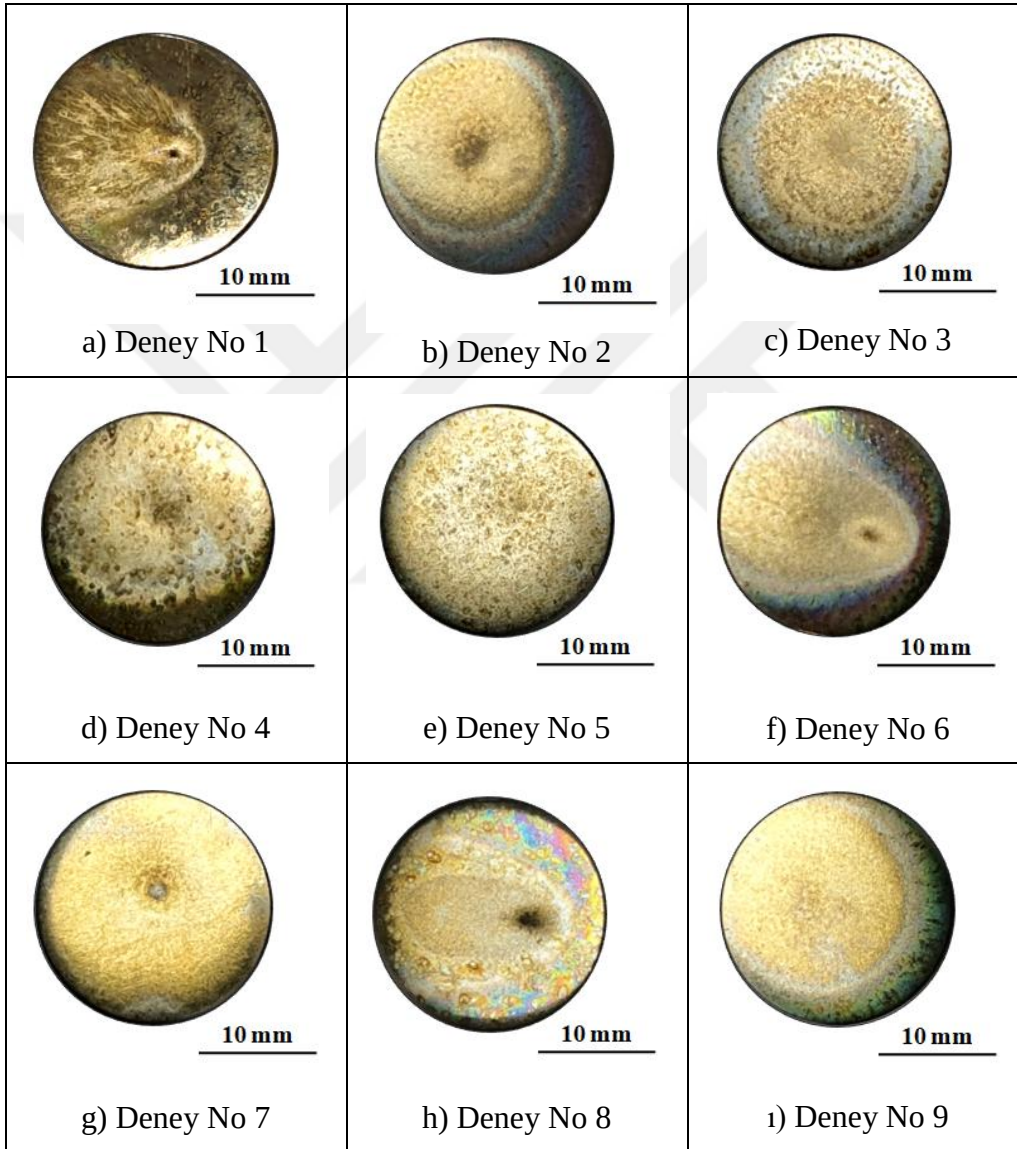
Yapılan değerlendirmeler sonrası her bir Taguchi deneyi sonrası numunelerin kavitasyon erozyonu hasarlarını gözlemlemek amacıyla çekilen görseller Şekil 5.14'te gösterilmiştir. İncelenen erozyon hasarı görsellerinde, kavitasyon su jeti erozyonuna maruz kalan numune yüzeylerinin halka şeklinde aşındığı ve bu erozyon halkalarının, çarpma açısı yönlerine doğru değiştiği ve geniş alana yayıldığı görülmüştür. Bu durum numune üzerinde farklı bölgelerin aşınma göstermesine ve aşınma izlerinin oluşumuna neden olmuştur. Ayrıca, farklı seviyelerde değişim gösteren kavitasyon sayısı, basınç değişkenleri ve nozul ile numune arasındaki (S_{off}) mesafe parametreleri, kavitasyon erozyonu aşınması etki alanını da etkilemiş ve değiştirmiştir. Tüm bu değişimler Taguchi deneyleriyle ortaya çıkarılmış ve sunulmuştur.



Şekil 5.13. Kavitasyon erozyonu parametrelerinin kütle kaybı üzerindeki etkisi

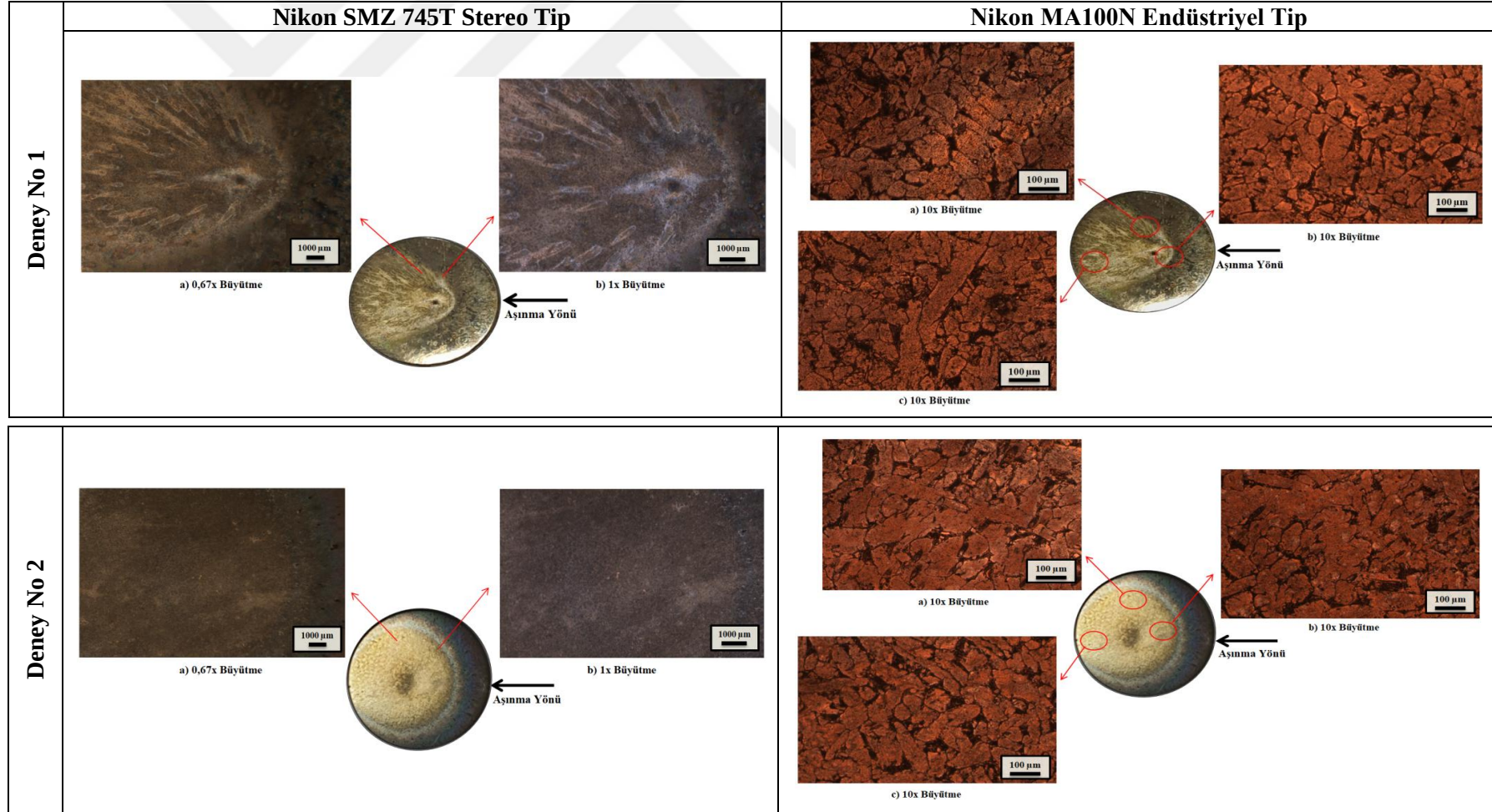
Kavitasyon kaynaklı erozyon aşınması özellikleri üzerinde, nozul ve test kabı basınç değişimi ile S_{off} mesafe değişim etkilerinin incelendiği bir çalışmada, giriş nozul basıncının artmasıyla birlikte kütle kaybının da arttığı tespit edilmiştir (Momma ve Lichtarowicz, 1995). Kavitasyon jetlerinin davranışı ve erozyon süreci üzerindeki eğim açısının etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada çeşitli erozyon testleri gerçekleştirilmiştir (Hutli ve diğ., 2017). Numune yüzeyinin eğim açısının erozyon oranı ve erozyon paterni üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmanın detaylı sonuçlarını ise hidrodinamik basınçların bir kavitasyon balonunun çökme sürecini hızlandırması ve çökme anında üretilen mikro jetleri güçlendirmesi ile açıklamışlardır. Sayısal olarak da numune yüzeyinin eğim açısı

arttıkça, normal hızın neden olduğu sıkıştırma basıncının azaldığını, oysa teğetsel hızın neden olduğu dinamik basıncın arttığını değerlendirmişlerdir. Bununla birlikte, sıkıştırma basıncındaki kayıp, dinamik basınçtaki artışla tam olarak telafi edilemez, bu da toplam hidrodinamik basınçta bir azalmaya neden olarak erozyon çukurlarının sayısı ve boyutu azalır, yani erozyon hızı düştüğünü savunmuşlardır. Sonuç olarak değişen parametrelerle ilişkili literatür ile benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

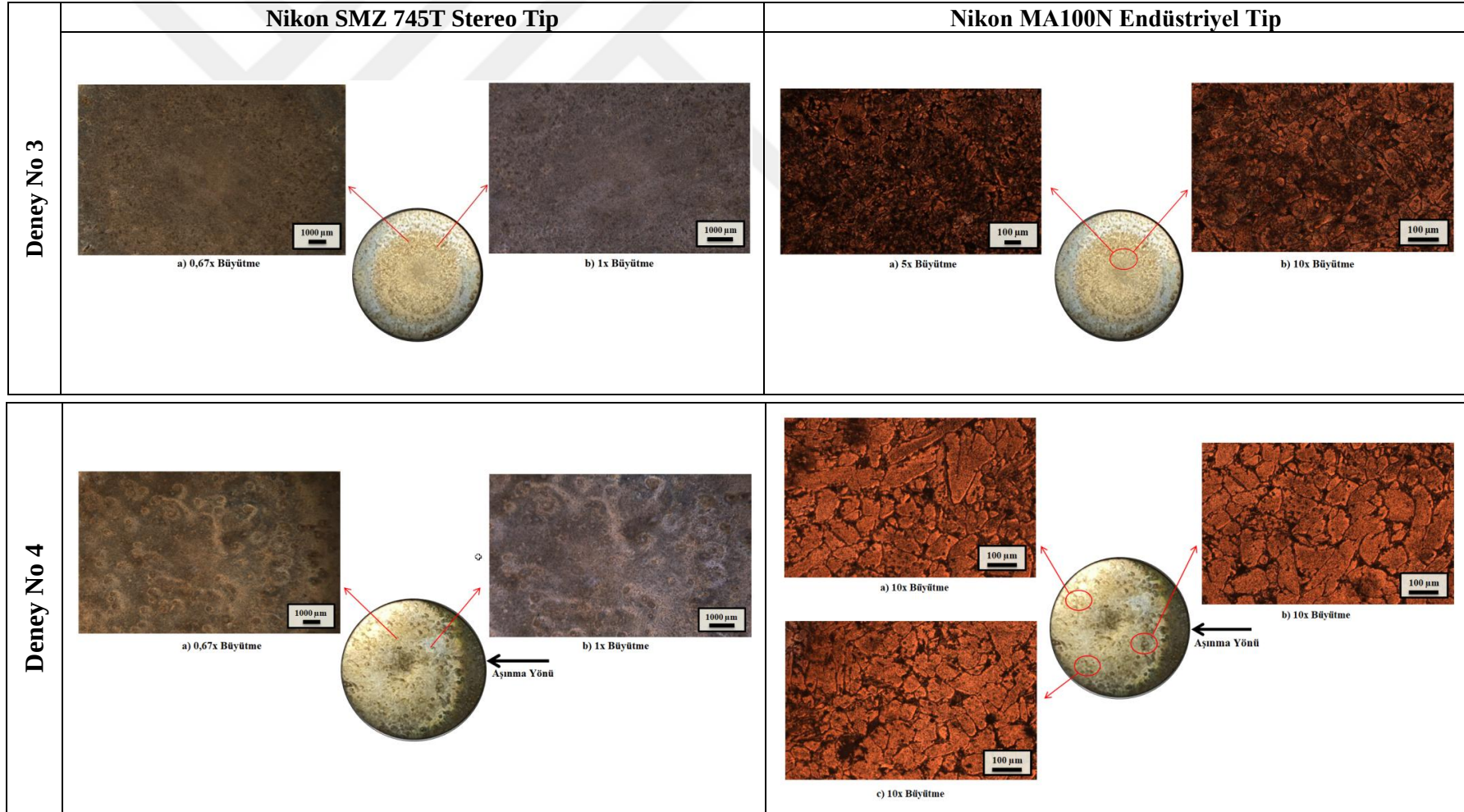


Şekil 5.14. Taguchi deneyleri sonrası kavitasyon erozyonu görselleri

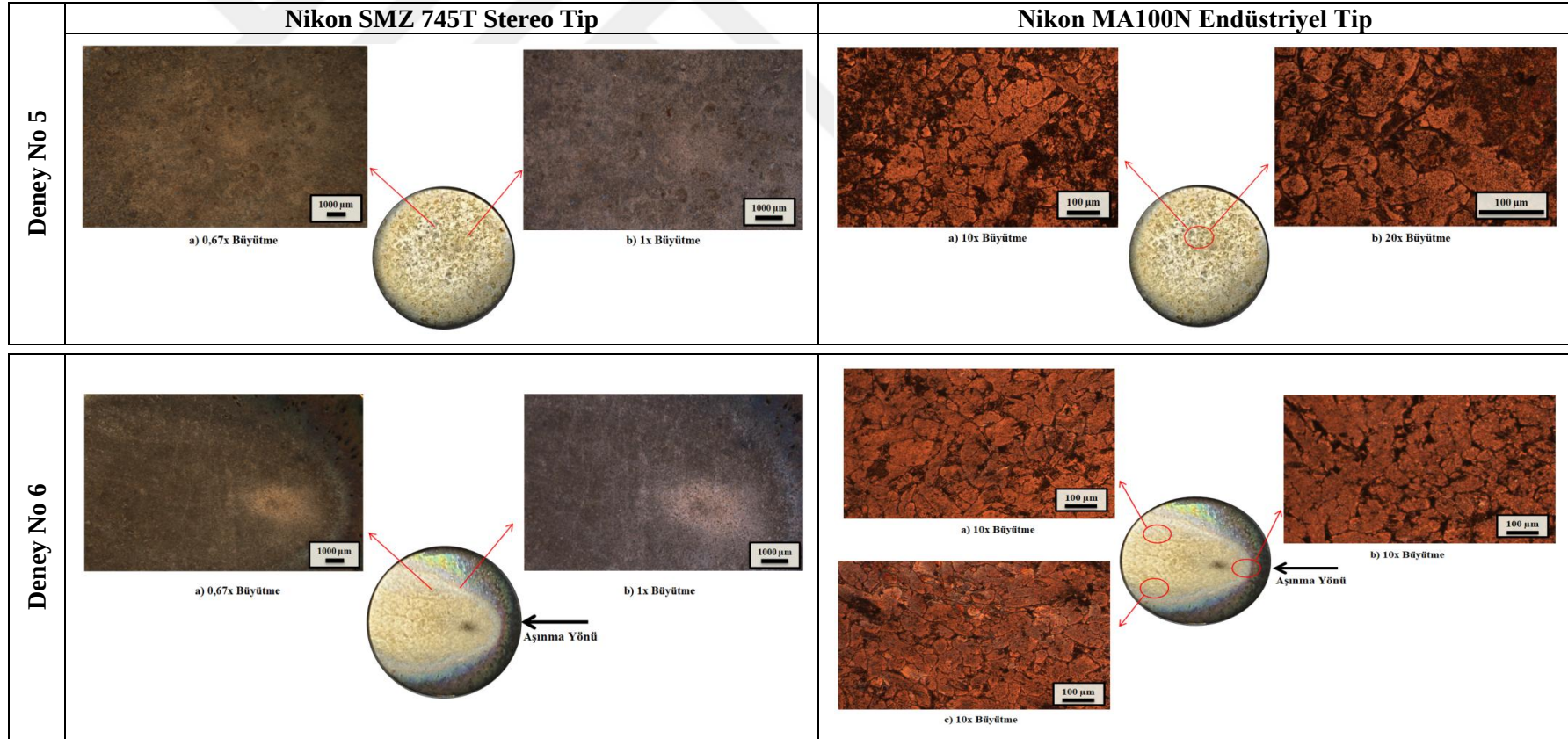
Taguchi deneyleri sonrasında Nikon SMZ 745T Stereo ve Nikon MA100N (Japonya) tip endüstriyel mikroskop cihazları ile belirtilmiş erozyon bölgesi alanlarında çekilmiş mikroskop görüntüleri Şekil 5.15 ve Şekil 5.19 arasındaki şekillerde verilmiştir.



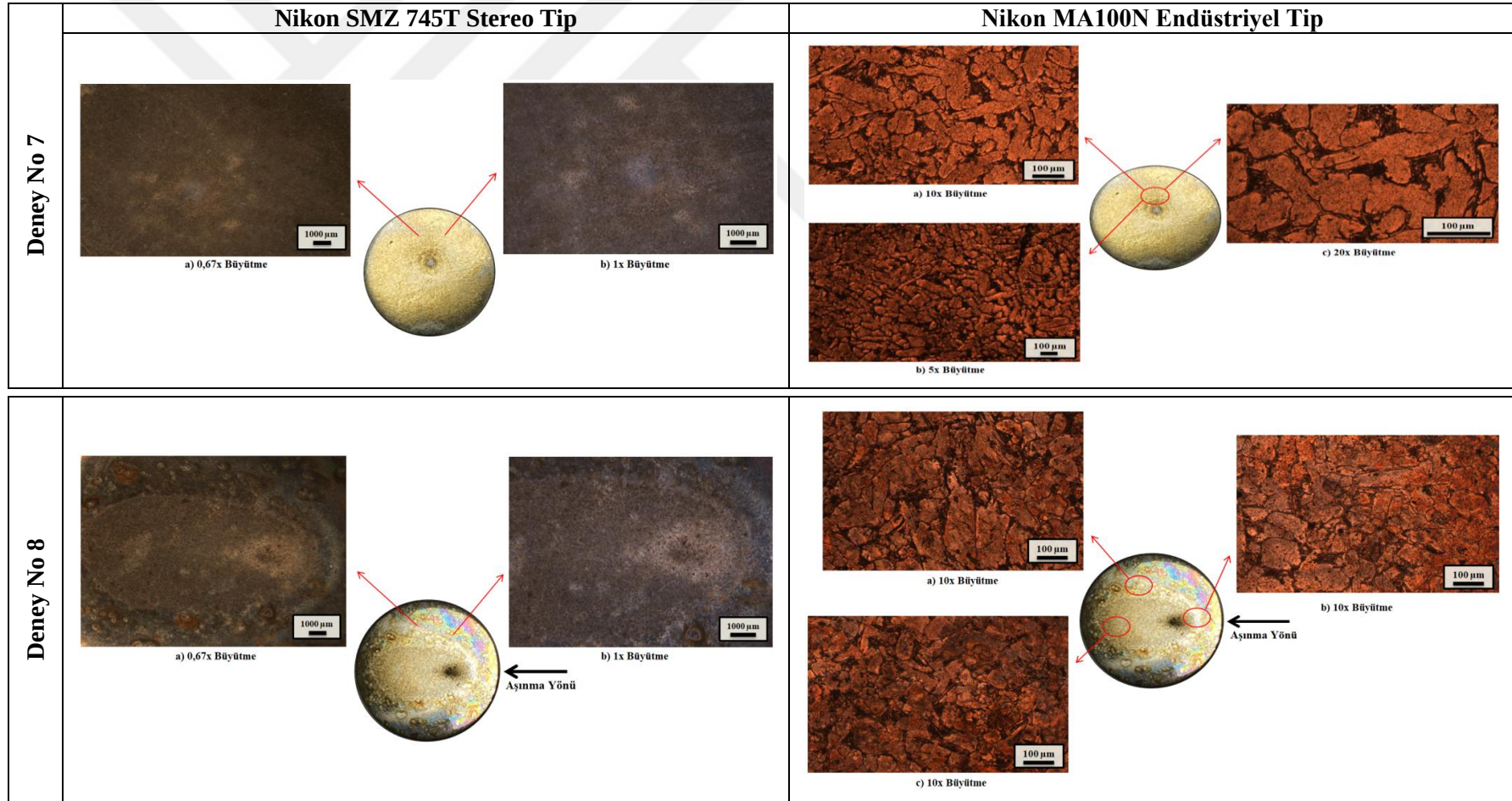
Şekil 5.15. 1 ve 2 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri



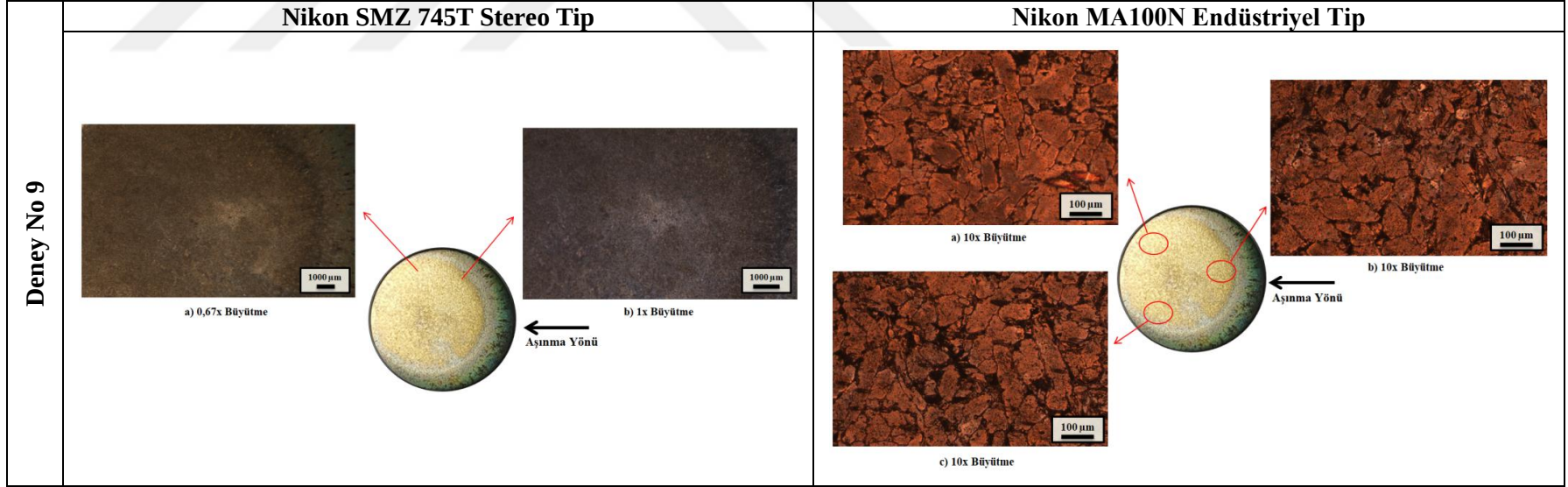
Şekil 5.16. 3 ve 4 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri



Şekil 5.17. 5 ve 6 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri



Şekil 5.18. 7 ve 8 nolu Taguchi deneyleri mikroskop görüntüleri



Şekil 5.19. 9 nolu Taguchi deneyi mikroskop görüntüsü

5.2.1. Minitab Programı ile Kütle Kaybı Analizi

Taguchi deney tasarımı yönteminde kalite karakteristiklerinin değerlendirilmesinde ve ölçülmesinde kullanılan Sinyal/Gürültü (S/N) oranı; ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranıdır. Bir diğer tanımlama ise sinyal değerinin sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değer olduğu, gürültü faktörünün ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen parametrelerin payını temsil eden değer olduğudur (Savaşkan ve diğ., 2004).

Yapılan çalışmalarda Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımının en az aşınma (kütle kaybı, erozyon oranı değişimi) değerleri olan deney programının elde edilebilmesi için Minitab programı Taguchi analizinde “en küçük en iyi” seçeneği seçilmiştir. Bu ifade ile Sinyal/Gürültü (S/N) oranının hesaplanması için Denklem (5.1) kullanılmıştır.

Denklemde sinyal değeri (S); sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü (N); istenmeyen faktörlerin değeri, Y; ölçülen kütle kaybı değerini, n; gerçekleştirilen deney sayısını gösterir.

$$S/N = -10 \times \log_{10} [\Sigma(Y^2)/n] \quad (5.1)$$

Analizler için Tablo 5.10’da, “en küçük en iyi” denklemi ile hesaplanan ve her deney için ölçülen kütle kaybı değerleri üzerinden Sinyal/Gürültü (S/N) oranları (SNRA1) verilmiştir.

Tablo 5.10. Sinyal/Gürültü (S/N) oranları ve ortalamaları

Deney No	Kavitasyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kavitasyon Hücüm Açısı ($^\circ$)	Kütle Kaybı Değişimi Δ_m (mg)	SNRA1 (dB)
1	0,006	5	30	2,2	-6,84845
2	0,006	10	60	2,7	-8,62728
3	0,006	15	90	3,6	-11,1261
4	0,008	5	60	2,6	-8,29947
5	0,008	10	90	3,4	-10,6296
6	0,008	15	30	2,5	-7,9588
7	0,01	5	90	4,3	-12,6694
8	0,01	10	30	2,8	-8,94316
9	0,01	15	60	3,5	-10,8814

Tablo 5.11, kavitasyon sayısının (σ), nozul ile numune arasındaki mesafenin (S_{off}) ve kavitasyon hücum açısının her seviyesi için ortalama S/N oranını gösterir. Yanıt tablosundaki en yüksek değere karşılık gelen deney değerleri ve ideal parametreler belirlenmiştir. S/N yanıt tablosu, her parametre düzeyi için seçilen özelliklerin ortalamasını görüntüler ve bunları, etkilerin göreceli derecesini gösteren Delta istatistiğine göre sıralar. Delta, her faktör için en düşük ortalama değer en yüksek ortalama değerden çıkarılmasıyla belirlenir (Park ve Kim, 2019). Cevap tablosundaki en büyük değer ile en ideal parametrelerin olduğu deney değerleri ortaya çıkarılmıştır. Cevap tablosu incelendiğinde;

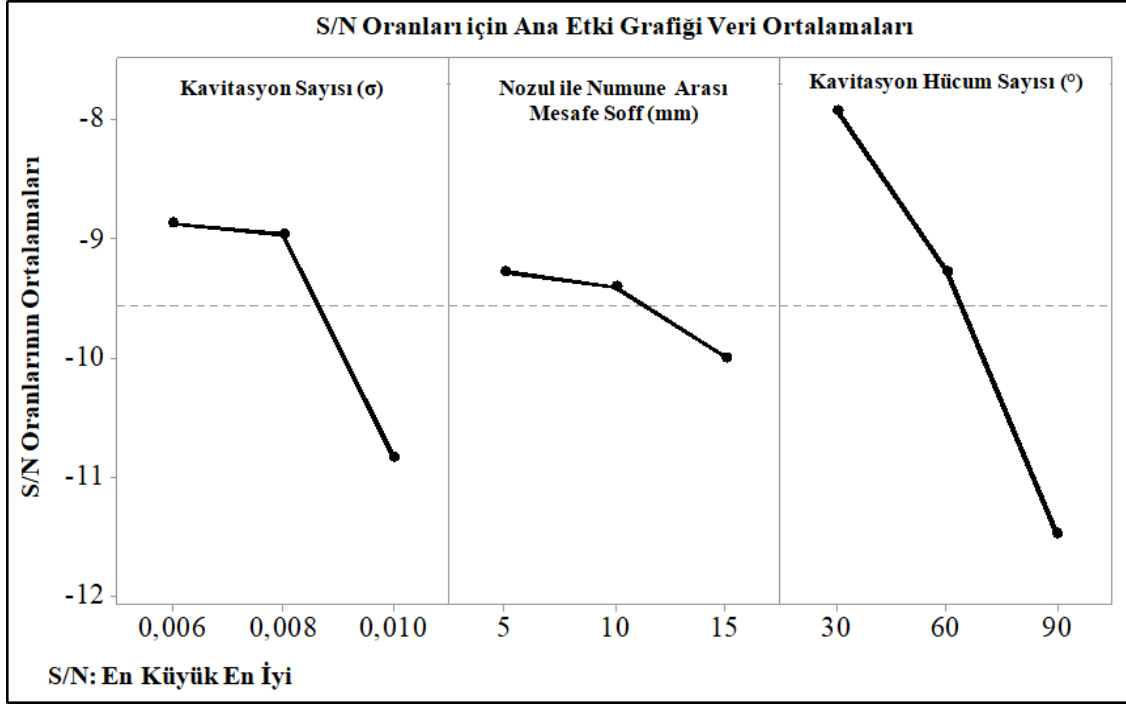
- S/N=-8,867 oranı ile 1. seviyeye denk gelen $\sigma=0,006$ parametre ve seviyesi,
- (S/N=-9,272 oranı ile 1. seviyeye denk gelen $S_{off}=5$ mm parametre ve seviyesi
- Kavitasyon hücum açısı faktöründe 30° seviyesi (S/N=-7,917 oranı ile 1. seviyeye denk gelen parametre) değerlerinden oluşmuştur.

Tablo 5.11. S/N oranı değerleri sonucu oluşan cevap tablosu

Seviye	Kavitasyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kavitasyon Hücum Açısı ($^\circ$)
1	-8,8677	-9,2724	-7,9172
2	-8,9633	-9,4001	-9,2693
3	-10,8312	-9,9892	-11,4752
Delta	1,9644	0,7161	3,5587
Rank	2	3	1

Şekil 5.20’de, Taguchi deney sonuçlarına göre ortaya çıkan ortalama Sinyal/Gürültü (S/N) oranları grafik olarak gösterilmektedirler. Analiz için seçilen “en küçük en iyi” karakteristik seçimi, S/N oranı cevap tablosunda oranın en yüksek olduğu seviyeler yardımıyla seçilirken; S/N oranı grafiklerinde bu seçim grafikte belirtilen seviye değerleri içerisinde en yukarıda olan değer tüm faktörlerin seviyeleri arasında en ideal parametre (optimum sonuç) olduğu anlamı kullanılarak ulaşılır.

Ortaya çıkan grafik sonuçlarına ve “en küçük en iyi” denkleminde çıkan optimum en az kütle kaybının görüldüğü parametre ve seviyeler; $\sigma=0,006$, $S_{off}=5$ mm ve 30° kavitasyon hücum açısındaki değerlerle oluşacaktır.



Şekil 5.20. Ortalama S/N oranı grafikleri

Minitab analizi sonrası ortalama S/N oranı grafikleri incelendiğinde parametrelerin etkileri aşağıdaki gibidir.

- Farklı σ değerine bağlı olarak kütle kaybındaki değişimin S/N oranları değerlendirildiğinde, $\sigma=0,006$ ve $\sigma=0,008$ değerleri arasında belirgin bir fark olmadığı ve her iki seviye değerinde ortalamanın üzerinde kaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek S/N oranına sahip en ideal seviye, $\sigma=0,006$ kavitasyon sayısında elde edilmiştir. Buna karşın, $\sigma=0,01$ seviyesi S/N oranı bakımından ortalamanın altında kalmış ve en düşük değeri göstermiştir.
- Nozul ile numune arası mesafe parametresi incelendiğinde, en ideal seviyenin $S_{off}=5$ mm’de olduğu değerdeki kütle kaybı ile elde edildiği görülmüştür. Ayrıca $S_{off}=5$ ve $S_{off}=10$ mm seviyelerinin S/N oranlarının ortalamanın üzerinde ve birbirine yakın olduğu; $S_{off}=15$ mm seviyesinin ise ortalamanın altında kalarak en düşük S/N oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Kavitasyon hücum açısı parametresinin incelenmesi sonucunda, 30° kavitasyon hücum açısının diğer seviyelerdeki değerlere kıyasla daha etkin olduğu ve en ideal seviyenin bu açıyla elde edilebileceği belirlenmiştir. Bu durumun yanında, en yüksek S/N oranı da bu açıda elde edilen kütle kaybında kaydedilmiştir. Buna

karşın, 90° kavitasyon hücum açısı seviyesinin aşınma ve kütle kaybı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu, bu seviyede S/N oranının ortalama değerin altında kaldığı Taguchi analizi ile tespit edilmiştir. Bu sonuç, 90° kavitasyon hücum açısında en fazla kütle kaybı değişiminin gözleneceğini göstermektedir.

Bireysel parametrelerin önemini veya belirli bir yanıt üzerindeki parametreler arasındaki etkileşimleri değerlendirmek için değerli bir istatistiksel araç olan ANOVA analizi (Sahoo, 2009), kavitasyon erozyonuna bağlı olarak kütle kaybı değişimini etkileyen temel parametreleri niceliksel olarak belirlemek için gerçekleştirilmiştir. ANOVA, karelerin toplamını (SS) kullanarak karakteristik değerlerin dağılımını ölçerek ve ardından SS'yi deneydeki faktörlerle ilgili bileşenlere bölerek yanıt değişkeninin değişimi üzerinde dikkate değer etkileri olan faktörleri belirler (Park, 1996; Phadke, 1995). Kavitasyon sayısı, kavitasyon hücum açısı ve nozul ile numune arası mesafe parametrelerinden hangisinin deney sonuçlarında etkili ve önemli olduğu sonucu Varyans (ANOVA) analizi ile değerlendirilmiştir (Kumar ve Choudhury, 2008; Nas ve Öztürk, 2018). Bu hedefle kontrol parametrelerinin kütle kaybı üzerindeki etkilerini ortaya çıkaran Varyans (ANOVA) sonuçları Tablo 5.12'de verilmektedir. Varyans analizi tablosunda yer alan katkı oranları incelendiğinde, kütle kaybına en fazla etki eden parametrenin % 69,07 değeriyle kavitasyon hücum açısının olduğu tespit edilmiştir. % 27,22 değeri ile kavitasyon sayısının ikinci etkili diğer bir parametreyken S_{off} parametresinin % 2,41 değeriyle en az etkiye sahip olan parametre olduğu görülmüştür. Tablo 5.13'te verilen Varyans model özetinde yer alan güvenilirlik ise % 98,70 olarak ölçülmüş ve oluşturulan modelin güvenilirliğinin yüksek olduğu tespit edilmiştir (Nas ve Öztürk, 2018).

Tablo 5.12. Varyans (ANOVA) analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Kavitasyon Sayısı (σ)	2	0,98000	% 27,22	0,98000	0,49000	21,00	0,045
S_{off} (mm)	2	0,08667	% 2,41	0,08667	0,04333	1,86	0,350
Kavitasyon Hücum Açısı (°)	2	2,48657	% 69,07	2,48668	1,243333	53,291	0,0187
Hata	2	0,04657	% 1,300	0,04677	0,023333		
Toplam	8	3,61000	% 100,00				

Tablo 5.13. Varyans (ANOVA) model özeti

S	R-Squared	Adjusted R-Squared	PRESS	R-squared and predicted
0,152753	% 98,70	% 94,81	0,945000	% 73,75

Kütle kaybı tahminini gerçekleştirmek amacıyla regresyon analizi de yapılmıştır. Bu doğrultuda, çıktı parametreleri için oluşturulan tahmin denklemi Denklem (5.2)'de sunulmuştur. Analiz sonucunda elde edilen bu denklem, istenilen parametreler doğrultusunda kütle kaybı değerinin hesaplanabilmesini sağlamakta ve bu sayede yeniden deney yapma gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır (Kalyon ve Özcan, 2019; Aslantas ve diğ., 2018). Doğrusal regresyon modeli ile elde edilen R^2 değeri %88,43 olarak bulunmuştur. Denklemden kullanılan değişkenler; KS: Kaviteasyon Sayısı (σ), NNM: Nozul ile Numune Arası Mesafe (mm) ve KHA: Kaviteasyon Hücüm Açısı ($^\circ$) şeklinde tanımlanmıştır.

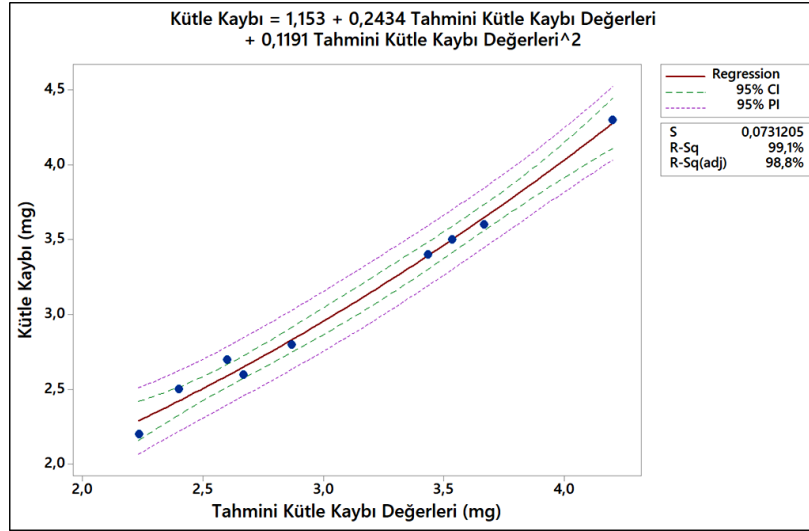
$$\text{Kütle Kaybı} = 175,0 (\text{KS}) + 0,0167 (\text{NNM}) + 0,02111 (\text{KHA}) + 0,233 \quad (5.2)$$

Taguchi analizinin bir diğer sunduğu özellik ise tahmini sonuçlar vermesidir. Yapılan deney sonuçlarından sonra tahmini kütle kaybı değerlerini bulmak için ise: gerçek kütle kaybı değerleri ile tahmini kütle değerleri arasındaki grafikler oluşturulmuştur.

Tablo 5.14. Taguchi kütle kaybı analizi tahmini kütle kaybı ve deneysel kütle kaybı değerleri

Deney No	Kaviteasyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kaviteasyon Hücüm Açısı ($^\circ$)	Kütle Kaybı Δ_m (mg)	Tahmini Kütle Kaybı Değerleri (mg)
1	0,006	5	30	2,2	2,233333333
2	0,006	10	60	2,7	2,6
3	0,006	15	90	3,6	3,666666667
4	0,008	5	60	2,6	2,666666667
5	0,008	10	90	3,4	3,433333333
6	0,008	15	30	2,5	2,4
7	0,01	5	90	4,3	4,2
8	0,01	10	30	2,8	2,866666667
9	0,01	15	60	3,5	3,533333333

Yapılan analizde Regresyon çizgisine mavi noktalar yani deney sonuçlarımız ne kadar yakınsa R-sq: % 100 o değeri o kadar yüksek olur. Grafikte PI (Predict Interval) tahmini değerler sınırını, CI (Confidence Interval) güven aralığı sınırlarını göstermektedir.



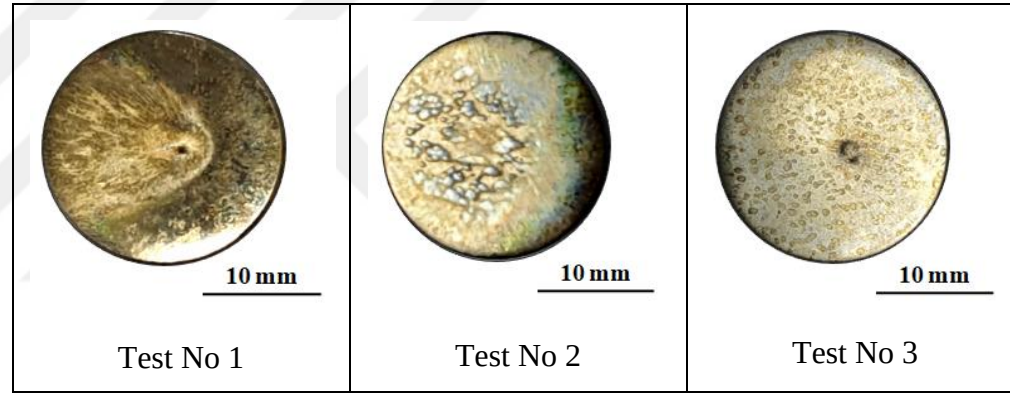
Şekil 5.21. Taguchi kütle kaybı analizi tahmini değer ile gerçek değerler arasındaki fark

5.3. Kaviteasyon Hücum Açısı Etkisi Bulguları

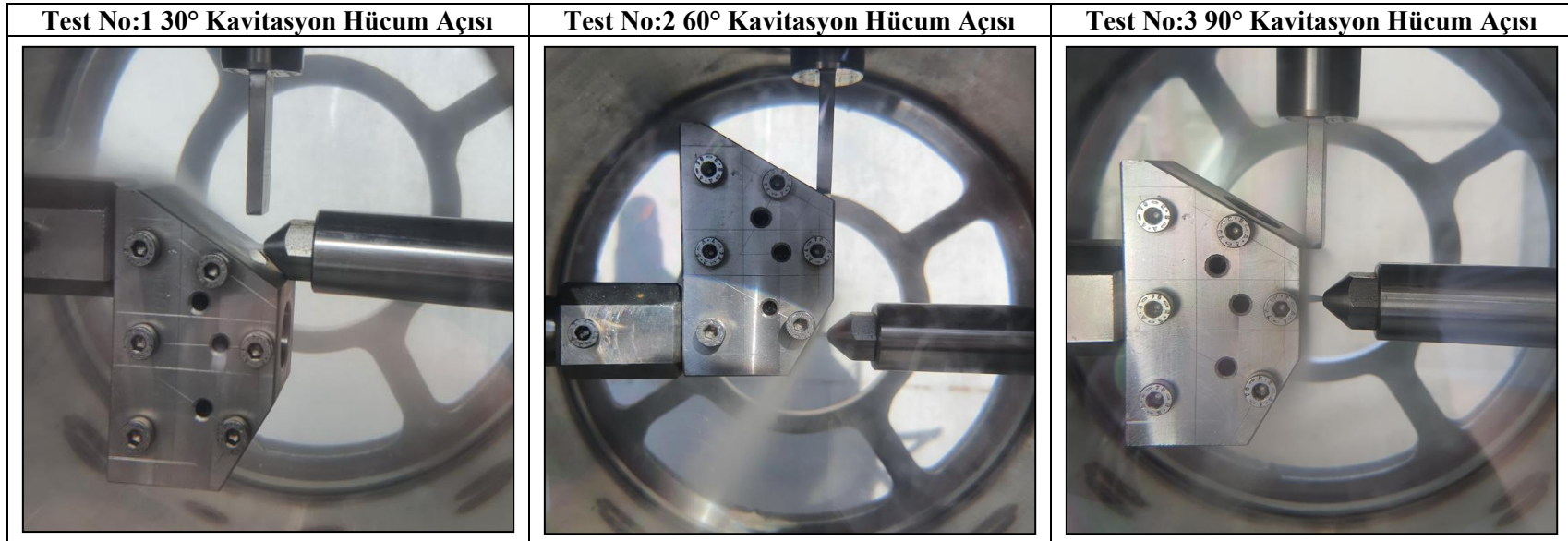
Taguchi deneylerinin analizi sonrası kaviteasyon su jeti erozyonu üzerinde ortaya çıkan en önemli parametrenin kaviteasyon hücum açısı olduğu belirlenmişti (Tablo 5.12). Bu kapsamda Tablo 5.16’da yer alan farklı kaviteasyon hücum açısı kaviteasyon su jeti erozyon testi sonuçları ile Taguchi deney sonuçlarının doğruluğu ortaya çıkartılmıştır. Testler; 180 dk test süresinde, $S_{off}=5$ mm mesafesinde, $d=1,5$ mm nozul çapında, iç basınç $P_1=1$ bar, giriş basıncı $P_2=150$ bar, $\sigma=0,006$ kaviteasyon sayısında ve farklı kaviteasyon hücum açılarıda şebeke suyu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.22’de ise kaviteasyona maruz bırakılan numunelerin kaviteasyon erozyonu görselleri yer almaktadır. Şekil 5.23’te farklı kaviteasyon hücum açıları kaviteasyona uğramış numunelerin test esnasındaki görüntüleri yer almaktadır. Son olarak farklı kaviteasyon hücum açılarıda gerçekleştirilen kaviteasyon su jeti erozyon testleri sonrasında Nikon SMZ 745T Stereo (Japonya) ve Nikon MA100N (Japonya) tip endüstriyel mikroskop cihazları ile belirtilmiş erozyon bölgesi alanlarında çekilmiş mikroskop görüntüleri Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’te yer almıştır.

Tablo 5.15. Numunelerin test öncesi özellikleri

Numune No	Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri (μm)				Kütle Ölçümleri (m) (g)
	R_a	R_q	R_z	R_{3z}	
6.1	0,123	0,166	0,855	-	20,6246
13.1	0,206	0,286	1,487	-	20,7538
15.1	0,157	0,19	0,799	-	20,5312



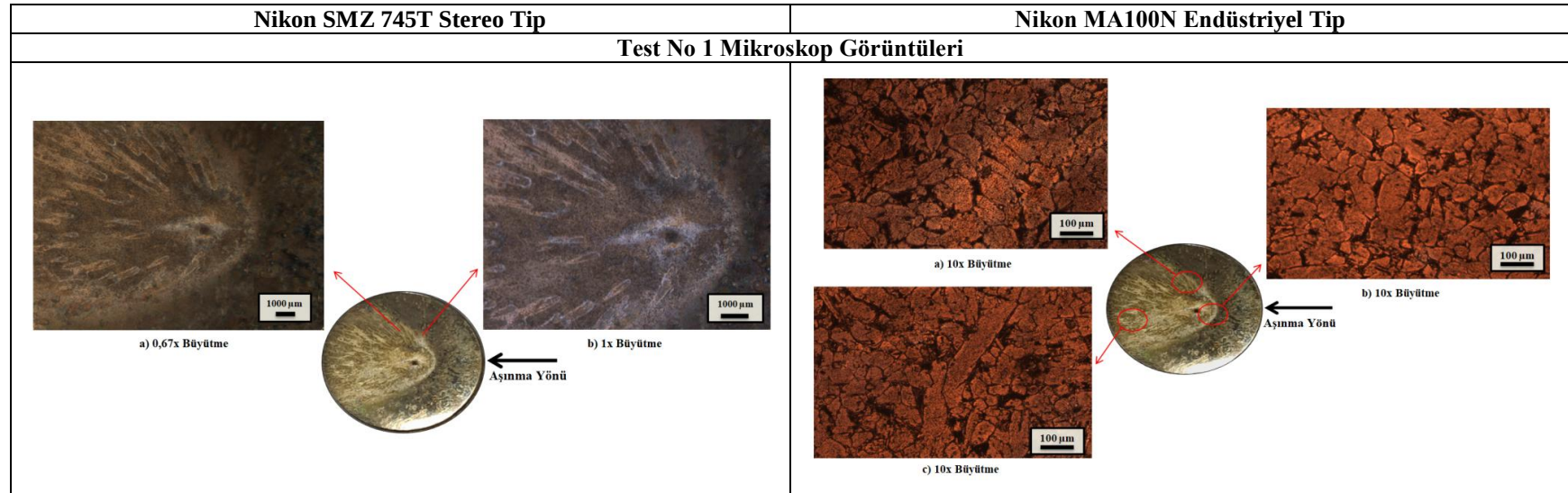
Şekil 5.22. Farklı kavitasyon hücum açılarında meydana gelen oluşan kavitasyon erozyonu görselleri



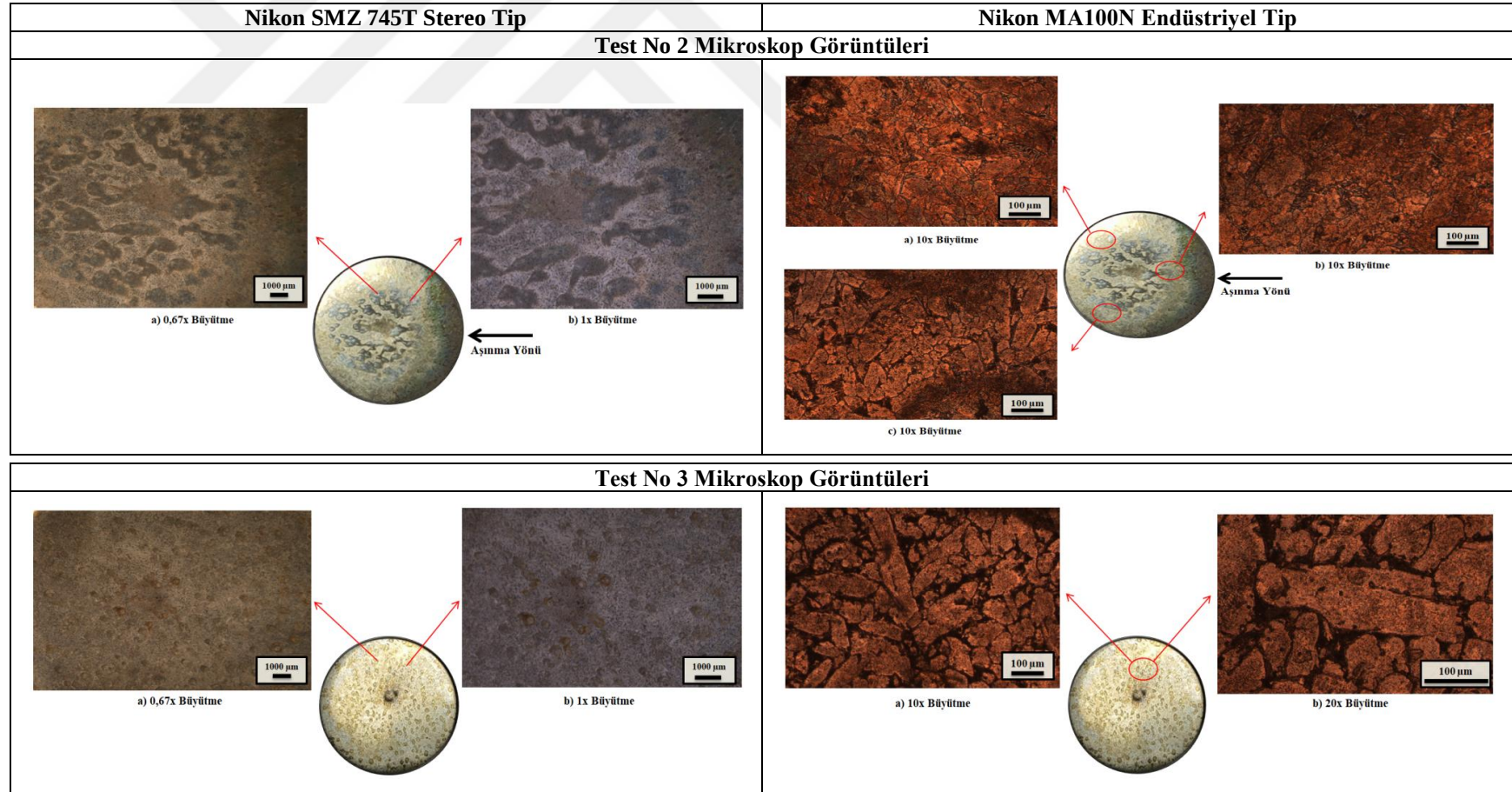
Şekil 5.23. Farklı kavitasyon hücum açıları test esnası görüntüleri

Tablo 5.16. Farklı kavitasyon hücum açısı kavitasyon erozyon testi sonuçları

Test No	Numune No	Etkime Zamanı		Kavitasyon Sayısı (σ)	S_{off} (mm)	Kavitasyon Hücum Açısı ($^\circ$)	Test Öncesi Kütle Ölçümü (m) (g)	Test Sonrası Kütle Ölçümü (m) (g)	Kümülatif Kütle / Hacim Kaybı			Kümülatif Erozyon Oranı		Yüzey Pürüzlülük Değerleri (μm)			
		dk	sa						Δ_m (g)	Δ_m (mg)	mm ³	mg/h	mm ³ /h	R_a	R_q	R_z	R_{3z}
1	15.1	180	3	0,006	5	30	20,5312	20,529	0,0022	2,2	0,29227556	0,73333333	0,09742519	0,478	0,628	3,857	2,51
2	13.1					60	20,7538	20,751	0,0028	2,8	0,37198708	0,93333333	0,12399569	0,368	0,469	2,437	1,875
3	6.1					90	20,6246	20,621	0,0036	3,6	0,4782691	1,2	0,15942303	0,504	0,626	3,486	2,485



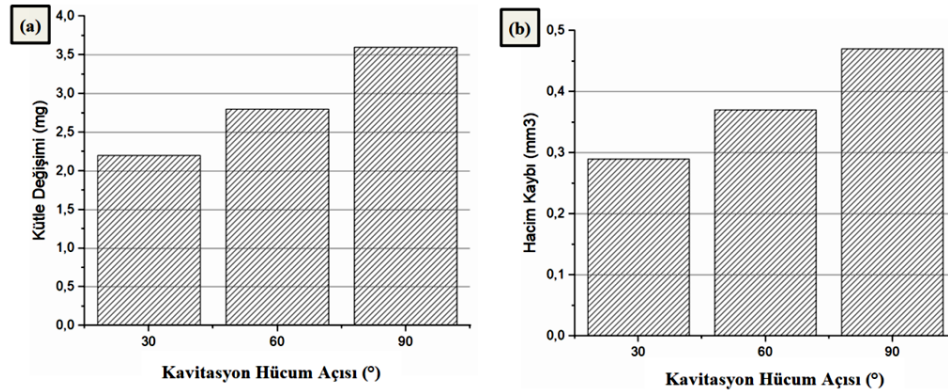
Şekil 5.24. Farklı kavitasyon hücum açıları 1 nolu erozyon testi mikroskop görüntüleri



Şekil 5.25. Farklı kaviteasyon hücum açıları 2 ve 3 nolu erozyon testleri mikroskop görüntüleri

Numuneler üzerinde farklı kavitasyon hücum açısı ile yapılan testler sonucu şu sonuçlara ulaşılmıştır:

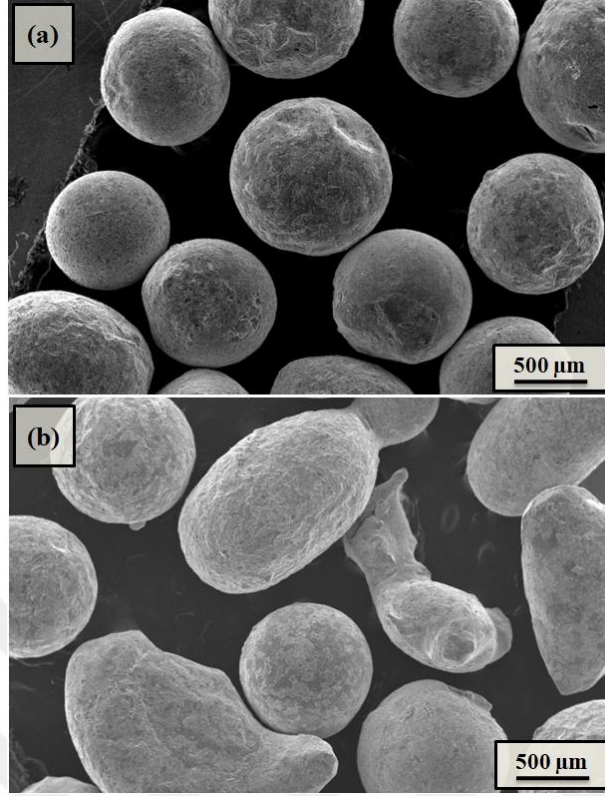
- Şekil 5.26'da farklı kavitasyon hücum açısı değişimi sonucu ortaya çıkan kütle ve hacim kaybı grafikleri yer almaktadır. Kavitasyon su jeti erozyonu uygulamasının 30° kavitasyon hücum açısındaki kütle kaybı $\Delta_m=2,2$ mg, 60° kavitasyon hücum açısındaki kütle kaybı $\Delta_m=2,8$ mg ve 90° kavitasyon hücum açısındaki kütle kaybı $\Delta_m=3,6$ mg olmuştur.
- Şekil 5.22'de görüldüğü gibi 90° kavitasyon hücum açısı konumunda numune yüzeylerinin aşınmış bölgelerinin halka şeklinde olduğu, kavitasyon hücum açısı arttıkça halka şeklinin uzadığı görülmektedir. 30° ve 60° kavitasyon hücum açısındaki aşınma izleri çarpma açısı yönüne doğru genişlemiştir.
- Kavitasyon su jeti erozyonu uygulamasının 30° kavitasyon hücum açısındaki yüzey pürüzlülük değişimi $\Delta R_a=0,321$ μm ; 60° kavitasyon hücum açısındaki yüzey pürüzlülük değişimi $\Delta R_a=0,162$ μm ; 90° kavitasyon hücum açısındaki yüzey pürüzlülük değişimi ise $\Delta R_a=0,381$ μm olmuştur. En fazla değişim 90° kavitasyon hücum açısındaki numune üzerinde görülmüştür. Yapılan doğrulama deneyleri Taguchi analizi için kurulan tasarımın doğruluğunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 5.26. Farklı kavitasyon hücum açısı değişimi a) kütle ve b) hacim kaybı grafikleri

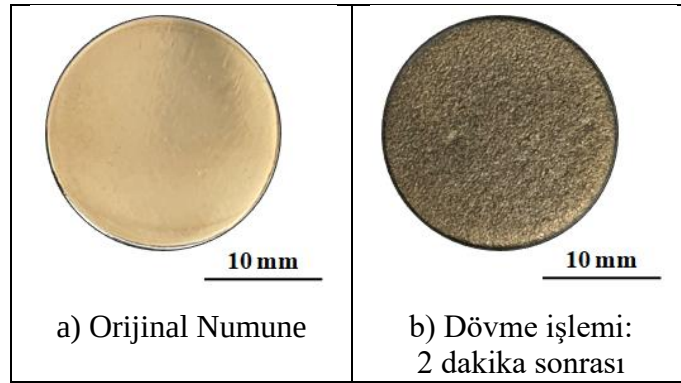
5.4. Bilyalı Dövme İşlemi Bulguları

Dövme işlemlerinde kullanılan S60 paslanmaz çelik bilyaların (boyut aralığı: 700-1000 μm çapında) dövme işlemi öncesi ve sonrasında çekilmiş SEM görüntüleri Şekil 5.27'de yer almaktadır. Görüntü incelendiğinde yüksek hızlarda hedef numuneye çarpan bilyaların hasar almış olduğu görüntülere ulaşılmıştır (Şekil 5.27 (b)).



Şekil 5.27. Dövme işlemleri için kullanılan paslanmaz çelik bilyaların SEM görüntüleri dövme işlemi (a) öncesi (b) sonrası

Şekil 5.28 (a) görselinde ise test numunesinin orijinal hali (daha önce zımparalanmış, parlatılmış ve testlere hazır hale getirilmiş) ve Şekil 5.28 (b)'de bilyalı dövme işlemi sonrası yüzeylerdeki pürüzlülük ve aşınma (erozyon) görüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 5.28. Bilyalı dövme işlemi sonrası numune görselleri (a) öncesi (b) sonrası

Tablo 5.17'de bilyalı dövme işlemi sonrası farklı numuneler özelinde ortaya çıkan kütle kaybı ve erozyon oranı değişim değerlerine yer verilmiştir. Dövme işlemi öncesi ve sonrasında düzenli zaman aralıklarında hassas terazide yapılan kütle ölçümleri sonucunda numunelerde aşınmaya bağlı kütle kaybı görülmüştür.

Tablo 5.17. Bilyalı dövme işlemi test çalışmaları ön parametrik değerleri

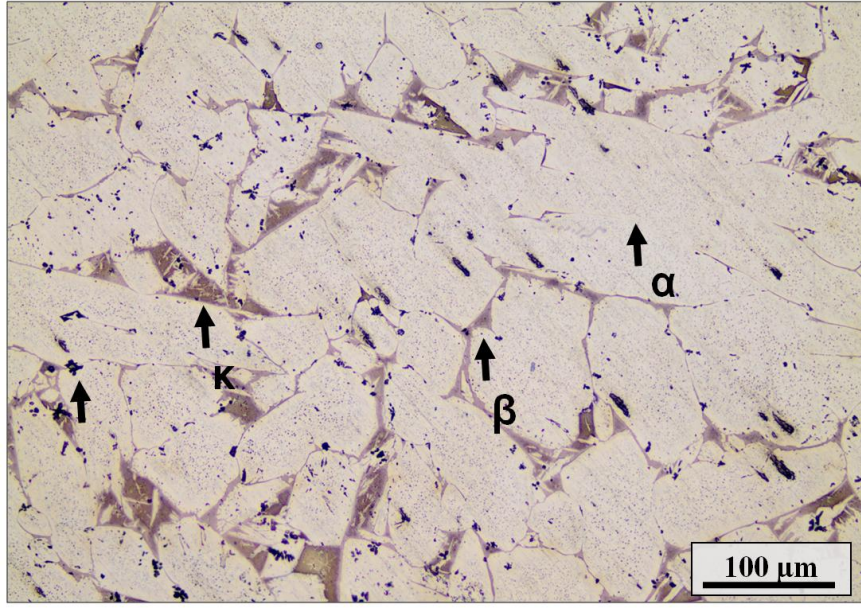
Sıra No	Test Edilen Malzemeler	Nozul ile Numune Mesafe (S_{off}) (mm)	Bilya Türü	Çalışma Basıncı (P) (bar)	Bilya Çarpma Açısı ($^{\circ}$) (Derece)	Test Süresi (t) (dk)	Test Öncesi Kütle Ölçümü (m) (g)	Test Sonrası Kütle Ölçümü (m) (g)	Kütle Kaybı Δ_m (g)	Erozyon Hızı (g/dk)
1	Döküm MAB	40	S60 Paslanmaz Çelik Bilya	4	90	2	21,9309	21,927	0,0039	0,00195
2							22,1376	22,1323	0,0053	0,00265
3							22,2429	22,2376	0,0053	0,00265
4							22,3925	22,3876	0,0049	0,00245
5							22,076	22,0707	0,0053	0,00265
6							22,2414	22,2349	0,0065	0,00325
7							22,4434	22,4381	0,0053	0,00265
8							22,031	22,0255	0,0055	0,00275
9							22,180	22,171	0,009	0,0045
10							22,196	22,1897	0,0063	0,00315
11							22,1849	22,1784	0,0065	0,00325
12							22,1892	22,1824	0,0068	0,0034
13							22,1033	22,0961	0,0072	0,0036
14							22,0447	22,0376	0,0071	0,00355
15							22,2135	22,2064	0,0071	0,00355
16							22,2064	22,199	0,0074	0,0037

5.4.1. Mikroyapı İncelemesi Bulguları

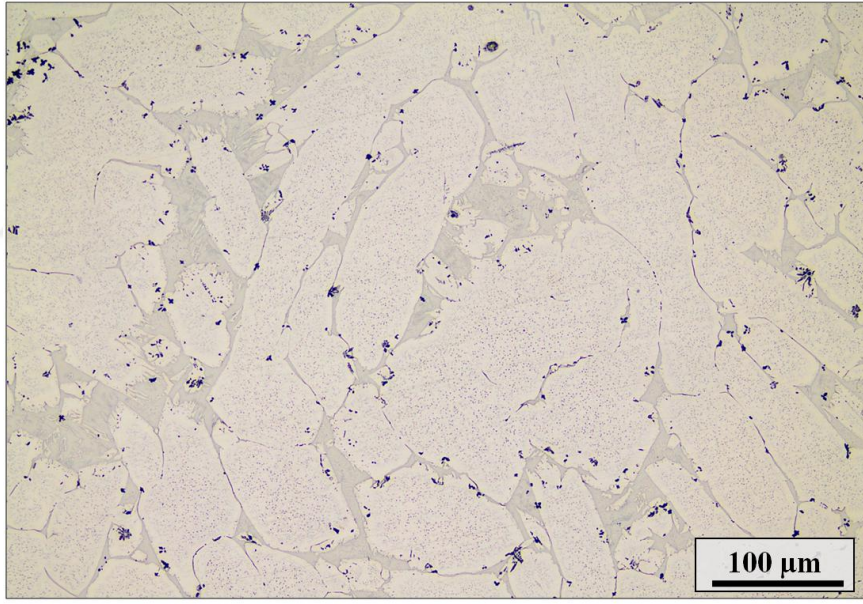
5.4.1.1. Orijinal Numune Mikroyapı Özellikleri

Orijinal (yüzey işlemi uygulanmamış) numunenin metalografik (zımparalama, parlatma, numune ve bakalite alma ile dağlama işlemleri) çalışmaları sonrası içyapı mikroyapı karakterizasyonları Şekil 5.36 (b)'de görüntüsü verilen Olympus (Japonya) marka optik mikroskop ile alınmıştır. Böylece belirtilen cihaz ile Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımının Şekil 5.29'da; α , β ve κ -fazlarından oluşan yüzey mikroyapısı ve Şekil 5.30'da gösterilen kesit mikroyapısı görüntülenmiştir. Bu işlemler ile malzemenin daha iyi tanınması sağlanmıştır.

Alaşımın mikroyapısının incelenmesi sonucunda α fazı (FCC-YMK yapı bakır bakımından zengin katı çözelti), Cu_3Al veya Cu_2MnAl olan ara β fazı (BCC-HMK yapı) ve rozet şeklindeki intermetalik farklı morfolojilere sahip κ fazı çökeltileri içeren çok fazlı bir mikroyapıya sahip olduğu belirtilmiştir (Iqbal ve diğ., 2006; Punburi ve diğ., 2018). Alaşım elementlerinin oluşturduğu fazlardan büyük κ fazı, α fazı içinde çökmüş olup ve bunun $\gamma\text{-Fe}$ 'ye dayandığı bildirilmiştir. Koyu siyah şekillerin ise döküm boşlukları (porozite) olduğu değerlendirilmiştir. Tane sınırına oturmuş ince uzun şeritler halinde farklı ton renginde (açık, koyu kahve, gri) yapılarda görülmektedir.



Şekil 5.29. Döküm MAB-CU4 alaşımının optik mikroskop ile yüzey mikroyapısı



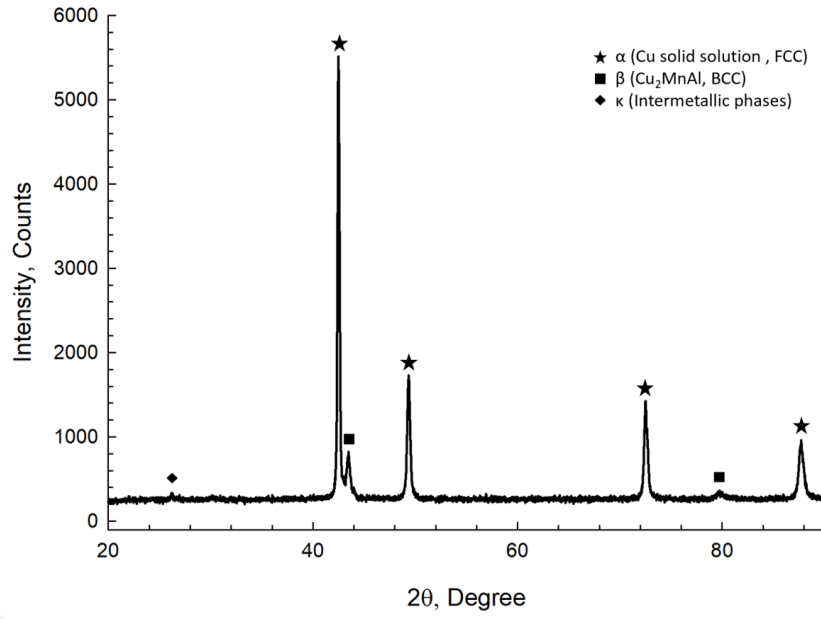
Şekil 5.30. Döküm MAB-CU4 alaşımının optik mikroskop ile kesit mikroyapısı

Alüminyum bronzlarının katılaşması esnasında HMK β fazı; bir Widmanstätten morfolojisi ve γ_2 (ötektoid reaksiyon) (Hasan ve diğ., 1982) ile YMK birincil α fazına dönüşür. Jahanafrooz ve arkadaşlarının (Jahanafrooz ve diğ., 1983) sonuçlarına göre, Fe_3Al partikülleri β fazında oluşur ve soğutma sırasında α fazında çöker. 800-930 °C sıcaklıklarında α ve β fazlarında da farklı κ faz morfolojilerinin (küresel, katmanlı, vb.) oluşabileceği raporlanmıştır (Fuller ve diğ., 2007). Fe ilavesi ile alüminyum bronzun mikroyapısındaki α fazının yüzdesi arttırılabilir. Ayrıca, bronz Fe ilave edilmesi ile κ

çökeltilerinin oluşumu teşvik edilir ve kırılğan γ_2 fazının miktarı azaltılır. Ni ve diğerleri (Ni ve diğ., 2009), bronz bileşiminde Fe'nin varlığının aşınma direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirdiği yönündeki çalışmaları da yayınlamıştır. Bronzun artan Ni içeriği β ve γ_2 fazlarının yüzdesini azaltmasının yanında κ fazının oluşumunu teşvik eder (Łabanowski ve Olkowski, 2009). Fe/Ni oranının alaşımın mikroyapısı üzerindeki etkisi büyüktür ve artan Fe/Ni oranı, κ fazının morfolojisini katmanlıdan küresele dönüştürebilir. Görüldüğü gibi ortaya çıkan bu çökeltilerin şekli ve boyutu, bronz alaşımlarının mekanik ve korozyon özelliklerini etkilediği savunulmuştur. Örneğin α ve katmanlı κ fazlarının ara yüzü çatlak yayılımı için favori bir yol iken (Xu ve diğ., 2016) κ çökeltileri tercihen asidik ortamlarda korozyona uğrayan bir yapıya sahiptir (Song ve diğ., 2015).

Bir diğer yapılan mikroyapısal analiz çalışmasında, Şekil 5.31'de gösterildiği gibi MAB-CU4 alaşımının kantitatif faz analizleri, X-ışını kırınımı (X-Ray Diffraction- X Işını Difraksiyon Spektroskopisi) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kırınımına uğrayan ışınlar hangi açıda kırınımına uğramışsa bu şekilde patern üzerinde pikler oluşturarak malzemeyi tanımlamamızı sağlamıştır.

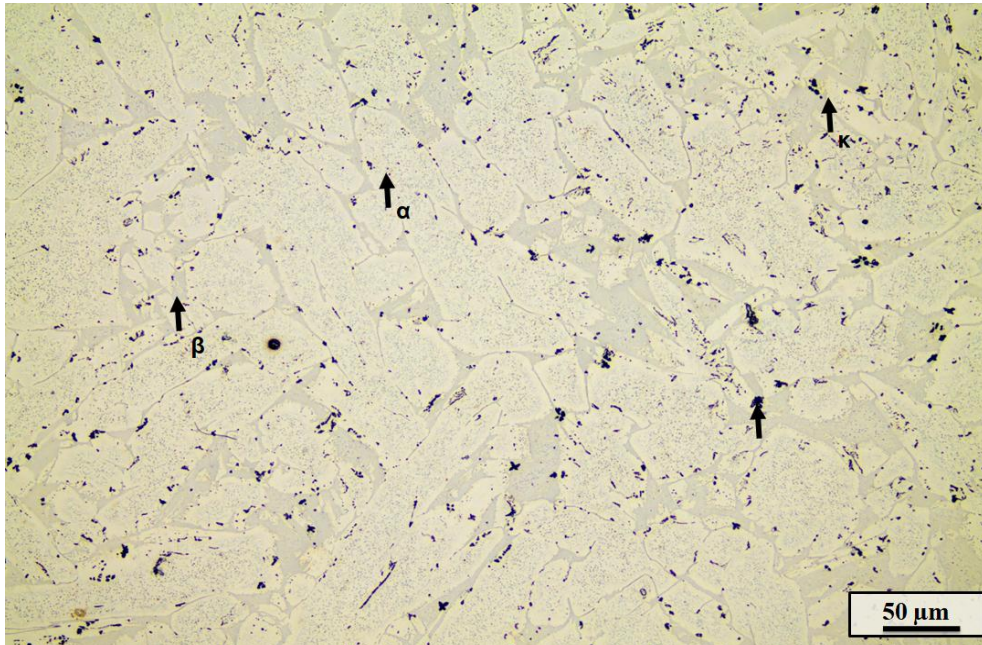
Yapılan analizler bir difraktometre (Rikagu, DMax 2200, Akishima-Shi, Japonya) ile 20° ile 90° arasında Cu-K α radyasyonu kullanılarak, 2° adım boyutunda gerçekleştirilmiştir. Bu spektrumlar, mikroyapı incelemesi ve mevcut XRD çalışmaları ile iyi bir uyum içindedir (Utyaganova ve diğ., 2023; Guo ve diğ., 2022; Punburi ve diğ., 2018; Jin ve diğ., 2016). Buradan çıkan analiz sonucuna göre döküm MAB-CU4 (Manganez Alüminyum Bronz) alaşımının mikroyapısı, bakır açısından zengin bir YMK (Yüzey Merkezli Kübik Yapı) yapıya sahip α fazı (42.46° , 49.34° , 72.51° ve 87.69° açılarındaki kırınım tepe noktaları), yaklaşık olarak α fazının iki katı alüminyum içeriğine sahip bakır açısından zengin β fazı (43.43° ve 79.78° açılarındaki kırınım tepe noktaları) ve manganez ile demir açısından zengin intermetalik fazları (κ) (26.19° açısındaki kırınım tepe noktası) içermektedir (Mota ve diğ., 2021; ASTM B148, 2018). Malzemede bulunan intermetalik fazlar iki farklı kategoriye ayrılabilir: κ_I ve κ_{IV} , her ikisi de γ (Fe) tabanlı ve YMK (Yüzey Merkezli Kübik Yapı) düzenine sahipken, κ_{II} ve κ_{III} ise Fe₃Al'e dayalı düzenli bir HMK (Hacim Merkezli Kübik Yapı) yapıya sahiptir (Meigh, 2018).



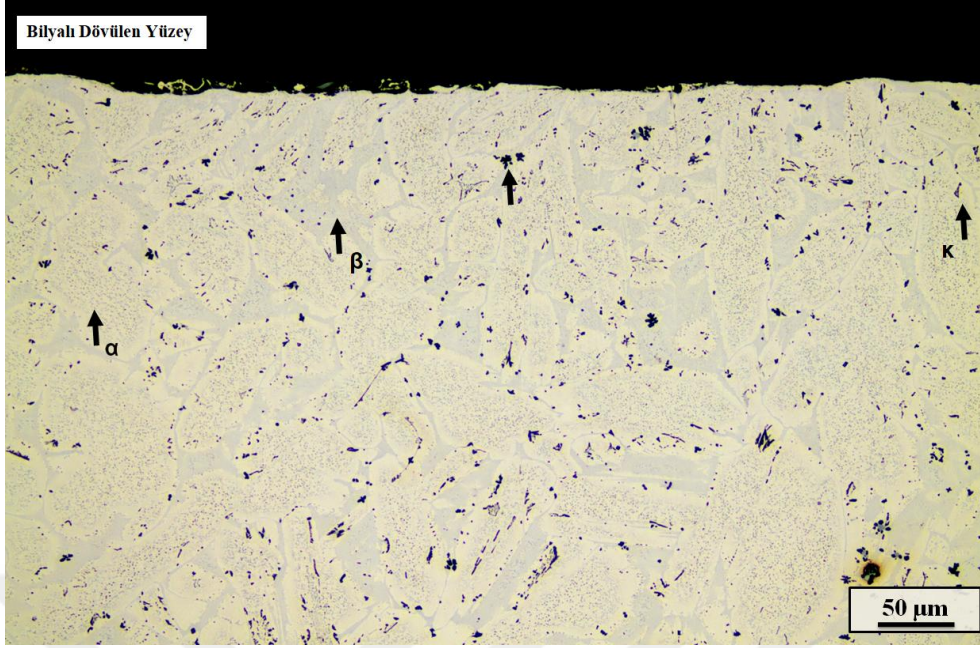
Şekil 5.31. Döküm MAB-CU4 alaşımlarının XRD spektrumları

5.4.1.2. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulanmış Numune Mikroyapı Özellikleri

Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 numunesi mikroyapı karakterizasyonları da Olympus (Japonya) marka optik mikroskop ile yapılmıştır. Şekil 5.32’de Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımlarının yüzey mikroyapısı yer almaktadır. Şekil 5.33’te ise dövülmüş numunenin kesit mikroyapısı yer almaktadır.

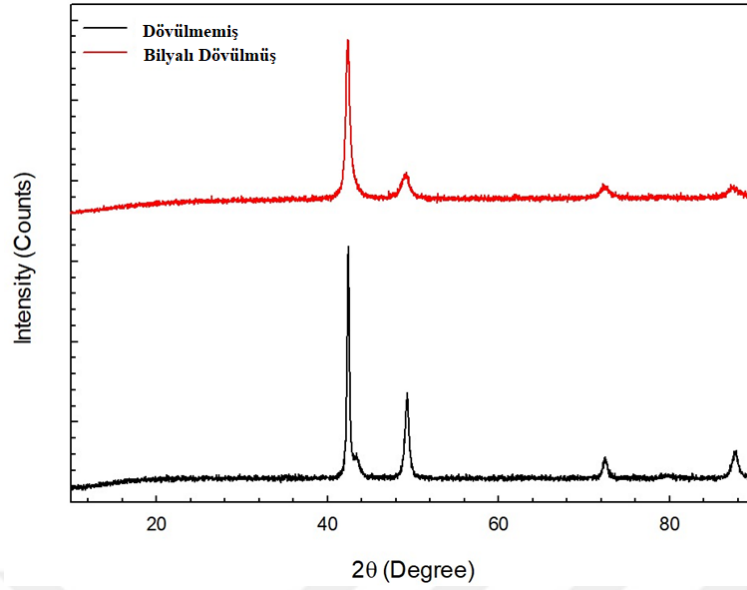


Şekil 5.32. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune yüzey optik mikroskop görüntüsü



Şekil 5.33. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune kesit optik mikroskop görüntüsü

MAB-CU4 alaşımına ait bilyalı dövülmemiş ve dövülmüş numunelerin XRD paternlerin karşılaştırılması ise Şekil 5.34'te gösterilmiştir. Sonuçlara göre dövülmemiş numune; β , α -Cu, κ_{II} ve κ_{III} faz ve bileşiklerini içermektedir. Önceki çalışmalarda Al, Ni, Fe ve Mn elementlerini içeren bronz alaşımları için yavaş soğuma koşullarında benzer XRD paternleri elde edilmiştir (Dudina ve diğ., 2022; Öztürk ve diğ., 2020; Yin ve diğ., 2022). Bilyalı dövülmüş numunede dövülmemiş numunenin paterninden farklı olarak; $43,45^\circ$ 'te bulunan ve κ_{II} ve κ_{III} intermetalik bileşiklerine ait olan pik bulunmamaktadır. Ayrıca scherrer eşitliğinden kristalit boyutunun $32,79 \text{ nm}$ 'den $22,56 \text{ nm}$ 'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme işlemi; malzeme yüzeylerine yüksek enerjili bilyaların çarpmasına bağlı olarak, enerji transferi sağlamaktadır. Bu enerji malzeme yüzeylerinde iç gerilmelere, mikro yapısal değişimlere ve faz dönüşümlerine neden olabilmektedir (Kumagai ve diğ., 2013; Liu ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2011). Liu vd. tarafından yapılan bir çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliğine uygulanan bilyalı dövme işleminin martenzitik dönüşümü tetiklediği bildirilmiştir (Liu ve diğ., 2020). Farklı bronzların soğuması üzerine yapılan çalışmalarda dengeli soğuma koşulları için yapıda sadece Cu kristallerinin oluşmasının beklenildiği, kararsız soğuma durumunda ise yapıda intermetalik bileşiklerin oluştuğu bildirilmiştir (Bazhenov ve diğ., 2021). Buna göre bilyalı dövme işlemi MAB-CU4 alaşımının yüzeyinde enerji transferi sağlayarak kararsız bileşiklerin azalmasına neden olmuştur.

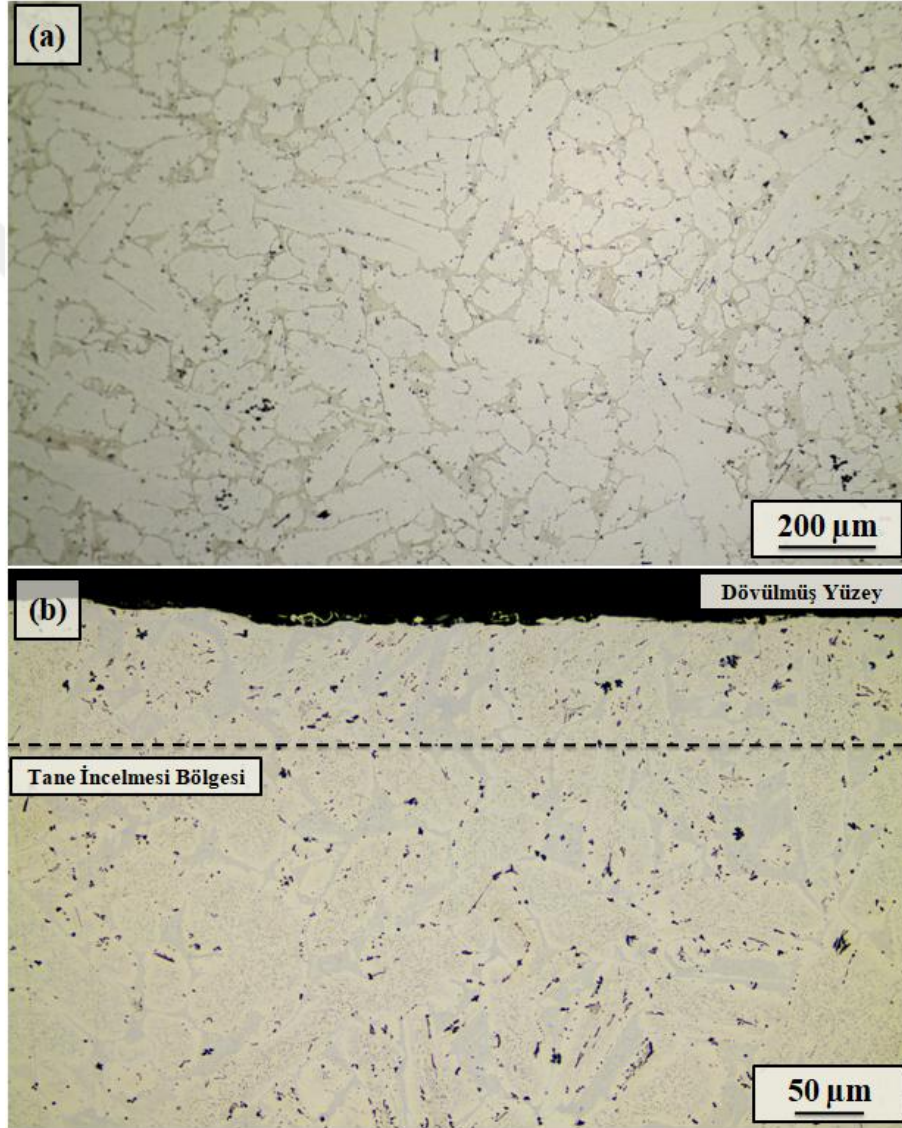


Şekil 5.34. Bilyalı dövülmemiş ve dövülmüş numunelerin XRD spektrumları

Bilyalı dövme işlemi etkisiyle malzemelerin yüzey ve yüzey altı özellikleri de değişmektedir. Bu sebeple Şekil 5.35'te bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş MAB-CU4 alaşımı numunelerinin kesit mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Ortaya çıkan mikroyapı incelendiğinde bilyaların yüksek enerjili ve tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarpması sonucu gerçekleşen plastik deformasyonun yüzey ve yüzey altı bölgelerde tane yönelmesine ve tane incilmesi mekanizmalarına sebep olduğu görülmektedir. Bu durum bazı bölgelerde ise tane sınırlarının kaybolması şeklinde etkisini devam ettirmiştir. Ayrıca yüzeye yakın bölgelerde plastik deformasyon etkisinin yoğun olduğu bölgelerde mikro boyutta çatlakların oluştuğu da gözlemlenmektedir.

Literatürde bilyalı dövme yöntemi sonrası mikroyapı değişimlerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Ma ve arkadaşları (2021) bilyalı dövme yönteminin mikroyapı değişimlerinin titanyum alaşımları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada mikroyapıda görülen kesit incelemesinin ve dövme etkisinin yüksek olduğu yüzeye yakın bölgelerde tane sınırlarının incelendiği ve hemen hemen ortadan kalktığını belirtmişlerdir. Bunun yanında kesit derinliğinin artmasına bağlı azalan bilyalı dövme etkisinin ise tane boyutunu giderek artması şeklinde gözlemlenmişlerdir (Ma ve diğ., 2021). Zhang ve arkadaşları da (2021) Ti4Al2V titanyum alaşımlarına uyguladıkları bilyalı dövme işlemi sonucunda mikroyapı değişimlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda bilyalı dövmenin etkisiyle yüzey altı bölgelerde tane sınırlarının düşük açılı

hale geldiklerini, kaba tanelerin kalktığını ve nano boyuttaki tanelerin oluşarak ikizlenme mekanizmalarının gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Artan bilyalı dövme etkisiyle oluşan plastik deformasyonun mikroyapıdaki bu değişimlerin nedeni olduğunu da eklemişlerdir (Zhang ve diğ., 2021). Benzer değişimlerin MAB-CU4 alaşımlarında da görüldüğü bilyalı dövme işleminin malzemenin mikroyapısını değiştirdiği görülmüştür.



Şekil 5.35. MAB alaşımı kesit mikroyapı bilyalı dövme (a) öncesi (b) sonrası

5.4.2. Vickers Sertlik İncelemesi Bulguları

Çalışmada orijinal numune (yüzey işlemi uygulanmamış) ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneler üzerinde yapılan Vickers sertlik ölçme işlemleri ile mekanik

karakterizasyon incelemeleri yapılmıştır. Bakır alaşımı numunesinin yüzey ve yüzey altı sertlik değeri ölçümleri Şekil 5.36 (a)'da görseli verilen Zwick ZHV 10 (Almanya) marka cihaz ile manüel olarak yapılmıştır. Sertlik haritaları numunenin kesit ve yüzeylerinde oluşturulan sertlik izleri ile oluşturulmuştur. ImageJ® yazılım programında ise sertlik izlerinin köşegen uzunlukları hesaplanarak belirlenen bölgelerin Vickers sertlik değerleri elde edilmiştir.

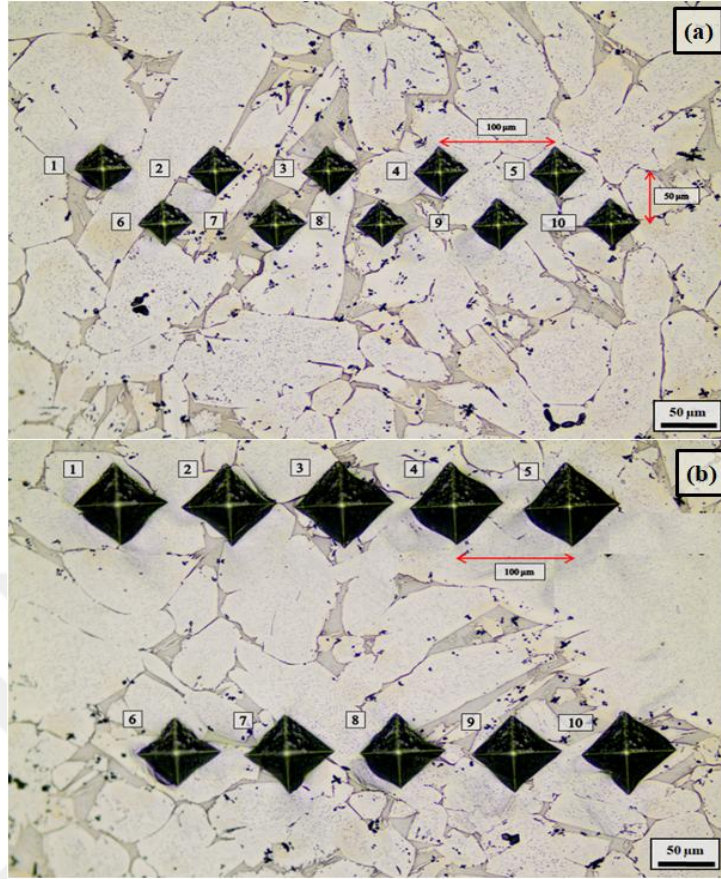


Şekil 5.36. Kullanılan (a) Vickers sertlik cihazı (b) optik mikroskop cihazı

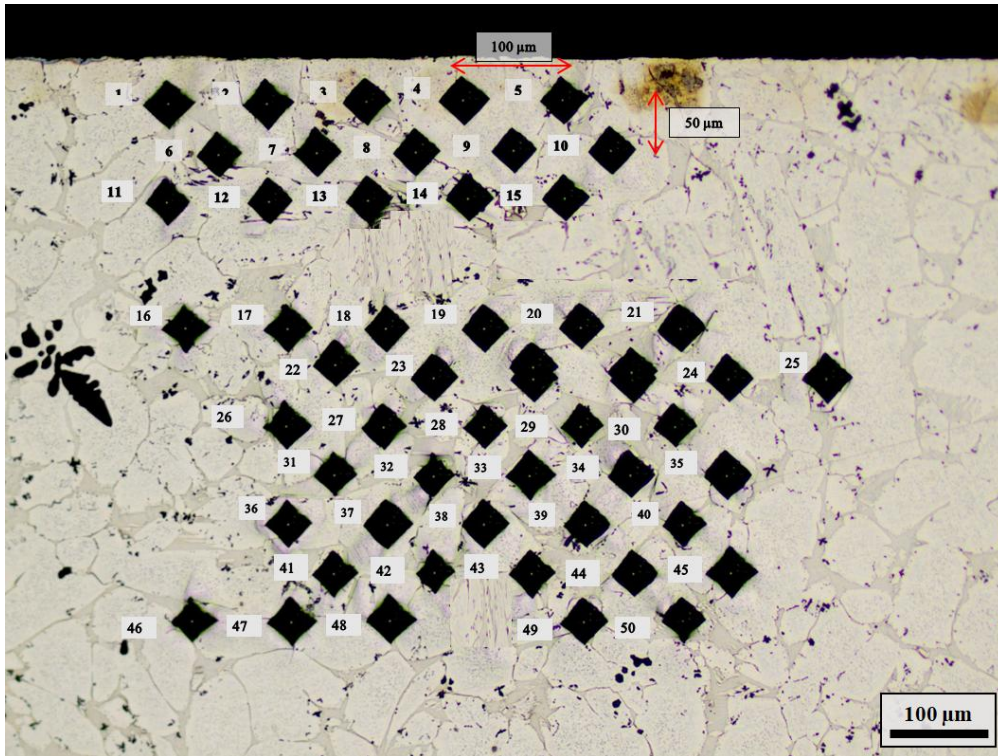
5.4.2.1. Orijinal Numune Vickers Sertlik Ölçümleri

Orijinal numunede yüzey sertlik ölçümleri 10 saniye aralıklarla 0,2 ve 0,5 kg yük altında farklı bölgelerden örüntüler yapılarak ASTM E348-17 standartları altında yapılmıştır. Her bir nokta için ölçümler beş tekrar olarak ölçülmüştür. Şekil 5.37 (a)'de 0,2 kg yük, 10 saniye yük altında (HV/0,2/10) 2x5 örüntü ve Şekil 5.37 (b)'de 0,5 kg yük, 10 saniye yük altında (HV/0,5/10) 2x5 örüntü ile sertlik ölçümlerine tabi tutulmuş numunenin yüzey mikroyapı görüntüsü yer almaktadır. Tablo 5.18 ve Tablo 5.19'da ise her bir noktanın Vickers sertlik ölçüm değeri verilmektedir.

Orijinal numune kesit sertlik ölçüm işlemleri için ise Şekil 5.38'de 0,2 kg yük, 10 saniye yük altında (HV/0,2/10) 5x10 örüntü ile sertlik ölçümlerine tutulmuş numunenin kesit mikroyapı görüntüsü ile verilmiştir. Tablo 5.20'de da her bir noktanın Vickers sertlik kesit ölçüm değeri, Tablo 5.21'de numune yüzeyinden derinliğe doğru ortalama Vickers sertlik ölçüm değerleri, Şekil 5.39'da ise numune yüzeyinden derinliğe doğru ortalama Vickers sertlik ölçüm grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.37. (a) HV/0,2/10 yüzey mikroyapısı (b) HV/0,5/10 yüzey mikroyapısı



Şekil 5.38. Orijinal numune HV/0,2/10 kesit mikroyapısı

Tablo 5.18. HV/0,2/10 Vickers yüzey sertlik ölçümleri

Bölge No	m (kg)	F(N)	D1 (mm)	D2 (mm)	HV	D1 (mikron)	D2 (mikron)
1	0,2	1,962	0,050918	0,048903	148,8596	50,918	48,903
2	0,2	1,962	0,050408	0,051349	143,2492	50,408	51,349
3	0,2	1,962	0,050101	0,05076	145,8056	50,101	50,76
4	0,2	1,962	0,049135	0,051928	145,2233	49,135	51,928
5	0,2	1,962	0,05022	0,051457	143,4747	50,22	51,457
6	0,2	1,962	0,048911	0,047315	160,1902	48,911	47,315
7	0,2	1,962	0,051253	0,052574	137,5942	51,253	52,574
8	0,2	1,962	0,046253	0,046819	171,2311	46,253	46,819
9	0,2	1,962	0,050742	0,052788	138,3848	50,742	52,788
10	0,2	1,962	0,051144	0,0513	141,3344	51,144	51,3

Tablo 5.19. HV/0,5/10 Vickers yüzey sertlik ölçümleri

Bölge No	m (kg)	F(N)	D1 (mm)	D2 (mm)	HV	D1 (mikron)	D2 (mikron)
1	0,5	4,905	0,084441	0,084331	130,1847	84,441	84,331
2	0,5	4,905	0,083167	0,085125	130,9284	83,167	85,125
3	0,5	4,905	0,088966	0,089965	115,8216	88,966	89,965
4	0,5	4,905	0,083225	0,083865	132,8189	83,225	83,865
5	0,5	4,905	0,085785	0,086105	125,5046	85,785	86,105
6	0,5	4,905	0,073804	0,069959	179,4182	73,804	69,959
7	0,5	4,905	0,080269	0,080926	142,7111	80,269	80,926
8	0,5	4,905	0,075753	0,077707	157,4601	75,753	77,707
9	0,5	4,905	0,080533	0,078316	146,9575	80,533	78,316
10	0,5	4,905	0,083825	0,084805	130,4041	83,825	84,805

Tablo 5.20. HV/0,2/10 Vickers kesit sertlik ölçümleri

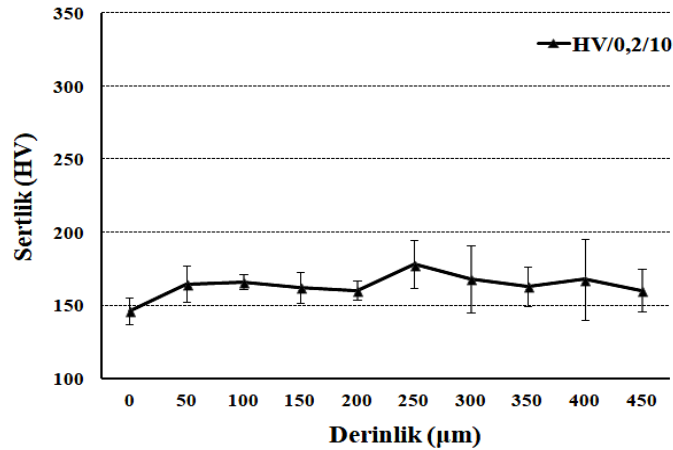
Bölge No	m (kg)	F(N)	D1 (mm)	D2 (mm)	HV	D1 (mikron)	D2 (mikron)
1	0,2	1,962	0,052224	0,049899	142,2243	52,224	49,899
2	0,2	1,962	0,052023	0,052567	135,594	52,023	52,567
3	0,2	1,962	0,048535	0,048376	157,9336	48,535	48,376
4	0,2	1,962	0,051677	0,049986	143,5142	51,677	49,986
5	0,2	1,962	0,049828	0,048695	152,8078	49,828	48,695
6	0,2	1,962	0,045347	0,046247	176,8018	45,347	46,247
7	0,2	1,962	0,048619	0,050884	149,8126	48,619	50,884
8	0,2	1,962	0,047383	0,048139	162,5601	47,383	48,139
9	0,2	1,962	0,045114	0,046234	177,7554	45,114	46,234
10	0,2	1,962	0,048044	0,049463	156,0088	48,044	49,463
11	0,2	1,962	0,044617	0,048459	171,2164	44,617	48,459
12	0,2	1,962	0,045327	0,047373	172,6082	45,327	47,373
13	0,2	1,962	0,046853	0,048879	161,8477	46,853	48,879
14	0,2	1,962	0,047195	0,048653	161,4562	47,195	48,653
15	0,2	1,962	0,047373	0,047714	164,0509	47,373	47,714
16	0,2	1,962	0,049649	0,049415	151,1434	49,649	49,415
17	0,2	1,962	0,048833	0,048804	155,5937	48,833	48,804
18	0,2	1,962	0,044927	0,048246	170,8601	44,927	48,246
19	0,2	1,962	0,047524	0,049293	158,2405	47,524	49,293
20	0,2	1,962	0,045425	0,046363	176,0553	45,425	46,363
21	0,2	1,962	0,048193	0,048348	159,1465	48,193	48,348
22	0,2	1,962	0,046263	0,047484	168,7742	46,263	47,484
23	0,2	1,962	0,047213	0,048493	161,9356	47,213	48,493
24	0,2	1,962	0,04728	0,048819	160,6139	47,28	48,819
25	0,2	1,962	0,050743	0,051837	140,9598	50,743	51,837
26	0,2	1,962	0,048612	0,050388	151,3388	48,612	50,388
27	0,2	1,962	0,045274	0,047026	174,1075	45,274	47,026

Tablo 5.20. (Devam) HV/0,2/10 Vickers kesit sertlik ölçümleri

28	0,2	1,962	0,044794	0,044449	186,2398	44,794	44,449
29	0,2	1,962	0,043194	0,045249	189,6242	43,194	45,249
30	0,2	1,962	0,043634	0,044785	189,7272	43,634	44,785
31	0,2	1,962	0,043474	0,044945	189,7272	43,474	44,945
32	0,2	1,962	0,041638	0,045532	195,2031	41,638	45,532
33	0,2	1,962	0,050503	0,051528	142,4809	50,503	51,528
34	0,2	1,962	0,047484	0,048561	160,7945	47,484	48,561
35	0,2	1,962	0,047835	0,050413	153,6644	47,835	50,413
36	0,2	1,962	0,047524	0,048125	162,1287	47,524	48,125
37	0,2	1,962	0,050056	0,050301	147,2738	50,056	50,301
38	0,2	1,962	0,047527	0,05046	154,4841	47,527	50,46
39	0,2	1,962	0,046436	0,047077	169,6199	46,436	47,077
40	0,2	1,962	0,044314	0,046126	181,3425	44,314	46,126
41	0,2	1,962	0,046234	0,047911	167,3502	46,234	47,911
42	0,2	1,962	0,038555	0,045409	210,3946	38,555	45,409
43	0,2	1,962	0,04664	0,049686	159,8578	46,64	49,686
44	0,2	1,962	0,046047	0,047504	169,4821	46,047	47,504
45	0,2	1,962	0,052637	0,053054	132,7837	52,637	53,054
46	0,2	1,962	0,04663	0,046223	172,0398	46,63	46,223
47	0,2	1,962	0,050279	0,050514	146,0024	50,279	50,514
48	0,2	1,962	0,050413	0,050367	146,0401	50,413	50,367
49	0,2	1,962	0,048459	0,048113	159,0444	48,459	48,113
50	0,2	1,962	0,044302	0,047313	177,7208	44,302	47,313

Tablo 5.21. HV/0,2/10 ortalama Vickers kesit sertlik ölçümleri

S.N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort. Vickers Sertlik Ölçümleri (HV)
Konum (µm)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	
1	0	142,22		135,59		157,93		143,51		152,81	146,414786
2	50		176,8		149,81		162,56		177,76		164,587755
3	100	171,22		172,61		161,85		161,46		164,05	166,235863
4	150		151,14		155,59		170,86		158,24		162,37857
5	200	159,15		168,77		162,94		161,61		149,96	160,486021
6	250		151,34		174,11		186,24		189,62		178,20751
7	300	189,73		195,2		142,48		160,79		153,66	168,374024
8	350		162,13		147,27		154,48		169,62		162,969815
9	400	167,35		210,39		159,86		169,48		132,78	167,973683
10	450		172,04		146		146,04		159,04		160,169495



Şekil 5.39. MAB-CU4 alaşımı numunesi sertliğinin derinliğe bağlı değişimi

Sonuçta Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımı üzerinde yapılan sertlik ölçümleri sonrası herhangi bir yüzey işlemine tabi tutulmamış orijinal numunenin,

- Ortalama yüzey Vickers sertlik değerleri farklı yüklerde 148 HV/0,2/10 ve 139 HV/0,5/10 olarak bulunmuştur.
- Yüzey sertlik ölçümleri Equo Tıp 2 (İsviçre) marka portatif sertlik ölçme cihazı ile de yapılmış olup farklı bölgelerinden yapılan ortalama Vickers sertlik değeri ölçümü 160 HV olarak tespit edilmiştir.
- Ortalama kesit Vickers sertlik değeri ise 163 HV/0,2/10 olarak ölçülmüştür.
- Şekil 5.39’da verilen grafik incelendiğinde ise kesit sertlik değerleri değişiminin numune yüzeyinden merkeze doğru homojen şekilde yaklaşık olarak aynı değerde kalarak değiştiği görülmüştür.

5.4.2.2. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulanmış Numune Vickers Sertlik Ölçümleri ve Sertlik Haritası

Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune sertlik haritasının çıkarılması işlemi için gerekli Vickers sertlik ölçümleri, Zwick ZHV 10 (Almanya) sertlik ölçme cihazı ile manüel olarak yapılmıştır. Sertlik haritaları çıkarılan kesit ve yüzeylerin ImageJ® programında köşegen uzunlukları bulunarak belirlenen bölgelerin sertlik değerleri hesaplanmıştır. Sertlik ölçüm işlemleri ASTM E348-17 standartları altında, 10 saniye aralıklarla 0,2 kg yük altında farklı bölgelerden örüntüler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir nokta için ölçümler beş tekrar olacak şekilde alınmıştır.

Örüntüler sertlik cihazı üzerinde bulunan yatay ve dikey ekseninde hareket edilmesini sağlayan mikrometre (bir çizgi 10 mikron) kolu ile her bir iz arasında yatayda 140 mikron dikeyde 70 mikron olacak şekilde izlerin konumlandırılması ile yapılmıştır. Sertlik izleri 1330 x 630 μm^2 ölçülerinde dikdörtgen bir alan üzerinde düzenlenmiş ve yüzeyin yaklaşık 30 μm altına yerleştirilmiştir. Şekil 5.42’de 0,2 kg yük, 10 saniye sürecinde (HV/0,2/10) 10x10 örüntü ile sertlik ölçümlerine tutulmuş numunenin kesit mikroyapı görüntüsü yer almaktadır. Tablo 5.22’de her bir noktanın Vickers sertlik ölçüm değerini vermektedir. Tablo 5.23’te ise numune yüzeyinden derinliğe doğru ortalama Vickers sertlik ölçüm değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5.22. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune HV/0,2/10 Vickers kesit sertlik ölçümleri

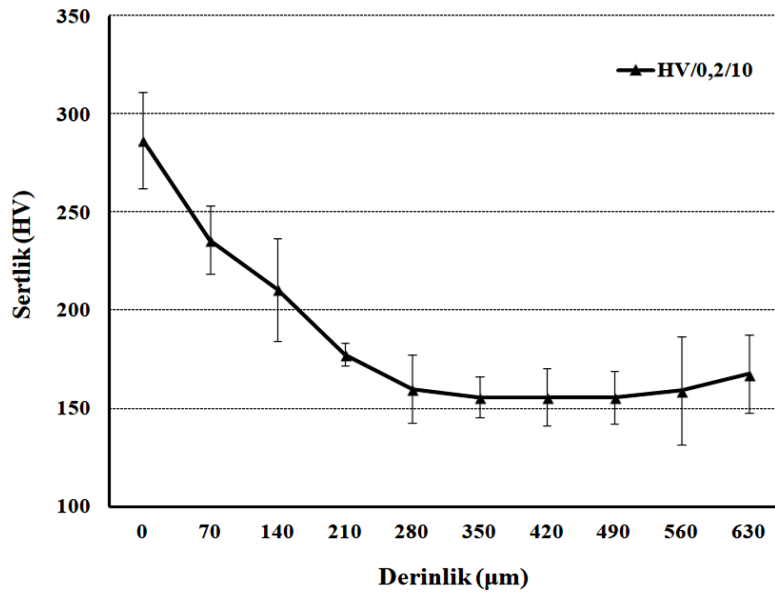
Bölge No	m (kg)	F(N)	D1 (mm)	D2 (mm)	HV	D1 (µm)	D2 (µm)
1	0,2	1,962	0,038954	0,037945	250,82996	38,954	37,945
2	0,2	1,962	0,036726	0,038147	264,58811	36,726	38,147
3	0,2	1,962	0,035554	0,035501	293,78628	35,554	35,501
4	0,2	1,962	0,039033	0,038686	245,56496	39,033	38,686
5	0,2	1,962	0,03548	0,037015	282,23098	35,48	37,015
6	0,2	1,962	0,035402	0,034669	302,09544	35,402	34,669
7	0,2	1,962	0,035949	0,034071	302,53567	35,949	34,071
8	0,2	1,962	0,034669	0,034763	307,68155	34,669	34,763
9	0,2	1,962	0,034071	0,03528	308,40069	34,071	35,28
10	0,2	1,962	0,035309	0,03398	308,95285	35,309	33,98
11	0,2	1,962	0,041327	0,039402	227,59444	41,327	39,402
12	0,2	1,962	0,039997	0,040741	227,5437	39,997	40,741
13	0,2	1,962	0,039528	0,040741	230,21048	39,528	40,741
14	0,2	1,962	0,041382	0,041327	216,82795	41,382	41,327
15	0,2	1,962	0,039997	0,041222	224,85654	39,997	41,222
16	0,2	1,962	0,037202	0,037229	267,7399	37,202	37,229
17	0,2	1,962	0,038483	0,039124	246,27425	38,483	39,124
18	0,2	1,962	0,037907	0,037229	262,73907	37,907	37,229
19	0,2	1,962	0,040567	0,041071	222,55435	40,567	41,071
20	0,2	1,962	0,039291	0,040405	233,53273	39,291	40,405
21	0,2	1,962	0,045845	0,046513	173,88886	45,845	46,513
22	0,2	1,962	0,044588	0,043336	191,86949	44,588	43,336
23	0,2	1,962	0,04229	0,044216	198,21127	42,29	44,216
24	0,2	1,962	0,042611	0,042375	205,36481	42,611	42,375
25	0,2	1,962	0,065779	0,064583	87,28081	65,779	64,583
26	0,2	1,962	0,041908	0,042351	208,92394	41,908	42,351
27	0,2	1,962	0,038547	0,039826	241,48372	38,547	39,826
28	0,2	1,962	0,039873	0,043121	215,34134	39,873	43,121
29	0,2	1,962	0,036813	0,038483	261,62364	36,813	38,483
30	0,2	1,962	0,040512	0,041046	222,99117	40,512	41,046
31	0,2	1,962	0,045871	0,04523	178,72056	45,871	45,23
32	0,2	1,962	0,04523	0,045179	181,46692	45,23	45,179
33	0,2	1,962	0,046464	0,044537	179,11356	46,464	44,537
34	0,2	1,962	0,043253	0,045871	186,73746	43,253	45,871
35	0,2	1,962	0,043895	0,045749	184,57732	43,895	45,749
36	0,2	1,962	0,044691	0,04698	176,50494	44,691	46,98
37	0,2	1,962	0,04533	0,047204	173,22801	45,33	47,204
38	0,2	1,962	0,045945	0,045604	176,97568	45,945	45,604
39	0,2	1,962	0,047864	0,045888	168,75619	47,864	45,888
40	0,2	1,962	0,044347	0,049189	169,5365	44,347	49,189
41	0,2	1,962	0,047277	0,049079	159,75824	47,277	49,079
42	0,2	1,962	0,046464	0,044537	179,11356	46,464	44,537
43	0,2	1,962	0,050478	0,048493	151,42755	50,478	48,493
44	0,2	1,962	0,052982	0,053449	130,94367	52,982	53,449
45	0,2	1,962	0,050416	0,045997	159,5694	50,416	45,997
46	0,2	1,962	0,049443	0,051346	146,01401	49,443	51,346
47	0,2	1,962	0,047224	0,048163	163,02057	47,224	48,163
48	0,2	1,962	0,043685	0,044078	192,5741	43,685	44,078
49	0,2	1,962	0,04701	0,047475	166,14798	47,01	47,475
50	0,2	1,962	0,047911	0,050998	151,61745	47,911	50,998
51	0,2	1,962	0,051118	0,050363	144,02946	51,118	50,363
52	0,2	1,962	0,050626	0,050318	145,56594	50,626	50,318
53	0,2	1,962	0,047106	0,049638	158,47936	47,106	49,638
54	0,2	1,962	0,05096	0,051566	141,10837	50,96	51,566
55	0,2	1,962	0,04839	0,050416	151,93372	48,39	50,416
56	0,2	1,962	0,049274	0,046905	160,3468	49,274	46,905

Tablo 5.22. (Devam) Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune HV/0,2/10 Vickers kesit sertlik ölçümleri

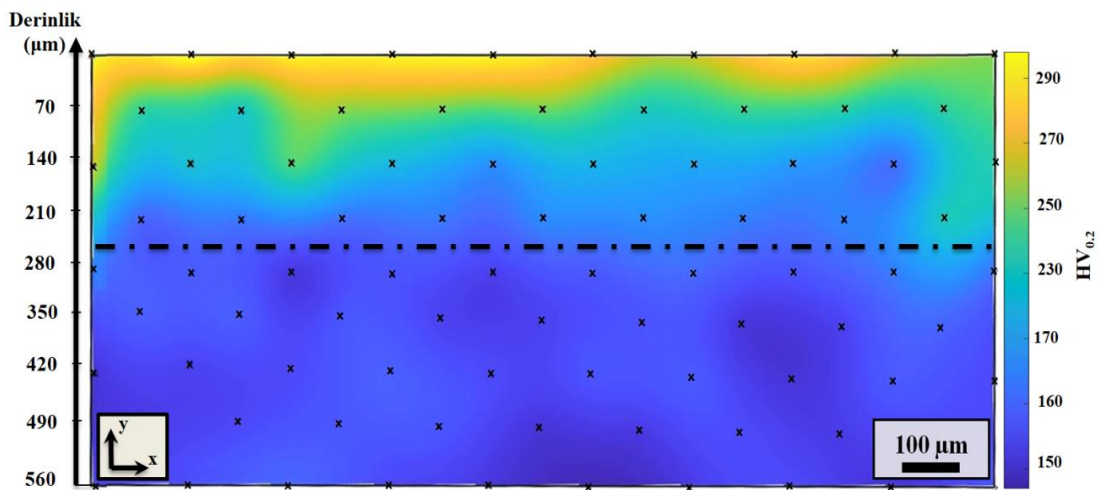
57	0,2	1,962	0,045626	0,049443	164,11299	45,626	49,443
58	0,2	1,962	0,047169	0,047475	165,5902	47,169	47,475
59	0,2	1,962	0,047567	0,050467	154,33604	47,567	50,467
60	0,2	1,962	0,046342	0,046371	172,55976	46,342	46,371
61	0,2	1,962	0,047679	0,047796	162,7202	47,679	47,796
62	0,2	1,962	0,042611	0,045781	189,84313	42,611	45,781
63	0,2	1,962	0,050363	0,052289	140,76217	50,363	52,289
64	0,2	1,962	0,045749	0,049033	165,10836	45,749	49,033
65	0,2	1,962	0,048352	0,049721	154,21332	48,352	49,721
66	0,2	1,962	0,050201	0,04887	151,122	50,201	48,87
67	0,2	1,962	0,051382	0,049509	145,71892	51,382	49,509
68	0,2	1,962	0,049509	0,048785	153,52064	49,509	48,785
69	0,2	1,962	0,050103	0,053221	138,93715	50,103	53,221
70	0,2	1,962	0,047544	0,050037	155,77231	47,544	50,037
71	0,2	1,962	0,051326	0,049033	147,26792	51,326	49,033
72	0,2	1,962	0,045479	0,045609	178,77157	45,479	45,609
73	0,2	1,962	0,050602	0,054446	134,41422	50,602	54,446
74	0,2	1,962	0,045764	0,047406	170,8711	45,764	47,406
75	0,2	1,962	0,046764	0,049106	161,38209	46,764	49,106
76	0,2	1,962	0,049138	0,048823	154,56615	49,138	48,823
77	0,2	1,962	0,051478	0,050148	143,61875	51,478	50,148
78	0,2	1,962	0,049363	0,045585	164,53154	49,363	45,585
79	0,2	1,962	0,049563	0,051606	144,91919	49,563	51,606
80	0,2	1,962	0,04887	0,048785	155,53632	48,87	48,785
81	0,2	1,962	0,057236	0,055523	116,65903	57,236	55,523
82	0,2	1,962	0,050096	0,050737	145,88661	50,096	50,737
83	0,2	1,962	0,040365	0,042909	213,89565	40,365	42,909
84	0,2	1,962	0,044882	0,046121	179,10569	44,882	46,121
85	0,2	1,962	0,047085	0,049655	158,49247	47,085	49,655
86	0,2	1,962	0,050839	0,047648	152,91954	50,839	47,648
87	0,2	1,962	0,052662	0,055143	127,62713	52,662	55,143
88	0,2	1,962	0,048924	0,050148	151,11895	48,924	50,148
89	0,2	1,962	0,044945	0,048231	170,84909	44,945	48,231
90	0,2	1,962	0,045675	0,046265	175,47361	45,675	46,265
91	0,2	1,962	0,047771	0,045415	170,81243	47,771	45,415
92	0,2	1,962	0,043015	0,045002	191,46424	43,015	45,002
93	0,2	1,962	0,040925	0,042889	211,14834	40,925	42,889
94	0,2	1,962	0,048557	0,048464	157,57572	48,557	48,464
95	0,2	1,962	0,04839	0,04839	158,36148	48,39	48,39
96	0,2	1,962	0,050201	0,048823	151,26549	50,201	48,823
97	0,2	1,962	0,048184	0,051426	149,49096	48,184	51,426
98	0,2	1,962	0,047592	0,051426	151,28383	47,592	51,426
99	0,2	1,962	0,047592	0,048286	161,35516	47,592	48,286
100	0,2	1,962	0,045675	0,046953	172,8766	45,675	46,953

Bilyalı dövme yöntemi, alaşımın yüzey ve yüzey altı özelliklerini etkilemiştir. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımı numunesi üzerinde yapılan sertlik ölçümleri sonrası ortalama Vickers sertlik değerlerinin numune yüzeyinden iç kesimlerine doğru azaldığı görülmüştür. Tablo 5.23'te görüldüğü üzere yüzeyden yaklaşık 250 µm derinliğe kadar sertlik değeri değişmektedir. Bu durum bilyalı dövme etkisinin yüzeyde max sertlik değeri oluşmasını sağlarken numune yüzeyinden iç kesimlere doğru gidildikçe sertlik değerinin giderek azalmasına ve malzemenin

homojen sertlik değerine ulaştığını göstermiştir. Bunun yanında oluşan plastik deformasyonun yüzey altı bölgede tane incelmeye ve tane yönelmesi mekanizmalarına neden olduğu savunulmaktadır. Şekil 5.40'da Vickers sertlik değerinin derinliğe bağlı değişimi incelendiğinde bilyalı dövme işleminin numunelerin sertlik değerlerini belli derinliğe kadar arttırdığı görülmüştür. Bu değerlerden sonra ise kesit derinliğine bağlı azalan sertlik değerinin numunenin homojen kendi sertlik değerine ulaştığı görülmektedir.



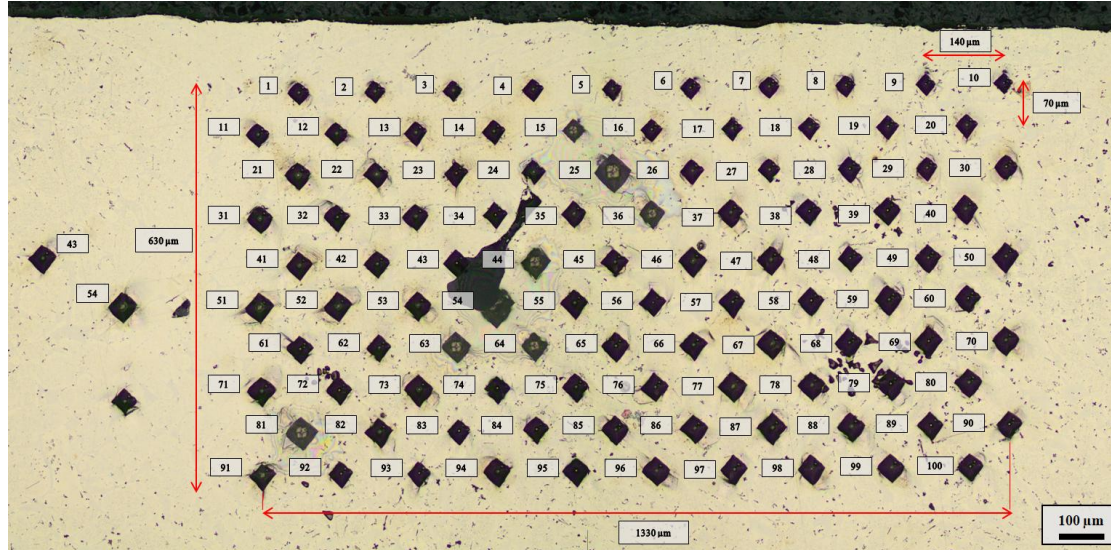
Şekil 5.40. Bilyalı dövme işlemi uygulanan MAB-CU4 alaşımı sertliğinin derinliğe bağlı değişimi



Şekil 5.41. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımı sertliğinin derinliğe bağlı değişimini gösteren iki boyutlu sertlik haritası

Tablo 5.23. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune HV/0,2/10 ortalama Vickers kesit sertlik ölçümleri

S.N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Ort. Vickers Sertlik Ölçümleri	
Konum (µm)	0	70	140	210	280	350	420	490	560	630	700	770	840	910	980	1050	1120	1190	1260	1330		
1	0		250,83		264,59		293,79		245,56		282,23		302,1		302,54		307,68		308,4		308,95	286,6666496
2	70	227,59		227,54		230,21		216,83		224,86		267,74		246,27		262,74		222,55		233,53		235,9873407
3	140		173,89		191,87		198,21		205,36		87,281		208,92		241,48		215,34		261,62		222,99	200,6979037
4	210	178,72		181,47		179,11		186,74		184,58		176,5		173,23		176,98		168,76		169,54		177,561715
5	280		159,76		179,11		151,43		130,94		159,57		146,01		163,02		192,57		166,15		151,62	160,0186526
6	350	144,03		145,57		158,48		141,11		151,93		160,35		164,11		165,59		154,34		172,56		155,8062628
7	420		162,72		189,84		140,76		165,11		154,21		151,12		145,72		153,52		138,94		155,77	155,7718204
8	490	147,27		178,77		134,41		170,87		161,38		154,57		143,62		164,53		144,92		155,54		155,5878845
9	560		116,66		145,89		213,9		179,11		158,49		152,92		127,63		151,12		170,85		175,47	159,2027759
10	630	170,81		191,46		211,15		157,58		158,36		151,27		149,49		151,28		161,36		172,88		167,563425



Şekil 5.42. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımının HV/0,2/10 kesit mikroyapısı

Şekil 5.41’de ise bilyalı dövmenin neden olduğu değişim ve malzemenin yüzey ve yüzey altı bölgelerinde ortaya çıkan sertleşmiş tabaka bölgelerinin iki boyutlu sertlik haritası gösterilmektedir. Sertlik incelemeleri geniş bir bölge üzerinde oluşturulmuş ($1130 \times 6300 \mu\text{m}^2$ dikdörtgen bir alan ve yüzeyin yaklaşık $30 \mu\text{m}$ altında) ve sertlik haritaları, MATLAB® araç kodu kullanılarak görselleştirilmiştir. İşaretler (x), sertlik izlerinin konumlarını belirtmekte olup ve görülen kesikli çizgi, yaklaşık $250 \mu\text{m}$ olan sertleştirilmiş katmanın derinliğini göstermektedir. Bu sayede sertlik bölgeleri farklı renklendirme skalasına tabi tutularak sertlik haritasının renklendirilmesi sağlanmıştır (Avcu ve diğ., 2023a; Iakovakis ve diğ., 2022; Brayshaw ve diğ., 2017; Avcu ve diğ., 2023b).

Bilyalı dövme etkisiyle derinliğe bağlı olarak azalan dövme işlemi etkisi numune iç bölgelerine doğru değişim göstermiştir. Yüzeye yakın bölgelerdeki sertlik değerlerindeki artış bilyalı dövme etkisinin yoğun olduğu yerlerde fazla iken dövme etkisinin azalmasıyla birlikte sertlik değerleri de azalmaktadır. Bilyalı dövme etkisinin ortadan kalktığı yüzeye uzak bölümlerde numunenin sertlik değerleri işlem görmemiş hallerindeki sertlik değerleri ile aynı değere ulaştığı görülmüştür. Yani dövme etkisinin görülmediği bölgelerde sertlik değerleri hiçbir işlem görmemiş numune ile aynı değerlere ulaşmıştır (Equo Tıp 2 (İsviçre) marka portatif sertlik ölçme cihazı ile yapılan sertlik ölçümü sonucu MAB-CU4 numunesinin 160 HV olduğu tespit edilmiştir).

Ortaya çıkan sertlik değerlerindeki bu artış dövme sonucu yüzeyde meydana gelen plastik deformasyonların yüzey altı bölgede ve yüzeye yakın bölgelerdeki tane incilmesi (Hall-Petch mekanizması) ve tane yönlenmesi mekanizmaları ile ilişkilendirilebilir (Mohammadi ve diğ., 2021). Dövme etkisinin görüldüğü bu bölgelerde gerçekleşen tane incilmesi, anılan bölgelerde dislokasyon hareketliliğini zorlaştırarak dislokasyon yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır (Alyani ve Kazeminezhad, 2021).

Dislokasyon yoğunluğundaki bu artış gerinme sertleşmesi mekanizmasına neden olmuş ve bunun sonucunda alaşımın sertlik değerlerinin artışına neden olmuştur (Eivani ve Rahimi, 2019). Bu durumların sonucunda gerçekleşen plastik deformasyonlar etki ettiği bölgelerde alaşımın mekanik özelliklerini değiştiren en büyük sebep olarak kabul edilmiştir (Al-Fadhalah ve diğ., 2019; Naseri ve diğ., 2016).

5.4.3. Bilyalı Dövme İşlemi Sonrası Kaviteasyon Erozyonu Aşınma Etkisi

Bilyalı dövme işlemi uygulanan Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımı numuneleri daha sonra erozyon testlerine tabi tutulmuştur ve dövülen numunelerin erozyon testleri sonrası ortaya çıkan değişimleri gözlemlenmiştir. Sonuçlar kaviteasyon erozyonuna maruz bırakılan orijinal numuneler ile kıyaslanmıştır. Kaviteasyon su jeti erozyon testleri farklı kaviteasyon hücum açısı ve giriş basıncı (P_1) değerleriyle ultrasonik banyo ile temizlenen bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler ile başlamıştır. Test edilecek numuneler, 30° ve 90° kaviteasyon hücum açısında, $P_1=150$ ve 200 bar giriş basıncı altında ve $S_{off}=5$ mm nozul ile numune arası mesafesinde ayarlandıktan sonra kaviteasyon erozyonu testlerine hazır hale getirilmiştir. Yüksek basınçlı şebeke suyu, giriş basıncı yüksek basınçlı su jeti makinesinden sağlanmıştır. Numuneler 3 saat süreli erozyon testlerine tabi tutulmuş, test öncesi ve sonrası yüzeyleri gözlemlenmiş, kütle ölçümü ve yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Tablo 5.24'te test çalışmasının fiziksel parametreleri ve Tablo 5.25'te çalışmanın sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.24. Bilyalı dövme işlemi sonrası kaviteasyon su jeti erozyonu test parametreleri

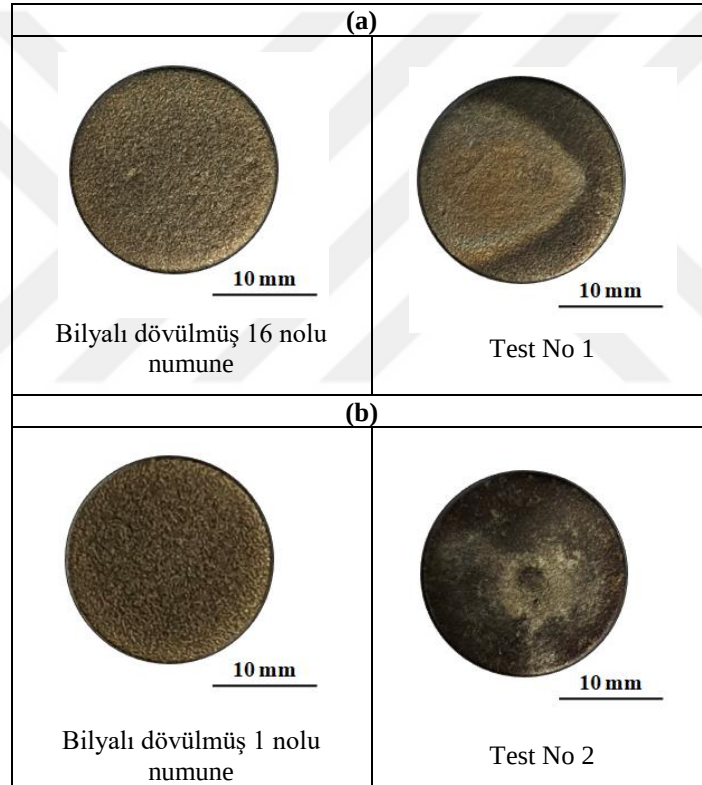
Test No	Bilyalı Dövülen Numune No	Test Süresi (t)		Basınçlar		Kaviteasyon Sayısı (σ)	Kaviteasyon Hücum Açısı ($^{\circ}$)	S_{off} (mm)	Sıcaklık (T) ($^{\circ}C$)	Nozul Çapı (D_{nozul}) (mm)	Kullanılan Akışkan
		dk	sa	İç Basıncı (P_2) (bar)	Giriş Basıncı (P_1) (bar)						
1	16	180	3	1	150	0,006	30	5	22-27	1,5	Şebeke Suyu
2	1						90				
3	3			200	0,005	30					
4	12					90					

Tablo 5.25. Bilyalı dövme işlemi sonrası kaviteasyon su jeti erozyonu test sonuçları

Test No	Bilyalı Dövülen Numune No	Test Süresi (t)		Orijinal Numune Kaviteasyon Su Jeti Erozyonu Sonrası Kütle Değişimi (Δ_m) (mg)	Orijinal Numune Bilyalı Dövme İşlemi Sonrası Kütle Ölçümü (m) (g)	Bilyalı Dövülmüş Numunelerin Kaviteasyon Su Jeti Erozyonu Sonrası Kütle Ölçümü (m) (g)	Kütle Değişimleri (Δ_m)		Sonuç
		dk	sa				(g)	(mg)	
1	16	180	3	2,2	22,1925	22,1907	0,0018	1,8	% -18,18
2	1			3,6	22,0316	22,0288	0,0028	2,8	% -22,22
3	3			2,9	22,2321	22,2292	0,0029	2,9	Değişim Yok
4	12			4,1	22,1765	22,1725	0,004	4	Değişim Yok

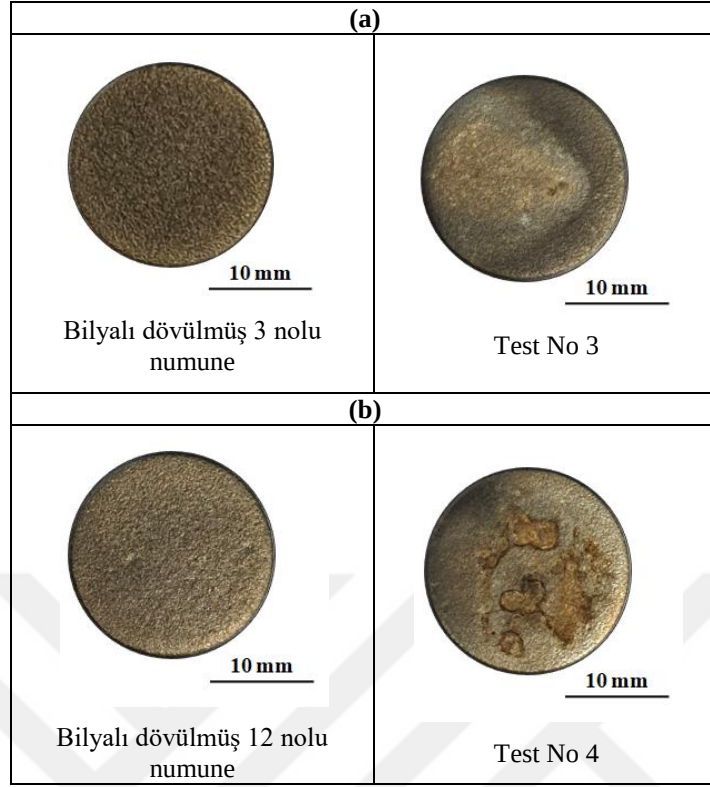
Numunelerin kavitasyon su jeti erozyon testleri sonrası yüzey görüntülerinin zamana bağlı değişim serisi görselleri mümkün olduğunca aynı şartlarda elde edilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde:

- Şekil 5.43 (a)'da; bilyalı dövme işlemi uygulanmış 16 nolu numunenin 30° kavitasyon hücum açısı, $P_1=150$ giriş basıncı, $P_2=1$ bar iç basıncı ve $\sigma=0,006$ kavitasyon sayısındaki bir nolu kavitasyon su jeti erozyonu testi sonrası erozyon görüntüsü verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış 1 nolu numunenin aynı parametreler altında ancak 90° kavitasyon hücum açısındaki iki nolu kavitasyon su jeti erozyonu testi sonrası erozyon görüntüsü ise Şekil 5.43 (b)'de verilmiştir.



Şekil 5.43. Bilyalı dövülmüş numunelerin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası görselleri ($P_1=150$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,006$, (a) 30° (b) 90° kavitasyon hücum açısı)

- Şekil 5.44 (a)'da bilyalı dövme işlemi uygulanmış 3 nolu numunenin 30° kavitasyon hücum açısı, $P_1=200$ giriş basıncı, $P_2=1$ bar iç basıncı ve $\sigma=0,005$ kavitasyon sayısındaki üç nolu kavitasyon su jeti erozyonu testi sonrası erozyon görüntüsü verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış 12 nolu numunenin aynı parametreler altında ancak 90° kavitasyon hücum açısındaki dört nolu kavitasyon su jeti erozyonu testi sonrası erozyon görüntüsü ise Şekil 5.44 (b)'de verilmiştir.



Şekil 5.44. Bilyalı dövülmüş numunelerin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası görselleri ($P_1=200$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,005$, (a) 30° (b) 90° kavitasyon hücum açısı)

- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kütle ve hacim kayıpları, numunelerin kavitasyona maruz kalma süresi arttıkça artmıştır.
- Kavitasyon erozyonuna maruziyeti arttıkça numune yüzeylerinde halka biçiminde bir desen oluştuğu, bu desenin zamanla daha belirgin hale geldiği ve kavitasyon erozyonunun arttığı tespit edilmiştir.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kavitasyon erozyonu numune resimleri değerlendirildiğinde, oluşan erozyon halkalarının genişlediği ve karakteristiklerinin zamana bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Numuneler ayrıca kavitasyon su jeti erozyonuna maruz kaldıkça görüldüğü gibi yüzeylerindeki erozyon (kararma) artmıştır. Bunun yanında yer yer parça soyulmaları ve kaybı da gözlemlenen bir diğer sonuçtur.
- Bilyalı dövülmemiş sadece kavitasyon su jeti erozyonu sonrası ($P_1=150$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,006$) 30° hücum açısındaki numunenin kütle kaybı değeri $\Delta_m=2,2$ mg iken, 90° hücum açısındaki numunenin kütle kaybı değeri $\Delta_m=3,6$ mg olmuştur. Bu şartlarda dövülmemiş numunenin kavitasyon hücum açısının 30° 'den 90° 'ye çıkmasına bağlı olarak kütle kaybı % 63,63 oranında artmıştır.

- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kavitasyon su jeti erozyonuna ($P_1=150$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,006$) maruz bırakılması sonrası 30° kavitasyon hücum açısındaki kütle kaybı değeri $\Delta_m=1,8$ mg iken, 90° kavitasyon hücum açısındaki numunenin kütle kaybı değeri $\Delta_m=2,8$ mg olmuştur. Kavitasyon hücum açısının 30° 'den 90° 'ye çıkmasına bağlı olarak kütle kaybı artış oranı ise % 55,55 olarak ölçülmüştür. Bu durum bilyalı dövme yöntemiyle dövülmüş numunelerin artan kavitasyon hücum açısına bağlı olarak da, dövülmemiş numunelere göre % 8,08 oranında kavitasyon erozyonuna karşı daha düşük aşınma oranı kazandığını göstermiştir.
- Bilyalı dövülmemiş sadece kavitasyon su jeti erozyonuna ($P_1=200$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,005$) maruz bırakılan 30° kavitasyon hücum açısındaki numunenin kütle kaybı değeri $\Delta_m=2,9$ mg iken, 90° kavitasyon hücum açısındaki numunenin kütle kaybı değeri $\Delta_m=4,1$ mg olmuştur. Bu şartlarda dövülmemiş numunenin kavitasyon hücum açısının 30° 'den 90° 'ye çıkmasına bağlı olarak kütle kaybı % 41,37 oranında artmıştır.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kavitasyon su jeti erozyonuna ($P_1=200$ bar, $P_2=1$ bar, $\sigma=0,005$) maruz bırakılması sonrası 30° kavitasyon hücum açısındaki kütle kaybı değeri $\Delta_m=2,9$ mg iken, 90° kavitasyon hücum açısındaki numunenin kütle kaybı değeri $\Delta_m=4$ mg olmuştur. Kavitasyon hücum açısının 30° 'den 90° 'ye çıkmasına bağlı olarak kütle kaybı artış oranı ise % 37,93 olarak ölçülmüştür. Bu durum bilyalı dövülmüş numunelerin artan kavitasyon hücum açısına bağlı olarak da, dövülmemiş numunelere göre % 3,44 oranında kavitasyon erozyonuna karşı daha düşük aşınma oranı gösterdiğini kanıtlamıştır. Ancak artan giriş basıncı, kavitasyon hücum açısına bağlı olarak bilyalı dövme işleminin yüzey dayanımının artırılmasına etkisinin azalmasına neden olmuştur. Bu nedenle artış oranı azalmıştır.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin 30° kavitasyon hücum açısındaki kavitasyon su jeti erozyon testleri sonrası $P_1=150$ bar giriş basıncı altındaki kütle kaybı değeri $\Delta_m=1,8$ mg, $P_1=200$ bar giriş basıncı altındaki kütle kaybı değeri $\Delta_m=2,9$ mg'dır. Bu durum belirtilen kavitasyon hücum açısında bilyalı dövme yöntemi işlemi uygulanmış numunenin artan giriş basıncına bağlı olarak kütle kaybının % 61,11 arttırdığını göstermiştir.

- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin 90° kaviteasyon hücum açısındaki kaviteasyon su jeti erozyon testleri sonrası $P_1=150$ bar giriş basıncı altındaki kütle kaybı değeri $\Delta_m=2,8$ mg, $P_1=200$ bar giriş basıncı altındaki kütle kaybı değeri $\Delta_m=4$ mg'dır. Bu durum belirtilen kaviteasyon hücum açısında bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin artan giriş basıncına bağlı kütle kaybının % 42,85 arttırdığını göstermiştir.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kaviteasyon su jeti erozyon testleri sonrası 30° kaviteasyon hücum açısındaki kütle kaybı değeri $P_1=150$ bar giriş basıncı altında $\Delta_m=1,8$ mg iken aynı şartlar altında orijinal numunenin sadece kaviteasyon su jeti erozyonu uygulamasındaki kütle kaybı $\Delta_m=2,2$ mg olmuştur. Bu durum bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin bu koşullar altında kaviteasyon erozyonuna karşı % 18 daha düşük aşınma oranı oluşturduğunu göstermiştir.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kaviteasyon su jeti erozyon testleri sonrası 30° kaviteasyon hücum açısındaki kütle kaybı değeri $P_1=200$ bar giriş basıncı altında $\Delta_m=2,9$ mg iken aynı şartlar altında orijinal numunenin sadece kaviteasyon su jeti erozyonu uygulamasındaki kütle kaybı aynı şekilde 2,9 mg olmuştur. Bu durum bilyalı dövme işleminin bu koşullar altında kaviteasyon erozyonu kütle kaybı değişim oranı üzerinde etkili olmadığını göstermiştir.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 numunesinin kaviteasyon su jeti erozyon testleri sonrası 90° kaviteasyon hücum açısındaki kütle kaybı değeri $P_1=150$ bar giriş basıncı altında $\Delta_m=2,8$ mg iken aynı şartlar altında orijinal numunenin sadece kaviteasyon su jeti erozyonu uygulamasındaki kütle kaybı $\Delta_m=3,6$ mg olmuştur. Bu durum bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin bu koşullar altında kaviteasyon erozyonuna karşı % 22,22 daha düşük aşınma oranı oluşturduğunu göstermiştir.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kaviteasyon su jeti erozyonu sonrası 90° kaviteasyon hücum açısındaki kütle kaybı değeri $P_1=200$ bar giriş basıncı altında $\Delta_m=4$ mg iken aynı şartlar altında orijinal numunenin sadece kaviteasyon su jeti erozyonu uygulamasındaki kütle kaybı aynı şekilde $\Delta_m=4,1$ mg olarak ölçülmüştür. Bilyalı dövme işlemi uygulamasının bu koşullar altında numunenin kaviteasyon erozyonuna karşı kütle kaybı değişim oranı üzerine belirli bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

5.5. İleri Karakterizasyon İncelemesi Bulguları

Malzemelerin erozif aşınma davranışlarının araştırılmasında ileri karakterizasyon analizleri büyük önem arz etmektedir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda malzemede görülen aşınma mekanizmalarının belirlenmesi üzerine durulmuş ve aşınma davranışları yorumlanmıştır. Bu tez çalışmasında da, farklı parametrelerin Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) malzemesinin aşınma davranışı etkilerini daha iyi kavrayabilmek, aşınan malzemenin mikroyapısındaki değişimleri, yüzey morfolojisi ve topografyasındaki dönüşümlerini incelemek ve malzemede meydana gelen etkin erozif aşınma mekanizmalarını belirlemek amacıyla detaylı karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Özellikle aşınmaya maruz kalan yüzeylerin farklı görüntüleme teknikleriyle alınan taramalı elektron mikroskobu (SEM-Scanning Electron Microscope) yüzey morfolojisi görüntüleri ve 3 boyutlu (3D Optical Profilometry) yüzey topografya görselleri çalışmaya özgünlük kattığı değerlendirilmektedir. Bu kapsamda ileri karakterizasyon analizleri için bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve/veya kavitasyon erozyonuna maruz bırakılan bakır alaşımı numunelerinin 3 boyutlu optik profilometre yardımı ile yüzey pürüzlülüklerinin incelenmesi ve taramalı elektron mikroskobu ile ilgili inceleme çalışmaları Sakarya Üniversitesi, Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan cihazlar yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışmalarında 3 boyutlu optik profilometre yardımı ile iki boyutlu yüzey haritaları ve üç boyutlu yüzey topografyaları çıkarılmıştır. SEM incelemeleriyle ise bilyalı dövme işlemleri ve kavitasyon su jeti erozyonu sonrası oluşan aşınma mekanizmalarının tane yönelmeleri, tane sınırları ve yüzey hasarları detaylı incelenmiş, parametrelerin yüzey altı özelliklere etkisi belirlenmiştir.

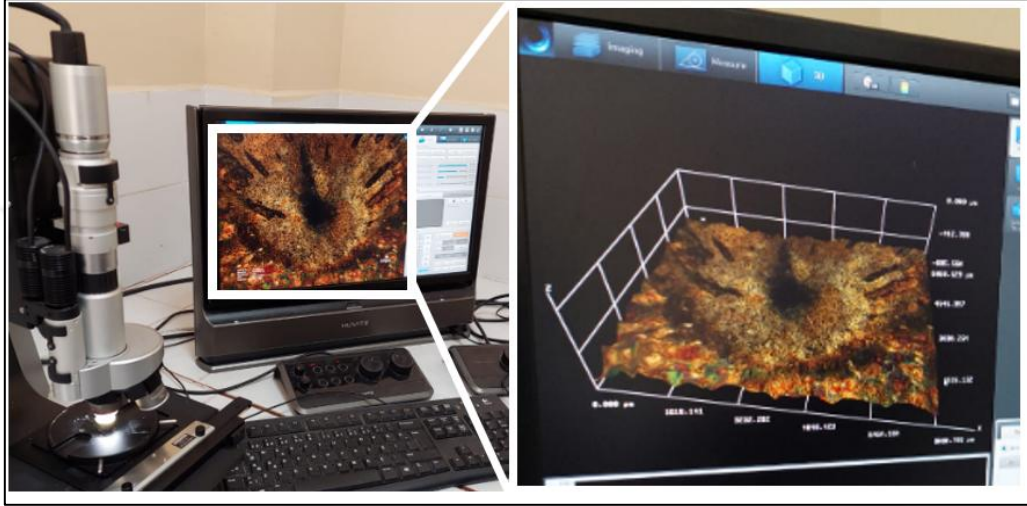
5.5.1. Yüzey Topografyası İncelemeleri

Kavitasyon su jeti erozyonuna maruz bırakılan alaşımın geometrik ve hidrodinamik koşullara bağlı ortaya çıkan yüzey pürüzlülük, yüzey topografisi özellikleri ve yüzey dokusu değişimleri 3 boyutlu optik profilometre ile farklı ve yüksek çözünürlüklerde incelenmiştir. Bu analizler sonucunda farklı parametreler altında numunelerin iki ve üç boyutlu topografik yüzey görüntüleri elde edilmiş ve hasar mekanizmalarının daha detaylı incelenmesi sağlanmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde kavitasyon erozyonu ile aşınmış yüzeylerin ileri karakterizasyonu ile araştırılması konulu limitli

sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Bu bağlamda, tez çalışmasında farklı parametrelerin malzemenin yüzey morfolojisine ve topografyasına olan etkilerinin kapsamlı bir şekilde araştırılması, çalışmaya önemli bir değer katmıştır. Kaviteasyon su jeti erozyonu sonucu ortaya çıkan değişimleri anlamak ve simüle etmek zordur. Bu nedenle kaviteasyon erozyonu aşınması sonrası hasar mekanizmalarının oluşturduğu girinti ve çıkıntıların geometrik özelliklerini belirlemek için 3 boyutlu topografik analizlerin kullanıldığı çalışmalar ile kaviteasyon hasar ölçümleri yapılabilmektedir. Yapılan bir çalışmada vibrasyon ile aşındırma işlemlerinden sonra çukur sayısı ve hasarlı yüzeyde gözlemlenen çukurların çapları ile hacim kaybı deformasyonları incelenmiştir (Patellaa ve diğ., 2000). Farklı kaviteasyon maruziyetlerinden sonra değişen yüzey topografisi özellikleri ve yüzey dokusu değişimleri sayesinde aşınmış bölgelerin 3 boyutlu profil derinliği, yüzey pürüzlülük parametreleri ve yüzey morfolojilerinin analiz edildiği çalışmalarda bulunmaktadır (Kumar ve diğ., 2014). Yüzey hasar mekanizmasının incelendiği bir diğer çalışmada SiC parçacıkları içeren sıvılarla kontrollü kaviteasyon erozyonu uygulamasında, yüzeydeki dalgalılık topografyası değişiklikleri analiz edilmiştir (Nagalingama ve Yeo, 2018). Kaplama çalışmalarının yapıldığı malzeme özelinde kaviteasyon kraterlerinin tabanındaki nispeten derin çukurların fark edildiği yüzey görünümündeki önemli farklılıklar 3 boyutlu topografik görüntüler ile açıklanmış çalışmalar da bulunmaktadır (Korobov ve diğ., 2022). Bu durum kaviteasyon erozyonu sonrası malzeme yüzeylerinin ayrıntılı incelenmesi, yüzey topografyasının gözlemlenmesi ve malzemelerin kaviteasyon direnci arasındaki farkların nedenlerini belirlemeyi mümkün kılması nedeniyle 3 boyutlu topografik analizlerin kullanımını yararlı hale getirmiştir.

Çalışmamızda da farklı parametreler altında kaviteasyon su jeti erozyonuna maruz bırakılan orijinal (hiçbir yüzey işlemi uygulanmamış) numunelerin yüzey aşınma izleri, 3 boyutlu optik profilometre cihazında yüzey profillerinin çıkarılması ile sağlanmıştır. Buradaki amaç profilometre ile yüzeyden topografik verileri çıkarmak ve yüzeyde noktasal, çizgisel veya üç boyutlu bir taramanın yapılmasıdır. Böylece optik profilometre ile numunelerin yüzey topografisi, yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü hassas bir şekilde belirlenebilmiştir. Kaviteasyon su jeti erozyonu testleri sonrası meydana çıkan yüzey topografisi ve hasar mekanizmaları Şekil 5.45'te görseli verilen Huvitz HDS-5800 (Kore Cumhuriyeti) marka model 3 boyutlu optik profilometre cihazıyla en uygun

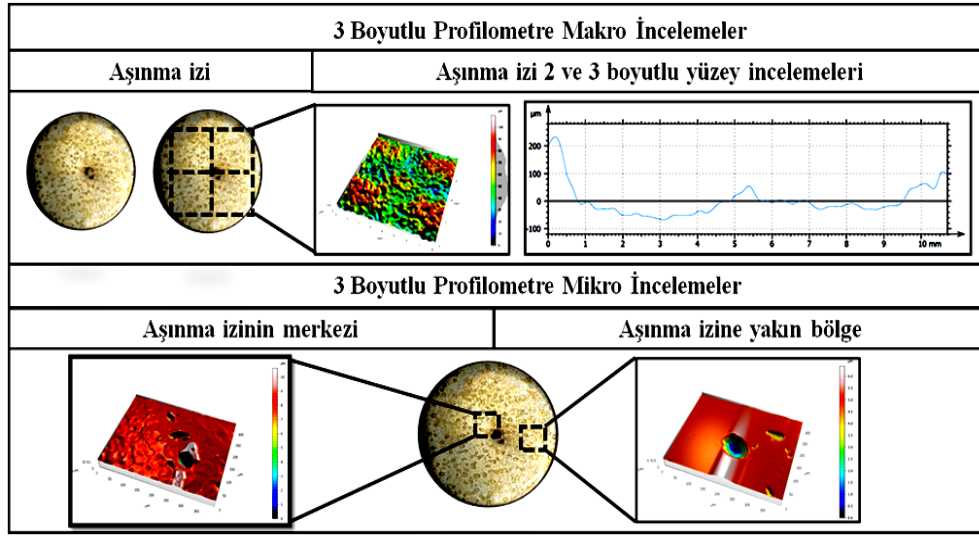
büyütme oranlarında ile görüntülenmiştir. Daha sonra 3 boyutlu yüzey topografyalarını ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerini değerlendirmek için Mountains® 9 (Digital Surf, Besançon, Fransa) programından yararlanılmıştır. Belirtilen cihaz ile kavitasyon baloncuklarının kavitasyon hücum açısına bağlı olarak değişen 3 boyutlu yüzey topografyası ve kavitasyona neden olan hasar mekanizmalarının makro ve mikro analizlerle incelenmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.45. Huvitz HDS-5800 3B optik profilometre cihazı

Makro incelemelerde, kavitasyon su jeti erozyonuna maruz kalan tüm yüzeyin incelenmesi amaçlanmış ve ortalama alansal ve çizgisel pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Numunelerde, bütün aşınma izinin taranması suretiyle farklı bölgelerin örülmesi ile aşınan yüzey izinin toplam çöküntüsü ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla kavitasyon su jeti erozyonuna maruz kalan yüzeylerin $8 \times 8 \text{ mm}^2$ ölçülerindeki farklı bölgeleri birbiri ile örülerek 4 eşit parçaya ayrılmış ve 3 boyutlu optik profilometre ile düşük büyütme oranlarında görüntülenmiştir. Sonrasında bu parçalar birleştirilerek aşınan yüzeylerin 3 boyutlu makro görüntüsü elde edilmiştir.

Mikro incelemelerde ise aşınma izinin merkezinden ve aşınma izine yakın bölgelerden 3 boyutlu optik profilometre ile yüksek büyütme oranlarında görüntüler alınmak suretiyle analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.46). Sonuçta kavitasyon etkisi nedeniyle tekrarlanan su jeti darbeleri, yüzeyde ciddi plastik deformasyonlara bağlı olarak yüzey hasarlarının oluşmasına neden olmuş, bu da yüzey pürüzlülüğündeki bir artışla birlikte krater, tepe ve vadilerin oluşmasıyla sonuçlanmıştır.



Şekil 5.46. Yüzey topografyası makro ve mikro aşınma izlerinin şematik gösterimi

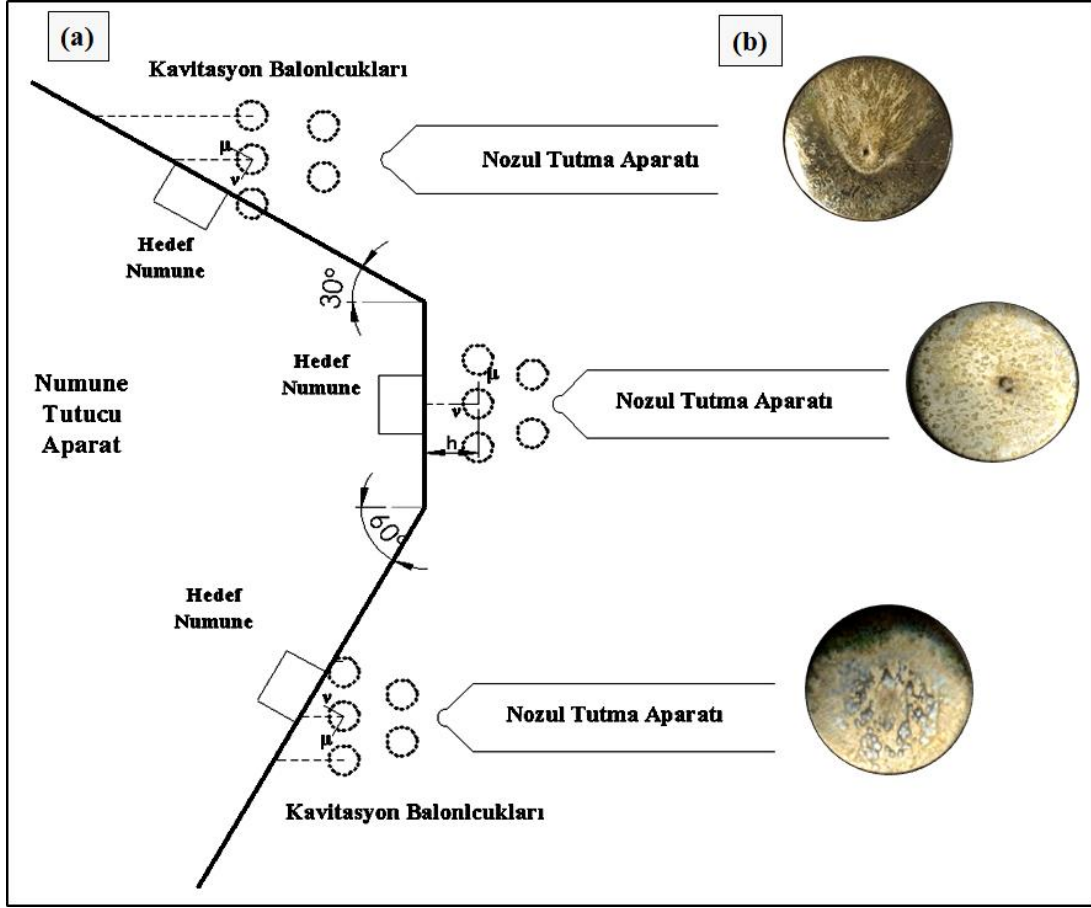
Bu kapsamda yapılan detaylı makro inlemeler sonucunda şu sonuçlara varılmıştır:

- 90° kavitasyon hücum açısında etkiyen yüksek basınçlı akışkanın aşınma bölgelerindeki kavitasyon erozyonu izlerini gösteren makro incelemeler Şekil 5.48’de yer alan yüzey topografyaları ile gösterilmektedir. 2 boyutlu yüzey haritaları ve 3 boyutlu yüzey topografyaları, kavitasyon su jetlerinin tekrarlı darbelerinin neden olduğu plastik deformasyon nedeniyle yüzeyde dağılmış tepeler ve çukurlar oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 5.48 (b)-(d)). Yüzey topografyası incelendiğinde, kavitasyon su jeti erozyonunun bir sonucu olarak, en yüksek tepe mesafesinin 110 µm civarında olan tepelerin oluşumu ortaya çıkarılmıştır (Şekil 5.48 (b)). Görüldüğü üzere kavitasyon su jeti erozyonu sonrası aşınmış yüzeyden çıkarılan pürüzlülük profiline (Şekil 5.48 (c)) göre aşınma bölgesinde yaklaşık 300 µm tepe ile vadi arasındaki aşınma derinliğine inilmiş kısımlar da bulunmaktadır. Bu da ciddi bir aşınma ve yüzey pürüzlülük değerindeki değişimlerin oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Bu veriler altında erozyona uğrayan bölgelerin yüzey ortalama alansal pürüzlülük değeri (S_a) 17,67 µm iken maksimum tepe yüksekliği (S_p) 246,3 µm ve en derin vadi derinliği (S_v) 243,1 µm’dir.
- 30° kavitasyon hücum açısında etkiyen yüksek basınçlı akışkanın aşınma bölgelerindeki kavitasyon erozyonu izlerini gösteren makro incelemeler ise Şekil 5.49’da yer alan yüzey topografyaları ile gösterilmektedir. 2 boyutlu yüzey haritaları ve 3 boyutlu yüzey topografyaları, kavitasyon su jetlerinin tekrarlı darbelerinin

neden olduğu plastik deformasyon nedeniyle yüzeyde dağılmış tepeler ve çukurlar oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 5.49 (b)-(d)). Yüzey topografyası incelendiğinde, kavitasyon su jeti erozyonunun bir sonucu olarak, en yüksek tepe mesafesinin 160 μm civarında olan tepelerin oluşumu ortaya çıkarılmıştır (Şekil 5.49 (b)). Görüldüğü üzere kavitasyon su jeti erozyonu sonrası aşınmış yüzeyden çıkarılan pürüzlülük profiline (Şekil 5.49 (c)) göre aşınma bölgesinde yaklaşık 400 μm tepe ile vadi arasındaki aşınma derinliğine inilmiş kısımlar da bulunmaktadır. Bu da ciddi bir aşınma ve yüzey pürüzlülük değerindeki değişimlerin oluşmasına neden olduğunu göstermektedir. Bu veriler altında erozyona uğrayan bölgelerin yüzey ortalama alansal pürüzlülük değeri (S_a) 25,91 μm iken maksimum tepe yüksekliği (S_p) 298,2 μm ve en derin vadi derinliği (S_v) 224,8 μm 'dir.

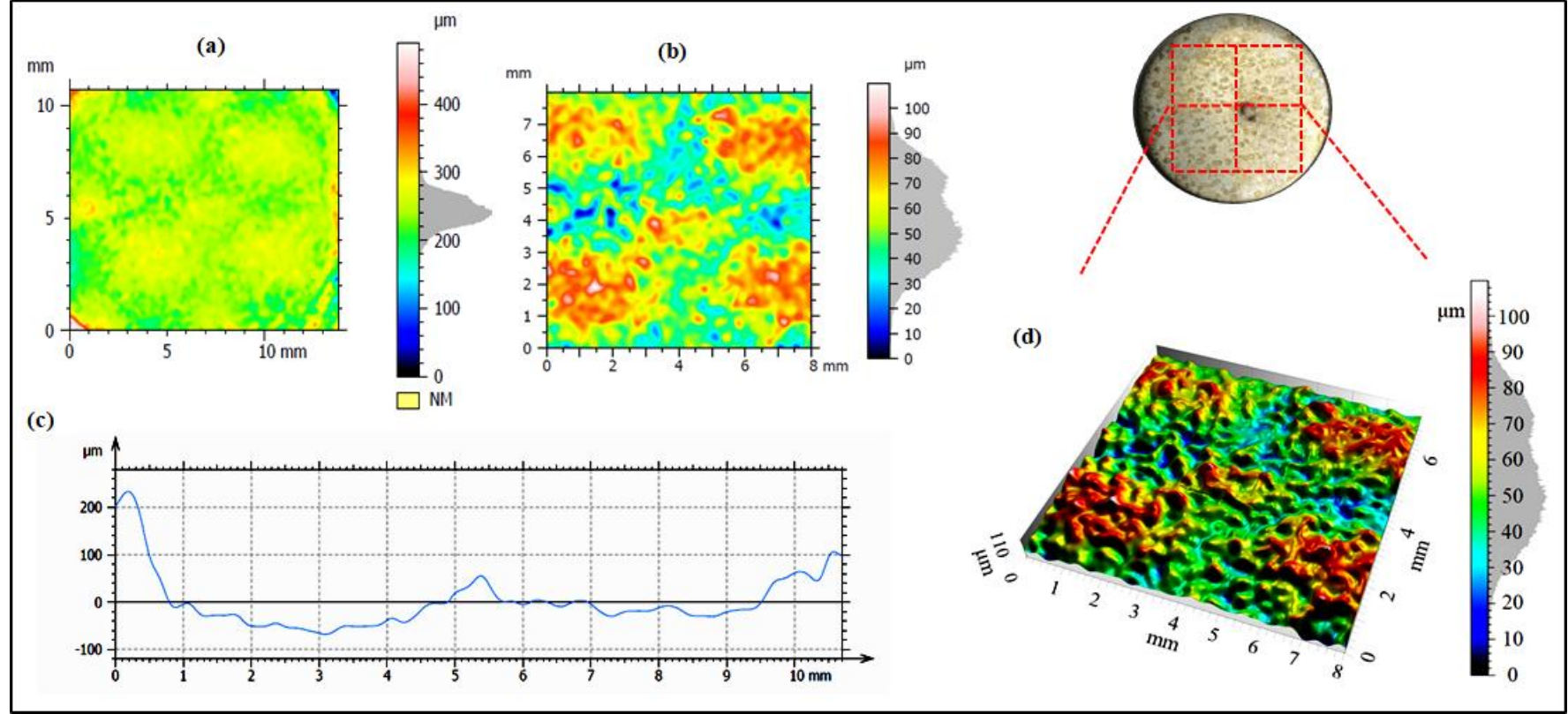
Kavitasyon su jeti test cihazı numune tutucu aparatının farklı yüzey eğiminden dolayı (30° , 60° ve 90°), nozul ile numune yüzeyleri arasındaki mesafe yüzey hattı boyunca değişmektedir (Şekil 5.47). Bu yüzden nozul ile numune arasındaki (S_{off}) mesafenin değişken ölçüleri, numunenin farklı kısımlarındaki hasar modelini etkilemiştir. Kavitasyon hücum açısının 30° olduğu durumdaki numunenin alt kısımlarındaki daha az hasar, kavitasyon baloncuklarının yüzeye çarpmadan önce çökmesine neden olan hücum bölgesindeki katı yüzey ile kavitasyon baloncuğu arasındaki sıvı filminde oluşan ve hidrodinamik basınçlarla da açıklanabilir. Buna benzer bir açıklamalarda yapılmıştır (Chen ve diğ., 2008; Soyama ve diğ., 2012; Hutli ve diğ., 2017). Ayrıca, değişen kavitasyon hücum açısından dolayı aynı numunenin üst kısmındaki (30° kavitasyon hücum açısı), daha uzun mesafe daha fazla baloncuk üretilmesine olanak vermiştir. Bu durumda daha fazla kavitasyon baloncuğu, sıçrama damlaları ve şok dalgalarının o alan üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmasına neden olmuştur. Belirtilen kısımlarda ayrıca hareket eden kavitasyon baloncuklarının geriye doğru akma olasılığı olmadığından çarpma anında oluşan düşük basınç bölgelerinde ortaya çıkan radyal jetlerin üst kısma doğru akması sıvının buradan uzaklaşmasına neden olmuştur. Test esnasında çekilen görsel fotoğrafları bu ifadeleri doğrulamakta ve kavitasyon jetinin büyük bir kısmının akışın ve numune tutucu aparatının açısına bağlı olarak numunenin eğim kısmına doğru kaydığını göstermektedir (Şekil 5.47 (a)-(c)). Tüm bu nedenler de farklı kavitasyon hücum açısındaki kavitasyon erozyonuna uğrayan numunelerin farklı bölgelerindeki daha yüksek aşınma derecesinin ve yüzey pürüzlülüğünün oluşmasını açıklamaktadır.

Bu gözlemlenen olaylar, Chen ve diğ. ve Hutli ve diğ. nin açıklamasıyla da iyi bir uyum içinde olup yaptıkları sayısal analiz ve deneysel çalışmalara da dayanmaktadır (Chen ve diğ., 2008; Hutli ve diğ., 2017).

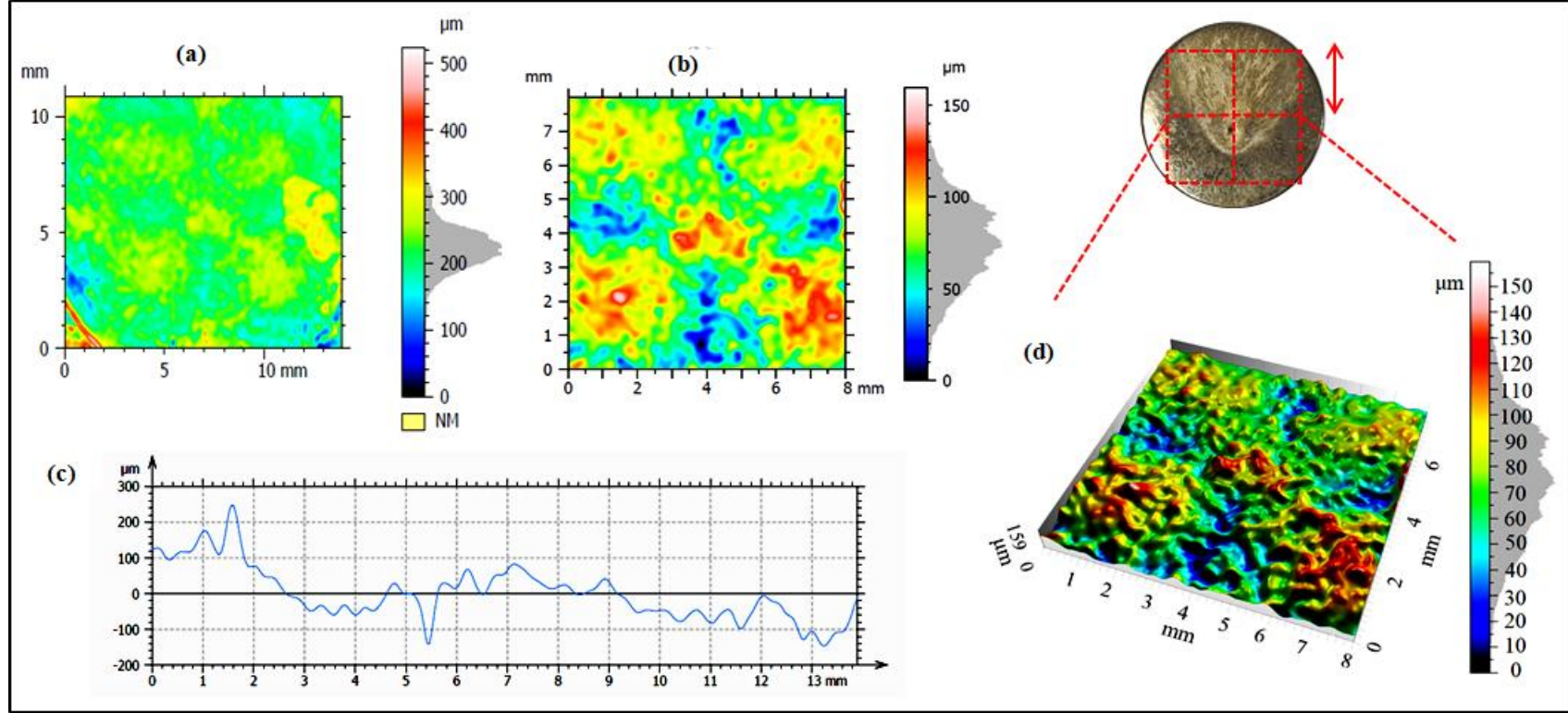


Şekil 5.47. Kaviteasyon su jeti erozyonu uygulamaları (a) hidrodinamik basınçlarının gösterimi (b) kaviteasyon hücum açılarında aşınan numunelerin gösterimi

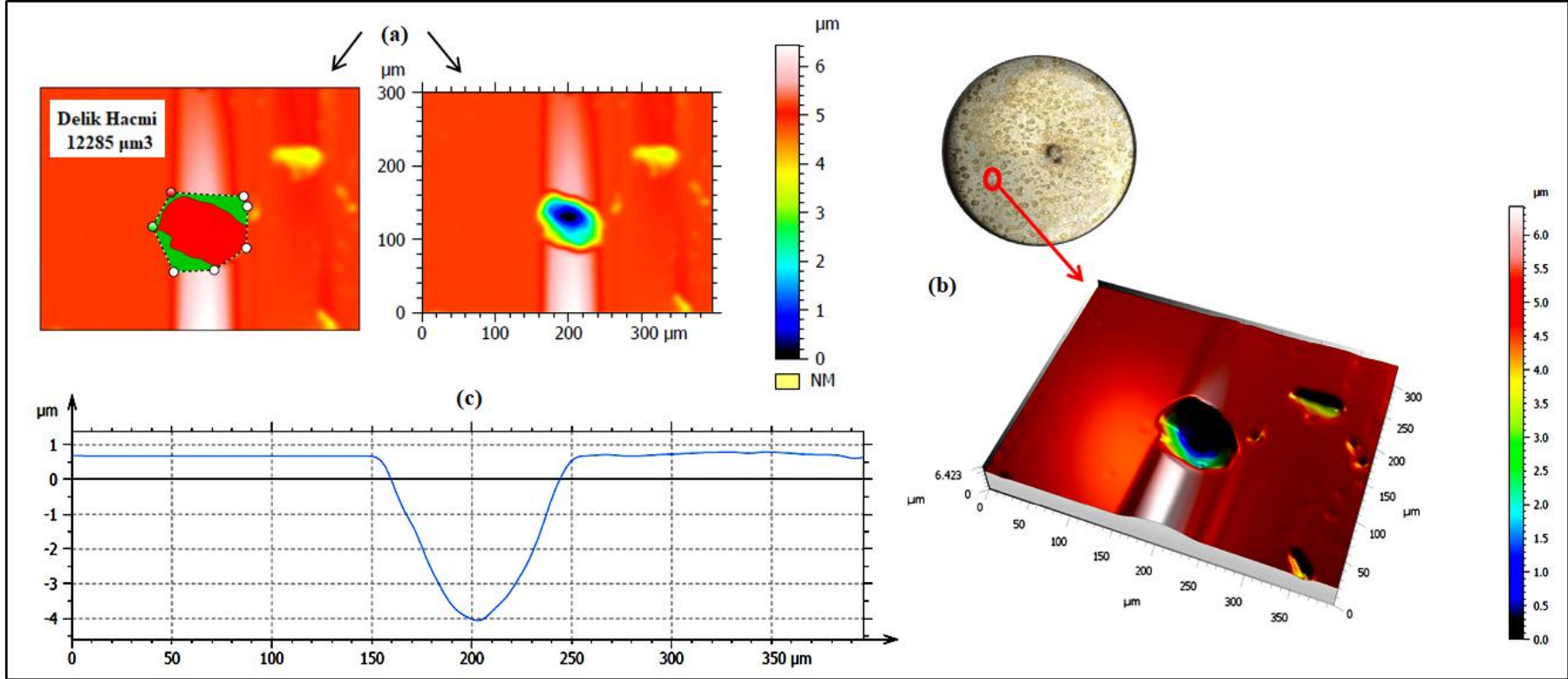
Kaviteasyon baloncuklarının yüzeye yaklaşırken oluşturduğu hidrodinamik basınç, baloncukların hareket hızlarıyla ilişkilidir. Bu hızlar, yüzeye dik (normal hız) ve yüzeye paralel (teğetsel hız) olmak üzere ikiye ayrılır. Baloncuk ile yüzey arasındaki sıvı filminde oluşan hidrodinamik basınçlar, yağlama teorisindeki hidrodinamik etkilerle benzerlik gösterir ve Reynolds denklemleriyle açıklanabilir. Bu basınçlar, baloncuk yüzeye yakın olduğunda en yüksek seviyeye ulaşır ve özellikle yüzeye dik çarpan baloncuklarda maksimum düzeye çıkar. Numune yüzeyinin eğim açısı da bu basıncı etkiler; örneğin, 30° eğim açısında hidrodinamik basınçların dağılımı Şekil 5.47 (a)'da gösterilmiştir. Sonuç olarak, yüzeye yaklaşan baloncukların hidrodinamik basıncı, yüzey eğim açısına göre değişim göstermektedir (Chen ve diğ., 2008).



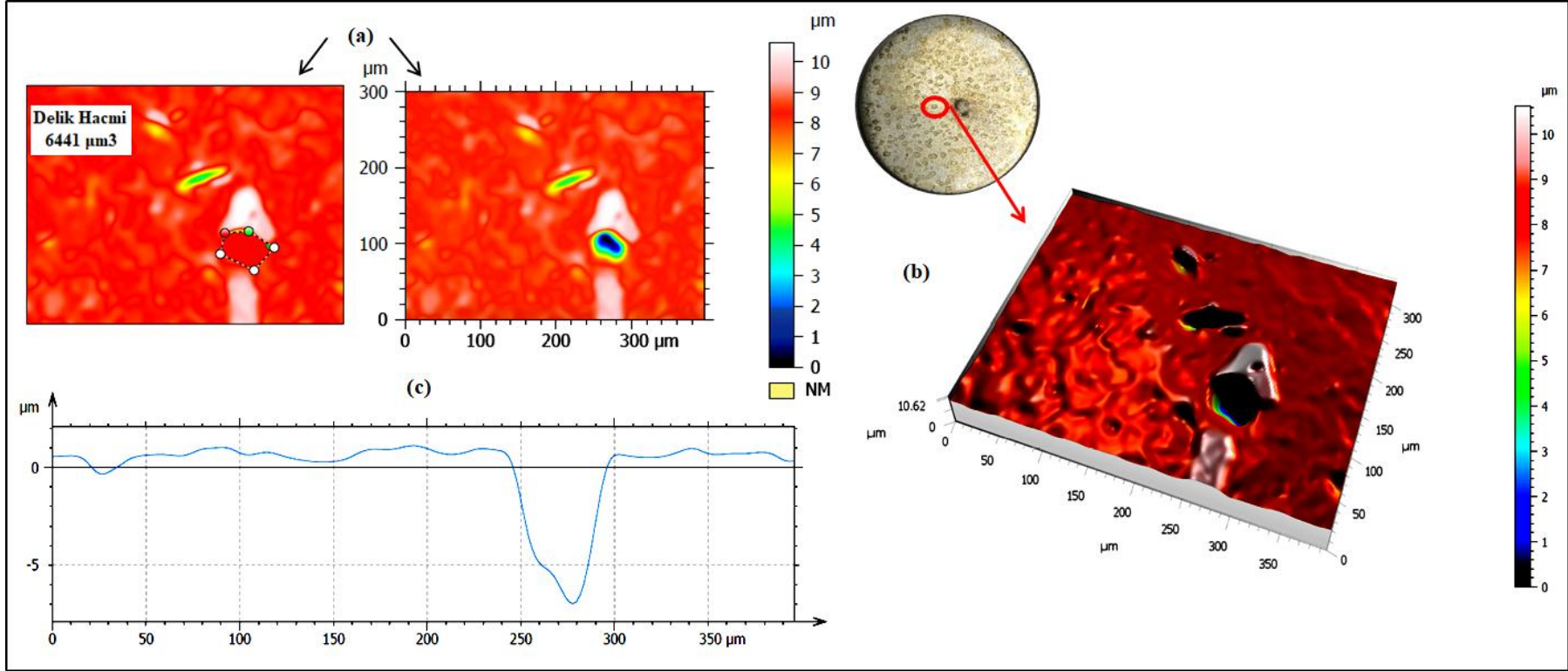
Şekil 5.48. 90° hücum açısındaki makro incelemeler (a) aşınma izi topografik yüzey haritası (b) aşınma bölgesinin merkezinde 8x8 mm²'lik bir bölgede alınmış 2 boyutlu topografik yüzey haritası (c) aşınma izi topografik yüzey haritasının çizgisel pürüzlülük profili (d) aşınma bölgesinin merkezinde 8x8 mm²'lik bir bölgede 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü



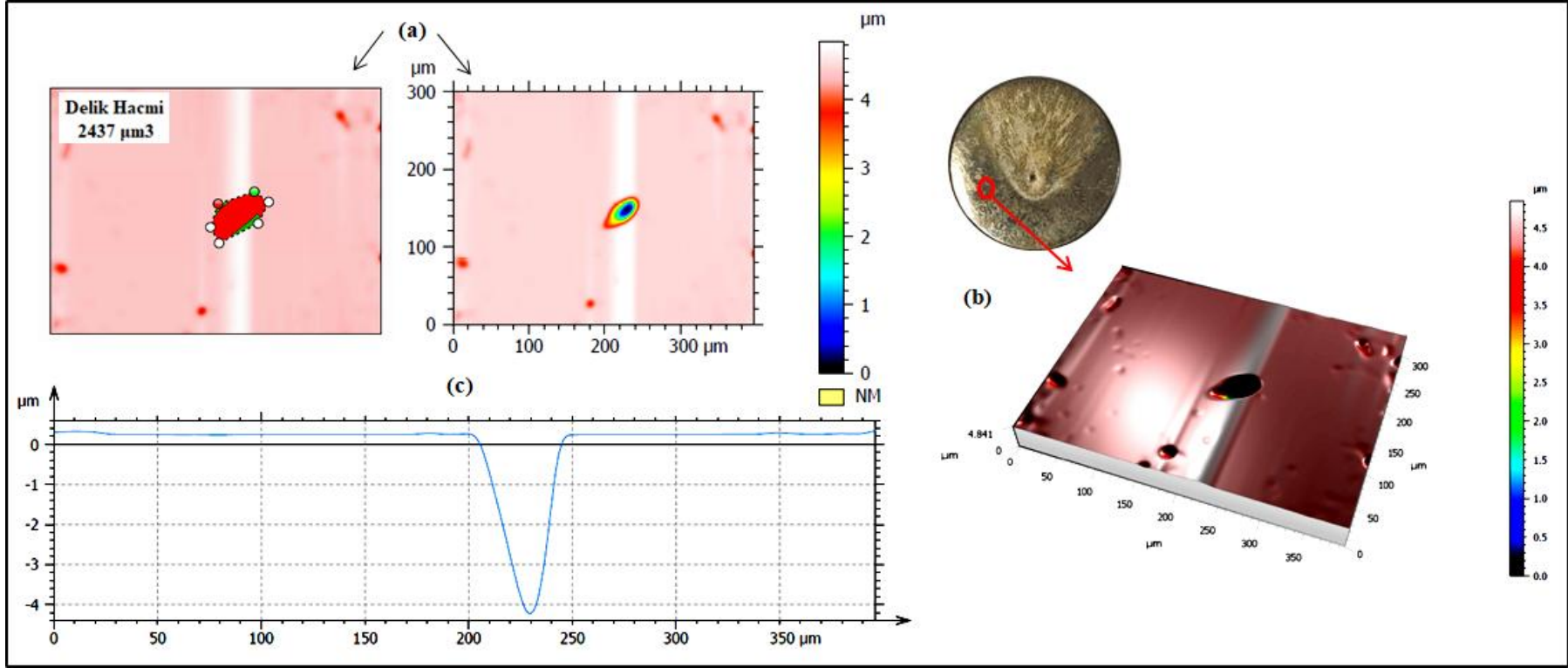
Şekil 5.49. 30° hücum açısındaki makro incelemeler (a) aşınma izinin topografik yüzey haritası (b) aşınma bölgesinin merkezinde 8x8 mm²'lik bir bölgede alınmış 2 boyutlu topografik yüzey haritası (c) aşınma izi topografik yüzey haritasının çizgisel pürüzlülük profili (d) aşınma bölgesinin merkezinde 8x8 mm²'lik bir bölgede 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü



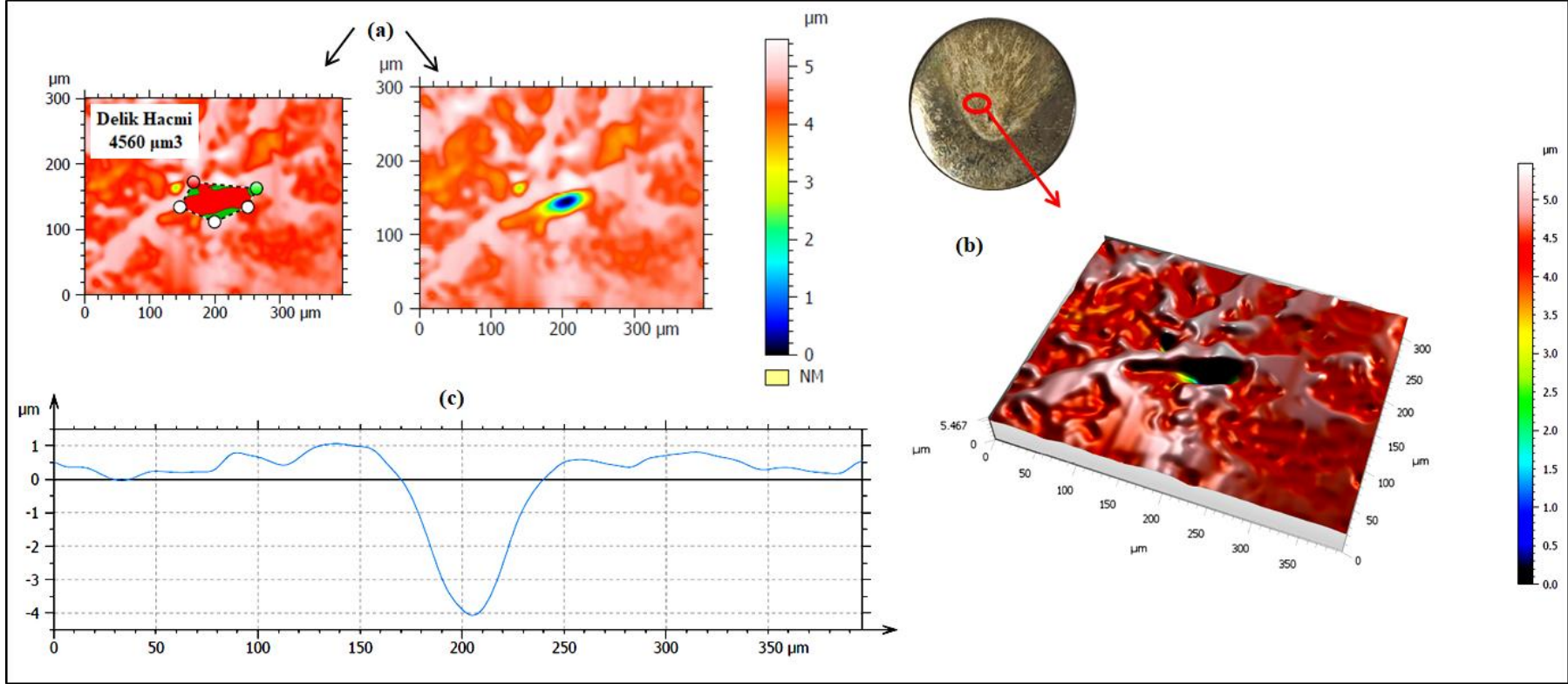
Şekil 5.50. Aşınma izlerinin 90° hücum açısındaki aşınma bölgesine yakın mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri



Şekil 5.51. Aşınma izlerinin 90° kavitasyon hücum açısındaki aşınma bölgesi merkezine yakın bölgelerdeki mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri



Şekil 5.52. Aşınma izlerinin 30° kavitasyon hücum açısındaki aşınma bölgesine yakın bölgelerdeki mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri



Şekil 5.53. Aşınma izlerinin 30° kavitasyon hücum açısındaki aşınma bölgesi merkezine yakın bölgelerdeki mikro incelemeler (a) çukurcuk hacim kaybı gösterimi b) çukurcuk 3 boyutlu yüzey topografya görüntüsü (c) hasar derinliğinin çizgisel değeri

Detaylı mikro inlemeler sonucunda ise şu sonuçlara varılmıştır:

- Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de 90° kavitasyon hücum açısında kavitasyon hasarına uğrayan numunelerin, aşınma bölgelerinde ve aşınma izi merkezine yakın bölgelerde meydana gelmiş erozyon çukurlarının (pittings) görüntüleri yer almaktadır. İki boyutlu yüzey haritaları ve üç boyutlu yüzey topografyaları, kavitasyon su jetlerinin tekrarlı darbelerinin neden olduğu plastik deformasyon nedeniyle yüzeyde dağılmış tepeler ve çukurlar oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 5.50 (b) - Şekil 5.51 (b)). Aşınma merkezi dışına doğru kalan bölgelerde daha az sayıda çukurlar görülürken, aşınma merkezine doğru yüzey hasarları ve çukur sayısı ile birlikte derinliklerinin de arttığı görülmüştür. Yüzey topografyası incelendiğinde, kavitasyon su jeti erozyonunun bir sonucu olarak, en derin çukurun Şekil 5.50 (c)’de 6 μm civarında, Şekil 5.51 (c)’de ise 10 μm civarında olduğu oluşumlar görülmüştür. Bu veriler altında mikro incelenen aşınma bölgesine yakın bölgelerin yüzey ortalama alansal pürüzlülük değeri 0,2467 μm iken maksimum tepe yüksekliği (S_p) 1,604 μm ve en derin vadi derinliği (S_v) 4,819 μm ’dir. Aşınma bölgesi merkezine yakın bölgelerdeki yüzey ortalama alansal pürüzlülük değeri (S_a) ise 0,3497 μm iken maksimum tepe yüksekliği (S_p) 2,293 μm ve en derin vadi derinliği (S_v) 8,325 μm ’dir.
- Şekil 5.52 ve Şekil 5.53’te ise 30° kavitasyon hücum açısındaki numunelerin, aşınma bölgelerinde ve aşınma izi merkezine yakın bölgelerde meydana gelmiş erozyon çukurlarının (pittings) görüntüleri yer almaktadır. İki boyutlu yüzey haritaları ve üç boyutlu yüzey topografyaları, kavitasyon su jetlerinin tekrarlı darbelerinin neden olduğu plastik deformasyon nedeniyle yüzeyde dağılmış tepeler ve çukurlar oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 5.52 (b) - Şekil 5.53 (b)). Aşınma merkezi dışına doğru kalan bölgelerde daha az sayıda çukurlar görülürken, aşınma merkezine doğru yüzey hasarları ve çukur sayısı ile birlikte derinliklerinin de arttığı görülmüştür. Yüzey topografyası incelendiğinde, kavitasyon su jeti erozyonunun bir sonucu olarak, en derin çukurun Şekil 5.52 (c)’de 4,5 μm civarında, Şekil 5.53 (c)’de ise 5 μm civarında olduğu oluşumlar görülmüştür. Bu veriler altında mikro incelenen aşınma bölgesine yakın bölgelerin yüzey ortalama alansal pürüzlülük değeri (S_a) 0,054 μm iken maksimum tepe yüksekliği (S_p) 0,3578 μm ve en derin vadi derinliği (S_v) 4,483 μm ’dir. Aşınma bölgesi merkezine yakın

bölgelerdeki yüzey ortalama alansal pürüzlülük değeri (S_a) ise 0,2627 μm iken maksimum tepe yüksekliği (S_p) 0,9185 μm ve en derin vadi derinliği (S_v) 4,548 μm 'dir.

- Şekil 5.50, Şekil 5.51, Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'te bulunan çukurların hacimleri de ölçülmüştür. Özetle 90° kavitasyon hücum açısında oluşan çukurların derinliği ve hacmi 30° kavitasyon hücum açısındakilerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca erozyonun dış bölgelerine göre erozyon merkezine doğru çukurların sayısı ve derinliği de artmıştır.

Kavitasyon hasarının neden olduğu ortaya çıkan erozyon çukurlarının çökme çarpmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Hammitt, 1980). Şok dalgalarının neden olduğu darbe basıncı genliği, malzeme eşik özelliklerini (ya akma gerilimi veya nihai mukavemet) kolay bir şekilde aşabilir (Brdička ve diğ., 1981; Franc ve Michel, 2006). Kavitasyonun devam etmesi de ortaya çıkan çukurların birbiri ile birleşmesi ve çukur yoğunluğunun artmasına neden olmuştur. Çukurların boyutu kavitasyon baloncuk boyutuna eşit veya daha büyük olduğunda ise tüm kavitasyon baloncuk enerjisi çukur alanında yoğunlaşır ve hızlandırılmış bir şekilde metal kopması gerçekleşir. Bu işlemlerin tekrarlanmasıyla yerel baloncuk patlatma gerilimi bakır alaşımının akma dayanımını aşmış ve baloncuk merkezinden yayılan küresel şok dalgalarının etkisiyle mikro çatlakların oluşumuna neden olmuştur. Sonrasında mikro çatlakların birleşmesiyle hızlandırılmış erozyon rejimine geçişi temsil eden malzeme parçalarının kopması hızlanmıştır.

Çalışmamızda da yüzeye dik doğrultuda çarpan kavitasyon baloncukların çökmesi sonucu oluşan daha fazla şok dalgaları 90° kavitasyon hücum açısında erozyona uğrayan numune üzerinde daha fazla çukur ve derinliğinin artmasına neden olmuştur. Özellikle düşük kavitasyon hücum açılarındaki (30°) yüzeysel abrasif çizilme benzeri hasarlar görülmüşken, yüzeye dik doğrultudaki (90°) hücum açılarındaki çatlak oluşumu ve aşırı plastik deformasyon ile yüzeyden malzeme kaybı ile hasar meydana geldiğine varılmıştır. Kumar ve arkadaşları da sünek tipte erozyonun derin çukurlara ve çatlamaya neden olduğunu vurgulayarak girinti-çıkıntılı yüzey görünümünü yorulma çatlakları ile birleşen plastik deformasyonun artan yoğunluğunu uzun kavitasyon periyotlarında gözlemlemişlerdir (Kumar ve diğ., 2014).

5.5.2. Yüzey Morfolojisi İncelemeleri

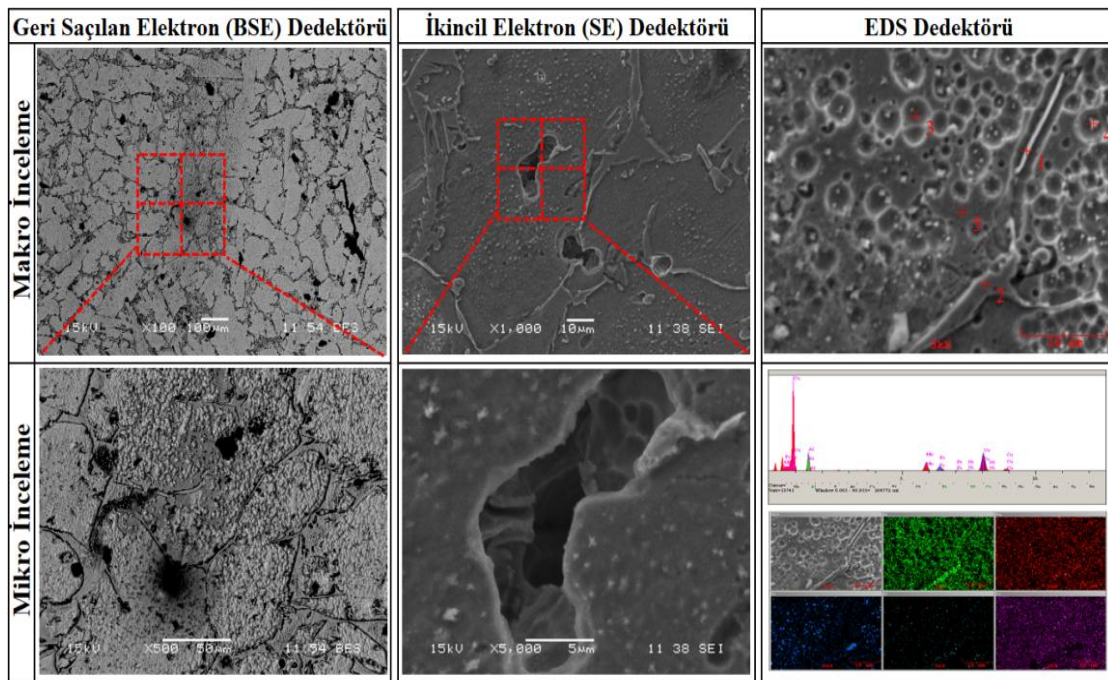
Çalışmamızda yalnızca kavitasyon su jeti erozyonuna maruz bırakılmış, yalnızca bilyalı dövülmüş numuneler ile hem bilyalı dövülüp hem de kavitasyon su jeti erozyonuna tabi tutulan numunelerin yüzey morfolojisi ve hasar mekanizmaları taramalı elektron mikroskobu (SEM) Jeol JSM 6060 LV (Japonya) marka cihazda analiz edilmiştir. Bu incelemeler için enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) dedektörü (Oxfords Instrument, Oxford, İngiltere) ile donatılmış taramalı elektron cihazı da kullanılmıştır.

5.5.2.1. Orijinal Numune Kavitasyon Erozyonu SEM İncelemeleri

Bu bölümde orijinal numuneye (hiçbir yüzey işlemi uygulanmamış) sadece kavitasyon su jeti erozyonu testleri uygulanarak MAB-CU4 alaşımı numunelerinin yüzey morfolojisi incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kavitasyon erozyonu ile ilgili literatür çalışmalarında; hidrodinamik koşullar (ortam ve püskürtme basınçları), geometrik koşullar (nozul geometrisi, nozul ile numune arasındaki mesafe, jetlerin hücum açısı), malzeme ve akışkan özellikleri gibi birçok farklı parametrenin erozif aşınma hasarı üzerinde etkisi olduğu belirtilmiştir (Soyama, 2011; Li ve diğ., 2016; Yamaguchi ve Shimizu, 1987; Dular ve Petkovšek, 2015). Bu parametrelerin değişimi, kavitasyon baloncuklarının çökme, saçılma ve yayılma davranışlarını etkileyerek yüzeye etki eden gerilimi değiştirir ve malzeme yüzeyinde farklı erozif aşınma mekanizmalarına yol açar. Bu nedenle, kavitasyon erozyonunun anlaşılması ve kontrolü için bu parametrelerin detaylı olarak incelenmesi değişken eğim ve serbest forma sahip yapılar örneğin gemi pervane kanadı gibi ekipmanların erozif davranışları üzerinde büyük önem taşımaktadır. Fakat aşınma sonrası değişen yüzey morfolojisini simüle etmek ve yorum yapmak zordur. Kavitasyon baloncuklarının rastgele çökmesi, yüzeye uygulanan gerilimlerin zamana ve alana göre değişkenlik göstermesi, malzeme üzerinde farklı hasar mekanizmalarına yol açar. Bu yüzden, kavitasyon erozyonu sonrası numune yüzeyi morfolojisi ve hasar mekanizmalarının gözlemlenmesi üzerine yapılan ayrıntılı çalışmalar, bu sürecin daha iyi anlaşılması açısından büyük önem taşır. Bu kapsamda, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri, yüzeyde meydana gelen mikroyapısal değişimleri, çatlak oluşumunu, çukurlaşmayı ve diğer hasar mekanizmalarını inceleyebilmek için son derece yararlı bir araç olarak kullanılabilir. Böylece SEM analizleri, detaylı yüzey karakterizasyonu sunarak kavitasyon erozyonunun

dinamiklerini daha iyi anlamaya olanak sağlar. (Chen ve diğ., 2008; Hutli ve diğ., 2017; Hutli ve diğ., 2018; Kazama ve diğ., 2015; Kumar ve diğ., 2014; Nagalingama ve Yeo, 2018; Korobov ve diğ., 2022).

Bu kapsamda tez çalışmasındaki SEM analizleri makro ve mikro aşınma izleri alınarak; kaviteasyon erozyonu testleri sonrası farklı kaviteasyon hücum açılarındaki (30° ve 90°) numunelerin aşınma merkezi ve o bölgelere yakın yerler arasındaki farklar göz önünde tutularak alınmıştır. Malzeme karakterizasyonları ikincil elektron (SE), geri yansıyan elektron (BSE) ve enerji dağılımlı X ışını spektroskopisi (EDS) dedektörleri kullanılarak farklı tarama metodları ile gerçekleştirilmiştir. İkincil elektronlar (Secondary Electron-SE-yansıyıp geri dönerek toplanan elektronlar) enerjileri düşük olduğu için numune yüzeyine yakın yerlerden; geri saçılan elektronlar ise (Back Scatter Electron-BSE-derinden kontrast vererek yapıyı oluşturan elementlerin farklı tonlarda görüntülenmesini sağlayan elektronlar) enerjileri yüksek olduğundan daha derinden yansıyarak görüntülerin elde edilmesini sağlamıştır. MAB-CU4 alaşımı elementel analizi (bileşimi) için kullanılan EDS (Energy Dispersive X Ray Spectroscopy) yöntemi ile ise alaşımın farklı bölge kompozisyonları arasındaki farklılığı ve haritalandırılma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.54'te SEM dedektörleri ile alınan yüzey morfolojisi makro ve mikro aşınma izlerinin şematik gösterimi yer almaktadır.

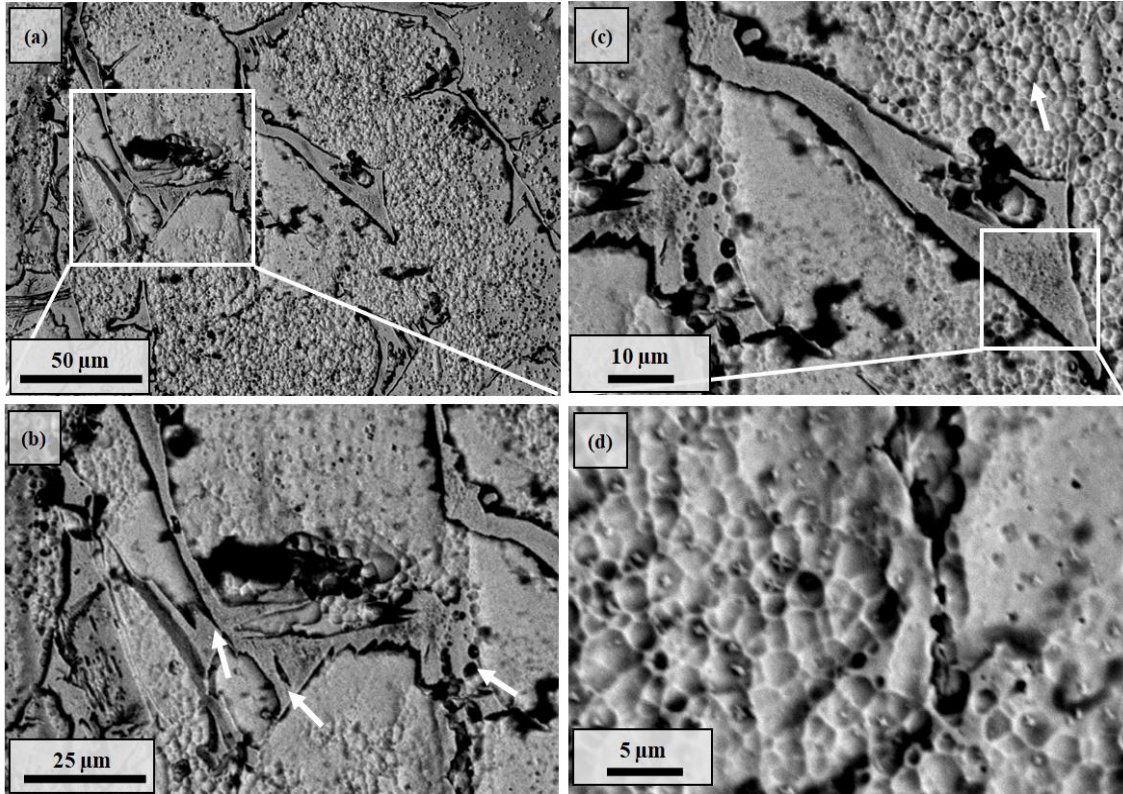


Şekil 5.54. Yüzey morfolojisi makro ve mikro aşınma izlerinin şematik gösterimi

Orijinal numunenin (hiçbir yüzey işlemi uygulanmamış) sadece kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde şu sonuçlara varılmıştır:

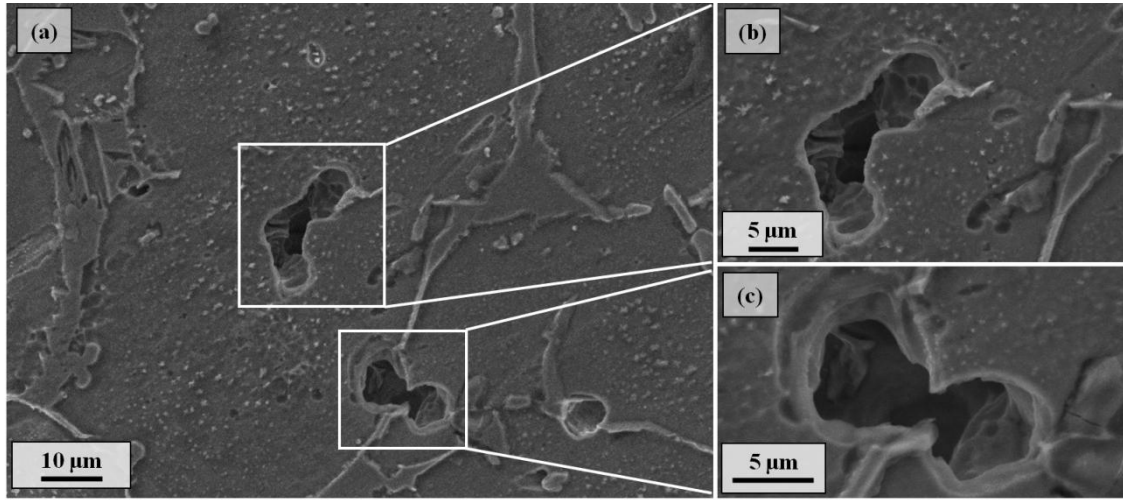
- Şekil 5.55'te, kavitasyon erozyonunun 90° kavitasyon hücum açısında neden olduğu hasar, BSE (Backscattered Electron) dedektörü ile alınan SEM görüntüsünde sunulmuştur. Kavitasyon etkisiyle oluşan hasarın boyutu ve yapısı, malzeme yüzeyindeki mikroyapısal değişimlerle ilişkilendirilmiştir. Elde edilen görüntülerde, tane içlerinin ve tane sınırlarının farklı kontrastlarla ortaya çıktığı, bu sayede hasarın dağılımının daha net görülebildiği anlaşılmıştır. Görüntülerde ortaya çıkan gölge efektleri, tane sınırları altında kalan kısımlar hakkında bilgi vermektedir. Şekil 5.55'in (a) ve (d) kısımlarında gösterilen detaylı incelemelerde, kavitasyon erozyonunun etkisiyle tane içlerinde yaklaşık olarak eş boyutlarda ve çok sayıda oyuk olduğu gözlemlenmiştir. Bu oyuklar, kavitasyon baloncuklarının çökmesi sırasında yüzeydeki malzemenin yerinden koparılmasıyla meydana gelmiştir. Tane içi oyukların yoğunluğu ve boyutlarının düzenli bir dağılım göstermesi, 90°'lik kavitasyon hücum açısının malzeme üzerinde homojen bir etki yarattığını işaret etmektedir. Bu durum, kavitasyon jetlerinin yüzeye dik doğrultuda çarparak daha yüksek oranda hasara neden olduğunu göstermektedir. Bu da benzer çarpma enerjilerine sahip kavitasyon baloncuklarının tekrarlanan ve sabit etkisini ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda, kavitasyon hasarının etkin olduğu, tane sınırına yakın bölgeler Şekil 5.55 (b ve c)'de gösterilmiştir. Bu bölgelerde, derin çukurlar (pitting) meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çukur oluşumu, kavitasyon baloncuklarının yüzeye çökmesiyle oluşan ani basınç etkisi sonucunda malzeme yüzeyinde yerel olarak hasarların yoğunlaştığını işaret etmektedir. Görsellerden anlaşılaacağı üzere, yapı içerisinde tane içlerinin kavitasyon hasarına daha fazla maruz kaldığı tespit edilmiştir. Tane içlerinde, kavitasyon jetlerinin tekrarlı darbe etkisi altında aşınan oyuk oluşumları gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tane sınırları bölgesinde, daha dirençli olmalarına rağmen, kavitasyon erozyonu sonucunda hasara uğramış alanlara rastlanmıştır. Bu sonuçlar, kavitasyon erozyonunun malzeme yüzeyinde homojen olmayan bir şekilde gerçekleştiğini ve hem tane içlerinde hem de tane sınırlarında farklı erozif mekanizmaların devrede olduğunu göstermektedir. Özellikle tane sınırlarına yakın yerlerde oluşan çukur yapıları, kavitasyon hasarının ilerleyen süreçte daha ciddi yüzey bozulmalarına neden olabileceğini ortaya koymaktadır.

Şekil 5.55 (b)'de çatlak ve Şekil 5.55 (d)'de görülen oyuk oluşumları bu durumları doğru göstermektedir. Şekil 5.55 (b)'de oklarla gösterildiği gibi tane sınırlarında da çatlaklar ve kraterler meydana gelmiştir. Ancak tane sınırlarındaki kaviteasyon, tane içlerine kıyasla hala nispeten sınırlıdır. Bu durum tane sınırlarında çökelen gevrek, sert ve kaviteasyon erozyonuna daha dayanıklı farklı fazlar/yapılar olduğu düşündürmektedir. Bu nedenle, bu bölgelerde kaviteasyon erozyonu hasarının, tane içlerine göre daha sınırlı kaldığı söylenebilir. Ancak, bu gözlemin kesin olarak doğrulanabilmesi ve bu bölgelerde bulunan fazların tam olarak tanımlanabilmesi için XRD analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bahse konu, bu sert fazların esnek olmayan yapıları nedeniyle kırılabilirlik gösterip çatlamlarla hasar aldığı görülmektedir. Böylece, tane sınırları üzerinde bulunan sert yapıların yüksek mukavemetine rağmen çatlamlara açık olmaları, uzun süreli kaviteasyon etkisi altında yüzeyde oluşan hasarın farklı bölgelerde farklı yoğunlukta ortaya çıkmasına neden olabilecektir.



Şekil 5.55. 90° kaviteasyon hücum açısında aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi (a) aşınma merkezine yakın 500x büyütülmüş makro görüntü (b) tane sınırındaki çatlaklar ve tane sınırı yakınındaki kaviteasyon çukurları (c) tanelerin içinde ve tane sınırlarında oyuk oluşumu (d) tane sınırının içinde oyuk oluşumu

- Şekil 5.56'da ikincil elektron (SE) dedektörü ile alınan SEM görüntüsü yer alır. Kavitasyon erozyonunun başlangıç aşaması olan inkübasyon (kuluçka) evresinde, malzeme yüzeyinde makroskopik düzeyde herhangi bir belirgin malzeme kaybı gözlenmemesine rağmen mikroskobik düzeyde deformasyon hasarlar meydana gelebilir. Ayrıca, kavitasyon etkisiyle yüzey sertleşmesi meydana gelebilir ve bu süreç sırasında bazen küçük oyuklar oluşurken bazen de malzemede bulunan mikro parçacıkların yer değiştirmesiyle kalıcı deformasyonlar gözlenebilir. Bu evrenin karakteristik özelliklerinden biri olarak, yüzeyde oluşan ilk küçük oyuklar, kavitasyon balonlarının çökmesi sonucu ortaya çıkar. Baloncukların ardışık çökmeleri sonucunda birleşen oyuklar büyüyerek daha geniş ve daha derin erozyon çukurlarına dönüşebilir. Şekil 5.56 (b)'de görülen çukurlar (pitting), genellikle tane içlerinde kavitasyonun yoğun şekilde etkimesi sonucunda oluşmuştur. Ancak, kavitasyonun sadece tane içleriyle sınırlı kalmadığı, Şekil 5.56 (c)'de görüldüğü üzere tane sınırlarında da benzer hasarların meydana geldiği belirlenmiştir. Çukurların bu karmaşık morfolojisi, kavitasyon erozyonunda etkili olan hidrodinamik mekanizmaların zorlu doğasını yansıtmaktadır. Özellikle, aynı bölgede tekrarlı olarak meydana gelen kavitasyon baloncuğu çöküşleri, yani kolektif çökmeler, bu tür hasarların ana nedenlerinden biri olarak görülmektedir. Bu süreçte, birden fazla baloncuğun aynı noktada veya yakın bölgelerde arka arkaya çökmesi, yüzeyde iç içe doğru patlamalarla yoğun gerilimlere neden olarak malzeme yüzeyinde karmaşık ve yaygın hasarların oluşmasına yol açmaktadır. (Carlton, 2012; Soyama ve Futakawa, 2004). Ayrıca yüzeydeki hasarlar; boşlukların çökmesi ve bitişik tanelerde kayma gerilmelerine neden olarak dalgalı olarak görünen plastik deformasyonu ortaya çıkarmıştır. SEM görüntüleri ile de erozyonun plastik deformasyonları takiben çatlak ilerlemesi ve bölünme ile üretildiği görüntülere ulaşılmıştır (Şekil 5.55). İleri erozyon aşamasında hasar tüm yüzeye yayıldığında ise kavitasyon hasarları malzemeye nüfuz etmeye başlayarak hasar derinliğinin artmasına neden olmuştur. Bu aşamada da, inkübasyon periyodunda sertleşmenin sona ermesine müteakip malzemenin gerinim ile sertleşme özelliklerine ve büyük çatlakların yayılmasına bağlı artan kırılma ve kütle kaybı görülmüştür. Görülen bir diğer bulgu ise tane içlerinde beyaz renkle görülen içeriklerin, şebeke suyundan kaynaklı minerallerin olduğu değerlendirilen gözlemlerdir.

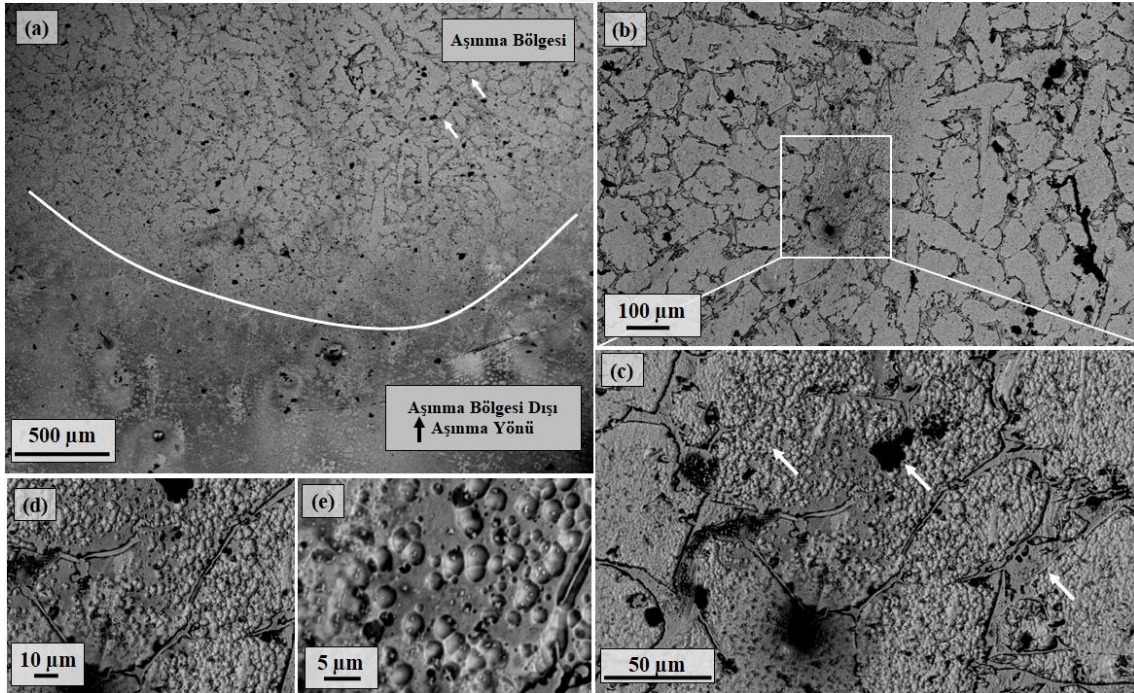


Şekil 5.56. 90° kavitasyon hücum açısında hasar gören SEM görüntüleri (a) aşınma bölgesinin 1000x büyütülmüş makro görüntüsü (b) tane içlerindeki ve (c) tane sınırlarındaki çukurlar

- Şekil 5.57’de hemen hemen aynı hasar mekanizmaları görülen ve BSE dedektörü ile taranmış 30° kavitasyon hücum açısındaki aşınma mekanizmalarını gösteren SEM görüntüleri yer almaktadır. Kavitasyon baloncuklarının neden olduğu (Şekil 5.57 (b)) tane içlerinde çok sayıda eş ölçekli oyuklar oluşmuşken bu oluşumlar tane sınırlarında daha limitli hasarlara neden olmuştur. Bu durum kavitasyon erozyonunun tercihen tane içlerinde meydana geldiğini gösterir. Bu da bakır açısından zengin katı çözelti fazına (XRD analizlerine) kıyasla tane sınırı fazlarının daha yüksek sertliğine atfedilebilir. Bazı bölgelerde ise büyük çukurların (pitting) (Şekil 5.57 (c)) oluşumu dikkat çekmiştir. Ayrıca tane sınırları üzerinde (Şekil 5.57 (d)) yüzeysel kavitasyon oyuk hasarlarına rastlanmıştır. Şekil 5.57 (a)’da ayrıca aşınan bölge ile aşınma görülmeyen bölgenin birbirinden ayrıldığı geçiş bölgesi alanının gösterimi yer almaktadır.

SEM incelemeleri sonucunda, numune yüzeyinde karşılaşılan hasarların; düzensiz şekillerde, farklı çap ve derinliklerde oyuk ve çukurlar içerdiği tespit edilmiştir. Bu oyuk ve çukurların, malzemenin kavitasyon erozyonu altında uğradığı plastik deformasyon nedeniyle halka şeklinde yapılar şeklinde karşımıza çıkmıştır. Aşınma bölgesinde, yapının tane içlerinin ve bu taneler arasındaki tane sınırlarının net bir şekilde ortaya çıktığı fark edilmiştir. Bunun yanı sıra, aşınma bölgesi dışında kirlilikler ve muhtemelen poroziteye bağlı istenmeyen yapılar da SEM görüntülerinde gözlemlenmiştir. 90° kavitasyon hücum açısında, kavitasyonun etkilediği numune

yüzeyinin aşınmış bölgelerinin halka şeklinde yayıldığı ve bu halkaların geniş bir alana yayıldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu hücum açısında geçiş bölgesi ortaya çıkmamış, aşınma homojen bir şekilde yüzeye yayılmıştır. Buna karşın, 30° kaviteasyon hücum açısında gerçekleştirilen testlerde hasar deseninin asimetrik bir özellik gösterdiği fark edilmiştir (Şekil 5.57 (a)). Bu asimetrik yapının, numunenin alt ve üst kısımları arasında belirgin bir aşınma izi farkı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu farklılıklar, kaviteasyon erozyonunun numunenin çeşitli bölgelerinde farklı aşamalarda gerçekleştiğini ve bu aşamaların oluşum yerlerini belirgin şekilde gözlemlememize olanak sağlamıştır. Hücum açısına bağlı olarak kaviteasyon etkisinin dağılımında belirgin farklılıklar oluşmuş ve erozyonun etkisinin yüzey üzerinde homojen ya da asimetrik olarak değişebileceği ortaya konmuştur.



Şekil 5.57. 30° kaviteasyon hücum açısında aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi (a) 30x büyütülmüş makro görüntüsü (b) aşınma bölgesi (c) tane içlerindeki kaviteasyon çukurları (d) tane sınırı hasarı (e) tane içlerinde oyuk oluşumu

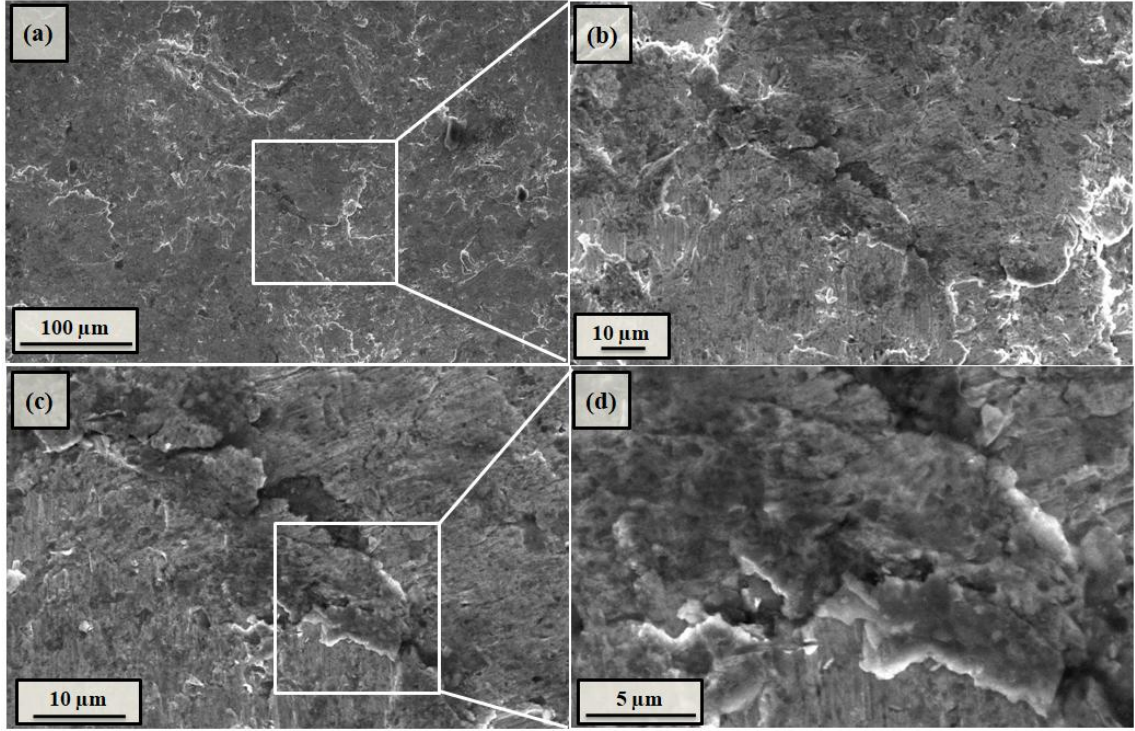
Sonuç olarak bu çalışmada daha belirgin bir tane içi kaviteasyon erozyonu (aşınma) gözlemlenmiştir (Şekil 5.55 ve Şekil 5.57). Ayrıntılı SEM ve optik profilometre çalışmaları, 90° kaviteasyon hücum açısındaki kaviteasyon erozyonu hasarının ağırlıklı olarak şiddetli plastik deformasyon ve yüzey korozyonu nedeniyle kaviteasyon çukurları şeklinde tane içlerinde meydana geldiği, sınırlı gözlemlere rağmen tane sınırlarındaki

sert ikincil fazlar etrafında çukur oluşumunun sınırlı olduğunu göstermektedir. Tane sınırlarındaki sert ikincil fazlardaki kavitasyon hasarı (Şekil 5.55 ve Şekil 5.56) ve özellikle 90° kavitasyon hücum açısında taneler içerisinde ciddi kavitasyon hasarı nedeniyle derin çukurlar oluşumu bunu doğrulamaktadır (Şekil 5.56).

5.5.2.2. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulanmış Numunelerin SEM İncelemeleri

Çalışmanın bu bölümünde de orijinal numuneye (hiçbir yüzey işlemi uygulanmamış) sadece bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımı numunelerinin değişen yüzey özelliklerinin etkisi incelenmiştir. Şekil 5.58’de ikincil elektron (SE) dedektörü ile taranan farklı büyütme ölçeklerinde (250x, 1000x, 2000x ve 5000x) alınmış SEM görüntüleri sırasıyla verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek kinetik enerji (çarpma enerjisi) ile numune yüzeyine tekrarlı olarak gönderilen paslanmaz çelik bilyaların numune yüzeyinde plastik deformasyonlara ve şekil değişimine sebep olduğu görülmektedir (Şekil 5.58 a-d). Plastik deformasyonlar sonucunda yüzeyde çukur ve tepeler oluşmuştur. Ayrıca yüzeyde oyuk ve benzeri yapıların oluştuğu ve şekil oluşumunu tamamlayamamış bölgelerin de varlığı gözlemlenmektedir. Şekil oluşumlarının tamamlanamadığı (sınırlı bir deforme edilebilirlik) bölgelerin varlığı katlanma ve mikro boyutta çatlakların oluşumunu ortaya çıkarmıştır (Şekil 5.58 c). Ortaya çıkan katlanma mekanizmaları aşırı plastik deformasyona atfedilebilir ve tekrarlanan yüksek enerjili bilya darbeleri, katlanmış yüzeylerin daha fazla bulaşmasına ve üst üste binmesine katkıda bulunur (Şekil 5.58 d).

Sonuç olarak bilyalı dövme işleminin MAB-CU4 (Mangane Alüminyum Bronz) alaşımı numunesinin yüzey özellikleri (pürüzlülük, topografya ve morfoloji) üzerinde belirgin bir etkisi olmuştur (Şekil 5.58). Bilyalı dövme yöntemi etkisiyle oluşan plastik deformasyon, deformasyon mekanizmalarının (katlanma, çıkıntı kaldırma, oyuk oluşumu vb. gibi) bir fonksiyonu olarak yüzey özelliklerini değiştirmiştir (Avcu ve diğ., 2023). Ortaya çıkan bu modifikasyonlar sadece yüzey pürüzlülüğünde değişime yol açmakla kalmamış, aynı zamanda dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımı numunelerinin yüzey ve yüzey altı mikroyapısal ve mekanik özelliklerini de değiştirmiştir. Tüm bu değişiklikler de, MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu davranışını etkilemiştir.

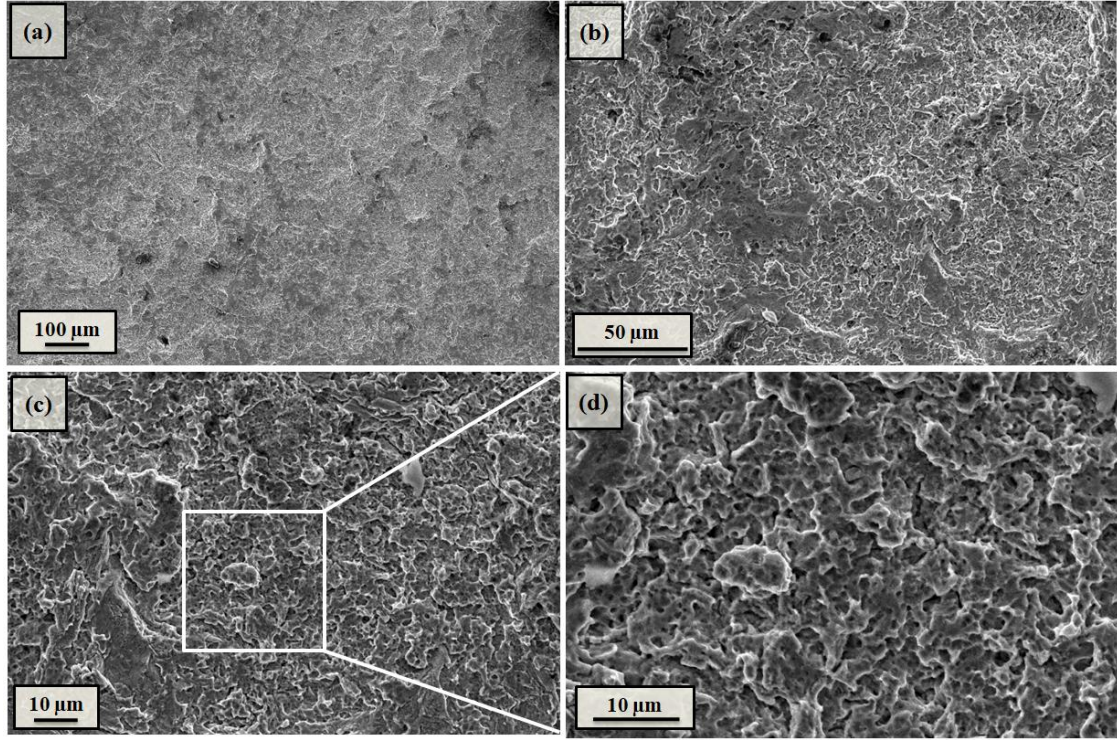


Şekil 5.58. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numune yüzeyinin SEM görüntüleri a) 250x b) 1000x c) 2000x d) 5000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları

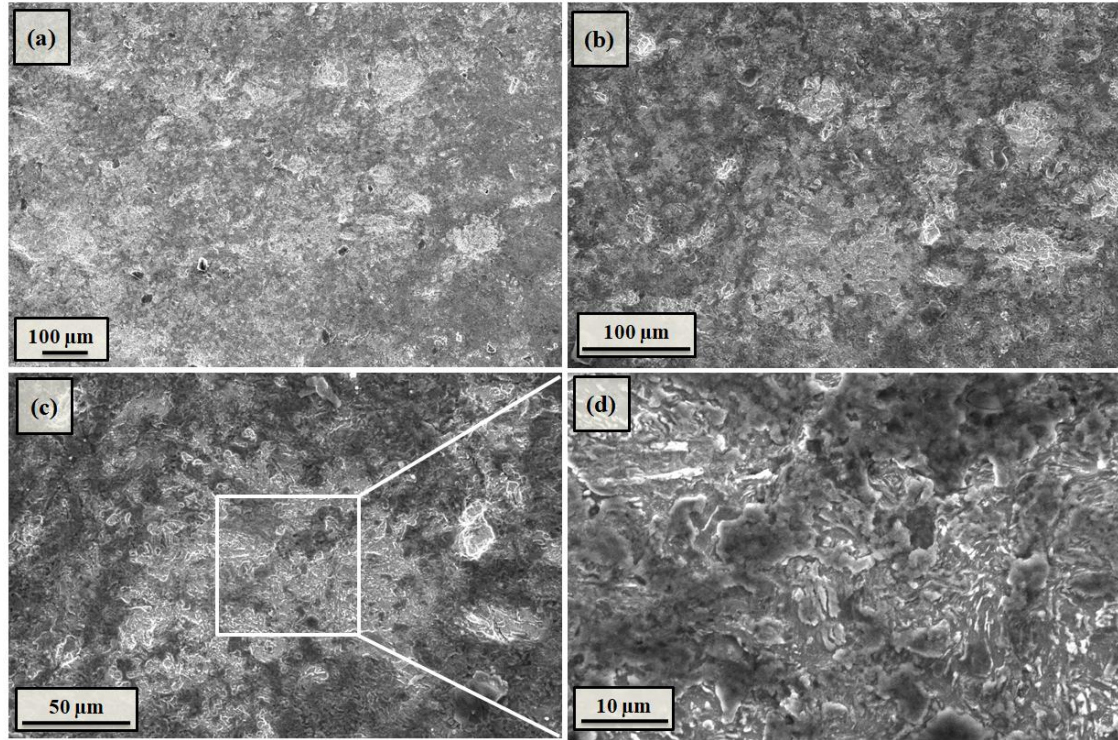
5.5.2.3. Bilyalı Dövme Sonrası Kaviteasyon Erozyonu SEM İncelemeleri

Bu bölümde bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımının daha sonra kaviteasyon su jeti yöntemi ile erozyona uğratılıp ortaya çıkan morfolojik değişimlerin etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda testler için farklı giriş basıncı (P_1) ve farklı kaviteasyon hücum açısında ortaya çıkan hasar görüntülerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü ve incelemelerine yer verilmiştir. Bu kapsamda; $P_1=150$ bar giriş basıncında fakat farklı kaviteasyon hücum açısında ortaya çıkan görüntülerde:

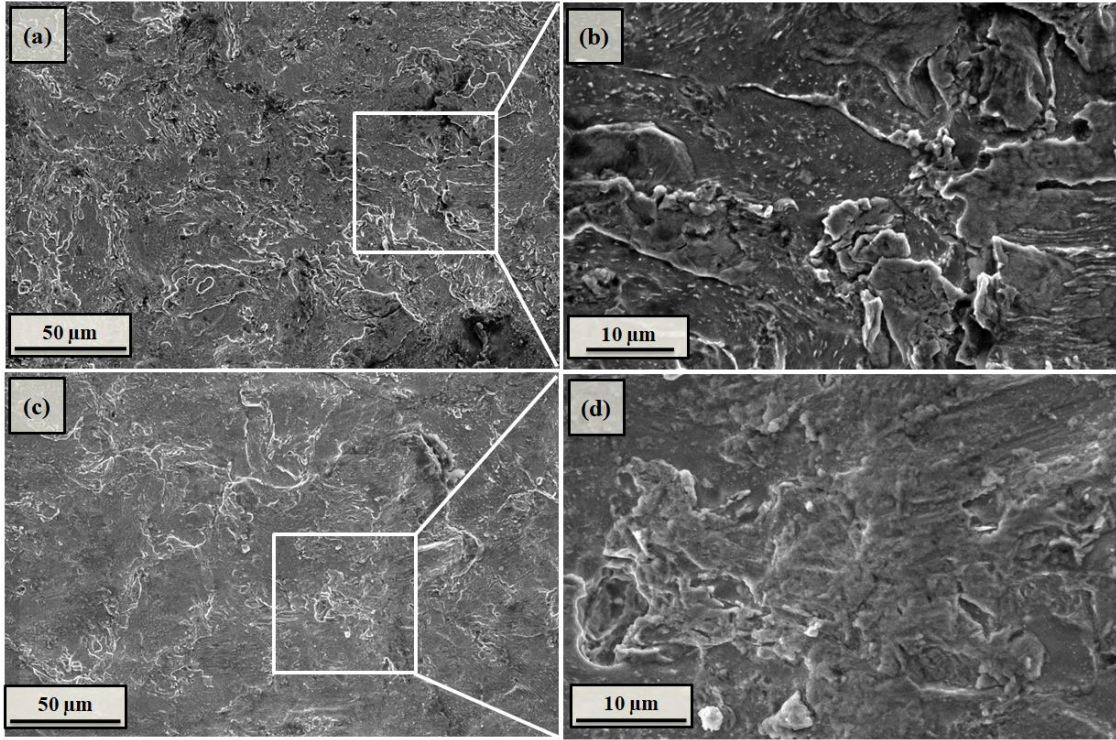
- Şekil 5.59'da ilk olarak bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin 30° kaviteasyon hücum açısı, $P_1=150$ bar giriş basıncı ve $P_2=1$ bar test kabı iç basıncı ve $\sigma=0,006$ kaviteasyon sayısı test koşullarında kaviteasyon su jeti erozyonu maruz bırakılması sonrası ortaya çıkan değişimleri ve
- Şekil 5.60'da bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin daha sonra 90° kaviteasyon hücum açısı, $P_1=150$ bar giriş basıncı ve $P_2=1$ bar iç basıncı ve $\sigma=0,006$ kaviteasyon sayısında kaviteasyon su jeti erozyonuna maruz bırakılması sonrası ortaya çıkan SEM görselleri yer almaktadır.



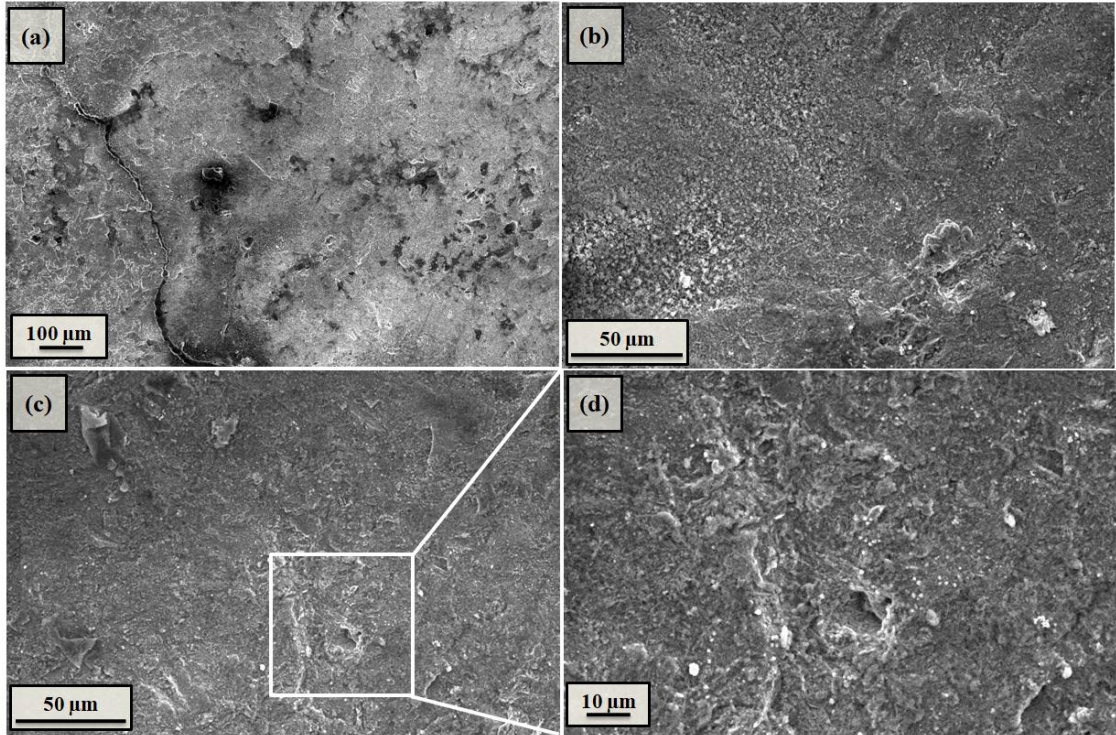
Şekil 5.59. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a)100x b)500x c)1000x d)2000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (30° hücum açısı ve $\sigma=0,006$ kavitasyon sayısı)



Şekil 5.60. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a) 100x b) 250x c) 500x d) 2000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (90° hücum açısı ve $\sigma=0,006$ kavitasyon sayısı)



Şekil 5.61. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a) 100x b) 2000x c) 500x d) 2000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (30° hücum açısı ve $\sigma=0,005$ kavitasyon sayısı)



Şekil 5.62. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası SEM yüzey görüntüleri a) 100x b) 500x c) 500x d) 1000x büyütme plastik deformasyon mekanizmaları (90° hücum açısı ve $\sigma=0,005$ kavitasyon sayısı)

$P_1=200$ bar giriş basıncı ve farklı kavitasyon hücum açısında ortaya çıkan görüntülerdeki incelemeler ise:

- Şekil 5.61’de bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin 30° kavitasyon hücum açısı, $P_1=200$ bar giriş basıncı ve $P_2=1$ bar iç basıncı ve $\sigma=0,005$ kavitasyon sayısı test koşullarında kavitasyon su jeti erozyonu maruz bıraktırılması sonrası ortaya çıkan değişimleri ve
- Şekil 5.62’de bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin daha sonra 90° kavitasyon hücum açısı, $P_1=200$ bar giriş basıncı ve $P_2=1$ bar iç basıncı ve $\sigma=0,005$ kavitasyon sayısında kavitasyon su jeti erozyonuna maruz bıraktırılması sonrası SEM görselleri yer almaktadır.

Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kavitasyon su jeti erozyonu sonrası ortaya çıkan SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey morfolojilerinde önemli değişimlerin gerçekleştiği görülmüştür. Numune yüzeyine çarpan kavitasyon su jetleri plastik deformasyon sonucu yüzeyde görülen tepe ve çukur bölgelerinin oluşumuna neden olmuştur. Ancak bazı bölgelerde tepe, çukur ve oyuk yapılarının şekil değiştirme enerjisini tam olarak karşılayamadığı bölgelerin oluşumu da dikkat çekmiştir. Bu sebeple yer yer oyuk yapıların oluşumu tamamlanamamış ve bu bölgelerde katlanma, sürünme ve mikro çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Bunun yanında bazı bölgelerde ise bilyalı dövmenin neden olduğu yüzey sertlik artışı nedeniyle kavitasyon su jeti erozyonuna karşı dayanım gösteren bölgelerin mevcut olduğu alanlar görülmüştür. Daha önceki bölümlerde bilyalı dövme işleminin numunelerin kesitsel sertlik değerlerini belli derinliğe kadar arttırdığı sertlik haritaları ile gösterilmişti (Şekil 5.41). Ancak bilyalı dövme etkisiyle derinliğe bağlı olarak azalan dövme etkisi numune iç bölgelerine doğru artan sertlik değişimini ortadan kaldırmıştır. Kavitasyon su jeti işlemi sonrası numune yüzeyine püskürtülen su jetleri daha önce bilyalı dövme yöntemi ile yüzeyi sertleştirilmiş numune yüzeyine çarpınca daha dayanıklı bölgelere rastlamıştır. Bu nedenle giriş basıncının $P_1=150$ bar olduğu durumda kavitasyon su jeti erozyonuna karşı dayanım kazanılmıştır. Bu durum artan giriş basıncı nedeniyle eşik basınç değerine kadar dayanım göstermiştir. Ancak $P_1=200$ bar giriş basıncı testleri sonrası bu dayanım ortadan kalkarak numune yüzeyinde ortaya çıkan hasarların artmasına neden olarak SEM görüntülerinde artan tepe, çukur ve oyuk olarak karşımıza çıkmıştır.

5.5.3. EDS Analizi

Çalışmamızda elementel bileşim değişiklikleri ile kavitasyon hasarı oluşumu arasındaki ilişkiyi araştırmak için aşınmış numune üzerinde Şekil 5.64 (a)'da belirtilen konumlardan elementel analizlere yer verilmiştir. 30° kavitasyon hücum açısında hasara uğramış numunede gerçekleştirilen elementel analizlerin amacı, numunenin farklı bölgelerindeki elementel bileşimi inceleyerek kompozisyon farklılıklarını ortaya koymak ve bu kompozisyon değişimlerini hasar oluşumuyla ilişkilendirmektir. Bu analizler, erozyonun malzeme üzerinde oluşturduğu etkilerin yüzeydeki farklı bileşenlerin konsantrasyonlarıyla nasıl bağlantılı olduğunu anlamaya yönelik önemli veriler sağlamaktadır. Çalışmada daha önce tartışılan XRD faz analizlerine (Şekil 5.31) uygun olarak aşınmış numune üzerinde aşağıdaki gibi beş farklı bölge seçilmiştir: 1 nolu alan tane sınırında ikincil faz (tane sınırındaki çökelti), 2 nolu alan tane sınırı β fazı (tane sınırının kendisi), 3 nolu alan krater hasarı tane içi κ fazı (oyuğun merkezi), 4 nolu alanda açık gri parçacık (mineral olduğu değerlendirilen partikül), 5 nolu alan tane içi α fazındaki hasarsız yüzey (tane içinde zarar görmemiş kısım) olarak seçilmiştir. Tablo 5.26'da elementel analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

Tablo 5.26. EDS analiz bölgeleri elementel bileşen değerleri (% kütlece)

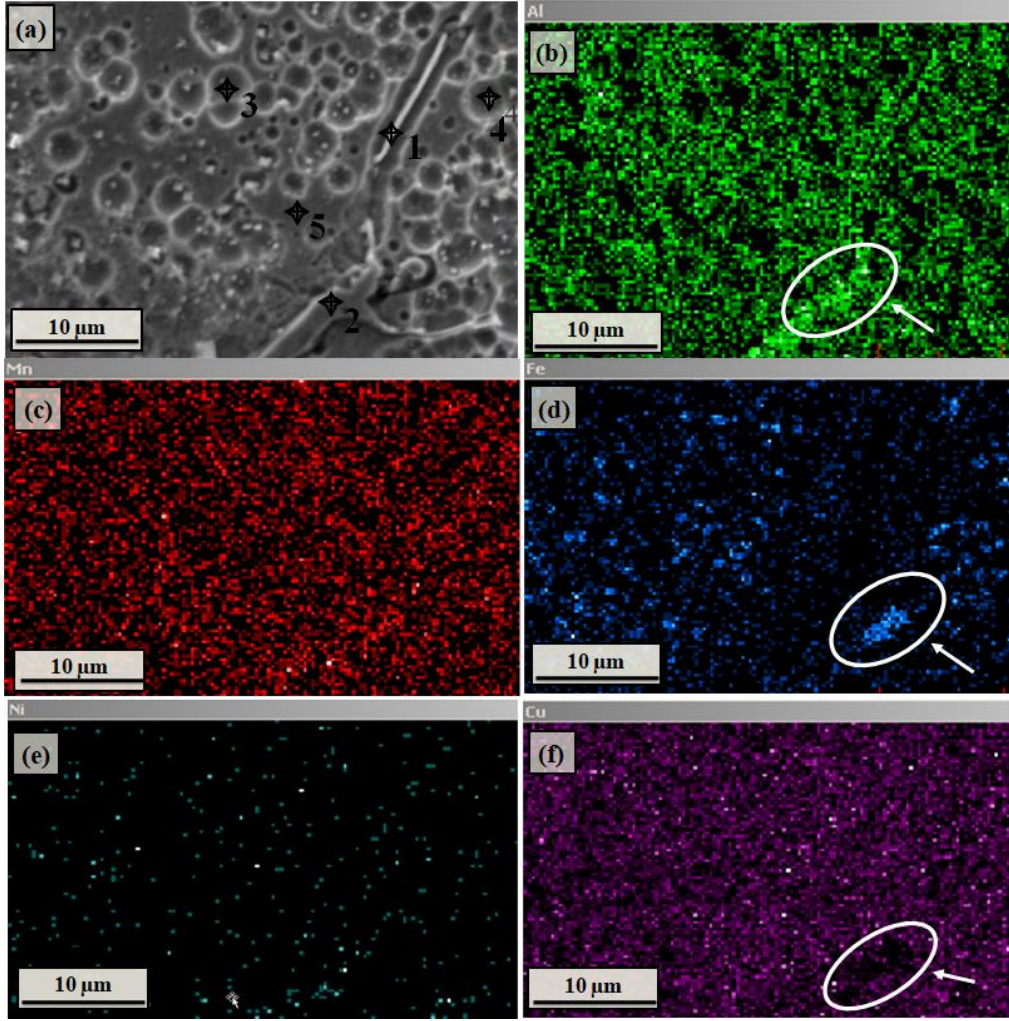
Elementler	Bölgelerin Kimyasal Bileşimler (% wt)				
	1 Nolu	2 Nolu	3 Nolu	4 Nolu	5 Nolu
Al	10,146	19,157	5,074	8,473	10,853
Mn	10,488	14,691	16,402	10,089	11,236
Fe	2,252	5,068	29,693	2,181	3,687
Ni	1,121	6,429	1,511	1,592	2,082
Cu	75,993	54,654	47,321	77,664	72,142

Tablo 5.26'da verilen bölgelerin kimyasal bileşimleri kendi aralarında değerlendirildiğinde; ilk olarak 1 nolu alan olarak tanımlanan tane sınırındaki çökelti bölgesinin karşılaştırılması sonucunda, bu bölgede Ni konsantrasyonunun düşük olduğu tespit edilmiştir. 2 nolu alan olarak belirlenen ve tane sınırında aşınma görülmeyen bölge incelendiğinde, Al konsantrasyonunun daha yüksek olduğu dikkat çekmiştir. 3 nolu bölge, aşınma sonucu oluşan oyuk merkezinin yer aldığı alandır. Bu bölgedeki element analizinde Al, Ni ve Cu konsantrasyonlarının düşük olduğu; buna karşın Fe ve Mn konsantrasyon oranlarının yüksek çıktığı görülmüştür. Özellikle Fe konsantrasyonunun diğer elementlere göre belirgin bir artış göstermesi ve Cu

konsantrasyonunun oldukça düşük seviyelerde bulunması dikkat çekicidir. Bu durum, oyuk merkezlerinin kimyasal bileşiminin kavitasyona karşı dayanıklı bir yapı oluşturmaktan uzak olduğunu düşündürmektedir. 4 nolu bölge, numunenin testlere tabi tutulmadan önceki spektrometre analiz sonuçlarına en yakın bileşim değerlerini veren bölge olarak belirlenmiştir. Son olarak, 5 nolu tane içinde hasar görmemiş kabul edilen bölge incelendiğinde ise değerlerin verilen seviyelerde kaldığı belirlenmiştir.

5.5.3.1. Haritalama (Map) Analizi

Şekil 5.63'te yapılan analizde de haritalama (map) analizi ile Al-Mn-Fe-Ni-Cu elementlerinin alaşım içindeki kompozisyon dağılımı ortaya çıkarılmıştır. Bu bölümde, görüldüğü üzere alansal EDS analizi ile elde edilen kompozisyonel değişimlerin yüzeydeki hasar durumuyla ilişkilendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kimyasal kompozisyon ile hasar alanlarının ilişkisi hakkında bazı çıkarımlar sunmakla birlikte, konu hakkında kesin bir sonuca varmak için yeterli değildir. Fakat farklı bölgelerdeki elementel kompozisyon değişimleri incelenerek, özellikle tane içleri, tane sınırları ve oyuk bölgelerindeki element yoğunluklarının hasar oluşumundaki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Tane sınırları, genellikle daha sert ve farklı fazlardan oluşan mikro yapılar içerdiğinden, kavitasyon direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Buna karşın, tane içlerinde meydana gelen mikro çukurlar ve oyuklar, bu bölgelerin kavitasyon etkilerine daha yatkın olabileceğini göstermektedir. Bu analizlerle, Cu, Al, Fe, Ni, ve Mn gibi element oranlarının malzemenin farklı alanlarında nasıl değiştiği belirlenerek, hangi bölgelerin daha fazla aşındığı ve hangi bölgelerin daha dirençli olduğu ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda Şekil 5.63 (a) numune üzerinde taranılan bölgenin SEM görüntüsünü vermektedir. Şekil 5.63 (b) Al elementinin yapıdaki dağılım haritasını göstermektedir. Al elementlerinin dağılımında tane sınır bölgesine denk gelen ok ile belirtilen yerin diğer konumlara göre daha parlak çıkması Al konsantrasyon değerinin bu bölgede daha yüksek görüldüğü anlamını çıkarmıştır. Şekil 5.63 (c)'de görüleceği üzere yapının genelinde Mn içeriğinin diğer elementlere göre homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Şekil 5.63 (f) ok ile gösterilen Cu haritasında bakırca fakir olan bölgelerin varlığı göze çarpmaktadır. Şekil 5.63 (d) ok ile gösterilen Fe haritasında ise demirce zengin bölgelerin varlığı dikkat çekmekte olup ve demirin varlığının homojen dağıldığı görülmektedir.



Şekil 5.63. EDS Harita analizi (a) 30° kavitasyon hücum açısındaki bölgenin SEM görüntüleri (b) Al (c) Mn (d) Fe (e) Ni (f) Cu element haritası

Elde edilen bulgular, hasar ve kompozisyon ilişkisini daha net bir şekilde anlamaya yardımcı olmakta ve malzemenin kavitasyon erozyonuna karşı dayanıklılık özelliklerini optimize etme potansiyeli sunmaktadır. Bununla birlikte, yapılan bu analizler, kimyasal kompozisyon ile hasar mekanizmasının tam olarak anlaşılmasını sağlamak için bir temel oluşturmakta, ancak daha detaylı yorumlamalar için XRD analizi gibi faz analizi yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu faz analizleri, yapıda hangi bileşiklerin veya intermetalik fazların bulunduğunu ortaya koyarak kompozisyon ile erozyon direnci arasındaki ilişkiyi daha ayrıntılı bir şekilde açıklamayı mümkün kılacaktır. İlerleyen aşamalarda XRD analizi ve ilgili literatür çalışmaları ışığında, numunenin yapısında oluşan fazlar net bir şekilde belirlenecek ve bu veriler üzerinden daha detaylı bir tartışma yürütülecektir. Bu sayede, hasar mekanizmalarının kimyasal kompozisyon ile daha güçlü bir şekilde ilişkilendirilmesi sağlanacaktır.



Şekil 5.64. 30° kavitasyon hücum açısında alınan EDS analiz bölgeleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kavitasyon erozyonunun zararlı etkilerini azaltmak için bilyalı dövme yönteminin kullanılması önerilmiştir. Bugüne kadar MAB-CU4 gemi pervane malzemesinin kavitasyon erozyonu aşınma davranışı üzerine az sayıda çalışma yapılmıştır. Bu yüzden, özellikle yüksek tork talepleri olan savaş gemisi pervane grupları gibi pervane, pompa ve türbin kanatları gibi kavitasyona maruz kalan yeni malzemelerin tasarlanmasında yapılacak olan çalışmaların incelenmesi oldukça önem teşkil etmektedir.

Bu kapsamda tez çalışması için yapılan inceleme yöntemleri, MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu davranışını etkileyen çeşitli parametrelerin (kavitasyon sayısı, kavitasyon hücum açısı, zaman ve nozul ile numune arası mesafesi) bir fonksiyonu olarak kapsamlı ve sistematik olarak keşfetmeye yönelik ilk araştırmalardandır. Alaşımın kavitasyon erozyon davranışı, çeşitli erozyon parametreleri altında kavitasyon testlerinin yapılmasına olanak tanıyan ASTM G134 standartlarında tasarlanan ve imalat edilen kavitasyon su jeti test cihazı kullanılarak incelenmiştir.

Kavitasyon erozyonu parametrelerinin alaşımın kavitasyon davranışı üzerindeki önemini sistematik olarak incelemek için ise Taguchi deney tasarımı tasarlanmıştır. Özellikle kavitasyon hücum açısı parametresinin kavitasyon davranışı üzerindeki etkileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3 boyutlu optik profilometre yoluyla makro ve mikro ölçekte gözlemlenmesine ilişkin çeşitli aydınlatıcı bulgular rapor edilmiştir. Daha sonra bilyalı dövme yöntemi yoluyla sertleştirilmiş yüzey tabakasının oluşumunu ortaya çıkarmak için MAB-CU4 alaşımı numunelerinin kesitsel sertlik haritalaması ile yakın yüzeyde sertlik değişimlerinde kayda değer bir artış ortaya çıkarılmıştır.

Sonuç olarak değişen mikroyapı ve mekanik özellikler sayesinde bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu testleri sonrası kavitasyon erozyonu direncinin artırılması sağlanmıştır. Bu bölümde de özetle doktora tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların genel çıktı ve sonuçları ayrı başlıklar altında sunulmuş ve gelecek çalışmalar ile ilgili önerilere yer verilmiştir.

6.1. Kavitasyon Erozyonu Sonuçları

Yöntem ile MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonuna karşı test koşullarını ve erozyon direnç karakteristikleri etkilerini incelemek amacıyla numunelerin az bir süre içerisinde aşındırılması (erozyona uğratılması) sağlanmıştır. Test çalışmaları için çalışma şartlarında kavitasyon erozyonuna uğrayan gemi pervanesi dökümünden elde ettiğimiz kendi üretimimiz numuneler hazırlanmıştır. Bu işlemler sonucunda döküm süreçleri ile ilgili önemli bulgular elde edilmiştir. Özellikle döküm hatalarından kaçınmak için uygun ortam koşullarında ve yöntemler ile numune dökümü gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ASTM G134 standartlarına göre kurulan test cihazımız literatürdeki mevcut bulunan ancak kısıtlı kullanıma izin veren cihazların geliştirilmesi ile imal edilmiştir. Özellikle ilk defa farklı kavitasyon hücum açılarındaki numunelerin kavitasyona maruz bırakılması tasarımıyla test cihazının özgünlüğünü ve kullanılabilirliğini arttırarak önemli bir tasarımsal yenilik ortaya çıkarılmıştır. Yapılan test çalışmaları sonucunda, kavitasyon test cihazının başarıyla çalıştığı, elde edilen sonuçların tutarlı ve tekrarlanabilir olduğu tespit edilmiş ve test cihazının geçerleme kılma (validasyon) ve doğrulama (verifikasyon) çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak kavitasyon su jeti erozyon testleri, farklı giriş basınçlarında (P_1) herhangi bir yüzey işlemi uygulanmamış numuneler üzerinde kütle kaybı ve erozyon hızlarının değerlendirildiği testler ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda gerçekleşen kütle kayıplarının miligram (mg) seviyesinde gerçekleştiği göz önünde bulundurularak ortaya çıkan sonuçlar:

- Kütle ve hacim kayıpları, numunelerin kavitasyona maruz kalma süresi (t) arttıkça artmıştır.
- Kavitasyon erozyonu test cihazının doğrulama ve geçerleme çalışmaları bu testler ile sağlanmış olup tipik bir ASTM G134 test aparatındaki kavitasyon erozyonu eğrisi olan kütle kaybı (S Eğrisi) ve erozyon hızı eğrilerine ulaşılmıştır. Ayrıca doktora tez çalışmasında elde edilen sonuçların literatür çalışmaları ile uyumlu olduğu ortaya çıkarılarak test cihazının doğru sonuçlar ortaya çıkardığı kanıtlanmıştır.

- Kavitasyon erozyonu sonrası numunelerin orta bölgelerinde halka biçiminde erozyon bölgeleri olduğu, zamanla birlikte erozyon halkası karakteristiklerinin de genişlediği görülmüştür.
- Artan giriş basıncı (P_1) ile kütle kaybı artış oranı yükselmiştir. $P_1=200$ bar giriş basıncı altındaki kavitasyon erozyonu testlerindeki daha fazla artan kütle kaybı ve erozyon hızı oranı bu değişimi göstermiştir.
- Testler sırasında çekilen görsellerin incelenmesi sonucunda aynı koşullar altında farklı kavitasyon sayılarına (σ) bağlı olarak kavitasyon baloncuklarının saçılımının basınç değişimlerine göre değiştiği gözlemlenmiştir.

Taguchi deney tasarımı yöntemi ile döküm MAB-CU4 malzemesinin kavitasyon erozyonu üzerindeki davranışlarına etkileyen parametrelerin etkinliği irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar:

- Gerçekleştirilen Taguchi deney koşullarına bağlı olarak kavitasyon hücum açısı ve kavitasyon sayısı arttıkça kütle kaybı da artmıştır. Bunun yanında kütle kaybının artmasına nozul ile numune arasındaki mesafenin azaltılması da etken olmuştur. Ayrıca kavitasyon sayısı, hücum açısı ve S_{off} mesafe değişimi erozyonunun nüfuz ettiği alanın değişimine sebep olmuştur.
- Taguchi deney tasarımı Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi sonucunda en az kütle kaybı; $\sigma=0,006$, $S_{off}=5$ mm, 30° kavitasyon hücum açısı parametre seviyesi değerlerinden oluşmuştur.
- Varyans analizi sonucunda % 69,07 oranı değeri ile kütle kaybına en fazla etki eden parametrenin kavitasyon hücum açısı olduğu; kavitasyon sayısı parametresinin % 27,22 oranı ile ikinci sırada olduğu, en az etkili olan parametrenin nozul ile numune arasındaki mesafenin (S_{off}) % 2,41 ile olduğu sonuçlarına varılmıştır.
- Taguchi deneyleri sonucunda kütle kaybında en etkili parametre olan kavitasyon hücum açısı parametresi ile yapılan doğrulama deneyleri sonucu; hücum açısı arttıkça kütle kaybının arttığı sonuçları çıkarılmıştır. Kütle ve hacim kayıpları 30° hücum açısında en az, 90° kavitasyon hücum açısında ise en fazla olmuştur.
- 30° ve 60° kavitasyon hücum açısındaki aşınma izleri kavitasyon su jetlerinin çarpma açısı yönüne doğru genişlediği gözlemlenmişken 90° kavitasyon hücum açısı konumunda bu gözlem görülmemiştir.

- Kavitasyon hücum açısı etkisini incelemek için kavitasyon erozyonu testleri ile yapılan doğrulama deneyleri Taguchi analizi için kurulan deney tasarımının doğruluğunu ortaya çıkarmıştır.

6.2. Bilyalı Dövme Sonuçları

Bilyalı dövme işlemleri için seçilen parametreler ile numuneler üzerinde mikro çatlak oluşumu veya aşırı yüzey pürüzlülüğü oluşumu oluşturulmadan ve bilyalı dövme yönteminin faydaları görülmeye çalışılarak kumlama makinesinde testler gerçekleştirilmiştir. İşlem sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerin mikroyapı üzerinde önemli değişimleri olduğu ortaya konulmuştur.
- Yapılan testler sonucunda gerçekleşen numune kütle kayıpları miligram (mg) seviyesinde gerçekleşmiştir.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımı numune yüzeylerinde plastik deformasyon değişimlerine ve çatlak oluşumlarına bağlı olarak hasarlı bir mikroyapının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.
- Numune yüzeyinde gerçekleşen plastik deformasyonlar, yüzey altı bölgelerde tane yönlenmesine ve tane incelmeye neden olmuştur. Bazı bölgelerde ise tane sınırlarının ortadan kalktığı da gözlemlenebilmiştir.
- Herhangi bir yüzey işlemi gerçekleştirilmemiş numune ile bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneler karşılaştırıldığında mikroyapı üzerinde oluşan önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. Ancak bu değişiklikler numune kesit derinliğine bağlı olarak etkisini yitirdiği belirli bir iç derinlikten sonra bilyalı dövme işleminden etkilenen bölgenin son bulduğu ve orijinal numune ile aynı özellikleri taşıyan bölgeye ulaşıldığı görülmüştür.
- Bilyalı dövme yöntemi ile MAB-CU4 alaşımının sertlik değerinin, alaşımın orijinal sertlik değerine göre yaklaşık %70'e kadar artış gösterdiği bölgeler tespit edilmiştir. Sertlik değerindeki bu artışın, malzeme derinliğe bağlı olarak azaldığı ve yaklaşık 250 μ m derinlikten sonra bilyalı dövmeden etkilenen bölgenin sona erdiği belirlenmiştir. Mikroyapısal değişimlerin, sertlik değişiminde görülen bu artış eğilimi ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

- Sertlik değerlerindeki bölgesel artışların plastik deformasyonların yüzey altı bölgede tane incilmesi ve tane yönlenmesine bağlı olarak meydana geldiği açıklanmıştır. Yüzey altı bölgelerde meydana gelen değişimler nedeniyle bu bölgelerdeki dislokasyon yoğunlukları artarak dislokasyon hareketlerini sınırlandırmıştır. Dolayısıyla bu değişimler gerinme sertleşmesi mekanizmasına sebebiyet vererek malzeme sertlik değerlerinin bölgesel artışına neden olmuştur.
- Bahsedilen bu önemli değişimler MAB-CU4 alaşımının bilyalı dövme işlemi sonrası değişiklik gösteren yüzey ve yüzey altı mekanik özelliklerinin iki boyutlu sertlik haritalaması ile incelenmesi ilk defa bu çalışmada ortaya çıkarılmış ve yenilikçi bir test yöntemi olarak literatüre kazandırılmıştır.

Çalışmada, daha önce bilyalı dövme yöntemi ile dövülen numunelerin kavitasyon su jeti erozyon yöntemi ile ortaya çıkan erozif aşınma davranışlarının incelenmesi de sağlanmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar bilimsel ve endüstriyel anlamda önemli bulguları ortaya çıkarmıştır.

- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kütle ve hacim kayıpları, numunelerin kavitasyon erozyonuna maruz kalma süresi arttıkça beraberinde artmıştır.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kavitasyon erozyonu testleri sonrası yüzeyleri analiz edildiğinde, basınçlandırılmış şebeke suyunun püskürtüldüğü bölgeler etrafında halka biçimine benzer erozyon bölgeleri olduğu gözlemlenmiştir.
- Aynı şartlar altında bilyalı dövme işlemi uygulanmamış (sadece kavitasyon su jeti erozyon testlerine maruz bırakılmış) numunenin $P_1=150$ bar giriş basıncı altında gerçekleşen kavitasyon su jeti erozyonu testleri sonrası artan kavitasyon hücum açısına (30° 'den 90° 'ye çıktığı durumda) bağlı olarak kütle kaybı % 63,63 oranında artmıştır. Bilyalı dövme yöntemi sonrası kavitasyon erozyonuna uğratılan dövülmüş numunenin ise artan kavitasyon hücum açısına bağlı olarak kütle kaybı oranı % 55,55 olarak ölçülmüştür. Bu da bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin artan kavitasyon hücum açısına bağlı olarak, dövülmemiş numunelere göre % 8,08 oranında kavitasyon erozyonuna karşı daha düşük aşınma oranını kazandığını göstermiştir.

- Aynı şartlar altında bilyalı dövülmemiş numunenin $P_1=200$ bar giriş basıncı altında gerçekleşen kavitasyon su jeti erozyonu testleri sonrası artan kavitasyon hücum açısına bağlı olarak kütle kaybı % 41,37 oranında artmıştır. Bilyalı dövme yöntemi sonrası kavitasyon erozyonuna uğratılan bilyalı dövülmüş numunenin ise artan kavitasyon hücum açısına bağlı olarak kütle kaybı oranı % 37,93 olarak ölçülmüştür. Bilyalı dövme işlemi bu basınç değerinde de dayanımı arttırmıştır. Ancak artan giriş basıncı 150 bar giriş basıncına göre alaşımın kavitasyon erozyonuna olan direncinin ve bilyalı dövme işleminin etkinliğini azalmasına neden olmuştur.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin aynı kavitasyon hücum açısında gerçekleştirilen kavitasyon su jeti erozyon testleri sonuçları değerlendirildiğinde artan giriş basınçlarına bağlı olarak kütle kayıpları artmıştır.
- Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunenin, 30° kavitasyon hücum açısında ve $P_1=150$ bar giriş basıncı altında gerçekleştirilen kavitasyon su jeti erozyon testlerinde, kavitasyon erozyonuna karşı dövülmemiş numuneye göre % 18 daha düşük kütle kaybı aşınma oranı ortaya çıkmıştır. Ancak bu dayanım $P_1=200$ bar giriş basıncı altında gözlenmemiştir. 90° kavitasyon hücum açısında ve $P_1=150$ bar giriş basıncı altında dövülmüş numunenin kavitasyon erozyon testlerinde ise kavitasyon erozyonuna karşı % 22,22 daha düşük kütle kaybı aşınma oranı ortaya çıkmıştır. Ancak bu işlemin aynı test ortamı şartlarında ancak $P_1=200$ bar giriş basıncı altında etkisini gösteremediği görülmüştür. Bu durum, bilyalı dövme işleminin malzemelerin yüzey ve yüzey altı mekanik özelliklerini iyileştirmesi ve bahse konu bu iyileştirmenin belirli bir numune derinlik kesitine kadar etkili olmasına atfedilmiştir.

6.3. Karakterizasyon Analizleri Sonuçları

İleri karakterizasyon analizleri için bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve/veya kavitasyon erozyonuna maruz bıraktıran MAB-CU4 alaşımı numunelerinin 3 boyutlu optik profilometre yardımı ile yüzey pürüzlülüklerinin incelenmesi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ilgili inceleme çalışmaları uygun cihazlar yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, mikroyapısal ölçekte erozyon hasarını kapsamlı bir şekilde inceleyen ve MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu sırasında mikroyapısal özelliklerinin erozyon hasarı üzerindeki etkisini analiz eden ilk çalışmalardan biridir. Kullanılan karakterizasyon metotları sayesinde numunelerin değişen özelliklerinin incelenmesi sağlanmıştır. SEM ve 3B optik profilometre incelemeleri; 90° kavitasyon hücum açısındaki kavitasyon erozyon hasarlarının çoğunlukla şiddetli plastik deformasyon ve yüzey korozyonu nedeniyle kavitasyon çukurları şeklinde tane içlerinde meydana geldiğini, çukur oluşumlarının ise tane sınırlarındaki sert ikincil fazlar etrafında sınırlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. 30° kavitasyon hücum açısında derin kavitasyon çukurları sınırlı, erozyon kraterleri geniş ve çukurların sayısının az olduğu görülmüştür. Genel olarak, daha fazla tane sınırına ve ikincil fazlara sahip daha ince mikro yapılar, 90° kavitasyon hücum açısında kavitasyon erozyonu direncini artırabilir ve 30° kavitasyon hücum açısında ise kavitasyonu destekleyen tasarım yöntemleri, bileşenin hizmet ömrünü uzatabilir. Çalışma sonucunda aşağıda başlıkları verilen sonuçlara varılmıştır.

6.3.1. Kavitasyon Erozyonu Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü ve Topografyası Sonuçları

Kavitasyon su jeti erozyon testleri sonrasında, malzemenin alansal ve çizgisel yüzey pürüzlülük değerlerinde belirgin değişiklikler meydana geldiği ve yüzey topografyasında önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.

- Farklı kavitasyon hücum açılarında ortaya çıkarılan bu değişiklikler tekrarlanan su jeti darbeleri nedeniyle, yüzeyde ciddi plastik deformasyonlara bağlı olarak yüzey hasarlarının oluşmasına neden olmuş, bu da yüzey pürüzlülüğündeki bir artışla birlikte krater, tepe ve vadilerin oluşmasıyla sonuçlanmıştır.
- Çatlak oluşumları ve aşırı plastik deformasyonlar yüzeyden malzeme kaybı sonucu ile ilişkilendirilmiştir.
- Daha fazla kavitasyon baloncuğu, sıçrama damlaları ve şok dalgalarının kavitasyon hücum açısı ve kavitasyon sayılarına bağlı olarak farklı yüzey pürüzlülük etkilerini oluşturduğu gözlemlenmiştir.
- Numunelerin aşınma bölgeleri etrafında yapılan yüzey pürüzlülük ölçümleri incelendiğinde kavitasyon erozyonuna maruz kalma süresi (t) arttıkça R_a , R_q , R_z ve R_{3z} değerlerinde de artış olduğu görülmüştür.

- Aşınma bölgelerinde yüzey ortalama alansal pürüzlülük (S_a) değeri, maksimum tepe yüksekliği (S_p) ve en derin vadi derinliği (S_v) ölçülerinde de artış gözlemlenmiştir.
- Farklı giriş basıncı (P_1) değişimlerinde aynı süre zarfında kavitasyon erozyonuna maruz bırakılan MAB-CU4 numunelerinin aşınma merkezine yakın bölgelerde prob ile alınan yüzey pürüzlülük ölçümü sonuçları değerlendirildiğinde önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür.

6.3.2. Kavitasyon Erozyonu Sonrası Yüzey Morfolojisi Sonuçları

Çalışmada kavitasyon erozyonu ve işlem parametrelerinin yüzey morfolojisi üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konulmuştur.

- İncelemeler sonucunda, MAB-CU4 alaşımı numune yüzeyinde plastik deformasyon ve çatlak oluşumlarına bağlı hasarların meydana geldiği tespit edilmiş; yüzey morfolojisinde çok sayıda krater (oyuk), tepecik ve çukurcuk oluşumu gözlemlenmiştir.
- SEM dedektörleri ile elde edilen görüntüler sonucunda, kavitasyon etkisiyle tane içlerinin, tane sınırları altında kaldığı ve tane içlerinde kavitasyonun sebep olduğu çok sayıda krater gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, kavitasyon hasarının yoğun olduğu tane sınırına yakın bölgelerde derin çukurlar (pittingleşmeler) tespit edilmiştir.
- Yapıda tane içleri kavitasyon hasarına daha fazla maruz kalırken, daha dirençli olmalarına rağmen tane sınırlarında da hasarlı bölgelere rastlanmıştır.
- Çukur morfolojisinin karmaşık özellikleri, hidrodinamik mekanizmaların artan su jeti darbelerine bağlanmış olup, bahse konu bölgelerdeki çok sayıda kavitasyon baloncuklarının aynı noktada çökmesiyle oluşan, art arda içe doğru patlamalarla karakterize edilen çukurlar olarak tespit edilmiştir.
- Yüzey görselleri incelendiğinde, 90° kavitasyon hücum açısında kavitasyon erozyonunun daha geniş bir alana yayılmasından dolayı erozyon geçiş bölgesi bu açıda ortaya çıkmamıştır. Fakat 30° kavitasyon hücum açısında gerçekleştirilen testlerde, hasar deseninin asimetric bir yapı sergilediği ve numunenin alt ve üst kısımları arasında belirgin bir aşınma izi farkı olarak ortaya çıktığı SEM görüntüleri elde edilmiştir.

Bu çalışmanın bulguları özellikle kavitasyon hücum açısının MAB-CU4 alaşımlarının kavitasyon erozyonu davranışı üzerindeki etkisine ilişkin anlayışımızı geliştirmektedir. Spesifik olarak, çalışma, mikro ölçekte kavitasyon hücum açısının bir fonksiyonu olarak kavitasyon erozyon hasarının ve ilgili erozyon mekanizmalarının değişimini sağlamakta ve alaşımın kavitasyon davranışı-mikroyapısal özellikler ilişkisini ortaya koymaktadır. Bu durumlar, faz fraksiyonunu, tane boyutunu ve dağılımını değiştirerek kavitasyona erozyona dayanıklı alaşımlar oluşturmak için mikroyapısal bazlı stratejilerin uygulanmasına izin verebilmesine olanak sağlamıştır.

6.3.3. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Morfolojisi Sonuçları

Bilyalı dövme yöntemi sonrasında yüzeye çarpan yüksek kinetik enerjiye sahip paslanmaz çelik bilyalar MAB-CU4 alaşımı numune yüzey morfolojisinde önemli değişimler meydana getirmiştir. Bu değişimler sonucu oluşan plastik deformasyon malzeme yüzeyinde krater, tepe ve çukur bölgeleri oluşturmuştur. Bunun yanında bazı bölgelerde ise şekil oluşumlarının tamamlanamadığı (sınırlı bir deforme olabilirlik), bu nedenle de katlanma ve mikro boyutta çatlakların oluştuğu da görülmüştür. Ortaya çıkan bu modifikasyonlar sadece yüzey pürüzlülüğünde değişime yol açmakla kalmamış, aynı zamanda bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımı numunelerinin yüzey ve yüzey altı mikroyapısal ve mekanik özelliklerini de değiştirmiştir. Tüm bu değişiklikler de, MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyonu davranışını etkilemiştir.

6.3.4. Bilyalı Dövme İşlemi Uygulanmış Numunelerin Kavitasyon Erozyonu Sonrası Yüzey Morfolojisi Sonuçları

Bilyalı dövme işlemi uygulanmış MAB-CU4 alaşımının kavitasyon su jeti yöntemi ile erozyona uğratılıp ortaya çıkan morfolojik değişimlerin etkisi sonucunda yüzey morfolojilerinde önemli değişimlerin gerçekleştiği görülmüştür. Numune yüzeyine çarpan kavitasyon su jetleri plastik deformasyon sonucu yüzeyde görülen tepe ve çukur bölgelerinin oluşumuna neden olmuştur. Kavitasyon su jeti erozyonu işlemi sonrası numune yüzeyine püskürtülen kavitasyon su jetleri daha önce bilyalı dövme yöntemi ile yüzeyi sertleştirilmiş numune yüzeyine çarpınca daha dayanıklı bölgelere rastlamıştır. Elde edilen bu sertlik artışı nedeniyle giriş basıncının $P_1=150$ bar olduğu durumda

kavitasyon su jeti erozyonuna karşı dayanım kazanılmıştır. Bu durum artan giriş basıncı nedeniyle belli basınca kadar dayanım göstermiştir. Ancak $P_1=200$ bar giriş basıncı testleri sonrası bu dayanım ortadan kalkarak numune yüzeyinde ortaya çıkan hasarların artmasına neden olarak SEM görüntülerinde artan tepe, çukur ve krater olarak karşımıza çıkmıştır.

6.4. Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) alaşımlarının çalışma şartlarında kavitasyon erozyonu nedeniyle hasara uğradıkları ve bu nedenle kullanım ömürlerinin kısıtlandığı bilinmektedir. Gemi pervane malzemesi olarak kullanılan bu bakır alaşımı grubuna yönelik gerçekleştirilen sınırlı çalışmalarda, kavitasyon erozyonu davranışlarını iyileştirmek amacıyla kaplama, nitrürleme, çeşitli mekanik yüzey işlemleri, ısıl işlemler, boyama gibi farklı yüzey işleme teknikleri uygulanmaktadır. Ancak, literatürde aşınma davranışlarını geliştirmek için yaygın olarak kullanılan bilyalı dövme yönteminin MAB-CU4 gemi pervane alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkilerini geliştirmeye yönelik çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Bu kapsamda, tez çalışması için özgün olarak tasarlanan ve imal edilen kavitasyon su jeti test düzeneği kullanılarak farklı kavitasyon erozyonu parametrelerinde aşınmaya maruz bırakılan MAB-CU4 alaşımı numunelerinin işlem parametrelerine bağlı erozif aşınma değişimleri anlaşılır bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca, MAB-CU4 alaşımının bilyalı dövme yöntemi sonrası kavitasyon erozyonu aşınma davranışı, değişen yüzey ve yüzey altı özellikleri ışığında mikroyapısal düzeyde ele alınmıştır. Bu çalışmalar ile çok sayıda endüstriyel ve akademik çıktıya ulaşılması hedeflenmiştir.

Akademik anlamda mevcut çalışma için, MAB-CU4 alaşımının bilyalı dövme yöntemi ile işlenmesi ve kavitasyon su jeti yöntemi ile aşınmaya uğratılması sonucunda malzemelerin değişen yüzey ve yüzey altı özellikleri ile bu işlemlerin malzemenin erozif aşınma davranışına etkileri konularında birçok ulusal ve uluslararası bildiriler ile SCI indeksli yayınlar hedeflenmiştir. Tez çalışması sürecinde de, bu çalışmaların bazıları literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca tez çalışması farklı alanlarda çalışan akademisyenlerin uzmanlıklarını bir araya getirerek disiplinler arası bilimin gerçekleşmesine de olanak sağlamıştır.

Tez çalışmasıyla endüstriyel uygulamalar için bilyalı dövme yöntemi ile gemi pervanesi alaşımının kavitasyon erozyonu direncinin artırılması, mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi konularında teknolojik çalışmalara doğrudan katkıda bulunulmuştur. Bu sayede kavitasyon olayının neden olduğu gürültü, titreşim, performans kaybı ve malzeme hasarının azaltılması ile deniz araçlarının ekonomik ömürlerinin artması sağlanabilecektir. Ayrıca gemi pervanesi bakır alaşımının bilyalı dövme şartlarında özelliklerinin geliştirilmesi ve kavitasyon erozyonuna karşı malzemenin gösterdiği özellik ilişkisinin ortaya çıkarılması sayesinde bilyalı dövmenin uygulandığı farklı malzeme sistemleri için de teknolojik ve endüstriyel çalışmalara altyapı oluşturulması sağlanabilir.

Sonuç olarak çalışma, bilyalı dövme yönteminin, gemi pervanesi MAB-CU4 alaşımının kavitasyon erozyon davranışı üzerindeki etkisini inceleyerek yüzey pürüzlülüğü, topografya, morfoloji, mikroyapı ve sertlik gibi değiştirilmiş yüzey ve yüzey altı özelliklerini aydınlatan öncü çalışmaların başını çekmiştir. Bu bulgular, yüzey mühendisliği ve erozyon araştırmalarına katkıda bulunmaya hazır olup, kavitasyon erozyonu davranışının çok önemli olduğu durumlarda bilyalı dövmenin daha güvenli ve daha yenilikçi uygulamasına yönelik içgörüler sunmaktadır. Dolayısıyla pervaneler, pompalar ve türbin kanatları gibi kavitasyona maruz kalan yeni malzemelerin, özellikle de yüksek tork gereksinimleri olan savaş gemisi pervane gruplarının tasarımına yardımcı olacaktır. Diğer yandan uygulama ile meydana gelebilecek olumsuzluklar da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda bilyalı dövme işleminin kavitasyon erozyonu performansı üzerindeki etkilerini daha da açıklığa kavuşturmak için farklı kavitasyon erozyonu ve bilyalı dövme parametrelerini (farklı süre, basınç, mesafe vb.) gelişmiş karakterizasyon tekniklerini (hızlı kamera, geçirimli elektron mikroskobu vb.) de içeren daha kapsamlı analizler ve deniz suyu akışkanı da kullanılarak yapılması önerilmektedir. Gelecek çalışmalar için de deniz koşullarında çalışan farklı gemi pervane malzemelerinin de bilyalı dövme yöntemi veya farklı kaplama türleri sonrası tribolojik davranışları, korozyon ve oksidasyon özelliklerinin araştırılması konularının da yüksek bütçeli projeler ve uzun süreli çalışmalar ile gerçekleştirilmesi önerilmekte ve planlanmaktadır. Böylece devam edecek yeni projeler ve bilimsel çalışmaların hayata geçirilmesi sayesinde ortaya çıkarılmış tez çalışmasının sürdürülebilir olmasına fayda sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- Al-Fadhalah, K. J., Alyazidi, M. K., Rafiq, M. (2019). Effect of Microstructure Refinement on Hardness Homogeneity of Aluminum Alloy 1100 Processed by Accumulative Roll Bonding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 4693-4706.
- Altenberger, I. (2003). Alternative Mechanical Surface Treatments: Microstructures, Residual Stresses & Fatigue Behavior. *Shot Peening*, 419-434.
- Alyani, A., Kazeminezhad, M. (2021). Annealing Behavior of Aluminum after Low-Temperature Severe Plastic Deformation. *Materials Science and Engineering: A*, 824, 141810.
- Annual Book of ASTM Standards. (2010). *Standard Test Method for Erosion for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*. (G32-10). ABD.
- Annual Book of ASTM Standards. (2010). *Standard Test Method for Erosion of Solid Materials by Cavitating Liquid Jet*. (G134-95). ABD.
- Aslantas, K., Ekici, E., Çiçek, A. (2018). Optimization of Process Parameters for Micro Milling of Ti-6Al-4V Alloy Using Taguchi-Based Gray Relational Analysis. *Measurement*, 128, 419-427.
- Avcu, E., Abakay, E., Yıldırım Avcu, Y., Çalım, E., Gökalp, İ., Iakovakis, E., Guney, M. (2023). Corrosion Behavior of Shot-Peened Ti6Al4V Alloy Produced via Pressure-Assisted Sintering. *Coatings*, 13(12), 2036.
- Avcu, Y. Y., Iakovakis, E., Guney, M., Çalım, E., Özkılınç, A., Abakay, E., Avcu, E. (2023). Surface and Tribological Properties of Powder Metallurgical Cp-Ti Titanium Alloy Modified by Shot Peening. *Coatings*, 13(1), 89.
- Avcu, Y. Y., Yetik, O., Guney, M., Sınmazçelik, T., Avcu, E. (2021). Tailoring Surface Morphology and Topography of Shot-Peened Ti6Al4V via Grit Blasting. *Materials and Technology*, 55(5), 625-628.
- Bazhenov, V. E., Titov, A. Y., Shkalei, I. V., Sannikov, A. V., Nikitina, A. A., Plisetskaya, I. V., Koltygin, A. V. (2021). Effect of the Cooling Rate on the Microstructure and Properties of C92900 Bronze. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 62, 274-285.
- Benedetti, M., Fontanari, V., Bandini, M., Savio, E. (2015). High-and Very High-Cycle Plain Fatigue Resistance of Shot Peened High-Strength Aluminum Alloys: The Role of Surface Morphology. *International Journal of Fatigue*, 70, 451-462.
- Blake, J. R., Gibson, D. C. (1981). Growth and Collapse of a Vapour Cavity Near a Free Surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 111, 123-140.

- Brayshaw, W. J., Roy, M. J., Sun, T., Akrivos, V., Sherry, A. H. (2017). Iterative Mesh-Based Hardness Mapping. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(5), 404-411.
- Brdička, M., Samek, L., Taraba, O. (1981). *Kavitace-Diagnostika a Technické Využití*. Praha: SNTL.
- Carlton, J. (2012). *Marine Propellers and Propulsion (3rd ed.)*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Chamgordani, S. A., Miresmaeili, R., Aliofkhazraei, M. (2018). Improvement in Tribological Behavior of Commercial Pure Titanium (CP-Ti) by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT). *Tribology International*, 119, 744-752.
- Chen, C., Zhang, H. (2021). Characteristics of Friction and Wear of Al-Zn-Mg-Cu Alloy after Application of Ultrasonic Shot Peening Technology. 423, 127615.
- Chen, H. S., Wang, J. D., Li, Y. J., Chen, D. R. (2008). Effect of Hydrodynamic Pressures Near Solid Surfaces in the Incubation Stage of Cavitation Erosion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 222(4), 523-531.
- Choi, J. K., Jayaprakash, A., Chahine, G. L. (2012). Scaling of Cavitation Erosion Progression with Cavitation Intensity and Cavitation Source. *Wear*, 278, 53-61.
- Dudina, D. V., Grigoreva, T. F., Kvashnin, V. I., Devyatkina, E. T., Vosmerikov, S. V., Ukhina, A. V., Lyakhov, N. Z. (2022). Microstructure and Properties of Cu-10 Wt% Al Bronze Obtained By High-Energy Mechanical Milling and Spark Plasma Sintering. *Materials Letters*, 312, 131671.
- Dular, M. (2016). Hydrodynamic Cavitation Damage in Water at Elevated Temperatures. *Wear*, 346, 78-86.
- Dular, M., Petkovšek, M. (2015). On the Mechanisms of Cavitation Erosion–Coupling High Speed Videos to Damage Patterns. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68, 359-370.
- Dular, M., Stoffel, B., Širok, B. (2006). Development of a Cavitation Erosion Model. *Wear*, 261(5-6), 642-655.
- Eivani, A. R., Rahimi, F. (2019). Inhomogeneity in Deformation, Microstructure, Tensile Properties and Damage Development in AA1050 during Multiple Cycles of Pure Shear Extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 745, 159-167.
- Ekinci, S. (2007). Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kavitasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 201207.

- Ferreira, N., Jesus, J. S., Ferreira, J. A., Capela, C., Costa, J. M., Batista, A. C. (2020). Effect of Bead Characteristics on The Fatigue Life of Shot Peened Al 7475-T7351 Specimens. *International Journal of Fatigue*, 134, 105521.
- Fonlupt, S., Bayle, B., Delafosse, D., Heuze, J. L. (2005). Role of Second Phases in The Stress Corrosion Cracking of A Nickel-Aluminum Bronze in Saline Water. *Corrosion Science*, 47(11), 2792-2806.
- Franc, J. P., Michel, J. M. (2006). *Fundamentals of Cavitation* (Cilt 76). Boston: Springer Science & Business Media.
- Fuller, M. D., Swaminathan, S., Zhilyaev, A. P., McNelley, T. R. (2007). Microstructural Transformations and Mechanical Properties of Cast NiAl Bronze: Effects of Fusion Welding and Friction Stir Processing. *Materials Science and Engineering: A*, 463(1-2), 128-137.
- Ganesh, B. K., Sha, W., Ramanaiah, N., Krishnaiah, A. (2014). Effect of Shotpeening on Sliding Wear and Tensile Behavior of Titanium Implant Alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 480-486.
- Gariépy, A., Bridier, F., Hoseini, M., Bocher, P., Perron, C., Lévesque, M. (2013). Experimental and Numerical Investigation of Material Heterogeneity in Shot Peened Aluminium Alloy AA2024-T351. *Surface and Coatings Technology*, 219, 15-30.
- Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft. (2009). *Rules for Classification and Construction, Materials and Welding*. Hamburg.
- Gonzalez-Avila, S. R., Nguyen, D. M., Arunachalam, S., Domingues, E. M., Mishra, H., Ohl, C. D. (2020). Mitigating Cavitation Erosion Using Biomimetic Gas-Entrapping Microtextured Surfaces (GEMS). *Science Advances*, 6(13), 1-10.
- Guo, C., Hu, B., Wei, B., Chen, F. (2022). Wire Arc Additive Manufactured CuMn13Al7 High-Manganese Aluminium Bronze. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 110.
- Hammit, F. G. (1963). Observations on Cavitation Damage in a Flowing System. *Journal of Basic Engineering*, 85(3), 347-356.
- Hammit, F. G. (1980). *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*. New York: McGraw-Hill International Book Co.
- Han, M. S., Hyun, K. Y., Kim, S. J. (2013). Effects of Shot Peening Time on Microstructure and Electrochemical Characteristics for Cu Alloy. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(5), 545-551.
- Han, M. S., Im, M. H., Kim, S. J. (2014). Effects of Shot Peening Projection Pressure on Electrochemical Characteristics of ALBC3 Alloy in Seawater. *Journal of the Korean Institute of Surface Engineering*, 47(1), 25-32.

- Han, M. S., Jang, S. K., Kim, J. S., Kim, S. J. (2013). Evaluation on Cavitation Damage in Sea Water with Shot Peening Stand-off Distance for ALBC3 Alloy. *Corrosion Science and Technology*, 12(5), 239-244.
- Handbook, A. S. (2004). Metallography and Microstructures. *Edited by GF Vander Voort, ASM International*, 9.
- Hasan, F., Jahanafrooz, A., Lorimer, G. W., Ridley, N. (1982). The Morphology, Crystallography and Chemistry of Phases in As-Cast Nickel-Aluminum Bronze. *Metallurgical Transactions A*, 13(8), 1337-1345.
- Hattori, S., Hirose, T., Sugiyama, K. (2010). Prediction Method for Cavitation Erosion Based on Measurement of Bubble Collapse Impact Loads. *Wear*, 269(7-8), 507-514.
- Hutli, E. A., Nedeljkovic, M. S., Radovic, N. A. (2013). Nano-and Micro-Scale Surface Modification of FCC Metal Using High Submerged Cavitating Water Jet. *Plasmonics*, 8, 843-849.
- Hutli, E., Abouali, S., Hucine, B., Mansour, M., Nedeljković, M., Ilić, V. (2013). Influence of Hydrodynamic Conditions and Nozzle Geometry on Appearance of High Submerged Cavitating Jets. *Thermal Science*, 17(4), 1139-1149.
- Hutli, E., Nedeljkovic, M. S., Bonyár, A., Légrády, D. (2017). Experimental Study on the Influence of Geometrical Parameters on The Cavitation Erosion Characteristics of High Speed Submerged Jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80, 281-292.
- Hutli, E., Nedeljkovic, M., Bonyar, A. (2018). Cavitating Flow Characteristics, Cavity Potential and Kinetic Energy, Void Fraction and Geometrical Parameters- Analytical and Theoretical Study Validated by Experimental Investigations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 873-886.
- Iakovakis, E., Avcu, E., Roy, M. J., Gee, M., Matthews, A. (2022). Wear Resistance of an Additively Manufactured High-Carbon Martensitic Stainless Steel. *Scientific Reports*, 12(1), 12554.
- Iqbal, J., Hasan, F., Ahmad, F. (2006). Characterization of Phases in an As-Cast Copper-Manganese-Aluminum Alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, 22(6), 779-784.
- Iwai, Y., Okada, T., Tanaka, S. (1989). A Study of Cavitation Bubble Collapse Pressure and Erosion Part2: Estimation of Erosion From The Distribution of Bubble Collapse Pressures. *Wear*, 133(2), 233-243.
- Jahanafrooz, A., Hasan, F., Lorimer, G. W., Ridley, N. (1983). Microstructural Development in Complex Nickel-Aluminum Bronzes. *Metallurgical Transactions A*, 14, 1951-1956.

- Jayaprakash, A., Choi, J. K., Chahine, G. L., Martin, F., Donnelly, M., Franc, J. P., Karimi, A. (2012). Scaling Study of Cavitation Pitting from Cavitating Jets and Ultrasonic Horns. *Wear*, 296(1-2), 619-629.
- Jin, K., Qiao, Z., Zhu, S., Cheng, J. (2016). Synthesis Effects of Cr and Ag on the Tribological Properties of Cu-9Al-5Ni-4Fe-Mn Bronze Under Seawater Condition. *Tribology International*, 101, 69-80.
- Kalyon, A., Özcan, M. T. (2019). Experimental Investigation of the Machinability of Coldie Cold Work Tool Steel. *Acta Physica Polonica, A*, 135(4).
- Kaya, M. (2020). Radyal Pompaların Kaviteasyon Performansının Hesaplanması ve İyileştirilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 619649.
- Kazama, T., Kumagai, K., Osafune, Y., Narita, Y., Ryu, S. (2015). Erosion of Grooved Surfaces by Cavitating Jet with Hydraulic Oil. *Journal of Flow Control Measurement & Visualization*, 3(02), 41-50.
- Kim, K. H., Chahine, G., Franc, J. P., Karimi, A. (Dü). (2014). *Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction*, (Cilt 106). New York: Springer.
- Korobov, Y., Alwan, H., Soboleva, N., Makarov, A., Lezhnin, N., Shumyakov, V., Deviatarov, M. (2022). Cavitation Resistance of WC-10Co4Cr and WC-20CrC-7Ni HVOF Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1-13.
- Kulekci, M. K., Esme, U. (2014). Critical Analysis of Processes and Apparatus for Industrial Surface Peening Technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 1551-1565.
- Kumagai, M., Akita, K., Itano, Y., Imafuku, M., Ohya, S. I. (2013). X-Ray Diffraction Study on Microstructures of Shot/Laser-Peened AISI316 Stainless Steel. *Journal of Nuclear Materials*, 443(1-3), 107-111.
- Kumar, D., Idapalapati, S., Wang, W., Narasimalu, S. (2019). Effect of Surface Mechanical Treatments on the Microstructure-Property-Performance of Engineering Alloys. *Materials*, 12(16), 2503.
- Kumar, K. K., Choudhury, S. K. (2008). Investigation of Tool Wear and Cutting Force in Cryogenic Machining Using Design of Experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1-3), 95-101.
- Kumar, R. K., Seetharama, S., Kamaraj, M. (2014). Quantitative Evaluation of 3D Surface Roughness Parameters During Cavitation Exposure of 16Cr-5Ni Hydro Turbine Steel. *Wear*, 320, 16-24.
- Łabanowski, J., Olkowski, T. (2009). Effect of Chemical Composition and Microstructure on Mechanical Properties of BA1055 Bronze Sand Casting. *Advances in Materials Science*, 9(1), 23-29.

- Laguna-Camacho, J. R., Lewis, R., Vite-Torres, M., Mendez-Mendez, J. V. (2013). A Study of Cavitation Erosion on Engineering Materials. *Wear*, 301(1-2), 467-476.
- Li, D., Kang, Y., Wang, X., Ding, X., Fang, Z. (2016). Effects of Nozzle Inner Surface Roughness on The Cavitation Erosion Characteristics of High Speed Submerged Jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 444-452.
- Li, Z. (2012). Assessment of Cavitation Erosion with a Multiphase Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method. Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy, Delft University of Technology.
- Lichtarowicz, A. (1972). Use of a Simple Cavitating Nozzle for Cavitation Erosion Testing and Cutting. *Nature Physical Science*, 239(91), 63-64.
- Lichtarowicz, A. (1979). Cavitating Jet Apparatus for Cavitation Erosion Testing. 664.
- Lin, Y. C., Jiang, Y. Q., Chen, X. M., Wen, D. X., Zhou, H. M. (2013). Effect of Creep-Aging on Precipitates of 7075 Aluminum Alloy . *Materials Science and Engineering: A*, 588, 347-356.
- Liu, H., Wei, Y., Tan, C. K., Ardi, D. T., Tan, D. C., Lee, C. J. (2020). XRD and EBSD Studies of Severe Shot Peening Induced Martensite Transformation and Grain Refinements in Austenitic Stainless Steel. *Materials Characterization*, 168, 110574.
- Lv, Y., Zhao, B., Zhang, H., Su, C., Nie, B., Wang, R., Lyu, F. (2019). Improving Corrosion Resistance Properties of Nickel-Aluminum Bronze (NAB) Alloys via Shot Peening Treatment. *Materials Transactions*, 60(8), 1629-1637.
- Ma, X., Chen, z., Lu, W., Xiao, L. (2021). Continuous Multi-Cycle Nanoindentation Behavior of a Gradient Nanostructured Metastable β Titanium Alloy Fabricated by Rotationally Accelerated Shot Peening. *Materials Science and Engineering: A*, 799, 140370.
- Maawad, E. K. (2013). Residual Stress Analysis and Fatigue Behavior of Mechanically Surface Treated Titanium Alloys. Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy, University of Clausthal, Clausthal.
- Maleki, E., Unal, O., Amanov, A. (2018). Novel Experimental Methods for The Determination of The Boundaries Between Conventional, Severe and Over Shot Peening Processes . *Surfaces and Interfaces*, 13, 233-254.
- March, P. A. (1987). Evaluating The Relative Resistance of Materials to Cavitation Erosion: A Comparison of Cavitating Jet Results and Vibratory Results. *In ASME Cavitation and Multiphase Flow Forum, Cincinnati*, 14-17.
- Meigh, H. (2018). Cast and Wrought Aluminium Bronzes: Properties, Processes and Structure. *CRC Press*.

- Mhaede, M. (2012). Influence of Surface Treatments on Surface Layer Properties, Fatigue and Corrosion Fatigue Performance of AA7075 T73. *Materials & Design*, 41, 61-66.
- Miao, H. Y. (2010). Numerical and Theoretical Study of Shot Peening and Stress Peen Forming Process. Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy, University of Montreal, Montreal.
- Mitrovic, S., Adamovic, D., Zivic, F., Dzunic, D., Pantic, M. (2014). Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 Alloyed Steels under Dry and Lubricated Contact Conditions. 290, 223-232.
- Mohammadi, A., Enikeev, N. A., Murashkin, M. Y., Arita, M., Edalati, K. (2021). Examination of Inverse Hall-Petch Relation In Nanostructured Aluminum Alloys by Ultra-Severe Plastic Deformation. *Journal of Materials Science & Technology*, 91, 78-89.
- Momma, T. (1991). Cavitation Loading and Erosion Produced by A Cavitating Jet. Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy, University of Nottingham, Nottingham.
- Momma, T., Lichtarowicz, A. (1995). A Study of Pressures and Erosion Produced by Collapsing Cavitation. 186, 425-436.
- Mota, N. M., Tavares, S. M., Do Nascimento, A. M., Zeeman, G., Biezma-Moraleda, M. V. (2021). Failure Analysis of a Butterfly Valve Made with Nickel Aluminum Bronze (NAB) and Manganese Aluminum Bronze (MAB). *Engineering Failure Analysis*, 129, 105732.
- Nagalingama, A. P., Yeo, S. H. (2018). Controlled Hydrodynamic Cavitation Erosion with Abrasive Particles for Internal Surface Modification of Additive Manufactured Components. *Wear*, 414, 89-100.
- Nas, E., Öztürk, B. (2018). Optimization of Surface Roughness via The Taguchi Method and Investigation of Energy Consumption when Milling Spheroidal Graphite Cast Iron Materials. *Materials Testing*, 60(5), 519-525.
- Naseri, M., Reihanian, M., Borhani, E. (2016). Effect of Strain Path on Microstructure, Deformation Texture and Mechanical Properties of Nano/Ultrafine Grained AA1050 Processed by Accumulative Roll Bonding (ARB). *Materials Science and Engineering: A*, 673, 288-298.
- Ni, D. R., Xue, P., Wang, D., Xiao, B. L., Ma, Z. Y. (2009). Inhomogeneous Micro-Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Processed Ni-Al Bronze. *Materials Science And Engineering: A*, 524(1-2), 119-128.
- Öztürk, S., Sünbül, S. E., Metoğlu, A., Kürşat, İ. (2020). Improvement of Microstructure, Tribology and Corrosion Characteristics of Nickel-Aluminum Bronze by P/M Method. *Tribology International*, 151, 106519.

- Park, I. C. (2021). Influence of Shot Peening on Cavitation Erosion Resistance of Gray Cast Iron. *Corrosion Science and Technology*, 20(3), 143-151.
- Park, I. C., Han, M. S., Kim, S. J. (2019). Cavitation Damage Characteristics of Shot Peened ALBC3 Alloy. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(2), 1111-1113.
- Park, I., Kim, A. (2019). Cavitation Erosion Behavior in Seawater of Electroless Ni-P Coating and Process Optimization Using Taguchi Method. *Applied Surface Science*, 477, 37-43.
- Park, S. H. (1996). Robust Design and Analysis for Quality Engineering. *Springer*.
- Patellaa, R. F., Reboud, J. L., Archer, A. (2000). Cavitation Damage Measurement by 3D Laser Profilometry. *Wear*, 246(1-2), 59-67.
- Peng, C., Tian, S., Li, G. (2018). Joint Experiments of Cavitation Jet: High-Speed Visualization and Erosion Test. *Ocean Engineering*, 149, 1-13.
- Petkovšek, M., Dular, M. (2013). Simultaneous Observation of Cavitation Structures and Cavitation Erosion. *Wear*, 300(1-2), 55-64.
- Phadke, M. S. (1995). Quality Engineering Using Robust Design. *Prentice Hall PTR*.
- Philipp, A., Lauterborn, W. (1998). Cavitation Erosion by Single Laser-Produced Bubbles. *Journal of Fluid Mechanics*, 361, 75-116.
- Pour-Ali, S., Kiani-Rashid, A. R., Babakhani, A., Virtanen, S., Allieta, M. (2018). Correlation Between The Surface Coverage of Severe Shot Peening and Surface Microstructural Evolutions in AISI 321: A TEM, FE-SEM and GI-XRD Study. *Surface and Coatings Technology*, 334, 461-470.
- Punburi, P., Tareelap, N., Srisukhumbowornchai, N., Euaruksakul, C., Yordsri, V. (2018). Correlation Between Electron Work Functions of Multiphase Cu-8Mn-8Al and De-Alloying Corrosion. *Applied Surface Science*, 439, 1040-1046.
- Ramos, R., Ferreira, N., Ferreira, J. A., Capela, C., Batista, A. C. (2016). Improvement in Fatigue Life of Al 7475-T7351 Alloy Specimens By Applying Ultrasonic and Microshot Peening. *International Journal of Fatigue*, 92, 87-95.
- Richardson, I. (2016). *Guide to Nickel Aluminium Bronze for Engineers*. Copper Development Association Publication.
- Rousseau, T., Nougier-Lehon, C., Gilles, P., Hoc, T. (2018). Finite Element Multi-Impact Simulations Using a Crystal Plasticity Law Based on Dislocation Dynamics. *International Journal of Plasticity*, 101, 42-57.
- Sahoo, P. (2009). Wear behaviour of electroless Ni-P coatings and optimization of process parameters using Taguchi method. *Materials & Design*, 30, 1341-1349.

- Sasaki, H., Takeo, F., Soyama, H. (2020). Cavitation Erosion Resistance of The Titanium Alloy Ti-6Al-4V Manufactured through Additive Manufacturing with Various Peening Methods. *Wear*, 462, 203518.
- Savaşkan, M. (2003). Deney Tasarımı Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Kullanımı ile İnce Sert Seramik Kaplı Matkap Uçlarının Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 143067.
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. (2004). Deney Tasarımı Yöntemi ile Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu. *itiüdergisi/d*, 3(6), 117-128.
- Schulze, V. (2006). *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects*. Weinheim: John Wiley & Sons.
- Song, Q. N., Xu, N., Bao, Y. F., Jiang, Y. F., Gu, W., Zheng, Y. G., Qiao, Y. X. (2017). Corrosion and Cavitation Erosion Behaviors of Two Marine Propeller Materials in Clean and Sulfide-Polluted 3.5% NaCl Solutions. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 30, 712-720.
- Song, Q. N., Zheng, Y. G., Ni, D. R., Ma, Z. Y. (2015). Studies on The Nobility of Phases Using Scanning Kelvin Probe Microscopy and its Relationship with Corrosion Behaviour in Chloride Media For As-Cast And Friction-Stir Processed Ni-Al Bronze in Chloride Media. *Corrosion Science*, 92, 95-103.
- Soyama, H. (2005). Distribution of Residual Stress around Plastic Deformation Pit Induced by Cavitation Shotless Peening. *Japan Society of Mechanical Engineers No: 05-9 Proceedings of the M&M2005 Strength of Materials Conference*. Fukuoka City, 4-6 November 2005.
- Soyama, H. (2011). Enhancing the Aggressive Intensity of a Cavitating Jet by Means of the Nozzle Outlet Geometry. *Journal of Fluids Engineering*, 133(10).
- Soyama, H. (2013). Effect of Nozzle Geometry on A Standard Cavitation Erosion Test Using A Cavitating Jet. *Wear*, 297(1-2), 895-902.
- Soyama, H. (2015). Surface Mechanics Design of Metallic Materials on Mechanical Surface Treatments. *Mechanical Engineering Reviews*, 2(1), 14-00192.
- Soyama, H. (2020). Cavitation Peening: A Review. *Metals*, 10(2), 270.
- Soyama, H., Asahara, M. (1999). Improvement of The Corrosion Resistance of A Carbon Steel Surface by A Cavitating Jet. *Journal of Materials Science Letters*, 18(23), 1953-1955.
- Soyama, H., Futakawa, M. (2004). Estimation of Incubation Time of Cavitation Erosion for Various Cavitating Conditions. *Tribology Letters*, 17, 27-30.

- Soyama, H., Kumano, H. (2002). The Fundamental Threshold Level-A New Parameter for Predicting Cavitation Erosion Resistance. *Journal of Testing and Evaluation*, 30(5), 421-431.
- Soyama, H., Sekine, Y. (2010). Sustainable Surface Modification Using Cavitation Impact for Enhancing Fatigue Strength Demonstrated by A Power Circulating-Type Gear Tester. *International Journal of Sustainable Engineering*, 3(1), 25-32.
- Soyama, H., Nagasaka, K., Takakuwa, O., Naito, A. (2012). Optimum Injection Pressure of a Cavitating Jet for Introducing Compressive Residual Stress into Stainless Steel. *Journal of Power and Energy Systems*, 6(2), 63-75.
- Sreedhar, B. K., Albert, S. K., Pandit, A. B. (2017). Cavitation Damage:Theory and Measurements–A Review. *Wear*, 372, 177-196.
- Standard Specification for Aluminum-Bronze Sand Castings. (2018). *ASTM International West Conshohocken*. USA.
- Sun, Y. (2013). Sliding Wear Behaviour of Surface Mechanical Attrition Treated AISI 304 Stainless Steel. *Tribology International*, 57, 67-75.
- Tini, S. C., Zeren, A. (2019). Tipik Bir Korvet Savaş Gemisi Gövde Kapağının Eş Zamanlı Mühendislik Yöntemi ile Montaja ve Bakıma Uygun Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 575308.
- Trško, L., Bokůvka, O., Nový, F., Guagliano, M. (2014). Effect of Severe Shot Peening on Ultra-High-Cycle Fatigue of A Low-Alloy Steel. *Materials & Design*, 57, 103-113.
- Tukker, J., Kuiper, G. (2004). High-Speed Video Observations and Erosive Cavitation. *In Proceedings of 9th Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures*, Wageningen.
- Umemoto, M., Todaka, Y., Tsuchiya, K. (2003). Formation of Nanocrystalline Structure in Steels by Air Blast Shot Peening. *Materials Transactions*, 44(7), 1488-1493.
- Unal, O., Karaoglanli, A. C., Ozgurluk, Y., Doleker, K. M., Maleki, E., Varol, R. (2019). Wear Behavior of Severe Shot Peened and Thermally Oxidized Commercially Pure Titanium. *Engineering Design Applications*, 461-470.
- Usta, O. (2018). Gemi Pervanelerinde Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu Modellemesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 517179.
- Utyaganova, V. R., Chumaevskii, A. V., Shamarin, N. N., Moskvichev, E. N., Vorontsov, A. V., Gurianov, D. A., Savchenko, N. L. (2023). Regularities of Structure Formation and Properties of Composite Materials Based on Aluminum–Manganese Bronze Produced by Electron Beam Additive Manufacturing with the Addition of Iron, Nickel, and Tungsten Powders During Printing. *Russian Physics Journal*, 65, 1584–1591.

- Van Steenkiste, T. H., Smith, J. R., Teets, R. E. (2002). Aluminum Coatings via Kinetic Spray with Relatively Large Powder Particle. *Surface and Coatings Technology*, 154(2-3), 237-252.
- Wang, H., Yuan, X., Wu, K., Xu, C., Jiao, Y., Wang, G., Luo, J. (2018). Effect of High Energy Shot-Peening on The Microstructure and Mechanical Properties of Al5052/Ti6Al4V Lap Joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 255, 76-85.
- Wang, Z., Luan, W., Huang, J., Jiang, C. (2011). XRD Investigation of Microstructure Strengthening Mechanism of Shot Peening on Laser Hardened 17-4PH. *Materials Science and Engineering: A*, 528(21), 6417-6425.
- Xie, L., Jiang, C., Lu, W. (2013). The Influence of Shot Peening on The Surface Properties of (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V. *Applied Surface Science*, 280, 981-988.
- Xu, X., Lv, Y., Hu, M., Xiong, D., Zhang, L., Wang, L., Lu, W. (2016). Influence of Second Phases on Fatigue Crack Growth Behavior of Nickel Aluminum Bronze. *International Journal of Fatigue*, 82, 579-587.
- Y Avcu, Y. (2019). Ti6Al4V Titanyum Alaşımın Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 575805.
- Yamaguch, A., Shimizu, S. (1987). Erosion Due to Impingement of Cavitating Jet.
- Yao, T., Qining, S., Huilin, L., Nan, X., Yefeng, B., Genyuan, Z., Lijuan, Z. (2021). A Comparative Assessment on Cavitation Erosion Behavior of Typical Copper Alloys Used for Ship Propeller. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 41(5), 639-645.
- Yıldıran Avcu, Y., Gönül, B., Yetik, O., Sönmez, F., Cengiz, A., Guney, M., Avcu, E. (2021). Modification of Surface and Subsurface Properties of AA1050 Alloy by Shot Peening. *Materials*, 14(21), 6575.
- Yıldıran Avcu, Y., Yetik, O., Guney, M., Iakovakis, E., Sınmazçelik, T., Avcu, E. (2020). Surface, Subsurface and Tribological Properties of Ti6Al4V Alloy Shot Peened Under Different Parameters. *Materials*, 13(19), 4363.
- Yin, T. Y., Zhang, S., Zhou, F. Q., Huo, R. J., Zhang, C. H., Chen, J. (2022). Effects of Heat Treatment on Microstructure and Wear Behavior of Modified Aluminum Bronze Coatings Fabricated by Laser Cladding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(6), 4294-4304.
- Yu-Kang, Z., Hammitt, F. G. (1983). Cavitation Erosion Incubation Period. *Wear*, 86(2), 299-313.
- Žagar, S., Grum, J. (2014). Surface Modification Analysis after Shot Peening of AA 7075 in Different States. *Materials Science Forum*. 768, 519-525. Trans Tech Publications Ltd.

- Zhan, K., Wu, Y., Li, J., Zhao, B., Yan, Y., Xie, L., Wang, L. (2018). Investigation on Surface Layer Characteristics of Shot Peened Graphene Reinforced Al Composite by X-Ray Diffraction Method. *Applied Surface Science*, 435, 1257-1264.
- Zhang, C., Fu, T., Chen, H., Gao, Y. (2021). Microstructure Evolution of Surface Gradient Nanocrystalline by Shot Peening of TA17 Titanium Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52, 1790-1798.
- Zhao, B., Lv, Y., Ding, Y., Wang, L., Lu, W. (2018). The Grain Refinement Mechanisms of Various Phases in Shot-Peened Nickel-Aluminum Bronze (NAB) Alloy. *Materials Characterization*, 144, 77-85.
- Zhu, L., Guan, Y., Lin, J., Zhai, J., Xie, Z. (2018). A Nanocrystalline-Amorphous Mixed Layer Obtained by Ultrasonic Shot Peening on Pure Titanium at Room Temperature. *Ultrason Sonochemistry*, 47, 68-74.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Tini, S. C.,** Kılavuz, İ. (2012). Bir Pergel Vincin Tasarımı ve Sonlu Elamanlar Metoduyla Gerilme Analizi. *Kalıp Dünyası*, 78, 110-114.
- Tini, S. C.,** Zeren, A. (2019). Tipik Bir Korvet Savaş Gemisi Gövde Kapağının Eş Zamanlı Mühendislik Yöntemi ile Montaja ve Bakıma Uygun Tasarımı, 4. *Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 23-24 Nisan 2019.
- Tini, S. C.,** Zeren, A. (2019). Tipik Bir Korvet Savaş Gemisi Gövde Kapağının Eş Zamanlı Mühendislik Yöntemi ile Montaja ve Bakıma Uygun Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 575308.
- Tini, S. C.,** Zeren, A. (2020). Tersine Mühendislik Yönteminde 3 Boyutlu Tarama, Ölçüm, ve Modelleme Süreçleri, 6. *Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 17-18 Aralık 2020.
- Tini, S. C.,** Zeren, A., Yıldırım, Y., Avcu, E. (2022). Kaviteasyon Erozyonu Test Cihazı Tasarımı ve Uygulaması, 5. *Uluslararası Fen Bilimler ve İnovasyon Kongresi* Ankara, Türkiye, 11-12 Kasım 2022.
- Tini, S. C.,** Zeren, A., Yıldırım, Y., Avcu, E. (2022). Manganez Alüminyum Bronz (MAB-CU4) Alaşımının Kaviteasyon Erozyonu Davranışına Etki Eden Parametrelerin Taguchi deney tasarımı ile İncelenmesi, 4. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 24-25 Aralık 2022.
- Tini, S. C.,** Zeren, A., Yıldırım, Y., Abakay, E., Avcu, E. (2023). Manganez Alüminyum Bronz Alaşımlarının Kaviteasyon Erozyonu Davranışına Kaviteasyon Hücum Açısının Etkisinin Optik Profilometre ile İncelenmesi, 2nd *International Conference on Innovative Academic Studies*, Konya, Türkiye, 28-31 Ocak 2023.
- Tini, S. C.,** Zeren, A., Yıldırım, Y., Abakay, E., Avcu, E. (2023). Farklı Kaviteasyon Hücum Açılarında Aşındırılan Manganez Alüminyum Bronz Alaşımının Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi, 6. *Uluslararası Fen Bilimler ve İnovasyon Kongresi*, Ankara, Türkiye, 25-26 Şubat 2023.
- Tini, S. C.,** Zeren, A., Yıldırım Avcu, Y., Abakay, E., Avcu, E. (2024). Gemi Pervane Malzemesi Kaviteasyon Erozyonu Aşınma Davranışı: Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) Değişiminin Taguchi Yöntemiyle Analizi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*.
- Tini, S. C.,** Zeren, A., Yıldırım Avcu, Y., Abakay, E., Avcu, E. (2024). Cavitation Erosion Behaviour of MAB-CU4 Alloy: Influences of Cavitation Number, Attack Angle, Time, and Stand-off Distance. *Materials Research Express*, 11(2024), 116506.

ÖZGEÇMİŞ

Sedat Can TİNİ, İstanbul Şişli Anadolu Lisesinden mezun olmuştur. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği ve çift ana dal programı ile eğitimine kabul edildiği Mekatronik Mühendisliği bölümlerinden 2012 yılında mezun olmuştur. 2013 yılında askerlik hizmetini Yedek Subay olarak tamamlamasına müteakip Bakım Mühendisi olarak iş hayatına başlamıştır. 2019 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimini tamamlamıştır. Takip eden dönemde aynı anabilim dalında Doktora eğitimine başlamıştır. 2016 yılından itibaren Milli Savunma Bakanlığı bağlısı İstanbul Tersanesi Komutanlığında Makine Mühendisi olarak görev yapmakta ve profesyonel yaşantısını sürdürmektedir.

