

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**POMPA ÇARKI MALZEMESİ NİKEL ALÜMİNYUM BRONZA UYGULANAN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİNİN MALZEMENİN KAVİTASYON DİRENCİNE
ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Haluk KELEŞ

**HAZİRAN - 2016
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**POMPA ÇARKI MALZEMESİ NİKEL ALÜMİNYUM BRONZA UYGULANAN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİNİN MALZEMENİN KAVİTASYON DİRENCİNE
ETKİSİ**

Mak. Müh. Haluk KELEŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 05 / 2016

Tezin Savunma Tarihi : 10 / 06 / 2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Trabzon 2016

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Haluk KELEŞ Tarafından Hazırlanan**

**POMPA ÇARKI MALZEMESİ NİKEL ALÜMİNYUM BRONZA UYGULANAN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİNİN MALZEMENİN KAVİTASYON DİRENCİNE
ETKİSİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 24 / 05 / 2016 gün ve 1654 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Tefvik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Üye : Doç. Dr. Yücel ÖZMEN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özlem BARAN

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesinde benden bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, çalışmanın her aşamasında beni yönlendirip destekleyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, üzerimde büyük emeği olan Sayın Doç. Dr. Yücel ÖZMEN'e, çalışmamız için tavsiyelerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mete AVCI'ya, çalışmanın her aşamasında büyük emekleri olan Malzeme Bilimleri, Talaşlı İmalat ve Takım Tezgâhları laboratuvarları teknisyenlerine, çalışmamıza maddi destekleri için KTÜ Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na teşekkürü bir borç bilirim. Optik profilometre görüntülerinin analiz edilmesinde yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Levent KARA'ya, elektroerozyon, mikroyapı inceleme ve mekanik testlerimi uygulamamda yardımlarını esirgemeyen, Öğr. Gör. Semih Mahmut AKTARER'e, Arş. Gör. Murat SEKBAN'a, Arş. Gör. Muhammet DEMİRTAŞ'a ve Arş. Gör. Harun YANAR'a teşekkürlerimi sunarım. Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan aileme ve hiçbir zaman desteğini esirgemeyen eşim Gülbahar KELEŞ'e teşekkür ederim.

Mak. Müh. Haluk KELEŞ

Trabzon – 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Pompa Çarkı Malzemesi Nikel Alüminyum Bronza Uygulanan Sürtünme Karıştırma Prosesinin Malzemenin Kaviteasyon Direncine Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışman hocam Doç. Dr. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/06/2016



Haluk KELEŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ ...	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Pompalar.....	3
1.1.1. Santrifüj Pompalar.....	3
1.1.2. Pompalarda Temel Kavramlar.....	4
1.1.2.1. Debi	4
1.1.2.2. Manometrik Basma Yüksekliği.....	5
1.1.2.3. Pompa Gücü	6
1.1.2.4. Özgül Hız.....	6
1.1.2.5. Pompa Verimi.....	7
1.1.2.6. Net Pozitif Emme Yüksekliği.....	7
1.1.2.7. Pompa Karakteristik Eğrileri	8
1.1.3. Pompa Malzemesi ve Seçimi.....	8
1.2. Nikel Alüminyum Bronz	10
1.2.1. Denizcilik Uygulamaları.....	17
1.2.2. Tesisat Uygulamaları.....	18
1.2.3. Pompa Uygulamaları	19

1.2.4.	Uygulamalarda Karşılaşılan Sorunlar.....	20
1.3.	Kavitasyon.....	20
1.3.1.	Pompalarda Kavitasyon ve Etkisi.....	23
1.3.2.	Pompalarda Kavitasyonlu Çalışma Rejimleri.....	26
1.3.2.1.	Hidrolik Performans Kaybı	26
1.3.2.2.	Hidrodinamik Sebeplerle Oluşan Kavitasyona Bağlı Kararsızlık	27
1.3.2.3.	Termodinamik Sebeplerle Oluşan Kavitasyona Bağlı Kararsızlık.....	27
1.3.3.	Kavitasyon Erozyonu	28
1.4.	Kavitasyon Çeşitleri	29
1.4.1.	Pervane Kanadı Üzerinde Oluştığı Konuma Göre Kavitasyon Çeşitleri.....	29
1.4.1.1.	Sırt Kavitasyonu	29
1.4.1.2.	Yüz Kavitasyonu	30
1.4.2.	Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavitasyon Çeşitleri.....	31
1.4.2.1.	Uç ve Göbek Girdap Kavitasyonu.....	31
1.4.2.2.	Kabarcık Kavitasyonu	32
1.4.2.3.	Tabaka Kavitasyonu	33
1.4.2.4.	Bulut Kavitasyonu	35
1.4.2.5.	Kök Kavitasyonu	35
1.4.2.6.	Pervane - Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV).....	36
1.5.	Pervanelerde Kavitasyonun Etkileri	37
1.5.1.	Performans Kaybı (İtme Azalması).....	37
1.5.2.	Gürültü Oluşumu	38
1.5.3.	Titreşim Oluşumu.....	39
1.5.4.	Erozyon Oluşumu	40
1.6.	Sürtünme Karıştırma Prosesi	41
1.6.1.	SKP'nin Uygulanması	43
1.6.2.	SKP Uygulanan Malzemede Oluşan Bölgeler.....	46

1.6.2.1.	Esas Metal	47
1.6.2.2.	Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	47
1.6.2.3.	Termomekanik Etkilenmiş Bölge (TEB).....	47
1.6.2.4.	Karıştırma Bölgesi.....	48
1.6.3.	SKP Uygulama Yöntemleri.....	48
1.6.4.	NAB Alaşımlarına SKP İşleminin Uygulanması	49
2.	ÇALIŞMANIN AMACI.....	51
3.	DENEYSEL ÇALIŞMA	53
3.1.	SKP Deney Düzeneği	53
3.1.1.	Ana Tezgâh.....	54
3.1.2.	Yükleme Ünitesi.....	55
3.2.	Kullanılan Takım.....	56
3.3.	Kullanılan Malzemeler	57
3.4.	Kullanılan Proses Parametreleri	59
3.5.	Prosesin Uygulanması	59
3.6.	Proses Yapısının İncelenmesi.....	60
3.6.1.	Metalografik Deneyler.....	61
3.6.2.	Mikrosertlik Ölçümleri.....	62
3.7.	Santrifüj Pompa Çarkı Konstrüksiyonunun Tasarımı	63
3.8.	Kavitasyon Deney Düzeneğinin Hazırlanması.....	68
4.	BULGULAR VE İRDELEME.....	73
4.1.	Malzemenin Başlangıç Özelliklerinin Belirlenmesi.....	73
4.2.	Mikrosertlik İncelemeleri	75
4.3.	Makro İncelemeleri.....	96
4.4.	Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) İncelemeleri.....	110
4.5.	Optik Profilometre İncelemeleri.....	112
5.	SONUÇLAR.....	128

6.	ÖNERİLER	129
7.	KAYNAKLAR.....	130

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

POMPA ÇARKI MALZEMESİ NİKEL ALÜMİNYUM BRONZA UYGULANAN
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA PROSESİNİN MALZEMENİN KAVİTASYON
DİRENCİNE ETKİSİ

Haluk KELEŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU
2016, 134 Sayfa

Bu çalışma kapsamında, radyal kanatlı santrifüj pompa çarkı tasarlanmıştır. Literatürdeki parametreler ve yaptığımız ön deneyler sonucu en uygun Sürtünme Karıştırma Prosesi (SKP) parametreleri belirlenmiştir. Nikel Alüminyum Bronzu (NAB) malzemesinden üretilen pompa çarkı kanatları SKP yöntemi ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. İmal edilen çarkın kanatları sökölüp takılabilir nitelikte hazırlanarak çalışmanın istenilen aşamalarında sökölüp incelenmesi mümkün olmaktadır. Oluşturulan sistem bir tanktaki suyun, santrifüj pompa ile emilerek sirküle edildiği kapalı devre şeklinde tasarlanmıştır. Kaviteasyonlu bölgede çalıştırılan pompa çarkının, zamanla sergilediği kaviteasyon davranışı incelenmiştir. Pompa çarklarının imalatında kullanılan NAB malzemesine uygulanan SKP işleminin, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve kaviteasyon direncini yaklaşık 10 kat artırdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Prosesi, Nikel Alüminyum Bronz, Kaviteasyon, Kaviteasyon Hasarı, Santrifüj Pompalar, Pompa Çarkı

Master Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF FRICTION STIR PROCESS APPLIED TO PUMP IMPELLER
MATERIAL NICKEL ALUMINIUM BRONZE ON MATERIAL'S CAVITATION
RESISTANCE

Haluk KELEŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU
2016, 134 Pages

In this study, a centrifugal pump impeller is designed which has radial straight blade. The best parameters of Friction Stir Processing (FSP) have been determined by results of preliminary experiments and checking literature. The pump impeller blades made from Nickel Aluminium Bronze (NAB) material subjected to surface treatment with the FSP method. The manufactured impeller blades can be disassembled and pluggable, so it can possible to examine at the desired stage by disassemble while operation continuing. System designed as a closed circuit that water suction by centrifugal pump from a tank. Cavitation behavior of pump impeller was examined which has run in the cavitation risk zone. Mechanical properties is gotten better and cavitation resistance improved up to 10 times after applying FSP to NAB which has used to manufacture pump impeller is determined.

Key Words: Friction Stir Processing, Nickel Aluminium Bronze, Cavitation, Cavitation Failure, Centrifugal Pumps, Pump Impeller

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Bir santrifüj pompanın şematik gösterimi	4
Şekil 2. Bernoulli denklemindeki ifadelerin şematik gösterimi	5
Şekil 3. Pompa eğrisi, sistem eğrisi ve çalışma noktası.....	8
Şekil 4. Malzeme seçimine etki eden parametreler	9
Şekil 5. Seçilmiş alaşımların mekanik özellikleri.....	12
Şekil 6. Hacim başına nispi döküm maliyetleri	15
Şekil 7. Bir gemi pervanesi ve SKP yöntemi ile işlenmiş alanlar	18
Şekil 8. Herhangi bir sıvı için faz diyagramı	21
Şekil 9. Daralan bir boru içindeki kavitasyon olayı.....	22
Şekil 10. Kabarcıkların yoğunlaşması	22
Şekil 11. Metal yüzeyinde patlayan kabarcıkların oyuk oluşturması	23
Şekil 12. Pompa fanı içerisinde basıncın buhar basıncının altına düşmesi	24
Şekil 13. Santrifüj pompa içerisindeki basınç profili	25
Şekil 14. Bir pompa çarkı üzerinde oluşan kavitasyon hasarı	26
Şekil 15. Buhar kabarcığı oluşumu.....	27
Şekil 16. a) Kabarcık başlangıcı, b) büyüme ve ilerleme, c) çökme	28
Şekil 17. a) Kabarcık başlangıcı, b) parçaların büyümesi, c) kısmi olarak çökme.....	28
Şekil 18. a) Santrifüj pompa çarkında kavitasyona bağlı erozyon b) bir Francis türbininde kavitasyona bağlı malzeme kaybı	29
Şekil 19. Sırt kavitasyonu şematik görüntüsü.....	30
Şekil 20. Yüz kavitasyonu şematik görüntüsü.....	30
Şekil 21. Uç girdap kavitasyonu şematik ve gerçek görüntüleri	31
Şekil 22. Göbek girdap kavitasyonu şematik ve gerçek görüntüsü	32
Şekil 23. Kabarcık kavitasyonu oluşumu	33

Şekil 24.	Bir pervane kanat kesiti üzerindeki tabaka kavitasyonu oluşumu.....	33
Şekil 25.	Tabaka kavitasyonu oluşumu	34
Şekil 26.	Bulut kavitasyonu oluşumunun görüntüsü	35
Şekil 27.	Kök kavitasyonu genel görüntüsü	36
Şekil 28.	PHV kavitasyonu genel görüntüsü	37
Şekil 29.	Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz durumda oluşan basınç dağılımı	40
Şekil 30.	Bir pervane kanadında kavitasyon nedeniyle oluşan erozyon.....	41
Şekil 31.	Sürtünme Karıştırma Prosesi'nin şematik gösterimi	44
Şekil 32.	Sürtünme Karıştırma Prosesi'nin uygulandığı ve oluşan içyapılar.....	45
Şekil 33.	SKP karıştırma bölgesi şematik görüntüsü.....	46
Şekil 34.	Taramalı ve spiral motif örneklerinin şematik görünümü	49
Şekil 35.	Sürtünme karıştırma proses donanımının genel görüntüsü	54
Şekil 36.	Hidrolik yüklemeli tablanın genel görüntüsü	55
Şekil 37.	Proses takımının hazırlanmasında kullanılan taşlama tezgâhları	56
Şekil 38.	SKP işleminde kullanılan karıştırıcı takımın görünümü	57
Şekil 39.	Proses edilecek NAB numunelerinin yüzey görüntüleri	57
Şekil 40.	Ham döküm NAB malzeme optik mikroskop görüntüsü	58
Şekil 41.	SKP'nin uygulandığı şekli, a) SKP düzeneği ve b) proses edilmiş numune yüzeyi	60
Şekil 42.	İnceleme amacı ile proses edilen parçadan numuneler ve kanadın çıkarım planı	61
Şekil 43.	a) Optik mikroskop ve b) stereo mikroskobu genel görüntüsü	62
Şekil 44.	Mikrosertlik ölçüm cihazı genel görünüşü	62
Şekil 45.	Proses bölgesinde sertlik alınan noktaların gösterimi	63
Şekil 46.	Basit bir radyal santrifüj pompa çarkı	64
Şekil 47.	Çark kanat geometrisinin proses edilmiş plakadan çıkarılması.....	64
Şekil 48.	Kanat sayısının belirlenmesi.....	65
Şekil 49.	Orijinal pompa çarkı ve geri eğimli kanatları.....	66

Şekil 50.	Pompa çarkı tasarımı	67
Şekil 51.	Alien vidalar ile kanatların çark gövdesine sabitlenmesi	68
Şekil 52.	Sistemin şematik ve gerçek görünümü	69
Şekil 53.	Pompaların genel karakteristik eğrisi	70
Şekil 54.	Kullanılan pompanın karakteristik eğrisi	71
Şekil 55.	Base malzemenin optik ve elektron mikroskop görüntüleri	74
Şekil 56.	Yüzeğe paralel mikrosertlik sonuçları	76
Şekil 57.	Yüzeyden derine doğru mikrosertlik değişimleri	77
Şekil 58.	SKP İşlemi sonrası 1 Paso Proses numunenin düşük büyütme mikroyapı görüntüleri	79
Şekil 59.	SKP İşlemi sonrası 1 Paso Proses numunenin yüksek büyütme mikroyapı görüntüleri	81
Şekil 60.	SKP İşlemi sonrası 2 Paso Proses numunenin düşük büyütme mikroyapı görüntüleri	83
Şekil 61.	SKP İşlemi sonrası 2 Paso Proses numunenin yüksek büyütme mikroyapı görüntüleri	85
Şekil 62.	SKP İşlemi sonrası 3 Paso Proses numunenin düşük büyütme mikroyapı görüntüleri	87
Şekil 63.	SKP İşlemi sonrası 3 Paso Proses numunenin yüksek büyütme mikroyapı görüntüleri	89
Şekil 64.	SKP İşlemi sonrası 4 Paso Proses numunenin düşük büyütme mikroyapı görüntüleri	91
Şekil 65.	SKP İşlemi sonrası 4 Paso Proses numunenin yüksek büyütme mikroyapı görüntüleri	93
Şekil 66.	Farklı paso sayılarında proses edilen malzemenin iç yapı görünümü	95
Şekil 67.	SKP ile işlenmiş NAB malzemenin kaviteasyon deneyi öncesi yüzey görüntüsü	97
Şekil 68.	Base malzemenin imal edilen çark kanat yüzeyinin farklı çalışma süreleri sonunda optik mikroskop görüntüleri, $1,2 \times 10^7$ (a) ve $4,8 \times 10^7$ (b) yük tekrarı	98
Şekil 69.	Base malzemenin imal edilen çark kanat yüzeyinde kaviteasyon hasarı beklenen bölgenin optik mikroskop görüntüsü, $3,0 \times 10^8$ (a) ve $3,56 \times 10^8$ (b) yük tekrarı	98
Şekil 70.	Base malzemenin imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kaviteasyon hasarı izleri	100
Şekil 71.	Base malzemenin imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kaviteasyon hasarı izleri	101

Şekil 72.	1 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kavite hasarı izleri	102
Şekil 73.	1 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kavite hasarı izleri	103
Şekil 74.	2 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi	104
Şekil 75.	2 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi	105
Şekil 76.	3 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi	106
Şekil 77.	3 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi	107
Şekil 78.	4 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi	108
Şekil 79.	4 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi	109
Şekil 80.	Base malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgeden alınan SEM görüntüsü	110
Şekil 81.	1 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgeden alınan SEM görüntüsü	111
Şekil 82.	2 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarı beklenen bölgeden alınan SEM görüntüsü	111
Şekil 83.	3 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarı beklenen bölgeden alınan SEM görüntüsü	112
Şekil 84.	4 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarı beklenen bölgeden alınan SEM görüntüsü	112
Şekil 85.	Base malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası	113
Şekil 86.	Base malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgenin optik profilometre ile ölçülen hacim kaybı	114
Şekil 87.	1 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası	115
Şekil 88.	1 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgenin optik profilometre ile ölçülen hacim kaybı	116
Şekil 89.	2 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası	117
Şekil 90.	2 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavite beklenen bölgenin optik profilometre ile ölçülen yüzey değerleri	118
Şekil 91.	3 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavite hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası	119
Şekil 92.	3 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavite beklenen bölgenin optik profilometre ile ölçülen yüzey değerleri	120

Şekil 93.	4 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası	121
Şekil 94.	4 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon beklenen bölgenin optik profilometre ile ölçülen yüzey değerleri	122
Şekil 95.	1 Paso proses işlemine tabi tutulan malzemenin içyapı genel görünümü	123
Şekil 96.	2 paso proses uygulanan malzemede iç yapı genel görünümü	124
Şekil 97.	Paso sayısının içyapıya etkisinin şematik görüntüsü, a) 1 paso proses, b) 2 paso proses.	125



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Santrifüj pompalar için P – α değerleri.....	6
Tablo 2. Çeşitli pompa malzemelerinin karşılaştırmaları	13
Tablo 3. Karşılaştırmalı korozyon performansı	14
Tablo 4. Karşılaştırmalı korozyon performansı, kısım 2	15
Tablo 5. NAB için bileşim verileri (ağırlıkça %)	17
Tablo 6. Sürtünme Karıştırma Prosesinin kullanım alanları.....	43
Tablo 7. Nikel Alüminyum Bronz malzemenin kimyasal yapısı.....	58
Tablo 8. Temin edilen NAB malzemenin ölçülen kimyasal bileşim oranları.....	73
Tablo 9. Yapılan çalışma ve literatür ile kıyaslanması	126

SEMBOLLER DİZİNİ

Al	: Alüminyum
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
Base	: Temel malzeme
Be	: Berilyum
°C	: Santigrat Derece
CCP	: Değişken Adımlı Pervane
Cent	: Madeni para birimi
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
DN	: Nominal Çap
ENPY	: Emmede Net Pozitif Yük
Fe	: Demir
Frank	: Fransa eski para birimi
GPa	: Gigapascal
GRE	: Cam takviyeli epoksi
G.T.	: Gerileme Tarafı
Hz	: Hertz
ITAB	: Isının Tesiri Altındaki Bölge
İ.T.	: İlerleme Tarafı
kW	: KiloWatt
Mg	: Magnezyum
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
n	: Takım devir sayısı
NAB	: Nikel Alüminyum Bronz
Ni	: Nikel
NMRIJ	: Japonya Ulusal Denizcilik Araştırma Enstitüsü
NPSH	: Net Pozitif Emme Yüksekliği

OM	: Optik Mikroskop
Pb	: Kurşun
PHV	: Pervane Gövde Girdabı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SKP	: Sürtünme Karıştırma Prosesi
TEB	: Termomekanik Etkilenmiş Bölge
Ti	: Titanyum
TWI	: Kaynak Enstitüsü (İngiltere)
V	: Vanadyum
VSD	: Vickers Sertlik Değeri
W	: Tungsten
WC	: Tungsten Karbür
Zr	: Zirkonyum
Zn	: Çinko
V	: Akışkan hızı (m/s)
ρ	: Akışkan yoğunluğu (kg/m ³)
α	: Alfa
P	: Basınç (Pascal) veya Güç (kW)
β	: Beta
γ	: Gama
Q	: Hacimsel debi (m ³ /s)
κ	: Kappa
m	: Kütleli debi (kg/s)
λ	: Lamda
μ	: Mikron
N	: Newton
v	: Nü
ω	: Omega (Açısal Hız – rad/s)
H	: Potansiyel yükseklik farkı
g	: Yer çekimi ivmesi (m/s ²)

η : Verim



1. GENEL BİLGİLER

Günümüzde oldukça yaygın kullanımı olan pompalar, genel olarak akışkanların basıncını ve toplam enerjisini artırarak, onların bir yerden başka bir yere transfer edilmesini gerçekleştiren makinelerdir. Dünyada kullanımı en yaygın pompa tipi olan santrifüj pompalar, başta sulama olmak üzere, şehir içme suyu şebekelerinde su basıncının yetersiz olduğu durumlarda hidroforlarda, yiyecek içecek endüstrilerinde ve kimya-petrokimya-hidrometalürji tesislerinde proses pompaları olarak kullanılmaktadırlar.

Santrifüj pompalar, elektromekanik makineler olup, çok sayıda parçanın birleştirilmesiyle üretilmektedirler. Bir pompa, motor ve pompa kafası olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır. Pompa kafası ise fan ve salyangozdan meydana gelmektedir. Pompanın performansını belirleyen ana parça, pompa fanıdır. Fan geometrisindeki küçük değişiklikler, pompa performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebepten, tasarım açısından pompa fanına verilen önem büyüktür. Genel tabirle, pompa tasarımı, pompa fanının tasarımıdır.

Pompa fanı, hem pompanın tüm karakteristiklerini etkilediği hem de aşınmaya maruz kaldığı için özel bir öneme sahiptir. Pompanın kullanım yeri ve fan boyutuna göre pompa fanı pik demir veya sfero dökme demir, paslanmaz çelik, bronz, cam elyafı plastik malzeme gibi değişik malzeme gruplarından üretilmektedir [1].

Pompa performansının en önemli parçalarından olan çarkın ömrünün iyileştirilmesi, tasarımda da esas olarak ele alınması gereken bir husustur. Ömrün iyileştirilmesi şüphesiz önemli bir etmendir. Son yıllar pompa ve çark ömrünün iyileştirilmesi hususunda birçok çalışma yapılmaktadır. Pompa çarkının ömrünü kısaltan aşınma, korozyon ve kavitasyona karşı kullanılan malzemeyi ve üretim yöntemlerini değiştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Her ne kadar malzeme ve üretim yöntemleri iyileştiriliyor olsa da, yine de bir sınır söz konusudur. Malzeme ve üretim yönteminden kaynaklanan kusur ve hataların giderilip daha uzun ömürlü bir çark elde edebilmek için yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Yüzey işlem teknolojisi, malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde günümüzde çok sık kullanılan bir yöntemdir. Malzemenin kendisinden ve üretim yöntemlerinden kaynaklanan bir takım kusurların iyileştirilmesi ancak üretilen ürün üzerinde yüzey işlemleri yaparak mümkün olmaktadır. Sürtünme karıştırma prosesi (SKP),

yeni sayılabilecek bir yüzey işleme tekniği olarak ortaya çıkmıştır. İşlem esasında sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemine dayanmaktadır. SKK bir katı hal kaynak yöntemi olup, 1990 yılında İngiltere Kaynak Enstitüsü'nde Wayne Thomas tarafından bulunmuş ve ilk defa 1991 yılında İngiltere'de patenti alınmıştır [2]. Endüstriyel olarak kullanımı ise bundan yaklaşık 5 yıl sonrasında başlamıştır. Başlangıçta özellikle demir dışı metallere olan alüminyum alaşımları üzerinde yapılmış olmakla birlikte, günümüzde demir esaslı malzemelerin kaynağı için de bu yöntem kullanılmaya başlanmıştır. SKP yönteminde, karıştırıcı (batacı) uç olarak adlandırılan ve yüksek devirlerde dönen omuzlu bir pimin, proses edilecek parçaların yüzeyine daldırılarak omuzun yüzeye sürtünmesinden dolayı ortaya çıkan ısının etkisiyle, parçaların ısınıp yumuşaması ve çamurumsu bir kıvamına gelmesi sağlanır. Böylece bu bölge içerisinde bulunan pimin karıştırıcı etkisiyle parçanın yüzey tabakası termomekanik olarak aşırı oranda deforme edilmiş olur.

Nikel Alüminyum Bronzu (NAB), mükemmel korozyon direnci, iyi kırılma tokluğu, yüksek sönümlenme kapasitesi ve iyi yorulma direnci gibi özellikleri yüzünden, geniş ölçüde denizcilikte pervane malzemesi ve pompa uygulamalarında ise çark malzemesi olarak kullanılan bakır bazlı bir alaşımdır. Döküm malzemelerde genel olarak gözlenen yüzey kusurları, NAB içinde bir sorun teşkil etmektedir. İşte bu sorunların giderilmesi hususunda yüzey işlem teknolojileri ön plana çıkmaktadır.

Kavitasyon, akışkanların söz konusu olduğu uygulamalarda karşılaşılabilen fiziksel bir olaydır. Esasında, akışkan içerisinde oluşan ani basınç düşüşlerinin, akışkanın kritik buharlaşma basıncının altına düşmesi ile akışkanın anlık olarak kaynayıp kabarcık oluşturmasıdır. Bu kabarcıklar, bir yüzeye temas etmesi veya basıncın yüksek olduğu bir bölgeye geçmesi durumunda kendi içerisine çökerek patlar, bu patlama yerel olarak yüksek basınç dalgalarının oluşmasına neden olur. Öyle ki bu gerilmeler yerel olarak 1,5 GPa mertebelerine kadar çıkabilmektedir [3]. Yapısal olarak gözenekli yapıya sahip olan döküm esaslı malzemeler kavitasyon etkisiyle aşındıklarında, yüzeyde derin çukurcuklar meydana gelir. Bu durum kanat yüzeyine uygulanan SKP işlemi ile malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin yanında yüzeylerde mevcut olan gözeneklerin yok olmasını veya azalmasını sağladığından kanatta kavitasyon etkisinin gözlenmesini geciktirir.

Çalışma kapsamında, radyal kanatlı santrifüj pompa çarkı tasarlanmıştır. Literatürdeki parametreler ve yaptığımız ön deneyler sonucu en uygun sürtünme karıştırma prosesi (SKP) parametreleri belirlenmiştir. Nikel Alüminyum Bronzu (NAB)

malzemesinden üretilen pompa çarkı kanatları SKP yöntemi ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan çarkın kanatları sökölüp takılabilir nitelikte imal edildiğinden çalışmanın istenilen aşamalarında sökölüp incelenmesi mümkün olmaktadır. Oluşturulan sistem, bir tanktaki suyun santrifüj pompa ile emilerek tekrar tanka gönderildiği kapalı devre şeklinde tasarlanmıştır. Sistemde emme ve basma hattına birer sürgülü vana konulmuştur. Emiş hattındaki vana kısılarak akışkanın hızı artırılmış ve basıncı düşürülmüştür. Kaviteasyonlu bölgede, çalıştırılan pompa çarkının, zamanla sergilediği kaviteasyon davranışı incelenmiştir. Pompa çarklarının imalatında kullanılan NAB malzemesine uygulanan SKP işleminin, oluşan kaviteasyon etkisine karşı kanat malzemesinin direncini tatminkâr derecede artırdığı belirlenmiştir.

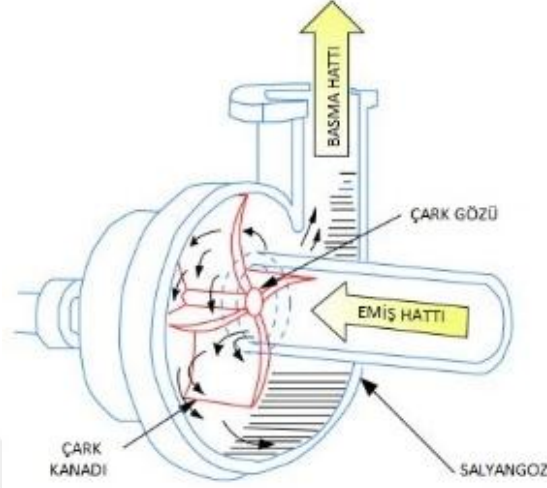
1.1. Pompalar

Pompalar, mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Pompalar pozitif yer değıştirmeli pompalar ve rotodinamik pompalar olmak üzere iki ana grupta toplanır. Volümetrik pompalarda, pompa içerisindeki akışkan hacmi değışmekte ve çalışma mekanik-statik kurallara bağılı kalmaktadır. Rotodinamik pompalarda ise akışkanın içinden geçtiği bir çark bulunmaktadır. Bu türdeki pompalarda, akışkana çeşitli elemanlar (palet, özel tasarımı elemanlar, vb.) yardımıyla moment aktarılmaktadır. Kapalı hacim söz konusu değıldir. Akışkan, açık kanallardan geçerken sahip olduğu momentum artırılır, difüzör yardımı ile ulaşılan yüksek hız gerektiğinde basınca dönüştürölür [4].

1.1.1. Santrifüj Pompalar

Santrifüj pompalar, rotodinamik pompalar grubundadırlar. Şekil 1’de şematik olarak gösterilen bir santrifüj pompada, akışkan çarkın emiş tarafında meydana gelen vakum nedeniyle çarkın kanatları arasına girer. Çark kanatları arasından geçen akışkan çarkın dönüş hareketi ile moment kazanır. Çark kanatları ile çarkın ön ve arka profili tarafından sınırlanan kanallar arasındaki akışkan, çarkın çıkış tarafına doğru dönme hareketi esnasında meydana gelen santrifüj kuvvetler etkisiyle itilir. Bu oluşan hareket devamlı akışı ve pompanın emme tarafındaki emişini sağlar. Çark kanatlarını büyük bir momentle

terk eden akışkanın içerdiği kinetik enerji, sabit difüzör kanatları arasında ve salyangoz boşluğunda basınç enerjisine çevrilir [5].



Şekil 1. Bir santrifüj pompanın şematik gösterimi [21].

1.1.2. Pompalarda Temel Kavramlar

Pompalarda enerjinin nasıl aktarıldığı, akışkanın basılan miktarının ne kadar olduğu gibi genel ifadeleri hesaplamak için pompalardaki temel kavramları incelemek gereklidir.

1.1.2.1. Debi

Pompa debisi, birim zamanda pompanın basma flanşından basılan akışkanın birim zamandaki hacmidir. Pompanın iç kaçakları, aksel itme dengeleme sistemlerine ve salmastraya giden akışkan miktarı dikkate alınmaz [6]. Hacimsel debi Q (m^3/s) şeklinde ifade edilir. Hacimsel debiye bağlı olarak da kütleli debi formül 1.1'deki gibi ifade edilir.

$\rho = \text{akışkan yoğunluğu (kg/m}^3\text{)}$

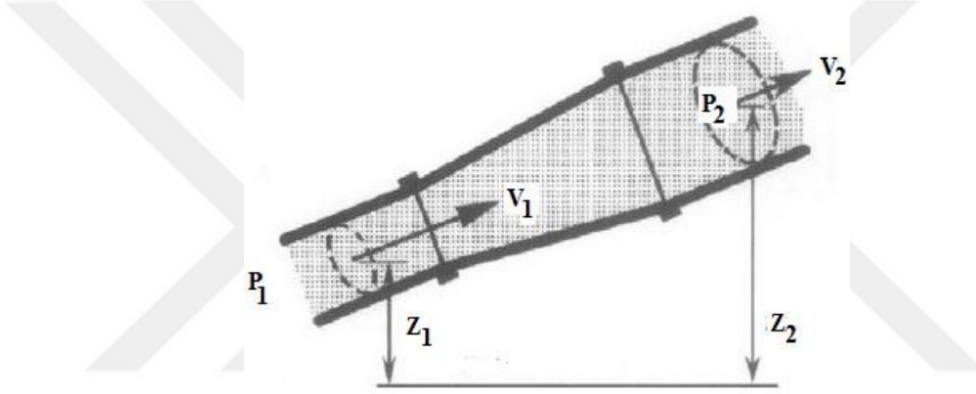
$$\dot{m} = \rho \cdot Q. \text{ (kg/s)}$$

(1.1)

1.1.2.2. Manometrik Basma Yüksekliği

Pompalarda manometrik yükseklik (H) basılan sıvının pompa giriş ve çıkış kesitleri arasındaki birim ağırlık başına kazandığı net enerji olarak tanımlanır. Pompa çarkı vasıtasıyla akışkanın birim ağırlığının yaptığı iştir.

Manometrik yükseklik, pompa çıkışı ve girişinde ölçülen, Bernoulli denkleminde yer alan enerji bileşenlerinin toplamları arasındaki fark olup, emme ve basma borularına yerleştirilen vakummetre ve manometre ile ölçülür. Şekil 2’de Bernoulli prensibi ifadeleri şematik olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Bernoulli denklemindeki ifadelerin şematik gösterimi [7].

Sürekli akış halinde pompa girişi ve çıkışı arasında düşü artışı (H) sağlanmaktadır. Tüm kayıplar ihmal edildiğinde Bernoulli denklemi ile

$$H = \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right) - \left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) \quad (1.2)$$

ulaşılan formül 1.2’deki ρ ifadesi yoğunluk (kg/m^3) ile yerçekimi ivmesinin (m/s^2) çarpımıdır. P (Pa) basınç, V (m/s) ise hızı ifade etmektedir. Z (m) ise referans düzleme olan mesafeyi göstermektedir. Pratikte emme ve basma borusu çapları birbirine eşit veya emme borusu çapı basma borusu çapından daha büyüktür. Emme ve basma borularının çapı eşit olduğunda emme ve basma hızı da birbirine eşit olur [4]. Yerleştirilecek ölçerlerin aynı düzlem üzerinde oldukları düşünülecek olursa formül 1.2’deki bağıntı formül 1.3’teki gibi olur.

$$H = (P_2 - P_1) / \rho = \Delta P / \rho \quad (1.3)$$

1.1.2.3. Pompa Gücü

Pompa gücü; pompa mil gücü ve pompa tahrik motoru gücü olmak üzere iki grupta incelenebilir. Pompa mil gücü, pompayı tahrik etmek için pompa miline uygulanması gereken güçtür ve η pompa verimi olmak üzere şu şekilde hesaplanır:

$$P = (\rho \times Q \times H) / (102 \times \eta) \text{ [kW]} \quad (1.4)$$

Pompa tahrik motoru gücü ise, pompanın etiket değerlerinden daha büyük debilerle çalışabileceği düşünülerek pompa mil gücünden α katsayısı kadar büyük seçilir. α katsayıları Tablo 1’de verilmiştir.

$$P_m = \alpha \times P \quad (1.5)$$

Tablo 1. Santrifüj pompalar için $P - \alpha$ değerleri

P (kW)	α
< 1.5	1.50 – 1.40
1.5 – 4	1.40 – 1.25
4 – 35	1.25 – 1.15
>35	1.15– 1.10

1.1.2.4. Özgül Hız

Özgül hız pompa çarkının geometrik biçimini belirleyen bir değerdir ve pompanın optimum noktadaki performansı için hesaplanır [6]. n pompa devir sayısı (d/dk), Q_{opt} pompanın optimum debisi (m^3/s) ve H_{opt} optimum manometrik yükseklik (m) olmak üzere özgül hız aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$n_q = \sqrt{Q_{opt} / H_{opt}^3} \quad (1.6)$$

1.1.2.5. Pompa Verimi

Pompalarda hidrolik verim, volümetrik verim ve mekanik verim olmak üzere üç çeşit verimle karşılaşılır. Bu verimlerin birbiri ile çarpımından sistemin genel verimi bulunur. Volümetrik verim Δq kaçak debi olmak üzere;

$$\eta_v = (Q) / (Q + \Delta q) \quad (1.7)$$

şeklinde hesaplanır. Hidrolik verim (η_h), kayıp düşünün ulaşılan düşüye bölünmesi ile elde edilir. Mekanik verim ise P_f mekanik sürtünmenin neden olduğu güç kaybı olmak üzere;

$$\eta_m = 1 / (P_f + P_m) \quad (1.8)$$

şeklinde hesaplanır. Sistemin genel verimi ise bu üç verimin çarpımıyla bulunur:

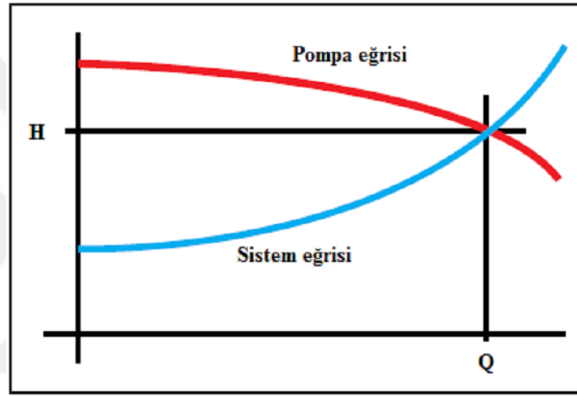
$$\eta_g = \eta_v \times \eta_h \times \eta_m \quad (1.9)$$

1.1.2.6. Net Pozitif Emme Yüksekliği

Net pozitif emme yüksekliği, pompaların emme koşullarının incelenmesi için kullanılan bir ifadedir. Pompanın emme hattında suyu pompa çarkına taşıyan toplam yararlanılabilir enerji olarak ifade edilen net pozitif emme yüksekliği mutlak basınç olarak belirtilen genel emme yüksekliği ile buhar basıncının farkıdır. $NPSH_A$ (Net Positive Suction Head Available) pompanın ulaştığı, $NPSH_R$ pompaya gerekli olan net pozitif emme yüksekliğidir [8].

1.1.2.7. Pompa Karakteristik Eğrileri

Pompa karakteristik eğrileri, bir pompanın sabit bir devir sayısında su basması halinde manometrik yükseklik, pompa mil gücü, pompa verimi, NPSH gibi değerlerin debiye bağlı olarak değişimini gösteren eğrilerdir. Karakteristik eğriler çizilirken sistem eğrisi ile pompa eğrisinin birbirini kestiği nokta çalışma noktasını verir. Şekil 3'te çalışma noktasına denk gelen debi ve basma yüksekliği gösterilmiştir. Pompa çalışma noktasında değişiklik yapabilmek için bu eğrilerde değişiklik yapma yoluna gidilmelidir. Bunun için devir sayısı, çark çapı ve akışkan viskozitesi gibi değerler değiştirilebilir [8].

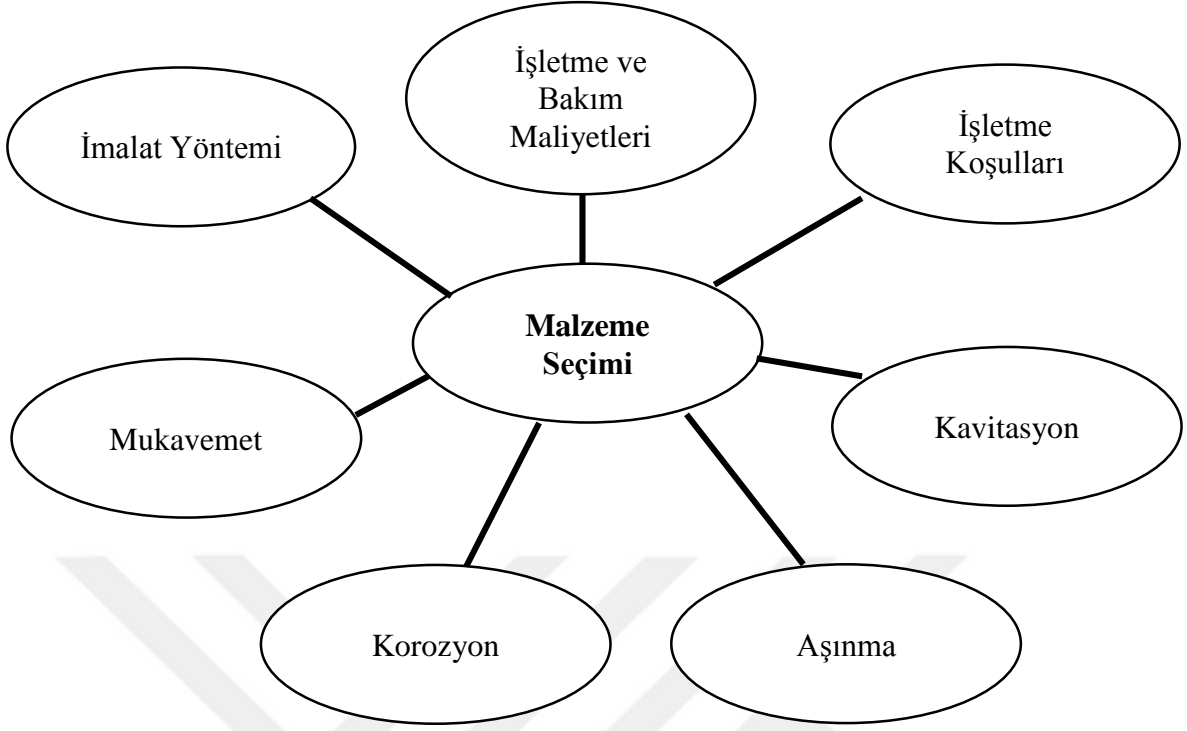


Şekil 3. Pompa eğrisi, sistem eğrisi ve çalışma noktası [8].

1.1.3. Pompa Malzemesi ve Seçimi

Pompa malzemesinin ve malzeme kombinasyonlarının seçiminde farklı birçok parametrenin etkisi dikkate alınmalıdır. Bu farklı parametrelerin en önemlisi işletme ve bakım maliyetleridir. Pompanın çalıştığı sistem üzerinde sürekliliği sağlaması ve beklenmedik duruşlara yol açmaması beklenir. Günümüzde çok gelişmiş izleme sistemleri sayesinde titreşim, sıcaklık, gürültü gibi parametreler sürekli olarak takip edilmekte ve olası arızalar önceden kestirilebilmektedir. Ancak önemli olan arıza sıklığı ve bakım maliyetlerini minimize eden malzeme kombinasyonları seçmek esas olarak üzerinde durulması gereken konudur.

Şekil 4'te malzeme seçimine etki eden temel parametreler verilmiştir.



Şekil 4. Malzeme seçimine etki eden parametreler [18].

Bilindiği gibi pompaj tesislerinin çalışmalarında en çok malzeme kaybına uğrayan organ çarklardır. Çarklarda oluşan bu malzeme kaybı üzerine birçok değişik etken söz konusudur. Bu etkenlerin sonucunda çarklarda aşınma meydana gelmektedir. İleri dereceli aşınma ise verimsel kayıplara neden olmaktadır.

Pompa çarklarının maruz kaldıkları aşındırıcı etkiler; mekanik aşınma, kavitasyon ve korozyon olarak sınıflandırılabilir. Kavitasyon, çalışma rejimine bağlı olarak ortaya çıkabilen bir aşınma türüdür. Pompa üreticileri kavitasyondan kaçınmak için kullanılması gereken işletme parametrelerini önceden belirler ve buna göre kullanılmasını ister. Bu nedenle pompa çarkı malzemesi seçimi ve bu seçimin iyileştirilmesi hususunda çalışmalar daha çok mekanik aşınma ve korozyon üzerine yoğunlaşmıştır. Kavitasyon ise hep kaçınılabilecek bir olumsuzluk olarak düşünülüp göz ardı edilir. Her ne kadar teorik olarak kavitasyondan kaçınmak mümkün gibi görünse de pratik durum her zaman kaçınmayı sağlayamaz.

Santrifüj pompaların gerek projelendirilmesi ve gerekse kullanımı sırasında kavitasyonu önlemek için her türlü çaba gösterilmesine rağmen pompanın optimum noktadan daha düşük debilerde çalıştırılması halinde her zaman bu amaç sağlanamaz. Şu

da bilinmelidir ki, düşük debili çalışmada, beyan edilen ENPYg eğrisi genellikle tüm kavitasyon tahribatının bastırılması için yeterli olmaz. Beyan edilen ENPYg, eğriler üzerinde gösterilen basma yüksekliği, debi ve verimi sağlayabilmek için gerekli olan değerdir. Düşük debilerde bir miktar kavitasyon tahribatının olacağı beklenmelidir. Bu düşük debilerde tüm kavitasyonu önleyecek şekilde ENPY'yi sağlamaya çalışmak pratik değildir. O halde, düşük debilerde çalışmada bir miktar kavitasyon olması beklenmeli ve çark malzemesi değerlendirilmelidir.

Özellikle açık tip karışık akımlı çarklarda dönen kanatlar ile sabit gövde arasındaki dar aralıklar kavitasyon erozyonuna duyarlıdır. Buna çoğunlukla kanat ucu erozyonu denir ve kanat ile gövde arasındaki aralıktaki vorteksler sebebi ile ortaya çıkar. Bu tip pompaların çark ve gövde malzemelerini değerlendirirken kanat ucu erozyonu ihtimalini de dikkate almak gereklidir.

Çok sayıda malzemenin kavitasyon erozyonuna dirençlerini tespit etmek amacı ile yapılan kapsamlı laboratuvar deneyleri, santrifüj pompalarda kullanılan tüm malzemeler için veriler sağlamıştır [18]. Laboratuvar verilerinden ve uygulamadaki tecrübelerden yararlanarak, pompa malzemelerinin kavitasyon direnci özellikleri artış sırasına göre şu şekilde verilmektedir:

Pik döküm < Bronz < Çelik döküm < Martenzitik çelikler < Ostenitik çelikler < Nikel Alüminyum Bronzu < Stellite

1.2. Nikel Alüminyum Bronz

Nikel alüminyum bronz (NAB), mükemmel korozyon direnci, iyi kırılma tokluğu, yüksek sönümlenme kapasitesi ve iyi yorulma direnci gibi özellikleri yüzünden geniş ölçüde denizcilik uygulamalarında kullanılan bakır bazlı bir alaşımdır [9]. Nikel alüminyum bronz bir bronz değildir. Tek benzerlik her ikisinin de bakır alaşımı olmasıdır. Bakır ve kalayın bileşimi bronz, milattan önce 4000'lerde tunç devrinde keşfedilmiştir. Alüminyum bronzun bu malzeme ile ismini paylaşması gerçeği ise, bazı geçmiş söylencelerin bir parçası olmasıdır [10].

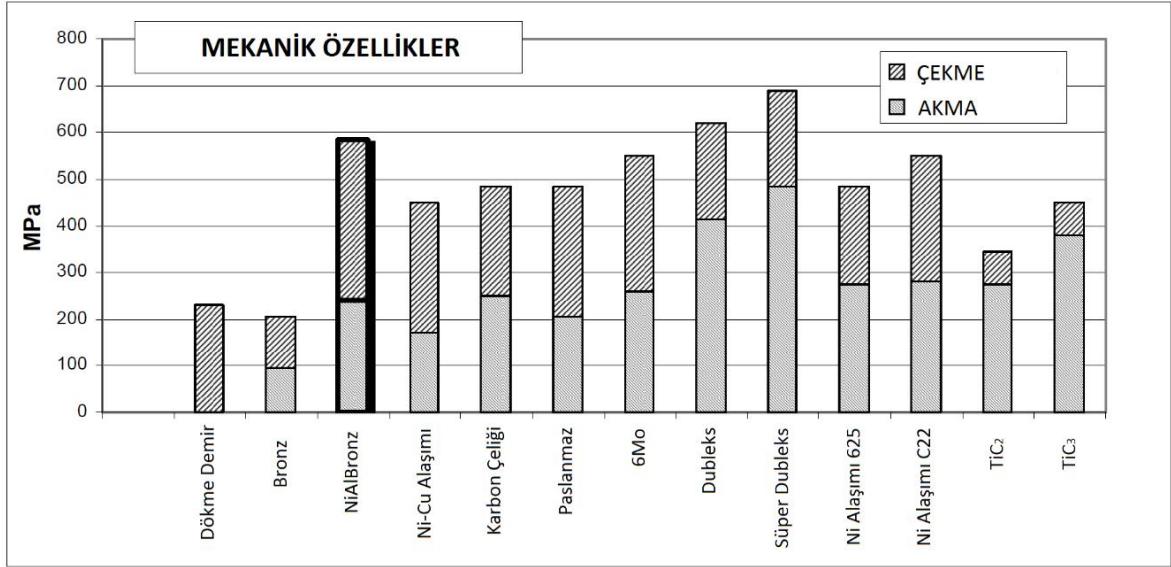
Bakır ve alüminyumun bileşimi ilk olarak 19.yy'ın ortalarında denenmiştir. Üretilmesi çok pahalıydı ve sonuç olarak metalürji uzmanları tarafından araştırma nesnesi olarak fazla kullanılmadı. Alüminyum bronz ve nikel alüminyum bronz nispeten yeni buluşlar olmuştur. Yüzyılın dönümünde ilave alaşım elementleri araştırılıyordu ve daha iyi

döküm yapılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. 1913'te Durville, alüminyum bronz kütükleri yapmak için yatık pota işlemini tamamlamıştır. Durville yöntemi, kısmen sınırlı donma değeri yüzünden büzülme kusurları ve alaşımların oksit yayılma karakteristiklerinin üstesinden gelmek için gerekliydi. Bu çok başarılıydı ve dolayısıyla Fransa hükümeti (Cu9Al) alaşımı bozuk paralarda (50 Cent, 1 ve 2 Frank) kullandı [10, 11].

Charles H. Meigh bu işlemi daha da geliştirdi ve Fransa deniz kuvvetleri ile ilk nikel alüminyum bronzu üretmek için çalıştı (Cu10Al3Ni3Fe3Mn). Metalürji uzmanları tarafından yapılan ileri araştırmalar sonucu alaşımlar geliştirildi ve NAB'ın genel ticari kullanımı gemi pervaneleri için artan ihtiyaca göre hızla artış gösterdi. Nikel alüminyum bronz, magnezyum bronz ve paslanmaz çelikten iki kat daha fazla korozyon yorulması direncine sahiptir ve bu yüzden kullanım için çok tutulan bir malzeme olmuştur. Petrol endüstrisindeki büyüme ve ihtiyaç, başlangıçta deniz suyu yangın pompaları için NAB'ın kullanımını genişletmiştir. Donanmalar da geniş ölçüde yüksek dayanım ve kaynak edilebilirliğinden dolayı NAB'ı kullanmıştır. Amerikan nükleer denizaltısı Thresher'in 1963'teki kaybının bronz döküm hasarından dolayı olduğu düşünülmüş ve bu durum NAB'ın denizaltılarda kullanımını hızlandırmıştır [10, 11].

Yakın geçmişte, süper ostenitik ve çeşitli dubleks paslanmaz çeliklerin gelişiyle, eğilim bu yeni malzemeler üzerine olmuştur, hatta bazı durumlarda daha az bilinen ve daha pahalı olan titanyum olmuştur. Vana malzemesi seçimi sıklıkla boru malzemesi seçimi tarafından belirlenir. Bu yüzden 1986'da bakır-nikel boru, NAB vanalar ile birlikte iyi kurulmuş gibi görünüyordu. Fakat ağırlık, dayanıklılık ve hız sınırlamaları (Cu-Ni boru içinde 3.5 m/s üzeri aşınma hasarı) yeni malzemeleri dikkate aldırdı. Bununla birlikte yeni malzemelerin (dubleks, süper dubleks, titanyum) tercih edilmesi sıcaklık, maliyet ve kalite sınırlamalarının ortaya çıkardı. Günümüzde, NAB vanalar GRE (cam takviyeli epoksi) boru ile kullanılmaktadır [10, 11].

NAB alaşımları yüksek mukavemetli olarak dikkate alınır fakat bilindiği gibi, yüksek mukavemet her şey değildir ve süneklik belirleyici bir faktördür. Değerlendirme için karşılaştırma yapıldığında, Şekil 5'te her gruptan alaşımın temsilen seçilerek basitleştirilmiş haliyle, çekme ve akma dayanım özellikleri gösterilmiştir [10].



Şekil 5. Seçilmiş alaşımların mekanik özellikleri [10].

Şekil 5 birkaç noktayı açık bir şekilde göstermektedir. İlk olarak bronz ve NAB arasındaki fark anormaldir. Bu da gösteriyor ki bakır alaşımı ve bronz etiketi paylaşması NAB'ın ününe zarar vermektedir. NAB'ın akma mukavemeti bronzunkinden iki kat daha fazladır (aynı zamanda top tuncu veya vana bronzu olarak bilinir). İkinci olarak NAB'ın mekanik özelliklerinin Ni-Cu alaşımından daha iyi olmasıdır (daha popüler bilinen ismiyle Monel). Üçüncü olarak genel karbon çeliği ve paslanmaz çelik gibi malzemeler ilgili temel mekanik özellikler bakımından fazla farklılık göstermemektedir. Gerçekte NAB'ın mekanik özelliklerini önemli ölçüde geçen yalnızca dupleks ve süper dupleks malzemelerdir [10]. Çeşitli pompa malzemelerinin karşılaştırmaları Tablo 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 2. Çeşitli pompa malzemelerinin karşılaştırmaları [10].

Pompa Çarkı Malzemesi Olarak Kullanılan Alaşımlar				
İsim	Standart	Derece	UNS	Ticari Adı
Dökme Demir				
Bronz	B62		C83600	Top turuncu, vana bronzu, kurşun tuncu
NiAl Bronz	B148		C95800	NAB
Ni-Cu Alaşımı	A494	M35-1	N24135	Monel®
Karbon Çeliği	A216	WCB	J03002	
Paslanmaz Çelik	A351	CF8M	J92600	316
6Mo	A351	CK3MCuN	J93254	
Dubleks	A890	4A / CD3MN	J92205	
Süper Dupleks	A744	1A / CD4MCu	J93370	
Ni Alaşımı 625	A494	CW6MC	N26625	Inconel® 625
Ni Alaşımı C22	A494	CX2MW	N26022	Hastelloy® C22
TiC2	B367	C - 2	R50400	
TiC3	B367	C - 3	R50550	

NAB malzemelerin korozyon dayanımı yüksektir. Korozyon, malzemenin doğru kimyasal bileşenleri ve ısıl işlemlerine kadar karmaşık birçok değişkenle bağlantılı bir konudur. Sonsuz olasılıktaki çalışma koşulları tarafından daha da karmaşıklaşır. Bu durumda malzemenin kendisi sadece bir unsurdur, çevre, basınç, sıcaklık, debi ise diğerleridir ve belirgin bir etkiye sahip olabilir. Hatta deniz suyunun sınırlayıcı etkisi, coğrafi değişiklikler durumunda düzgün değildir ve aynı zamanda biyolojik hareketlilik tarafından da etkilenir [10].

Genel korozyon, oyuklaşma ve çatlak korozyonu, hız etkisi, sıcaklık, galvanik hususlar ve diğer korozif durumlar NAB üzerinde önemli etkilere sahiptir. Karşılaştırma açısından bütün bu durumlardan toplanan daha önceki çalışmalar, Tablo 3 ve 4'te dikkate alınan malzemelerin bağıl korozyon davranışı şeklinde verilmiştir. Uygun başlıklar altında çeşitli malzemelerin bütün performansını iletmesi amaçlanmıştır. Bu tablolar, ayrıntılı

karşılaştırmadan ziyade bir sıralama amaçlıdır. Burada çeşitli malzemelerin dayanıklılık ve zayıflıkları tanımlanmıştır [10]. Ölçek gelişigüze, daha yüksek rakam daha iyidir.

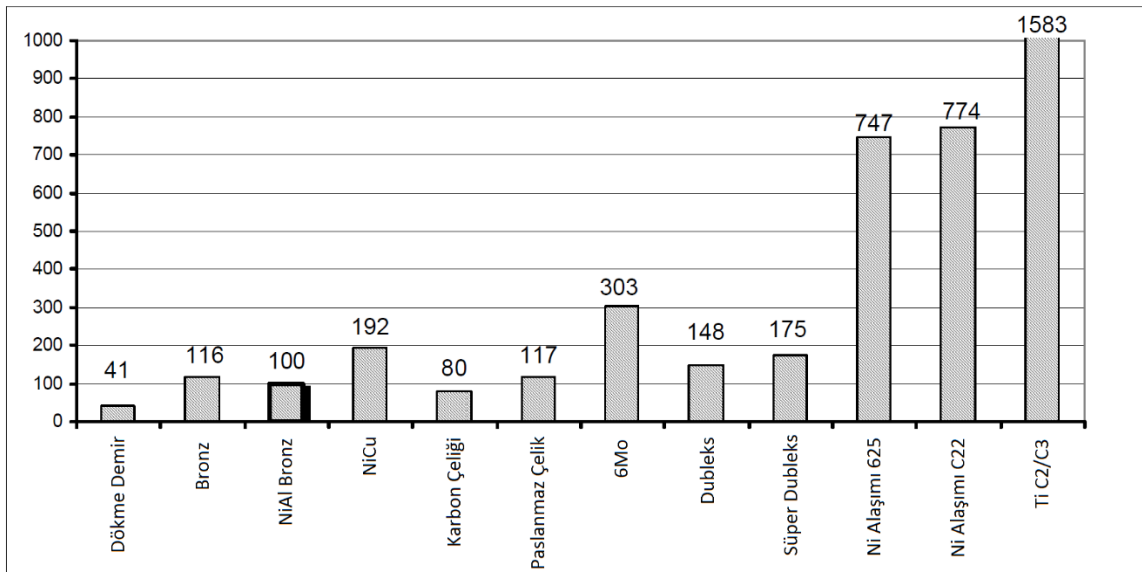
Tablo 3. Karşılaştırmalı korozyon performansı [10].

	Genel Korozyon	Oyuk Korozyonu	Aralık Korozyonu	Aşındırıcı Korozyon	Kavitasyon	Gerilme Korozyonu
Bronz	8	9	9	7	5	
NiAl Bronz	9	10	8	8	8	10
Ni-Cu Alaşımı	10	5	2	10	8	
Karbon Çeliği	3	3			2	
Paslanmaz 6Mo	10	4	3	10	7	8
Dubleks	10	9	8	10	8	8
Süper Dupleks	10	5	4	10	8	9
Süper Dupleks	10	9	8	10	8	9
Ni Alaşımı 625	10	13	12		13	
Ni Alaşımı C22	10	14			10	
Titanyum	10	15	10		9	

Tablo 4. Karşılaştırmalı korozyon performansı, kısım 2 [10].

	Kirli Deniz Suyu	Korozyon Yorulması	Tortu Dayanımı	Galvanik	Aşınma
Bronz			10	5	10
NiAl Bronz	4	9	8	6	10
Ni-Cu Alaşımı			4	8	5
Karbon Çeliği				1	8
Paslanmaz	4	6	1	4/7	6
6Mo	9	6	1	9	5
Dubleks	5	9	1	8	4
Süper Dupleks	9	9	1	10	3
Ni Alaşımı 625		12	1	10	3
Ni Alaşımı C22			1	10	3
Titanyum			1	9	2

Maliyet, malzeme seçiminde sıklıkla belirleyici bir etkindir ve bazen tek seçenek olarak görülür. Pompa çarkı malzemelerinin birim hacim başına döküm maliyetleri Şekil 6'da verilmiştir [10].



Şekil 6. Hacim başına nispi döküm maliyetleri [10].

Karşılaştırmada yol gösterme amaçlanmıştır. Şekil 6'daki değerler geçmiş yıllardaki benzer karşılaştırmalardır. Bronzun yoğunluğu NAB'dan daha büyüktür. Böylece bronz malzeme fiyatları kilogram başına benzer olmasına rağmen NAB'dan daha pahalı olmaktadır. Paslanmazlar aynı zamanda NAB'dan daha yoğun ve benzer etkidedir. İşleme fiyatları dahil edilmemiştir, fakat bu genel anlamda 6Mo, dubleks, süper dubleks ve Ni alaşımlarının fiyatlarını NAB'a göre nispi olarak artırmaktadır [10].

Nikel Alüminyum Bronzu (NAB), deniz suyu uygulamalarında çok yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu konudaki mükemmeliyeti ile geniş ölçüde tanınır. Dikkat çeken ve pahalı süper dubleks alaşımlar, nikel alaşımları ve titanyum ile dökme demir ve karbon çeliği gibi düşük maliyet seçenekleri arasında maliyet bakımından yerini alır ve bir alternatif olarak temsil edilir. NAB, yüksek sıcaklık ve sülfür çevre sınırlamalarına rağmen özellikle deniz suyu hizmeti için kullanışlıdır [10]. Cazip özellikleri yüzünden NAB, hem tatlı su hem de tuzlu su hizmetlerinde pompalar, vana parçaları, rakorlar, dişliler ve pervaneler gibi bileşenler için geniş ölçüde kullanılır [12]. Nikel alüminyum bronzun temel avantajları aşağıda özetlenmiştir [10-12].

- Paslanmaya dirençli malzemelerle karşılaştırıldığında daha ekonomiktir.
- Deniz ortamında korozyona karşı üstün dayanım gösterir (Korozyon, oyuklaşma ve kavitezyon üzerinde genel performansı, süper dubleks alaşımlarla karşılaştırılabilir ve belirleyici şekilde standart alaşımlardan daha iyidir).
- Genel bronz alaşımları arasında iyi bir mukavemet-sıcaklık değerine sahiptir.
- Uygulamalarda tesisat elemanı olarak istenen malzeme özelliklerini en iyi seviyede sağlamaktadır.
- Orta dereceli çekme dayanımı ile birlikte hem aşırı düşük hem de yüksek sıcaklıklarda iyi kırılma tokluğu sergiler (Kriyojenik hizmet için uygundur).
- Düşük sürtünme katsayısına sahip olup, aşınmaya karşı yüksek dayanım gösterir.
- Kıvılcım çıkarmayan davranış sergiler.
- Yüksek sönümlenme kapasitesi vardır.
- Elektrik ve ısı iletkenliği oldukça iyidir.
- Denizcilik uygulamalarında korozyona ve yorulmaya karşı dayanımı yüksektir.

1.2.1. Denizcilik Uygulamaları

Nikel Alüminyum Bronzu'nun bazı bileşimlerinin denizcilik uygulamaları için çok yaygın kullanılması, onun "Pervane Bronzu" olarak da anılmasına neden olmuştur. Kabul edilebilir mukavemet ve sertlik ile yorulma, korozyon, kavitezyon ve aşınma direnci de dahil olmak üzere, bu özelliklerin eşsiz bir kombinasyonunu sergilemesi, onu donanma pervane malzemesi olarak kullanılmak üzere mükemmel bir seçim kılmıştır. Bu bronzlar, Alüminyum, Nikel, Demir ve Mangan katkılı bakır bazlı alaşımlardır. ASTM B 148-78 şartnamesi C95800 tanımı, bu alaşım ilavelerinin her biri için nominal değerleri belirler. Pervane bronzu alaşım maddelerinin kabul edilebilir sınırlar içindeki nominal ağırlık yüzdeleri Tablo 5'de listelenmiştir [13].

Tablo 5. NAB için bileşim verileri (ağırlıkça %) [13].

Element	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Si	Pb
Min -	(min)	8.5-9.55	4.0-5.0	3.5-4.5	0.8-1.5	0.10	0.03
Max	78.0					(max)	(max)
Nominal	81	9	5	4	1	-	-

Bu malzemenin kullanımı ile ilişkili problemler genellikle imalat sırasında ortaya çıkar. İmalat sırasında, gemi pervaneleri çok büyük kalıplara dökülür. Tek parça halinde dökülen kesitlerin çevre sıcaklığına soğuması o kadar uzundur ki bir haftaya kadar sürebilir. Bu, daha kalın bölümler için 10^{-3} °C/s 'ler mertebesinde çok yavaş bir soğuma oranına tekabül eder. Bu yavaş soğuma hızının sonucu olarak ortaya çıkan çok iri tane yapısı, malzeme özelliklerinin zayıflamasına neden olur. Öte yanda, dökümün ince kesitlerinde daha hızlı bir soğuma oranı ile karşılaşır. Çeşitli et kalınlıklarındaki soğuma oranlarının geniş varyasyonu nedeniyle, NAB mikro yapısı bazen ayrışma ve gaz çıkışı sergiler, bu durum gözeneklilik ile sonuçlanır. Bu gözeneklilik, imalat işleminde, gözenekleri doldurmak için füzyon kaynak, x-ray veya ultrasonik muayene, taşlama ve olası yeniden kaynak yapmayı gerektiren ek zorluklar yaratır. Bu gözenekliliklerin tamiri, tekrarlanan bir onarım döngüsüne neden olabilir, pervane döküm sonrası işleme süresi 18 aya kadar sürebilir. Döküm sonrası SKP'nin işlemi, füzyon kaynakla onarım döngüsünün yerini almasına yönelik çalışmalar da yapılmaktadır. SKP seçici olarak pervane yüzeyinin

belirli bölgeleri ya da tüm döküm yapısını iyileştirmek için de kullanılabilir. SKP malzeme yüzeyini pekiştirir ve pervane yüzey tabakası yakınındaki gözenek gibi kusurları giderir. SKP ile döküm sonrası işleme zamanının önemli ölçüde azaltılabileceği ve hem zamandan hem de paradan tasarruf edilebileceği öngörülmüştür. Şekil 7’de bir pervane üzerinde SKP yapan robotik bir kol görülmektedir [13]. İlgili çalışmada, sadece kavitasyon hasarına uğrayan bölgenin SKP ile iyileştirilmesi yapılmıştır. SKP parametrelerinden takım baskı kuvveti belirlenmemiş, ayrıca farklı paso proses işlemleri, bunların mikroyapı görüntüleri ve performansları kıyaslanmamıştır.

Her ne kadar denizcilik uygulamalarında çok sık tercih edilen bir alaşım olsa da, hidrojen sülfür içeren sularda çalışılacak uygulamalarda tercih edilmemektedir.



Şekil 7. Bir gemi pervanesi ve SKP yöntemi ile işlenmiş alanlar [13].

1.2.2. Tesisat Uygulamaları

Tesisat elemanlarında NAB malzeme kullanmanın özellikle vanalar ve pompa çarklarında, kayda değer avantajları bulunmaktadır. Korozyon performansları sebebiyle bilhassa deniz suyu uygulamalarında elverişli ve kullanışlıdır, özellikle klorür çukurlaşmasına karşı dirençleri mükemmeldir. İyi kalitede istikrarlı döküm üretme

tekniklerinin geliştirilmesi ile beraber 6Mo, dubleks ve süper dubleks çeliklerde kapsamlı tahribatsız muayeneye çok daha az ihtiyaç duyulmaktadır [14].

Mekanik olarak, NAB diğer popüler korozyona dayanıklı alaşımlar ile karşılaştırılabilir, ancak bu özelliklerden tam olarak yararlanmak için, özel olarak belirlenen basınç-ısı değerlerinin kullanılması gerekir. Aşınmaya ve malzeme kaybına karşı mükemmel özellikleri, NAB vanaların uzun ömürlü ve iyi performans sağlamasına yardımcı olur [14].

NAB vanalar için çeşitli sınırlar vardır, sülfürik ortamlarda kullanılmamalıdır ve akış sınırlamaları hesabı dikkate alınmalıdır. Dökme demir ve çelik vanaların rekabeti korumak için ek iyileştirmelere ihtiyacı vardır. Kalite ve dayanıklılık rekabetin edebilme gücünü belirler. Paslanmaz çelik vanalar deniz suyunda, ciddi çatlak korozyonu ve çukurlaşmadan zarar görürler ve 6Mo, dubleks ve süper dubleks paslanmaz çelik vanaların maksimum klor içeriğine sahip 20°C'deki deniz suyunda çalışabilmeleri için sınırlar vardır. Daha egzotik yüksek alaşımların masrafı kritik bir faktör haline gelir, kullanılmasını savunmak için özel sebeplere ihtiyaç vardır [14].

Piyasa fiyatları değişirken, bakır fiyatlarındaki son artışlara rağmen, NAB, deniz suyunda çalışma için uygun maliyetli bir vana malzemesi olmaya devam etmektedir. Bununla birlikte, boru malzemesi ile uyumluluk vana malzemesini belirleyen önemli bir faktördür. NAB'ın üstün yönlerinin fazla olması önemli bir avantajdır ve onu tercih edilebilir kılmaktadır [14].

1.2.3. Pompa Uygulamaları

Tuzlu suda çalışacak etkin malzeme konstrüksiyonu ile ilgili yirminci yüzyılda büyük gelişmeler olmuştur. Pompalarda, metal teknolojisi, bu yüzyılın ilk yarısında pirinç döküm ünitelerden, günümüzde son derece pahalı titanyuma doğru gitmiştir. Bu genel görünümde, düzgün çalışan orta fiyatlı Nikel Alüminyum Bronz alaşımlı pompa ünitelerinin modern alanda başarılı olduğu, 40 yıllık deniz suyu uygulamaları ve elde edilen ampirik verilerle desteklenmiştir [15].

Deniz suyu uygulamaları için unutulmamalıdır ki, NAB'ın mükemmel özellikleriyle birlikte doğru pompa tasarımı ve uygulaması, ideal bir pompayı sağlamak için gereklidir. Dalma hattı çukurlaşmasını azaltmak için, uygun şekilde tatlı su basmak ve genişletilmiş ikmal sürelerinde tam drenaj yapmak için tasarlanmış NAB malzemedan yapılan pompa

ünitesinin maliyeti, ostenitik paslanmaz çeliklere göre, daha düşük ilk kurulum maliyeti ile çalışacak ve daha az bakım gerektirecektir. Dalma gerilim direnci nedeniyle ortaya çıkan kavitasyon, dönen çark tarafından geliştirilen yüksek hızlar ve yüksek gerilme baskısı limitine sahip olan bir ses basıncı sınırı nedeniyle aşınmalar ortaya çıkmaktadır. Günümüzde, bu gibi sorunlara karşı, diğer elementler ile en başta alüminyum, nikel ve demir ile alaşım yapılması sonucu, bakırın sadece mükemmel korozyon direnç özelliğini sağlamakla kalmayan bronz alaşımları üretilmiştir [15].

1.2.4. Uygulamalarda Karşılaşılan Sorunlar

Birçok uygulamada başarılı bir performans sergileyen NAB malzemeler için en büyük sorun yüzey düzgünsüzlükleri ve porozitedir. Akışkanlar ile çalışılan uygulamalarda yüzeyde var olan düzgünsüzlükler, akışın yüzeye yakın sınır tabakasında hız değişikliklerine neden olmaktadır. Bernoulli ilkesine göre akış içerisindeki hız değişimi basınç ile doğrudan ilişkilidir. Akışkan içerisindeki hızın artması, ilgili noktadaki basıncın düşmesi anlamına gelmektedir. Eğer akışkan içerisindeki bir noktanın yerel basıncı, suyun kritik buhar basıncının altına düşerse, o noktadaki su molekülleri buhar fazına geçer ve kabarcık oluşturur. Akış etkisi ile bu kabarcık yüksek basınç noktasına geçtiğinde ise kendi içerisine büzülerek patlar ve yerel olarak çok yüksek basınç dalgaları oluşturur.

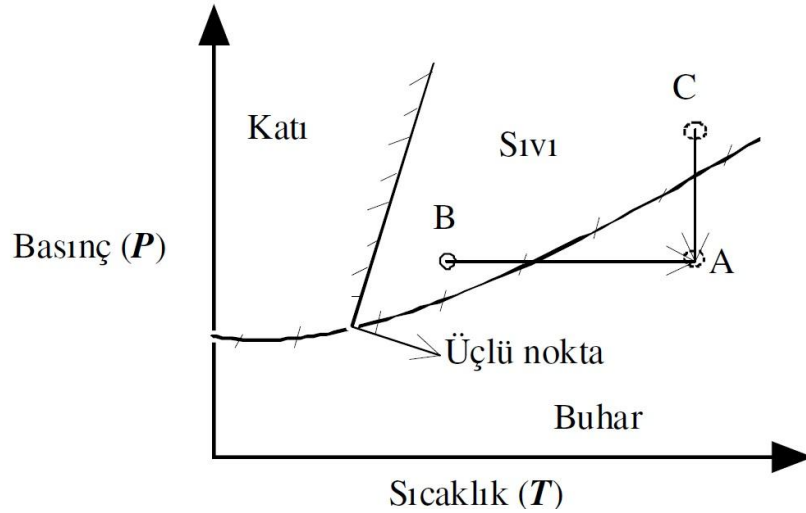
Bu nedenle NAB malzeme yüzeyinin iyileştirilmesi, akışkan ile çalışılan uygulamalarda çalışma ömrü açısından kritik öneme sahiptir. İşte bu aşamada yüzey iyileştirmeleri yani yüzey işlem teknolojileri önemli ölçüde ihtiyaç duyulan yöntemlerdir.

1.3. Kavitasyon

Kavitasyon, su veya herhangi bir akışkan içerisindeki hız artışı veya bu akışkan içerisinde hızlı hareket eden herhangi bir cisim nedeni ile oluşan gözlenebilir faz değişim olayıdır. Bernoulli prensibine göre, akışkan içerisindeki hız artışı basıncın azalmasına neden olur. Daha düşük basınç ise akışkan içerisinde soğuk kaynama riski (kaynama noktası değişmez) anlamına gelir. Başka bir deyişle, basınçtaki azalma suyun kaynama noktasını ortam sıcaklığına kadar düşürebilir. Bu durumda içinde su buharı ve erimiş gazlar bulunan, hava kabarcıkları içeren bir tür soğuk kaynama meydana gelir. Bu olay

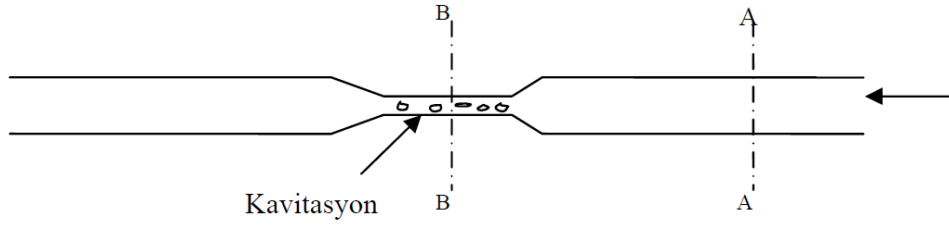
“kavitasyon” olarak bilinir. Kaviteasyon, kaynama olayından farklı bir olaydır. Çünkü kaynama olayındaki buharlaşma sabit basınçta sıcaklık artışı ile meydana gelirken kaviteasyon olayındaki buharlaşma ise hemen hemen sabit sıcaklıkta basınç düşüşü ile meydana gelir. Buharlaşmanın meydana gelmesi için bir miktar ısı gerekir, ancak kaviteasyonlu akışta bu miktar çok küçüktür [16].

Herhangi bir sıvı için faz diyagramı Şekil 8’de verilmektedir. B noktasındaki bir sıvıda sıcaklık artırılarak, C noktasındaki bir sıvıda da basınç azaltılarak aynı A noktasına gelinebilir. Yani bir sıvının basıncı düşürülerek veya sıcaklığı artırılarak buhar fazına geçmesi sağlanabilir. C’den A’ya geçişte kaviteasyon, B’den A’ya geçişte ise kaynama olayı meydana gelir [17].



Şekil 8. Herhangi bir sıvı için faz diyagramı [16].

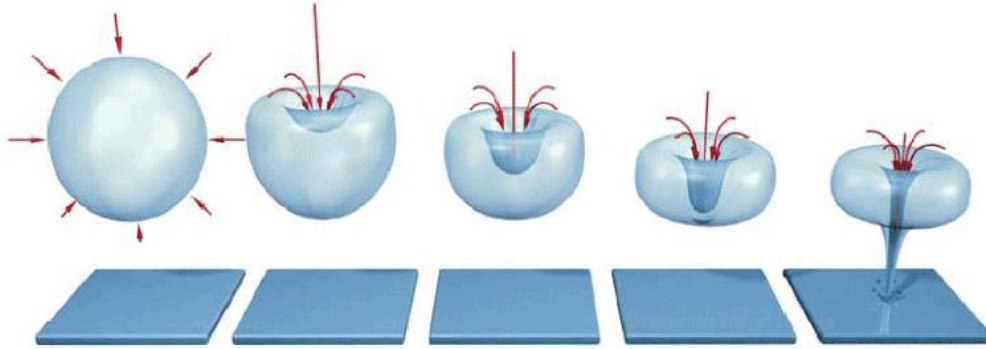
Olayı daha iyi kavrayabilmek için, Şekil 9’da gösterildiği gibi içerisinde su geçen bir boru ele alınmaktadır. A-A kesitinden birim zamanda belirli bir miktar su düşük hızda geçmektedir. B-B kesitinde ise boru daralmaktadır. Süreklilik prensibine göre yine aynı miktarda su birim zamanda B-B kesitinden geçmek zorunda olduğundan akışkanın hızı artar ve böylece su hızlanır. Akıştaki bu hızlanmayı oluşturan kuvvet A-A kesiti ile B-B kesiti arasındaki basınç farkıdır. B-B kesitindeki basınç, A-A kesitindeki basınçtan daha azdır. Dolayısıyla B-B kesitinde kaynama riski vardır. Yeterince yüksek hızlarda kaynama noktası su sıcaklığına kadar düşer ve su kaynamaya başlar [17].



Şekil 9. Daralan bir boru içindeki kavitasyon olayı [17].

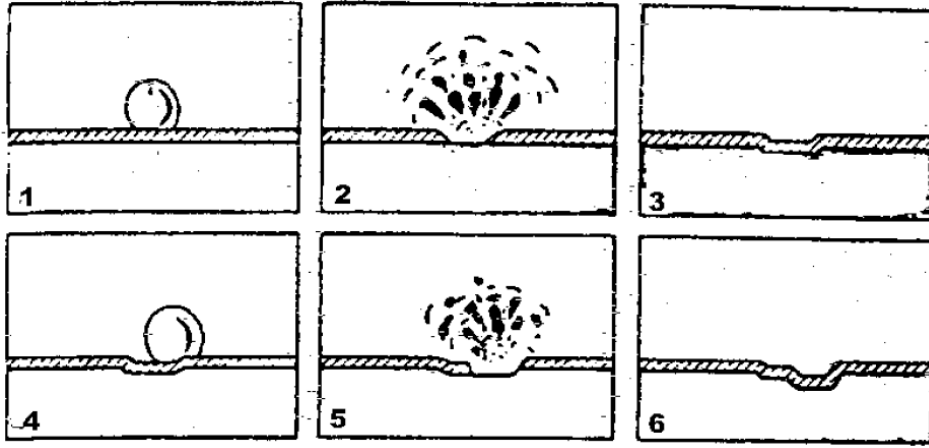
Boru genişlediğinde suyun hızı azalır, buna bağlı olarak basınç ve kaynama noktası yeniden yükselir. Artan basınç karşısında kabarcıkların aniden patlamasıyla boru çeperinde sert etkiler oluşur. Bu darbeler öylesine kuvvetlidir ki çoğu kez duyulabilir ve meydana getirdiği kavitasyon erozyonu ile malzemeyi aşındırabilir [16].

Buhar kabarcıkları akımla birlikte taşınır. Basıncın yüksek olduğu bölgelere taşınan kabarcıklar aniden yoğuşur ve yüzeyde çok yüksek gerilmelere neden olur. Öyle ki bu gerilmeler yerel olarak 1,5 GPa mertebelerine kadar çıkabilmektedir [3]. Şekil 10'da kabarcıkların yoğuşarak patlaması şematik olarak verilmiştir.



Şekil 10. Kabarcıkların yoğuşması [18].

Bu denli yüksek gerilmeler metal yüzeyinde aşınmalara neden olur. Bu aşınmalar zamanla yüzeyde pürüzlülük oluşturur ve kabarcıklar akış yüzeyinde bulunan bir engele çarparak parçalanır. Bu olay genellikle metal yüzeyinde patlama şeklinde meydana gelir ve metal yüzeyi üzerinde kuvvetli bir emiş (vakum) etkisi yaparak metalin o noktada oyulmasına neden olur. Şekil 11'de de görülebileceği üzere, oluşan bu oyuk yeni kabarcıklar oluşmasına ve oyuğun gittikçe büyümesine neden olur [19].



Şekil 11. Metal yüzeyinde patlayan kabarcıkların oyuk oluşturma [19].

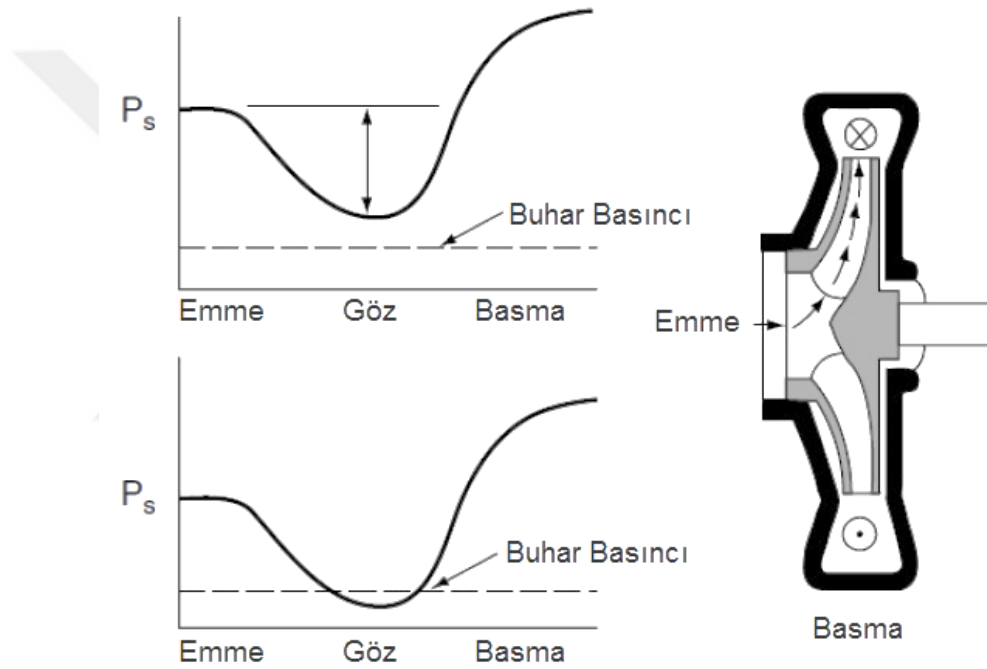
1.3.1. Pompalarda Kavite ve Etkisi

Kavite ve onun pompa hidrolik tasarımı üzerine etkileri, son yıllarda araştırmacıların bilimsel-teknik hedeflerinden biri olmuştur [20].

Bu olguyu araştırmak için, santrifüj pompalar üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların önemli bir sonucu olarak, günümüzde pompalar kaviteye karşı yüksek hızlarda dahi güvenle çalışabilmekteler. Birçok araştırmacı, kavite ile ilişkili pompa arızalarının, pompa tipi, tasarım tipi ve emme özgül hız kullanımı gibi çok sayıda tasarım ve operasyonel parametrelere bağlı olduğunu vurgulamaktadırlar [20].

Kavite (cavitation) terimi, içi boş bir alan veya bir boşluk anlamına gelen latince'deki "cavus" dan gelmektedir. Santrifüj pompa bağlamında, kavite terimi, sıvı pompa boyunca akarken, büyümeleri ve müteakiben çöküşleri, sıvı içerisinde kabarcık oluşumunun dinamik bir süreci anlamına gelmektedir. Santrifüj pompa içerisinde sıvının buharlaşması söz konusu olabilir. Pompalanma sıcaklığında, yerel statik basınç sıvının buhar basıncının altına düşer, dahili bir emme sistemindeki statik basınç azalışının ortaya çıkmasının başlıca nedeni çark gözündeki hız artışıdır (Şekil 12). Çalışma koşullarında herhangi bir değişiklik olmadığı sürece, yeni kabarcıklar oluşmaya devam eder ve eski kabarcıkların boyutu büyür. Kabarcıklar daha sonra bir sıvı içerisinde kanatçık arka kenarı boyunca çark gözünden çark çıkışına akış içerisinde taşınır. Çark dönmesi eylemi nedeniyle, kabarcıklar çok yüksek bir hıza ulaşır ve sonuçta çark içerisinde çökmeye başladıkları yüksek basınç bölgesine varırlar. Buhar kabarcıkları çark kanatları boyunca hareket ederken, kabarcıkların etrafındaki basınç, kabarcık dışındaki basıncın kabarcık

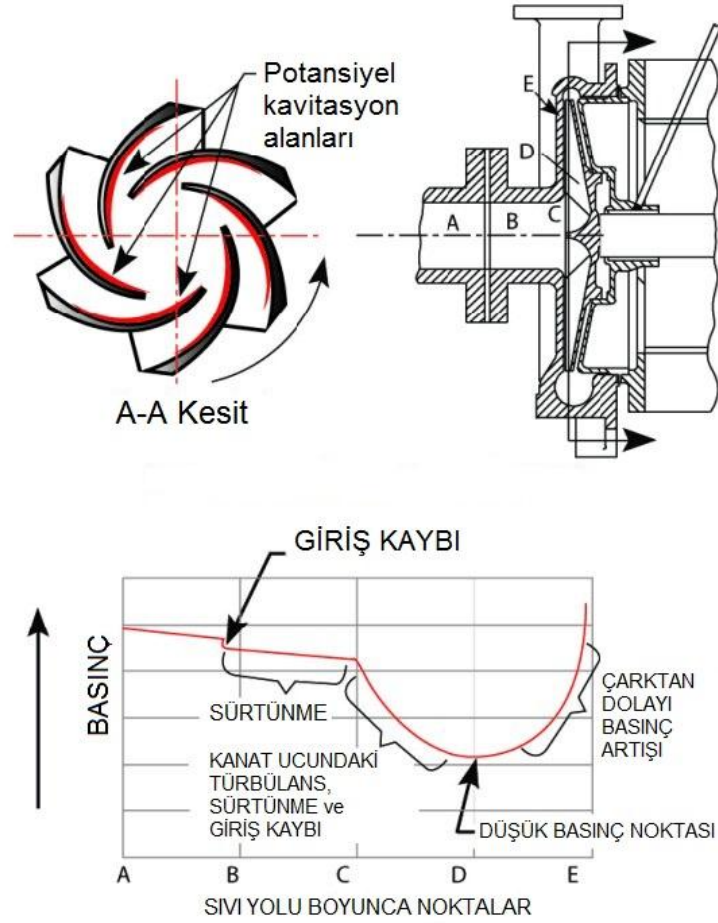
içerisindeki basınçtan büyük olduğu noktaya ulaşıncaya kadar artmaya başlar ve sonra kabarcık çöker. Bu süreç bir patlama değil fakat bir içe çöküş şeklindedir. Yüzlerce kabarcık aynı çark kanadı üzerinde yaklaşık olarak aynı noktada çöker. Kabarcıklar asimetrik olarak da çöker, öyle ki çekiçleme işlemi oluşur. Yüksek lokalize çekiçleme etkisi çark kanadı üzerinde çukur (oyuk) oluşturabilir. Kabarcık çöküşünden sonra, bir şok dalgası çöküş noktasından dışarıya doğru yayılır. Bu tür kavitasyon $NPSH_A$ (Net Positive Suction Head Available – Erişilebilir Net Pozitif Emme Yüksekliği) yetmezliği olarak bilinir [20].



Şekil 12. Pompa fanı içerisinde basıncın buhar basıncının altına düşmesi [3].

Kavitasyon hasarı, bir santrifüj pompada küçük çukurcuklardan felaketle sonuçlanabilecek arızalara neden olabilir ve pompalanan akışkan karakteristiklerine, enerji seviyelerine ve kavitasyon süresine dayanır. Çoğu hasar genellikle çarkın içinde; özellikle, kanatların basınç olmayan taraflarının sırt kısımlarında (Şekil 13) meydana gelir. Çark kanadında gözlenen net etki iz lekesi, kaba yüzey ve metal erozyonundan kanatların şiddetli incilmesi şeklinde olacaktır (Şekil 14). Kavitasyonun, bir hidrolik makinenin sabit parçalarında bile veya dönen parçalarında (örneğin bir santrifüj pompanın çarkı gibi) ortaya çıkabileceğinden söz edilir. Sıvı içerisindeki katkı maddeleri buhar basıncının yanı

sıra sıvının aşındırıcı özelliklerini de yükseltmesi sebebiyle kavitasyon hasarını artırabilir. Farklı malzemeler farklı kavitasyon direnci gösterir. Genel olarak, bu olaya tamamen dirençli hiçbir malzeme yoktur. Rijit plastik ve kompozitler normalde kavitasyona az dayanıklı malzemelerdir. Aynı kavitasyon koşulları altında, çok yaygın olarak kullanılan metallere dökme demir ve pirinç çok hasar alırken, paslanmaz çelik, titanyum, nikel, alüminyum ve bronz daha az hasar alacaktır [20].



Şekil 13. Santrifüj pompa içerisindeki basınç profili [21].



Şekil 14. Bir pompa çarkı üzerinde oluşan kavitasyon hasarı [22].

1.3.2. Pompalarda Kavitasyonlu Çalışma Rejimleri

Pompaların kavitasyonlu çalışması durumunda aşağıdaki durumlar ortaya çıkabilir;

1.3.2.1. Hidrolik Performans Kaybı

Pompa çarkı içerisinde yerel basınç düşümlerinin olduğu bölgeler kavitasyonun ilk olarak oluşacağı bölgelerdir. Bu bölgelerdeki basınç bölgesel olarak buharlaşma basıncının üzerine yükseltilebilirse kavitasyon ortadan kalkacaktır. Eğer emme hattında yeterli basınç sağlanamamışsa, pompa basma yüksekliği kavitasyonsuz duruma göre daha düşük seviyelere çekilir. Bu durumda pompa gerekli debiyi sağlayamaz. İkinci bir durumda ise, pompa optimum çalışma noktasının solundaki çok düşük debi değerlerinde çalışıyorsa, çark tarafından harcanan enerjinin büyük bir kısmı akışkanı ısıtmaya harcanacaktır. Bu durumda sürekli çalışma halinde akışkan buharlaşmaya başlayacak ve pompa kavitasyona girecektir [23].

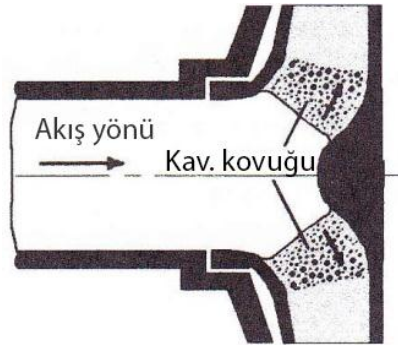
1.3.2.2. Hidrodinamik Sebeplerle Oluşan Kaviteye Bağlı Kararsızlık

Pompalar kısmi debilerde çalışırken akış açısı ile çark kanadı giriş açıları arasında uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır. Bu durum ön yanağa yakın yerlerde daha belirgindir. Böyle durumlarda emme borusuna doğru bir resirkülasyon akımı başlamaktadır. Bu sirkülasyon debi kısıldıkça daha da artacaktır. Böylece ortaya çıkan düşük basınç alanlarında kaviteye ortaya çıkmaktadır. Buhar fazına geçen akışkan emme hattına doğru ilerledikçe daha düşük basınç gradyanlarıyla karşılaşmakta ve kaviteye bulutunun boyu büyümekte, çökmesi ise gecikmektedir. Bu kararsızlık tipik olarak 2-10 Hz aralığında bir frekansa sahiptir [23].

1.3.2.3. Termodinamik Sebeplerle Oluşan Kaviteye Bağlı Kararsızlık

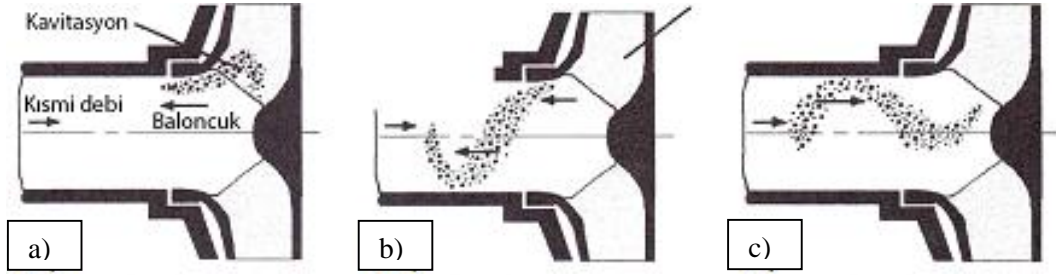
Emme borusundaki basınç, akışkanı sıvı fazında tutmaya yetmeyecek kadar azsa, pompa içerisinde ve hatta tesisat borularında kaviteye oluşabilir. Bu durumda ve benzer olarak buhar bukleleri olması durumunda ortaya çıkan ekstra buhar hacmi pompa gövdesi içerisindeki basıncı arttırmaktadır [23]. Yukarıda özetlenen durumlara bağlı olarak pompalarda 3 çeşit kaviteye çalışır rejimi tanımlanmıştır.

Kararlı çalışma rejimi pompa görev karşılamama durumu ile ilişkili olarak ortaya çıkmaktadır. Bu rejim herhangi bir debi değerinde gerçekleşebilir. Buhar akışı gözlemlenebilir ve buhar kabarcıklarının kapladığı hacim zamandan bağımsızdır [23]. Şekil 15'te pompa fanı içerisinde buhar kabarcıkları oluşumunun şematik görüntüsü verilmiştir.



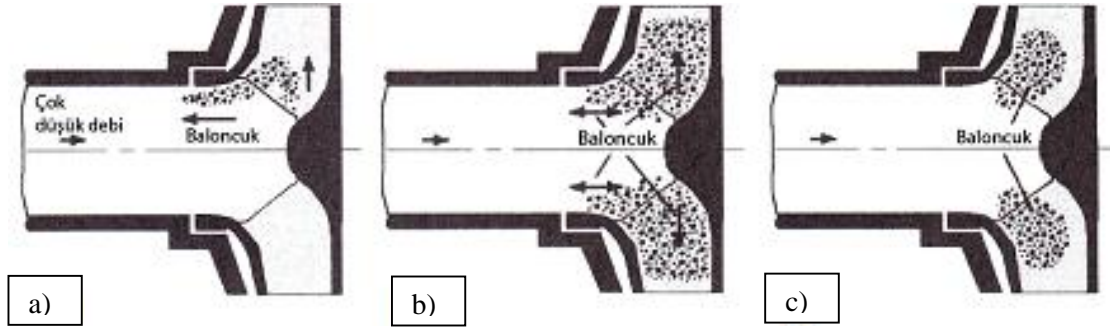
Şekil 15. Buhar kabarcığı oluşumu [23].

Kararsız çalışma rejimi hidrodinamik sebeplerle oluşan kavitasyona bağlı kararsızlığın sonucunda ortaya çıkar. Bu rejim düşük debi değerlerinde gözlenebilir. Buhar kabarcıklarının hacmi zamana bağlı olarak değişir [23]. Şekil 16'da kararsız rejimde akışkan içerisinde kabarcıkların davranışları şematik görüntü olarak verilmiştir.



Şekil 16. a) Kabarcık başlangıcı, b) büyüme ve ilerleme, c) çökme [23].

Geçiş çalışma rejimi termodinamik sebeplerle oluşan kavitasyona bağlı kararsızlığın sonucunda ortaya çıkar. Çok düşük veya sıfır debi şartlarında ortaya çıkar. Buhar akışının izlenmesi güçtür. Buhar kabarcıklarının hacmi patlamaya kadar büyümeye devam eder [23]. Şekil 17'de bu mekanizmanın şematik görüntüsü verilmiştir.

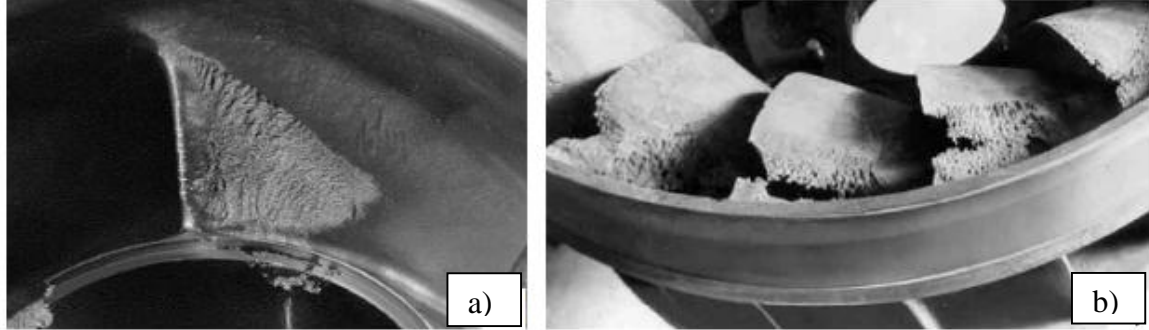


Şekil 17. a) Kabarcık başlangıcı, b) parçaların büyümesi, c) kısmi olarak çökme [23].

1.3.3. Kavitasyon Erozyonu

Buhar parçacıklarının yüksek basınç altında patlamasıyla metal yüzeylerinde bir hasar mekanizması ortaya çıkmaktadır. Parçacıklar metal yüzeylerinden uzakta patlarsa hasar meydana gelmeyebilir. Bunun için malzeme yüzeylerindeki hasara bakarak

kavitasyon yoğunluğu hakkında bir tahminde bulunmak güçtür. Şekil 18’de pompa çarkı ve Francis türbini üzerinde oluşan kavitasyon erozyonu görölmektedir.



Şekil 18. a) Santrifüj pompa çarkında kavıtasyona bağlı erozyon b) bir Francis türbininde kavıtasyona bağlı malzeme kaybı [23].

1.4. Kavıtasyon Çeşitleri

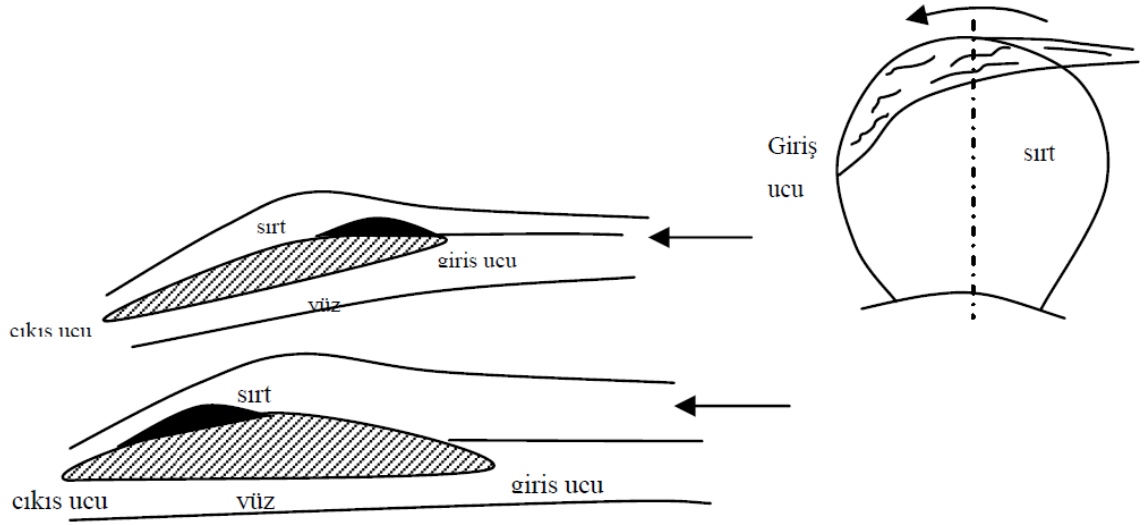
Kavıtasyon olayını kontrol eden ana parametre basınç gradyenidir. Ancak, kavıtasyon çok farklı şekillerde görölür ve etkileri karmaşıktır. Gemi pervanelerinde görölen kavıtasyon türlerini genel olarak aşığıdaki gibi iki grupta toplamak mümkündür.

- 1-) Pervane kanadı üzerinde oluştuduğu konuma göre kavıtasyon çeşitleri
- 2-) Fiziksel görünüşüne göre kavıtasyon çeşitleri

1.4.1. Pervane Kanadı Üzerinde Oluştuduğu Konuma Göre Kavıtasyon Çeşitleri

1.4.1.1. Sırt Kavıtasyonu

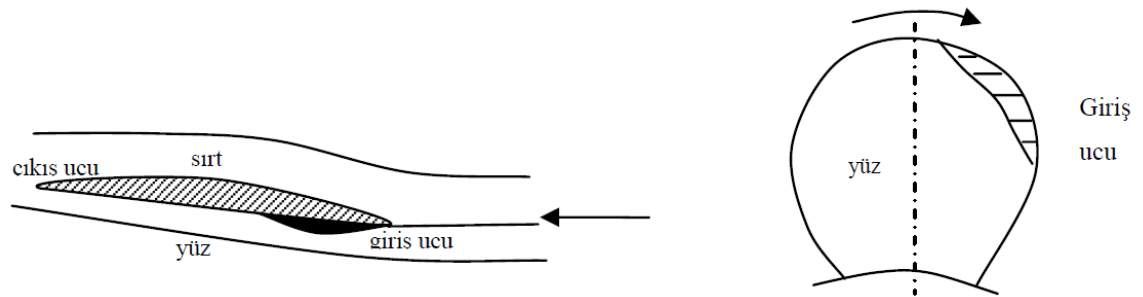
Sırt kavıtasyonu genellikle pervane kanat kesitlerinin pozitif hücum açılarında çalışması durumunda kesitin giriş ucu civarında, emme kısmında, küçük hatvelerde, ilerleme hızının sıfır ya da çok küçük olduğu ağır yükleme şartlarında oluşan kavıtasyon türüdür. Kanat kesit profilinin sıfır dereceye yakın hücum açılarında çalışması durumunda kesitin çıkış ucu civarında, emme kısmında maksimum kesit kalınlığının gerisinde de bu tür kavıtasyon meydana gelir [16].



Şekil 19. Sırt kavitasyonu şematik görüntüsü [16].

1.4.1.2. Yüz Kavitasyonu

Yüz kavitasyonu genellikle pervane kanat kesitlerinin negatif hücum açılarında çalışması durumunda kanat kesitlerinin giriş ucu civarında basınç kısmında oluşan kavitasyon türüdür. Burada akım kanat kesitinin giriş ucuna yakın yüz kısmında hızlanır ve kavitasyon başlar [16].



Şekil 20. Yüz kavitasyonu şematik görüntüsü [16].

1.4.2. Fiziksel Görünümlerine Göre Kaviteasyon Çeşitleri

1.4.2.1. Uç ve Göbek Girdap Kaviteasyonu

Pervane kanatlarının basınç kısmındaki yüksek basınç ve emme tarafındaki düşük basınç akımının kanat ucundan ayrılmasına neden olur. Böylece her kanadın ucunda ve pervane göbeğinde girdaplar oluşur. Yüksek devirli pervanelerde ve yüksek iz katsayısı içinde çalışan pervane kanatları üzerinde şiddetli girdaplar meydana gelir. Dönme esnasında, merkezkaç kuvvetinin etkisi ile girdap merkezindeki basınç akışkanın buharlaşma basıncının altına düşmekte ve kaviteasyon oluşmaktadır [16].

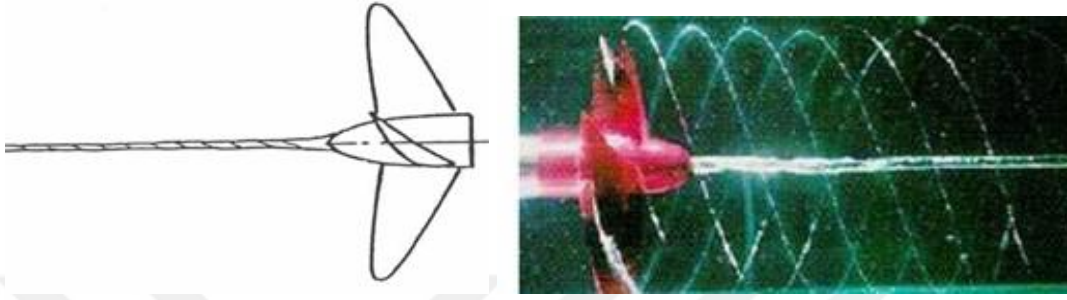
Uç girdap kaviteasyonu, ilk olarak pervane kanadının uç kısmında belirli bir uzaklıkta ortaya çıkar. Genellikle ilk meydana gelen kaviteasyon çeşididir. Bu özelliğinden dolayı “bağlı olmayan-serbest girdap” olarak da adlandırılır. Serbest girdaplar, ya yüksek kanat yüklenmelerinde ya da düşük kaviteasyon sayılarında meydana gelir ve şiddetli etkiye sahiptir. İlk oluştuğu andan itibaren devir sayısının artması ile yavaş yavaş kanat ucuna doğru hareket eder ve sonunda sanki kanat ucunun bir parçası şeklinde bu kısma tutunur, kanat ucu gerisinde kendisini bir helis şeklinde gösterir (Şekil 21). Bu kaviteasyon çeşidinin başlangıcını tayin etmek kaviteasyon incelemeleri içerisinde yer alan en zor problemdir. Çünkü uç girdap kaviteasyonu hem çekirdek oluşumuna hem de viskoz ölçek etkilerine hassas bir kaviteasyon türüdür. Bu kaviteasyon türü özellikle donanma gemilerinde hıza ve ilk harekete geçme anına etki etmektedir [16].



Şekil 21. Uç girdap kaviteasyonu şematik ve gerçek görüntüleri [16].

Göbek girdap kaviteasyonu ise her bir pervane kanadının kök kısmından göbeğe doğru saçılan ve akış içindeki moleküller arasındaki bağı bozan zayıf bölgeleri oluşturan kaviteasyon çekirdekleri nedeni ile oluşur (Şekil 22). Bu kaviteasyon tipi, aynı zamanda,

pervane arkasındaki dümene de zarar verebilir. Bundan korunmak için, pervane kanatlarına veya dümene pervane göbek finleri konulmaktadır. Bu yapılar, akım hızını pervaneye doğru arttırarak akımı düzeltir. Ancak, finlerin dezavantajı her takıntı gibi tekne direncini arttırmasıdır [16].



Şekil 22. Göbek girdap kavitasyonu şematik ve gerçek görüntüsü [16].

1.4.2.2. Kabarcık Kavitasyonu

Bu tür kavitasyonda, akışkan içinde bulunan küçük gaz çekirdekleri düşük basınç bölgesine doğru yayılmaktadırlar. Bu çekirdekler, akışkan ile birlikte hareket ettiklerinden dolayı kabarcık kavitasyonuna “seyahat eden-hareketli kavitasyon” da denilmektedir. Bu tip kavitasyon üzerine ilk çalışma Knopp ve Hollander tarafından 1948 yılında yapılmıştır. Bu araştırmacılar yüksek hızlı fotoğraf tekniğini kullanarak yarı küresel bir yapı üzerinde kabarcık kavitasyonu oluşumunu gözlemlemişlerdir [16].

Şekil 23’te gösterilen kabarcık kavitasyonu, kanat kesidinin kort uzunluğunun ortasında basıncın düşük olduğu yerde, yüksek emme basıncına neden olan basınç dağılımının etkisi ile oluşur. Bu nedenle, kanat kesit sehim dağılımı ve kalınlığı, kabarcık kavitasyonunun oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. Kanat kesitlerinin kısmen ince ve küçük hücum açılarında çalışması durumunda da kabarcık kavitasyonu meydana gelmektedir. Bu tür kavitasyonda oluşan kabarcıklar büyüyerek kanat yüzeyinde patlamaya başlarlar [16].

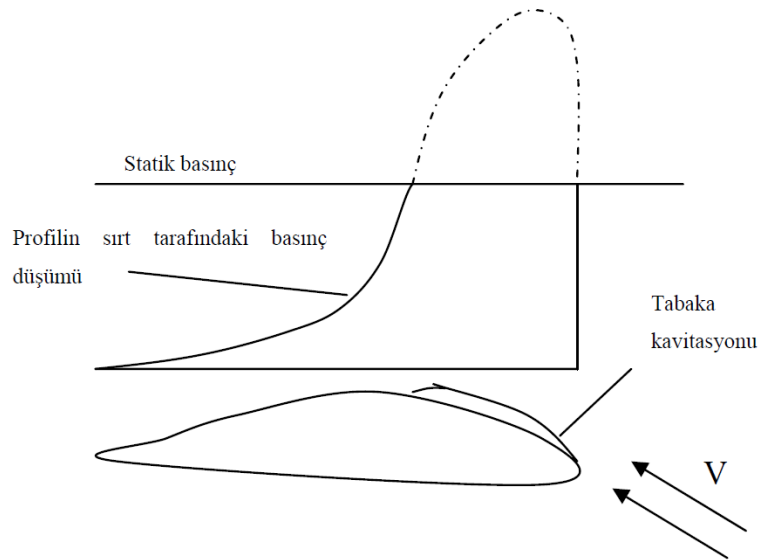
Model ölçeğinde yapılan çalışmalarda, yüksek orandaki kavitasyon çekirdeklerinin etkisi ile bu tip kavitasyonun şiddetli gürültüye sebep olduğu, ancak erozyon yönünden gürültüye göre etkisinin daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 23. Kabarcık kavitasyonu oluşumu [16].

1.4.2.3. Tabaka Kavitasyonu

Şekil 24’te gösterildiği gibi, büyük hücum açısında çalışan bir pervane kanat kesiti üzerindeki basınç dağılımı şiddetli ve ters bir basınç gradyenine sahip olduğunda akım kesitten ayrılır. Daha sonra kesitin emme tarafında basınç dağılımı değişir ve giriş ucuna yakın bir yerde düşük basınç yüksek bir değere ulaşır. Yani maksimum bir emme meydana gelir. Burada minimum basınç buhar basıncından daha düşük olduğu için tabaka kavitasyonu meydana gelir. Bu şekilde oluşan tabaka kavitasyonu kanat kesitine tutunur ve akım tabaka etrafında hareket eder. Tabaka kavitasyonunun bu şekli “kısmi kavitasyon” olarak da adlandırılır. Şayet oluşan kavitasyon kesitin giriş ucunu geçerek basınç tarafına doğru uzanırsa oluşan bu tabaka kavitasyonu “süperkavitasyon” olarak tanımlanır [16].



Şekil 24. Bir pervane kanat kesiti üzerindeki tabaka kavitasyonu oluşumu [16].

Şekil 25’te iki farklı kavitasyon tüneline oluşumu gösterilen tabaka kavitasyonu, uç girdap kavitasyonunu takiben pervane yüklemesinin artması sonucu oluşan bir kavitasyon çeşidi olup, görülen iki etkisi vardır. Bunlardan ilki, bu kavitasyonun gelişmesi ve daha sonra patlaması ile akışkan içinde basınç dalgalanmalarına neden olması, diğeri ise kesitin çıkış ucunda bulut kavitasyonunun oluşumuna öncülük ederek pervane malzemesi üzerinde erozyona neden olmasıdır. Kavitasyon kaynaklı titreşim problemi bu tip kavitasyon nedeniyle oluşur. Gemi gövdesi, rijit bir yapı olduğundan tabaka kavitasyonunun ürettiği basınç dalgalanmalarını bünyesinde toplar. Böylece, gemi gövdesinde büyük kuvvetlerin dolayısı ile titreşimlerin oluşmasına neden olur. Bu olaya serbest yüzey etkisi de dahil olursa sistem daha karmaşık hale gelir [16].



Şekil 25. Tabaka kavitasyonu oluşumu [16].

Tabaka kavitasyonu sonucu tekne üzerinde indüklenen basınç dalgalanmalarının analizinde ana problem, kavitasyon alanı veya hacminin belirlenmesidir. Çünkü basınç dalgalanmaları kavitasyon hacminin zamana göre değişimi ile orantılıdır. Lineer ve lineer olmayan kavitasyon teorisi içinde düzensiz akış içinde çalışan iki ve üç boyutlu hidrofoiller ile pervanelerde görülen tabaka kavitasyonunun önceden tahmini için daha önce de örnekleri verilen birçok sayısal teknik ve deneysel çalışmalar mevcuttur. Tabaka kavitasyonunun önceden tahmini hidrodinamik dizayn ve değerlendirme aşamasında son derece önemli olduğundan, tabaka kavitasyon koşullarını temsilen model deneyleri MIT (Massachusetts Institute of Technology)’de Kerwin tarafından 1994 yılında gerçekleştirilmiştir. [16].

1.4.2.4. Bulut Kavitasyonu

Bulut kavitasyonu genelde tabaka kavitasyonunun gelişimini takiben “sis” veya “bulut” görünümlü küçük kabarcıklar şeklinde, çoğunlukla tabakanın çıkış ucunda ortaya çıkmaktadır (Şekil 26). Bu nedenle, bulut kavitasyonu, “daimi olmayan tabaka kavitasyonu (unsteady sheet cavitation)” olarak da adlandırılmaktadır. Bu kavitasyon tipi, pervane kanat kesiti üzerinde ek olarak üretilen bir sehim meydana getirir veya kanadın iz değerinin maksimum olduğu durumdan ayrıldığında ortaya çıkan sehim artırımını devam ettirir. Bu durum ise, kanat üzerinde yerel yük artışına neden olup, kavitasyon oluşumuna olan eğilimi arttırır. Kararlı bir kavitasyon tabakasının arka ucunda veya tabakanın kararsız davranışının bir sonucu olarak meydana gelen bu kavitasyon çeşidinin gelişim aşamasını kontrol eden bir mekanizma belli değildir, ancak baskın olan bir görüş mevcuttur. Bu da, tabaka kavitasyonunun uç kısmında ve içinde bir “yeniden girişken jet veya re-entrantjet”in oluşmasıdır. Bazı zamanlarda, bu jet akımı, kavitasyon tabakasının yüzeyine çarpar ve tabakanın bir kısmını ayırır. Tabakadan ayrılan bu parça akışkan ile birlikte hareket eder ve daha yüksek basınçların olduğu bir bölgeye geldiğinde ise patlar. Bu olay çok karmaşıktır. Çünkü ayrılan buhar bölgesinin şekli küresel ve iki boyutlu durumdan oldukça uzaktır. Bu özelliği ile bulut kavitasyonu, pervane kanadı üzerinde en fazla erozyona neden olan kavitasyon çeşididir [16].

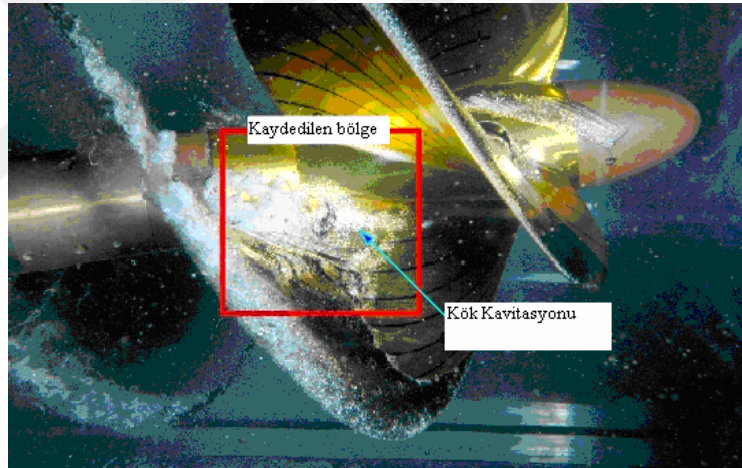


Şekil 26. Bulut kavitasyonu oluşumunun görüntüsü [16].

1.4.2.5. Kök Kavitasyonu

Bu kavitasyon türü, pervane kanadının kök kısmında meydana gelen ve kama şekline benzer bir yapıya sahip olup genelde nadir görülmektedir. Ufak, aşırı yüklü pervanelerde

ve CPP pervanelerinde gözlemlenebilir. Kök bölgesinde, kanat kesitine ait maksimum kalınlık noktasının yakınlarında sırt kısmında oluşabilir. Şekil 27’de, NMRIJ’da, yüksek hızlı video tekniği ile çekilen kök kavitasyon şekli gösterilmektedir. Kök kavitasyonu, şaft braketleri gibi takıntılardan dolayı oluşan dalga iz etkisi ve eğimli bir şaftın oluşturduğu at nalı şeklindeki girdap akımları nedeni ile meydana gelmektedir. Kök kavitasyonunu önlemenin bir yolu kanat kesitinin basınç tarafından kanat köküne doğru küçük bir delik açılması ve böylece emme tarafının kaldırma etkisini hafifletmektir. Delik, genellikle kökün hemen dışındaki kanat kesitinin kort ortasına yerleştirilmektedir. Bu deliğin çapı, 800-1000 mm arasında değişen çaplara sahip pervanelerde 10 mm civarındadır. Kanatlar arasında deliklerin konumunun dikkatli bir şekilde uyum göstermesi amaçlanmalıdır. Elde edilen tecrübelerle göre, deliğin kanada dik değil, şaft eksenine paralel olacak şekilde açılması ile kök kavitasyonunun önlenebileceği belirtilmektedir [16].

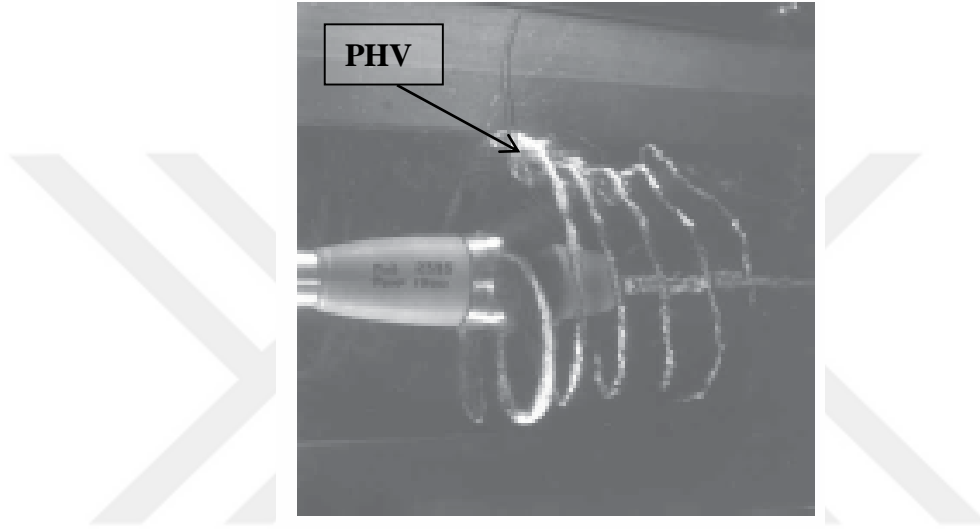


Şekil 27. Kök kavitasyonu genel görüntüsü [16].

1.4.2.6. Pervane - Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV)

Girdap kavitasyonunun özel bir şekli olan bu kavitasyon, büyük ve şiddetli bir iz alanı ile pervane etkileşimi sonucunda meydana gelir. Böyle bir durumda, pervane kanadının ucunda meydana gelen girdap tekneye doğru bir şimşek karakterinde sıçrayarak tekne ile birleşir (Şekil 28). Kısa bir zaman içinde düzensiz aralıklarla oluşur. Başka bir deyişle, pervanede yüksek oranlarda yük artışı olduğunda pervaneye gelen akım az olur. Bu eksikliği ortadan kaldırmak için pervane dönme esnasında tekne arkasından su çekmeye çalışır. Bu durumda teknedeki pervaneye doğru bir akım hattı oluşur. PHV

kavitasyonunun tekneye yakın bölgelerde oluşan farklı akım dağılımları ve türbülans nedeni ile oluştuğu varsayılmaktadır. PHV kavitasyonunun oluşmasına öncülük eden faktörler; düşük pervane ilerleme katsayısı, pervane ile tekne arasındaki açıklığın düşük olması ve pervane üzerinde düz yüzeylerin bulunmasıdır. Kavitasyonun bu çeşidi, pervane kanadına ve tekneye zarar verir. Geniş bir şekilde yüksek gürültü seviyesine neden olur. PHV kavitasyonu dolgun kıçlı gemilerde meydana gelebilir [16].



Şekil 28. PHV kavitasyonu genel görüntüsü [16].

1.5. Pervanelerde Kavitasyonun Etkileri

Pervanlerde kavitasyonun oluşturduğu etkiler ile pompa çarklarında kavitasyonun oluşturduğu etkiler aynıdır. Pervanelerin boyutlarının pompa çarklarına göre daha büyük olması yüzeyin ve hasar etkilerinin incelenebilirliği açısından bir kolaylık sağlamaktadır [16].

1.5.1. Performans Kaybı (İtme Azalması)

Kavitasyon olayının, pervaneler üzerinde performans kaybına neden oluşunun en güzel örneği 1894 yılında İngiliz destroyeri “Daring”de görülmüştür. Gemi hızı 27 knot olarak hedeflenmiş iken ancak 24 knot hıza ulaşılmıştır [16].

Tek bir kanat profili üzerinde meydana gelen kısmi kavitasyonun uzunluğu kort uzunluğunun büyük bir kısmını kapladığı zaman profilin sehimini arttırabilir ve bu nedenle profilin kaldırma kuvvetini de arttırabilir. Profil üzerindeki ortalama basınç arttığında azalan kavitasyon kaldırma kuvvetinde de azalmaya neden olur. Bu azalma derece derece ve oldukça hızlı olur. Buna bağlı olarak, pervaneler üzerindeki farklı kanat kesitleri, farklı koşullarda kaldırma kuvvetindeki azalmadan etkilenecektir. Bu nedenle kavitasyonun pervane itmesi üzerinde etkisi tek bir profil üzerindeki etkisinden daha yavaş olmaktadır. Şayet oluşan kavitasyon, pervanenin farklı boyutsuz yarıçaplarına ait kesitlerin yaklaşık %20 – 25’lik kısmını kapladığında, pervanenin itmesi ve torku azalmaktadır. Ancak itmenin, torka göre azalması daha hızlı olmaktadır. Bu olay, ticari pervanelerde seyrek olarak meydana gelir. Çünkü bu gemilere ait pervanelerin işletme şartlarında, pervane yüklenmesi ve dönme oranı yeterince düşük olabilmektedir. Yüksek yüklü pervanelerde ve özellikle yüksek hızlarda çalışan pervanelerde itme üzerinde kavitasyonun ölçülebilir etkisi fark edilebilmektedir. Tam güçteki savaş gemilerinde veya çekme durumundaki römorkörlerde bu olay ile sık sık karşılaşılmaktadır. Yine hızlı konteyner ve hızlı ferilere ait pervanelerin performansına da kavitasyon etki edebilmektedir [16].

1.5.2. Gürültü Oluşumu

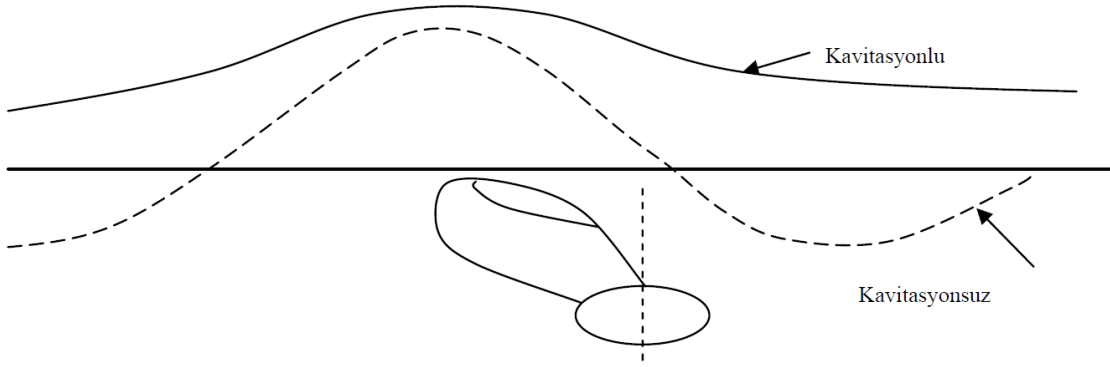
Kavitasyon kabarcığı etrafındaki dış basınç artmaya başladığında kısa bir süre sonra iç ve dış bölgelerdeki basınç gradyeni düşer ve kabarcık patlama konumuna gelir. Kavitasyon kabarcıklarının patlaması sonucu yüksek yerel basınçlar oluşur. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan şok dalgaları yüksek seviyede gürültü meydana getirir. Başka bir deyişle, kavitasyon başlangıç koşulu gürültü seviyesine etki etmektedir. Kavitasyon gürültüsü, hareket eden kabarcıklar, tabaka kavitasyonu, uç girdap kavitasyonu gibi birçok kavitasyon çeşidi tarafından oluşur. PHV kavitasyonu çok şiddetli gürültü oluşturan bir kavitasyon çeşididir. Gemi sistemi tarafından üretilen gürültülerin önemli bir bölümü su altında oluşan pervane kaynaklı gürültüdür. Bir gemi pervanesinin su içerisinde basınç dalgaları üretebilmesi ve bir gürültü artışına neden olması için başlıca dört temel mekanizma vardır. Bunlar: pervane kanatkesitleri tarafından su kütlelerinin yer değiştirmesi, pervane kanadının dönmesi esnasında emme ve basınç kısımları arasındaki basınç farkı, tekne arkasında pervane kanatlarının değişken iz alanı içinde çalışmasından dolayı oluşan kavitasyon hacminin periyodik olarak değişmesi, bir kavitasyon çekirdeği veya girdabın

ani olarak çökmesi, patlamasıdır. İfade edilen oluşumlardan da anlaşılacağı üzere pervane kaynaklı gürültü kavitasyonsuz pervane gürültüsü ve kavitasyonlu pervane gürültüsü olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Pervane ve özellikle kavitasyon kaynaklı pervane gürültüsü savaş gemileri ve yolcu gemileri için oldukça önemli bir yere sahiptir. Çünkü savaş gemilerinin yerlerinin tespit edilmesine neden olmakta, yolcu gemilerinde ise yolcu ve mürettebatın konforuna olumsuz yönde etki etmektedir [16].

1.5.3. Titreşim Oluşumu

Gemi pervane kanatlarında oluşan tabaka kavitasyonu hacimce büyük bir yere sahiptir. Bu büyük buhar hacminin dinamik davranışı su içerisinde şiddetli basınç darbeleri üretir. Dinamik kavitasyon tabakası etrafındaki basınç dalgalanmaları, tabakanın tekneye olan mesafesi ile orantılı olarak değişen geniş bir dalga boyuna sahiptir. Bu nedenle, oluşan basınç dalgalanmaları suyun sıkıştırılabilirlik özelliğinden bağımsızdır [16].

Kavitasyon tarafından indüklenen basınçlar tekne titreşimlerinin oluşmasında etkilidir. Pervane kanadında oluşan kavitasyon olayının meydana getirdiği bu basınç alanı, kavitasyon göstermeyen bir pervane kanadının meydana getirdiği basınç alanından farklıdır. Bu basınç alanları tekne boyunca farklı yerlerde farklı zamanlarda hissedilir. Bu durum, Şekil 29'da gösterilmiştir. Burada, belirli bir zamanda ve konumda olan bir pervane kanadı etrafındaki basınç dağılımı çizilmiştir. Kavitasyon nedeni ile oluşan basınç dağılımı, tekne üzerinde herhangi bir yerde aynı fazda maksimum ve minimum değerine ulaşır. Kavitasyonsuz durumdaki basınç dağılımı ise pervane kanadının akışkan içerisinden geçmesinden dolayı, bir basınç dalgası şeklinde olur. Bu basınç dalgası, tekne yüzeyi üzerinde hareket eder. Kavitasyon tarafından indüklenen basınçların genlikleri $1/r$ (r kavitasyon tabakasına olan uzaklıktır) ile orantılı olarak azalırken, kavitasyonsuz bir pervane kanadının oluşturduğu basınç genliği $1/r_2$ ile orantılı olarak azalmaktadır. Bu nedenle, kavitasyonun meydana getirdiği basınç genlikleri daha hızlıdır. Kavitasyon nedeni ile ek olarak üretilen bu basınçlar tekne bünyesinde toplandığı zaman, kavitasyonsuz pervane tarafından tekne üzerinde oluşan indüklenmiş basınçlardan daha geniş basınçların oluşmasına neden olurlar. Kavitasyonsuz durumda basınç tepeleri ve çukurları birbirinin tersidir. Bu bölgede basınçlar, daha küçük rol oynarlar [16].



Şekil 29. Kaviteasyonlu ve kaviteasyonsuz durumda oluşan basınç dağılımı [16].

Oluşan basınç dalgalanmalarını bünyesinde toplayan tekne alanı geniş olduğu için şiddetli titreşimlerin oluşması kaçınılmaz bir olaydır. Gürültü problemi gibi yolcu ve savaş gemilerinde de titreşim önemli bir problemdir. Kaviteasyon etkisi ile meydana gelen titreşim olayını aza indirmek için; pervane kanadının yüzey alanı özellikle kanat uçlarında artırılabilir, pervane kanatlarının eğriliği artırılabilir veya hatve uçlara doğru azaltılabilir. Ancak titreşimlerden kaçınılmanın en etkili yolu, iz alanını mümkün olduğunca düzgün yapmaktır.

1.5.4. Erozyon Oluşumu

Kaviteasyon gösteren bir akışkan içerisinde bulunan buhar kabarcıkları düşük bir basınç bölgesinde hareket ederler. Bu kabarcıkların içindeki basınç, buhar basıncına çok yakın bir basınca ulaştığında kabarcıklar hızlı bir şekilde genişler. Kabarcıklar içindeki basınç dış basınçtan yüksek olduğunda boyutu azalır. Boyutu azalan kabarcığın yüzey gerilimi büyüktür. Bu durum kabarcığın patlamasını hızlandırır. Böylece kaviteasyon kabarcıkları şiddetli bir şekilde patlar. Bu olay pervane kanadı, yüzeyinde veya yüzeye yakın bir bölgede oluşursa belirli bir zaman sonra (birkaç saatten birkaç aya kadar) kanat malzemesinde yerel olarak yorulmalar meydana gelebilir ve küçük parçacıklar halinde kanat yüzeyinden kopmalar olabilir. İşte bu olay kaviteasyon erozyonu olarak nitelendirilir. Kaviteasyon erozyonu yüksek dinamik koşullarda genellikle tabaka kaviteasyonunda görülmektedir. Korozyon ile erozyon olayını birbirine karıştırmamak gerekir. Korozyon, malzemede meydana gelen kimyasal hasardır. Erozyon ise malzemede oluşan mekanik hasardır. Bir pervane kanadı üzerinde meydana gelen kaviteasyon kaynaklı erozyonun

muayenesinde dikkat edilecek birtakım noktalar vardır. Bunlar; erozyonun konumu, kanadın sırt veya yüz tarafında meydana gelme durumu, erozyonun radyal konumu, erozyonun kort yönündeki konumu (kort ortası veya giriş veya çıkış ucuna olan yakınlığı), erozyona uğrayan alanın büyüklüğü, yüzeyin dokusu ve rengi, ezilme, renkte solma, oyulma veya gözeneklilik durumu, hasarın maksimum derinliği, hasarın tüm kanatlar üzerinde meydana gelip gelmediği, şayet birden fazla kanatta meydana gelmiş ise bu hasarların birbirlerine benzeyip benzemediği, çift pervaneli bir gemi ise hem sancak hem iskele taraftaki pervanede hasarın oluşup oluşmadığı gibi durumlardır [16]. Şekil 30'da kaviteasyonun neden olduğu erozyon nedeniyle malzeme kaybına uğramış bir gemi pervane görülmektedir.



Şekil 30. Bir pervane kanadında kaviteasyon nedeniyle oluşan erozyon [32].

1.6. Sürtünme Karıştırma Prosesi

Pompa performansının en önemli parçalarından olan çarkın ömrünün iyileştirilmesi, tasarımda da esas olarak ele alınması gereken bir husustur. Ömrün iyileştirilmesi şüphesiz önemli bir etmendir. Son yıllarda pompa ve çark ömrünün iyileştirilmesi hususunda birçok çalışma yapılmaktadır. Pompa çarkının ömrünü kısaltan aşınma, korozyon ve kaviteasyona

karşı kullanılan malzemeyi ve üretim yöntemlerini değiştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Her ne kadar malzeme ve üretim yöntemleri iyileştiriliyor olsa da, yine de bir sınır söz konusudur. Malzeme ve üretim yöntemlerinden kaynaklanan kusur ve hataların giderilip daha uzun ömürlü bir çark elde edebilmek için yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin pompa çark kanatlarının kavitasyon nedeniyle hasara uğramalarında yapıdaki homojensizlik ve döküm hataları başlıca etmenler olarak karşımıza çıkmaktadır. İşte bu kusurların düzeltilmesi ve malzeme mukavemetinin artırılmasında yüzey işlem teknolojileri bir çözüm yolu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yüzey işlem teknolojisi, malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde günümüzde çok sık kullanılan bir yöntemdir. Malzemenin kendisinden ve üretim yöntemlerinden kaynaklanan bir takım kusurların iyileştirilmesi ancak üretilen ürün üzerinde yüzey işlemleri yaparak mümkün olmaktadır. Sürtünme karıştırma prosesi (SKP), yeni sayılabilecek bir yüzey işleme tekniği olarak ortaya çıkmıştır. İşlem esasında sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemine dayanmaktadır. SKK bir katı hal kaynak yöntemi olup, 1990 yılında İngiltere Kaynak Enstitüsü'nde Wayne Thomas tarafından bulunmuş ve ilk defa 1991 yılında İngiltere'de patenti alınmıştır [2]. Endüstriyel olarak kullanımı ise bundan yaklaşık 5 yıl sonrasında başlamıştır. Başlangıçta özellikle demir dışı metallere olan alüminyum alaşımları üzerinde yapılmış olmakla birlikte, günümüzde demir esaslı malzemelerin kaynağı için de bu yöntem kullanılmaya başlanmıştır. SKP yönteminde, karıştırıcı (baticı) uç olarak adlandırılan ve yüksek devirlerde dönen omuzlu bir pimin, proses edilecek parçaların yüzeyine daldırılarak omuzun yüzeye sürtünmesinden dolayı meydana gelen ısı, parçaların ısınıp yumuşamasını ve çamurumsu bir kıvama gelmesini sağlar. Böylece bu bölge içerisinde bulunan pimin karıştırıcı etkisiyle parçanın yüzey tabakası termomekanik olarak aşırı oranda deforme edilmiş olunur ve malzeme mukavemeti ve tokluğunda önemli ölçüde artış kaydedilir.

Sürtünme karıştırma kaynağı ile temel prensipleri aynı olan sürtünme karıştırma prosesi, malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için katı halde uygulanan bir termomekanik işlemdir. Bu yöntem Al ve Mg gibi demir dışı ve demir esaslı alaşımlarda kullanılmaktadır. Takım ve iş parçası arasında oluşan sürtünme, iş parçasının ısınmasına, yumuşamasına ve plastik bir hal almasına neden olmaktadır [24].

Sürtünme Karıştırma Prosesi (SKP), SKK yönteminden yola çıkılarak Mishra ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Prosesin geliştirilme amacı, malzemenin mikro yapısal olarak iyileştirilmesidir. Yöntemin amacı belirli bir devir sayısına sahip

takımın malzemeye daldırılması ve bölgesel mikro yapı modifikasyonunun yapılması ile belirli özelliklerin artırılmasıdır. Örneğin, ticari olarak kullanılan 7075 alüminyum alaşımının bu yöntem ile süper plastik özelliklerinin arttığı belirlenmiştir. Bundan başka, yüzeyde kompozit yapı elde edilmesinde, toz metalürjisi ile üretilen alüminyum alaşımlarının homojenleştirilmesinde, metal matrisli kompozit yapıların mikro yapılarının modifikasyonunda ve döküm alüminyum alaşımlarının özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır [30]. Proses amaçlı kullanım alanları Tablo 6’da gösterilmiştir.

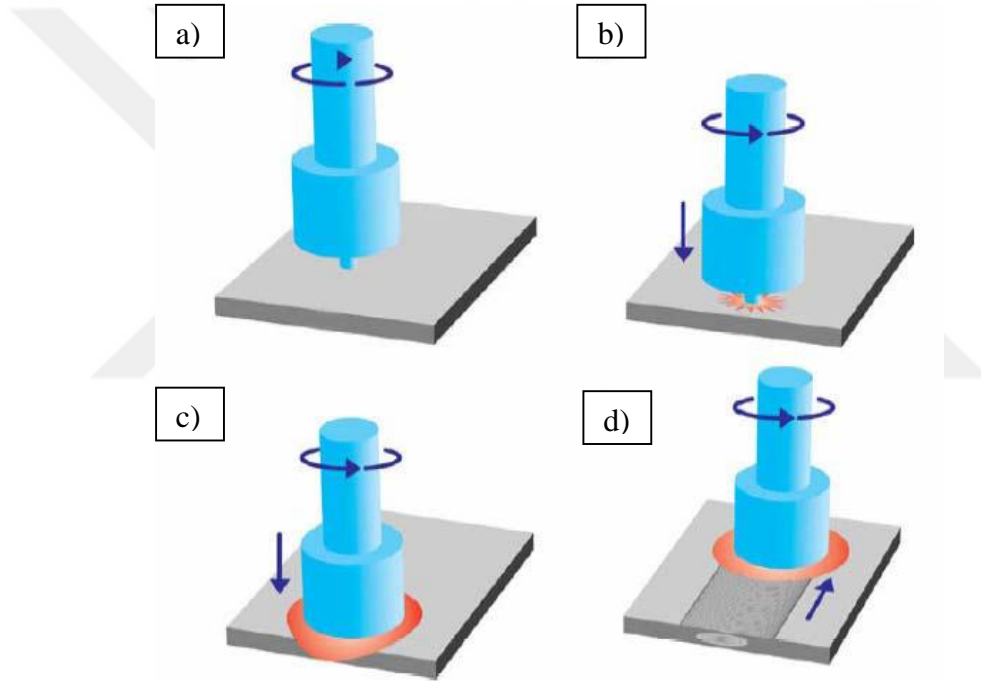
Tablo 6. Sürtünme Karıştırma Prosesinin kullanım alanları [30].

<p>Sürtünme Karıştırma Yetenekleri</p> <ul style="list-style-type: none"> • Büyük oranda plastik şekil değiştirme • Yüksek gerinme oranı • Sıcaklığın yükselmesi • Mekanik karıştırma • Malzeme akışı 	<p>Süperplastiklik</p> <p>Oda Sıcaklığında şekillendirilebilme</p> <p>Döküm modifikasyonu</p>
<p>Mikroyapısal Özellikleri</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tane yapısını iyileştirme • Homojenleştirme • Parça kusurlarını azaltma 	<p>Kompozit yüzeyler</p> <p>Toz metalürjisi</p> <p>Kanal açma</p>
<p>Potansiyel Hataları</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kurt/solucan delikleri 	

1.6.1. SKP'nin Uygulanması

Şekil 31’de SKP yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. İlk aşamada (a), yanması mümkün olmayan silindirik takım, önceden belirlenmiş bir devir sayısında dönmektedir. İkinci aşamada (b), dönen takımın ucu iş parçasına daldırılır ve sürtünmeden dolayı ısı ortaya çıkar. Takım, iş parçası içerisine dalan küçük çaplı bir uç ve bu etki ile ortaya çıkan yukarı yönlü hareketi engelleyen omuz olarak tasarlanmıştır. Takımın iş parçasına nüfuz etmesi ile beraber, karıştırıcı uç sürtünme ile adyabatik bir ısı etkisi oluşturur. Sürtünme ve ısının kombinasyonu malzemenin yumuşamasına ve çamurumsu bir kıvama gelmesine

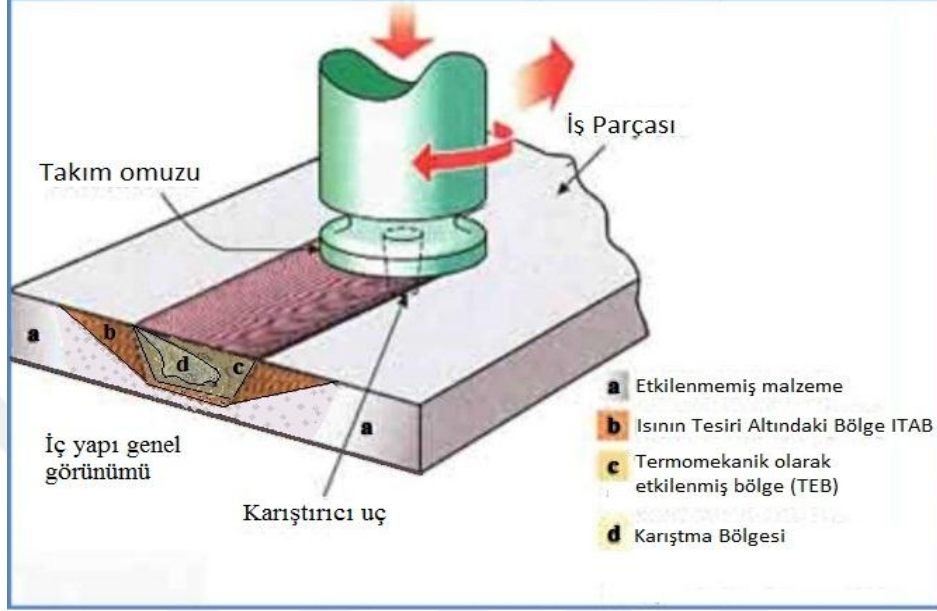
neden olmaktadır. Takımın dönmesi, sürtünme etkisini artırır ve malzemenin karıştırıcı uç çevresi boyunca akmasını sağlar. Penetrasyon derinliği, takım omuzu ve karıştırıcı uç uzunluğu ile kontrol edilir. Şekil 31'in üçüncü aşamasında (c), takım omuzu ile malzeme yüzeyinin teması şematize edilmiştir. Takım omuzunun sebep olduğu ısı, sıcak bölgenin büyümesine neden olur. Takım omuzu, karıştırıcı uç sürtünme etkisi nedeniyle ortaya çıkan yukarı yönlü malzeme akışını, deforme olmuş malzeme üzerinde bir dövme etkisi oluşturması sonucunda sınırlar. Takım, iş parçası içerisine tamamen sokulup, proses edilecek doğrultu boyunca belirli bir devir sayısında dönerek ilerleyişi Şekil 31'in dördüncü aşamasında (d) görülmektedir [24].



Şekil 31. Sürtünme Karıştırma Prosesi'nin şematik gösterimi [24].

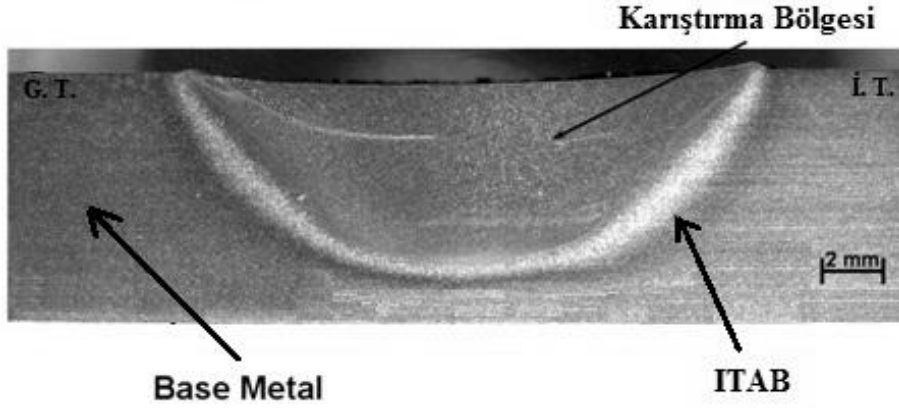
SKP sırasında, dönen takım çalışırken sürekli bir ısı oluşturur, takım ucu ilerleme tarafından, gerileme tarafına doğru malzemeyi hareket ettirerek, kendisini çevreleyen dar bir bölgede yumuşayıp çamurumsu bir kıvama gelmesine neden olur. Unutulmaması gerekir ki, işlem sırasında metal asla erimez. Bu işlem sırasından ulaşılabilen en yüksek sıcaklık, malzeme erime sıcaklığının %80 ila %90'ı arasında bir değerdir. Takım bir proses gerçekleştirdiğinde, işlenmiş malzeme soğur, zarif ve homojenize bir mikroyapı sergiler. Esasen, SKP malzemenin geri kalanının özellikleri üzerinde çok az etkisi olan, yerel

özelliklerini değiştiren bir termomekanik malzeme işleme sürecidir [24]. Şekil 32’de SKP işleminin uygulanışı ve oluşan içyapıların şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 32. Sürtünme Karıştırma Prosesi'nin uygulanışı ve oluşan içyapılar

SKP'nin sıcak çalışma süreci, sıradışı yerel gerilme ve gerilme oranlarının bunun yanı sıra çoğunlukla $0,9 T_{erime}$ mertebelerinde yüksek sıcaklıklar oluşmasına yol açar. Bu faktörler SKP'nin döküm malzemenin mikroyapısını dövülmüş şartlara dönüştürmesine izin verir. Bazı alaşımlarda, mukavemet, süneklik ve tokluk gibi malzeme özelliklerinde önemli artışlar ile sonuçlanmaktadır. Diğer gözlenen faydaları, süperplastisite, daha iyi kaynak kabiliyeti ve gelişmiş yorulma ve korozyon direnci olarak sayılabilir. Proses edilmiş malzeme alanı genellikle "karıştırma bölgesi" ya da "karıştırma külçesi" olarak adlandırılır. Karıştırma bölgesinin çevresi, proses ısısının malzeme içerisinde yerel olarak küçük deformasyonlar oluşturduğu, termomekanik etkilenmiş bölge (TEB) olarak adlandırılır. TEB'in çevresi ise, ısının tesiri altındaki bölge olarak (ITAB) adlandırılır. Karıştırma bölgesi, TEB ve ITAB arasındaki ortak yön, bölgelerin, NAB malzemede süneklik kayıplarının mevcut olduğunu tespit edilmesini sağlamıştır. Şekil 33'te, malzemeye uygulana SKP işleminin, karıştırma bölgesi üzerine etkisinin optik mikroskop görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 33. SKP karıştırma bölgesi şematik görüntüsü [24].

Takım geometrisi karıştırma bölgesinin boyutunu ve şeklini, dolayısıyla TEB ve ITAB'yi belirleyen önemli bir parametredir. Karıştırma bölgesi genişliğini etkileyen takım omuz çapı, birkaç milimetre ile birkaç santimetre arasında değişebilir. İş parçası ile temas eden omuz yüzeyindeki sarmal şekilli yivler, homojenliği ve malzeme akışını artırmak için kullanılır. Karıştırıcı uç derinliği, malzemeye bağlı olarak, takımın en geniş çapının %100'ü kadar olabilir, bu da derin penetrasyon ve prosese izin verir. Karıştırıcı uç daima omuz ile eş merkezlidir, fakat karıştırma bölgesindeki malzeme akışını teşvik edici yiv veya spiral adımlar içerir. Dönme hızı, ayarlanabilir bir parametredir, fakat dönme yönü proses süresince sabit kalır. İlerleme yönü, takımın ilerleyeceği doğrultu olarak ayarlanır ve düz bir çizgi ile sınırlı değildir. Takımın ilerleme hızı, dakikada kat ettiği mesafe olarak ifade edilir (mm/dk). Takım geometrisi, dönme ve ilerleme hızının kombinasyonu, ana malzeme içerisinde ne kadar ısı üretileceğini ve yayılacağını belirler [24].

1.6.2. SKP Uygulanan Malzemede Oluşan Bölgeler

SKP yöntemi esasında SKK yöntemine dayandığı için işlem sonrası oluşan içyapı bölgeleri hemen hemen aynıdır. TWI'de yapılan çalışmalar sonucunda, SKK yöntemi sonrası malzemede dört temel bölge oluştuğu kabul görmüş [34] ve SKP ile ilgili yapılan çalışmalarda da bu bölgeler teyit ve kabul edilmiştir [25, 35, 36]. Bunlar sırasıyla; esas metal, ısının tesiri altındaki bölge, termomekanik etkilenmiş bölge ve karıştırma bölgesidir. Proses metaline bazı yayınlarda, "karışım bölgesi", "kaynak dolgusu" gibi tanımlarda yapılmıştır.

1.6.2.1. Esas Metal

Bu bölge ne ısıdan ne de mekanik deformasyondan etkilenmiştir. Dövme alaşımlarında esas metal bölgesi, tipik hadde yapısındadır ve taneler uzundur.

1.6.2.2. Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)

Bu bölgede mekanik deformasyon yoktur; ancak proses sırasında ortaya çıkan ısı, malzeme özelliklerini etkilemektedir. Isının tesiri altındaki bölge olarak tanımlanır. ITAB, optik mikroskopta incelendiğinde, ergitme esaslı kaynak yöntemlerinde gözlenenin aksine, esas metalden farklı görülmemektedir. Yaşlandırılmış ya da mekanik olarak sertleştirilmiş alaşımlarda bu bölge çok sert değildir. Aşırı yaşlandırma ve tavlama, ITAB'nin iç yapısına benzer etkiler yapar.

1.6.2.3. Termomekanik Etkilenmiş Bölge (TEB)

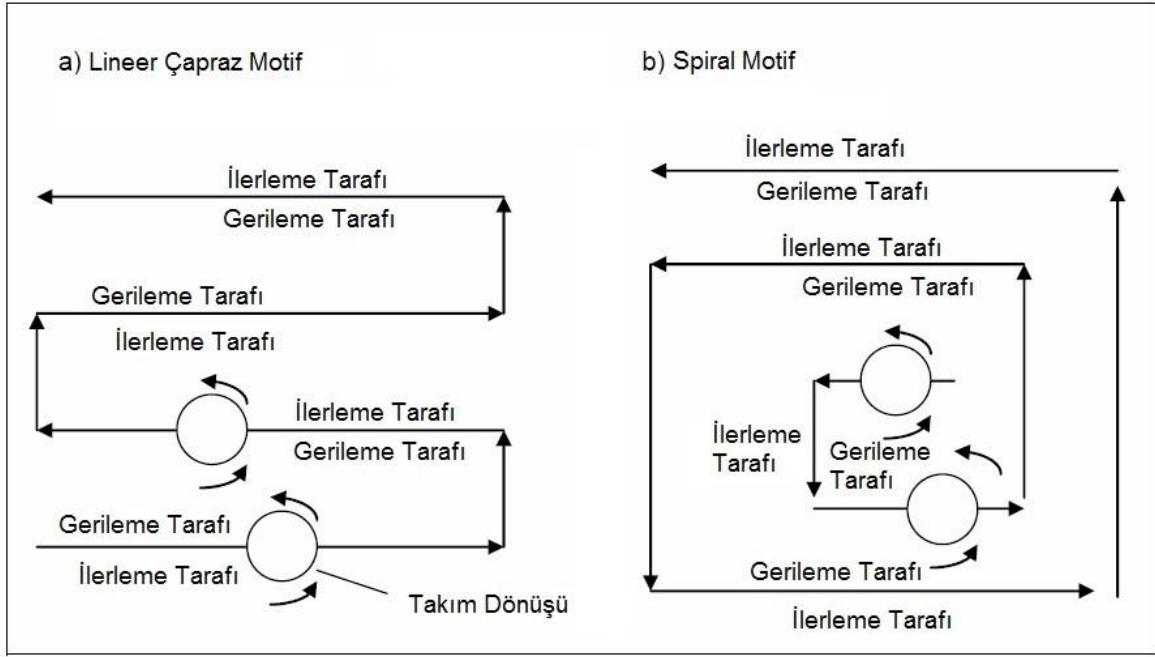
Bu bölge takımın etkisi ile plastik deformasyona uğramıştır ve proses ısısından etkilenir. Proses işlemi zaman zaman termo mekanik etkilenmiş bölgede, yerel olarak yeniden kristalleşme ve uzun tanelerin kıvrılmasına neden olmaktadır. Konuyla ilgili yapılan ilk çalışmalarda bu bölge iki alt bölge olarak ele alınmış olmasına karşın son yapılan çalışmalar diğer metallerin ve alaşımların SKP yöntemi ile işlenmesinde farklı davranışlar gösterdiklerini bunun da alüminyumdan farklı olduğunu ortaya koymuşlardır. Zira alüminyum yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşme göstermeden farklı davranışlara sahip olabilmektedir. Diğer metallerde, yeniden kristalleşme bölgesi sınırları görülmez ve tüm TEB yeniden kristalleşmiş olarak görülür. Saf titanyum, β – titanyum alaşımları, ostenitik paslanmaz çelikler ve bakır gibi metaller ısı etkisi ile faz dönüşümü olmadan gerinmesiz kendi kendilerine yeniden kristalleşme gösterirler. Ferritik yapıları çelikler ve Ti6Al4V gibi $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarında ısı etkili faz dönüşümleri ile mikro yapının anlaşılması çok daha zordur ve ITAB/TEB sınırı çok belirgin değildir.

1.6.2.4. Karıştırma Bölgesi

Karıştırma bölgesi, TEB içinde yeniden kristalleşmiş ince taneli bölgedir. Aslında bu tanımlama tam olarak bilimsel olmamasına karşın bunun yerine konacak bir terim bulunamadığından geniş ölçüde kabul görmüş ve teknik terminolojiye bu şekilde geçmiştir. Şekil 33'te de görülebileceği üzere takım omzunun hemen altında farklı tane yapısında oluşmuş ve kesin hatları ile görülen TEB'nin bir bölümü olan bölgedir. Bazı araştırmacılar kaynak metalindeki küçük yeniden kristalleşmiş tanelerin, yoğun alt taneleri ve dislokasyonları da içerebileceğini belirtmişlerdir. Yöntem değişkenleri, takım geometrisi, iş parçası sıcaklığı ve malzemenin ısıl iletkenliğine bağlı olarak değişik biçimlerde proses yapıları gözlenmektedir.

1.6.3. SKP Uygulama Yöntemleri

Doğrusal, taramalı ve spiral motifler kullanılarak, geniş alanlar SKP ile işlenebilir. Taramalı ve spiral motif örnekleri Şekil 34'te şematik olarak gösterilmiştir. Bu şekiller takım dönüşünü ve izlediği rotayı göstermektedir. SKP işlemi çapraz geçiş hattı etrafında simetrik değildir. İlerleme tarafında, çapraz geçiş ve teğet hızları eklenirken, gerileme tarafında çapraz geçiş ve teğet hızları çıkarılır. Karıştırma bölgesi içerisinde çok ince ve homojen mikroyapılar varken, nispeten deforme olmamış malzeme olan TEB'ye doğru, ilerleme tarafında mikroyapı içerisinde çoğunlukla derin geçişler vardır. Gerileme tarafında genellikle daha sık geçişler sergiler ve incelmemiş mikroyapılar içerir. Bu sebepten, karıştırma bölgesi içerisinde de homojen olmayan mikroyapılar olur. Lineer taramalı motiflerde, ilerleme/ilerleme ve gerileme/gerileme pasoları varken, spiral motiflerde ilerleme ve gerileme tarafları örtüşür. İkincisinde (spiral motifte) prosesli bölgelerde izotropi (eşyönlülük) özellikleri olasılığı artma eğilimindedir [24].



Şekil 34. Taramalı ve spiral motif örneklerinin şematik görünümü [24].

SKP uygulanmış metalik malzemelerde sertlik, mukavemet, korozyona ve yorulmaya karşı direnç artmaktadır. Döküm hatalarını ortadan kaldırmak, metalik malzemelerde mikroyapıyı inceltmek, yüzey kompozitleri üretmek ve kaynak yüzeylerini modifiye etmek için uygulanmaktadır. SKP, lazer veya yüksek enerji elektron bombardımanı ile karşılaştırıldığında, daha iyi sonuçlar vermektedir. SKP basit ve kontrol edilmesi kolay bir işlemdir. Karmaşık yüksek enerji lazer cihazı ve yüksek voltaj elektron üretici gibi ekipmanlara ihtiyaç yoktur [24].

1.6.4. NAB Alaşımlarına SKP İşleminin Uygulanması

Nikel alüminyum bronz (NAB), mükemmel korozyon direnci, iyi kırılma tokluğu, yüksek sönümlenme kapasitesi ve iyi yorulma direnci gibi özellikleri yüzünden geniş ölçüde denizcilik uygulamalarında kullanılan bakır bazlı bir alaşımdır [25].

NAB nispeten erozyon, korozyon ve kaviteasyona karşı dayanıklı malzeme olmasına rağmen, erozyon, korozyon ve kaviteasyon performansını daha da artırmak amacıyla organik ve metalik kaplamaların kullanımı araştırılmıştır [26]. Kaplama yaklaşımı mekanik özellikleri artırıcı olmasa da, gözeneklilik kusurlarının ortadan kaldırılması ve kaba döküm yapısının düzeltilmesine olanak sağlar. Bu nedenle, mekanik özellikler ile korozyon,

erozyon ve kavitasyon özelliklerini geliştirebilecek bir metod, döküm NAB malzemenin daha fazla tercih edilir olmasını sağlar [26].

İşte bu noktada Sürtünme Karıştırma Prosesi bu ihtiyaçları karşılamada yeterli olmaktadır. NAB'ın da dahil olduğu üretilen bir çok döküm parçasının kalın kesitleri ve ortaya çıkan yavaş soğuma oranları, kaba mikroyapılar ile düşük fiziksel ve mekanik özellikler sergilemesine neden olur [25]. Bu tür uygulamalarda, NiAl bronz malzemeler kolaylıkla iyileştirilemeyebilir ve bu yüzden SKP yöntemi, seçici olarak yüzey bileşenlerinin güçlendirilmesi için alternatif bir yolu temsil eder [25].

Bu yöntem, ince taneli yapılar oluşturmak için, heterojen metalik malzemelerin yapısını değiştirmek için, yüzey kompozitleri üretmek ve kompozitler ve intermetalik bileşikler sentezlemek için kullanılmıştır. Bu şekilde, gözenekler elimine edilebilir ve yabancı maddeler de bileşenlerin şekillerinde herhangi bir değişiklik olmaksızın dağıtılabilir. Son zamanlarda, ABD donanması NAB pervanelerin performansını artırmak için SKP yöntemini kullanmaktadır [26].

2. ÇALIŞMANIN AMACI

Pompaların performansını ve ömrünü belirleyen en önemli parça hiç şüphesiz ki pompa çarklarıdır. Doğrudan akışkan ile temas halinde olan bu parça, akışkanın meydana getirebildiği her türlü etkiye maruz kalmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak yıllardır süre gelen çalışmalar pompa çarklarının ömürlerinin uzatılması üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmalarda birçok türden malzeme pompa çarkı üretiminde kullanılmış, performans ve ömürleri üzerine araştırmalar yapılmıştır.

Başarılı bir pompadan beklenen, performans ve uzun ömürdür. Performans pompanın basma yüksekliği, debi ve verimi ile ilgilidir. Ömür ise pompanın, kabul edilebilir bir performans ile çalışabilmesi için, bir veya birden fazla parçasının değiştirilmesinden önceki çalışma saatlerinin toplamıdır. Başlangıçtaki performans pompa imalatçısının sorumluluğu altındadır ve hidrolik tasarımın sonucudur. Ömür ise, çalışma şartları altında kullanılan malzemelerin dayanıklılığının ölçüsüdür.

Herhangi bir hizmet için en ekonomik malzeme seçiminde sadece pompanın tasarımı ve imalatı ile ilgili bilgiler yeterli olmaz. Ayrıca seçilen malzemenin pompadaki akış hızlarında erozyon, korozyon ve kavitasyon özelliklerinin de bilinmesi gerekir. Her ne kadar çalışma parametreleri değiştirilerek kavitasyondan kaçınmak mümkün gözükse de bu durum kavitasyondan tümüyle korunmayı sağlayamayabilir.

Özellikle açık tip karışık akımlı çarklarda dönen kanatlar ile sabit gövde arasındaki dar aralıklar kavitasyon erozyonuna diğer kanat tiplerine oranla daha duyarlıdır. Bu durum çoğunlukla kanat ucu erozyonu olarak adlandırılmaktadır. Kanat ile gövde arasında da oluşan girdap etkisiyle ortaya çıkar. Bu tip pompaların çark ve gövde malzemelerini değerlendirirken kanat ucu erozyonu ihtimalini de dikkate almak gereklidir.

Çok sayıda malzemenin kavitasyon dirençlerini tespit etmek amacı ile yapılan çok kapsamlı laboratuvar deneyleri, santrifüj pompalarda kullanılan bir çok malzeme için veriler bulunmaktadır [18].

Gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan elde edilen bilgilerin değerlendirilmesi sonucunda pompa malzemeleri artan kavitasyon dirençlerine göre $Pik\ döküm < Bronz < Çelik\ döküm < Nikel-alüminyum\ bronz < Stellite$ şeklinde sıralanmıştır [18].

Nikel Alüminyum Bronzu her ne kadar kavitasyona karşı dirençli olsa da üretim yöntemi olan döküm yapısından dolayı içerisinde belirli miktarda ve büyüklükte

gözeneklilik bulundurmaktadır. Bu gözenekler de malzemedeki kavite direncini olumsuz yönde etkilemektedirler.

Bu gözenekli yapının iyileştirilmesi için gözenekliliği azaltıcı yüzey işlem teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle kısmen yeni sayılabilecek Sürtünme Karıştırma Proses yöntemi de özellikle malzeme yüzeyinde oluşturduğu karıştırma ve aşırı plastik deformasyon etkisi ile malzeme yüzeyinde döküm hatalarının önemli oranda giderilmesine, daha homojen bir yapı oluşmasına ve daha yüksek sertliğe erişmesine olanak sağlamaktadır.

NAB pompa çarklarında ortaya çıkan yüzey iyileştirme ihtiyacı çalışmamızın temelini oluşturmaktadır.

Bu amaç doğrultusunda, elimizde bulunan bir pompa çarkı için, yüzey bölgesinin özellikleri söz konusu SKP uygulanarak iyileştirilmiş bir malzeme oluşturarak mevcut pompa çarkının kullanım ömrünün artırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, yüzeyi farklı paso sayılarında SKP ile işlenen NAB malzeme kullanarak imal edilen çark kanatlarının kavite direncinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve mevcut literatür bilgileri ile kıyaslanması hedeflenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, üstün deniz suyu korozyonu direnci, aynı zamanda kavitasyon ve erozyona karşı da dirençli bir malzeme olması sebebiyle, deney malzemesi olarak Nikel Alüminyum Bronz (C95800) alaşımı kullanılmıştır. Bu malzeme için literatürde bulunan sürtünme karıştırma prosesi değerleri dikkate alınarak ve yapılan ön deneyler sonucunda, kullanacağımız proses parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler kullanılarak NAB alaşım plakaların yüzeylerine sürtünme karıştırma prosesi işlemi 1, 2, 3 ve 4 paso olarak uygulanmıştır. SKP işlemi için sırasıyla deney düzeneği oluşturulmuş, ham döküm halinde nikel alüminyum bronz malzeme temin edilmiş ve proses için uygun boyutlarda hazır hale getirilmiştir. Proses için kullanılacak karıştırıcı uç dizayn edilerek imal edilmiştir. Proses işlemi için kullanılacak parametreler, literatür incelemelerinden ve uygulanan ön proses işlemlerinden elde edilen bilgiler ışığında belirlenmiştir. Uygulanan proses işleminden elde edilen malzemeden amaca uygun parça ve numuneler tel erozyon yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu işlemlerde sonra, proses edilen NAB malzemelerden tasarlanan pompa çarkı kanatları imal edilmiştir. Sökülüp takılabilir olacak şekilde tasarlanan kanatlar, ayrıca bronz malzemeden hazırlanan çark gövdesine şekil bağlı olarak sabitleyici vidalar ile bağlanmıştır. İmalatı tamamlanan çark pompa üzerine takılmıştır.

Literatür araştırması, yapılan ön deneyler ve imal edilen pompa çarkı verileri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda pompa kavitasyonlu bölgede olacak şekilde çalıştırılmıştır. Belirli çalışma sürelerinde sistem durdurulup, pompa çarkı sökülerek, kanatlar üzerinde göz, optik ve elektron mikroskopu yardımıyla kanat yüzeylerinin incelemesi gerçekleştirilmiştir.

3.1. SKP Deney Düzeneği

Gerçekleştirilmek istenilen bu çalışmada, sürtünme karıştırma prosesi işlemi için Şekil 35'te görüldüğü gibi SKP işlemi amacına uygun şekle dönüştürülen bir universal dikey freze tezgâhı kullanılmıştır. Proses parametreleri freze tezgâhı sayesinde sabit olacak şekilde ayarlanabilirken, bu parametrelerden biri olan takım baskı kuvveti bu amaçla oluşturulan hidrolik yükleme tablası yardımıyla uygulanıp, proses edilecek parça tutucusunun bağlandığı yük hücreleri ile ölçülüp, istenilen değerde sabit tutulmuştur.



Şekil 35. Sürtünme karıştırma proses donanımının genel görüntüsü

3.1.1. Ana Tezgâh

SKP deneylerini gerçekleştirmek için KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü takım tezgâhları laboratuvarında bulunan bir üniversal freze tezgâhi kullanılmıştır. Freze tezgâhi 7,5 kW gücünde olup, 50 – 1600 dev/dak devir sayısı aralığında ve 35 – 1020 mm/dak ilerleme hızı aralığında çalışabilmektedir. Prosesi gerçekleştirmek için kullanılan takım, bu tezgâhin takım tutucusuna özel sıkma penci ile bağlanmıştır. Tezgâh tablası üzerine takım baskı kuvvetini uygulamak ve kontrol etmek amacıyla hazırlanmış hidrolik üniteli deney tablası bulunmaktadır. Kullanılan freze tezgâhi ile SKP'nin takım dönme hızı, ilerleme hızı ve tezgâhin tablasına montaj edilmiş hidrolik tablayı takıma dik doğrultuda hareket ettirerek proses parametreleri kontrol edilmiştir.

3.1.2. Yükleme Ünitesi

SKP esnasında takım baskı kuvvetini uygulamak ve kontrol etmek amacı ile oluşturulmuştur. Yüzeyleri taşlanmış iki adet tabla, dört köşesine yerleştirilen dört adet kılavuz milleri ile üst tabla tezgâh tablasına dik doğrultuda, takım yönünde hareket ettirilebilmektedir. Bu tablaların dik yöndeki hareketi tablaların aralarında yerleştirilmiş olan hidrolik bir silindir ile sağlanmaktadır. Bu hidrolik silindir, 1,5 kW gücünde, değişken basınçlı yük kontrol ünitesi hidrolik pompa ünitesi ile tahrik edilmektedir. Sistemin tepkisini hızlandırmak için üst tablanın köşelerinde konumlandırılmış dört adet yay monte edilmiştir. Hidrolik sistem takım ile iş parçası arasındaki baskı kuvvetini SKP işlemi boyunca uygulayıp sabit tutmak amacı ile hazırlanıp kalibre edilmiştir. Proses edilecek plakalar Şekil 36’da görülmekte olduğu gibi üst tabla üzerinde sabitlenebilen ve dört adet yük ölçüm hücrelerinin bağlı olduğu ayrı bir tutucu haznesine yerleştirilerek sabitlenebilmektedir.



Şekil 36. Hidrolik yüklemeli tablanın genel görüntüsü

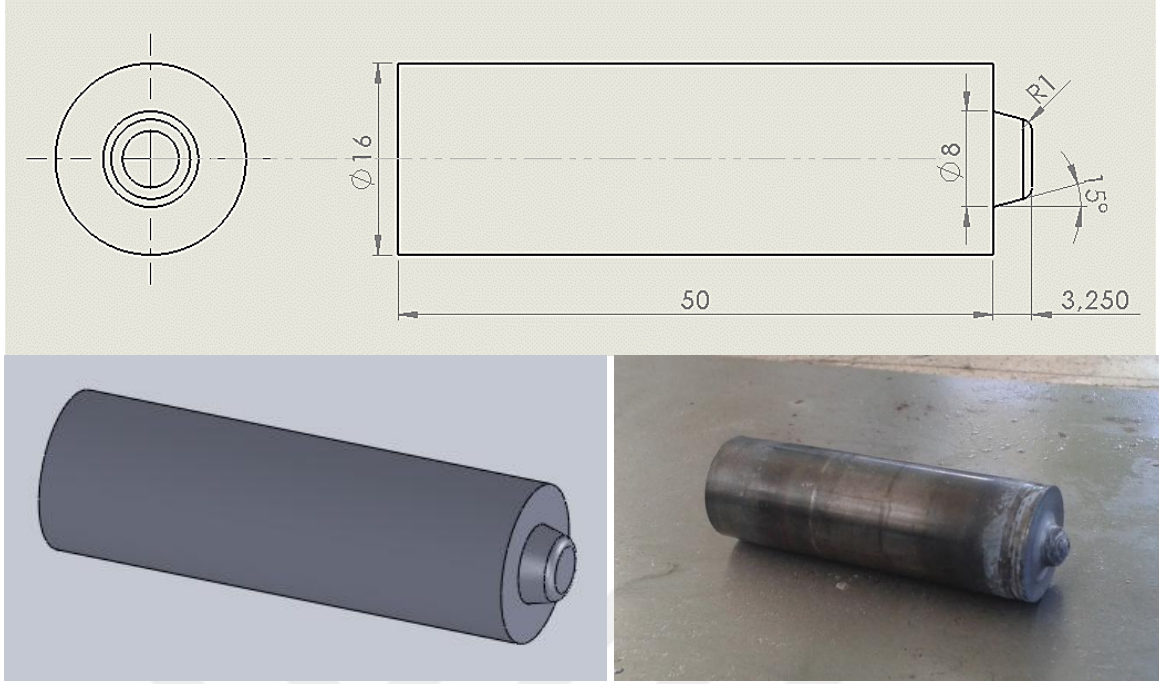
3.2. Kullanılan Takım

Takım malzemesi olarak aşınmaya ve yüksek sıcaklığa dayanıklı sert bir malzeme olan tungsten karbür kullanılmıştır. Takımın işlenmesi Şekil 37'deki taşlama tezgâhları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 37. Proses takımının hazırlanmasında kullanılan taşlama tezgâhları

Karıştırıcı uç profilini belirlemek amacı ile literatür taraması yapılmıştır. Uygun karıştırıcı uç profili olarak NAB malzemenin SKP çalışmalarında verimli olarak kullanılan pahlı kesik konik profilli takım uçlarının olduğu görülmüştür. SKP yapılacak plaka kalınlığı 9 mm olarak belirlenmiş ve SKP takımının pim uzunluğu 3,25 mm olarak belirlenmiştir. Takım omuz çapı 16 mm ve pim çapı 8 mm olarak seçilmiştir. Pime taşlama tezgâhında omuzdan başlayarak pahlı kesik konik yapıda şekil verilmiştir. Şekil 38'de şekillendirilmiş takım profili görülmektedir.



Şekil 38. SKP işleminde kullanılan karıştırıcı takımın görünümü

3.3. Kullanılan Malzemeler

SKP işleminde deney malzemesi olarak, deniz suyu ortamındaki uygulamalarında yaygın olarak kullanımı olan ham döküm nikel alüminyum bronz (C95800) belirlenmiştir. Bu malzeme piyasadan ticari olarak üretilmiş durumda yaklaşık 11 – 12 mm kalınlığında plaka olarak Şekil 39’da görüldüğü gibi temin edilmiştir. Daha sonra bu plakalar sürtünme karıştırma proses işlemi için 9 mm x 30 mm x 200 mm boyutlarında olacak şekilde hazırlanmışlardır. Hazırlanan numunelerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri yaklaşık olarak $10 \mu\text{m} \pm 5$ mertebesindedir.



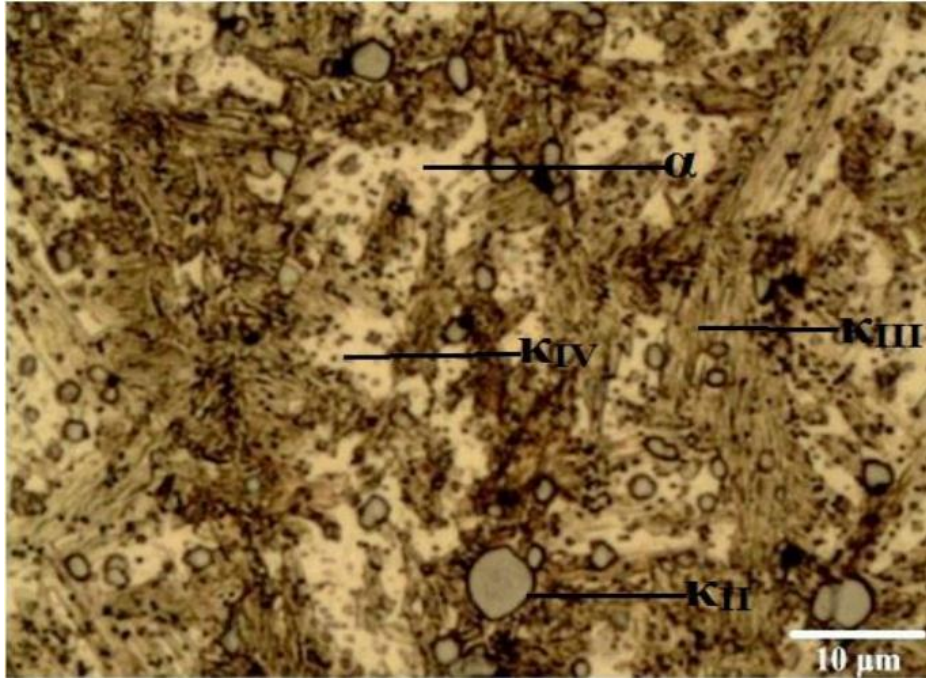
Şekil 39. Proses edilecek NAB numunelerinin yüzey görünümleri

Deneyde kullanılan C95800 nikel alüminyum bronz için ASTM B148 – 14’te verilen nominal kimyasal bileşim oranları Tablo 7’de verilmiştir. Ayrıca tedarikçi firma malzeme sertlik değerini 280 Brinell Sertlik Değeri (295 VSD) olarak vermiştir.

Tablo 7. Nikel Alüminyum Bronz malzemenin kimyasal yapısı

Nominal Bileşim Oranları, %				
Bakır	Nikel	Demir	Alüminyum	Mangan
81,3	4,5	4,0	9,0	1,2

KTÜ Makine Mühendisliği Malzeme Bilimleri Laboratuvarında satın alınan ham döküm NAB malzeme üzerinde yapılan incelemelerde ham döküm malzemeye ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 40’ta verilmiştir.



Şekil 40. Ham döküm NAB malzeme optik mikroskop görüntüsü

Ham döküm durumdaki NAB alaşımının mikroyapısı, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında bakırca zengin (α) fazı ve Ni-Fe-Al (κ) fazlarından oluştuğu görülmektedir. κ -fazlarının yapısını NAB alaşımının kimyasal bileşim oranları

belirlemektedir. κ -fazı, literatürde de ayrıntılı olarak belirtildiği gibi yapıdaki element oranlarına bağlı olarak κ_I , κ_{II} , κ_{III} ve κ_{IV} fazları şeklinde oluşabilmektedir [21]. κ_I fazı, sadece %5 Fe'den daha büyük demir içeriği ile NAB içinde gözlemlendiği belirtilmiştir. Buna paralel olarak deneylerde kullanılan NAB malzemenin Fe oranı % 3,98 olduğundan ortalama 20 ile 50 μm boyutunda ve α tanelerinin merkezlerinde bulunan κ_I fazı görülmemiştir. Şekil 40'ta görüldüğü gibi açık sarı renkte olan bakırca zengin α fazı etrafında literatürde de belirtilen ortalama 5 ile 10 μm çapında küresel görünümlü κ_{II} çökeltileri açık gri renkte görülmektedir. Nikelce zengin κ_{III} çökeltileri lamelli bir şekil sergiler. α taneleri boyunca dağılan ince nokta biçiminde küçük ve 2 μm çapından daha düşük mertebesinde parçacıklar demirce zengin κ_{IV} parçacıklarıdır. α taneleri dış kenarında bir çökelti serbest bölgesi ile görülmektedir [27].

3.4. Kullanılan Proses Parametreleri

SKP'de kullanılacak proses parametrelerini belirlemek amacı ile önce literatür taraması yapılmıştır. Bu çalışmalarda takım baskı kuvveti ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmadığından gerçekleştirilen ön deneyler sonucunda en uygun olarak belirlenen parametreler kullanılarak proses işlemleri yapılmıştır. Uygulanan SKP işlem parametreleri, takım dönme hızı 1250 d/dk, takım ilerleme hızı 65 mm/dk ve takım baskı kuvveti 4400N olarak kullanılmıştır.

3.5. Prosesin Uygulanması

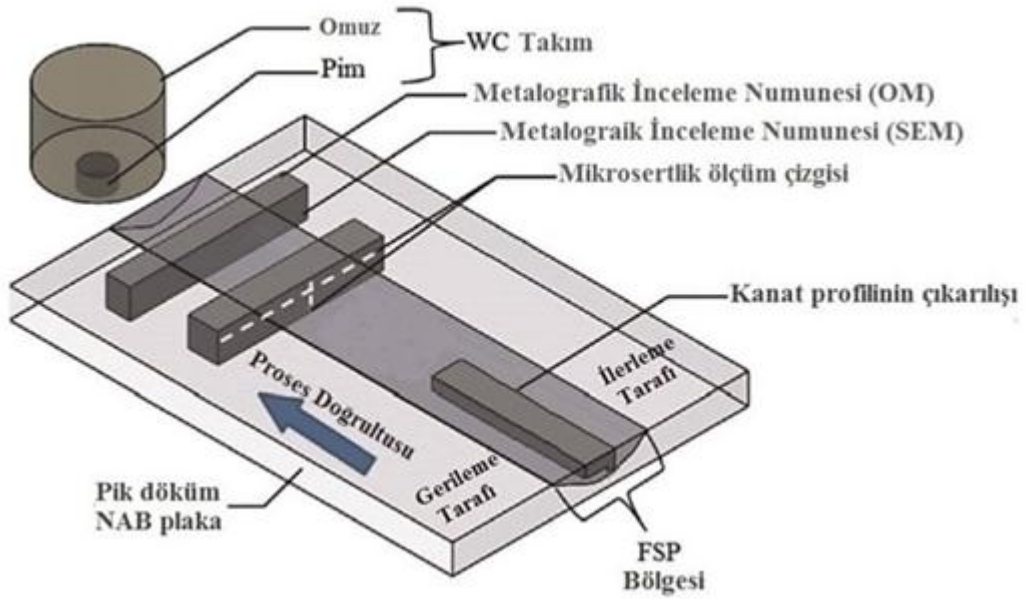
Proses edilecek numuneler tutucu hazneye yerleştirilmeden önce, takıma gelen ilk yükü azaltmak için numunelere ön delik açıldı. Şekil 41'deki gibi numuneler tutucu haznede sabitlendi. Sonra takım dönme hızı ve takım ilerleme hızı parametreleri freze tezgâhına girildi. Takım eğim açısı 3° olarak uygulandı. Takım dönüş yönü saat yönü olarak ayarlandı. Hidrolik yükleme ünitesinden takım baskı kuvveti, kalibre edilmiş yük hücreleri vasıtası ile dijital göstergeden okunarak girildi. Takımın plakalar üstüne girmesi ve takım omzunun plakalar ile temasının sağlanması ile takım ilerleme hareketi verildi ve kaynak işlemi başladı. Takımın plakanın sonuna gelmesi ile beraber takım baskı kuvveti geri çekildi, paso sayısına göre bu işlem tekrarlandı, takım plakalardan ayrıldı.



Şekil 41. SKP'nin uygulanış şekli, a) SKP düzeneği ve b) proses edilmiş numune yüzeyi

3.6. Proses Yapısının İncelenmesi

SKP sonunda proses edilen plakaların öncelikle görsel kontrolleri yapılarak proses hattı incelenmiştir. Daha sonra proses edilmiş plakalardan çeşitli incelemeler için gerekli numuneler elektroerozyon yöntemi ile çıkartılmıştır (Şekil 42).



Şekil 42. İnceleme amacı ile proses edilen parçadan numuneler ve kanadın çıkarım planı

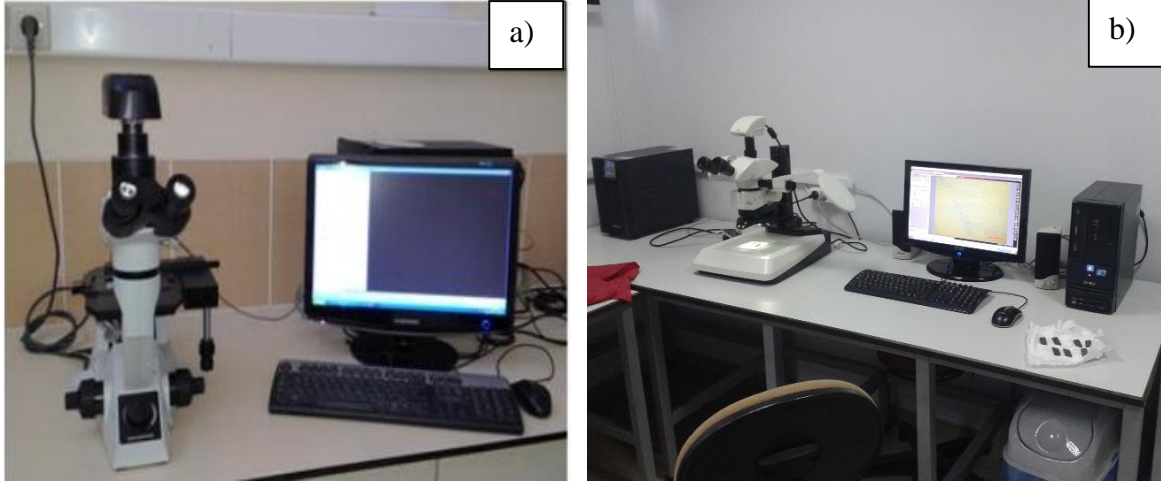
Numuneler çıkarıldıktan sonra ayrıca amaca uygun olarak deneylerde kullanılmak üzere şekillendirilmişlerdir.

3.6.1. Metalografik Deneyler

Metalografi numuneleri, standart metalografi teknikleri kullanılarak hazırlandı. Yüzeyi parlatmak için numuneler önce 1 μ ve sonra 0,3 μ 'luk alümina süspansiyon ile BUEHLER marka dönen disk üzerinde parlatılmıştır.

Parlatma işleminden sonra dağlama işlemi için 2 adet solüsyon hazırlanmıştır. Birinci solüsyon 40 ml su, 40 ml amonyum hidroksit, 20 ml hidrojen peroksit içerirken, ikinci solüsyon 60 ml su, 30 ml fosforik asit ve 10 ml hidrojen peroksit içerecek şekilde hazırlandı. Dağlama işlemi önce birinci solüsyonda 1 – 2 sn. arası bekletilen numuneler sonra ikinci solüsyonda 2 – 3 saniye bekletilerek gerçekleştirilmiştir [31].

Dağlanan numunelerin mikro yapıları Şekil 43'teki görüldüğü üzere KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri Laboratuvarı'nda LEICA marka mikroskopta, kavitasyon deneyine tabi tutulan çark kanatları ise Artvin Çoruh Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan LEICA M60 marka stereo mikroskopta incelenmiştir.



Şekil 43. a) Optik mikroskop ve b) stereo mikroskobu genel görüntüsü

3.6.2. Mikrosertlik Ölçümleri

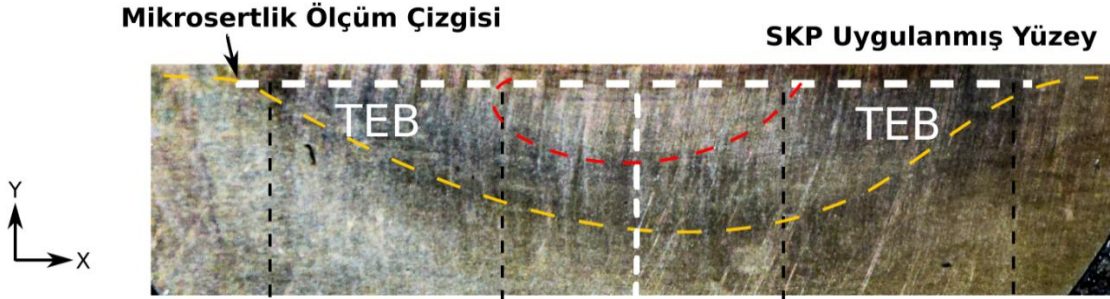
Mikrosertlik ölçümleri için Şekil 44’te görüldüğü üzere, KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimi Anabilim Dalı Laboratuvarında mevcut STRUERS marka mikrosertlik ölçme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 44. Mikrosertlik ölçüm cihazı genel görünüşü

Sertlik ölçümleri proses yüzeyinin 0,5 mm altından proses yönüne dik doğrultuda merkezden ileri, geriye ve yüzeyden aşağıya doğru ölçülmüştür. Tüm ölçümler 0,5 mm

adım aralıklarla ilerleme ve gerileme bölgelerinde simetrik olarak yapılmıştır (Şekil 45). Mikrosertlik ölçümleri; Vickers ucu ile 200 gram yük altında 10 sn süre ile uygulanmıştır.



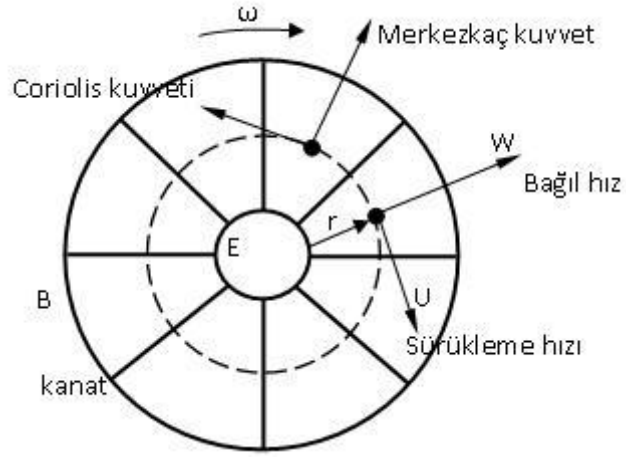
Şekil 45. Proses bölgesinde sertlik alınan noktaların gösterimi

3.7. Santrifüj Pompa Çarkı Konstrüksiyonunun Tasarımı

Sürtünme Karıştırma Prosesi ile işlenmiş Nikel Alüminyum Bronz malzemenin kavitasyon direncinin belirlenmesi için, yeni bir radyal pompa çarkı imal edilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu radyal çarkın kanatları, SKP ile işlenmiş NAB malzemeden imal edilmesi planlanmıştır.

Santrifüj pompalarda da, tüm turbo makinelerde olduğu gibi, sabit eksen etrafında bir açısal hızla dönen ve çark adı verilen bir ana eleman vardır. En basit şekliyle merkezkaç çark, birbirine paralel iki diskin arasına veya tek bir disk yüzeyine merkezci (radyal) kanatlar konarak elde edilir. Ayrıca, disklerden biri eksen etrafında kalınlaştırılarak bir mile bağlanır.

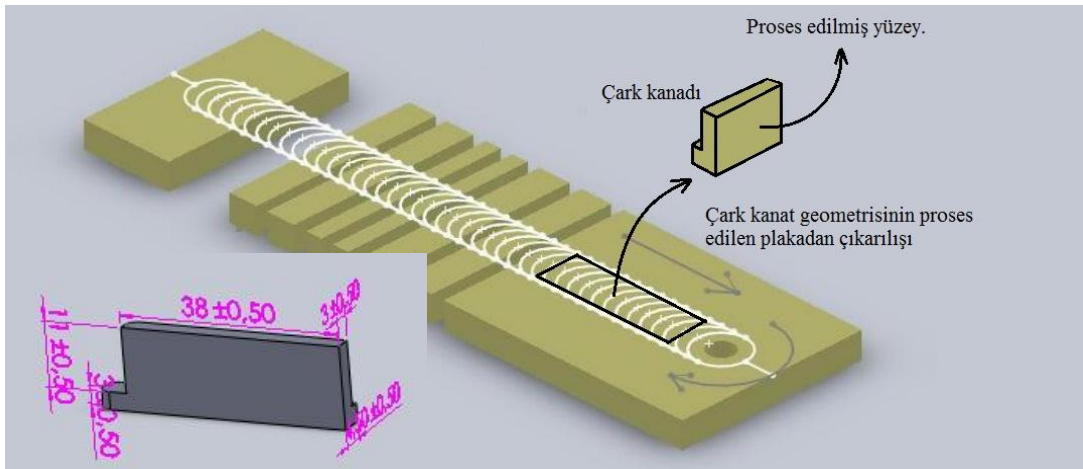
Şekil 46'da belirtildiği gibi, çark içindeki bir akışkan parçacığı, bir yandan çarkla beraber $u=r.\omega$ hızıyla dönme eksenini etrafında dönerken, diğer yandan ω hızıyla çarka göre hareket edip çarkı terk eder. u çevresel hız, ω bağıl hız adını alır [28].



Şekil 46. Basit bir radyal santrifüj pompa çarkı [28].

İçi akışkan dolu bir çark, eksenini etrafında dönmeye başlayınca, merkezkaç kuvvetlerinin etkisi altında akışkan B yüzeyinden dışarı çıkmaya başlar. Böylece, E yüzeyinden emilen akışkan B yüzeyinden dışarı basılır [28].

Kullanılan LeoXGm/1A santrifüj pompanın çarkı sökölüp, boyutları incelendikten sonra, pompa için imal edilmesi daha kolay olan radyal çark tasarımı yapılmıştır. Radyal çark kanatlarının imali, ileri veya geri eğimli pompa çark kanatlarının imaline nazaran daha kolay ve pratiktir. Ayrıca SKP ile işlenmiş NAB malzemeye, içyapısını ve mekanik özelliklerini değiştirebilecek ek işlem yapılmaması bizim için önemli bir kriterdir. Bu nedenle radyal çark kanadı imal edilmesine karar verilmiştir. Kanat profil çıkarımının şematik görüntüsü Şekil 47’de verilmiştir.



Şekil 47. Çark kanat geometrisinin proses edilmiş plakadan çıkarılması

Radyal çarklarda kanat sayısı seçimi önemlidir. Gereğinden fazla kanat sayısı seçilirse sürtünme yüzeyi artacak, enerjinin bir kısmı sürtünme dolayısıyla kaybolacaktır. Diğer taraftan kanat sayısı gereğinden az seçilirse kanat yüzeyleri gerekli kanat basıncını taşıyamayacaktır. Kanat kanallarında cidarlardan ayrılmalar meydana gelecektir. Bu sebeplerden dolayı optimum kanat seçimine çalışılmalıdır. Araştırmacılar uygun kanat yüzeyi için,

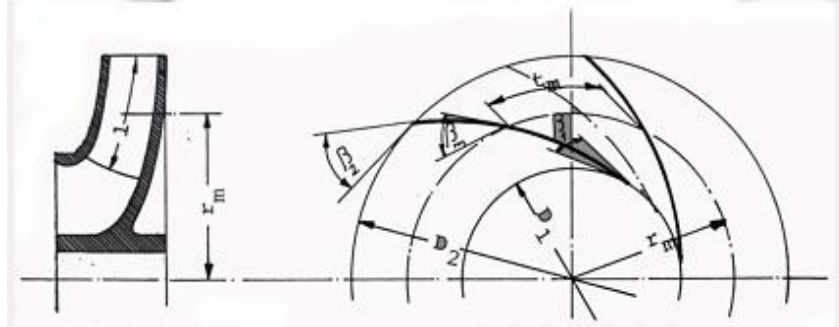
$$c = \frac{l}{\sin \beta_m \cdot t_m} \quad (3.1)$$

eşitliğinin sağlanması istenmektedir. Bu eşitlikte,

$$t_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_m}{z} \quad \text{ve} \quad \sin \beta_m = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (3.2)$$

$$1,6 < c < 2,2 \quad \text{ve} \quad l = r_1 - r_2 \quad (3.3)$$

olarak alınacaktır.



Şekil 48. Kanat sayısının belirlenmesi [29].

Formül 3.1'deki eşitlikte t_m değerinin karşılığı koyulup z kanat sayısı tek bırakılırsa,

$$z = c \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_m}{l} \cdot \sin \beta_m \quad (3.4)$$

$$z = k \cdot \frac{2 \cdot r_m}{l} \cdot \sin \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (3.5)$$

$$k = c \cdot \pi \quad (3.6)$$

elde edilir. Basit radyal çarklarda $l=r_2-r_1$ olduğundan tam santrifüj pompalar için kanat sayısı,

$$z = k \cdot \frac{D_2+D_1}{D_2-D_1} \cdot \sin \frac{\beta_2+\beta_1}{2} \quad (3.7)$$

eşitliği yardımı ile bulunur. Formül 3.7'deki k değeri ($5 < k < 6,5$) arasında seçilir. Genellikle bu değer 6,5 civarında alınır [29].

Elimizde mevcut olan pompanın ebatları imal edecek olduğumuz radyal çark için temel kriter olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 49'da orijinal pompa çarkı görülmektedir.



Şekil 49. Orijinal pompa çarkı ve geri eğimli kanatları

Formül 3.7'ye göre, radyal çarkın β_1 ve β_2 değerleri 90° 'dir. Bu nedenle $\sin(90)=1$ olmaktadır. Z kanat sayısı doğrudan kanat dış ve iç çap değerleri ile ilişkilidir.

Çark çapı aynı zamanda kanat dış çapı (D_2) olmaktadır. Mevcut pompa ebatlarına göre çarp çapı 122 mm'dir. Kanat iç çapı (D_1) ise, kamalı mil yatağının et kalınlığı ile

doğrudan bağlantılıdır. Mil yatak çapı 20 mm'dir. Emiş gözünden akışkanın rahatça hareket edebilmesi ve karşılaşacağı direncin azalması için mil yatağı ile kanat arasında bir miktar boşluk bırakılması gerekmektedir. Bu değeri belirlemek için orijinal çark referans alınarak 9 mm seçildi. Böylelikle D_1 değeri 38 mm olarak bulunmuştur.

Bulunan değerler formül 3.7'deki yerlerine konulduğunda;

$$Z = 6,5 \times \frac{(122+38)}{(122-38)} = 12,3 \equiv 12 \text{ olarak seçilir.}$$



Şekil 50. Pompa çarkı tasarımı

İşlenmiş 12 adet kanadın çark gövdesine şekil bağlı konstrüksiyonu gerçekleştirilmiştir. Kanatların sabitlenmesi amacıyla alien vida ile çark gövdesine bağlantısı yapılmıştır. Şekil 50 ve Şekil 51'de kanat tipleri, uygulaması ve monte edilişi görülmektedir.

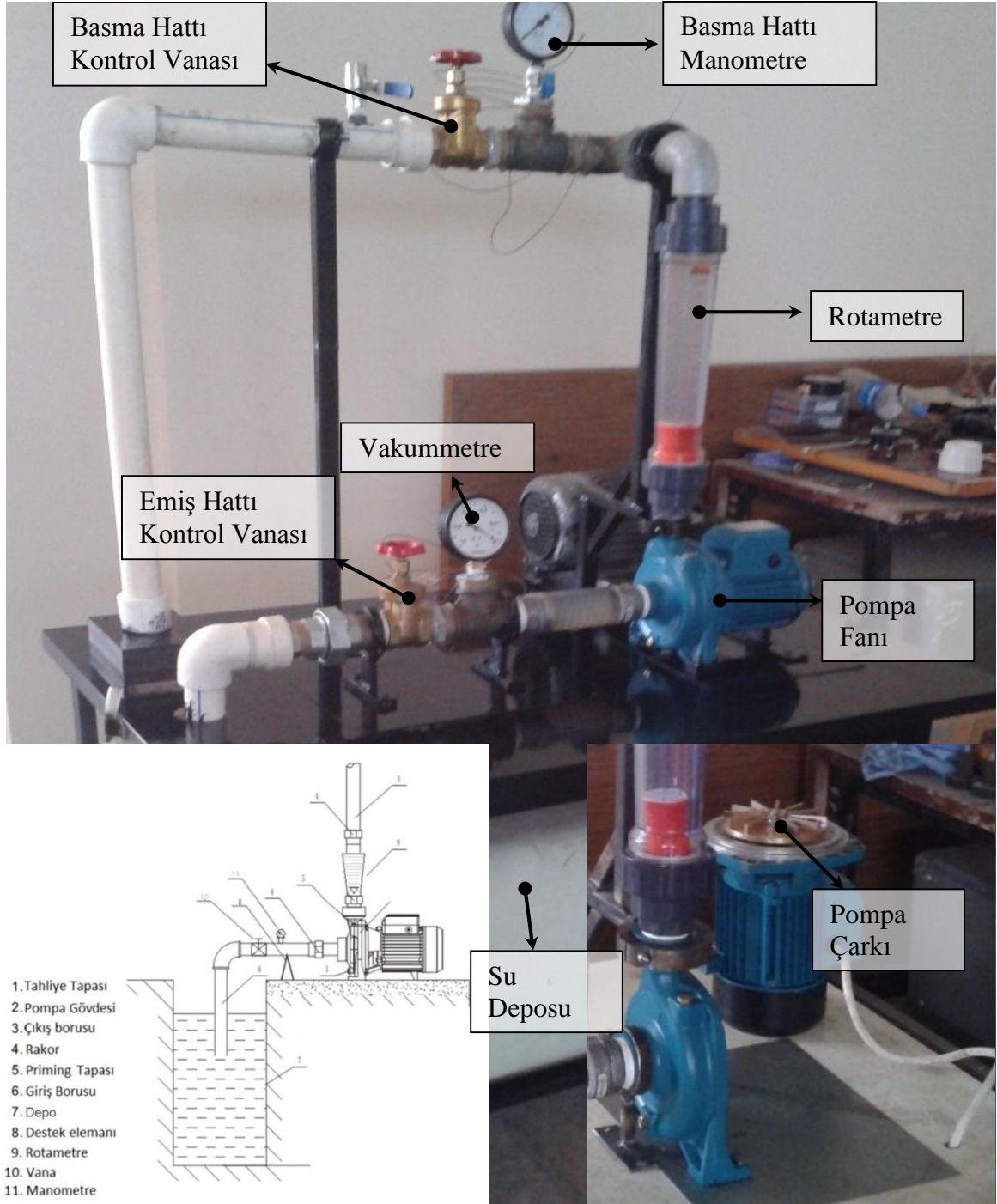


Şekil 51. Alien vidalar ile kanatların çark gövdesine sabitlenmesi

Ayrıca üretilen çarkın balansı kontrol edildi ve hafifletmek amacıyla atıl kalan bölgelerinden bir miktar talaş kaldırılmıştır.

3.8. Kaviteasyon Deney Düzenekinin Hazırlanması

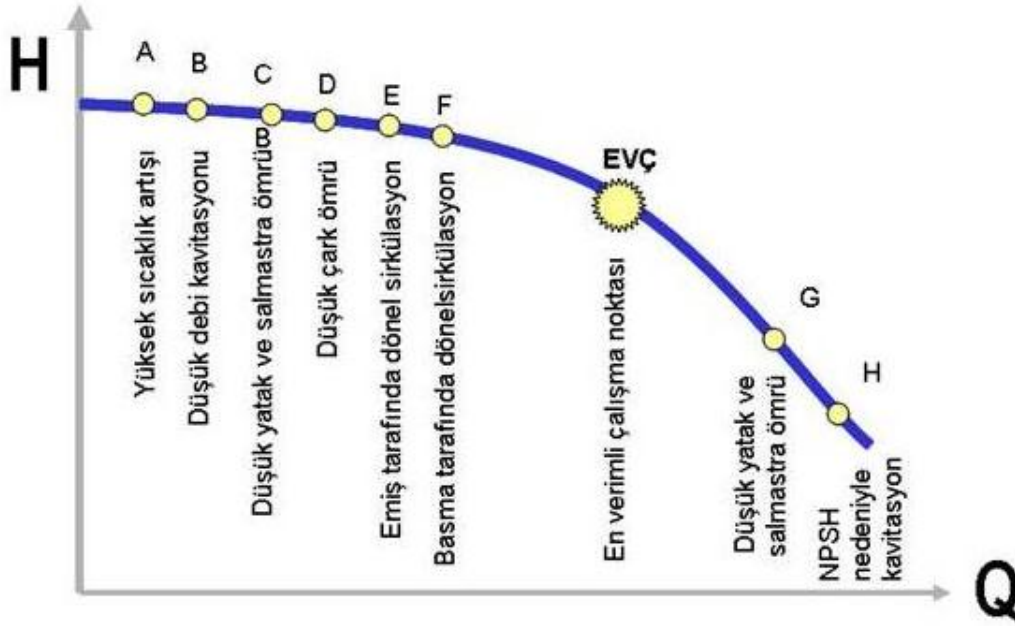
Şekil 52’de görüldüğü gibi, bir tanktaki suyun santrifüj pompa ile emilerek tekrar tanka gönderildiği kapalı devre sistemi yapılmıştır. Sistemde emme ve basma hattına birer sürgülü vana konulmuştur. Emiş hattındaki vana kısılarak akışkanın hızı artırılmış ve basıncı düşürülmüştür. Dolayısıyla bu şartlar altında çalışan pompa çarkı, gürültülü (sanki içerisinde çakıl taşı varmış gibi) ve titreşimli bir çalışma davranışı göstermeye başlamıştır. Sistemin negatif emişli olması pompa çarkının kaviteasyona eğilimini arttıracaktır. Ayrıca emme hattında bulunan zorlayıcı elemanlarda, kaviteasyon oluşumunu artıran etmenlerdendir. Sabit tutulan SKP parametreler kullanılarak farklı sayılarda proses edilmiş durumdaki pompa çarkı kanatlarının kaviteasyonlu bölgede çalıştırılması durumunda zamana bağlı olarak sergilediği davranışlar incelenmiştir.



Şekil 52. Sistemin şematik ve gerçek görünümü

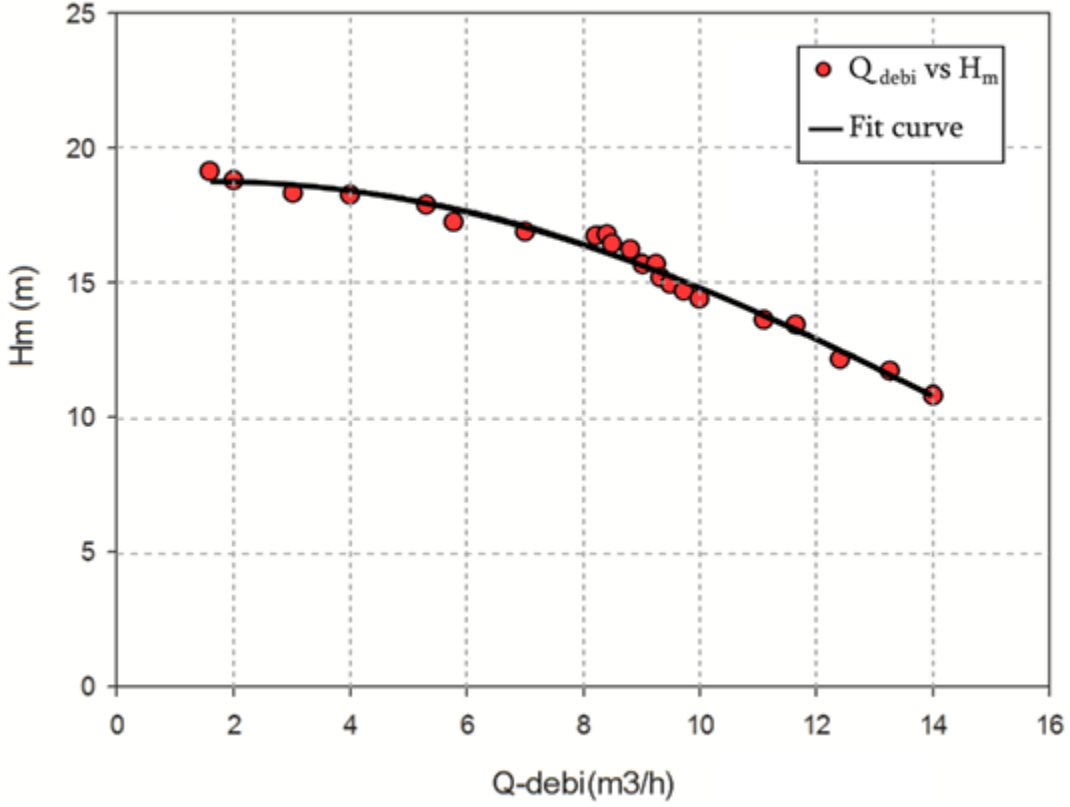
Pompa üreticisinden alınan destek ve veriler ile yaptığımız ön deneyler sonucu elde ettiğimiz verilerden yola çıkarak, pompanın karakteristik eğrisi çıkarılmıştır (Şekil 53 ve Şekil 54). Bu eğriden yararlanılarak, pompanın kavitasyonlu bölgede çalıştırılması sağlanmıştır. Literatür ve pompa üreticilerinin kavitasyonlu bölgeden kaçınılması için yapılması gereken tüm adımların tam tersi uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Giriş emme

basıncı düşürülmüş, tank seviyesi pompa emiş seviyesinin altında tutulmuş, emiş hattına vana, vakummetre ve dirsek gibi akışta direnç ve kayıp yaratan ekipmanlar kullanılmıştır. Pompa'nın çalışma koşulları olarak, $Q= 4 \text{ m}^3/\text{h}$ ve $P_{\text{emiş}}= - 0,9 \text{ bar}$ şeklinde seçilmiştir. Pompa giriş ve çıkışları 11/2" (DN40)'tır. Pompa basma çıkışında bir rotametre yardımı ile basma debisi ölçülmüştür.



Şekil 53. Pompaların genel karakteristik eğrisi

Pompa optimum çalışma noktasının solunda, çok düşük debilerde çalıştırılıp, düşük debi kavıtasyonuna maruz bırakılmıştır. Pompanın enerjisi akışkanı ısıtmıştır, bu durum akışkanı kavıtasyona yaklaştıran diğer bir etkidir. Pompa üreticisinin kavıtasyonlu bölgede çalışma belirtileri olarak bildirdiği; gürültülü çalışma, pompa fanı içerisinde çakıl taşı varmışçasına ses oluşumu, akışın kesintiye uğraması ve rulman arızası gibi sorunlarla karşılaşmıştır.



Şekil 54. Kullanılan pompanın karakteristik eğrisi

Basma hattındaki 100lt'lik depoda su dinlendirilip, doğal akış ile 250lt'lik depoya aktarılmaktadır. Böylelikle çalkantı sebebiyle su içerisinde oluşabilecek kabarcıkların önüne geçilerek, sadece kavitasyon menşei kabarcık oluşması hedeflenmiştir. Ayrıca emiş ağzı, su seviyesine olabildiğince uzak; tankın taban noktasına yakın yerleştirilerek, olası girdap oluşumu ile pompanın hava emmesi engellenmiştir. Pompa çark mili 3100 d/dk hızında dönmektedir. Pompa fanı, pompa gövdesinden belli aralıklarla sökülüp sorun olup olmadığı takip edilmiştir. Ayrıca bu belirli aralıkla gerçekleştirilen bakım işlemi sırasında, pompa çarkı gövdeden sökülerek, çark kanatları optik ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) altında yüzey incelemesine tabi tutulmuştur. Böylelikle çalışma süresi boyunca yüzeyde oluşan değişimler belirli aralıklarla incelenip, kayıt altına alınmıştır. Pompada bariz olarak kavitasyon belirtileri elde edilinceye kadar (3000 saat) çalıştırılmıştır. Bu çalışma süresi sonucunda sistem elemanları üzerinde $5,58 \times 10^8$ yük tekrarına erişilmiştir. Çalışma sırasında kapalı devre çalıştırılan sistemin depodaki suyun sıcaklığı başlangıçta $15^\circ\text{C} \pm 2$ değerinde iken sistem rejim haline geldiğinde (yaklaşık 5 saatlik çalışma süresi) $30^\circ\text{C} \pm 2$ aralığına eriştiği ölçülmüştür. Depodaki suyun sıcaklığının

rejim konumunda sabit kalmasını sağlamak için depoya paralel olarak pasif soğutucu bir panel bağlanmıştır. Suyun sıcaklığının artması buharlaşma basıncını atmosfer basıncına yaklaştırmakta yani mutlak basıncın, suyun kritik buharlaşma basıncından daha küçük olmasına sebebiyet vermektedir. Bu da kavitasyonu hızlandıran çok önemli bir faktördür.

Sistemin çalıştırılması sırasında, belli aralıklarda çark kanatları sökölerek optik ve elektron mikroskopları yardımıyla incelenmiştir.



4. BULGULAR VE İRDELEME

4.1. Malzemenin Başlangıç Özelliklerinin Belirlenmesi

Tedarikçiden temin edilen NAB (C95800) plakalar üzerinde kimyasal bileşim belirlenmesi, sertlik ve yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

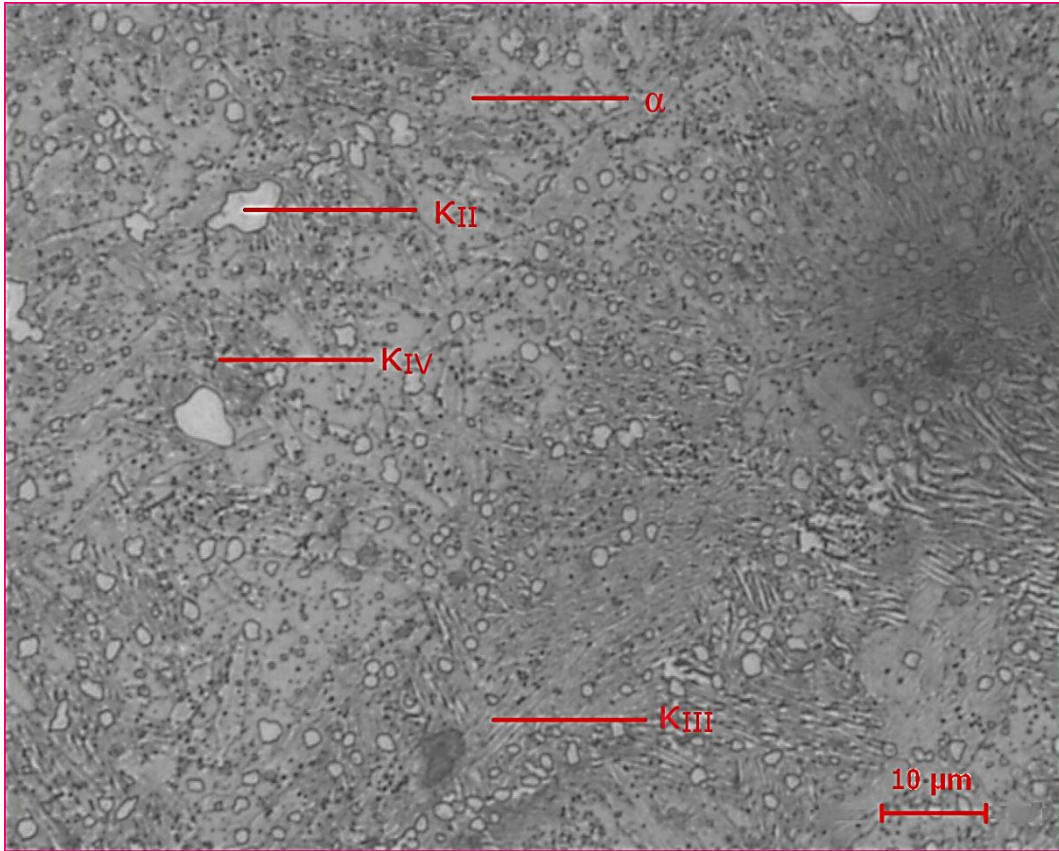
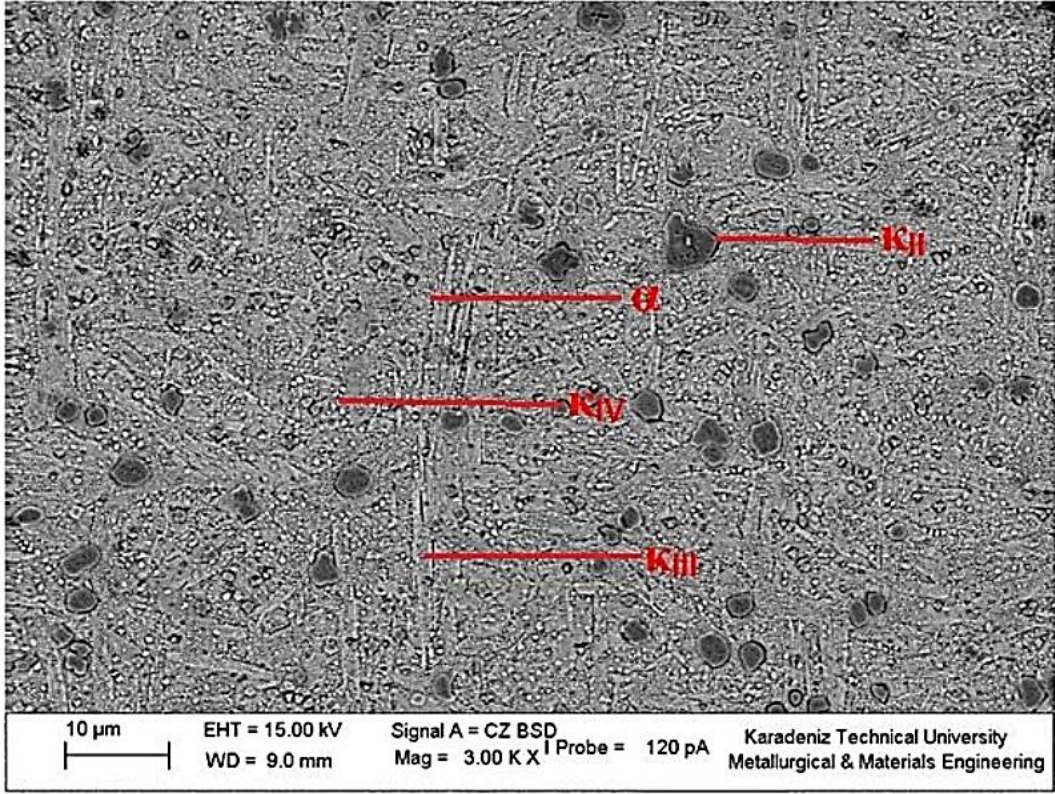
Ham döküm NAB plakalardan alınan numune üzerinde sertlik ölçümü yapılmıştır. Farklı noktalardan ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması 290VSD_{0,2/10} (Vickers Sertlik Değeri) olarak ölçülmüştür. Gerçekleştirilen ölçüm işlemlerinde hata payı ± 5 birim olarak gözlemlenmiştir. Tedarikçinin beyan ettiği 295 VSD değerine çok yakın bir değer olduğu belirlenmiştir.

NAB malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 8'deki gibi elde edilmiştir. ASTM B148 – 14'teki bileşim oranları aralıklarında olduğu ve dolayısıyla temin edilen malzemenin C95800 olduğunu doğrular niteliktedir.

Tablo 8. Temin edilen NAB malzemenin ölçülen kimyasal bileşim oranları

Kimyasal Bileşim							
Element	Cu	Al	Ni	Fe	Mn	Sn	Si
% Ağırlık	78,311	10,917	4,863	3,987	1,312	0,234	0,162
Element	Zn	Zr	Co	Pb	Mg	Be	Cr
% Ağırlık	0,132	0,045	0,021	0,009	0,004	0,002	0,001

Elimizdeki ham döküm NAB malzemenin mikroyapı ve makro görüntüleri çekilmiştir. Base malzemenin içyapı görüntüleri Şekil 55'te verilmiştir.

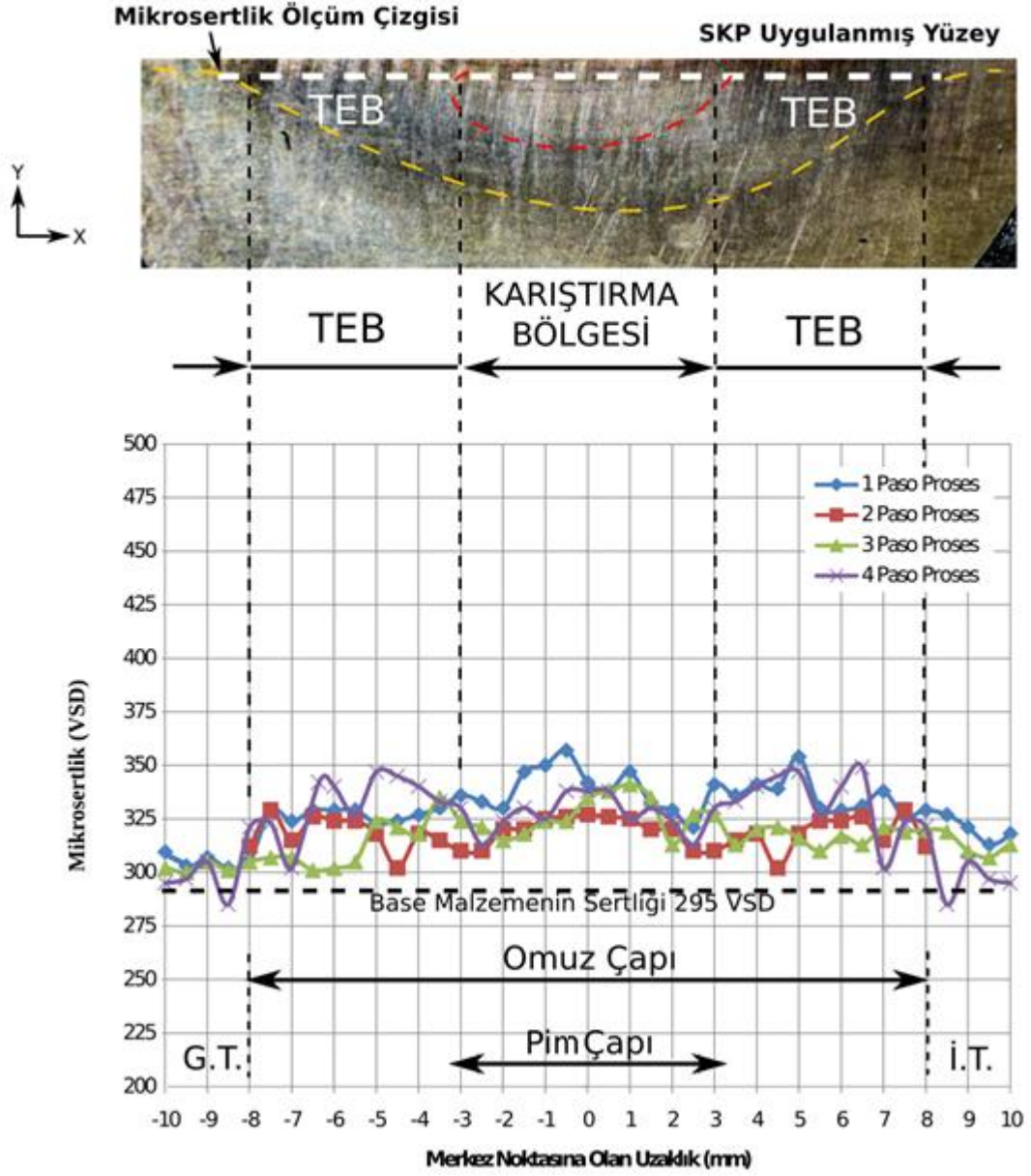


Şekil 55. Base malzemenin optik ve elektron mikroskop görüntüleri

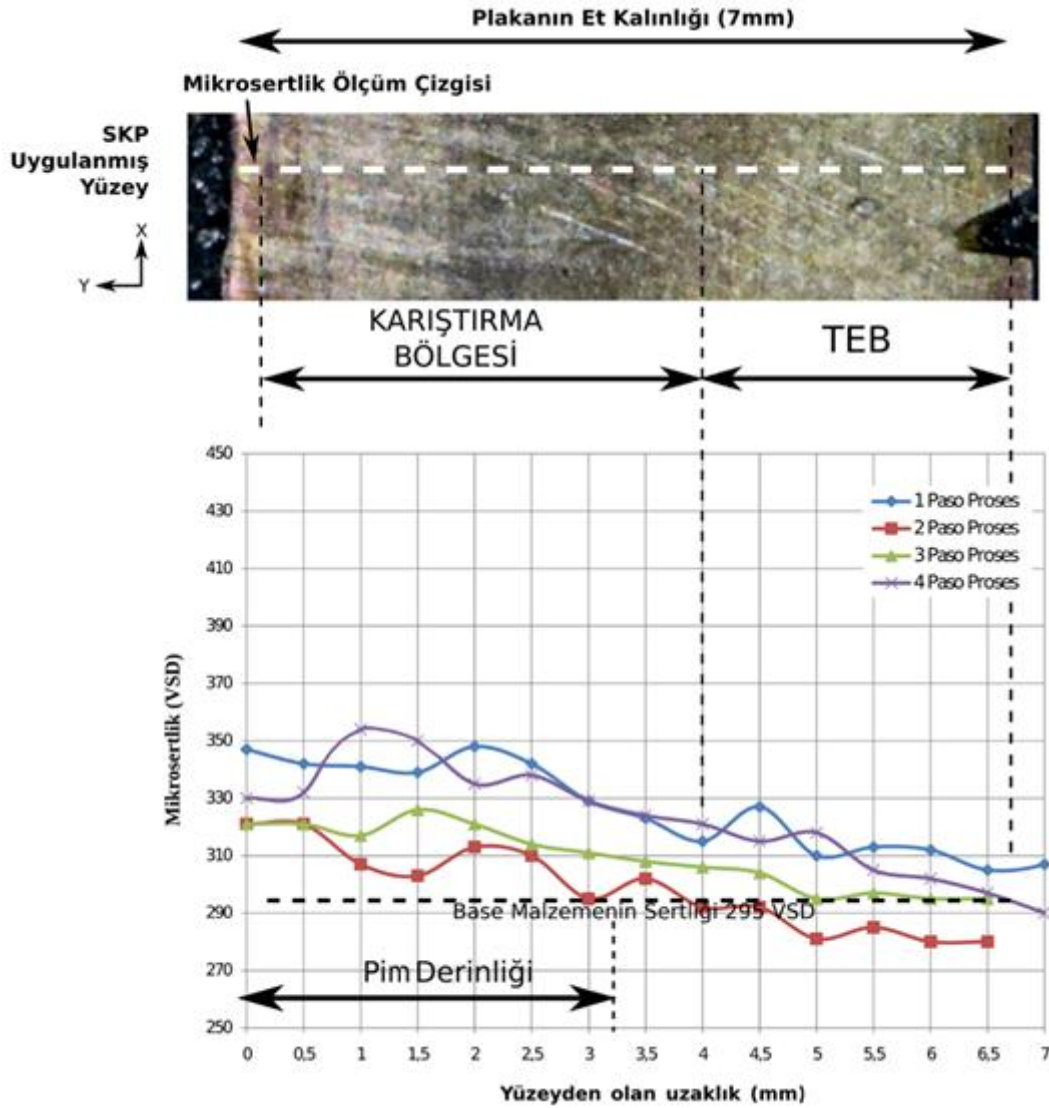
4.2. Mikrosertlik İncelemeleri

Sürtünme karıştırma prosesi sonrası var olan farklı mikroyapısal bölgelerin incelemesi optik mikroskop aracılığıyla yapılmıştır. Bu proses yönteminde proses bölgesinin dört farklı bölgesi Şekil 56'da bakalitle kaplı bir numunenin stereo mikroskop görüntüsü üzerinde gösterilmiştir. Burada karıştırma bölgesi ve termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB) gösterilmiştir. Bunun dışında ısının tesiri altındaki bölgede vardır, fakat bu daha çok sürtünme karıştırma kaynak yönteminde ortaya çıkmaktadır. Bu bölgeler mikroyapısal olarak farklılıklar göstermektedir.

Mikrosertlik ölçümleri için hazırlanan metalografi numunelerine Şekil 56'daki gibi kaynak bölgesi merkezinden başlayarak simetrik olarak her iki yönde eşit adımlarla ölçümler yapılmıştır. Tüm karıştırma şiddetlerinde yapılan ölçümlerden alınan sonuçlar Şekil 56 ve 57'deki grafikte sunulmuştur.



Şekil 56. Yüzeye paralel mikrosertlik sonuçları

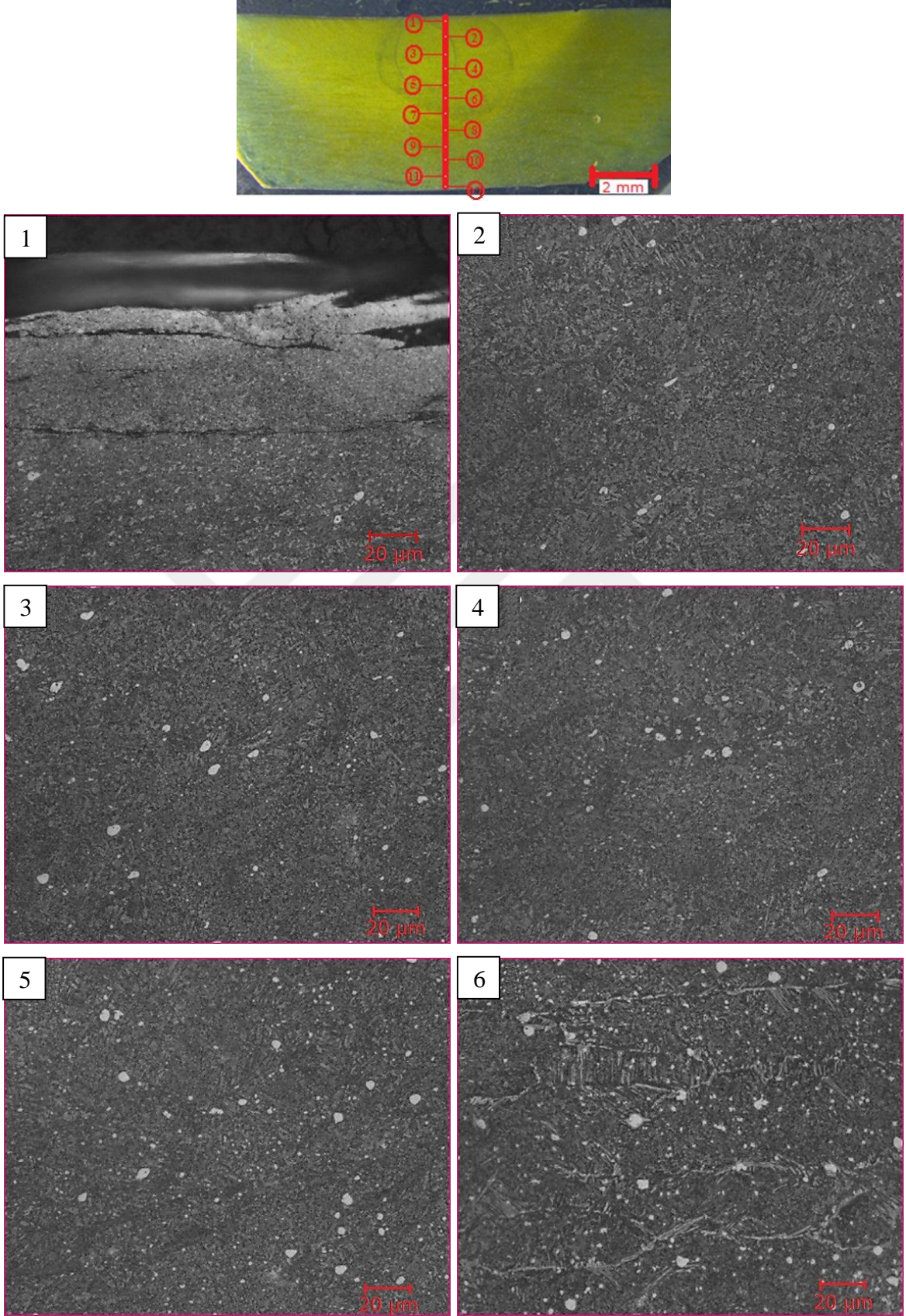


Şekil 57. Yüzeyden derine doğru mikrosertlik değişimleri

Gerçekleştirilmiş sürtünme karıştırma prosesi numunelerinden 1 Paso Proses edilmiş olan numunenin üzerinde, meydana gelen deformasyon sonucu oluşan içyapıların ayrıntılı optik mikroskop görüntüleri Şekil 58’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde Proses edilmiş olan yüzeyin en üstünde takımın sürtünmesinden etkisiyle ilerleme bölgesinden gerileme (yığılma) bölgesine transfer edilmiş olan yaklaşık 40 μm kalınlığındaki bir tabaka görülmektedir.

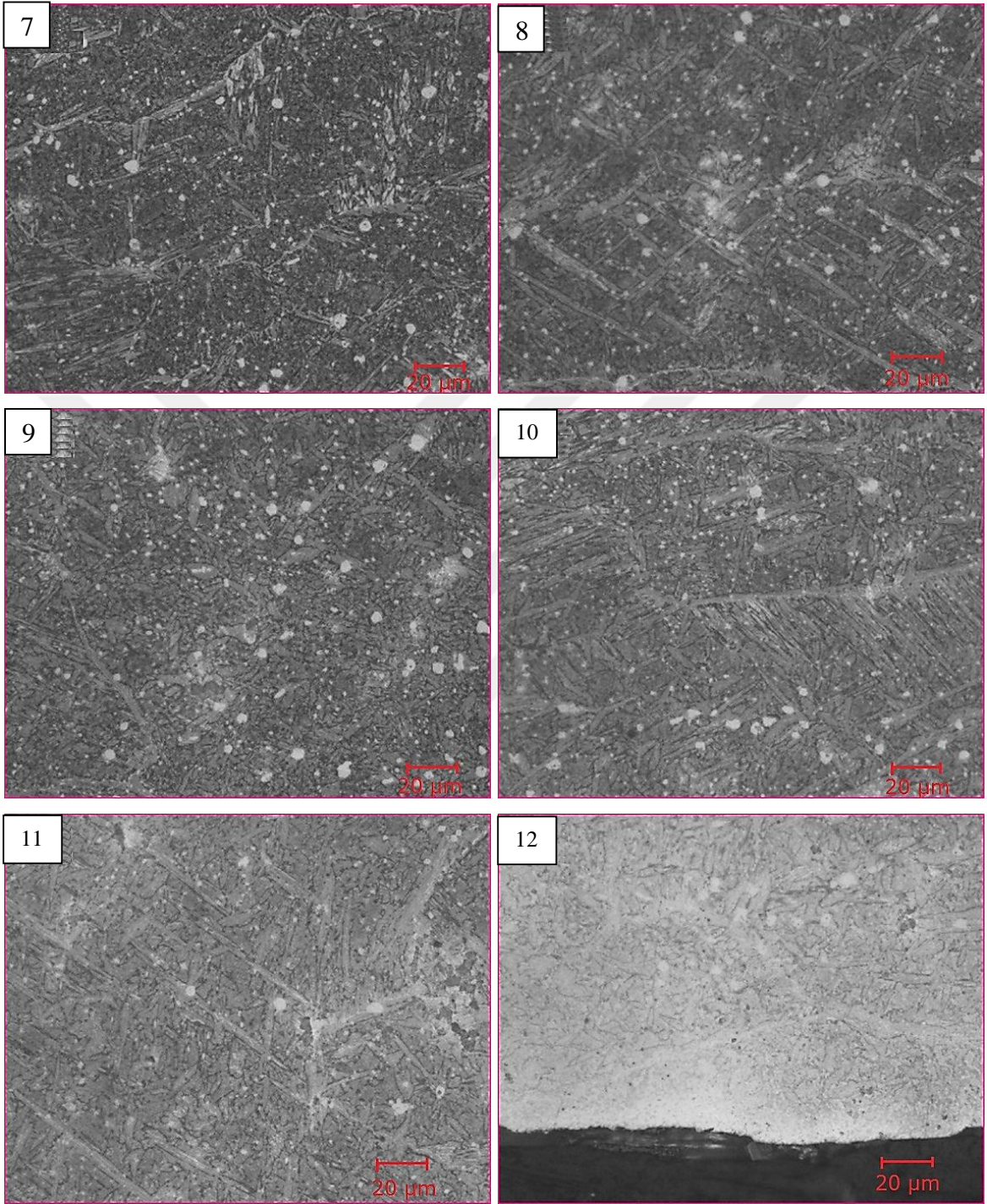
Proses işlemi sırasında, malzemenin karıştırma bölgesinde ölçülen sıcaklık değerinin $685^{\circ}\text{C} \pm 15$ mertebelerine eriştiği belirlenmiştir. Bu sıcaklık mertebelerinde malzeme içerisindeki faz yapılarında bir takım değişiklikler olmaktadır.

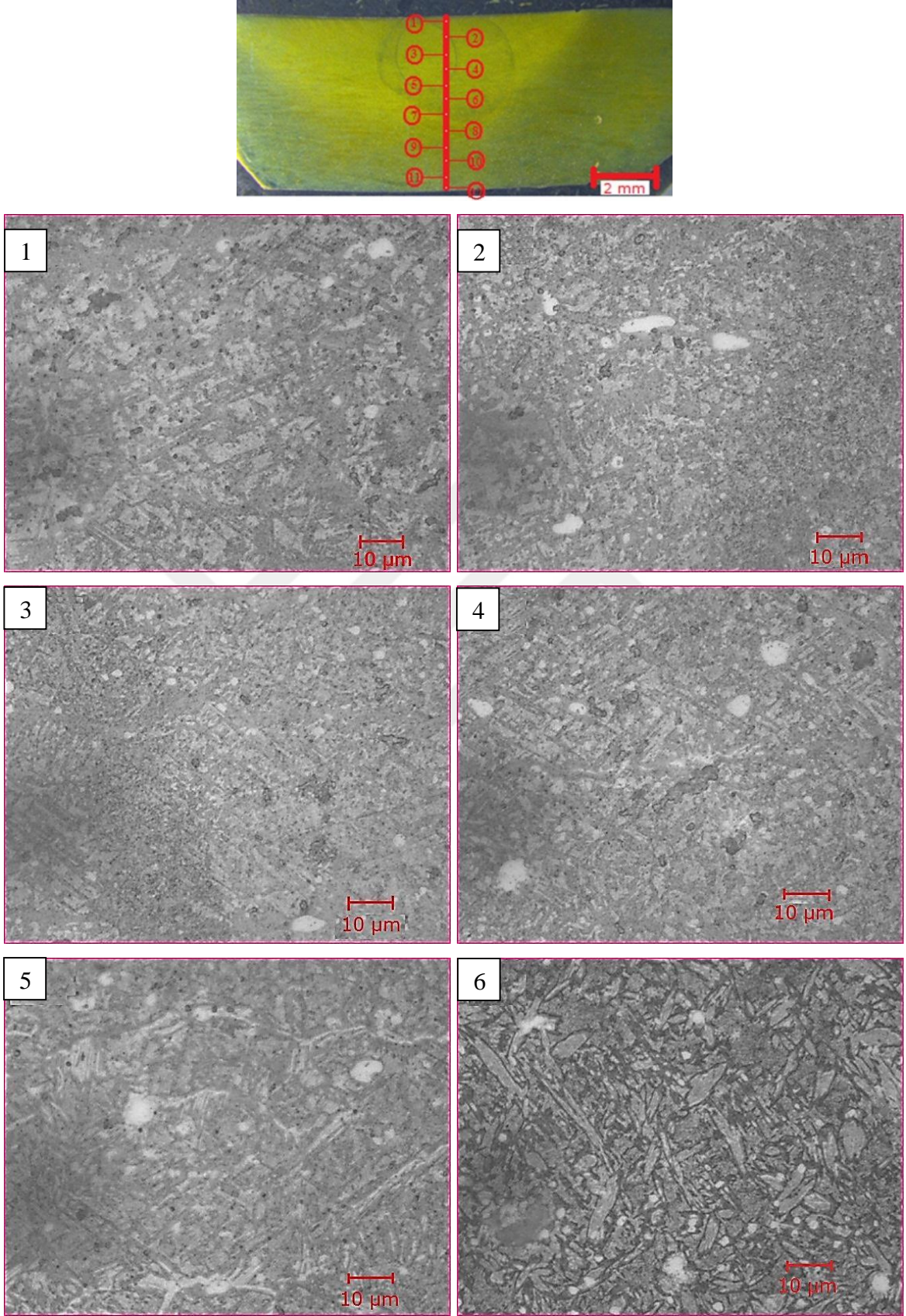
NAB alaşım malzeme için SKP işlemi 1 paso olarak gerçekleştirilmiş numune üzerinde detaylı içyapı incelemesi yapıldığında; ana metal taneleri termomekanik etkili bölgede dağılır, kayma yönü ve uzantısı, karıştırma bölgesi – termomekanik etkili bölge sınırı boyunca değişir. Bu bölgedeki mikroyapıda takımın karıştırıcı ve oluşan deformasyonun etkisiyle oldukça incelmiş bir yapının ortaya çıkmış olduğu görülmektedir. Ayrıca oluşturulan karıştırma etkisiyle döküm yapısında gözlenen boşluk gibi döküm hatalarının önemli oranda azalmış olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, aynı bölgenin SEM görüntülerinden de anlaşılmaktadır. Şekil 58'deki karıştırıcı pim ucuna denk gelen 5. ve 6. fotoğraflardan bu bölgedeki tane yapısının nispeten daha iri yapıda oluştuğu, dökülmüş durumdaki yapıya yaklaştığı görülmektedir. Bu görüntülerden, dökülmüş durumdaki NAB alaşımı bünyesinde bulunan κ_{III} , κ_{IV} ve martenzitik fazların önemli ölçüde incelmiş oldukları ve malzemenin daha homojen bir yapıya dnştğu görülmektedir. Şekil 58'deki 7. görüntüden başlayarak ana malzemede gözlenmiş olan κ_{III} , κ_{IV} ve martenzitik fazların yapıda değişmemiş, iğneli ve iri taneli bir yapıda muhafaza oldukları görülmektedir. Aynı zamanda yüzeyden uzaklaştığı karıştırıcı pimin etkisi azalmakta, dolayısıyla döküm yapısındaki hataların mevcut olarak bulundukları (zellikle 11. ve 12. görüntü) bariz olarak görülmektedir.



Şekil 58. SKP İşlemi sonrası 1 Paso Proses numunenin düşük büyütme mikroyapı görüntüleri

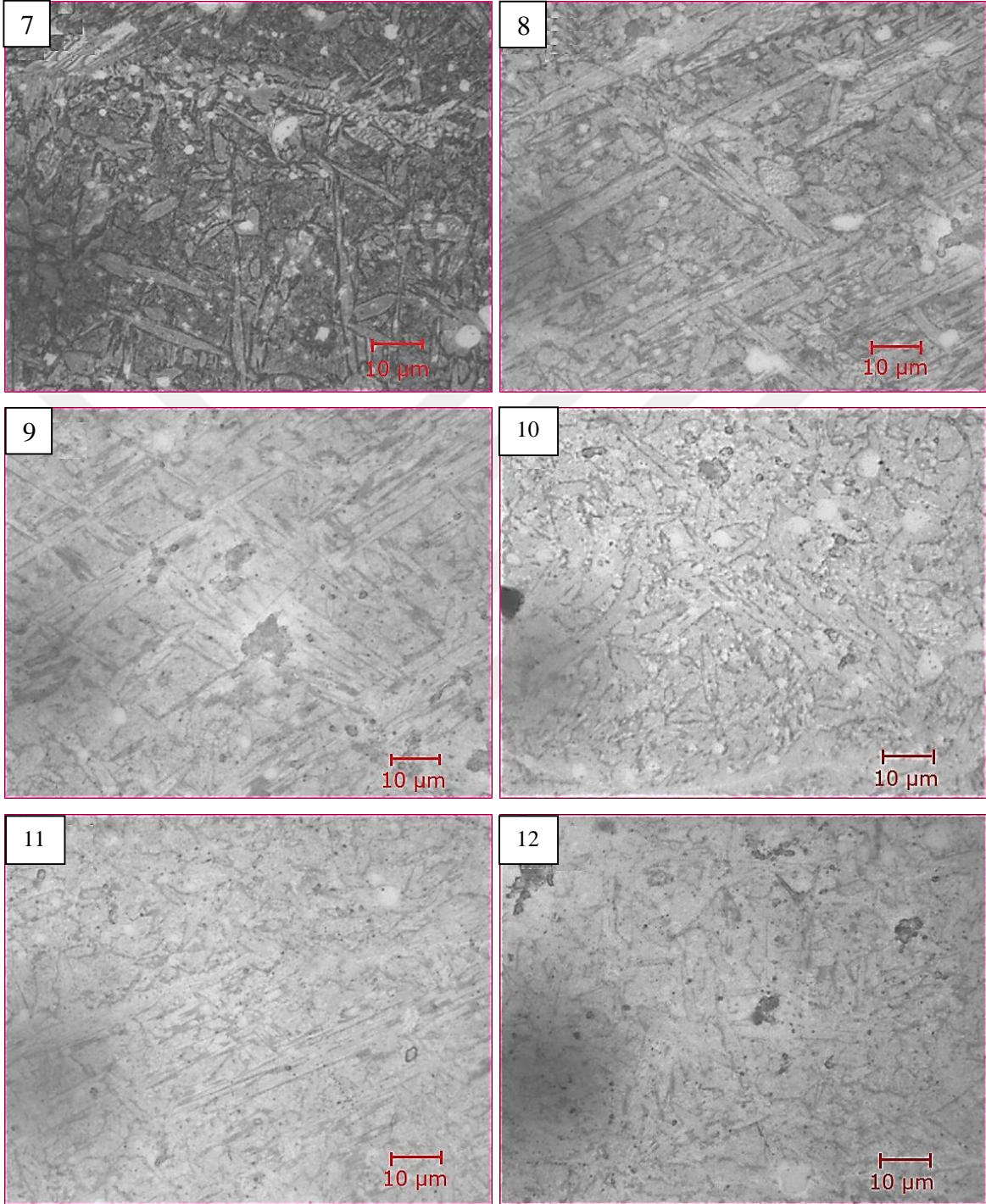
Şekil 58'in devamı

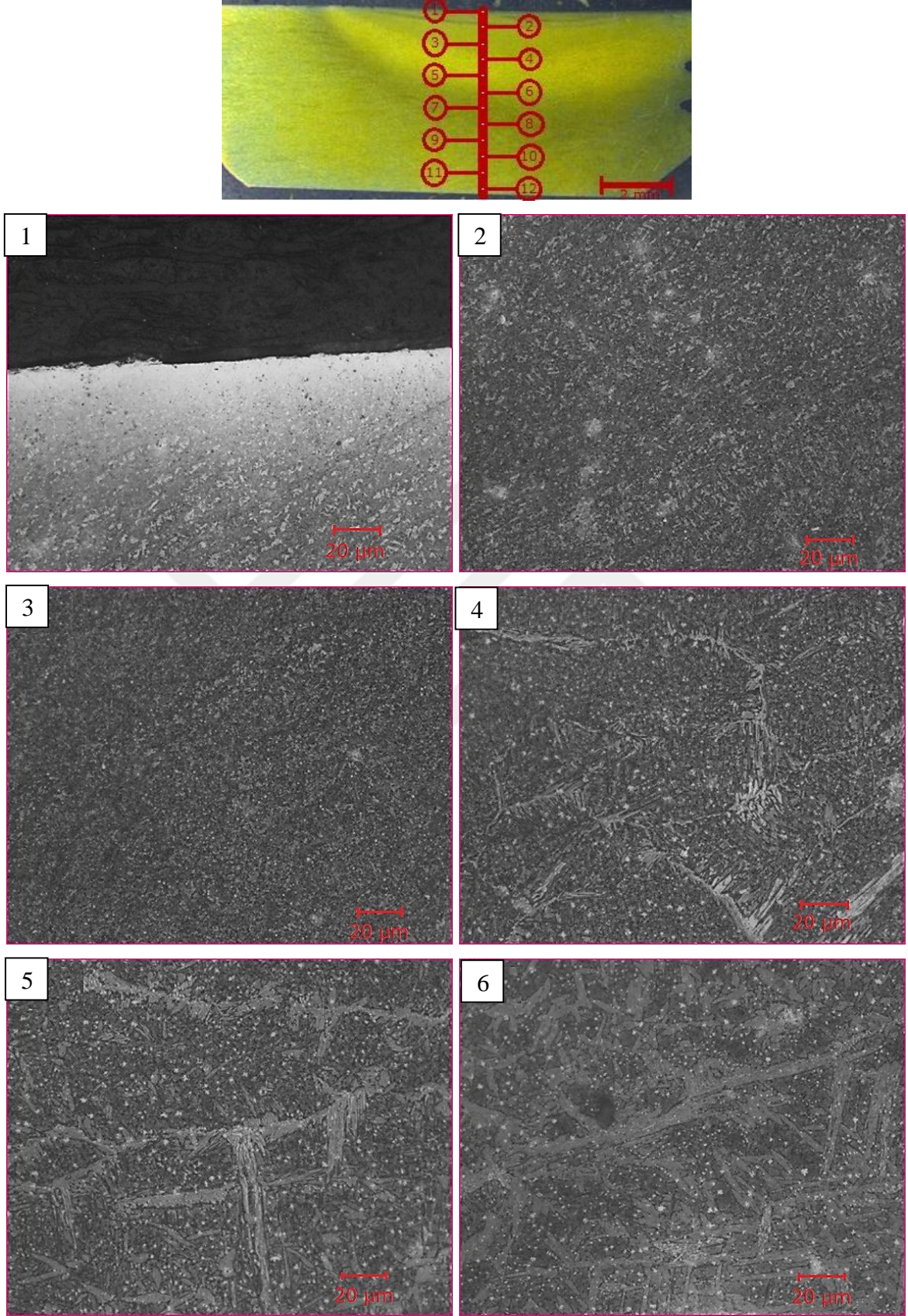




Şekil 59. SKP İşlemi sonrası 1 Paso Proses numunenin yüksek büyütme mikroyapı görünümleri

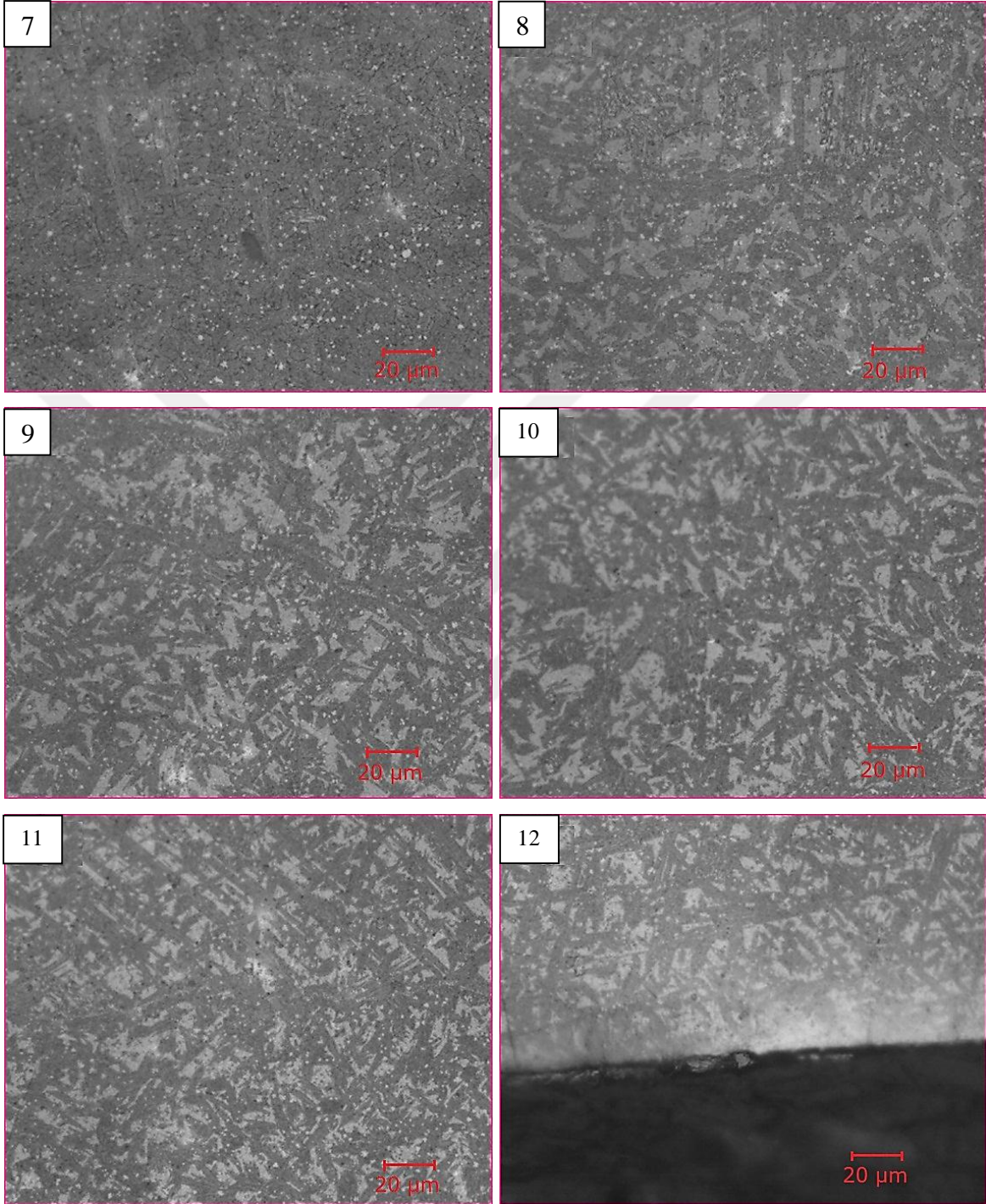
Şekil 59'un devamı

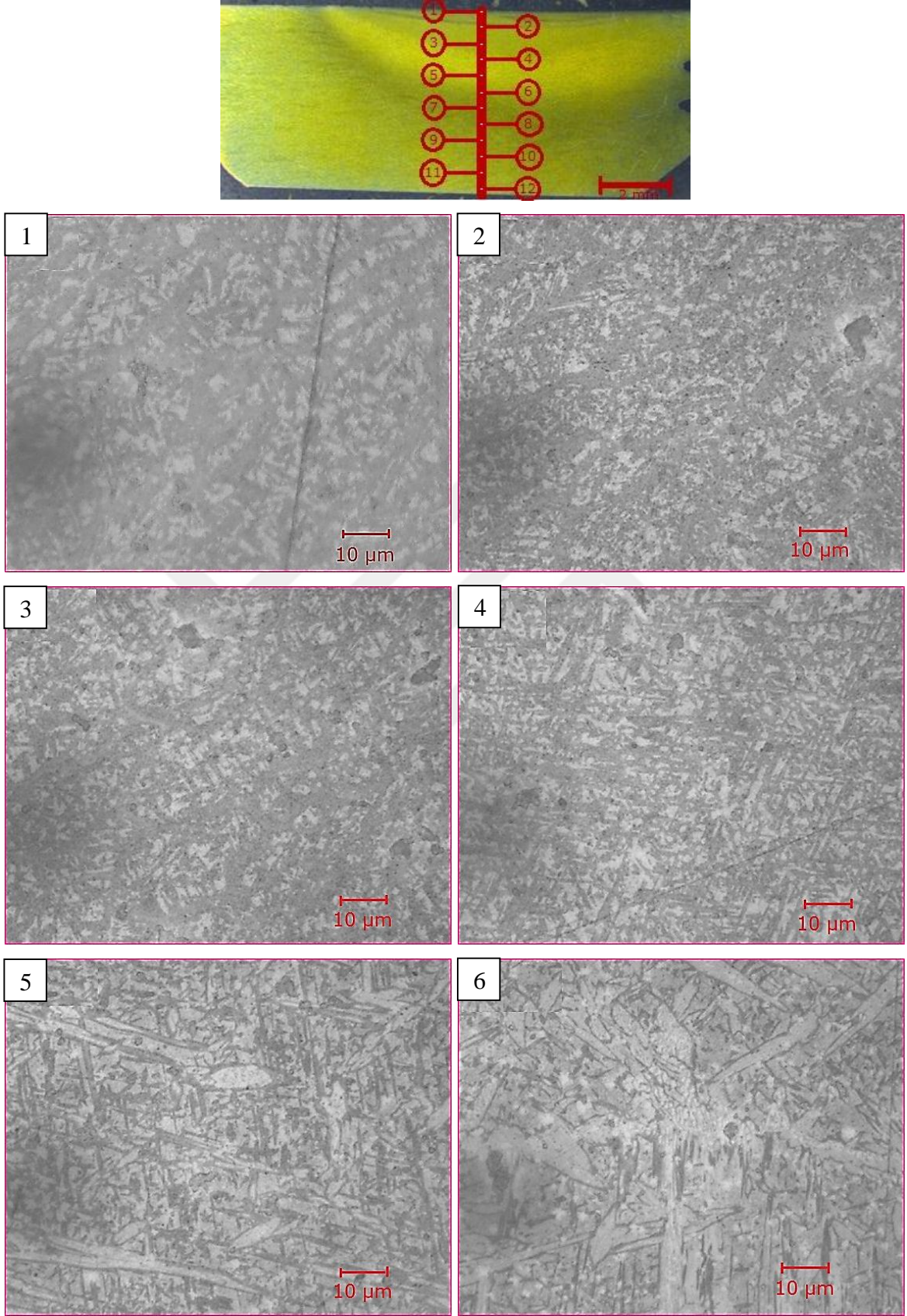




Şekil 60. SKP İşlemi sonrası 2 Paso Proses numunenin düşük büyütme mikroyapı görünümleri

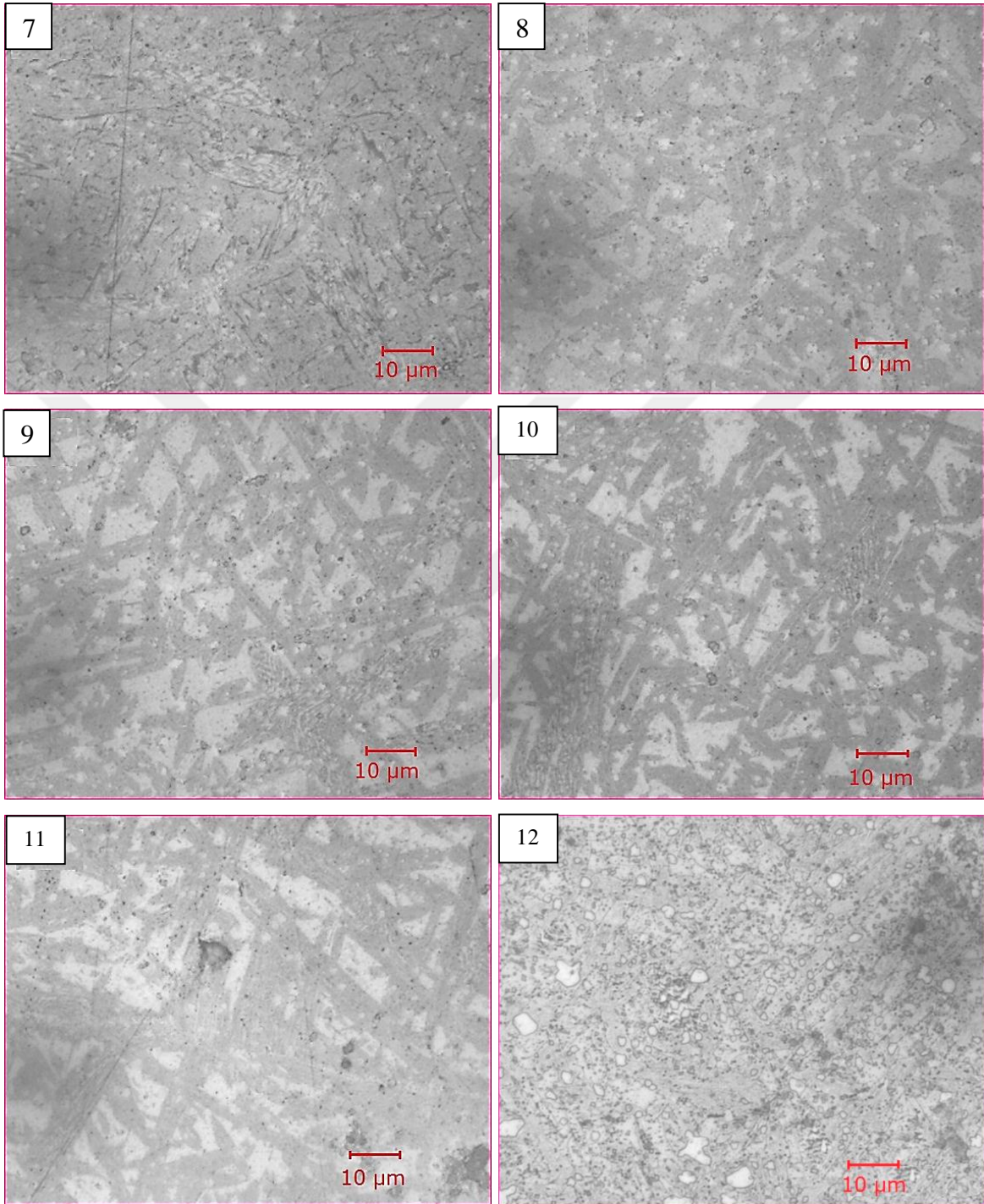
Şekil 60'in devamı

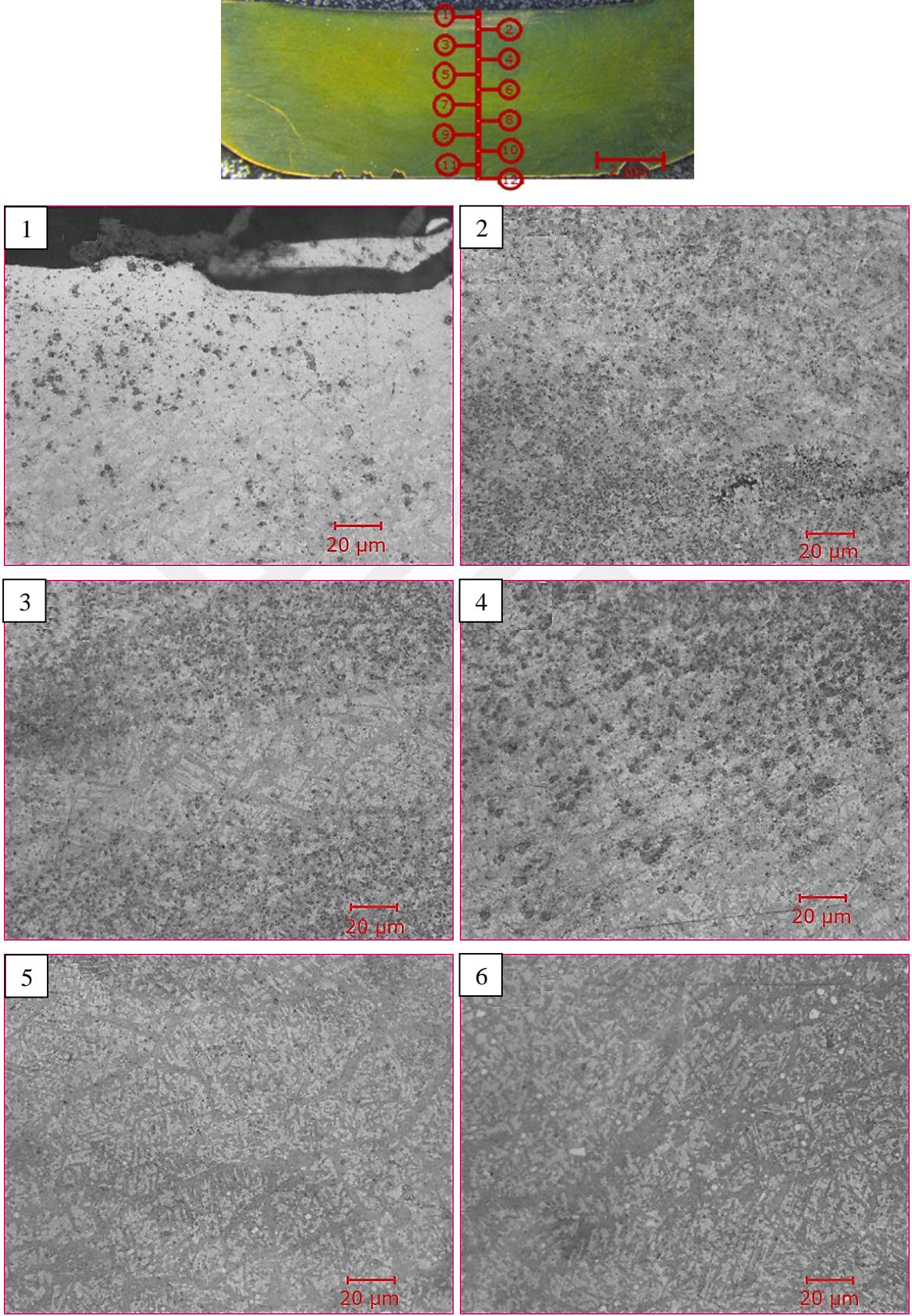




Şekil 61. SKP İşlemi sonrası 2 Paso Proses numunenin yüksek büyütme mikroyapı görünümleri

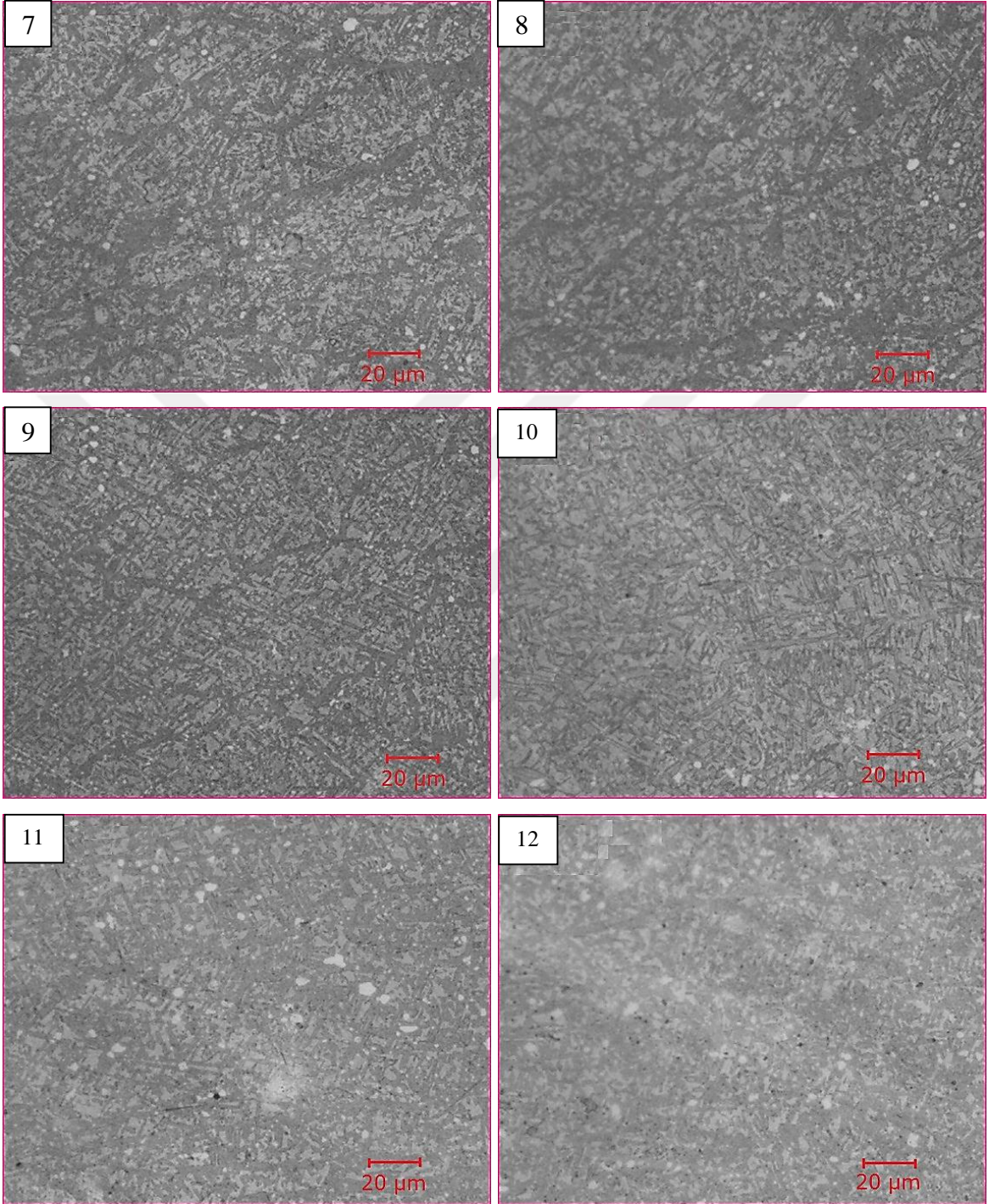
Şekil 61'in devamı

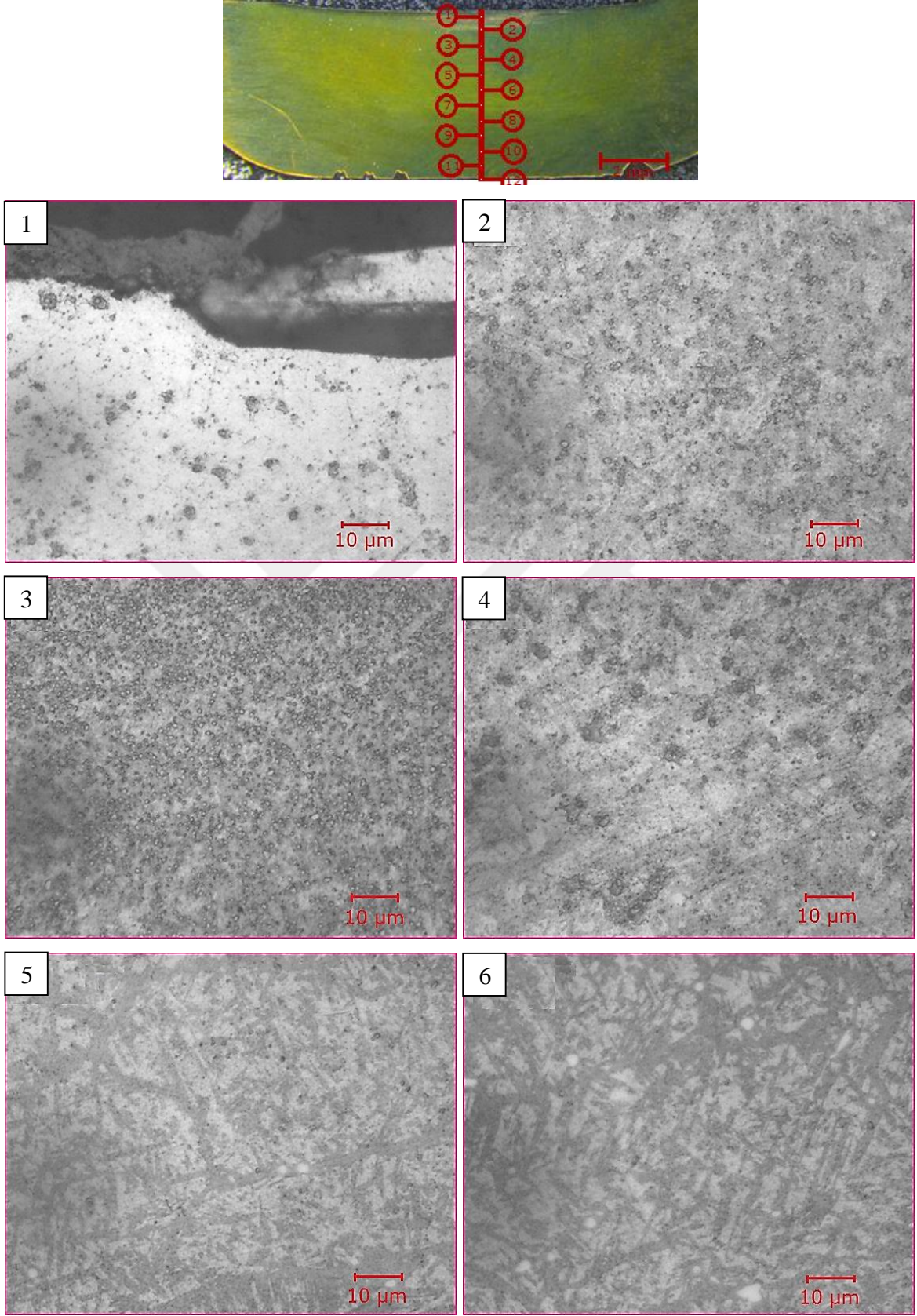




Şekil 62. SKP İşlemi sonrası 3 Paso Proses numunenin düşük büyütmeli mikroyapı görünümleri

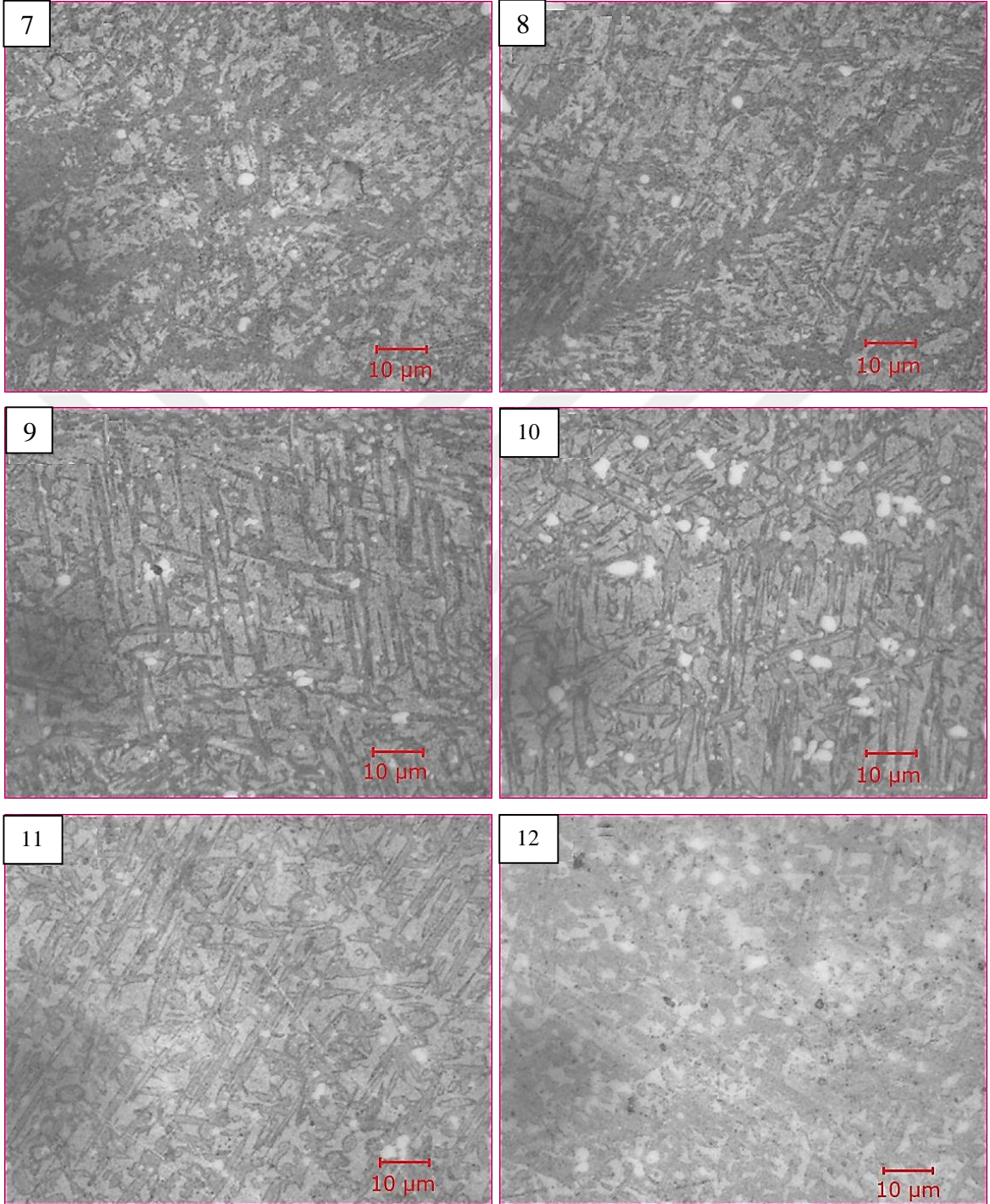
Şekil 62'nin devamı

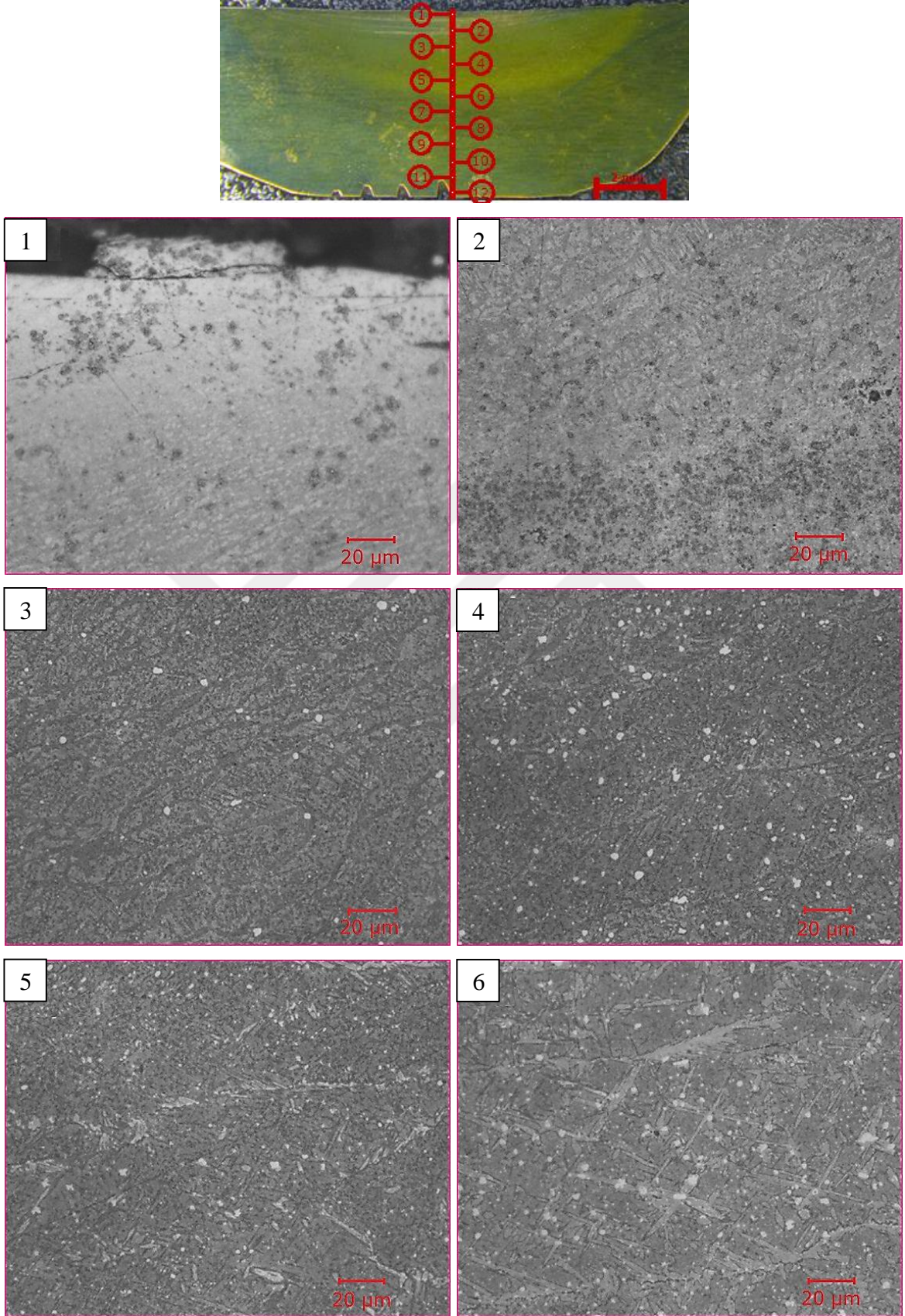




Şekil 63. SKP İşlemi sonrası 3 Paso Proses numunenin yüksek büyütme mikroyapı görünümleri

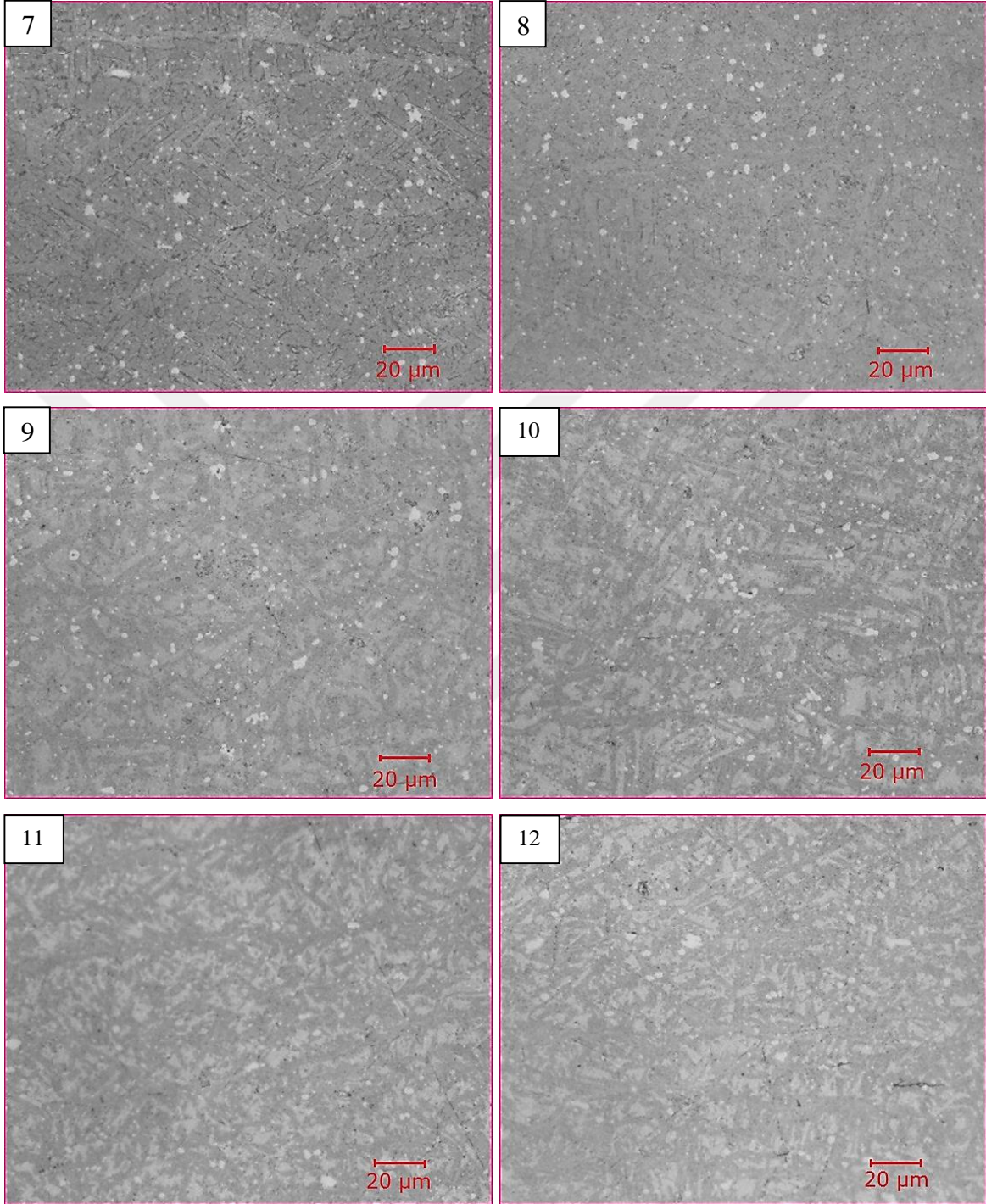
Şekil 63'ün devamı

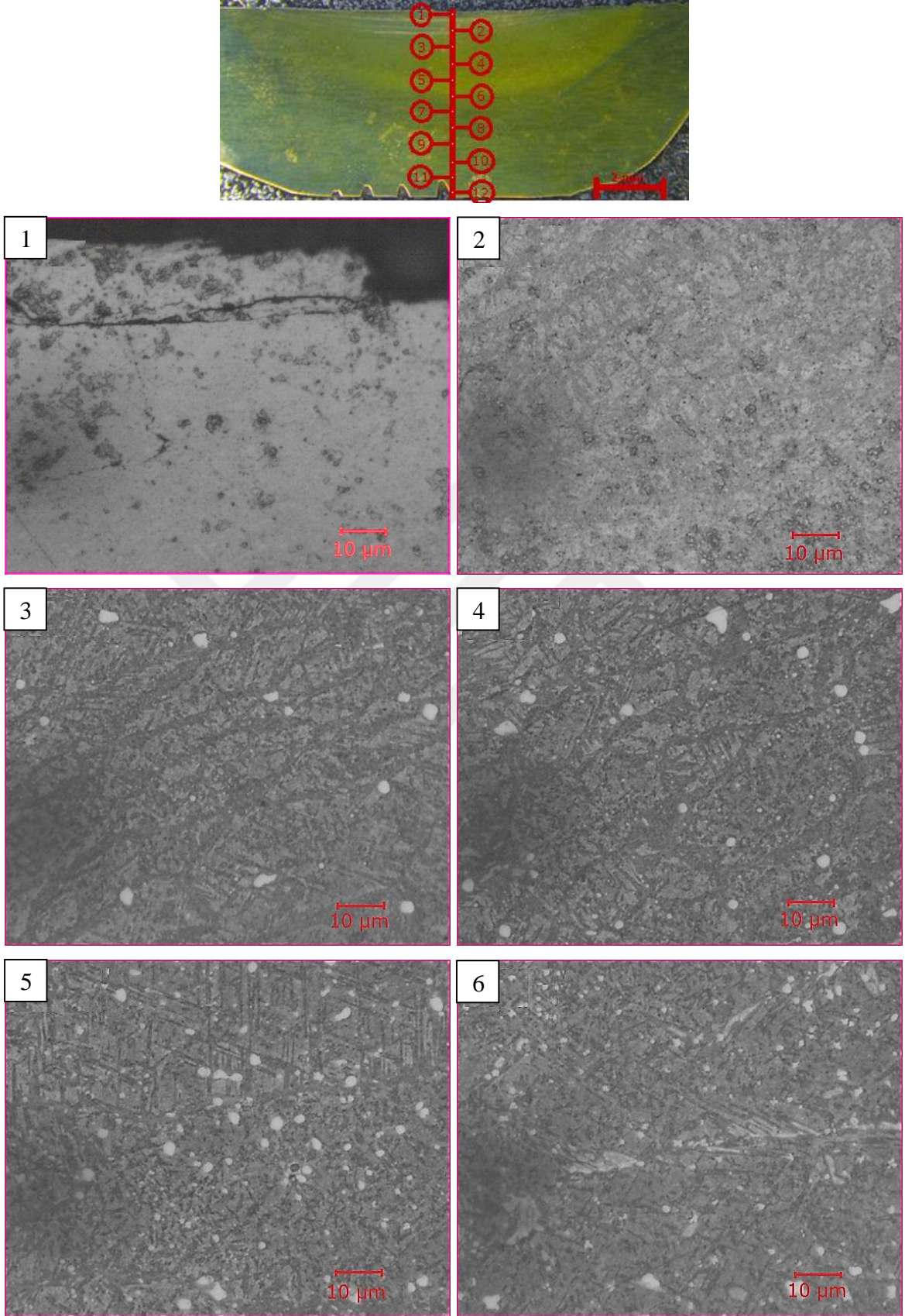




Şekil 64. SKP İşlemi sonrası 4 Paso Proses numunenin düşük büyütme mikroyapı görünümleri

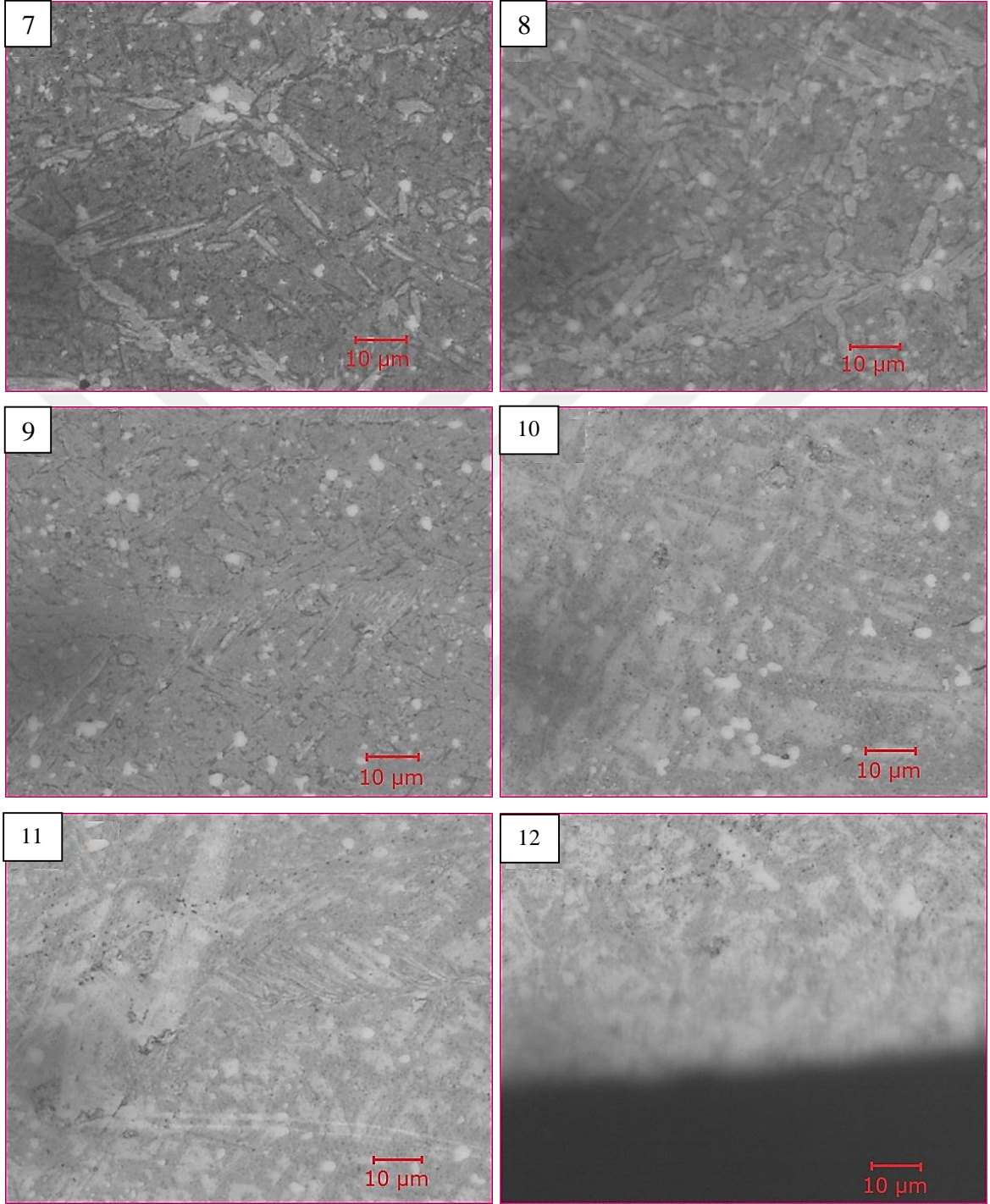
Şekil 64'ün devamı





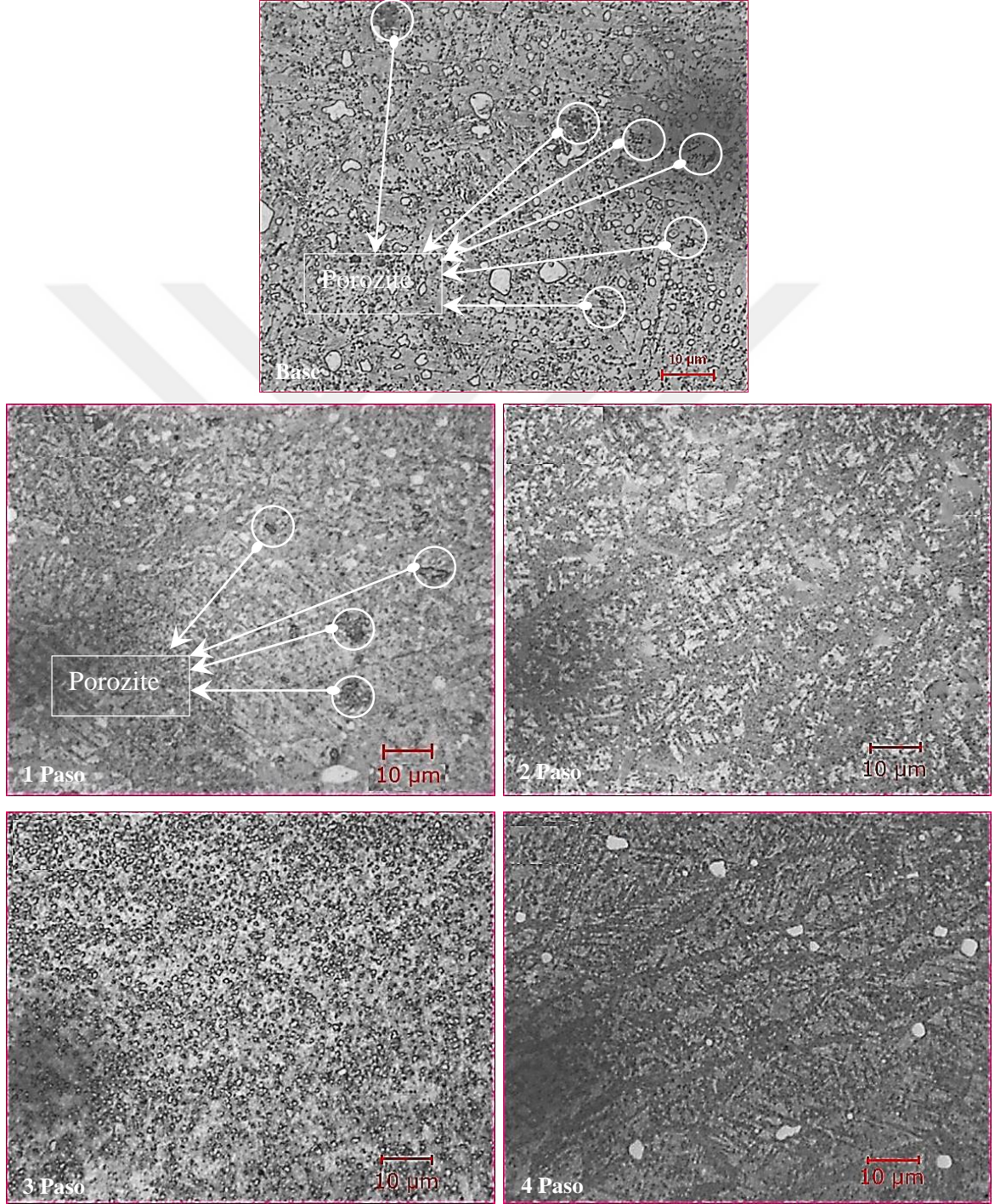
Şekil 65. SKP İşlemi sonrası 4 Paso Proses numunenin yüksek büyütmeli mikroyapı görünümleri

Şekil 65'in devamı



İncelenen mikroyapı görüntülerinden base malzemedeki döküm hatalarının (boşlukların) proses edilmiş olan malzemede büyük ölçüde giderilmiş oldukları ve uygulanan proses sayısına göre bu hataların küçülmüş ve yapıda daha homojen olarak dağılmış oldukları belirlenmiştir. Şekil 66'da da görülebileceği üzere, proses'in karıştırma

etkisi sayesinde malzemenin yüzey bölgesinde ve termomekanik olarak etkilenmiş bölge boyunca boşluklar incelerek döküm hataları önemli miktarda giderilmiş oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 66. Farklı paso sayılarında proses edilen malzemenin iç yapı görünümü

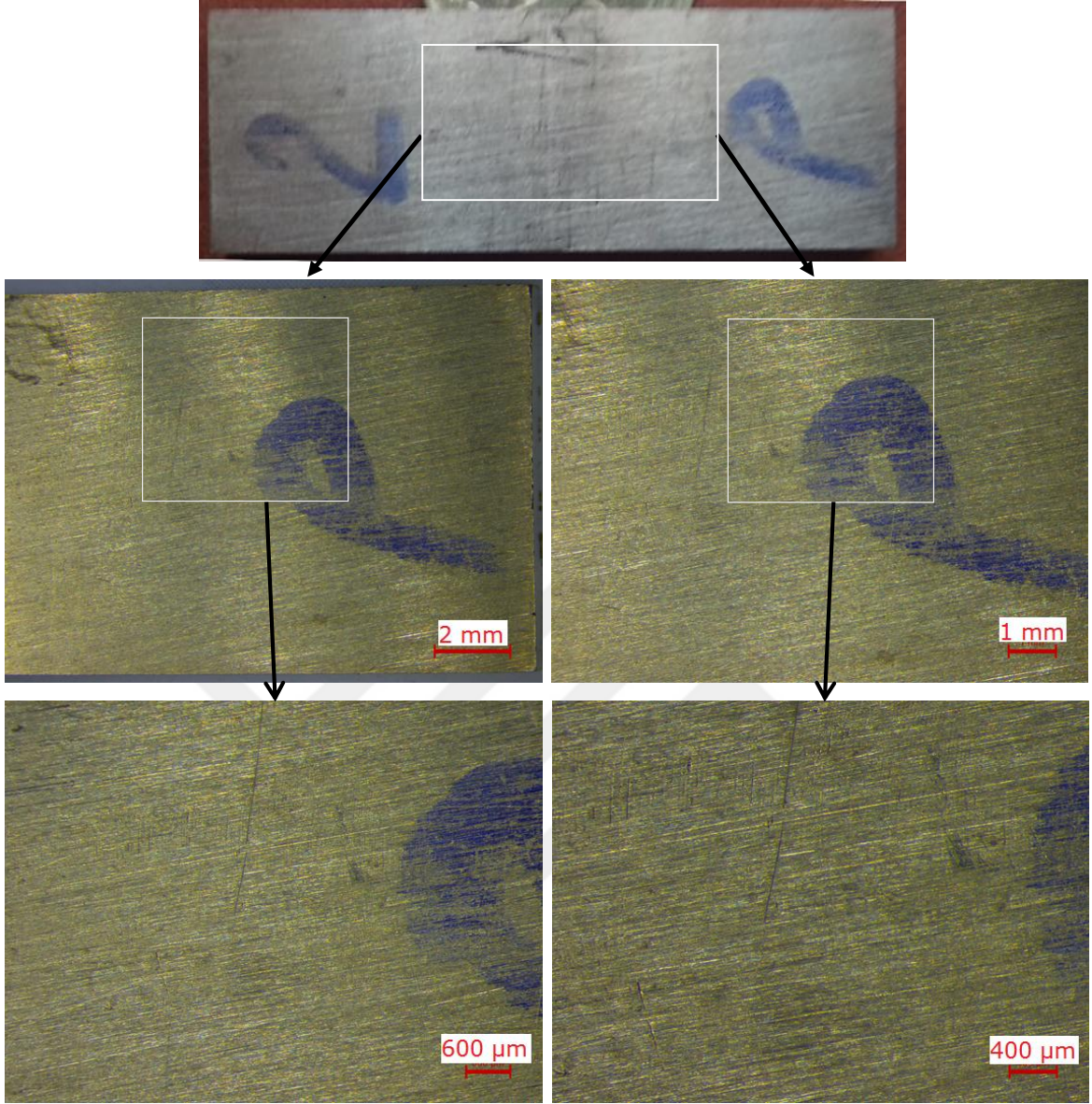
Proses sonucunda malzeme yüzeyinde ve karıştırma bölgesinde içyapıdaki tanelerin oldukça incelendiği görülmektedir. Aynı zamanda homojenize olan içyapı, malzemenin eşdeğer davranış sergilemesini sağlamaktadır. Karıştırma bölgesinden, termomekanik etkilenmiş bölgeye doğru gidildikçe, tane yapılarında irileşmenin başladığı ve içyapıda bulunan fazların heterojen olarak dağılım sıklığının arttığı görülmektedir.

Ham döküm NAB alaşımı optik mikroskop ve görüntüleri ile farklı proses parametreleri altında SKP ile işlenmiş numunelere ait görüntülerden de açıkça görüldüğü gibi mikroyapısal farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Ham döküm yapıya ait optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde bakırca zengin α fazı etrafında ortalama 2 ile 4 μm çapında küresel görünümlü κ_{II} çökeltileri görülmektedir. Nikelce zengin κ_{III} çökeltileri lamelli bir şekil sergiler. α taneleri boyunca dağılan ince nokta biçiminde küçük ve 2 μm çapından daha düşük mertebesinde parçacıklar demirce zengin κ_{IV} parçacıklarıdır. α taneleri dış kenarında bir çökelti serbest bölgesi ile görülmektedir.

SKP işlemi sonrası elde edilen numunelerden alınan optik mikroskop görüntüleri yukarıda verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde proses yapılan numunelerde matris yapıya oranla daha sert olan κ fazlarının yapıda parçalanıp küçülerek homojen şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir.

4.3. Makro İncelemeleri

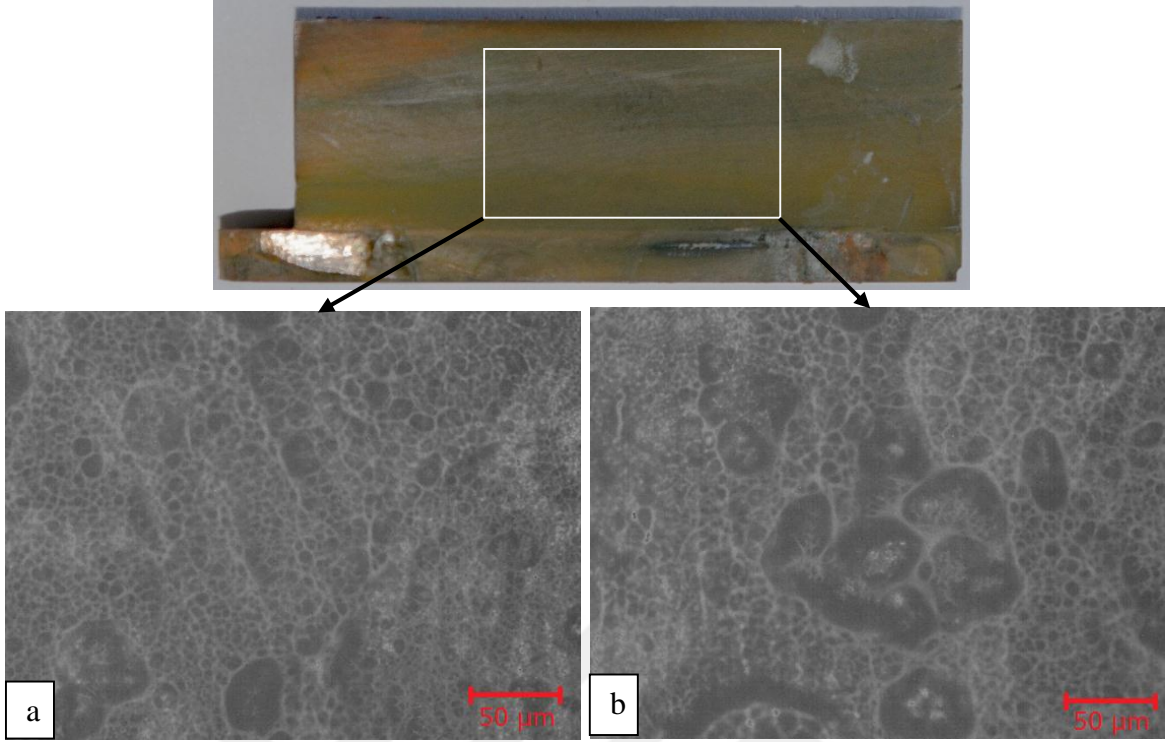
SKP işlemine maruz bırakılmış kanatların kavitasyon deneyi öncesi hazırlanan kanatların kavitasyon deneyi öncesindeki yüzey durumları incelenmiştir. Şekil 67'de SKP ile işlenmiş NAB malzemenin kavitasyon deneyi öncesi yüzey görüntüleri verilmiştir. Bütün kanatlar yüzey pürüzlülük değeri özdeş olacak şekilde ve aynı yöntem ile imal edilmişlerdir. Kanat geometrisinin oluşturulmasında ve procesten kalan çapakların giderilmesi için yüzeyden asgari düzeyde talaş kaldırılmıştır. Talaş kaldırma işlemi, KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Talaşlı İmalat ve Takım Tezgahları Laboratuvarında Universal Freze tezgahı kullanılarak, aynı çakı ile devir sayısı, ilerleme hızı ve aynı derinlikte talaş kaldırılmıştır. Yüzeyler, fabrika üretim şartlarına sahip olmuş olması adına, ek yüzey parlatma ve pürüzlülük giderme işlemlerine tabi tutulmamıştır.



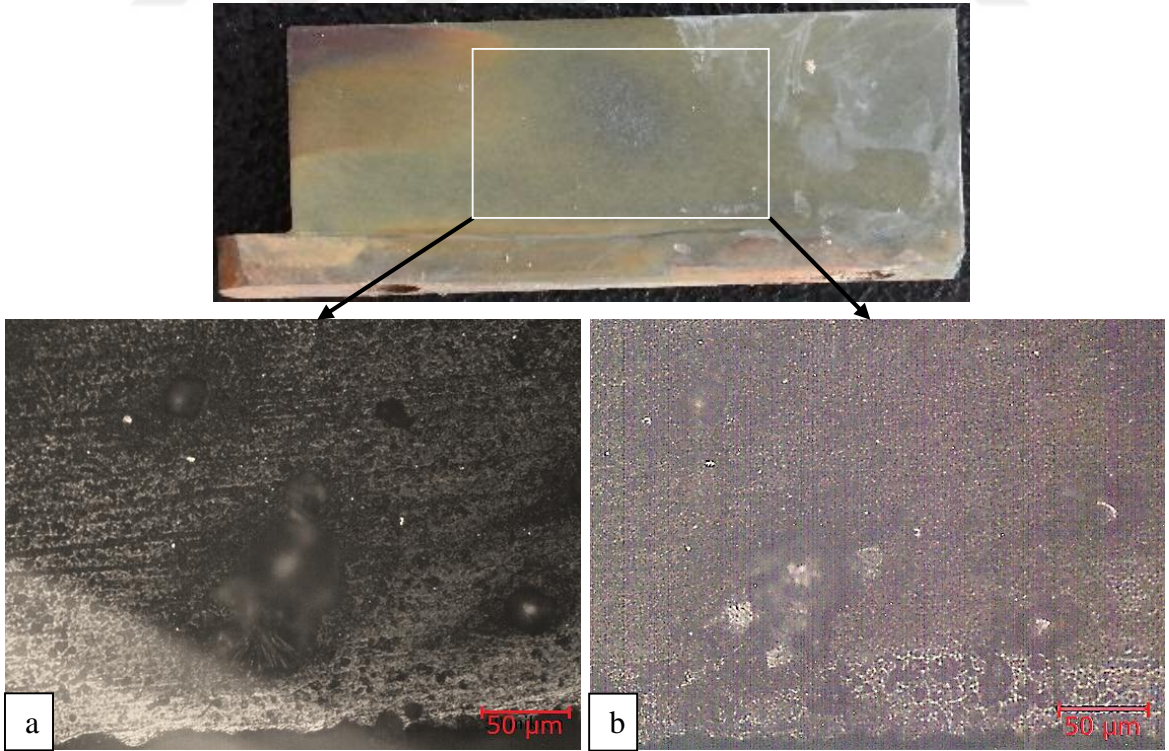
Şekil 67. SKP ile işlenmiş NAB malzemenin kavitasyon deneyi öncesi yüzey görüntüsü

Sistem işletme sırasında belli aralıklarda durdurulup, çark kanatları sökülerek optik ve stereo mikroskop yardımıyla incelenmiştir.

Base malzemeden imal edilen kanadın, kavitasyon deneyinin erken saatlerinde (65. ve 250. saat) yapılan incelemelerde proses edilmiş kanatlar üzerinde anlamlı kavitasyon etkisi tespit edilememiş olmasının yanında proses işlemine tabi tutulmamış (base) kanat yüzeyinde optik mikroskop yardımıyla mikro ölçekte görülebilen kavitasyon belirtileri tespit edilmiştir. Bu belirtilerin optik mikroskop görüntüleri ayrıntılı olarak Şekil 68 ve 69'da verilmiştir.



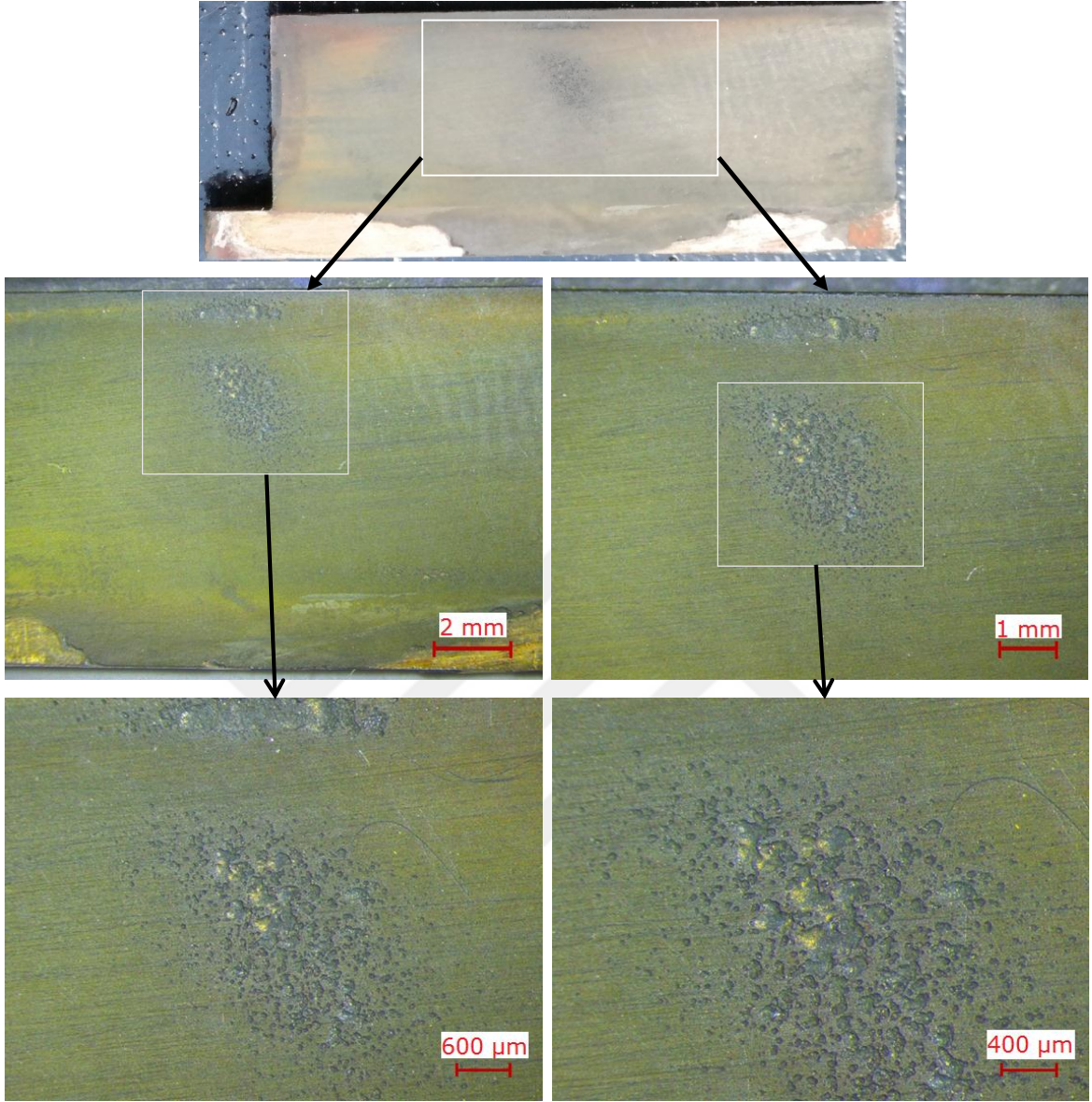
Şekil 68. Base malzemeden imal edilen çark kanat yüzeyinin farklı çalışma süreleri sonunda optik mikroskop görüntüleri, $1,2 \times 10^7$ (a) ve $4,8 \times 10^7$ (b) yük tekrarı



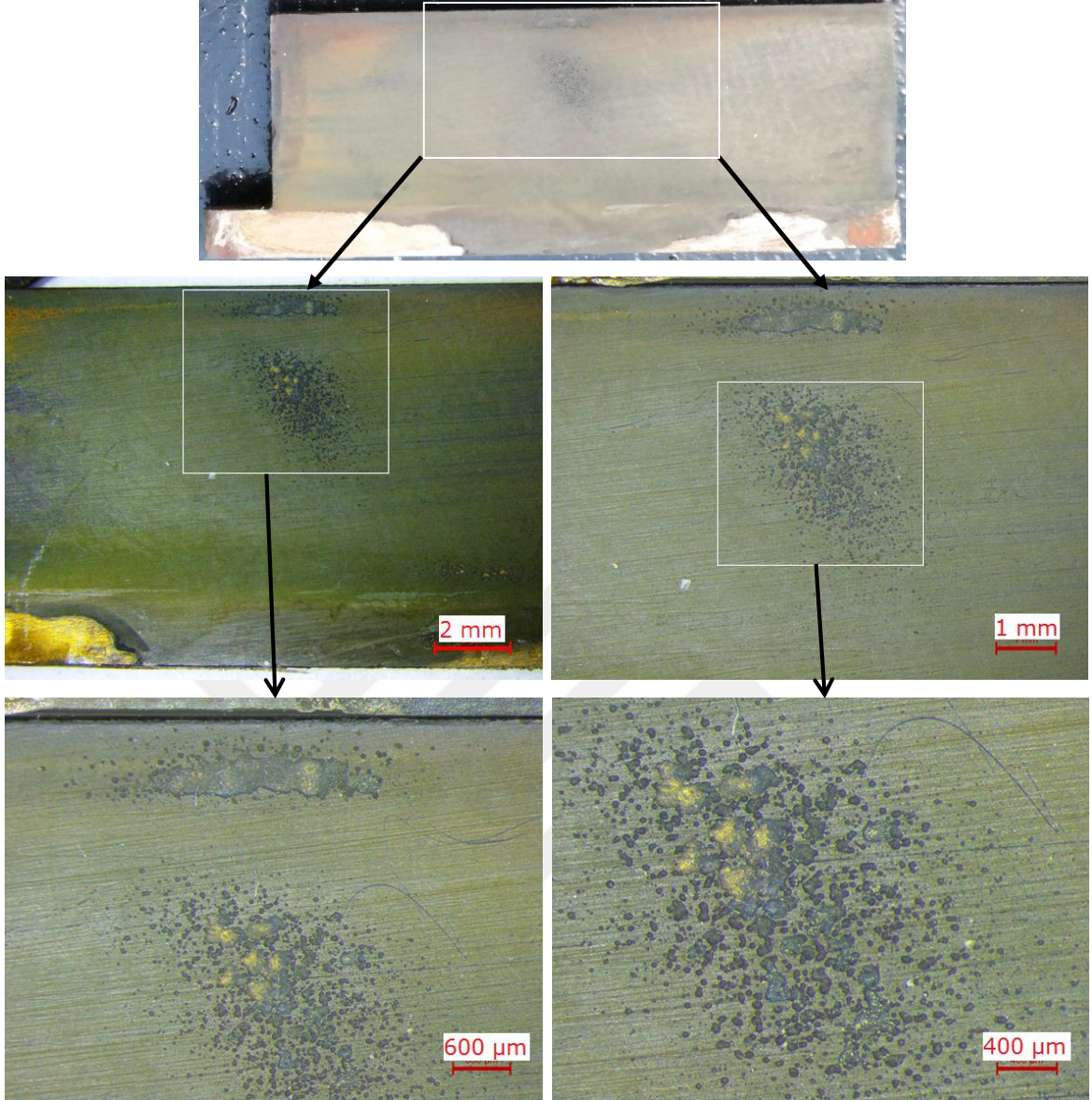
Şekil 69. Base malzemeden imal edilen çark kanat yüzeyinde kavitasyon hasarı beklenen bölgenin optik mikroskop görüntüsü, $3,0 \times 10^8$ (a) ve $3,56 \times 10^8$ (b) yük tekrarı

Şekil 68’de base malzemenin yüzeyi optik mikroskop ile incelendiğinde, mikro boyutlarda oyuklaşmanın başladığı görülmüştür. $1,2 \times 10^7$ yük tekrarı sonucu gözlemlenen oyukların ortalama çaplarının $20 \mu\text{m}$, $4,8 \times 10^7$ yük tekrarı sonucu ortaya çıkan oyukların ortalama çaplarının $40 \mu\text{m}$ civarında olduğu anlaşılmaktadır. Bu da zamanla oyuk sayısının ve çapının arttığının bir kanıtı olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı şekilde yük tekrar sayısının yaklaşık 3 kat arttığı durumda oyuklardaki büyümenin devam ettiği Şekil 69’da bariz olarak görülmektedir.

Stereo mikroskop görüntülerinden de görülebileceği üzere, kavitasyonun etkileri sonucu yüzeylerde başlayan belirtiler, base malzemede (Şekil 70 ve 71) geçen çalışma süresi zarfında daha da belirginleşmiş olup, 1 paso proses işlenen kanatlarda (Şekil 72 ve 73’te) zaman ile olan değişim çok daha az görülmektedir. 2, 3 ve 4 paso proses işlemi uygulanan (Şekil 74, 75, 76, 77, 78 ve 79’da) belirtilerin ortaya çıkmadığı gözlemlenmiştir.

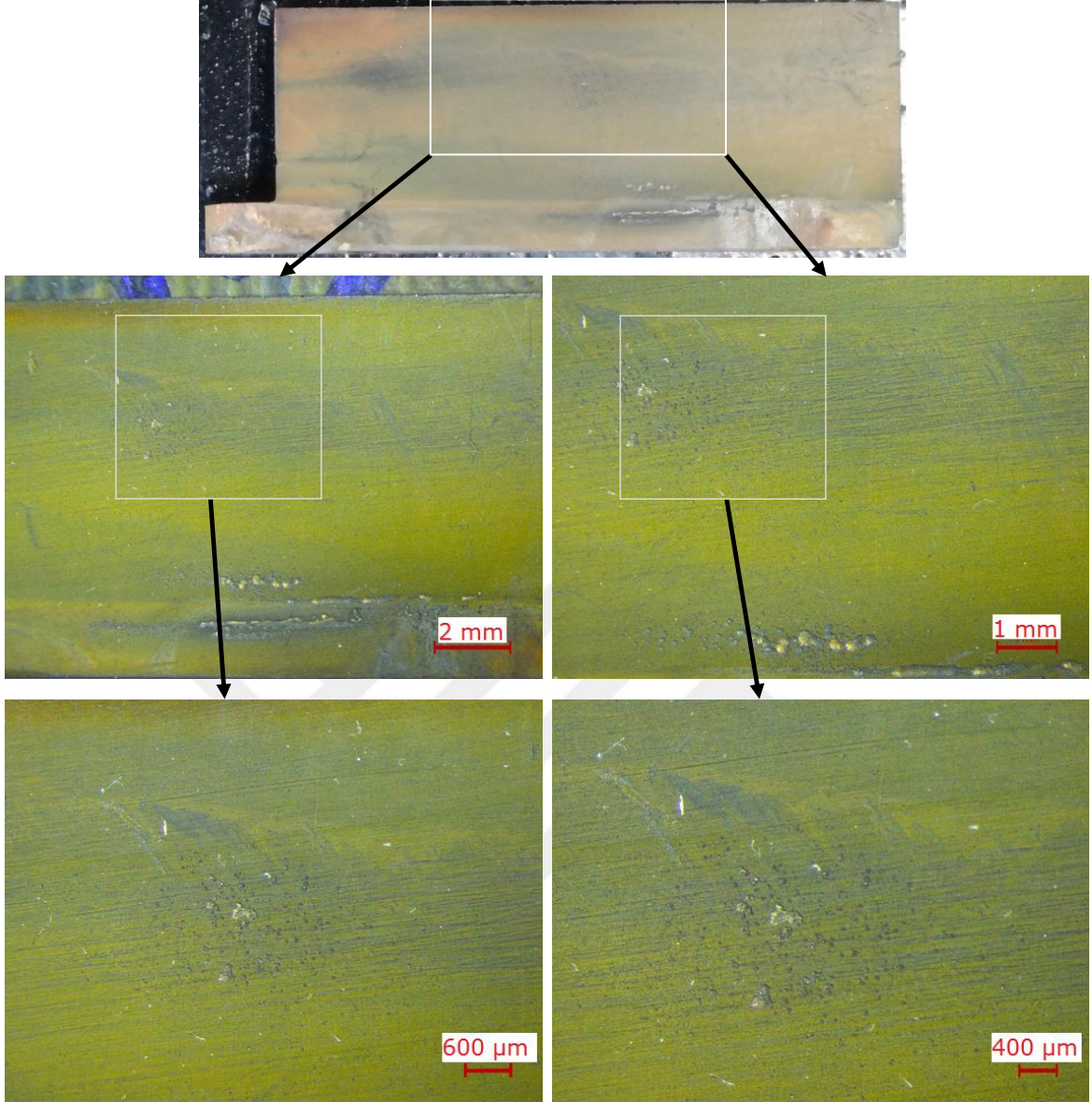


Şekil 70. Base malzemedan imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kavitasyon hasarı izleri

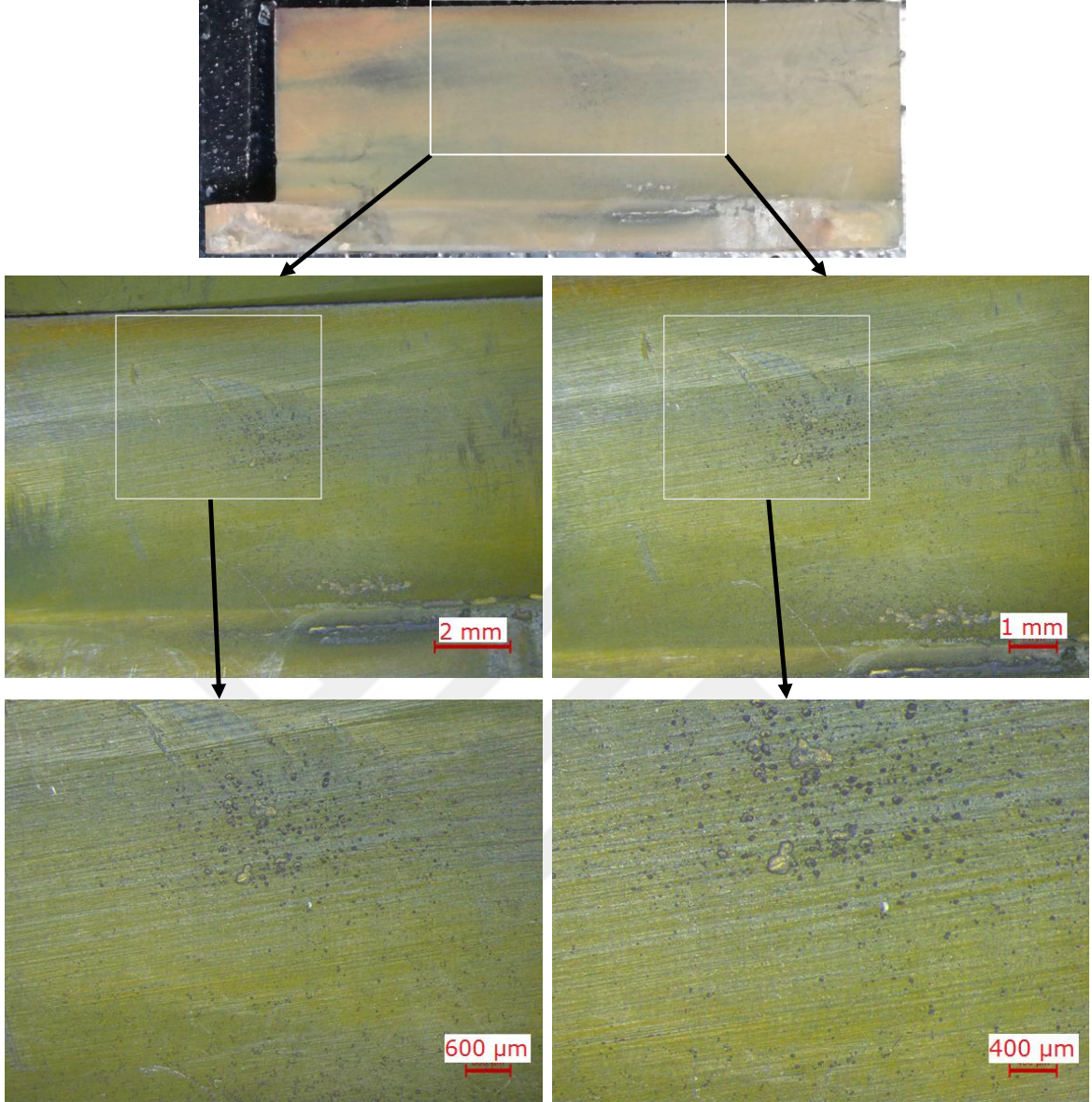


Şekil 71. Base malzemedan imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kavitasyon hasarı izleri

Şekil 70 ve Şekil 71 arasında bir kıyas yapıldığı zaman, yaklaşık 5×10^7 yük tekrarı artışı sonucunda dahi yaklaşık $100 \mu\text{m}$ boyutunda yeni oyukların oluşmaya başladığı, ayrıca mevcutta bulunan oyukların çaplarının da giderek büyüdüğü çok net olarak görülmektedir. Bu da kavitasyon hasar etkisinin mevcut oyuklarla daha da etkin bir şekilde arttığı tezini doğrular niteliktedir.

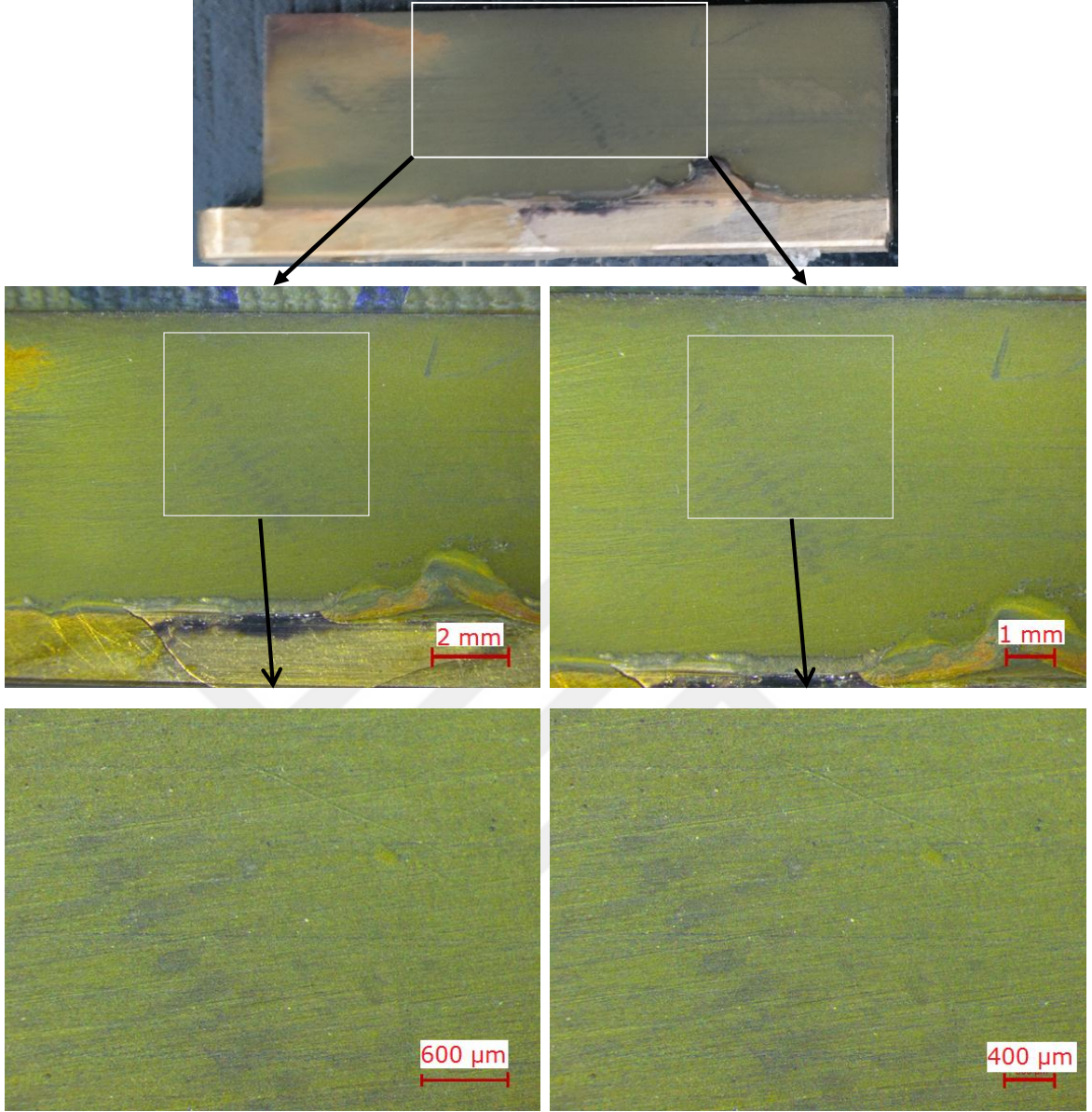


Şekil 72. 1 paso proses edilmiş malzemedan imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kavitasyon hasarı izleri

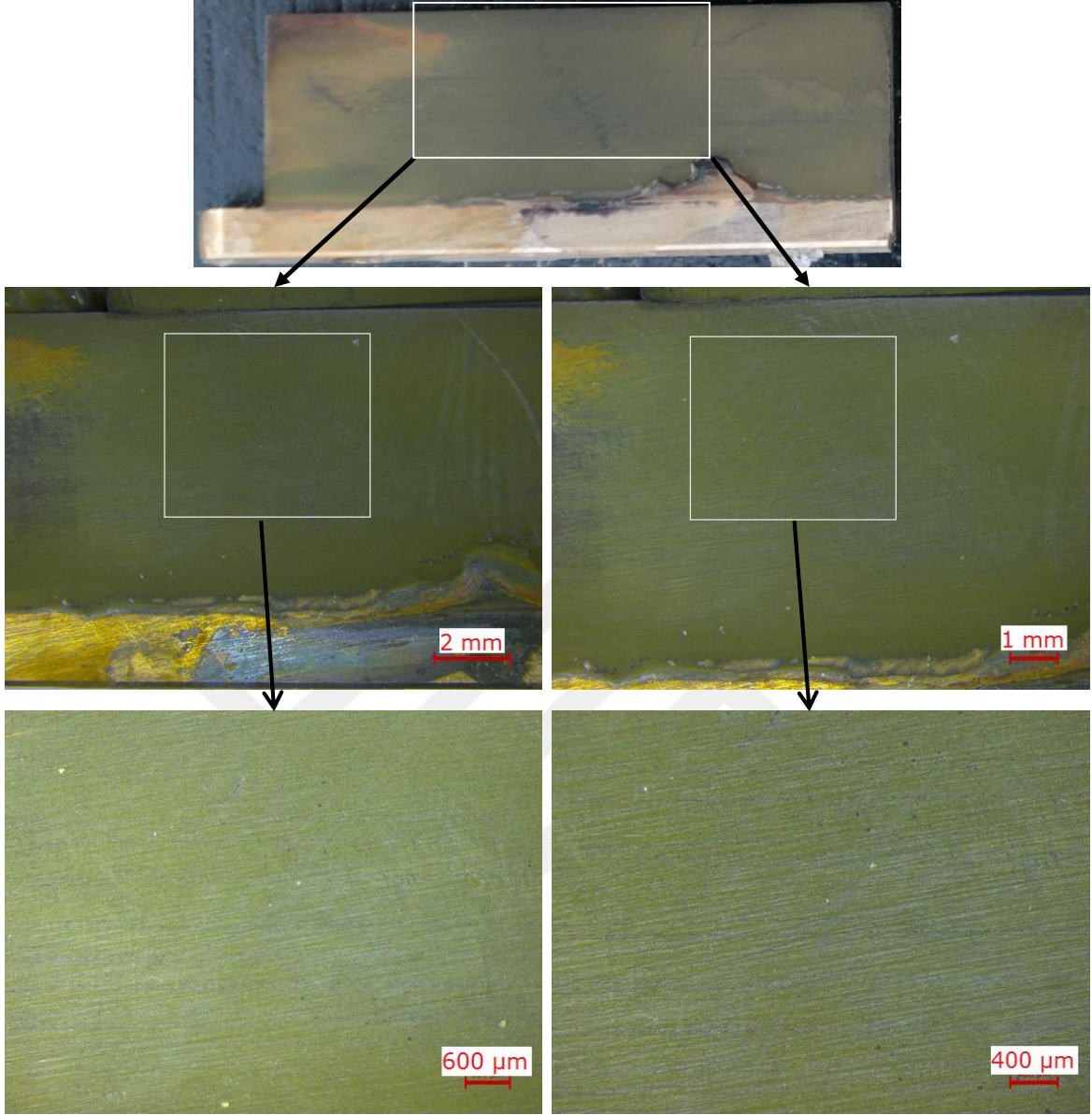


Şekil 73. 1 paso proses edilmiş malzemedan imal edilen çark kanadı yüzeyinde $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda kavitasyon hasarı izleri

Şekil 72 ve Şekil 73 göz önüne alındığında 1 paso proses edilmiş malzeme üzeride 5×10^7 lik bir yük artış miktarında base malzemeye kıyasla daha az bir kavitasyon gelişmesi belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak yüzey mukavemetinin artmış olması, her ne kadar yüzeyde oyuklar var olsa da kavitasyona karşı direnç daha fazladır. Bu nedenle yüzeyde malzeme kaybı daha az olmuştur.

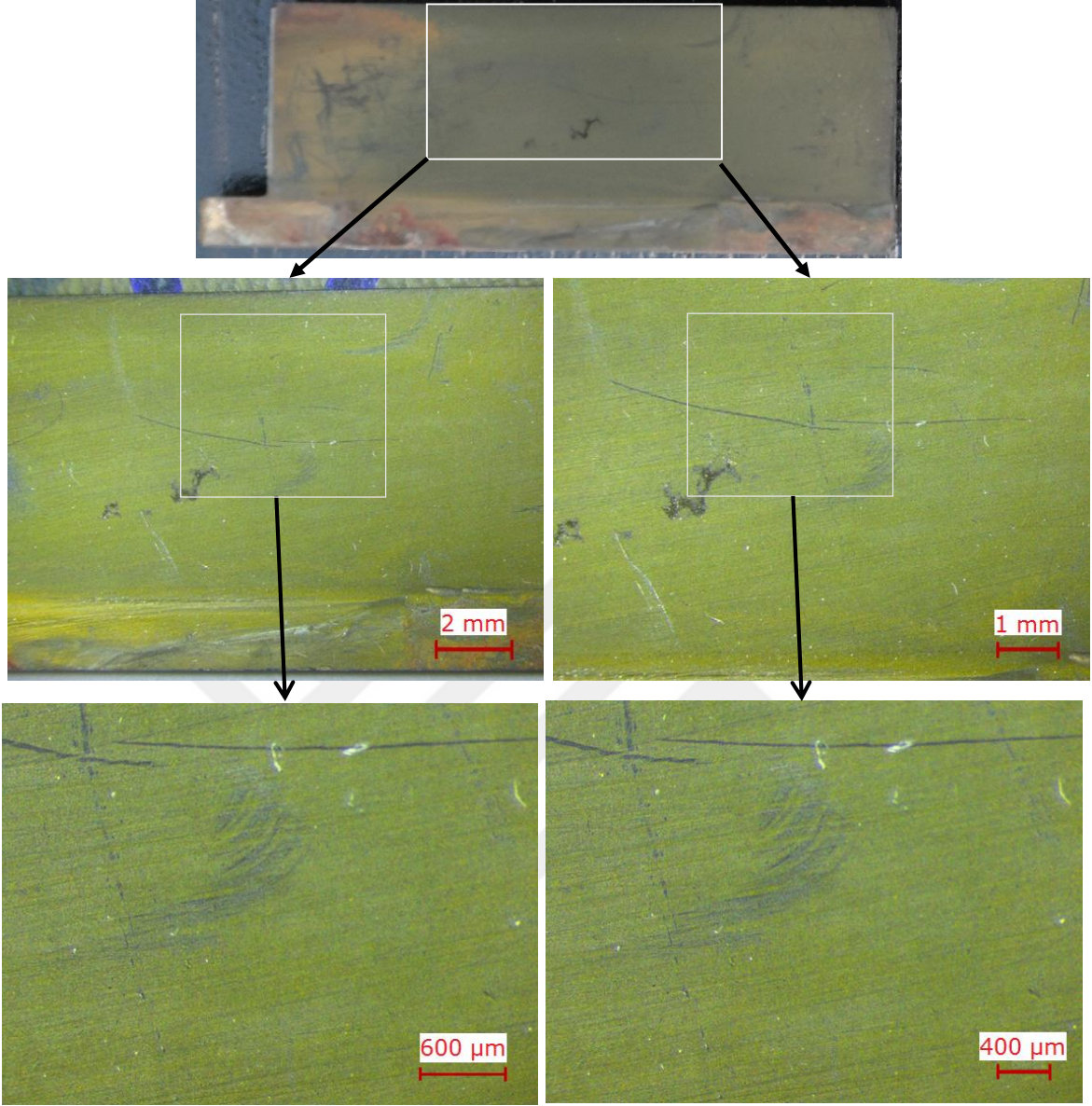


Şekil 74. 2 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi

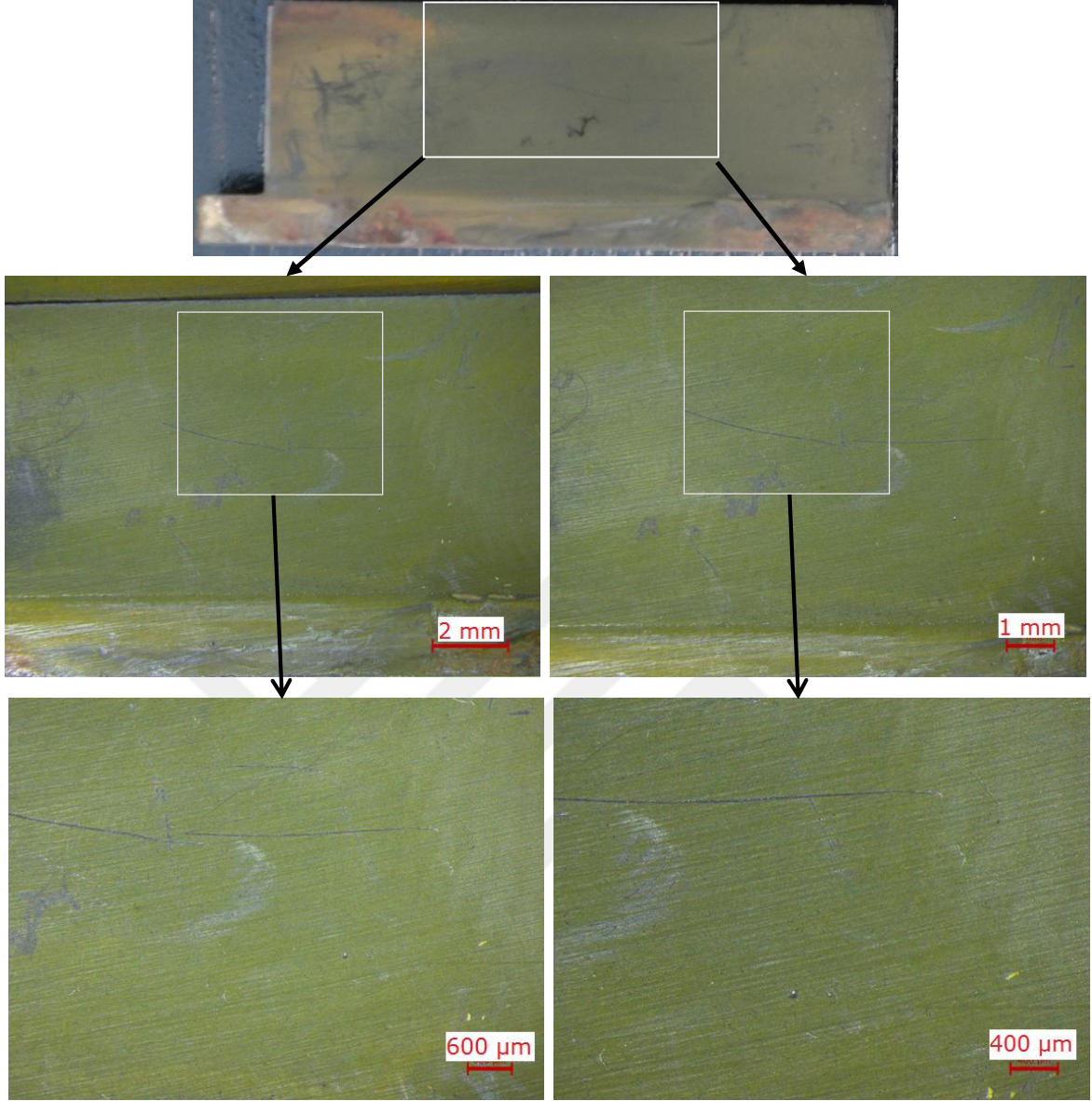


Şekil 75. 2 paso proses edilmiş malzemenin imal edilen çark kanadının $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi

Şekil 74 ve Şekil 75 göz önüne alındığında 2 paso proses edilmiş malzeme üzerinde 5×10^7 lik bir yük artış miktarında bir gelişme görülmemiştir. Toplamda $5,58 \times 10^8$ 'lik bir yük tekrarı sonucunda dahi yüzeyde kavitasyonun etkisi sonucu bir oyuklaşma söz konusu değildir. Bu iyileşmenin, malzemeye uygulanan 2 paso proses işleminin, malzeme yapısında meydana getirdiği homojenleşmenin ve plastik deformasyon etkisiyle tane yapısında meydana gelen tane incelmesinin olumlu etkisinden kaynaklanmaktadır. Bunun sonucu olarak malzemenin kavitasyon direncinin önemli oranda artmış olduğu şeklinde ifade edilebilir.

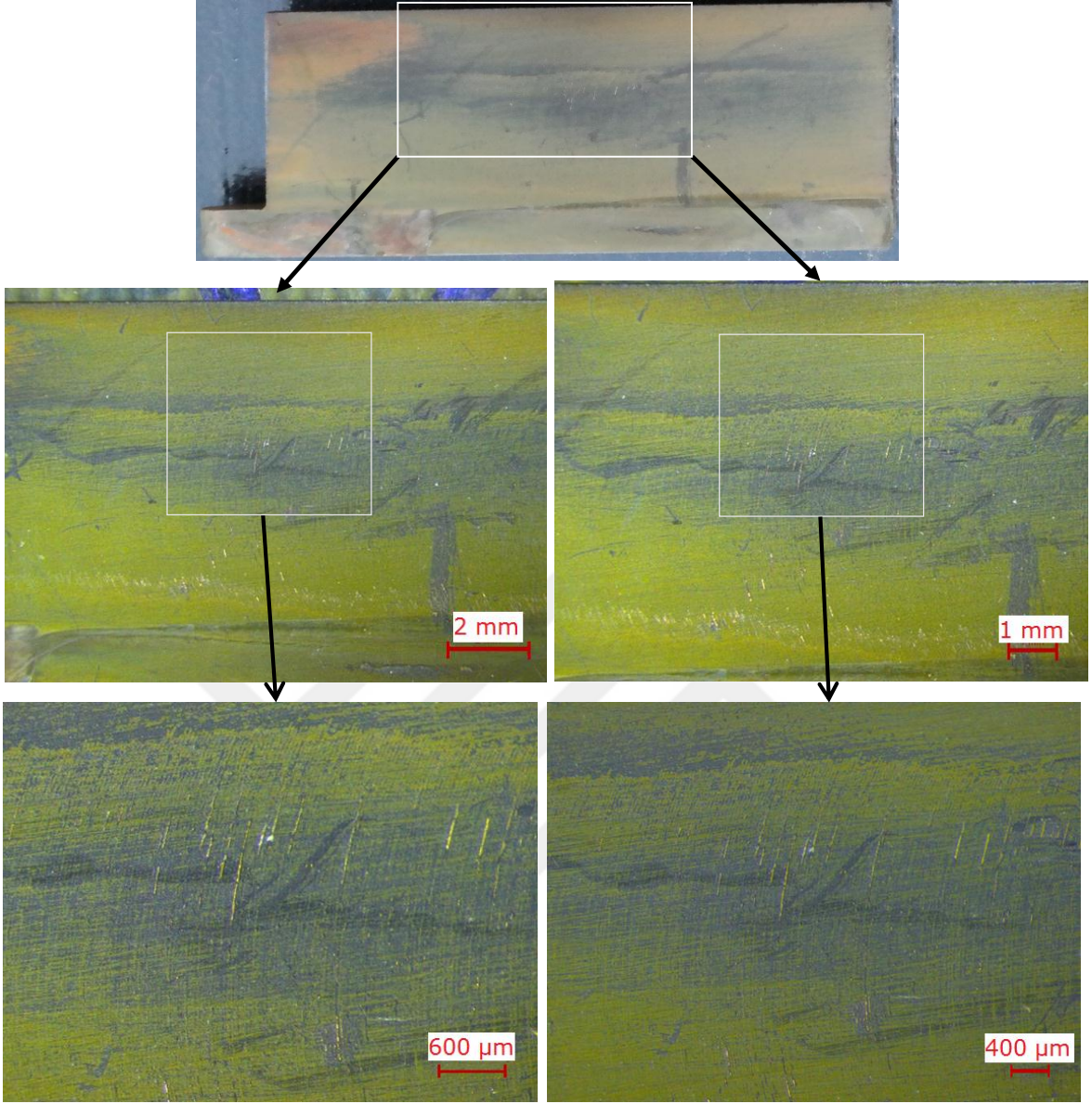


Şekil 76. 3 paso proses edilmiş malzemedan imal edilen çark kanadının $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi

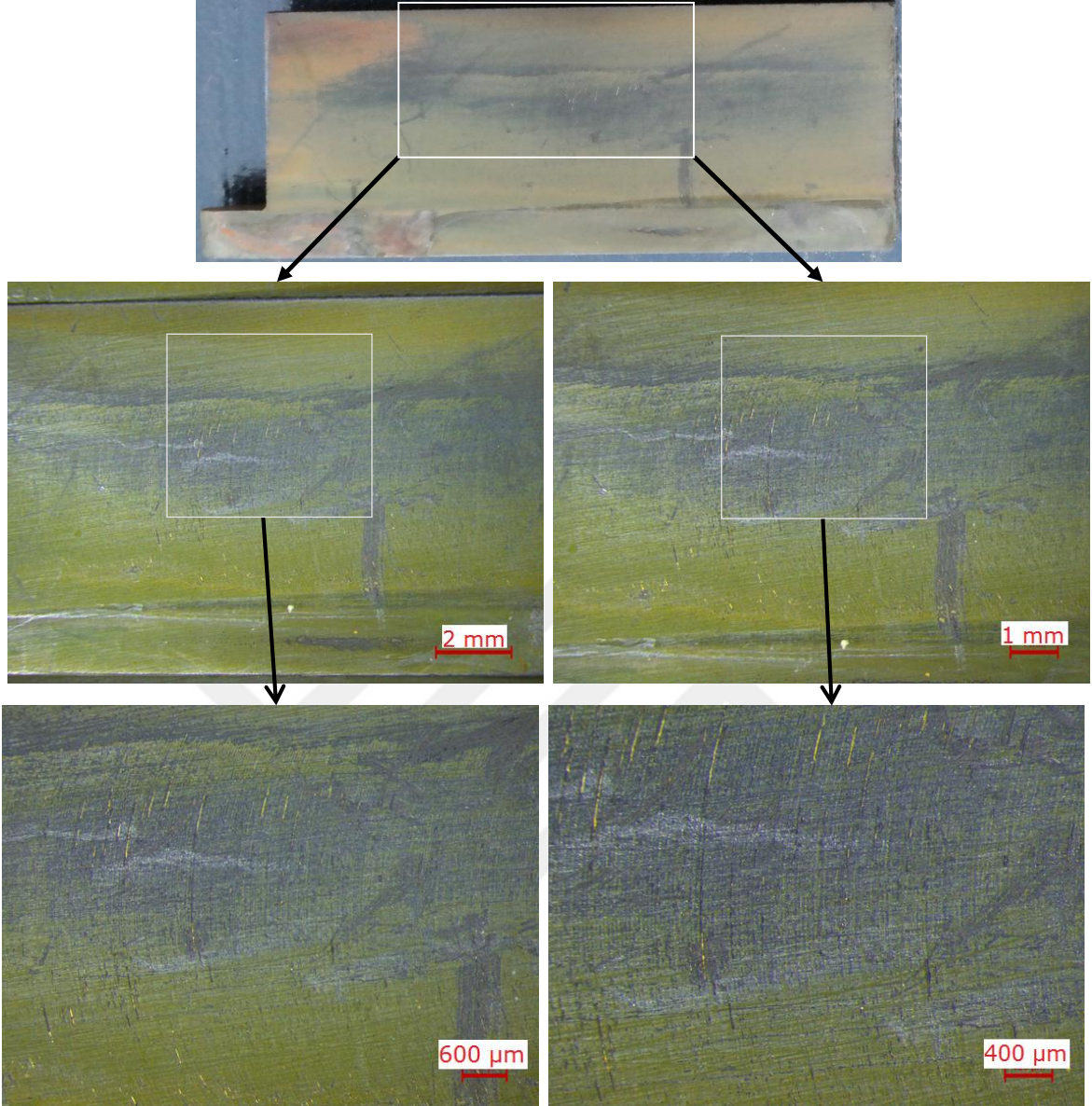


Şekil 77. 3 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi

Şekil 76 ve Şekil 77 göz önüne alındığında 3 paso proses edilmiş malzeme üzerinde 5×10^7 lik bir yük artış miktarında kavitasyon oluşumunda herhangi bir gelişme görülmemiştir. Toplamda $5,58 \times 10^8$ 'lik bir yük tekrarı sonucunda dahi yüzeyde kavitasyonun etkisi sonucu bir oyuklaşma söz konusu değildir. Yüzey mukavemetinin artmış olması ve birkaç kez tekrarlanan prosesin, yüzeyde daha homojenize bir iç yapı oluşturduğu bir gerçektir. Bunun sonucu olarak malzemenin kavitasyon direnci oldukça iyi seviyede artmış olduğu söylenebilir. 3 paso proses işleminin 2 paso proses işlemine göre bir fark oluşturmadığı da elde edilen önemli bulgulardan biridir.



Şekil 78. 4 paso proses edilmiş malzemedan imal edilen çark kanadının $5,1 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi



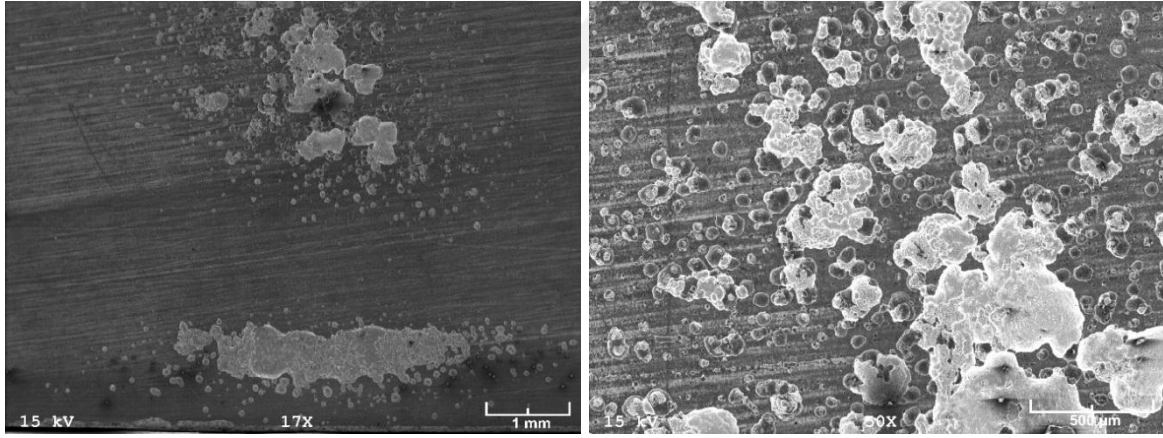
Şekil 79. 4 paso proses edilmiş malzemeden imal edilen çark kanadının $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı sonucunda yüzeyi.

Şekil 78 ve Şekil 79 göz önüne alındığında 4 paso proses edilmiş malzeme üzerinde 5×10^7 lik bir yük tekrarı belirlen bir kaviteleşme belirtisi tespit edilememiştir. Erişilen $5,58 \times 10^8$ lik yük tekrarı sonucunda dahi kanat yüzeyinde kaviteleşmenin hasar etkisi görülmemiştir. Yüzey mukavemetinin artmış olması ve birkaç kez tekrarlanan prosesin, yüzeyde daha homojenize bir içyapı oluşturmuş olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun sonucu olarak uygulanmış olan bu işlem sayesinde malzemenin kaviteleşme direncinin önemli ölçüde artmış olduğu tespit edilmiştir. Bu bulguların ışığında, 4 paso proses işlemine tabi tutulmuş malzemenin incelenen kaviteleşme direncinde 2 ve 3 paso proses

işlemlerine tabi tutulmuş olan malzemelere oranla belirgin bir farkın oluşturmadığı belirlenmiştir.

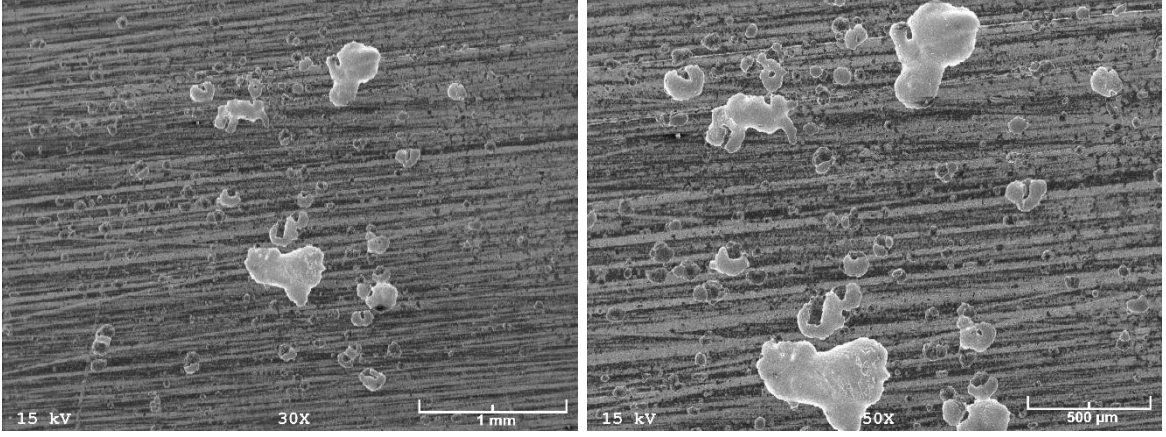
4.4. Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) İncelemeleri

Kavitasyon deneyine tabi tutulan kanat numuneleri, taramalı elektron mikroskopi (SEM) ile de incelenmiştir. Elde edilen kavitasyon hasar görüntüleri, stereo ve optik mikroskop görüntüleri ile birebir uyuşmaktadır. Şekil 80’de base malzeme yüzeyinin SEM yardımı ile elde edilen yüzey görüntüsü görülmektedir. SEM ile elde edilen yüzey görüntüleri Song ve arkadaşlarının yayını ile de benzerlik göstermektedir [33]. Yuvarlak halkalar, yoğunlaşan kabarcıkların yüzeyde patladıkları noktayı temsil etmektedir [33]. Literatürde kavitasyonun SEM ile elde edilen görüntülerinde de, yüzeyde dairesel oyuklaşmaların olduğu tespit edilmiştir. Şekil 80’deki base malzeme yüzey görüntüsünde, ortalama 5~6mm çapındaki alanda yoğun şekilde kavitasyon hasarı gözlemlenmiştir.

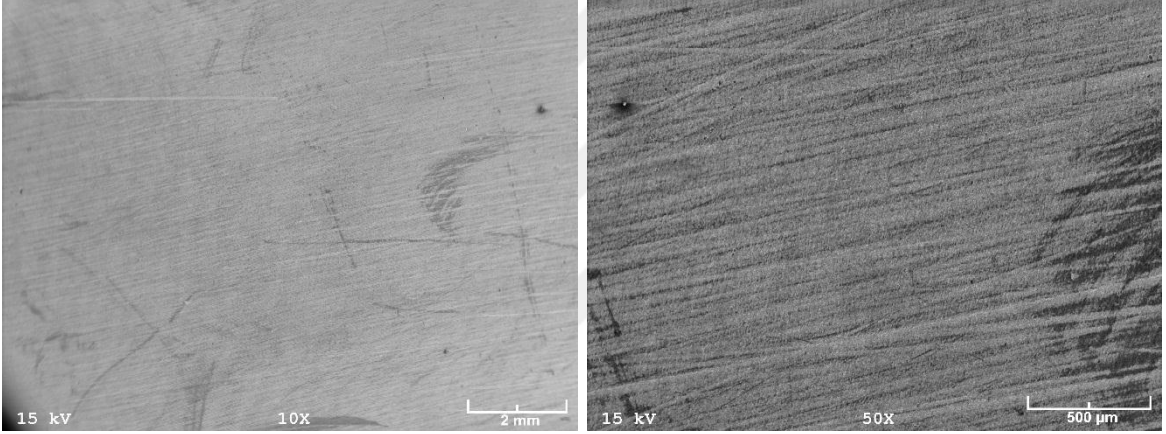


Şekil 80. Base malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarlı bölgeden alınan SEM görüntüsü

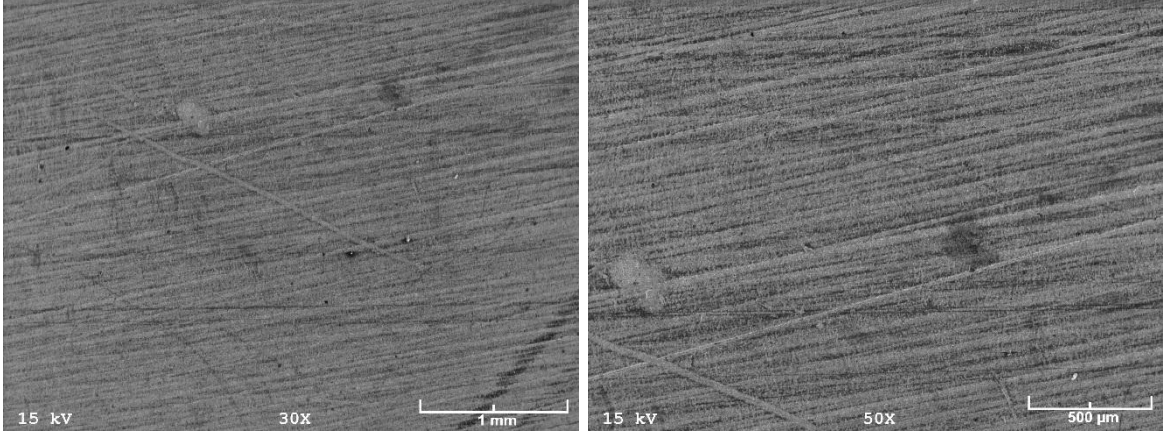
SKP işlemine tabi tutulan kanatlar da, kavitasyon deneyi sonrasında SEM ile incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskopi, daha algılanabilir görüntüler elde etmeye olanak sağlamaktadır. Şekil 81, 82, 83 ve 84’ten de görülebileceği üzere, elde edilen yüzey görüntüleri, optik ve stereo mikroskop görüntüleri ile birebir uyuşmaktadır.



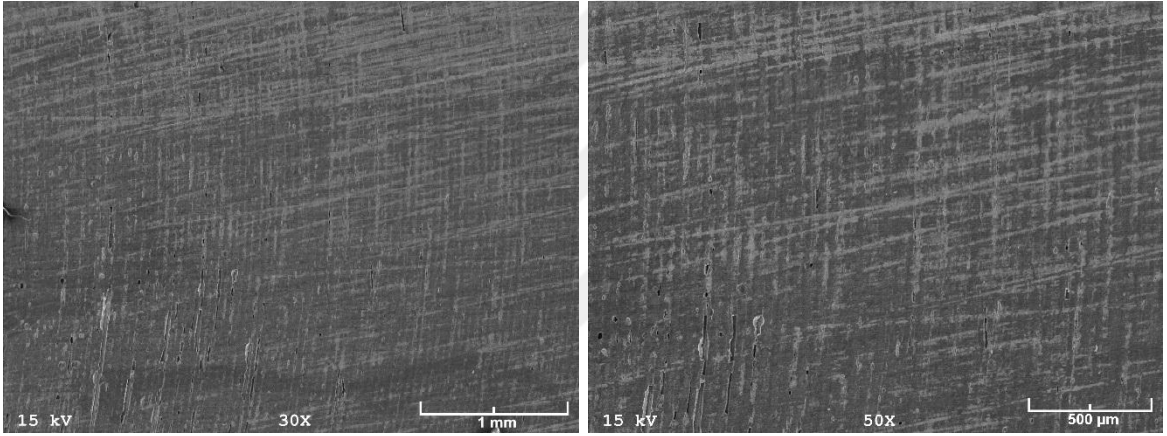
Şekil 81. 1 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarlı bölgeden alınan SEM görüntüsü



Şekil 82. 2 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarı beklenen bölgeden alınan SEM görüntüsü



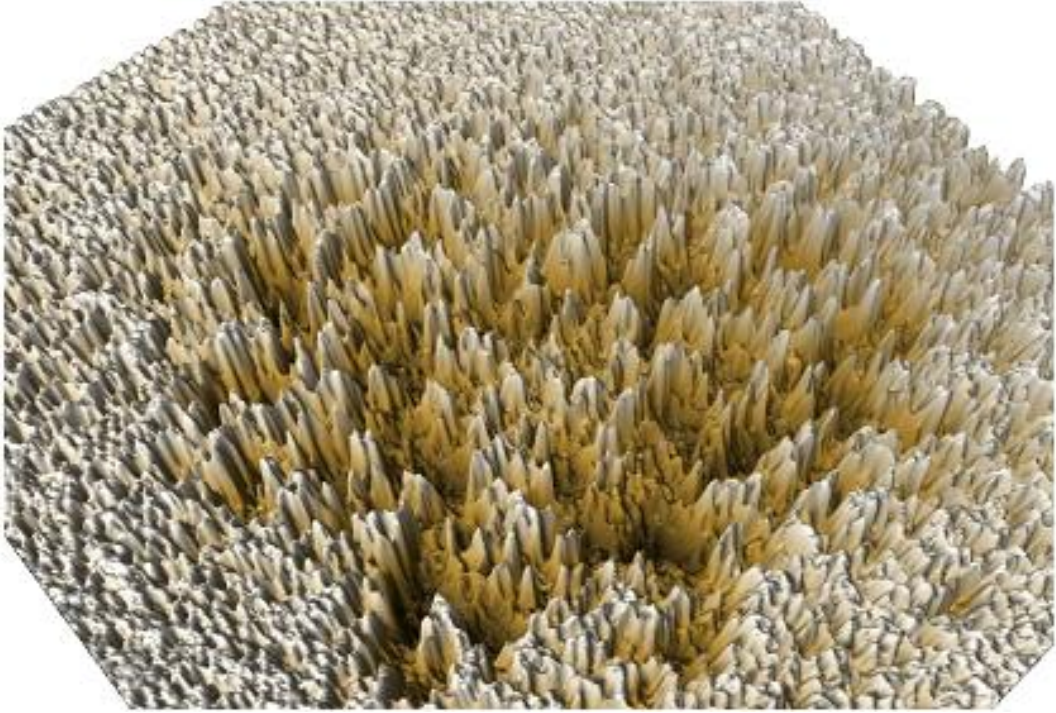
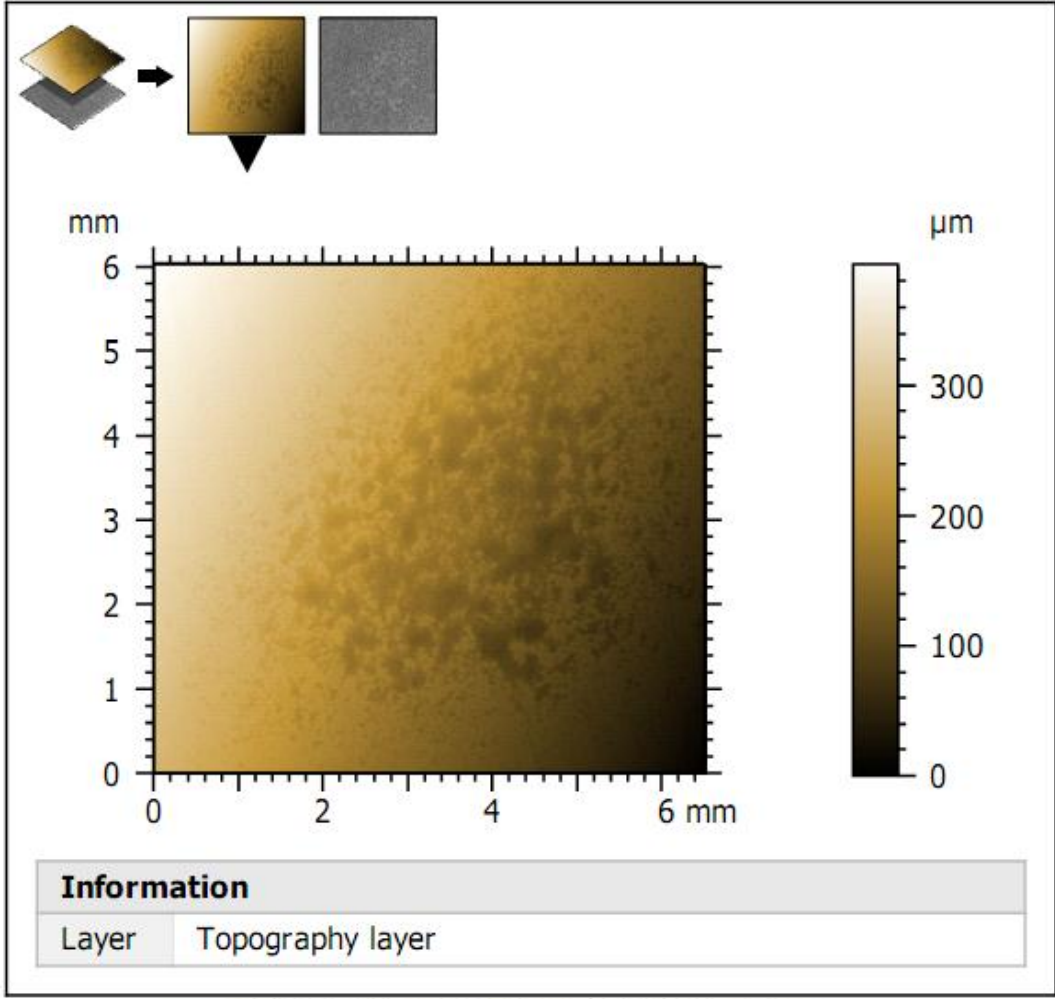
Şekil 83. 3 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarı beklenen bölgeden alınan SEM görüntüsü



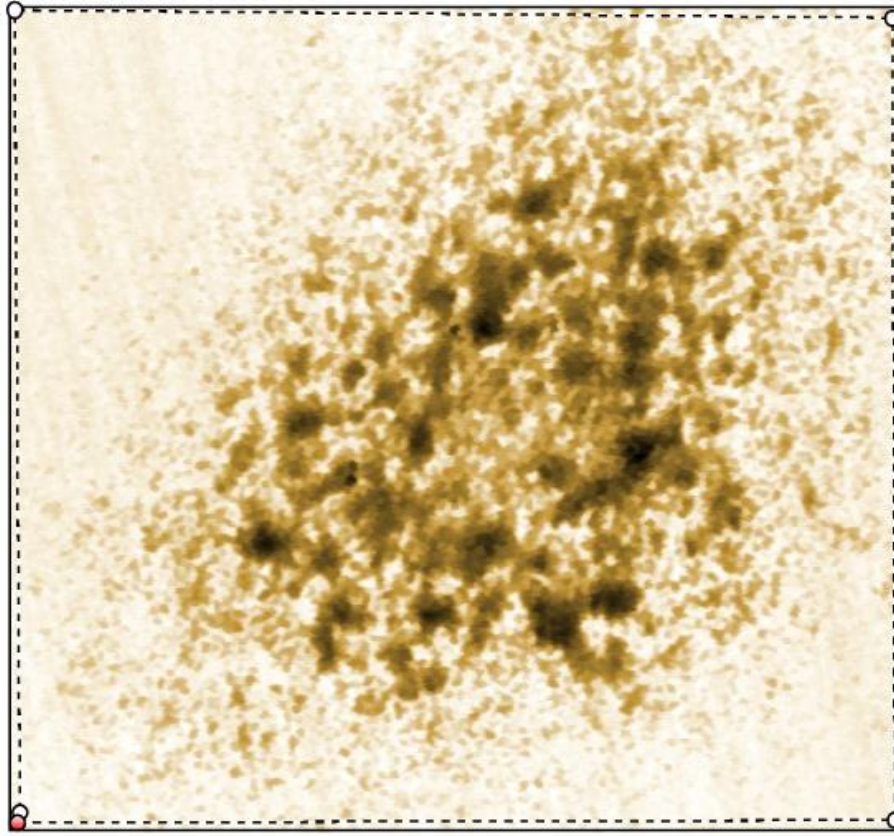
Şekil 84. 4 Paso proses edilen malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarı beklenen bölgeden alınan SEM görüntüsü

4.5. Optik Profilometre İncelemeleri

Çark kanadı kavitasyon deney numunelerinin yüzeylerinde oluşan kavitasyon hasarının malzeme üzerinde oluşturduğu derinliği ile malzemenin toplam hacim ve kütle kayıp miktarları optik profilometre yardımı ile tespit edilmiştir. Şekil 85 ve 86'da base malzemeden imal edilen kanat numunesinin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafya ve hacim kayıp sonuçları verilmiştir.



Şekil 85. Base malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası

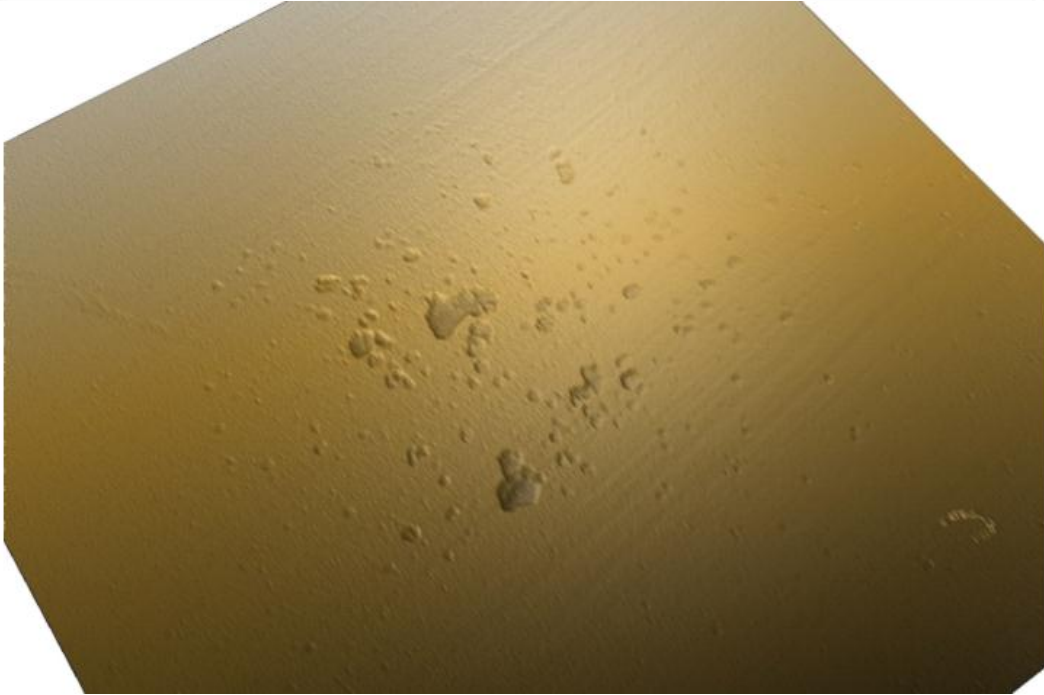
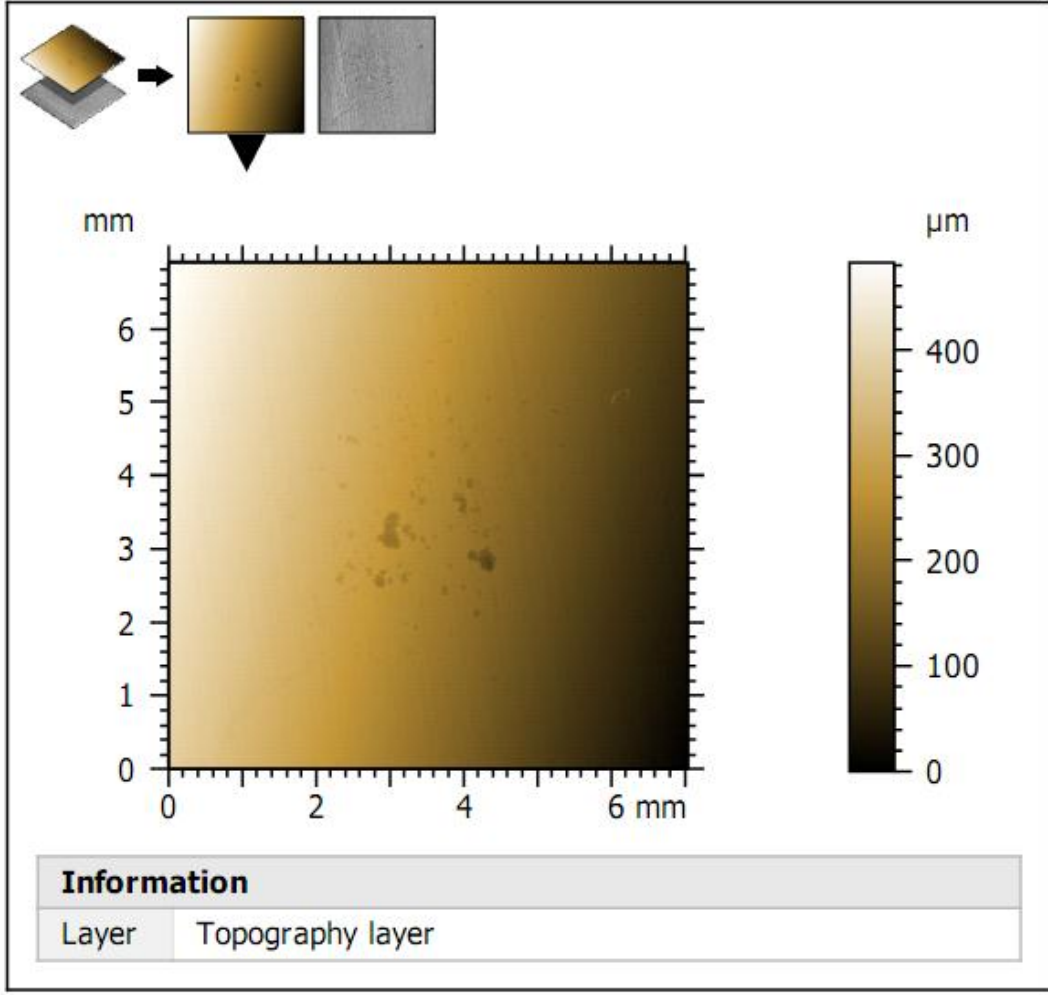


Parameters	Unit	Hole	Peak
Surface	mm ²	25.7	8.02
Volume	μm ³	269336731	13052471
Max. depth/height	μm	51.4	16.1
Mean depth/height	μm	10.5	1.63

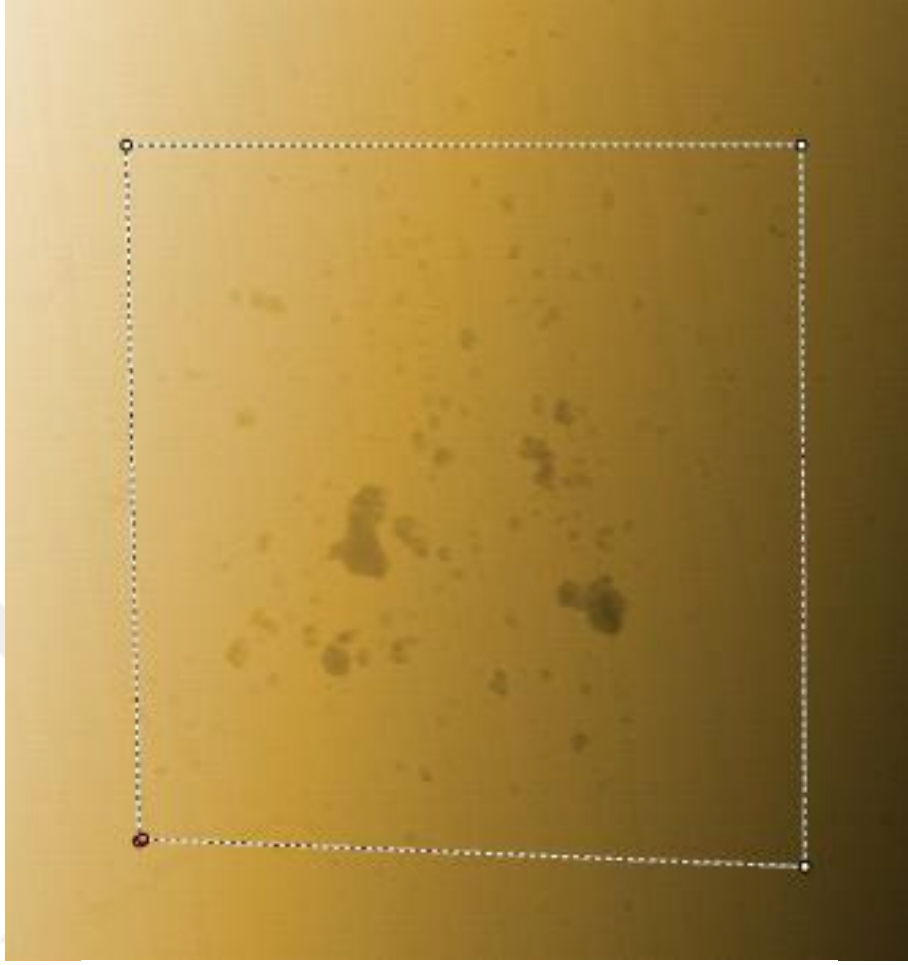
Şekil 86. Base malzemedan imal edilen kanattaki kavitsyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile ölçülen hacim kaybı

Şekil 85’de elde edilen veriler doğrultusunda, base malzemedeki kavitsyon etkisi ile oluşan çukurcuklarının 50μm derinliğine eriştiği tespit edilmiştir. Şekil 86’dan elde edilen veriler doğrultusunda kanadın kavitsyon etkisinde kalan sınırlı (49 mm²) bölgedeki hacimsel malzeme kaybının 0,27 mm³ olduğu tespit edilmiştir. Kanat malzemesi NAB’ın yoğunluğu 7,64 g/cm³ olmak üzere bu kanat üzerinde ölçüm yapılmış olan sınırlı bölgedeki kavitsyon etkisiyle oluşan malzeme kaybı 0,002 gr olarak belirlenmiştir.

Şekil 87 ve 88’de 1 paso SKP uygulanmış malzemedan imal edilen kanat numunesinin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafya ve hacim kayıp sonuçları verilmiştir.



Şekil 87. 1 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası

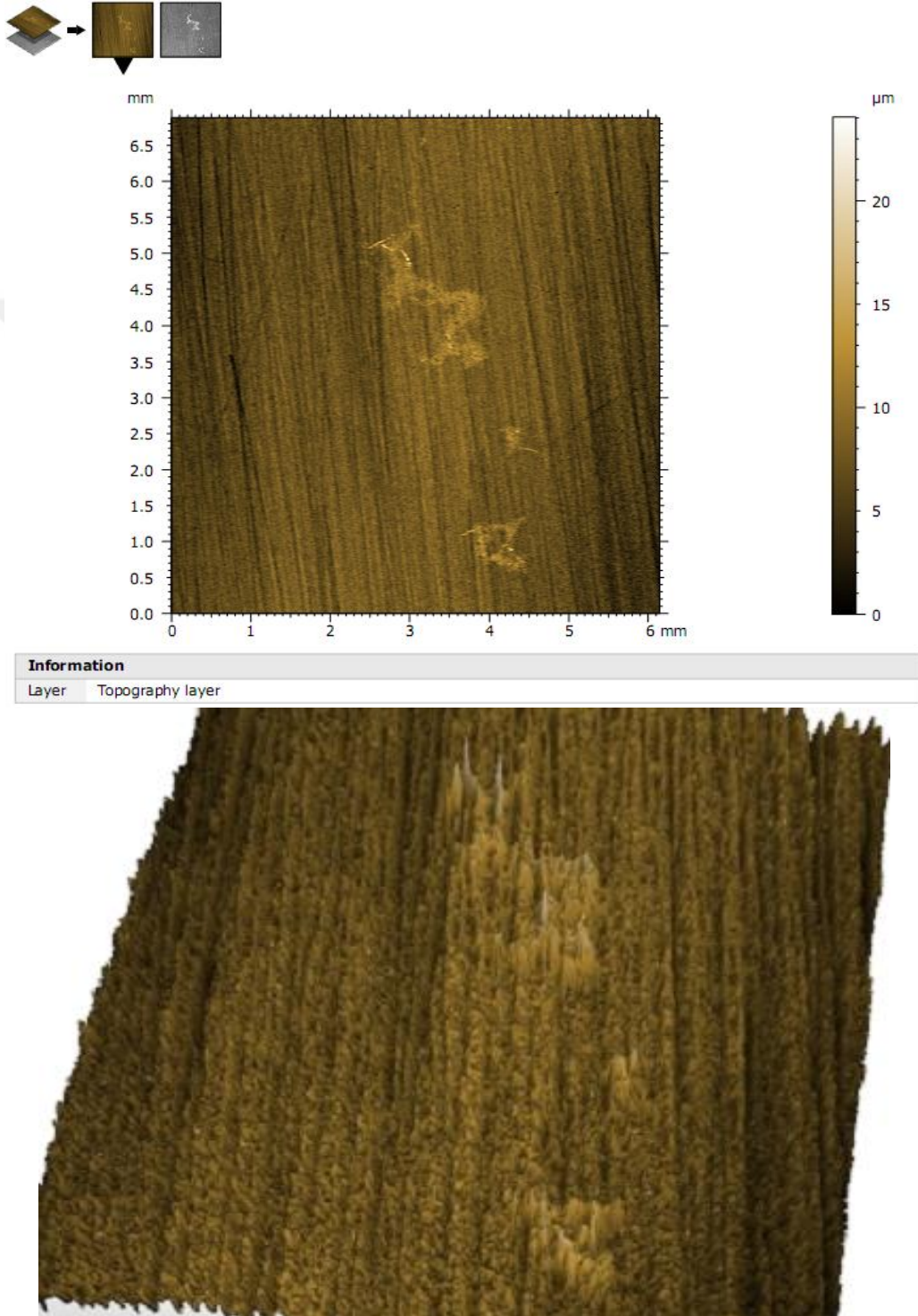


Parameters	Unit	Hole	Peak
Surface	mm ²	7.44	2.29
Volume	μm ³	26631629	2237099
Max. depth/height	μm	72.3	9.63
Mean depth/height	μm	3.58	0.977

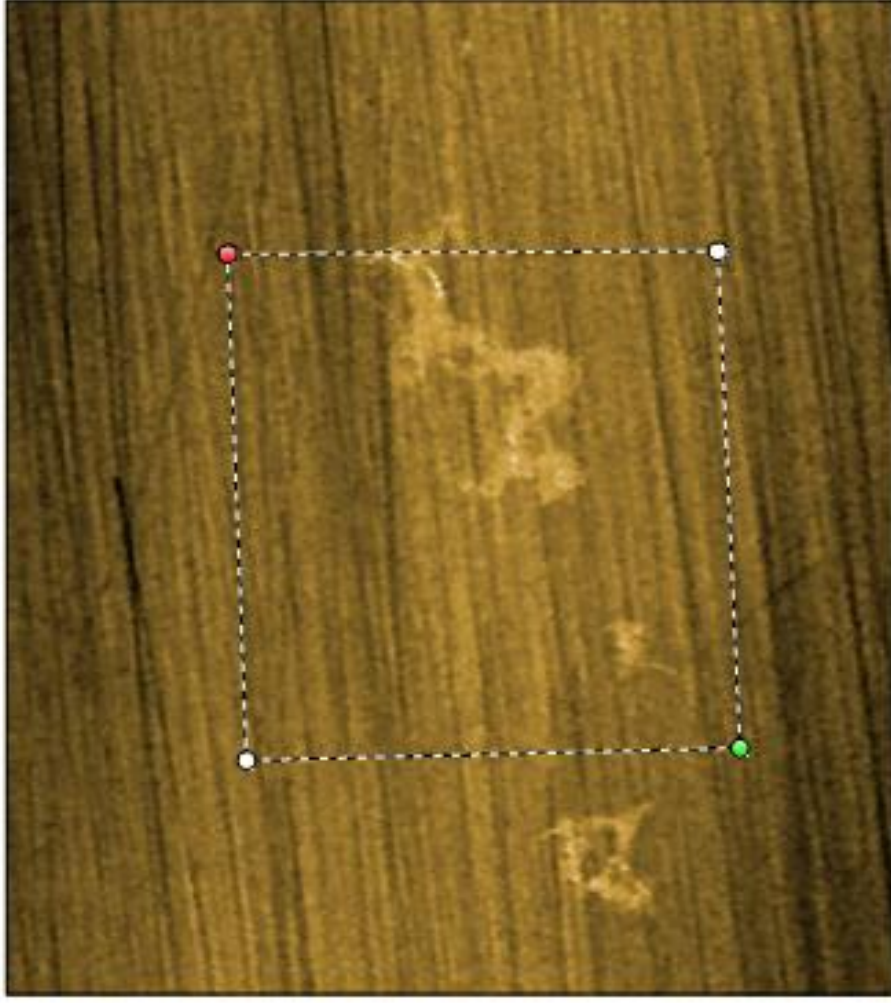
Şekil 88. 1 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kaviteyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile ölçülen hacim kaybı

Şekil 87’de elde edilen veriler doğrultusunda, 1 Paso SKP uygulanan malzemedeki kaviteyon etkisi ile oluşan çukurcuklarının 70μm derinliğine eriştiği tespit edilmiştir. Şekil 88’den elde edilen veriler doğrultusunda kanadın kaviteyon etkisinde kalan sınırlı (49 mm²) bölgedeki hacimsel malzeme kaybının 0,026 mm³ olduğu tespit edilmiştir. Kanat malzemesi NAB’ın yoğunluğu 7,64 g/cm³ olmak üzere bu kanat üzerinde ölçüm yapılmış olan sınırlı bölgedeki kaviteyon etkisiyle oluşan malzeme kaybı 0,0002 gr olarak belirlenmiştir.

Şekil 89 ve 90'da 2 paso SKP uygulanmış malzemeden imal edilen kanat numunesinin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafya ve hacim kayıp sonuçları verilmiştir.



Şekil 89. 2 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kaviteyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası

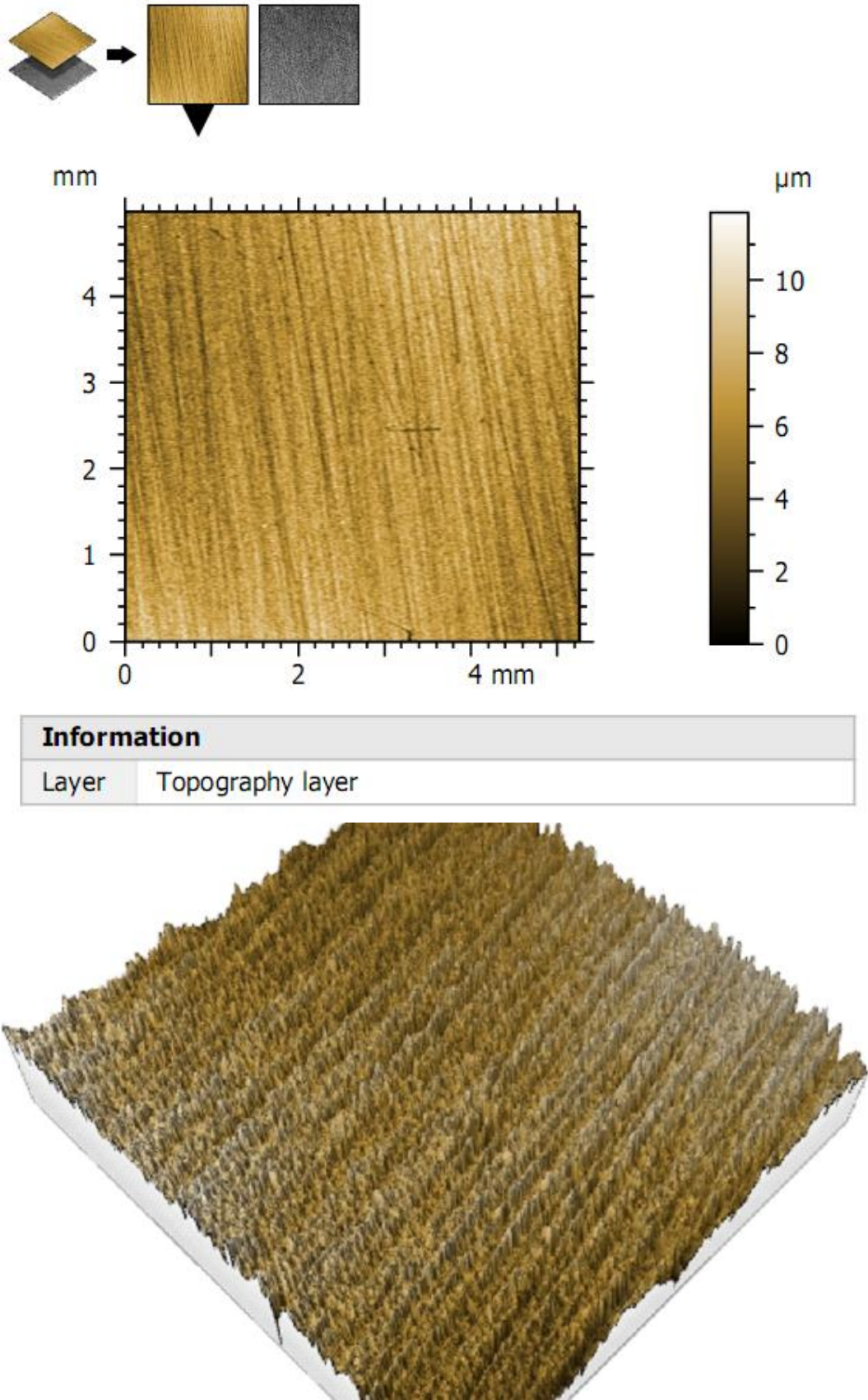


Parameters	Unit	Hole
Surface	mm ²	1.22
Volume	μm ³	598122
Max. depth/height	μm	2.82
Mean depth/height	μm	0.491

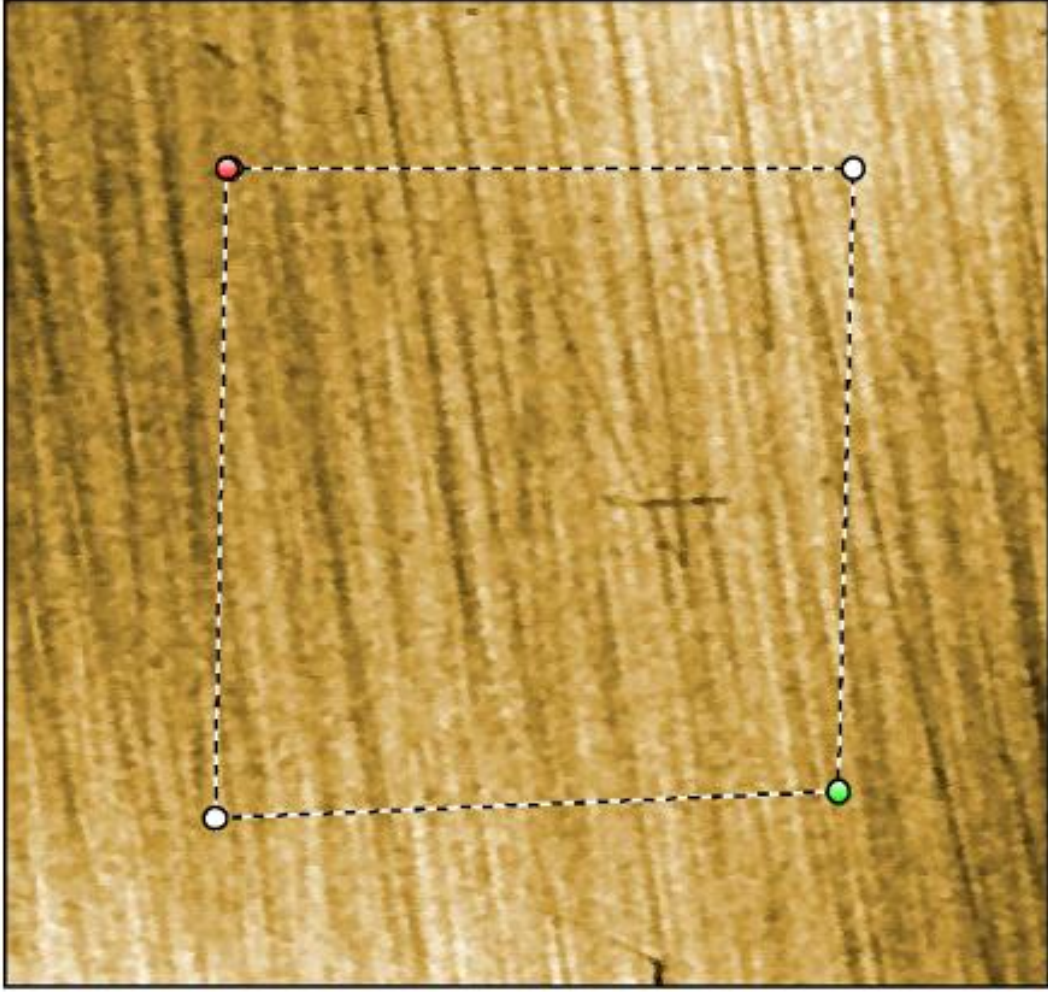
Şekil 90. 2 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kaviteyon beklenen bölgenin optik profilometre ile ölçülen yüzey değerleri

Şekil 89 ve 90'dan elde edilen veriler doğrultusunda, 2 Paso SKP uygulanan malzemedeki kaviteyon etkisi ile yüzeyde çukurcuk oluşmadığı tespit edilmiştir. Yüzeydeki tümsek yapının kirletici bir kalıntı olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 91 ve 92'de 3 paso SKP uygulanmış malzemeden imal edilen kanat numunesinin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafya ve hacim kayıp sonuçları verilmiştir.



Şekil 91. 3 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavitasyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası

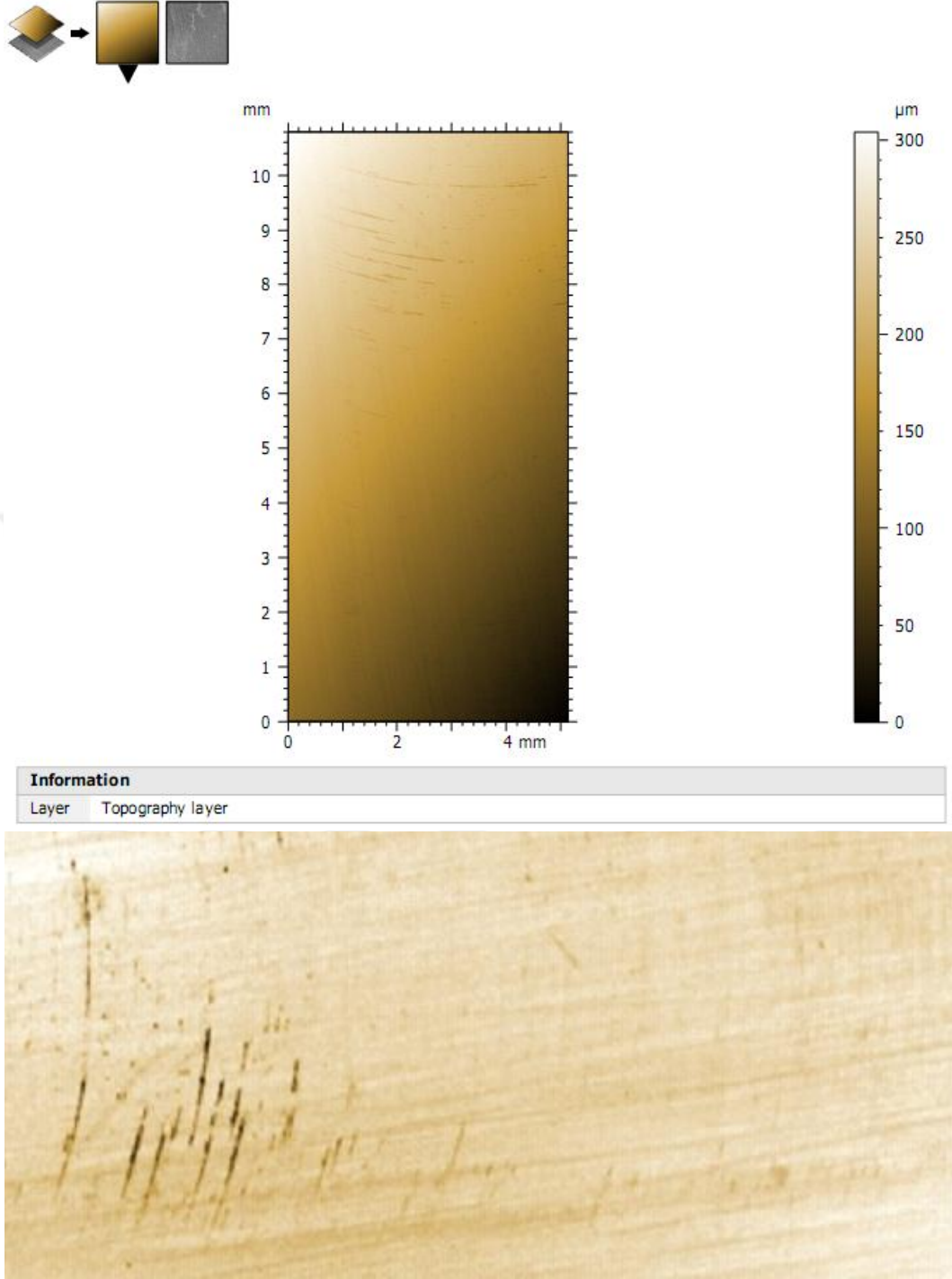


Parameters	Unit	Hole
Surface	mm ²	3.84
Volume	μm ³	2181958
Max. depth/height	μm	3.23
Mean depth/height	μm	0.569

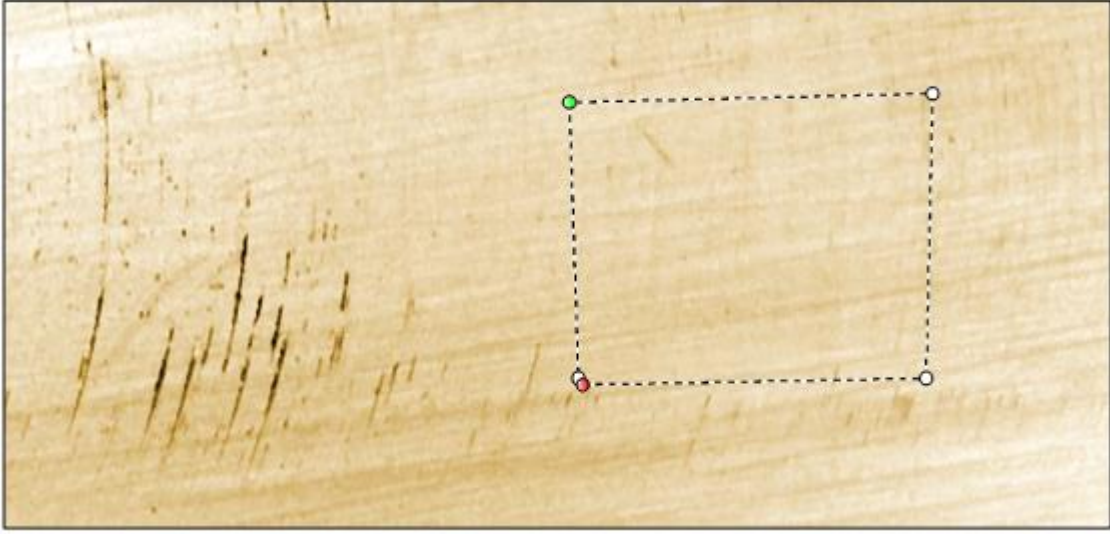
Şekil 92. 3 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavitsiyon beklenen bölgenin optik profilometre ile ölçülen yüzey değerleri

Şekil 91 ve 92'den elde edilen veriler doğrultusunda, 3 Paso SKP uygulanan malzemedeki kavitsiyon etkisi ile yüzeyde çukurcuk oluşmadığı tespit edilmiştir. Yüzeydeki çizgilerin numunenin hazırlanması sırasında uygulanan zımparadan kalmış olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 93 ve 94'de 4 paso SKP uygulanmış malzemeden imal edilen kanat numunesinin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafya ve hacim kayıp sonuçları verilmiştir.



Şekil 93. 4 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kaviteyon hasarlı bölgenin optik profilometre ile elde edilen yüzey topoğrafyası



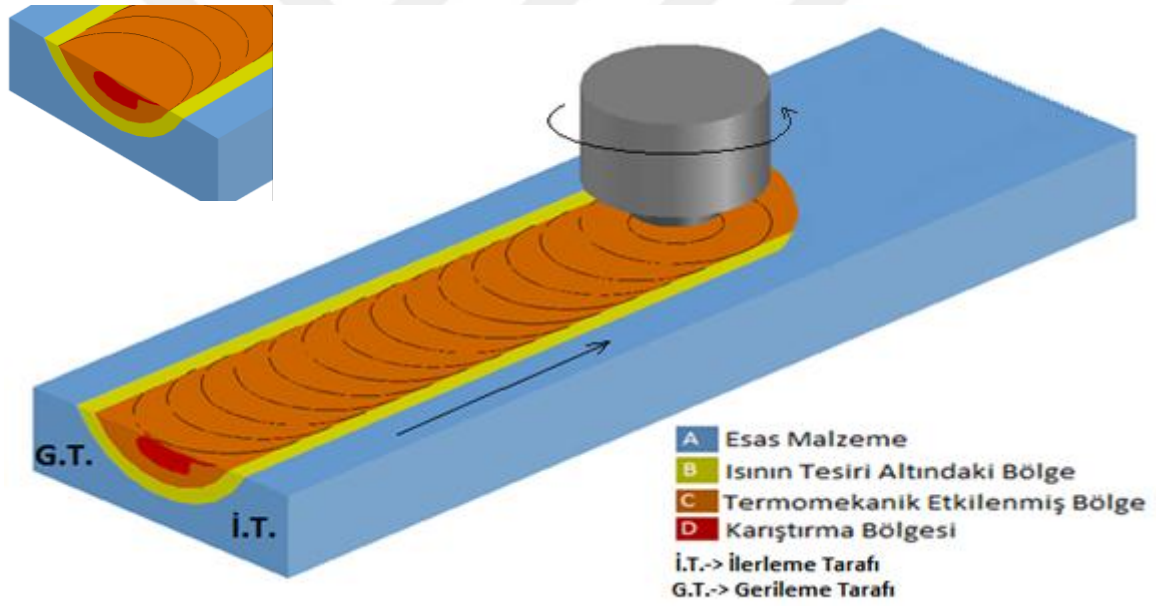
Parameters	Unit	Hole
Surface	mm ²	5.49
Volume	μm ³	5291219
Max. depth/height	μm	7.64
Mean depth/height	μm	0.964

Şekil 94. 4 Paso SKP uygulanan malzemeden imal edilen kanattaki kavitsiyon beklenen bölgenin optik profilometre ile ölçülen yüzey değerleri

Şekil 93 ve 94'ten elde edilen veriler doğrultusunda, 4 Paso SKP uygulanan malzemedeki kavitsiyon etkisi ile yüzeyde çukurcuk oluşmadığı tespit edilmiştir. Yüzeydeki spiral çizgileri SKP işleminden kalma ilerleme izleri olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucu, en fazla kavitsiyon hasar belirtisi base malzemede gözlemlenmiştir. Kanat malzemesine uygulanan SKP işleminin malzemenin kavitsiyon direncine olumlu katkı yaptığı, 1 ve daha fazla sayıda prosese tabi tutulmuş kanatların kavitsiyon deneyi sonucundaki yüzeylerinin incelenmesinden bariz olarak anlaşılmaktadır. Bir pasodan daha fazla sayıda (2, 3 ve 4 paso) proses edilmiş kanatların sınırlı sürede de olsa kavitsiyona testine tabi tutulmalarında anlamlı kavitsiyon belirtileri gözlemlenememiştir. Ayrıca 3 ve 4 paso SKP işleme tabi tutulmuş kanat numunesi yüzeylerinin stereo mikroskop görüntülerinde (Şekil 76-79) aşınma etkisi gibi algılanan izlerin çalışma ortamındaki kimyasal etkilerden ve söküp takma işlemleri sırasındaki mekanik etkilerden kaynaklanan renklemeler olduğu yüzey üzerinde yapılan üç boyutlu optik profilometre incelemelerinden (Şekil 89, 90) anlaşılmıştır. Dolayısıyla bu numuneler üzerinde anlamlı herhangi bir aşınma belirtisi tespit edilememiştir.

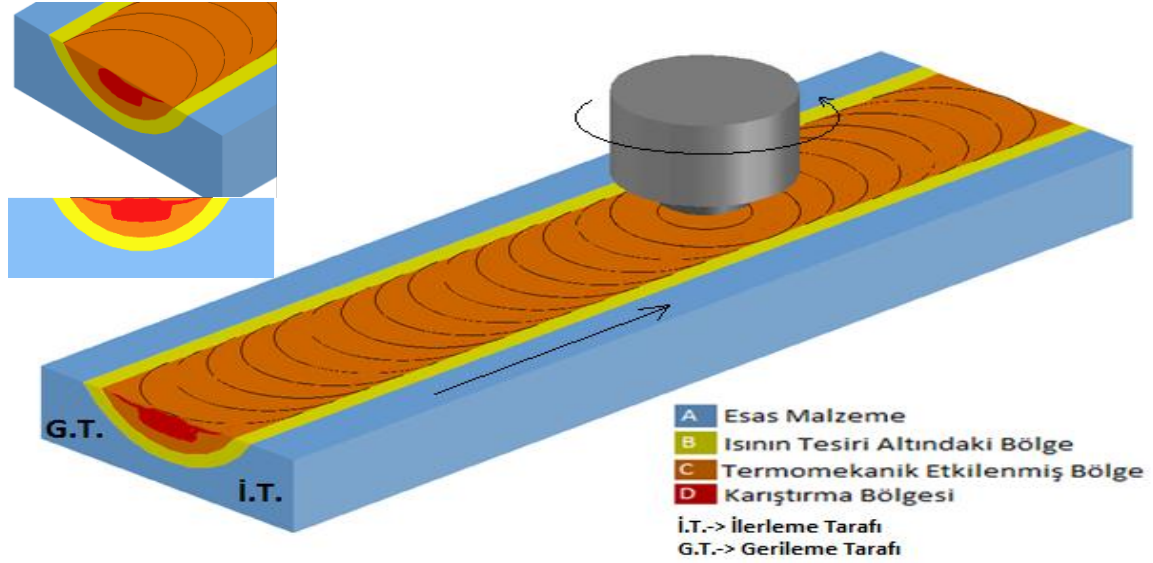
1 Paso proses işlemine tabi tutulan kanadın, daha yüksek sayıda paso procese tabi tutulan kanatlar ile aynı performansı göstermemiş olması, diğer taraftan base malzemeye göre kavitasyon hasarına karşı oldukça iyi direnç göstermiş olması, proses işlemi ve sayısına göre yapıda oluşan değişiklikleri irdelememizin gerekliliğini ortaya koymaktadır. 1 Paso procese tabi tutulan NAB malzemedeki, Şekil 95'teki gibi heterojen bir içyapı oluşmaktadır. Şekil 95 ve 96'da A bölgesi esas malzemeyi, B bölgesi ısının tesiri altındaki bölgesi, C bölgesi termomekanik etkilenmiş bölge ve D bölgesi karıştırma bölgesini temsil etmektedir. Şekilde de görülebileceği üzere SKP'nin karıştırma etkisi ile ilerleme tarafında yüzeye yakın bölgede malzeme yönlendirme etkisi göstermektedir. Yani yüksek mukavemetli karıştırma bölgesi asimetrik olarak ilerleme tarafında hem daha geniş bir alana yayılmakta, hem de yüzeye daha yakın bir bölge oluşturmaktadır.



Şekil 95. 1 Paso proses işlemine tabi tutulan malzemenin içyapı genel görünümü

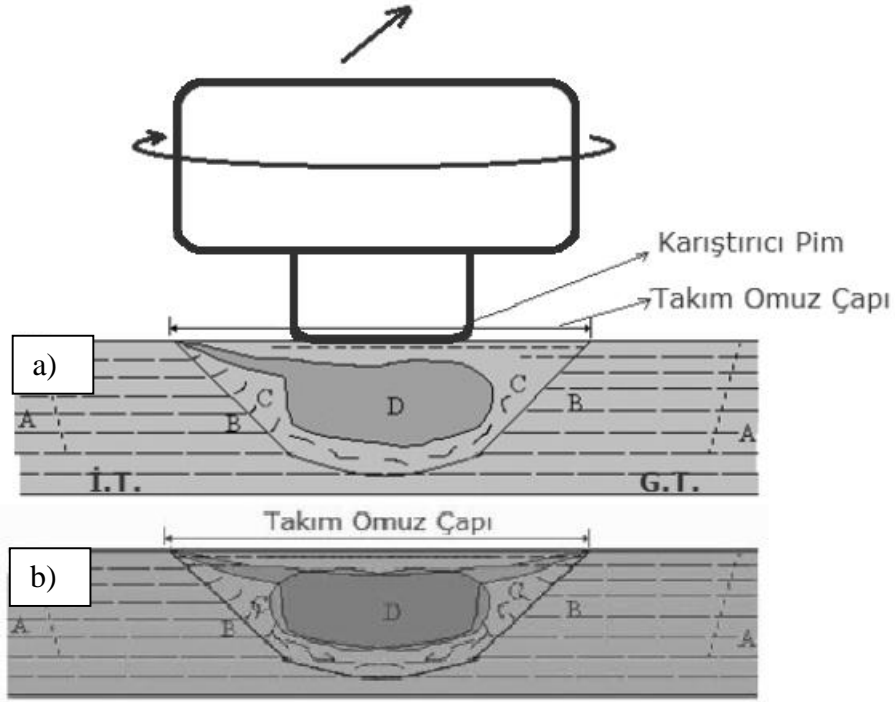
Kanat profili, SKP takım piminin etkisinde kalan bölge içerisinden çıkarılmıştır. Bu durum, 1 paso proses edilmiş malzemedeki kanat profilinde, proses edilmiş olan bölgenin asimetrik bir yapıda olmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla uygulanan SKP işleminin malzemenin mikroyapısında oluşturmakta olduğu homojen yapının proses işleminin ters yönde birkaç kez tekrarlanması ile daha homojen bir yapının elde edilmesini sağlayacaktır. Uygulanan proses işlem etkisi 1 pasoda yeterli homojen yapının oluşmasını,

sağlamamakla birlikte base malzemeye kıyasla yapının bir miktar iyileşmesini sağlamış olması nedeniyle, 1 pasoda daha yüksek kaviteyon direncinin elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 96'dan görülebileceği gibi, 2 paso ve üzeri sayıda uygulanan proses işleminin malzemeyi daha homojen bir şekilde proses etkisine maruz bırakmış olması nedeniyle, malzemenin kaviteyon direncinde de önemli ölçüde iyileşme elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 96. 2 paso proses uygulanan malzemedeki iç yapı genel görünümü

Şekil 96'da da görüldüğü üzere yüzeye uygulanan SKP işlemi 1 paso sonrası aynı doğrultuda geriye dönük olarak 2. paso şeklinde uygulandığında yapıda, 1 pasonun aynalanmış hali gibi oluşmaktadır. Bu durum artan paso sayısı ile daha homojen bir yapının elde edilmesini sağlar. Şekil 97'de paso sayısının iç yapıya etkisi görülmektedir.



Şekil 97. Paso sayısının içyapıya etkisinin şematik görüntüsü, a) 1 paso proses, b) 2 paso proses.

Çalışmamızda $5,58 \times 10^8$ yük tekrarı (3000 saat) işletme süresi sonucunda kavitasyon hasarı gözlemlenen 49 mm^2 'lik alan üzerinde optik profilometre yardımı ile hacim kaybı ve dolayısıyla kaybolan malzeme kütlesi hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda base malzemede $2 \mu\text{g}$ malzeme kaybı oluşur. 1 paso proses edilen malzemede aynı alanda $0,2 \mu\text{g}$ malzeme kaybı hesaplanmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalarda, genellikle kavitasyon testi için ASTM G32 standartlarına uygun şekilde ultrasonik kavitasyon test cihazı kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda yükleme frekansı 20 kHz olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan kavitasyon düzeneğinde kavitasyon kabarcıklarının içe çökme etkisiyle oluşan şok dalgasının darbe etkisinin, literatürde kullanılan ultrasonik kavitasyon test düzeneklerinde elde edilen şok dalgalarının darbe etkileri ile aynı mertebede oldukları varsayılmıştır. Bu varsayımdan yola çıkılarak, çalışmadaki işletme süresine yani erişilen yük tekrar sayısına, ultrasonik kavitasyon test cihazlarında 20kHz'lik frekansla t sürede ulaşılabileceği kabul edilmiştir. t (Ultrasonik Kavitasyon Test Cihazı Eş değer Çalışma Süresi)'nin hesaplanması formül 4.1'deki gibi bir bağıntı ile gerçekleştirilebilir.

$$\text{Frekans (f) x Zaman (t) = Y\u00fck tekrar sayısı} \quad (4.1)$$

Burada; $20 \text{ kHz} = 20 \times 10^3 \text{ devir/sn}$ oldu\u011fu bilinmektedir, $20 \times 10^3 \text{ d/sn} \times 60 \text{ sn/dk} \times t = 5,58 \times 10^8$ olmalıdır. Buradan; $t = 465 \text{ dk}$ olarak hesaplanır. $465' \text{ da} = 7 \text{ saat } 45 \text{ dk}$ ' dır.

Literat\u00fcrde yapılan \u00e7alışmalar sonucunda ortaya \u00e7ıkan malzeme kaybını ger\u00e7ekleştirilen bu \u00e7alışma ile kıyaslanabilmesi i\u00e7in, literat\u00fcrde bu Şartlar altında 465'inci dakika sonucunda ortaya \u00e7ıkan malzeme kaybı dikkate alınmıştır. Bu sebeple, \u00e7eşitli \u00e7alışmaların 465'inci dakikada elde ettikleri malzeme kayıpları Tablo 9'da g\u00f6sterilmiştir.

Tablo 9. Yapılan \u00e7alışma ve literat\u00fcr ile kıyaslanması

Çalışmayı Yapan	Çalışma Türü (Kavitasyon diren\u00e7 belirleme)	Numune	Numune alanı (mm ²)	Malzeme kaybı (μm)
H. Keleş	SKP ile işlenen NAB	Base	418 mm ² *	2±0,2 μg
H. Keleş	SKP ile işlenen NAB	1 Paso	418 mm ² *	0,2±0,02 μg
Li ve arkadaşları [37]	TIG kaynağı yapılan NAB malzemenin kavitasyon direnci	Base	127 mm ²	75 μg
Li ve arkadaşları [37]	TIG kaynağı yapılan NAB malzemenin kavitasyon direnci	TIG Kaynak B\u00f6lgesi	127 mm ²	53 μg
Hanke ve arkadaşları [38]	Y\u00fczey s\u00fcr\u00fct\u00fcm\u00e9 prosesi (friction surfacing)	Base	400 mm ²	20±7 μg
Hanke ve arkadaşları [38]	Y\u00fczey s\u00fcr\u00fct\u00fcm\u00e9 prosesi (friction surfacing)	S\u00fcr\u00fct\u00fcm\u00e9 Y\u00fczeyi	400 mm ²	11±6 μg
Song ve arkadaşları [33]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kavitasyon direnci	Base	120 mm ²	5 μg
Song ve arkadaşları [33]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kavitasyon direnci	SKP b\u00f6lgesi	120 mm ²	3,5 μg
Zheng ve arkadaşları [39]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kavitasyon direnci	Base	49 mm ²	9,75 μg
Zheng ve arkadaşları [39]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kavitasyon direnci	SKP b\u00f6lgesi 1200/50	49 mm ²	4,6 μg
Zheng ve arkadaşları [39]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kavitasyon direnci	SKP b\u00f6lgesi 1200/100	49 mm ²	3,5 μg
Zheng ve arkadaşları [39]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kavitasyon direnci	1200/50 2 Paso	49 mm ²	3,6 μg

Tablo 9'un devamı

Zheng ve arkadaşları [39]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kaviteasyon direnci	SKP bölgesi 1500/50	49 mm ²	4,6 µg
Ahmad ve arkadaşları [40]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kaviteasyon direnci	Base	900 mm ²	3,6 µg
Ahmad ve arkadaşları [40]	SKP ile işlenen NAB malzemenin kaviteasyon direnci	SKP bölgesi	900 mm ²	2 µg
Cottam ve arkadaşları [41]	Lazer ile işlenen NAB malzemenin kaviteasyon direnci	Base	128,7 mm ²	64 µg
Cottam ve arkadaşları [41]	Lazer ile işlenen NAB malzemenin kaviteasyon direnci	Lazer eritme	128,7 mm ²	4 µg
Cottam ve arkadaşları [41]	Lazer ile işlenen NAB	Lazer proses	128,7 mm ²	5 µg
* ölçüm yapılan alan en fazla kaviteasyon hasarı gözlemlenen bölge (49mm ²) ile kısıtlı tutulmuştur.				

Ham döküm durumda bulunan nikel alüminyum bronz malzemenin farklı çalışmalarda, farklı miktarlarda malzeme kaybına uğradığı Tablo 9'dan da anlaşılmaktadır. Nikel alüminyum bronzun genellikle serbest piyasadan tedarik edilen bir alaşım olması ve imalat koşullarında ortaya çıkan farklılıklar nedeniyle, diğer taraftan kaviteasyon test cihazlarındaki probunun çapı, numune-prob arası mesafe v.b. etkilerden dolayı farklı kaviteasyon dirençlerinin ortaya çıkması söz konusudur. Bunun sonucu olarak yapılan çalışmalarda farklı malzeme kaybı değerlerinin bulunması beklenen bir durumdur. Yapılan çalışmalarda da esas olarak üzerinde durulduğu gibi, kaviteasyon direncini artırmaya yönelik yapılan işlemlerin ne kadar başarılı olduğunun bir ölçüğü olması bakımından, çalışmaların kendi içlerinde izafi olarak base malzeme ve işlem görmüş malzemelerin eş ortamlardaki kaviteasyona uğramaları sonucunda oluşan malzeme kayıplarının kıyaslanması kabul edilebilir değerler vermektedir. Gerçekleştirilen çalışmadan elde edilen sonuçlarda, sürtünme karıştırma prosesi uygulanan nikel alüminyum bronz malzemede ölçülen kaviteasyon miktarı base malzemede ölçülen kaviteasyon miktarının yaklaşık onda biri kadar olduğu belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar da çalışmamızı doğrular nitelikte olup, proses işleminin malzemenin kaviteasyon direncini yaklaşık olarak 7-8 kat artırdığı ifade edilmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada nikel alüminyum bronz malzeme 1250d/dk'lık devir sayısı, 65mm/dk'lık ilerleme hızı ve 4400N'luk takım baskı kuvvet proses parametreleri kullanılarak sürtünme karıştırma proses işlemine tabi tutulmuştur. Bu malzemeden pompa çarkı imal edilmiştir. İmal edilen pompa kavitasyon deneyi için 4m³/h debi ve emiş hattında -0,9 bar mutlak basınç (vakum) sabit tutularak çalıştırılmıştır. Gözle görülür ölçüde kavitasyon hasarının tespit edildiği 3000 saatlik işletme süresi sonunda, pompa çarkı kanatları üzerinde yapılan incelemelerin ve tespit edilen bulguların değerlendirilmesinden çıkartılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. NAB alaşımına sürtünme karıştırma proses işlemi kullanılan parametreler ile etkin bir şekilde uygulanabilir.
2. NAB malzemenin döküm yapısındaki gözeneklilik hataları ve heterojen yapı uygulanan SKP işlemi ile giderilerek daha homojen bir içyapı elde edilmesi sağlanır.
3. Uygulanan SKP işleminde artan paso sayısı ile birlikte hatalardaki azalma ve homojen yapı doğru orantılı olarak artar.
4. SKP işlemi malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler.
5. SKP işlemi NAB malzemenin tane yapısında önemli oranda incelleme etkisi ortaya çıkarır (Ortalama 5-7 µm mertebelerinden 1µm'a kadar düşürmektedir).
6. SKP işlemi NAB alaşımının kavitasyona karşı direncini önemli ölçüde artırır.
7. NAB alaşımının kavitasyon direncini artırma amaçlı uygulanacak SKP işleminde kabul edilebilir iyileşmeye 2. paso adımda erişilebilir.
8. Döküm yöntemi kullanılarak elde edilen NAB alaşımına uygulanan SKP işlemi malzemenin kavitasyon direncini 10 kat artırabilmektedir.

6. ÖNERİLER

Yaptığımız çalışma sonucunda 3000 saatlik işletme süresinin base malzeme üzerinde kavitasyonun yıkıcı hasar etkisinin bariz ortaya çıkması için yeterli olmuştur. Ancak, proses işleminin etkinliğinin sınırlarını tam olarak belirleyebilmek için gerçekleştirilmesi düşünülebilecek çalışmalar aşağıda ifade edilmiştir.

Yapılabilecek yeni çalışmalarda, işletme süresinin artırılmasına müteakip SKP ile işlenmiş malzemelerin kavitasyon hasarına dayanım süreleri tespit edilebilir. Farklı paso sayısında işlenen malzemelerin davranışları ve birbirlerine göre üstünlük ve zayıflıkları ortaya çıkarabilecek çalışmalar yapılabilir.

Gerçek şartların daha iyi temsil edilebilmesi adına, kullanılan soğutucunun daha etkin soğutucular ile değiştirilerek gerçek çalışma sıcaklığında çalışmalar yapılabilir.

Pompa çark kanatları farklı malzemelerden imal edilerek ve bu kanatlar farklı yüzey işlemlerine tabi tutularak çalışma performansları incelenebilir.

Sürtünme Karıştırma Prosesi (SKP) benzer olarak gemi pervanelerine de uygulanabilir ve bu pervanelerin çalışma performansına etkileri araştırılabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Çopur, M., Santrifuj Pompa Fanlarının Döküm Simülasyonu, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
2. Aktarer, S. M., Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen If 7114 Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapısının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
3. Stachowiak, G.W. ve Batchelor, A.W., Engineering Tribology, Second Edition, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford England, 2005.
4. Pancar, Y. ve Ergür, H. S., Hidrolik Makinalar ve Uygulamaları, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2007.
5. Palgrave, R., Troubleshooting Centrifugal Pumps and Their Systems, Elsevier Science and Technology Books, Birleşik Krallık, 2003.
6. Ardıç, S., Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Santrifuj Pompalarda Performans Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2014.
7. Nesbitt, B., Handbook of Pumps and Pumping, Elsevier Science and Technology Books, Birleşik Krallık, 2006.
8. Flach, P., Pump Handbook: Pumps and Systems: Centrifugal Pumps, Elsevier Science and Technology Books, Birleşik Krallık, 1999.
9. Ham-Su R., Cheng L. M. ve Gharghourı M. A., Residual Stresses in Friction Stir Processed (FSP) Nickel Aluminium Bronze, http://www.cins.ca/docs/exp_rep/CNBC-2008-54.pdf, 13 Ocak 2016.
10. Strang, J. R. C., Nickel-Aluminium Bronze for Seawater: Flattered by Comparison. www.valve-world.net/pdf/vw1009_materials_shipham.pdf. 02 Ocak 2016.
11. Strang J. R. C., Cast Valve Materials for Seawater Service: Nickel-Aluminium Bronze and Its Rivals. http://www.shipham-valves.com/uploads/files/ValveWorld06_P0607_Strang-Valve_Materials_for_Seawater__NAB__Rivals.pdf 10 Ocak 2016.
12. Cuevas A. M., Microstructure Characterization of Friction-Stir Processed Nickel-Aluminium Bronze through Orientation Imaging Microscopy, Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California USA, 2002.
13. Rosemark, B.P., Friction Stir Processing Parameters and Property Distributions in Cast Nickel Aluminum Bronze, Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California USA, 2006.

14. www.aluminium-bronze-valves.com/valves.html Valves for Seawater Service 31 Aralık 2015.
15. Horwath, J. H., Why Nickel Aluminium Bronze for Sea Water Pumps. www.ampcopumps.com/wp-content/uploads/2015/01/Why-NiAlBz-For-Saltwater.pdf. 02 Ocak 2016.
16. Ekinci, S., Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kavitasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
17. Çelik, F., Kavitasyon, Kavitasyonun Etkileri Kavitasyon Kontrolü, <http://www.yildiz.edu.tr/~fcelik/dersler/gemidirenci/PDF/9.%20Kavitasyon.pdf> 12 Ocak 2016.
18. Tural, H.N., Pompalarda Malzeme Kaynaklı Hasarlar ve Malzeme Seçimi, 7. Pompa-Vana Kongresi ve Sergisi, Nisan 2011, İstanbul
19. Balbaşı, M., Korozyon ve Korozyon Kontrolü, <http://w3.gazi.edu.tr/~balbasi/BOLUM-6.pdf> 8 Ocak 2016.
20. Tabar, M.T.S., Majidi, S.H. ve Poursharifi Z., Investigaiton of Recirculation Effects on the Formation of Vapor Bubbles in Centrifugal Pump Blades, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, 5, 2011, 410-415.
21. www.pumpfundamentals.com/pump_glossary.htm, Pumps! That's What it's about, 12 Ağustos 2014.
22. <https://jacpump.wordpress.com/2011/04/17/solving-a-cavitation-problem/>, Centrifugal Pump Help-John Anspach Consulting, 22 Mart 2016.
23. Kaya, M., Pompalarda Kavitasyon ve Öngörme Yöntemleri, 8. Pompa-Vana Kongresi ve Sergisi, 2013.
24. Rosemark, B. P., Friction Stir Processing Parameters and Property Distributions in Cast Nickel Aluminum Bronze, Yüksek Lisans Tezi, Naval Postgraduate School, California USA, 2006.
25. Mishra, R.S. and Mahoney, W.M., Friction Stir Welding and Processing, http://www.asminternational.org/documents/10192/3447989/05112G_Frontmatter.pdf/37de79b5-f97f-4446-9a84-49c156e821d1 15 Ocak 2016.
26. Lotfollahi M., Shamanian M. ve Saatchi A., Effect of Friction Stir Processing on Erosion–Corrosion Behavior of Nickel–Aluminum Bronze, Materials & Design, 62, (2014) 282-287.
27. Şentürk, E., Nikel Alüminyum Bronzun Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.

28. www.bilgiustam.com/santrifuj-pompa-nedir-nasil-calisir/, Santrifüj Pompa Nedir? Nasıl Çalışır?, 8 Ekim 2014.
29. Çallı, İ., Santrifüj Pompa Hesabı ve Çizimi, <http://www.nevoku.com/santrifuj-pompa-hesabi-ve-cizimi-genel/viewdeck/53923ec3-7bd3-454a-98a4-1aa376193cfa> 14 Ocak 2016.
30. Sert, A., Sürtünme Karıştırma Prosesi ile Yüzeyine SiC Partikül Takviye Edilmiş Al 7075-T651 Alüminyum Alaşımının Mikro Yapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
31. Küçükömeroğlu, T., Şentürk, E., Kara, L., İpekoğlu, G. and Çam, G., Microstructural and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Nickel-Aluminium Bronze (NAB) Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, (2016) 320-326.
32. <http://www.e-marineeducation.com/tr/gemi-pervanelerinde-kavitasyon/>, Gemi Pervanelerinde Kaviteasyon – E Marine Education, 21 Nisan 2016.
33. Song, Q. N., Zheng, Y. G., Jiang, S. L., Ni, D. R. and Ma, Z. Y., Comparison of Corrosion and Cavitation Erosion Behaviors Between the As-Cast and Friction-Stir-Processed Nickel Aluminium Bronze, *Corrosion Journal*, 69, 11 (2013) 1111-1121.
34. Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff H. R. and Withers P. J., Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-of-aluminium-alloys> 4 Mayıs 2016.
35. Mishra, S. R., De, P. S. and Kumar, N., Friction Stir Welding and Processing, First Edition, Springer International Publishing, Cham, 2014.
36. Givi, M. K. B. and Asadi, P., Advances in Friction Stir Welding and Processing, First Edition, Woodhead Publishing, Cambridge, 2014.
37. Li, X., Yan, Y., Xu, Z. and Li, J., Cavitation Erosion Behavior of Nickel Aluminium Bronze Weldment, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 13, 6 (2003).
38. Hanke, S., Fischer, A., Beyer, M. and Santos, J. D., Cavitation Erosion of NiAl-bronze Layers Generated by Friction Surfacing, *Wear*, 273 (2011) 32-37.
39. Song, Q. N., Zheng, Y. G., Ni, D. R. and Ma, Z. Y., Corrosion and Cavitation Erosion Behaviors of Friction Stir Processed NiAl Bronze: Effect of Processing Parameters and Position in the Stir Zone, *Corrosion Journal*, 70, 3 (2014) 261-270.
40. Ahmad, A., Li, H., Pan, Z., Cuiuri, D. and Duin, S., Feasibility Study of Low Force Robotic Friction Stir Process and Its Effect on Cavitation Erosion and Electrochemical Corrosion for NiAl Bronze Alloys, *Metallurgical and Materials Transaction B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 45, 6 (2014) 2291-2298.

41. Cottam, R, Luzin, V., Moody, H., Edwards, D., Majumdar, A., Wong, Y. C., Wang, J. and Brandt, M., The Role of Microstructural Characteristics in the Cavitation Erosion Behavior of Laser Melted and Laser Processed Nickel-Aluminium Bronze, Wear, 317 (2014) 56-63.



ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Ordu'da doğan Haluk KELEŞ, ilk ve orta öğrenimini Ordu'da tamamladıktan sonra 2011 yılında K.T.Ü. Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Ordu'nun Altınordu ilçesinde doğalgaz iç tesisat yetkili mühendisliği yaptı. 2011 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2014 yılında askerlik hizmetini Şırnak 23'üncü J. Snr. Tüm. K.lığı'nda yerine getirdi. Halen Artvin Çoruh Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi ve aynı zamanda Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'nda Makine Mühendisi olarak görevine devam eden Haluk KELEŞ iyi derecede İngilizce bilmektedir.