

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al-12Si MATRİSLİ SERAMİK PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT
KAPLAMALARIN SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

S. Emrah BAYRAK

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Malzeme Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al-12Si MATRİSLİ SERAMİK PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT
KAPLAMALARIN SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
S. Emrah BAYRAK
(506071414)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2011**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)**

OCAK 2011

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, farklı bakış açıları kazandıran, gösterdiği ilgi ile çalışmanın hedefine uygun olmasını sağlayan ve bu tezin hazırlanmasında en az benim kadar heyecanlı olan değerli hocam Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOGU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Gösterdiği ilgi ve yönlendirmeler için Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a, çalışmalarımın yönünü çizmemde ve her aşamada tüm detayları paylaşarak sorunları gidermemde yardımcı olan, bu çalışmaya büyük katkılar sağlayan, verdiği emeği hiçbir zaman göz ardı edemeyeceğim Arş. Gör. Onur MEYDANOĞU'na, karakterizasyon çalışmalarında yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Mert GÜNYÜZ'e ve tozların hazırlanmasında bana zaman ayırıp destek olan Arş. Gör. Hasan GÖKÇE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni her yönden destekleyen ve her daim yanımda olan sevgili AİLEME ve sevgili teyzem Hatice BAYAR'a, çalışmalarım sırasında motivasyonumu hep yüksek tutan ve sabrını esirgemeyen arkadaşım Nurcan TARHAN'a derin şükran ve minnet borçluyum.

ARALIK 2010

S. Emrah BAYRAK

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1 GİRİŞ	1
2 SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ (SDGP)	3
2.1 SDGP Tanımı ve Tarihçesi.....	3
2.2 SDGP Yöntemleri, Avantaj ve Dezavantajları.....	4
2.3 SDGP Kaplama Mekanizması ve Parametreleri.....	8
2.4 SDGP ile İlgili Örnek Çalışmalar.....	11
2.4.1 SDGP ile Al-12Si kaplama üretilmesi ve karakterizasyonu	11
2.4.2 SDGP ile Al-12Si matrisli SiC partikül takviyeli kompozit üretimi....	18
3 SİNERLENMİŞ SiC'ÜN SULU ORTAM AŞINMA DAVRANIŞLARI .	23
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
4.1 Kaplama İşlemi.....	27
4.2 Karakterizasyon Çalışmaları	30
4.2.1 Mikroyapı incelemeleri	30
4.2.2 Sertlik ölçümleri.....	31
4.2.3 Aşınma deneyleri	31
5 DENEYSEL SONUÇLAR.....	35
5.1 Mikroyapı İncelemeleri	35
5.2 Sertlik Ölçümleri	41
5.3 Aşınma Deneyleri.....	42
5.3.1 Aşınma profilleri ve aşınma kayıpları.....	42
5.3.2 Sürtünme katsayısı	45

5.3.3	Aşınma yüzeyleri.....	48
6	GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	55
	KAYNAKLAR.....	57
	EKLER.....	59
	EK A	59
	ÖZGEÇMİŞ.....	67

KISALTMALAR

SDGP	: Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yöntemi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
Al-12Si	: Alüminyum, %12 Silisyum Alaşımı
HV	: Vickers Sertlik Birimi (Hardness Vickers)
XRD	: X-ışınları Kırınımölçeri (X-Ray Diffractometer)
EDS	: Enerji Dağılımlı Görüngeölçer (Energy Dispersive Spectrometer)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Portatif tip ve istasyon tip cihazlar arası parametre farkları [4].	6
Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan tozların özellikleri.....	28
Çizelge 4.2 : Hazırlanan harmanlar ve karıştırma yöntemleri.....	29
Çizelge 5.1 : Kaplama verimi hesaplamaları.	40
Çizelge A.1 : Sertlik ölçüm sonuçlarının standart sapmalı ortalama değerleri.	59
Çizelge A.2 : Aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik ve derinlik değerleri ile aşınma alanı hesaplarının, ortalama ve standart sapma ile gösterimi.	60
Çizelge A.3 : Al 6082 altlık ve %40 SiC takviyeli kaplama için farklı yüklerdeki kuru ve sulu ortam sürtünme katsayısı değerleri.	61

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : SDGP yönteminin genel şematik gösterimi [3].....	3
Şekil 2.2 : SDGP tipleri (a) Portatif tip (b) İstasyon tipi [6].....	5
Şekil 2.3 : Portatif tip cihazın önemli parçaları.	5
Şekil 2.4 : Nozül tasarımının şematik görünümü.	6
Şekil 2.5 : SDGP uygulama yerleri (a) erozyona karşı boru iç ve dış çeper kaplama (b) elektrik iletkenliği olan kaplamalar (c) kaynak dikişi koruma amaçlı kaplama (d) elektrik motorlarında dönmeyen kısımlara yapılan kaplamalar (e) aşınma bölgesi kaplamaları (f) boyut uyumsuzluğunu düzeltme amaçlı kaplama (g) otomotivde korozyon engelleme amaçlı kaplamalar (h) boru ağzı kapama amaçlı kaplamalar (i) yatak yuvalarının onarılması [9].	8
Şekil 2.6 : 600 m/s hıza sahip 5µm boyutlarında iki küresel taneciğin ardı ardına altlık üzerine çarpışının 5, 10 ve 15. sn'lerdeki hareketinin üç boyutlu simülasyon ile gösterimi [10].	9
Şekil 2.7 : (a) Al partikülleri (b) 730 m/s (c) 780 m/s (d) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partiküllerinin etkisi [4].	9
Şekil 2.8 : Lazer saçılma metoduyla çekilen toz yörünge fotoğrafları. Silindir ve Küre gövde çapı yaklaşık 8mm (a) kama yarığı ve Al parçacıkları (b) silindir ve Al parçacıkları (c) küre ve Al parçacıkları (d) küre ve akrilik cam parçacıkları [1].	10
Şekil 2.9 : (a) Al-12Si toz morfolojisi (b) partikül kesit alanı (c) partikül kesitinin yüksek büyütme görüntüsü (d) Si elementinin EDS analizi [12].	12
Şekil 2.10 : Al-Si faz diyagramı [12].	12
Şekil 2.11 : Kaplama öncesi ve sonrası Al-12Si X-ışını difraksiyon analizi [12].	13
Şekil 2.12 : SDGP ile (a) 250 ⁰ C (b) 350 ⁰ C (c) 410 ⁰ C sıcaklıkta gaz kullanılarak elde edilen kaplamaların tarama elektron mikroskobu görüntüleri (d) gaz sıcaklığı ile porozitenin değişimi [13].	14
Şekil 2.13 : SDGP yöntemi ile üretilen Al-12Si kaplama kalınlığının gaz sıcaklığına göre değişimi [13].	14
Şekil 2.14 : 400 °C'de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri [12].	15
Şekil 2.15 : Tane boyutu - parçacık hızı grafiği [12].	15

Şekil 2.16 : 560 °C’ de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri (a) genel görünüm (b-d) yüksek büyütme [12].	16
Şekil 2.17 : (a-b) kaplamanın kesitinden alınmış numunenin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (c) b’deki görüntünün EDS ile çekilmiş Si element haritası [12].	17
Şekil 2.18 : (a) Al-12Si morfolojisi (b) SiC morfolojisi [16].	18
Şekil 2.19 : Hacimce (a) %20 SiC (b) %30 SiC (c) %40 SiC (d) %50 SiC içeren Al-12Si/SiC kompozit kaplamaların kesit alanlarından alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [16].	19
Şekil 2.20 : Kompozit kaplama yapısı içerisindeki çatlamış SiC tanecikleri [16].	20
Şekil 2.21 : Besleme tozu ve kompozit kaplama içerisindeki hacimce % SiC oranları [16].	21
Şekil 2.22 : Sertlik-Hacimce % SiC oranı grafiği [16].	21
Şekil 2.23 : SiC tane boyutu- Sertlik grafiği [16].	22
Şekil 3.1 : Tribo-kimyasal film tabakası oluşumunun şematik gösterimi [11].	23
Şekil 3.2 : SiC sulu aşınma modelinin şematik gösterimi (a) ilk temas ve birikinti oluşumu (b) temasın devamı ve kayma çatlaklarının oluşumu (c) hapsedilmiş su ve hidro-termal reaksiyonlar (d) izin düzleşmesi ve boşlukların dolması (e) silikanın dönüşümü, çözünmesi ve çökmesi (f) silika aşınma parçacıklarının yuvarlanması, ufalanması ve bozunumu [11].	25
Şekil 4.1 : Kaplama işlemi için hazırlanmış Al 6082 altlıklar	27
Şekil 4.2 : Al, Al-12Si, SiC ve B ₄ C tozlarının hacimce % boyut dağılım grafikleri.	28
Şekil 4.3 : (a) Turbula® 3 eksenli kuru karıştırıcı (b) Retsch™ MM400 mekanik alaşımlama cihazı.	29
Şekil 4.4 : Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Sistemi, İTÜ (a) kompresör (b) basınçlı hava tüpü (c) kurutucu (d) RUSONIC™ marka SDGP cihazı (e) kaplama odası (f) püskürtme tabancası (g) nozül (h) altlık.	30
Şekil 4.5 : (a) Leica™ marka optik mikroskop (b) Hitachi™ marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu.	31
Şekil 4.6 : SHIMADZU™ marka mikro Vickers sertlik cihazı.	31
Şekil 4.7 : TRIBOTECH™ marka salınımlı aşınma cihazı.	32
Şekil 4.8 : DEKTAK 6M İğneli Yüzey Profil Cihazı.	32
Şekil 4.9 : Aşınma izi derinliği, genişliği ve alanının şematik olarak gösterimi (A: Aşınma izi alanı, G: Aşınma izi genişliği, D: Aşınma izi derinliği).	33
Şekil 5.1 : (a) %60 Al-12Si + %20 Al matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (b) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (c) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama (d) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı (e) %80 Al-12Si matris, %40 B ₄ C takviyeli, kuru karıştırıcı.	36
Şekil 5.2 : (a) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama, 500x (b) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı, 500x (c)	

%80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı, 1500x (d) %80 Al-12Si matris, %40 B ₄ C takviyeli, kuru karıştırıcı, 1500x.	37
Şekil 5.3 : (a) %60 Al-12Si + %20 Al matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (b) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (c) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama (d) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı (e) %80 Al-12Si matris, %40 B ₄ C takviyeli, kuru karıştırıcı.	38
Şekil 5.4 : %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, 100x (a) kuru karıştırma (b) mekanik alaşımlama.	40
Şekil 5.5 : 100g ve 200 g ile ölçülen mikro Vickers sertlik değerlerinin kaplama kompozisyonuna göre gösterimi.	41
Şekil 5.6 : %60 Al-12Si, %40 SiC ve %40 B ₄ C takviyeli kompozit kaplamalar için farklı yüklerdeki mikro HV sertlik değerlerinin standart sapmaları ile gösterimi.	42
Şekil 5.7 : 6082 altlığın 1, 2, 3, 4 ve 5 N yükler altında, kuru-sulu ortam aşınma profilleri.	43
Şekil 5.8 : %60 Al-12Si, %40 SiC 1-5 N yükler için kuru-sulu ortam aşınma profilleri.	44
Şekil 5.9 : Altlık ve %40 SiC kaplama için kuru-sulu ortam, yük-aşınma alanı eğrileri.	45
Şekil 5.10 : Al 6082 altlık için; 1, 2, 3 ve 4 N yük altında, kuru ve sulu ortamda zaman-sürtünme katsayısı grafikleri.	46
Şekil 5.11 : %40 SiC takviyeli kaplama için; 1, 2, 3, 4 ve 5 N yük altında, kuru ve sulu ortamda zaman-sürtünme katsayısı grafikleri.	46
Şekil 5.12 : Altlık ve %40 SiC takviyeli kaplama için farklı yüklerde ölçülen kuru ve sulu ortam, kararlı sürtünme katsayısı değerleri.	47
Şekil 5.13 : Altlık ve kaplamanın sulu ortamda, %40 SiC takviyeli kaplamanın kuru ve sulu ortamdaki kararlı sürtünme katsayılarının kıyaslanması.	48
Şekil 5.14 : Altlık ve %40 SiC takviyeli kaplamanın kuru-sulu ortamda 1, 2, 3, 4 ve 5 N'daki aşınma deneylerinde kullanılan Al ₂ O ₃ toparların aşınma izleri. .	49
Şekil 5.15 : Al 6082 altlık üzerine, 1-5 N arası yüklerin kuru ve sulu ortamda uygulanması ile oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 500x büyütmedeki tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.	50
Şekil 5.16 : %40 SiC takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 2500x büyütmedeki Tarama Elektron Mikroskobu görüntüleri.	52
Şekil A.1 : Al 6082 altlık üzerine, 1-5 N arası yüklerin kuru ve sulu ortamda uygulanması ile oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 200x büyütmedeki tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.	62
Şekil A.2 : %40 SiC takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 1200x büyütmedeki Tarama Elektron Mikroskobu görüntüleri.	63

Şekil A.3 : %40 SiC takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 4000x büyütmedeki Tarama Elektron Mikroskobu görüntüleri..... 65

Al-12Si MATRİSLİ SERAMİK PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme (SDGP) teknolojisi bir hava akımı içinde, ses hızından daha yüksek hızlarda iki fazlı (gaz + katı parçacıklar) akış çalışmalarının modellenmesi sırasında ortaya çıkmıştır. İlk defa; 1980'li yılların ortalarında Novosibirsk'te bulunan Rus Bilimler Akademisi'nde, Prof. Dr. Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir. Temel olarak, mikro boyuttaki parçacıkların bir rüzgar tüneli içerisinde ses hızından daha yüksek hızlara ulaştırılarak altlık üzerine püskürtülmesi ve burada plastik deformasyona uğrayarak bir kaplama oluşturması prensibine dayanmaktadır.

Bu çalışmada, 6082 kalite Al alaşımı altlık üzerine, SDGP yöntemi ile metal matrisli kompozit kaplama yapılması hedeflenmiştir. Besleme tozu 5 bar basınçta, kurutulmuş hava taşıyıcı gazı ile portatif tip bir SDGP cihazı ile püskürtülmüştür. Matris malzemesi olarak Al ve Al-12Si tozları, takviye malzemesi olarak SiC ve B₄C seramik tozları kullanılmıştır.

- İdeal matrisi belirlemek amacıyla; %20 SiC takviye oranı için; Al / Al-12Si oranında değişim yapılarak kaplamalar yapılmıştır.
- Mekanik alaşımlamanın yapıya etkisini görmek amacıyla; aynı oranlardaki tozlar kuru karıştırıcı ve mekanik alaşımlama işlemlerinden sonra kaplanmıştır.
- Takviye oranının yapıya etkisini görmek amacıyla; aynı matris malzemesinde %20 ve %40 takviye oranları denenmiştir.
- Aynı matris ve takviye oranlarında, takviye malzemesi türünün yapıya etkisini görmek amacıyla; %40 SiC ve %40 B₄C takviyeli kompozit kaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Kaplamalar; mikroyapı incelemeleri ve sertlik ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Ayrıca, %40 SiC takviyeli kompozit kaplamalar için kuru ve sulu ortam aşınma deneyleri ile SiC'ün sulu ortamdaki yağlayıcı etkisi incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda söz konusu kompozit kaplamalar Al 6082 altlık üzerine uyumlu bir ara yüzey ile bağlanarak kaplanmıştır. Takviye parçacıklar, kaplama yapısında boşluk oluşturmayacak şekilde homojen olarak dağılmıştır. Takviye malzemesi oranı arttıkça sertlik artmakta ayrıca, SiC yerine B₄C kullanılması sertliği bir miktar daha fazla artırmaktadır. SiC takviyeli kompozit kaplama su ile aşındırıldığında yağlayıcı etki göstermekte ve bu etki, aşınma alanını ve sürtünme katsayısını düşürmektedir.

PRODUCTION and CHARACTERIZATION of Al-12Si MATRIX CERAMIC PARTICULATE REINFORCED COMPOSITE COATINGS with COLD SPRAY PROCESS

SUMMARY

The Cold Spray (Cold Gas Dynamic Spray, CGDS) process was originally discovered while studying models subjected to a supersonic two-phase flow (gas + solid particle) in a wind tunnel. First developed in the mid-1980s at the Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences in Novosibirsk by Dr. Anatolii Papyrin and his colleagues. Main principle of the process is accelerate the micro-size particles to the ultrasonic values in a wind tunnel and spraying it to a substrate to form a coating by plastic deformation of particles.

The aim of this research is to form a metal matrix coating on Aluminum 6082 type substrate. Feeding powder was sprayed with a manual CGDS equipment in 5 bar pressure via dried air gas. Al and Al-12Si particles were used as the matrix powder while SiC and B₄C particles were used as the reinforcement powder.

- In order to determine the best matrix composition; coatings were done by changing the Al / Al-12Si ratio in the feeding powder.
- In order to determine the effect of mechanical alloying on structure of the coatings; same blends were prepared with mechanical alloying and shaker mixing.
- In order to determine the effect of reinforcement amount on structure of the coatings; matrix blended with 20% and 40% reinforcement powder.
- In order to determine the effect of reinforcement powder type on structure of the coating; SiC and B₄C reinforced blends were sprayed on the substrate.

Characterizations of the coatings were conducted by applying microscopic examinations and hardness measurements. Additionally, dry sliding and water lubrication wear tests were performed to see the self-lubrication capability of 40% SiC reinforced coating.

As a consequence of this research, mentioned composite coatings were successfully coated on Al 6082 substrate with a compatible interface. Reinforcement particles were dispersed homogenously without any porosity in the coating structure. With the rising level of reinforcement rate in the blend, hardness was also raised. Meanwhile using B₄C instead of SiC as the reinforcement was concluded with a higher hardness value. SiC reinforced composite coating shown a lubrication effect in water wear tests and this lubrication effect decreased the wear rate and the friction coefficient.

1 GİRİŞ

Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme (SDGP) yöntemi temelde, yüksek basınçlı sıkıştırılmış gaz içinde depolanan enerjinin, ince taneli toz partiküllerinin (5-100 μm) yüksek hızlarda (500-1500 m/s) püskürtülmesi için kullanılmasıdır. Sıkıştırılan gaz, kurutucu üniteden geçtikten sonra soğuk gaz dinamik püskürtme cihazının tabancasına iletilir ve bu tabancanın ucunda bulunan özel tasarlanmış (başlangıçta daralan çıkış noktasına doğru genişleyen) nozülde yüksek hızlarda dışarı çıkar. Diğer yandan cihazın yüksek basınçlı toz besleme ünitesinden tabancaya iletilen tozlar, bu yüksek hızdaki hava akışı ile birleşerek bir kaplama jeti oluşturur. Bu akım içerisinde bulunan toz partikülleri kaplanacak yüzeye süpersonik hızlarda çarparak yüzeyde plastik deformasyona uğrar ve fiziksel olarak malzemeye bağlanırlar.

Bu yöntem oda sıcaklığında gerçekleştirildiğinden yöntemin adı soğuk dinamik gaz püskürtme olarak nitelendirilmiştir. Her ne kadar sıkıştırılmış gaz, yüksek basınç etkisiyle, nozülde çıkarken yaklaşık 100°C civarında bir sıcaklığa ulaşsa da bu sıcaklıkta toz partiküllerinin ve kaplanacak malzemenin kimyasal bozunumundan söz edilemez. Dolayısıyla kaplama sırasında herhangi bir difüzyon olayı gerçekleşmez, yani üretim sürecinde oluşan kaplamaların yapısında kimyasal bir bozunumdan söz etmek mümkün değildir. Böylelikle kaplama sırasında herhangi bir faz değişimi, kalıntı gerilme oluşumu, kaplanacak ve kaplanan malzemelerin termal genleşme farklılıklarından dolayı özellikle ara yüzeyde herhangi bir iç gerilme oluşumu, oksitlenme, buharlaşma, ergime, kristalleşme, bağların kopması, istenmeyen gazların açığa çıkması, soğuma hızının kontrol edilememesinden kaynaklanan büzülme gibi sorunlardan bahsedilemez.

Bu çalışmanın amacı; Al-12Si veya Al-12Si + Al matrisli, SiC veya B₄C partikül takviyeli kompozit kaplamaları, yeni nesil soğuk dinamik gaz püskürtme (SDGP) teknolojisi ile üretmektir. Bu kapsamda farklı oranlarda toz karışımına sahip Al-12Si ve Al-12Si + Al matrisli ve bu matrislere karıştırılan yine farklı oranlarda SiC ve B₄C partiküllerden oluşan, toz karışımları 6082 kalite Al alaşımı üzerine SDGP yöntemi ile 5 bar basınçlı kurutulmuş hava kullanılarak kaplanmıştır. Ardından

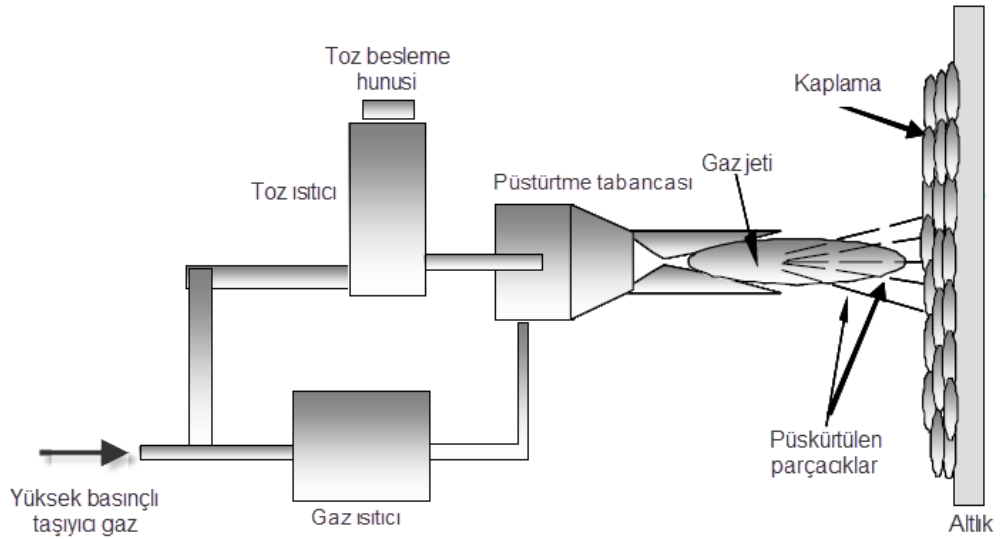
kaplamaların karakterizasyonu için mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve aşınma testleri yapılmıştır. Matrislerin ve farklı oranlardaki farklı takviye malzemelerinin kaplama yapısına ve özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

2 SOĞUK DİNAMİK GAZ PÜSKÜRTME YÖNTEMİ (SDGP)

2.1 SDGP Tanımı ve Tarihçesi

Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme teknolojisi bir hava akımı içinde, ses hızından daha yüksek hızlarda iki fazlı (gaz + katı parçacıklar) akış çalışmalarının modellenmesi sırasında ortaya çıkmıştır. Yapılan birçok araştırma projesi dışında havacılık, uzay bilim, kaplama teknolojileri ve yeni malzemelerin geliştirilmesi konusundaki uygulamalı araştırmalar iki fazlı akış ve bunun altlık ile etkileşimi konusunun daha hızlı olarak çözülmesini tetiklemiştir [1].

SDGP yöntemi ile yüksek yoğunluklu kaplamalar oluşturmak amacıyla mikron boyutundaki besleme tozlarını, malzemeye göre değişim gösteren bir kritik hıza çıkarılarak, altlık üzerinde bir kaplama oluşturulmaktadır [2]. Bu teknik, ergimemiş parçacıkların püskürtülme ile kazandıkları kinetik enerji kullanılarak, çarpmanın etkisi ile çok yüksek bölgesel basınçlar altında parçacıkların plastik deformasyon ile birbirlerine yapışarak kaplama oluşturulması temeline dayanmaktadır.



Şekil 2.1 : SDGP yönteminin genel şematik gösterimi [3].

Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme teknolojisi ilk defa; 1980'li yılların ortalarında Novosibirsk'te bulunan Rus Bilimler Akademisi'nin, Teorik ve Uygulamalı Mekanik Bilimler Enstitüsü'nde, Profesör Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından

geliştirilmiştir. Söz konusu bilim adamları bu yöntemle farklı altlıklar üzerine metal, metal alaşımları ve kompozitten oluşan birbirinden farklı kaplamaları oluşturabilmiş ve soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinin birçok alanda uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır. Bu teknolojiye ait ilk Amerika patenti 1994'te, ilk Avrupa patenti 1995'te alınmıştır [1].

1980'li yıllarda SDGP kaplama mekanizması hakkında tartışmalar ortaya çıkmıştır. Bir grup bilim adamı, kaplamanın oluşabilmesi için yüksek hızlı kaplama jeti içerisindeki partiküllerin yüzeye çarparken ergime noktası sıcaklığında ya da bu sıcaklığa yakın olması gerektiğini savunmuşlardır. Diğer bir grup bilim adamı ise herhangi bir fiziksel değişim olmadığını iddia etmiştir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar da gösteriyor ki; üretilen kaplamalarda partiküllerin sıcaklığı kaplama işlemi sırasında kendi ergime noktalarının altındadır. Dolayısıyla fiziksel bir değişim söz konusu değildir [4].

Son yıllarda; Rusya'da Rus Bilimler Akademisi Teorik ve Uygulamalı Mekanik Bilimler Enstitüsü, Amerika Birleşik Devletleri'nde Sandia Ulusal Laboratuvarı, Pennsylvania Devlet Üniversitesi, ASB, Ford Motor, General Electric, General Motors, Pratt & Whitney, Dartmouth Üniversitesi, Rutgers Üniversitesi, Amerikan Ordu Araştırma Laboratuvarı, Delphi Araştırma Laboratuvarında; Almanya'da Federal Silahlı Kuvvetler Üniversitesi, Avrupa Hava Savunma Ve Uzay Araştırma Kurumu, Linde AG Soğuk Gaz Teknolojileri, Siemens; İngiltere'de Cambridge, Nottingham, Liverpool Üniversiteleri'nde, Yasaki Avrupa ve BOC Gaz şirketlerinde, Japonya'da Shinshu Üniversitesi ve Plasma Gigen şirketinde; Kanada'da Windsor Üniversitesi ve Ulusal Araştırma Kurulu'nda; Avustralya'da CSIRO; Brezilya'da Mahle Metal, Güney Kore, Çin ve Hindistan gibi daha birçok ülkede soğuk dinamik gaz püskürtme tekniği prosesi üzerinde çalışılmaktadır [1].

2.2 SDGP Yöntemleri, Avantaj ve Dezavantajları

SDGP işlemi portatif ve istasyon tipi olmak üzere iki çeşit kurulum ile gerçekleştirilebilir. Portatif cihazlarda püskürtme tabancası operatör tarafından el ile kullanılır. Bu sistemin en büyük dezavantajı altlık ile tabanca arasındaki mesafenin ve tabancanın yüzeyde gezdirilme hızının operatörün kontrolünde olmasıdır. Bu ise, yapılan kaplamaların sabit şartlar altında gerçekleştirilmesini güçleştirmektedir. İstasyon tipi kurulumlarda tabanca özel tasarım bir robot kola bağlıdır ve bu şekilde

bir problem ile karşılaşılmamaktadır. Diğer yandan portatif cihazlarla ulaşılması zor yerlerdeki parçaların kaplama işlemi yapılabilir. Şekil 2.2’de bu iki ayrı tip cihaz kurulumu gösterilmektedir.



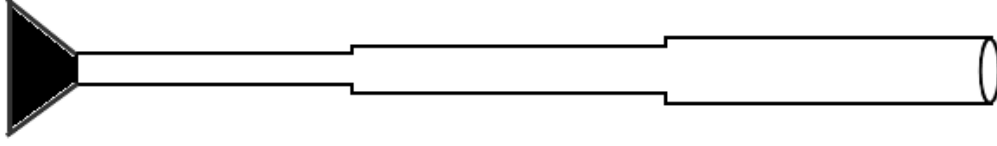
Şekil 2.2 : SDGP tipleri (a) Portatif tip (b) İstasyon tipi [6].

Şekil 2.3’ te portatif tip cihazın önemli parçaları görülmektedir. Toz besleme ünitesi tabancaya toz tükenene kadar toz beslemesi yapan kısımdır. Tabanca ise, toz ve gazın birleştiği üzerinde bir tetik bulunan ve bu tetiğe basıldığında söz konusu karışımı nozüle ileten kısımdır.



Şekil 2.3 : Portatif tip cihazın önemli parçaları.

Nozül tabancanın uç kısmına monte edilen ve tozların cihazdan çıktığı son noktadır. Nozülün iç çeperi Şekil 2.4’te gösterildiği gibi basamaklı olarak genişleyen özel bir tasarıma sahiptir. Bu özel tasarım sayesinde yüksek basıncın etkisiyle gelen toz, nozül içerisinde supersonik hızlara ulaşır.



Şekil 2.4 : Nozül tasarımının şematik görünümü.

Portatif ve istasyon tipi sistemler arasında prensip olarak gaz basıncı ve gaz/toz akış hızı gibi farklar göze çarpmaktadır. Bu farklar Çizelge 2.1’de özetlenmiştir. Portatif bir sistem hazır sıkıştırılmış havayı vakumlayarak kullanırken istasyon tipi sistemler yüksek basınçlı gazları ve bu gazları oluşturmak için kendisine ait yüksek basınç kompresörünü kullanır. Portatif sistemlerde gaz olarak hava kullanılırken istasyon tipi cihazlarda havanın yanında helyum gibi molekül ağırlıkları oldukça düşük gazlar kullanılabilir. Yüksek hızların gerekli olduğu durumlarda helyum kullanılması büyük yarar sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda azot ve hava ile yapılan çalışmalara nazaran helyumun iki kat daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Bu da partiküllerin iki kat daha fazla hızlanması anlamına gelir ki parçacığın kritik hızı SDGP tekniğinde çok önemlidir. Belirli bir kritik hıza ulaşamayan partiküllerin altlık malzeme yüzeyine bağlanması beklenemez [4].

Çizelge 2.1 : Portatif tip ve istasyon tip cihazlar arası parametre farkları [4].

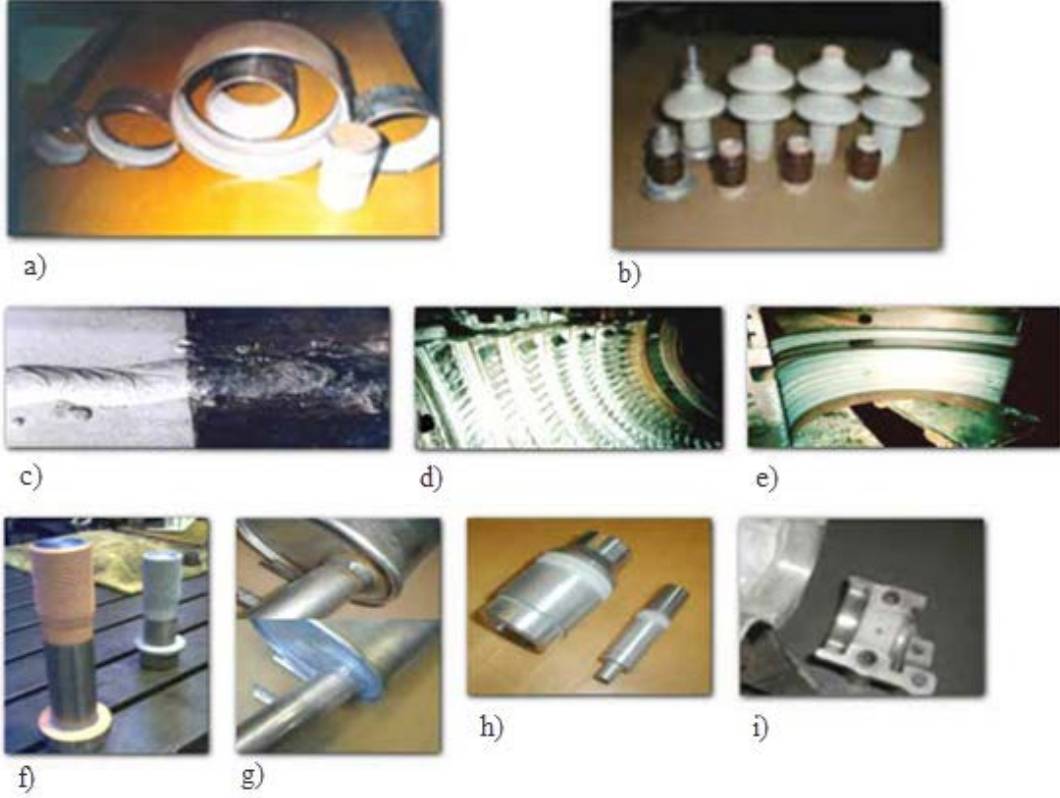
İşlem Parametreleri	İstasyon Tipi Sistemlerde	Portatif Tip Sistemlerde
Kullanılan Gaz	N ₂ , He, Hava	Hava
Gaz Basıncı (bar)	20-45	6-8
Gaz Ön Isıtma (°C)	20-800	20-550
Gaz Akış Hızı (m ³ /sa)	50-150	15-30
Toz Akış Hızı (g/s)	0.1-1.0	0.06-0.1
Parçacık tane boyutu (µm)	5-100	10-50

SDGP yönteminin diğer klasik kaplama yöntemlerinden en belirli karakteristik farkı düşük sıcaklık ve yüksek parçacık hız parametrelerine sahip oluşudur. Termal spreyden en temel farkı kaplamanın; işlem sırasında katı hali bozulmayan küçük tane boyutlu partiküllerden oluşması ve difüzyondan yoksun olarak gerçekleştirilmesidir [7-8]. Kaplamanın düşük sıcaklıklarda üretilebilmesi, kaplananan ve kaplanacak

malzemenin yüksek sıcaklığın neden olduğu zararlı etkilerden korunması anlamına gelir ve birçok avantaj elde edilir. Bunlar [8];

- İstenmeyen faz ve oksidasyon oluşumunun olmaması.
- Kaplanan ve kaplanacak malzemelerin işlem sonrası tüm özelliklerinin aynı kalması.
- Düşük kalıntı gerilme değeri.
- Kaplama boyunca elektrik ve ısıya kolaylıkla iletilebilmesi.
- Yüksek sertlik, yüksek kaplama yoğunluğu ve soğuk işlem görmüş bir yapı elde edilmesi.
- Isıya duyarlı malzemelerin kaplanabilmesi.
- 5-10 µm tane boyutundan daha küçük boyutlu toz partiküllerin püskürtülebilmesi.
- Altlık ve kaplanacak malzemelerin farklı malzeme grubunda olması halinde bile rahatlıkla çalışılabilmesi.
- Kaplanacak olan malzemenin yüzey hazırlama işlemlerinin minimize edilmesi.
- Yüksek hızda toz besleme ve buna bağlı olarak verimlilik artışı.
- Yüksek hızda ve yüksek verimde kaplama yapabilmek.
- Kaplama sırasında saçılan partiküllerin geri dönüşümünün yapılabilmesi.
- Kaplama sırasında altlık malzemede çok düşük sıcaklık artışı görülmesi.
- Yüksek sıcaklığa sahip gaz, radyasyon, patlayıcı gaz gibi tehlikeli unsurların işlem sırasında bulunmayışı nedeniyle uygulamanın güvenli oluşu.

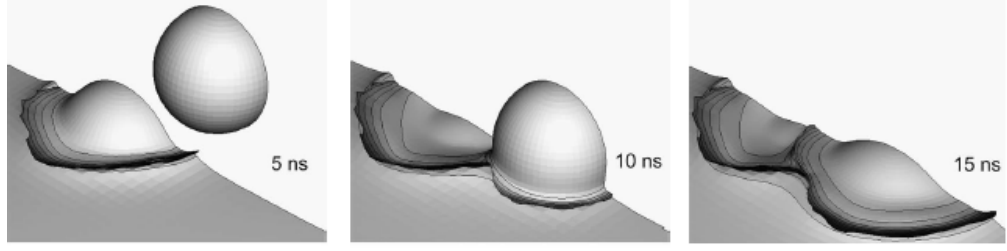
Bu avantajlar, bu yöntemin birçok farklı endüstri kollarında geniş ölçekte değişik parçaların üretiminde ve onarımında kullanılmasını sağlamaktadır. Türbin kanatları, pistonlar, silindir ve valfler, piston segmanları, rulman parçaları, pompa ekipmanları, bağlantı elemanları, miller gibi parçalar örnek olarak gösterilebilir. Birçok farklı kaplama; mukavemet arttırmak, sertlik, aşınma ve korozyon direnci sağlamak, elektro-manyetik ve ısı iletkenliği gibi istenen özelliklere göre oluşturulabilir. Bu faktörlerin en az birini sağlayan farklı tozlar karıştırılarak veya alaşımlandırılarak bu özelliklerin istenilen niteliklerde elde edilmesi mümkündür [4]. Şekil 2.5'te uygulama alanlarına örnek fotoğraflar görülmektedir [9].



Şekil 2.5 : SDGP uygulama yerleri (a) erozyona karşı boru iç ve dış çeper kaplama (b) elektrik iletkenliği olan kaplamalar (c) kaynak dikişi koruma amaçlı kaplama (d) elektrik motorlarında dönmeyen kısımlara yapılan kaplamalar (e) aşınma bölgesi kaplamaları (f) boyut uyumsuzluğunu düzeltme amaçlı kaplama (g) otomotivde korozyon engelleme amaçlı kaplamalar (h) boru ağzı kapama amaçlı kaplamalar (i) yatak yuvalarının onarılması [9].

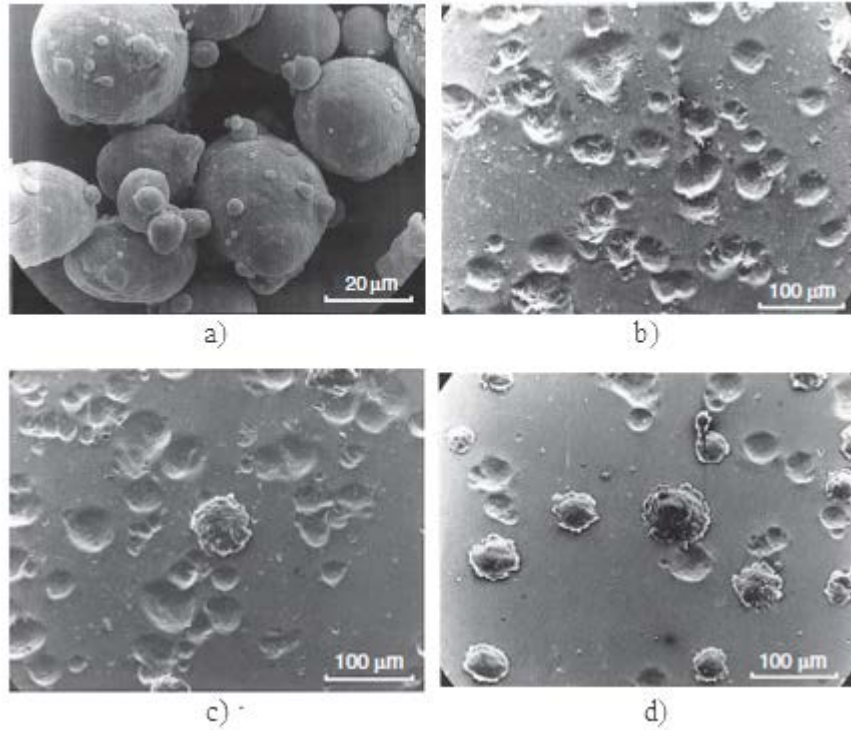
2.3 SDGP Kaplama Mekanizması ve Parametreleri

Şekil 2.6’da kritik hıza ulaşmış iki parçacığın altlık üzerine bağlanması simüle edilmiştir. SDGP yönteminde püskürtülen parçacığın altlığa bağlanması birçok değişik faktöre bağlıdır. Bu faktörler; temas yüzey alanı, kraterin derinlik-genişliği gibi geometrik parametrelerle beraber plastik şekil değiştirme kabiliyeti, akma direnci, basınç ve sıcaklık gibi termo mekanik değişkenler şeklinde sıralanabilir. Bu parametreler partikül çarpma hızı ile direkt olarak ilişkilidir. Bu nedenle, kritik çarpma hızı yakınlarındaki bir hızda yüzeye çarpan bir parçacığın bu diğer değişkenler için de kritik değere ulaştığını kabul etmek gerekmektedir [10].



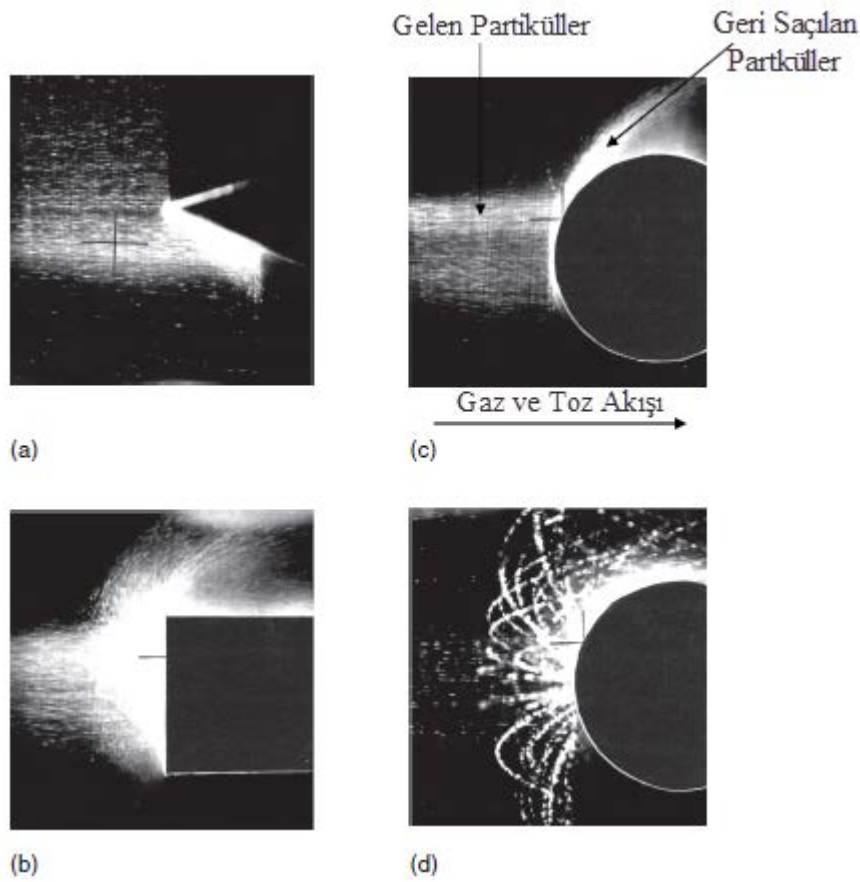
Şekil 2.6 : 600 m/s hıza sahip 5µm boyutlarında iki küresel taneciğin ardı ardına altlık üzerine çarpışının 5, 10 ve 15. sn'lerdeki hareketinin üç boyutlu simülasyon ile gösterimi [10].

Şekil 2.7'de farklı Al partiküllerinin ve farklı hızlarda Cu yüzeyine püskürtülen Al partiküllerinin yüzey etkileşimleri görülmektedir. Parçacık hızı düşük olduğu zaman partiküller yüzeye çarpıp geri dönerler ancak orada bağlanamazlar. Bu koşullarda yapılan işlem altlık malzeme yüzeyinin erozyonundan öteye gidemez (Şekil 2.7b). Fakat bu değer kritik parçacık hızına ulaştığı veya bu değeri aştığı zaman yüzeye bağlanma başlar ve böylelikle kaplama oluşur (Şekil 2.7c ve Şekil 2.7d). Birçok deneysel çalışmalarda da saptanmıştır ki; kritik partikül hızı değeri, partikül ve kaplanacak malzemenin cinsine, partikül sıcaklığı ve boyutuna, kaplanacak malzeme yüzeyinin durumuna göre değişmektedir [4].



Şekil 2.7 : (a) Al partikülleri (b) 730 m/s (c) 780 m/s (d) 850 m/s hızla Cu yüzeyine çarpan Al partiküllerinin etkisi [4].

Şekil 2.8’de püskürtülen partiküllerin hareket yörüngeleri görülmektedir. Kaplanacak malzemeye çarpıp geriye saçılan partiküller açıkça görülmektedir. Geri seken bazı partiküllerin geri dönüş açısı gelme açısıyla aynı veya yakın olduğu zamanlarda bu partiküller geri dönerken kendini yine arkadan gelen akış yoğunluğu içerisinde bulur ve tekrar geri dönerek kaplanacak malzemeye bir daha çarparlar. Bu bir döngü içerisinde devam ettikçe, geri dönen partiküllerin geri dönüş mesafeleri zamanla azalır, böylelikle kaplanacak malzeme yüzeyinde bir birikme oluşur. Gelen ve seken partiküller arasındaki yoğun etkileşimden konsantrasyonu giderek artan bir bölge oluşur [4].



Şekil 2.8 : Lazer saçılma metoduyla çekilen toz yörünge fotoğrafları. Silindir ve Küre gövde çapı yaklaşık 8mm (a) kama yarığı ve Al parçacıkları (b) silindir ve Al parçacıkları (c) küre ve Al parçacıkları (d) küre ve akrilik cam parçacıkları [1].

2.4 SDGP ile İlgili Örnek Çalışmalar

2.4.1 SDGP ile Al-12Si kaplama üretilmesi ve karakterizasyonu

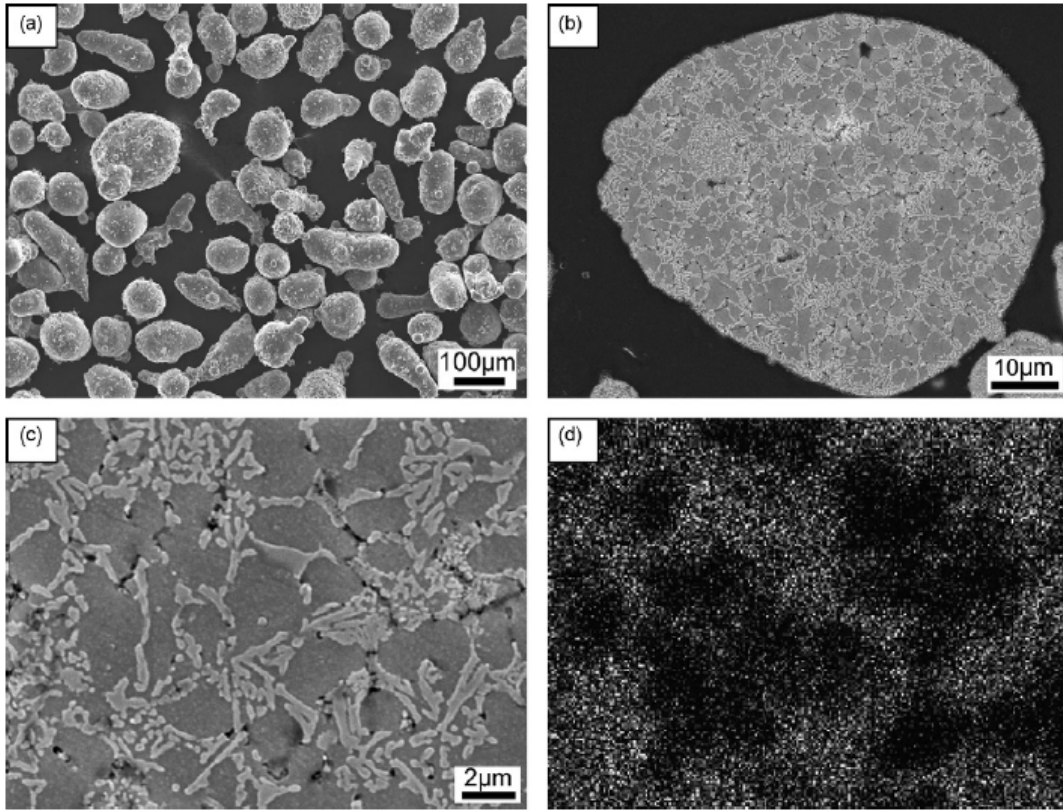
Bu çalışmada [12], Al-12 Si tozu SDGP yöntemi ile kaplanmış ve karakterize edilmiştir.

Kaplama işlemi sırasında uca doğru kademeli olarak genişliği artan ve çıkış ucu çapı 4,9 mm olan 170 mm'lik bir nozül kullanılmıştır. Hızlandırıcı olarak yüksek basınçlı hava ve toz taşıyıcı gaz olarak argon gazı kullanılmıştır. Hava basıncı 2,7 MPa ve sıcaklık 400-560 °C olarak ayarlanmıştır. Kaplama işlemi sırasında nozülün altlık yüzeyinden uzaklığı 30 mm olacak şekilde kullanılmıştır. Besleme tozu olarak Sulzer-Metco tarafından üretilen 45-90 µm parçacık boyutlarında Al-12Si tozu kullanılmıştır. Altlık olarak düşük karbonlu yumuşak çelik kullanılmış ve kaplama işlemi öncesi alümina ile kumlanmıştır [12].

Kaplamanın mikroyapısı; optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, EDS ve Cu K α radyasyonlu X-ışını difraksiyon analizi ile incelenmiştir. Daha iyi bir mikroyapı analizi için bazı parlatılan numuneler 100 ml H₂O + 3ml HF + 6ml HNO₃ çözeltisiyle dağlanmıştır. Mikro Vickers sertlik ölçümleri 50 gr. yük altında 15 sn. süre ile yapılmıştır [12].

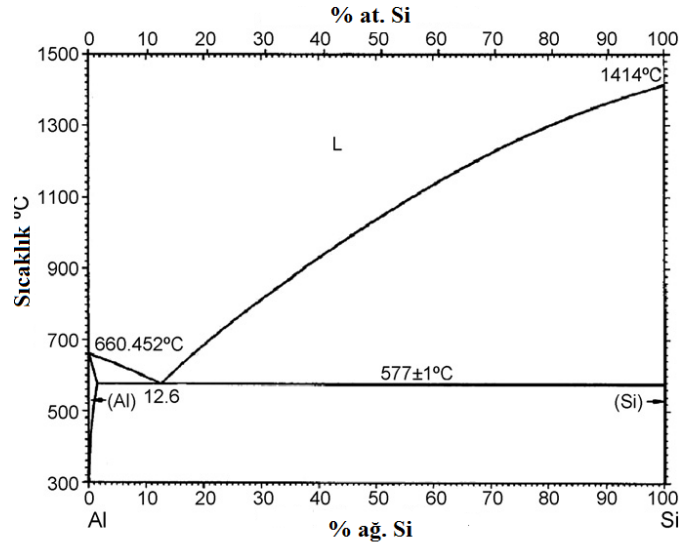
Kaplama işleminin özelliklerini daha iyi anlamak için, püskürtme koşullarındaki parçacıkların hızları ticari FLUENT yazılımı ile 2 boyutlu eksen simetrik bir model hazırlanarak hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler ile, bu simülasyon metodu ile yapılan hesapların deneysel veriler ile örtüştüğü tespit edilmiştir [12].

Al-12Si tozu küresel forma yakın bir morfolojide bulunmaktadır (Şekil 2.9a). Şekil 2.9b'de Al-12Si tozunun kesit görüntüsü verilmiştir. Yapıda α -Al dendritik yapısı içerisinde şekillenmiş Si fazı görülmektedir [12].



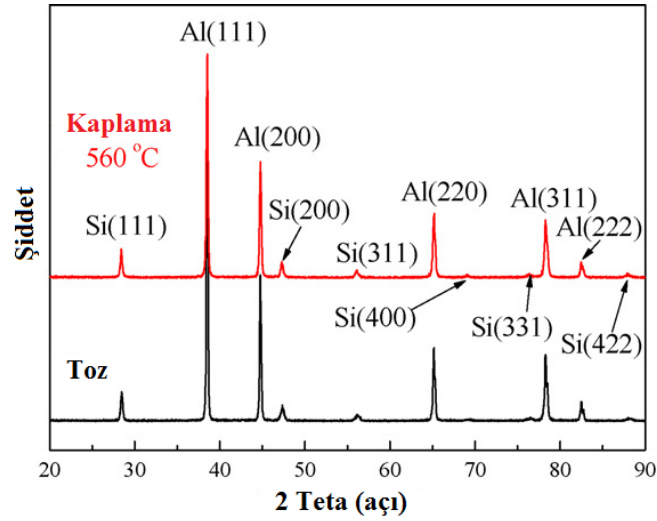
Şekil 2.9 : (a) Al-12Si toz morfolojisi (b) partikül kesit alanı (c) partikül kesitinin yüksek büyütme görüntüsü (d) Si elementinin EDS analizi [12].

Şekil 2.10’da verilen Al-Si faz diyagramına bakıldığında Al-12Si kompozisyonunun, %12,6 ötektik bileşimine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 2.10 : Al-Si faz diyagramı [12].

Şekil 2.11’de verilen EDS sonuçlarına göre Şekil 2.9’deki koyu gri faz alüminyumca zengin, açık gri faz silisyumca zengin bölgeleri göstermektedir. Ayrıca Şekil 2.11’de α -Al ve Si pikleri de görülmektedir [12].



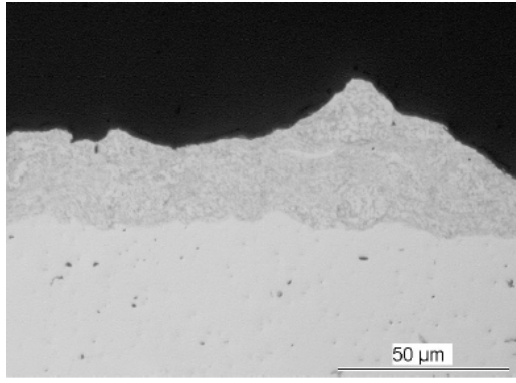
Şekil 2.11 : Kaplama öncesi ve sonrası Al-12Si X-ışını difraksiyon analizi [12].

Al-12Si, dendritik ötektoid mikro yapısından ve silisyumun düşük süneklik özelliğinden dolayı saf alüminyuma göre daha az sünekliğe fakat daha fazla mukavemete sahiptir. Al-12Si tozun mikro sertliği 64 ± 8 Hv_{0,05} olarak hesaplanmıştır [12].

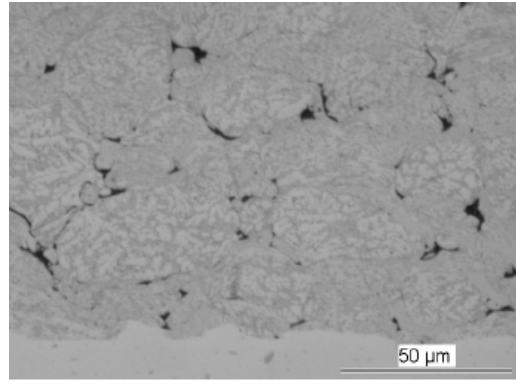
64 ± 8 Hv_{0,05} olan Al-12Si tozunun sertliği 560 °C’ de yapılan kaplama ile kıyaslandığında 99 ± 12 Hv_{0,05} gibi önemli bir artış göstermektedir. Her ne kadar deformasyon sertleşmesi etkisi kaplamanın sertliğinin artmasında rol oynayabilse de sertliğin artışıdaki asıl sebep Si partiküllerinin kaplama içerisinde yayılmasıdır [12].

XRD analizinden (Şekil 2.11) kaplamanın toz ile aynı kristal yapıya sahip olduğu görülmektedir. Buna ek olarak tozun oksijen içeriğinin % ağı. 0,016 kaplamanın ise % ağı. 0.036 olduğu hesaplanmıştır. Bu veriler kaplama sırasında hiçbir şekilde faz değişiminin, difüzyonun ve oksidasyonun gerçekleşmediğini göstermektedir [12].

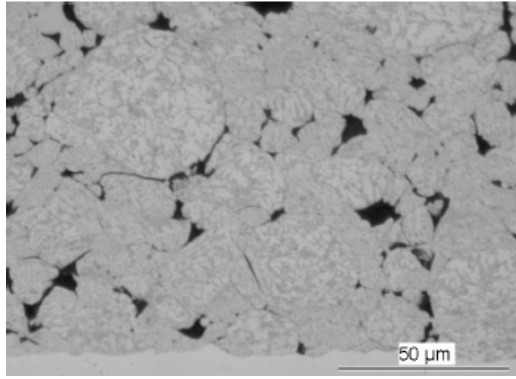
Yapılan literatür çalışmalarına göre [13-14], taşıyıcı gaz olarak azot kullanılarak, 250-410 °C sıcaklık aralığında, ince taneli (-45µm) Al-12Si tozu püskürtülerek kaplama elde edilebilmiştir. Şekil 2.12’de 250⁰C, 350⁰C ve 410⁰C sıcaklıkta gaz kullanılarak elde edilen kaplamaların tarama elektron mikroskobu görüntüleri ve gaz sıcaklığı ile porozitenin değişimi grafiği verilmiştir. Oluşturulan Al-12Si kaplamaların poröz yapıda olduğu ve artan gaz sıcaklığıyla kaplama porozitesinin arttığı gözlenmiştir. Örneğin 410 °C’ de yapılan kaplamanın porozitesi %7,3 civarındadır (Şekil 2.12d) [13].



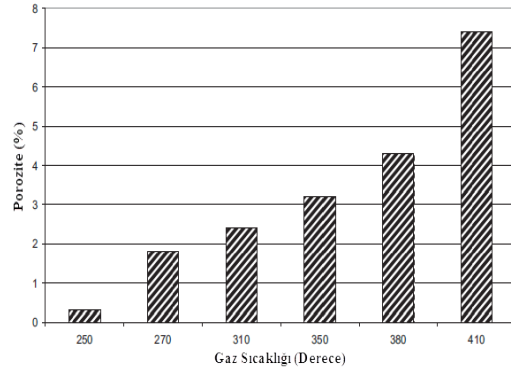
(a)



(b)



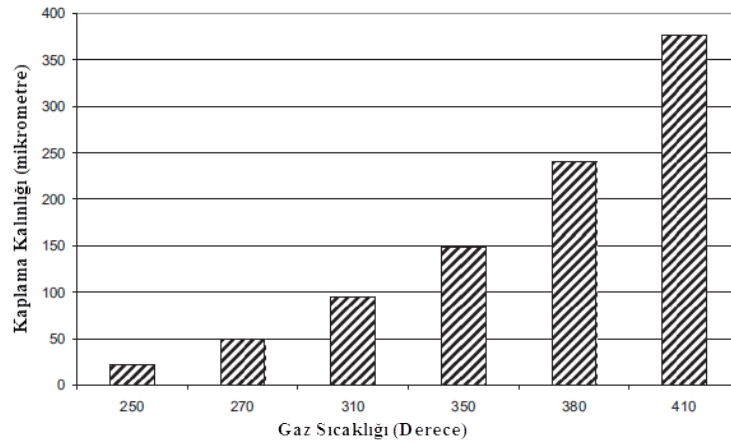
(c)



(d)

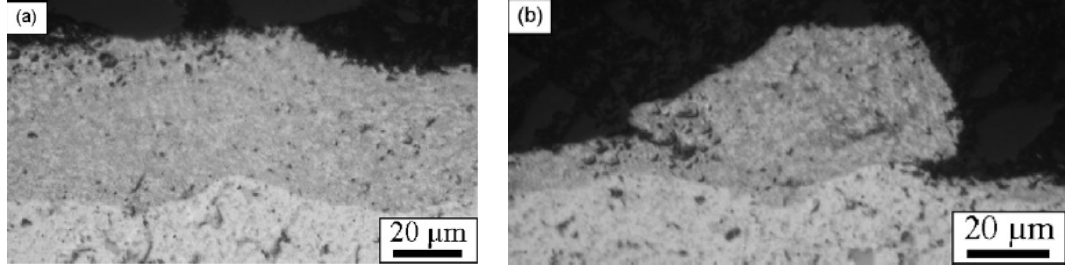
Şekil 2.12 : SDGP ile (a) 250⁰C (b) 350⁰C (c) 410⁰C sıcaklıkta gaz kullanılarak elde edilen kaplamaların tarama elektron mikroskobu görüntüleri (d) gaz sıcaklığı ile porozitenin değişimi [13].

Şekil 2.13'te kaplama kalınlığının yükselen gaz sıcaklığıyla artışı gösterilmiştir [13]. Bu artış yüksek sıcaklıklarda yüksek kaplama verimliliği anlamına gelmektedir. Bu nedenle yapılan deneyde göreceli olarak iri taneli parçacıklar kullanılmış ve gaz sıcaklığı 400 °C olarak belirlenmiştir [12].



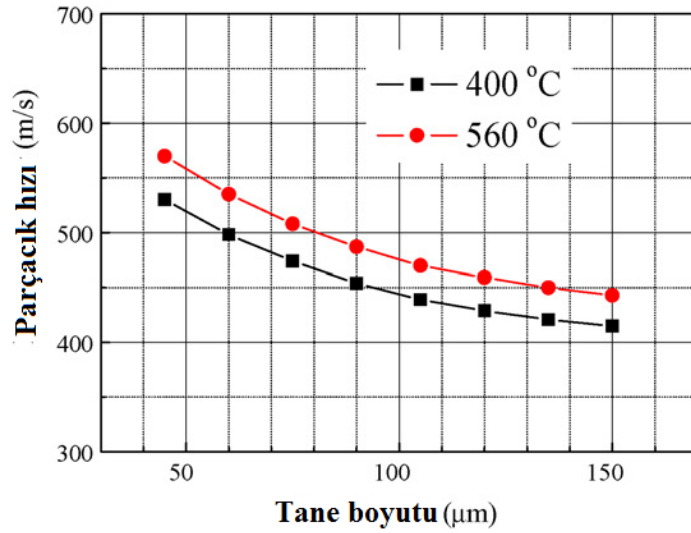
Şekil 2.13 : SDGP yöntemi ile üretilen Al-12Si kaplama kalınlığının gaz sıcaklığına göre değişimi [13].

Ancak kaplama işlemi sonrasında 400 °C gaz sıcaklığında çok ince bir kaplama oluşmuştur. (Şekil 2.14a). Bu, parçacıkların kaplanması için gereken kritik hıza çoğu parçacık için ulaşamadığı anlamına gelmektedir.



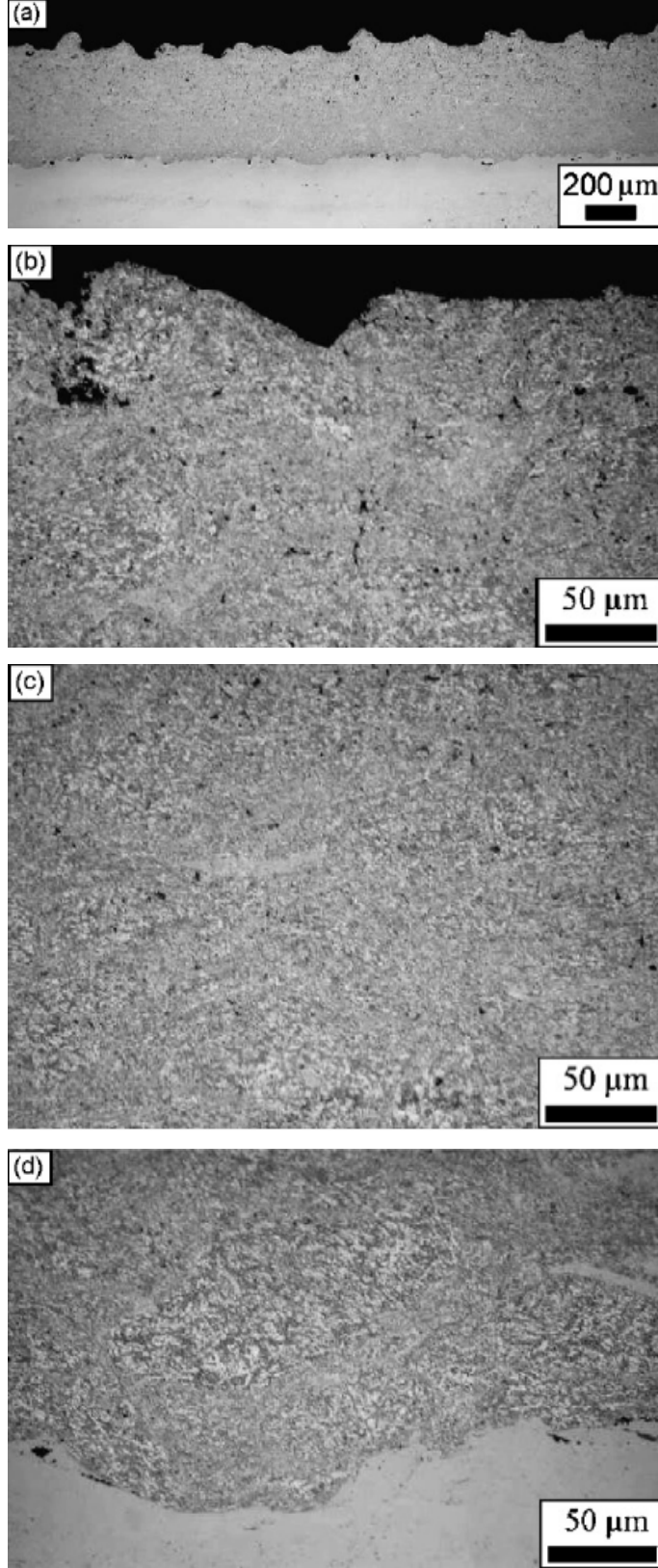
Şekil 2.14 : 400 °C’de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri [12].

25 µm ortalama parçacık boyuna sahip Al-12Si tozu için kritik hızın 580 m/s olması gerektiği rapor edilmiştir [15]. Ancak bu çalışmadan elde edilen kritik parçacık hızının ortalama parçacık boyutuna göre değişimi Şekil 2.15’te verilmiştir. Şekil 2.15’deki verilere göre 580 m/s hızında herhangi bir yapışma gözlenmemesi gerekmektedir. Ancak, Şekil 2.14b’de yaklaşık 55 µm çapında bir parçacığın altlık üzerine bağlandığı görülmektedir. Bu nedenle, büyük parçacıklar için kritik çarpma hızının 580 m/s’den düşük olması, hatta 500 m/s civarında olması bile yeterli olacaktır [12].



Şekil 2.15 : Tane boyutu - parçacık hızı grafiği [12].

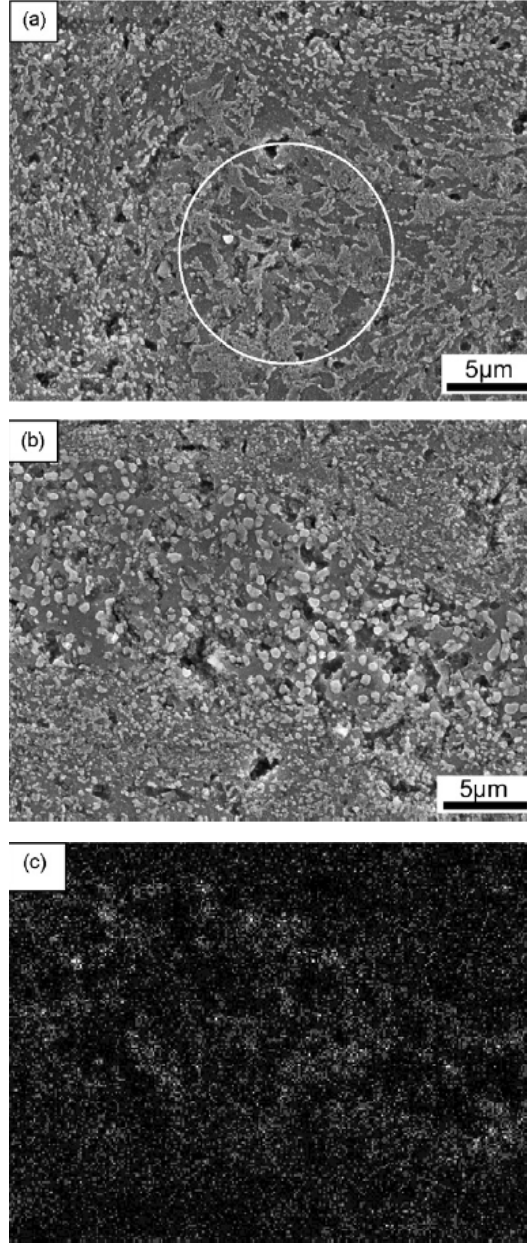
Faz diyagramına (Şekil 2.10) bakıldığında, Al-12Si’un ergime noktası 577 °C civarında olduğundan kaplama sıcaklığı olarak 560 °C seçilmiştir. Bu sıcaklıkta 400 °C’ye göre daha kalın bir kaplama elde edilmiştir. Şekil 2.16’dan da anlaşıyor ki arayüzey bağlanma kalitesi oldukça iyi ve yoğun bir kaplama elde edilmiştir.



Şekil 2.16 : 560 °C’ de yapılan Al-12Si kaplamanın optik mikroskop görüntüleri (a) genel görünüm (b-d) yüksek büyütme [12].

Şekil 2.17’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde koyu gri faz alfa-alüminyum fazı, açık gri faz silisyum fazını göstermektedir. Alfa alüminyum dendritik yapısı

içerisinde hapsolmuş bir silisyum fazı görülmektedir. Beyaz daire içerisindeki kısım (Şekil 2.17a) tozun orijinal morfolojisinden farklı bir görünümündedir. Bu kısımda yüksek sıcaklık etkisiyle yaşlanma olduğu belirlenmiştir. Yaşlanma olayı ile Si partikülleri alfa alüminyum fazı içerisinde çökelmiş ve dağılmışlardır. Çökelme sertleşmesi etkisiyle 560 °C’de sertlikte önemli ölçüde artış olmuştur.

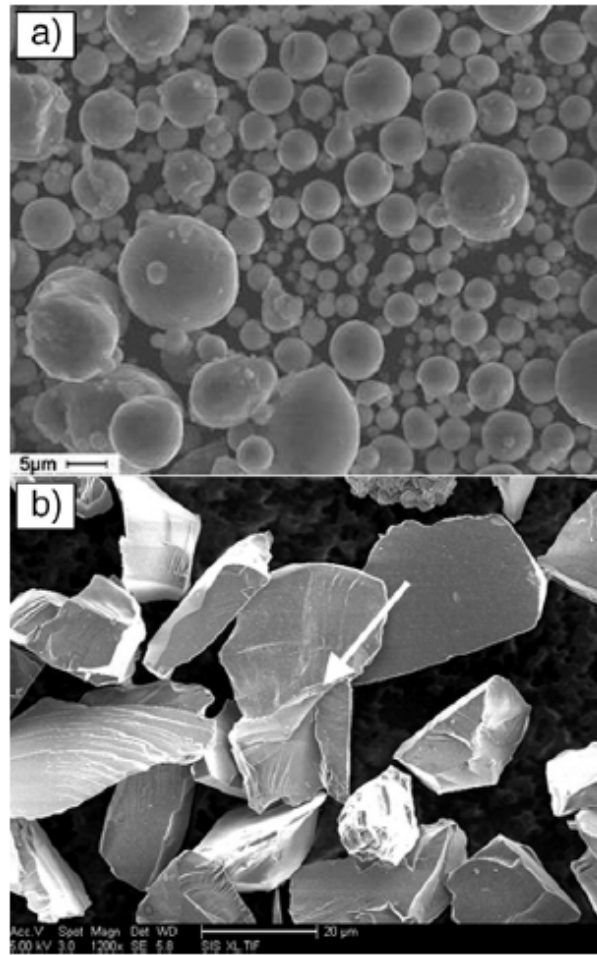


Şekil 2.17 : (a-b) kaplamanın kesitinden alınmış numunenin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (c) b’deki görüntünün EDS ile çekilmiş Si element haritası [12].

2.4.2 SDGP ile Al-12Si matrisli SiC partikül takviyeli kompozit üretimi

Bu çalışmada [16], SDGP tekniği ile Al-12Si matrisli SiC takviyeli kompozit kaplamalar üretilmiş ve ardından özellikleri araştırılmıştır.

Şekil 2.18a'da Al-12Si tozunun mikroyapısı görülmektedir. Atomizasyon yöntemi ile üretildikleri için oldukça düzgün küresel yapıya sahip bu toz partiküllerinin çapı 5-45 μm arasında değişmektedir. Şekil 2.18b'de ise parçacık boyutları 25-38 μm arasında değişen keskin köşeli SiC partikülleri görülmektedir. SiC partiküllerinin yoğunluğu (3.2 g/cm^3) Al-12Si yoğunluğundan (2.7 g/cm^3) nispeten fazla olmasına rağmen, keskin köşeli partiküllerin küresel partiküllere göre hızlanmaları daha kolay olduğu için, partiküller yaklaşık olarak aynı hızlarda altlığa çarpmaktadır.

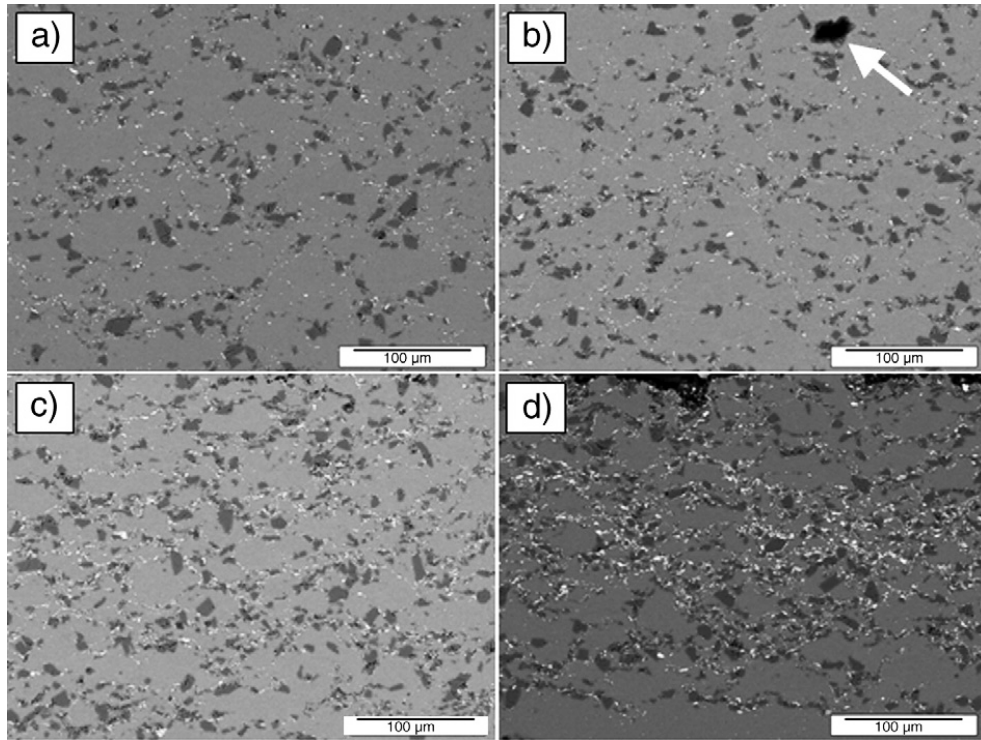


Şekil 2.18 : (a) Al-12Si morfolojisi (b) SiC morfolojisi [16].

Kaplama işlemi sırasında uca doğru kademeli olarak genişliği artan ve çıkış ucu çapı 7,3 mm olan bir nozül kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak Helyum kullanılmış ve gaz basıncı 1,7 MPa ve gaz sıcaklığı 360°C olarak ayarlanmıştır. Altlık malzemesi olarak 6061-T6 kullanılmış ve yüzeyine kaplama öncesi kumlama işlemi yapılmıştır.

Kumlama işlemi 45° açılarla, 400 kPa basınçta, ferro silikat parçacık kullanılarak yapılmıştır. Nozülün altlık malzemeden uzaklığı 10 mm olarak ayarlanmıştır. Kaplama işleminde boyutları 32 µm'nin altında olan SiC tozları hacimce %20, %30, %40 ve %60 kompozisyonlarında kullanılmıştır.

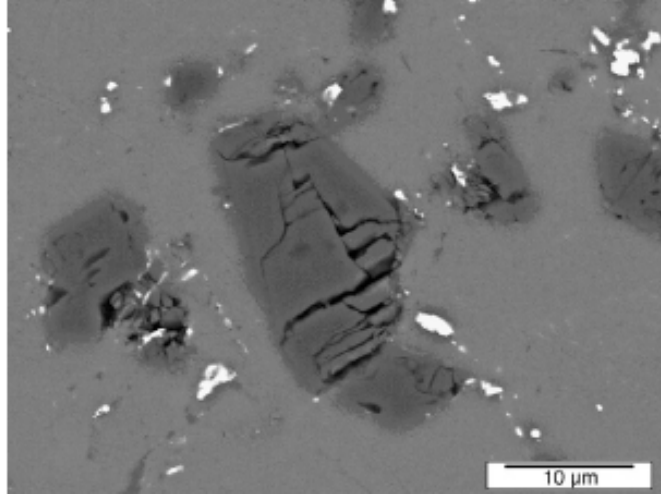
Şekil 2.19'da Al-12Si matrisli %20, %30, %40 ve %50 SiC partikül takviyeli kompozit kaplamaların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Şekillerdeki açık gri bölgeler Al-12Si adacıklarını, koyu gri bölgeler SiC taneciklerini, siyah bölgeler ise yapı içerisindeki boşlukları göstermektedir. Kompozit kaplamalarda mikroyapıdaki beyaz noktalar yüksek hızda püskürtme işleminden kaynaklanan nozülün aşınması sonucu kopan parçacıklardır (Şekil 2.19d). EDS sonuçlarında bu noktaların nozülün malzemesi olan paslanmaz çelik olduğu saptanmıştır. SiC miktarı arttıkça nozüldeki aşınmanın arttığı mikroyapı incelemeleri sonucu anlaşılmıştır. Beyaz ok ile gösterilen kısım ise SiC partikülünün numune hazırlama işlemi sırasında yapıdan ayrılması sonucu oluşan boşluktur (Şekil 2.19b).



Şekil 2.19 : Hacimce (a) %20 SiC (b) %30 SiC (c) %40 SiC (d) %50 SiC içeren Al-12Si/SiC kompozit kaplamaların kesit alanlarından alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [16].

Şekil 2.20'de, Şekil 2.19a'nın merkez bölgesinden alınmış bir yüksek büyütme taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Bazı SiC tanelerinde oluşan bu

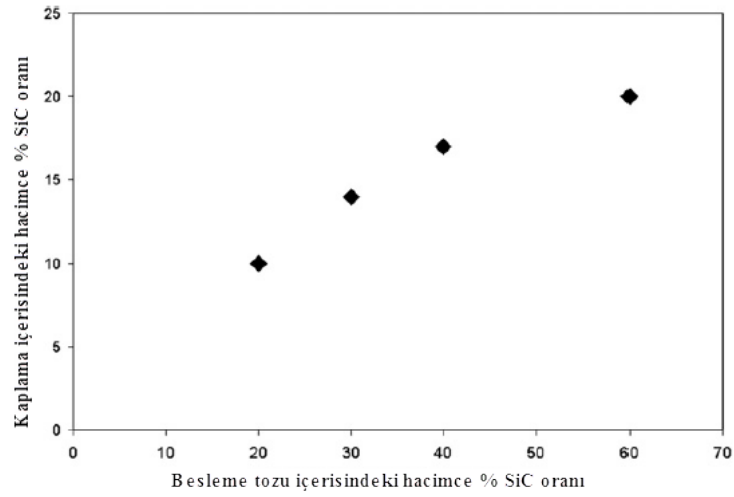
çatlamaların metalografik hazırlıklar sırasında oluştuğu düşünülerek, farklı kesme taşları ile kesitler alınmış ve farklı aşındırıcılar ile metalografik hazırlıklar yapılmıştır. Ancak yapılan çalışmalar sonrasında bu çatlamaların metalografik hazırlıklardan kaynaklanmadığı anlaşılmıştır. Bu çatlakların kaplama işlemi sırasında SiC tanelerinin birbiri ile çarpışması sonucu oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 2.20 : Kompozit kaplama yapısı içerisindeki çatlamış SiC tanecikleri [16].

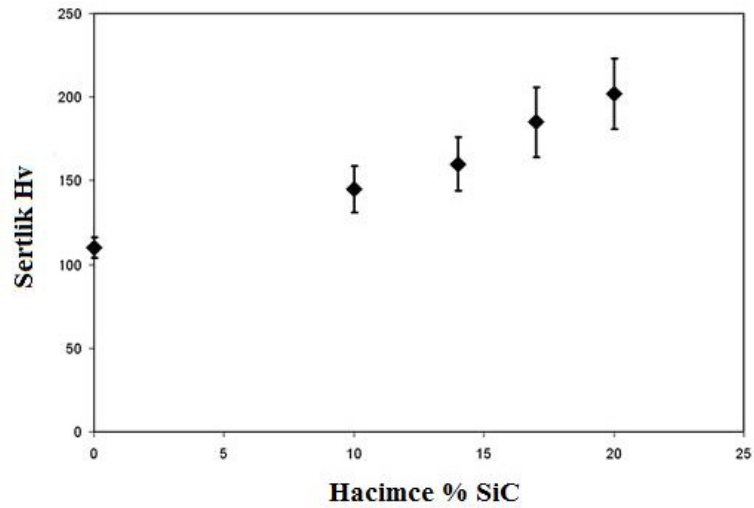
Yapılan karakterizasyon çalışmalarında porozitenin %1 in altında olduğu, arayüzeyin mükemmel plastik deformasyon kabiliyetinden dolayı kusursuz olduğu belirlenmiştir. SiC partiküllerin püskürtme öncesi fiziksel morfolojisi kaplama içerisinde de aynıdır.

Şekil 2.21’de besleme tozu içerisindeki ve SDGP işlemi sonucu kaplama yapısına geçen hacimce % SiC oranları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kaplama yapısı içerisinde hacimce % 10-20 arasında SiC oranı elde edebilmek için besleme tozu içerisinde hacimce % 20-60 arası SiC tozu kullanılmıştır. Bunun en büyük nedeni ise işlem sırasında altlık yüzeyine çarpan SiC parçacıklarının deforme olmaması ve büyük bir bölümünün yüzeye çarparak geri saçılmasıdır.



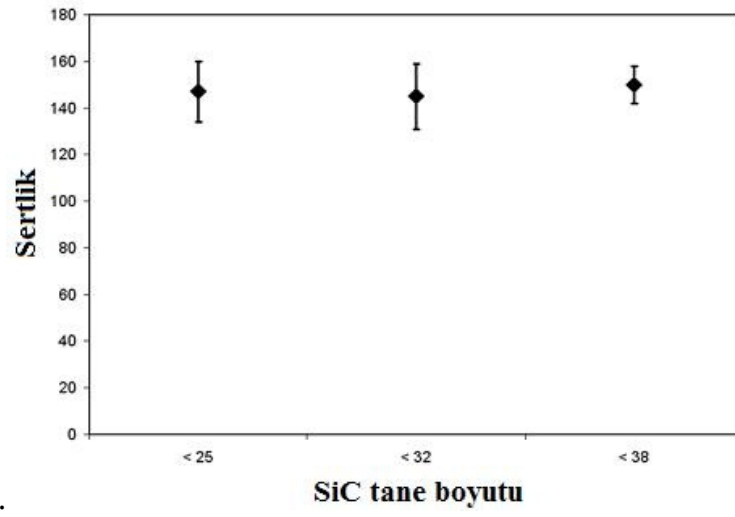
Şekil 2.21 : Besleme tozu ve kompozit kaplama içerisindeki hacimce % SiC oranları [16].

Al-12Si matris içerisindeki SiC karbür miktarı arttıkça sertliğin arttığı görülmektedir (Şekil 2.22). Sertlik değerleri %10 ve %20 SiC içeren kaplamalarda sırasıyla 145 ± 14 ve 205 ± 25 HV_{300g} değerlerindedir. SiC takviyesi olmadan yalnızca Al-12Si matrisin sertliği 110 ± 25 HV_{300g} değerindedir. Bu demek oluyor ki %10 SiC takviyesiyle %32, %20 SiC takviyesiyle %86'lık bir sertlik artışı olmaktadır.



Şekil 2.22 : Sertlik-Hacimce % SiC oranı grafiği [16].

Yapılan incelemelere göre sertliğin SiC tane boyutuyla çok fazla ilgili olmadığı görülmektedir (Şekil 2.23).



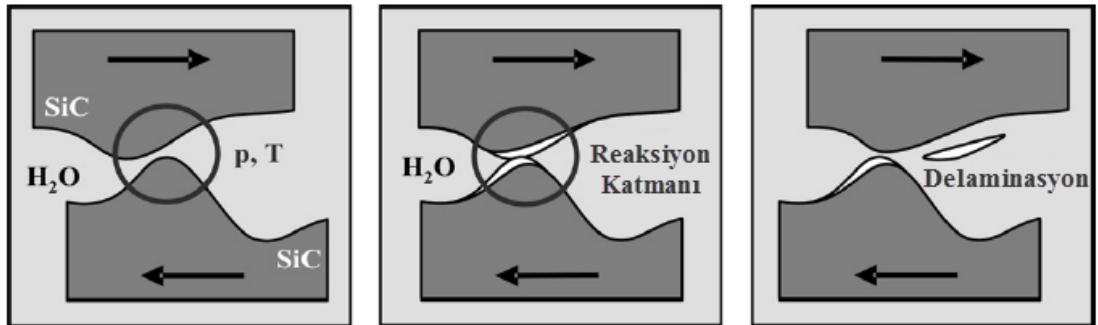
Şekil 2.23 : SiC tane boyutu- Sertlik grafiği [16].

3 SİNERLENMİŞ SiC'ÜN SULU ORTAM AŞINMA DAVRANIŞLARI

Sinterlenmiş SiC, uç seviyedeki ortamlar için yaygın olarak tercih edilen bir seramik çeşididir. Kimyasal olarak inert oluşu ve 900⁰C'ye kadar ki sıcaklıklarda, oksijen ortamında dahi oksidasyon oluşturmeyen kararlı yapısı tercih edilmesinin en büyük nedenleri arasındadır. SiC ayrıca, özellikle sulu ortamlarda gösterdiği yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı ile de bilinmektedir. Ancak çok kırılğan bir yapıya sahip olması kullanım alanlarını kısmen daraltmaktadır [11].

SiC, su yağlayıcı aşınma ortamında kimyasal ve mekanik bozunmaya uğramaktadır. Sürtünmeli kimyasal aşınma, yüzeyde ince (10-100 nm) bir film tabakası oluşmasını tetiklemekte ve bu aşınma sırasında SiC partikülleri plastik deformasyona uğrayarak oval bir yapıya dönüşmektedir. Plastik deformasyonun bir sonucu olarak bu ara geçiş bölgesindeki SiC tek kristalleri, mozaik kristallere dönüşmektedir [11].

Şekil 3.1 sulu sürtünme ortamında, reaksiyon katmanındaki ince yağlayıcı film tabakasının oluşumunu basit bir modelle göstermektedir. Kayan iki SiC tabakası arasındaki temas yüzeylerinde bölgesel olarak çok yüksek sıcaklık ve basınç değerleri oluşmaktadır. Mekanik temas sonucu kopan parça bu yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında su ile birleştiğinde silika veya silikamsı bir tabaka oluşturmaktadır. Kayma yüzeyleri de aşınma ürünleri oluşumu ve tepe aşınması mekanizmalarının ortak sonucu olarak düz bir yapıya ulaşmaktadır [11].

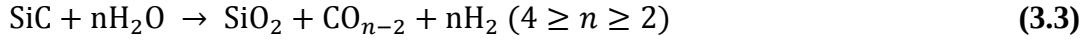


Şekil 3.1 : Tribo-kimyasal film tabakası oluşumunun şematik gösterimi [11].

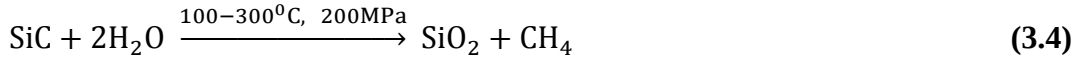
Yağlayıcı film tabakası oluşumu mekanizması için H_2 ve $300^{\circ}C$ 'den büyük sıcaklıklarda CO_2 ölçümleri yapılarak aşağıdaki tribo-kimyasal reaksiyonlar ileri sürülmüştür;



ya da daha genel olarak;



SiC üzerine yapılan hidro-termal deneyler sonucunda $H_2O:SiC$ molar oranının 2:1'e ulaşmasından hemen önce SiC'ün kararsız hale geldiği ve karbonun istikrarsızlaştığı görülmüştür. Bu nedenler ile orta sıcaklıklarda ($100-300^{\circ}C$, $200MPa$) reaksiyon (3.1) ile beraber metan oluşumu reaksiyonunun (3.4) meydana gelmesi mümkündür [11].



SiC yüzeylerin sulu aşınması sonucu ortaya çıkan ince yağlayıcı tabaka oluşumu dört aşamada modellenmiştir ve bu aşamalar Şekil 3.2'de verilmiştir.

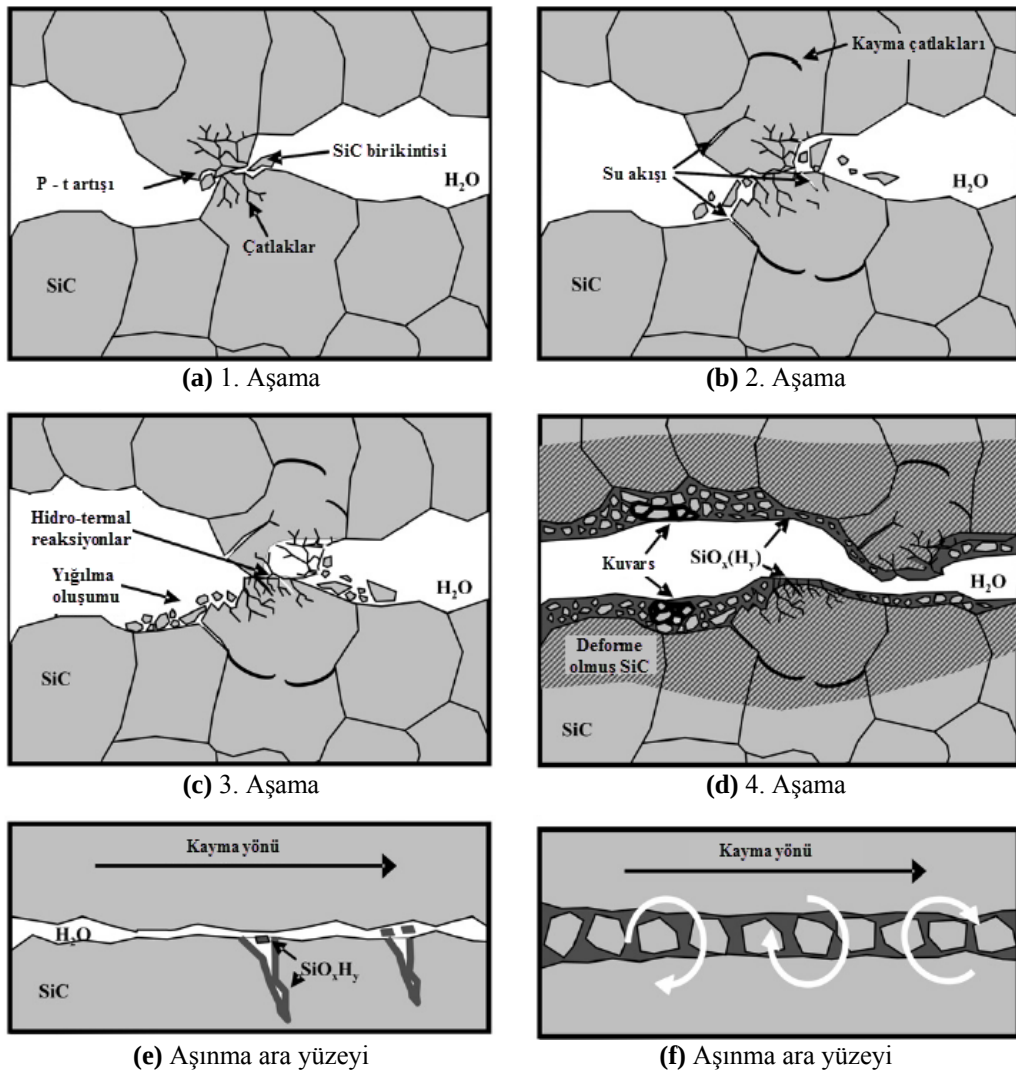
1. Aşama : İdeal olmayan hidro-dinamik koşullarda temas olduğunda, pürüzlü yüzeylerdeki çıkıntılar kırılmakta ve bu kırılma yüksek sıcaklık ve basınç koşulları oluşturmaktadır. Bu çökme darbe etkisi sonucu oluşmakta ve SiC yapısal olarak parçalanarak küçük kristallere ayrılmakta ve aşınma birikintileri oluşturmaktadır. Bu birikintilerin bir kısmı su tarafından korozyon ürünleri olarak taşınırken diğer kısmı bölgesel basınç ve sıcaklığın etkisi ile suyun hidro-termal saldırısına uğramaktadır. Bunun sonucu olarak, çatlak yüzeylerinde ve diğer yüksek gerilimli bölgelerde, gaz ve silika oluşum reaksiyonları başlamaktadır [11].

2. Aşama : Devam eden mekanik temas sonucu büyük bozunmalar ve kayma çatlakları oluşmakta, bu boşlukları dolduran su SiC boşlukları arasında yüksek basınca maruz kalmaktadır. Mekanik temas ile oluşan enerji ısıya dönüşmekte ve bölgesel sıcaklık yüksek değerlere ulaşmaktadır [11].

3. Aşama : Temas sonucu yükselen sıcaklık dinamik bir denge sıcaklığına ulaşmaktadır. Çatlaklar mekanik olarak açılıp kapanmakta ve aşınma yığılmaları bu boşluklara zorlanmaktadır. Bu olaylar sonucu (3.3)

formülüne göre silika oluşmakta ve silika olarak zengin ıslak faz (SiO_xH_y) sürtünme yüzeyindeki boşluklara tutunmaktadır [11].

4. Aşama : Mekanik temasın olduğu ara yüzeylerde düzgün aşınma izleri oluşmaktadır. Sürtünme yüzeyleri arasına sıkışan aşınma birikintileri, sürtünme parlatması yapmakta ve nano boyutlara ufalanarak daha oval şekiller almaktadır. Silika olarak zengin faz yağlayıcı aşınma tabakasının ana malzemesini oluşturmaktadır. Kopan ufalanmış aşınma birikintileri ise SiC üzerindeki uygun boşluklara yerleşerek su ile yapıdan uzaklaşmayı engellemektedir [11].



Şekil 3.2 : SiC sulu aşınma modelinin şematik gösterimi (a) ilk temas ve birikinti oluşumu (b) temasın devamı ve kayma çatlaklarının oluşumu (c) hapsedilmiş su ve hidro-termal reaksiyonlar (d) izin düzleşmesi ve boşlukların dolması (e) silikanın dönüşümü, çözünmesi ve çökmesi (f) silika aşınma parçacıklarının yuvarlanması, ufalanması ve bozunumu [11].

4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada alüminyum–12 silisyum (Al-12Si), alüminyum (Al), silisyum karbür (SiC) ve bor karbür (B₄C) tozları kullanılarak Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme (SDGP) yöntemi ile 116 HV_{0,1} sertliğindeki Al 6082 altlık üzerine, alüminyum matrisli SiC ve B₄C takviyeli kompozit kaplanmıştır. Kompozit kaplamaların karakterizasyonu; mikroyapı incelemeleri (optik ve taramalı elektron mikroskopisi), sertlik ölçümleri ve aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir.

4.1 Kaplama İşlemi

Bu çalışmada altlık malzemesi olarak kullanılan Al 6082 kalite kare profil çubuk, önce 0,5 cm kalınlığında dilimlendikten sonra yaklaşık 1x2 cm büyüklükte kesilerek kaplanacak yüzey sırasıyla 60 ve 120'lik zımpara ile düzeltilmiş ve alkol ile temizlenmiştir (Şekil 4.1).

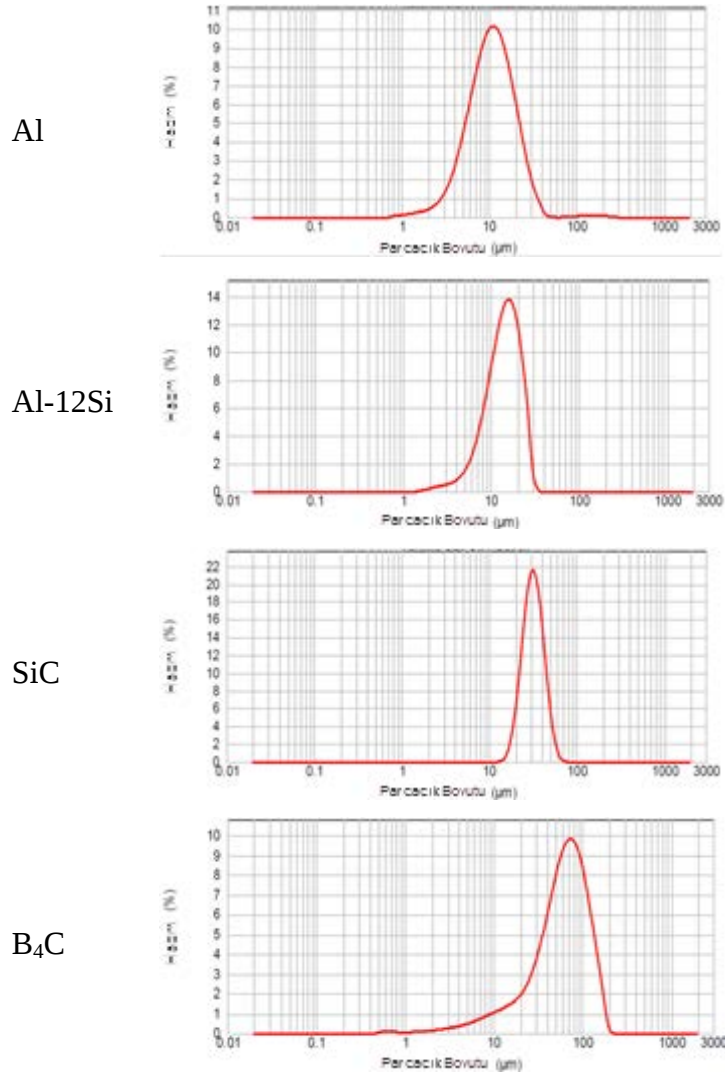


Şekil 4.1 : Kaplama işlemi için hazırlanmış Al 6082 altlıklar.

Matris malzemesi olarak Al ve Al-12Si tozları, takviye malzemesi olarak da SiC ve B₄C tozları kullanılmıştır. Söz konusu tozların özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu tozların boyut dağılımları Malvern™ Mastersizer 2000–S model lazer kırınımlı boyut analiz cihazı ile ölçülerek Şekil 4.2’de verilmiştir.

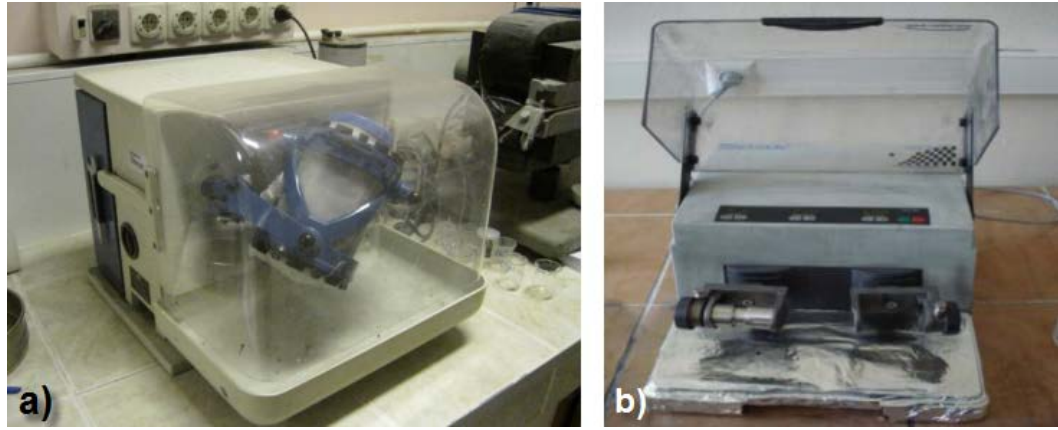
Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan tozların özellikleri.

Toz	Firma	Bileşim	Tane Boyutu (µm)	Morfoloji
Alüminyum	Alfa Aesar	% 99,5 Al	12	Oval
Alüminyum-12 Silisyum	Praxair	% 11,5 Silisyum % 88,3 Alüminyum % 0,2 Diğer	17	Küresel
SiC	-	%100 SiC	33	Köşeli
B ₄ C	Zhengzhou Yincheng	%100 B ₄ C	60	Köşeli



Şekil 4.2 : Al, Al-12Si, SiC ve B₄C tozlarının hacimce % boyut dağılım grafikleri.

Bu çalışma kapsamında Al 6082 altlık üzerinde kompozit kaplama oluşturma işlemlerinde kullanılan harmanlar kuru karıştırma ve mekanik alaşımlama yöntemleri ile hazırlanmıştır. Kuru karıştırma işleminde, tozların sabit hızda eksantrik dönme hareketiyle karıştırıldığı Turbula® marka kuru karıştırıcı (Şekil 4.3a) kullanılmıştır. Mekanik alaşımlama işleminde yatay eksenle titreşim yapan Retsch™ MM400 marka-model mekanik alaşımlama cihazı (Şekil 4.3b) kullanılmıştır. Mekanik alaşımlama işlemi, 1:6 oranında (ağırlıkça toz:top oranı), 10Hz’de, 90 dk süre ile gerçekleştirilmiştir. Tozların havan ve top yüzeyine yapışmasını engellemek için ağırlıkça %2 stearik asit kullanılmıştır. Tozlar çelik havana Glowbox içerisinde, argon ortamında konularak kapatılmış ve yine argon ortamında açılmıştır.



Şekil 4.3 : (a) Turbula® 3 eksenli kuru karıştırıcı (b) Retsch™ MM400 mekanik alaşımlama cihazı.

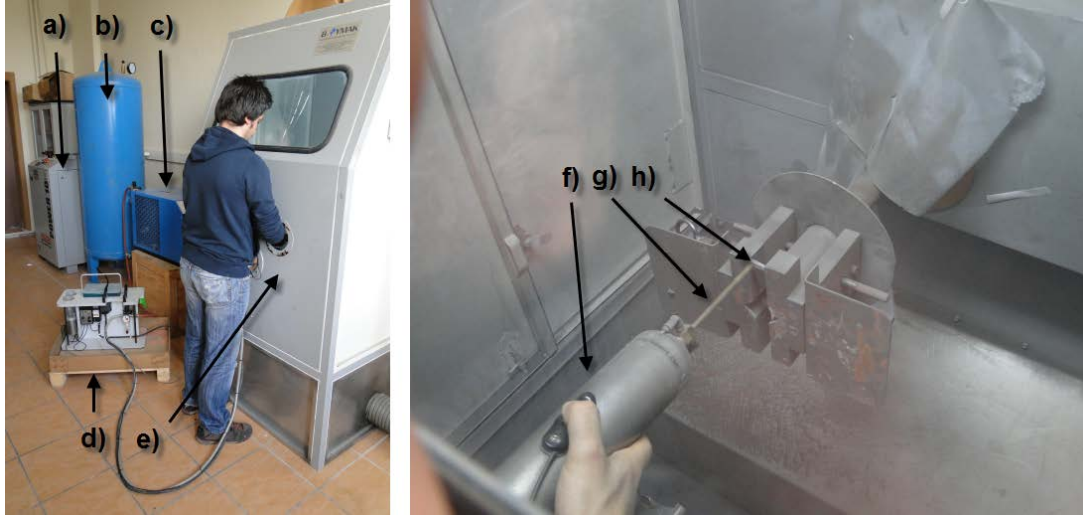
Soğuk dinamik gaz püskürtme işleminde besleme tozu olarak kullanılacak harmanlar aşağıda belirlenen hacim oranlarında, belirtilen karıştırma yöntemleri ile harmanlanmıştır. Kaplama işlemlerinden önce toz harmanları, içerisinde bulunabilecek nemi bertaraf etmek amacıyla Etüv fırınında 90⁰C’de, 18 saat süreyle kurutulmuştur.

Çizelge 4.2 : Hazırlanan harmanlar ve karıştırma yöntemleri

%60 Al-12Si + %20 Al + %20 SiC	Kuru Karıştırıcı
%80 Al-12Si + %20SiC	Kuru Karıştırıcı
%80 Al-12Si + %20SiC	Mekanik Alaşımlama
%60 Al-12Si + %40SiC	Kuru Karıştırıcı
%60 Al-12Si + %40B ₄ C	Kuru Karıştırıcı

Besleme tozları RUSONIC™ marka soğuk dinamik gaz püskürtme sistemi ile (Şekil 4.4) Al 6082 altlık üzerine püskürtülmüştür. Püskürtme işlemi manüel olarak

gerçekleştirilmiştir ve taşıyıcı gaz olarak 5 bar basınca sahip kurutulmuş hava kullanılmıştır. Kaplama işlemleri sırasında toz besleme hızı 0,08 gram/saniye olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4 : Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Sistemi, İTÜ (a) kompresör (b) basınçlı hava tüpü (c) kurutucu (d) RUSONIC™ marka SDGP cihazı (e) kaplama odası (f) püskürtme tabancası (g) nozül (h) altlık.

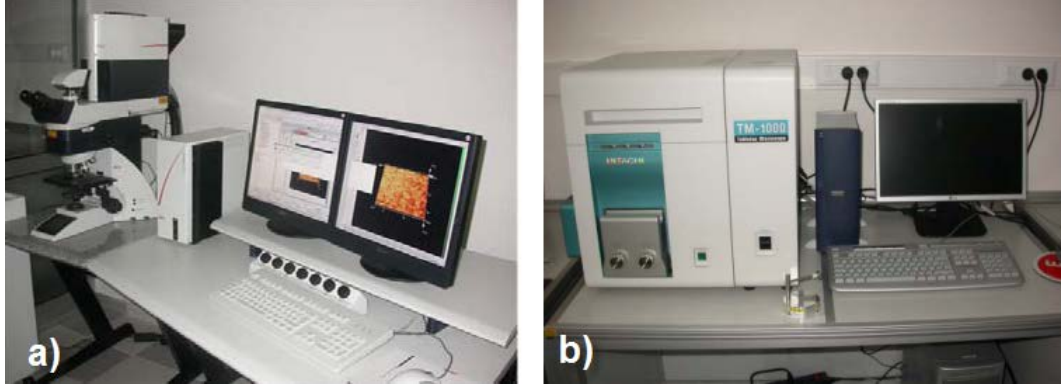
4.2 Karakterizasyon Çalışmaları

Karakterizasyon çalışmaları; mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve aşınma deneyleri olarak 3 aşamada yapılmıştır.

4.2.1 Mikroyapı incelemeleri

Kaplanmış numuneler kesitten incelenebilecek şekilde bakalite alınmış ve sırasıyla 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500'lük zımparalar ile düzeltildikten sonra MDnap kalite çuhada silika aşındırıcı ve yağlayıcı kullanılarak parlatılmıştır.

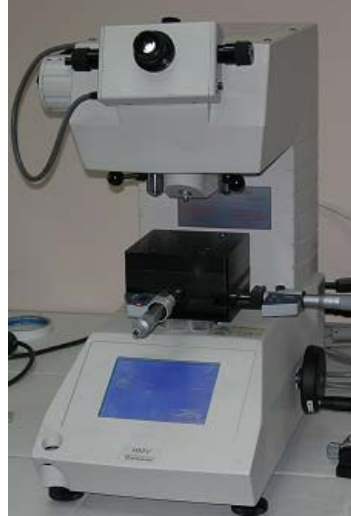
Mikroskobik incelemeler LEICA™ marka optik mikroskop (Şekil 4.5a) ve HITACHI™ marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM, Şekil 4.5b) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.5 : (a) Leica™ marka optik mikroskop (b) Hitachi™ marka masaüstü taramalı elektron mikroskobu.

4.2.2 Sertlik ölçümleri

Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler kullanılarak kaplamaların sertlikleri kesitten ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri Shimadzu™ marka HMV-2 model mikro sertlik cihazı ile (Şekil 4.6) 25, 50, 100, 200 ve 300 gr yüklerin 15 sn uygulanması ile Vickers cinsinden gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için en az 10 ölçüm yapılarak, ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır.

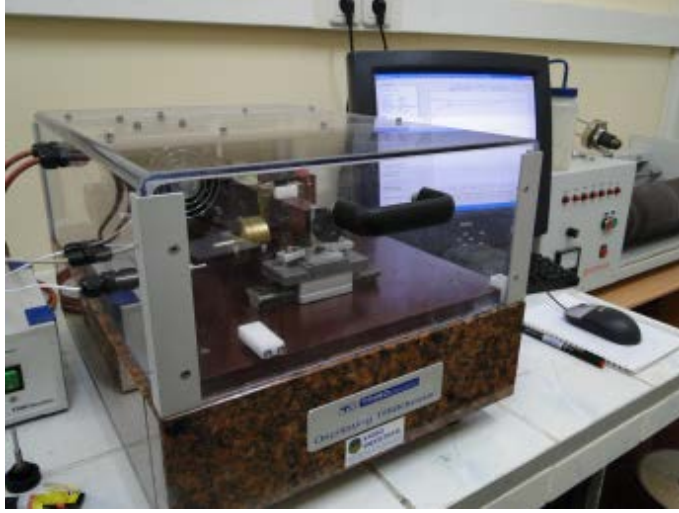


Şekil 4.6 : SHIMADZU™ marka mikro Vickers sertlik cihazı.

4.2.3 Aşınma deneyleri

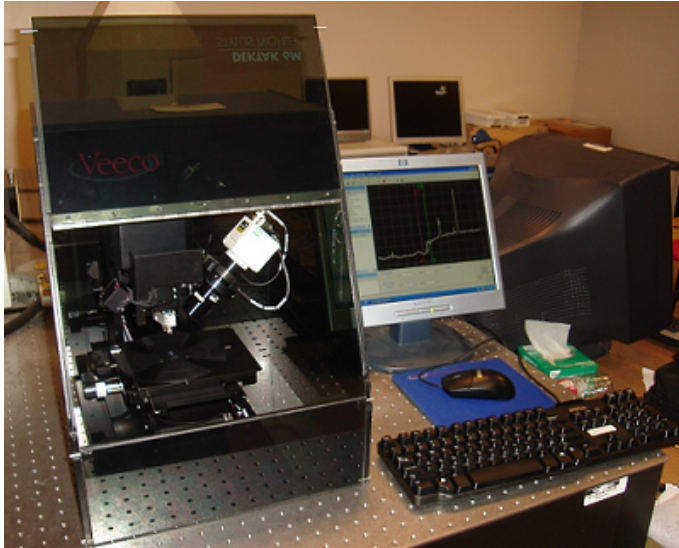
Aşınma deneyleri ileri-geri hareketli yükleme koşullarında, TRIBOTECH™ marka salınlımlı aşınma cihazında (Şekil 4.7) yapılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında alümina top kullanılmıştır. Aşındırıcı top 1, 2, 3, 4 ve 5 N yük altında, 2 mm/s kayma hızında numune yüzeylerine sürtmüştür. Aşınma deneylerinde iz uzunluğu 2 mm (strok) ve toplam kayma mesafesi 5000 mm olarak ayarlanmıştır. Aşınma deneyleri sırasında sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı bilgisayar

vasıtasıyla kaydedilmiştir. Aşınma deneyleri kuru ve sulu ortam olmak üzere iki ayrı koşulda yapılmıştır. Kuru ortam aşınma deneyleri % 45±4 nem ve 22±2 °C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sulu ortam aşınma deneyleri ise 10 ml hacminde 7,1 pH ve 70 µs/cm iletkenlik katsayılı saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7 : TRIBOTECH™ marka salınlı aşınma cihazı.

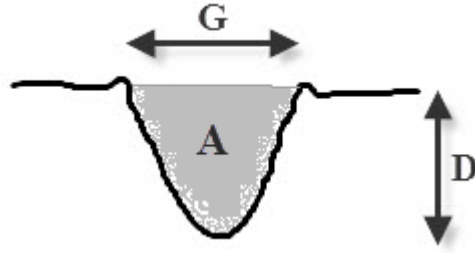
Deney öncesi numunelerin yüzey pürüzlülüğü uygun zımparalama diskleri ile (600, 1200'lük) ortalama 0,2 µm değerine indirilmiştir. Aşınma yüzeyi ve aşındırıcı top, deney öncesi alkol ile temizlenmiştir.



Şekil 4.8 : DEKTAK 6M İğneli Yüzey Profil Cihazı.

Deneyler sonrasında numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin yüzey profilleri DEKTAK 6M (Şekil 4.8) tipi cihaz ile ölçülmüş ve elde edilen yüzey profillerinden

aşınma iz alanları Şekil 4.9’da açıklandığı gibi hesaplanmıştır. Numunelerin ve topun temas yüzeyleri mikroskopik olarak incelenmiştir.



$$A=(\pi/4).G.D$$

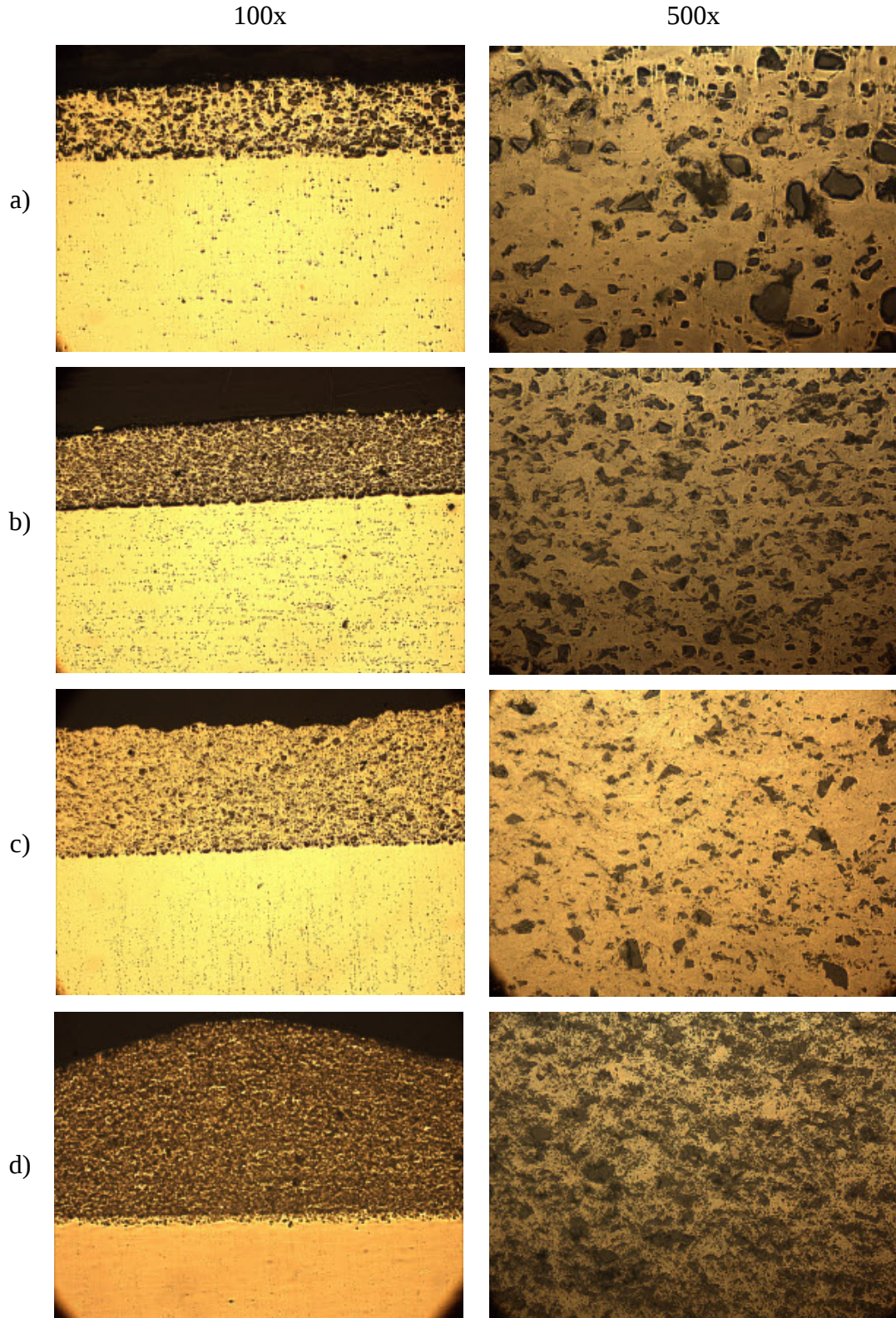
Şekil 4.9 : Aşınma izi derinliği, genişliği ve alanının şematik olarak gösterimi (A: Aşınma izi alanı, G: Aşınma izi genişliği, D: Aşınma izi derinliği).

5 DENEYSEL SONUÇLAR

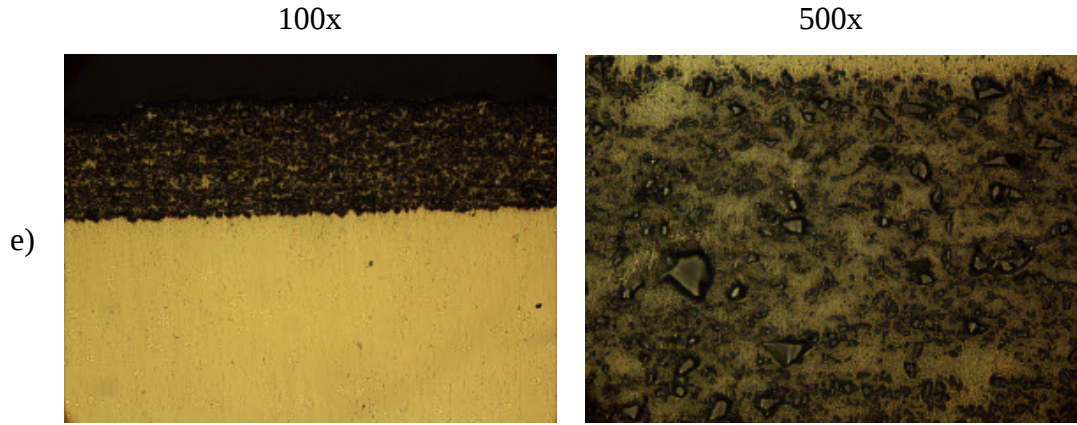
5.1 Mikroyapı İncelemeleri

Kesitten alınmış 100x ve 500x büyütmelelerdeki optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Kaplamalardaki siyah bölgeler, SiC ve B₄C partikülleri olup matris içerisinde homojen olarak dağılmıştır. Şekillerden gözlemlendiği gibi %SiC oranı arttığında kaplama kalınlığında da bir artış gözlenmektedir. Bunun temel nedeni, yapıdaki SiC seramiklerin kaplamanın ilk safhalarında, altlığa çarparak yüzeyde bir nevi kumlama yapması ve yüzeyi kaplamaya daha elverişli hale getirmesidir.

Optik mikroskop çalışmaları SiC ve B₄C takviyeli kaplamaların yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğunu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde sıkıca bağlandığını ortaya çıkarmıştır. Yapılan literatür araştırmalarına göre [4,12,17], yalnızca Al-12Si tozları kullanılarak elde edilen kaplamalar boşluklu bir yapıya sahiptir. Bunun temel nedeni; kaplama işleminde, yüzeye yapışan bir Al taneciğine çarpan ikinci bir Al partikülünün, ilk parçacığı yeterince deformasyona uğratamamasıdır. Harman içerisinde seramik parçacıklar konulduğunda ise, yüzeye yapışmış Al parçacığına çarpan seramik partikül, ilk parçacığı daha fazla deformasyona uğratmakta ve kendisi de ilk parçacık içine gömülmektedir. Optik mikroskop görüntülerindeki seramik partiküller, püskürtmenin etkisi ile plastik olarak deformasyona uğramış olan Al ve Al-12Si tozları tarafından çevrelenmiş, diğer bir deyişle alüminyum tozları arasında hapis olmuş durumdadır.

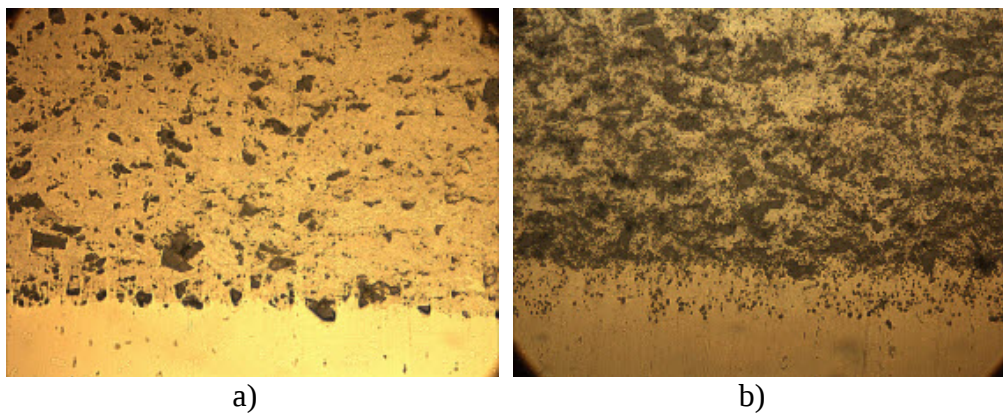


Şekil 5.1 : (a) %60 Al-12Si + %20 Al matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (b) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (c) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama (d) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı (e) %80 Al-12Si matris, %40 B₄C takviyeli, kuru karıştırıcı.

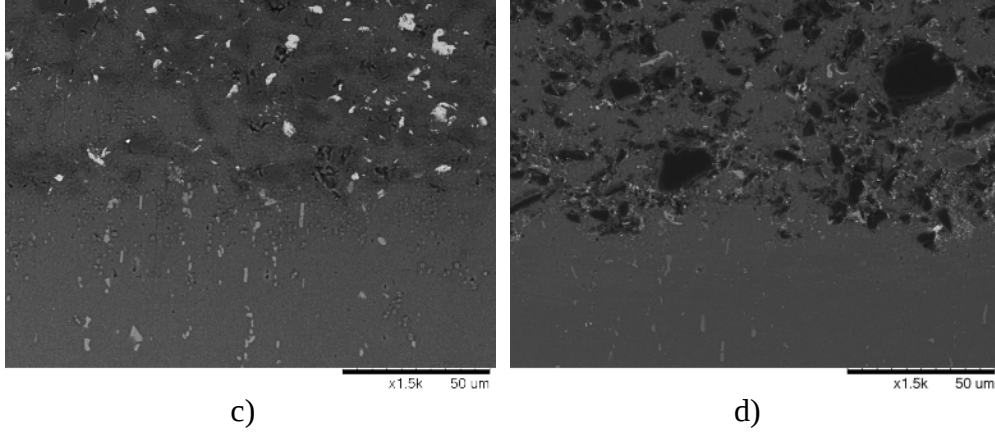


Şekil 5.1 (devam): (a) %60 Al-12Si + %20 Al matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (b) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (c) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama (d) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı (e) %80 Al-12Si matris, %40 B₄C takviyeli, kuru karıştırıcı.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, farklı harmanlar da dahi partiküllerin altlık malzemeye penetrasyonu oldukça iyi kalitededir. Altlık-kaplama ara yüzeyi oldukça uyumlu bir bağlanma göstermekte ve herhangi bir boşluk veya süreksizlik içermemektedir. Yüksek takviye oranlarına çıkıldığında, SiC ve B₄C partiküllerinin altlık içerisine nüfuz ederek, Al 6082 yapısı içerisinde ilerlediği görülmektedir. Birleşme bölgelerinde düz bir arayüzey görülmemesi, altlık ve kaplamanın tek bir yapı olarak birbirini tamamladığını ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca kaplamanın herhangi bir bölgesinde veya parçacıkların kenarlarında görülen boşluk oranı, göz ardı edilecek kadar düşüktür.

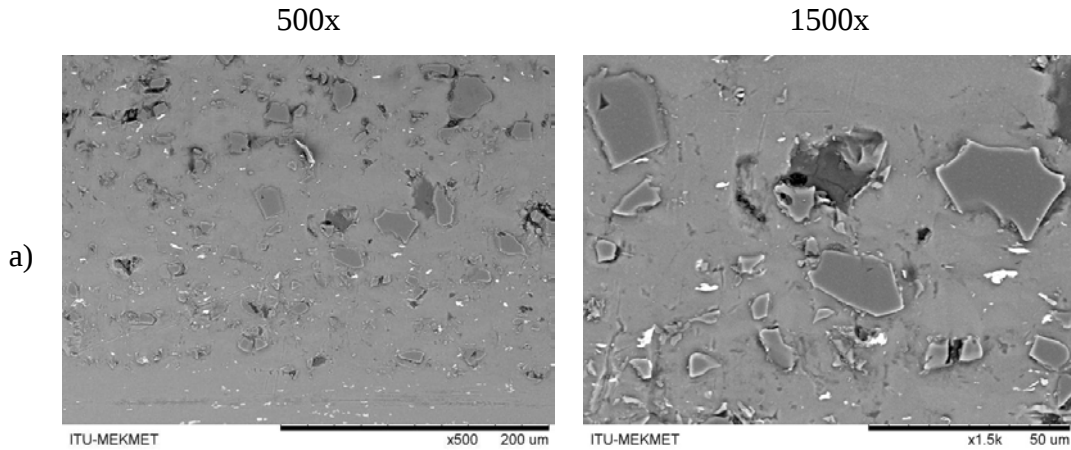


Şekil 5.2 : (a) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama, 500x (b) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı, 500x (c) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı, 1500x (d) %80 Al-12Si matris, %40 B₄C takviyeli, kuru karıştırıcı, 1500x.

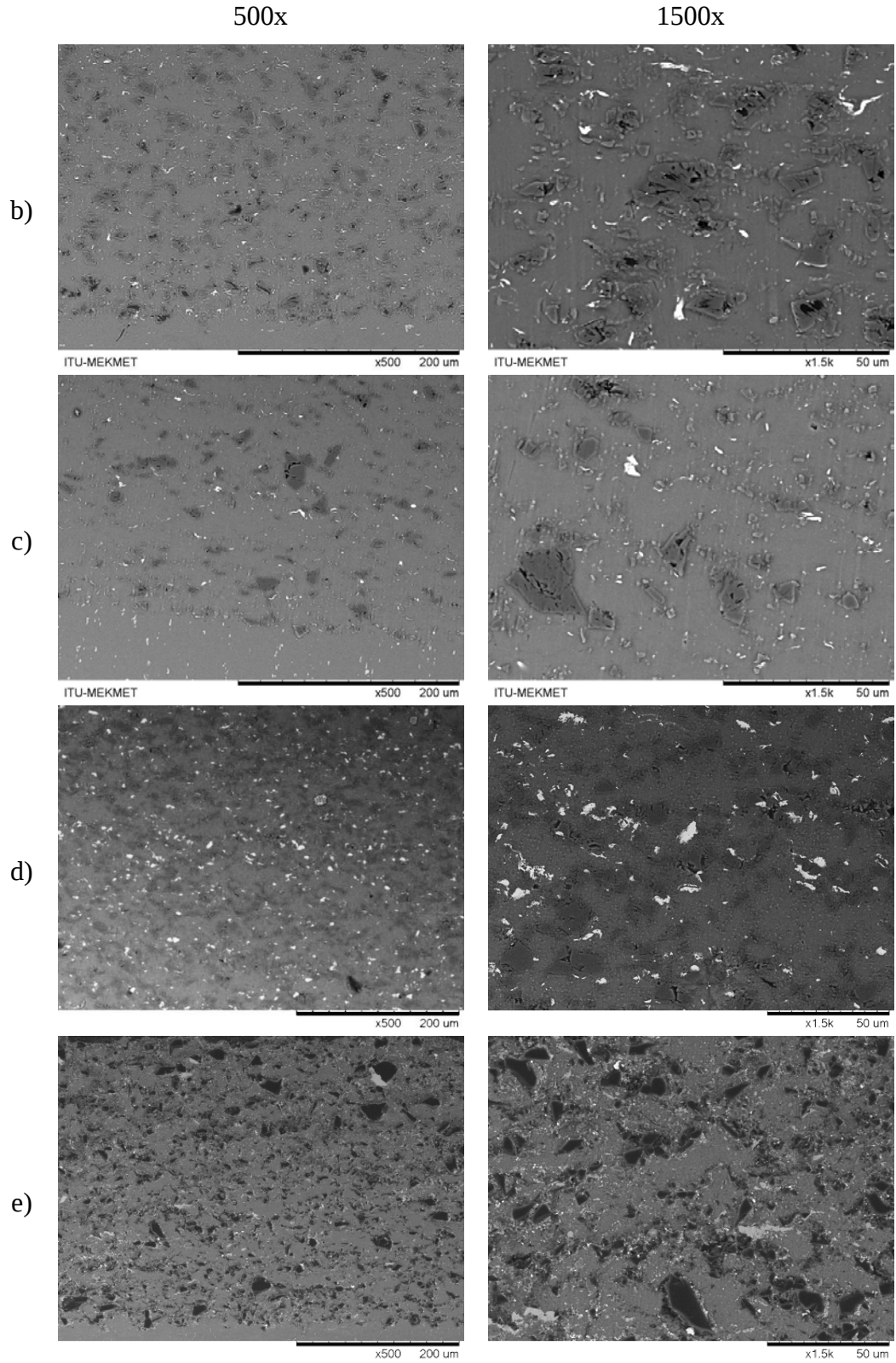


Şekil 5.2 (devam) : (a) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama, 500x (b) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı, 500x (c) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı, 1500x (d) %80 Al-12Si matris, %40 B₄C takviyeli, kuru karıştırıcı, 1500x

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.3'te verilmiştir. Yüksek büyütmelelere çıkıldığında kaplama sırasında yüzeye çarpan takviye parçacıklarının bazılarında çatlama ve kırılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kaplama yapısında beyaz renkli küçük adacıkların mevcudiyeti dikkat çekmiştir. Yapılan bir çalışmada [17] bu beyaz adacıkların nozülün aşınması sonucu nozülden ayrılan parçacıklar olduğu belirlenmiştir. Şekil 5.3b ve Şekil 5.3d kıyaslandığında beyaz adacıkların Şekil 5.3d'de daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu da besleme tozu içerisindeki SiC oranı arttıkça nozülün püskürtme işlemi sırasında daha fazla aşındığını ve kompozit kaplama yapısına daha fazla nüfuz ettiğini göstermektedir.

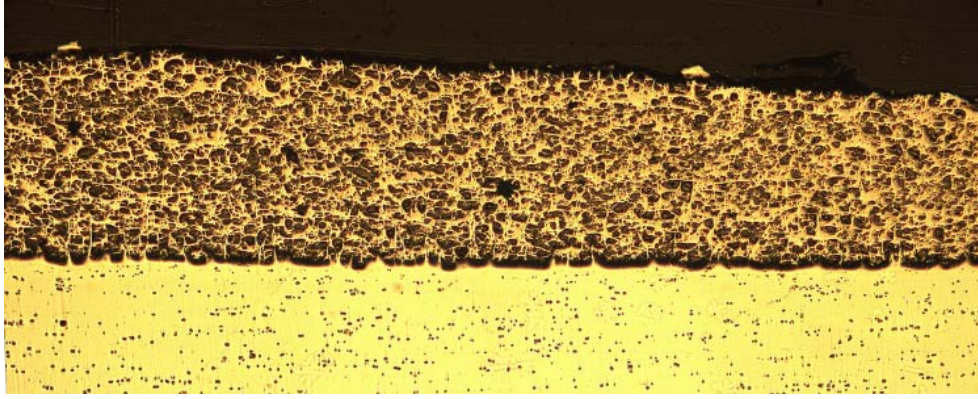


Şekil 5.3 : (a) %60 Al-12Si + %20 Al matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (b) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (c) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama (d) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı (e) %80 Al-12Si matris, %40 B₄C takviyeli, kuru karıştırıcı.

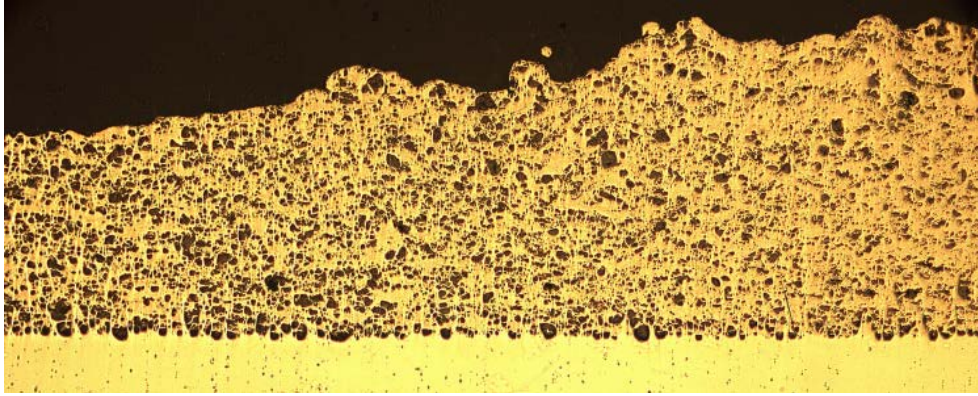


Şekil 5.3 (devam) : (a) %60 Al-12Si + %20 Al matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (b) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, kuru karıştırma (c) %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, mekanik alaşımlama (d) %80 Al-12Si matris, %40 SiC takviyeli, kuru karıştırıcı (e) %80 Al-12Si matris, %40 B₄C takviyeli, kuru karıştırıcı.

Şekil 5.4'te kuru karıştırma ve mekanik alaşımlama ile harmanlanmış, aynı miktar toz kullanılarak elde edilmiş, %20 SiC takviyeli kompozit kaplamalar arasındaki fark gözlenmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, mekanik alaşımlama SiC partiküllerinin küçülmesine ve kaplama kalınlığının artmasına neden olmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 5.4 : %80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli, 100x (a) kuru karıştırma (b) mekanik alaşımlama.

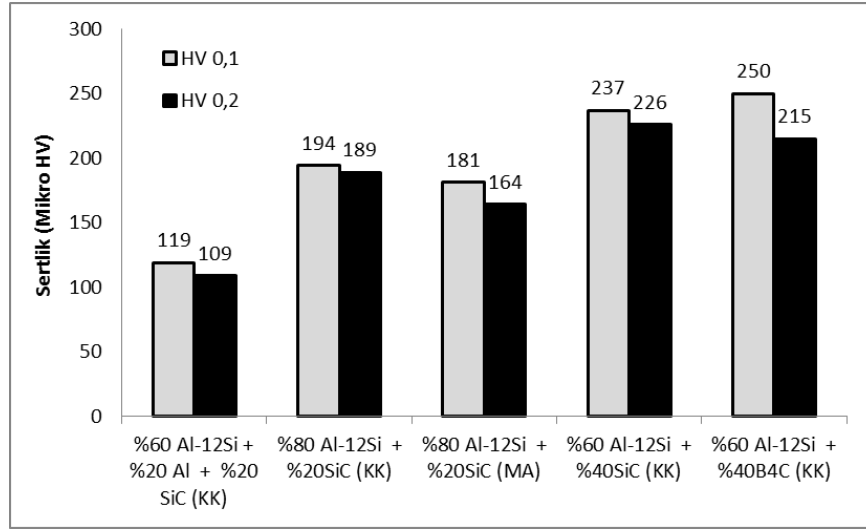
Harman içerisine konan ve kaplamaya geçen % SiC oranları kullanılarak yapılan, SiC kaplama verimi hesaplamaları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Verilerden anlaşılabileceği gibi matris malzemesi olarak Al-12Si kullanılması verimin artmasına, harmanlama yöntemi olarak mekanik alaşımlamanın kullanılması verimin düşmesine neden olmuştur.

Çizelge 5.1 : Kaplamaya geçen SiC oranını için verim hesaplamaları.

Matris Malzemesi	Takviye Malzemesi	Karıştırma Yöntemi	Karışımındaki SiC Miktarı (%)	Kaplamadaki SiC Miktarı (%)	Kaplama Verimi (%)
%80 Al-12Si/Al (75/25)	%20 SiC	Kuru Karıştırıcı	20	24,12	120,6
%80 Al-12Si	%20 SiC	Kuru Karıştırıcı	20	29,32	146,6
%80 Al-12Si	%20 SiC	Mekanik Alaşımlama	20	18,64	93,2

5.2 Sertlik Ölçümleri

Farklı harmanlar kullanılarak Al 6082 altlık üzerine yapılan kaplamaların, 100 g ve 200 g ile ölçülen ortalama HV sertlik değerleri Şekil 5.5'te verilmiştir. Ölçüm sonuçları, ortalamaları ve standart sapmaları Çizelge A.1'de verilmiştir. Kaplama içerisindeki SiC miktarındaki artış sertliğin de artışı sağlanmaktadır. Aynı hacim oranlarında SiC ve B₄C kullanıldığında ise, B₄C takviyeli kompozit kaplamanın daha yüksek sertliğe sahip olduğu görülmektedir.

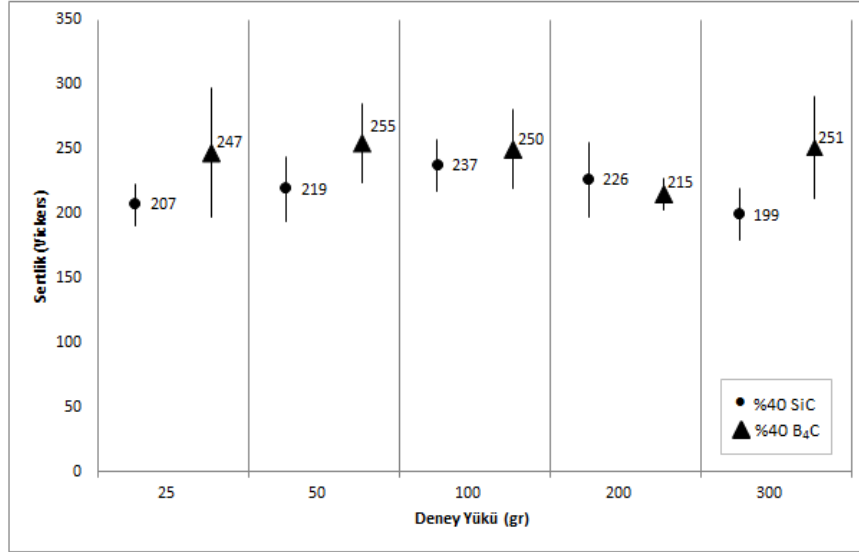


Şekil 5.5 : 100g ve 200 g ile ölçülen mikro Vickers sertlik değerlerinin kaplama kompozisyonuna göre gösterimi.

Besleme tozunda matris malzemesi olarak Al-12Si ile beraber Al tozlarının kullanılması, sertliğin düşmesine neden olmaktadır. Öyle ki, Şekil 5.5'te görüldüğü gibi %20 SiC takviyesi içeren iki numunede, %80 Al-12Si matrisli numunenin sertliği 194 HV_{0,1} iken, %60 Al-12Si + %20 Al matrisli numunenin sertliği 119 HV_{0,1} olarak bulunmuştur. Bu sertlik değeri kullanılan Al 6082 altlığın sertliği olan 116 HV_{0,1}'e yakın olduğundan, sertlik miktarında yeterli artış sağlanamadığı için sonraki kaplamalarda matris malzemesi olarak sadece Al-12Si kullanılmıştır.

%80 Al-12Si matris, %20 SiC takviyeli numunelerin hazırlanmasında kuru karıştırma ve mekanik alaşımlama yöntemleri uygulanmıştır. Kaplamaya geçen SiC verimi çalışmaları sonucunda mekanik alaşımlama ile harmanlanmış kaplamada, kuru karıştırmaya göre hacimce %10 daha az SiC bulunmasına rağmen sertlikteki düşüş aynı oranda yüksek değildir. Ancak mekanik alaşımlamanın sertlik üzerinde dikkate değer miktarda olumlu etkisi gözlemlenmediği için bu yöntem terk edilmiştir.

Şekil 5.6’da %60 Al-12Si matrisli, %40 SiC takviyeli ve %40 B₄C takviyeli kompozit kaplamaların farklı yüklerde ölçülen sertlik değerleri standart sapmaları ile gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney yükünün değişmesi sertlik değerlerinde büyük değişimlere sebep olmamakla beraber, standart sapmalarda da büyük değişimler gözlenmemiştir. Tüm veriler irdelendiğinde %40 SiC takviyeli kaplama için mikro Vickers sertlik değerinin 220±10 HV, %40 B₄C takviyeli kaplama için 250±5 HV olduğu söylenebilir.



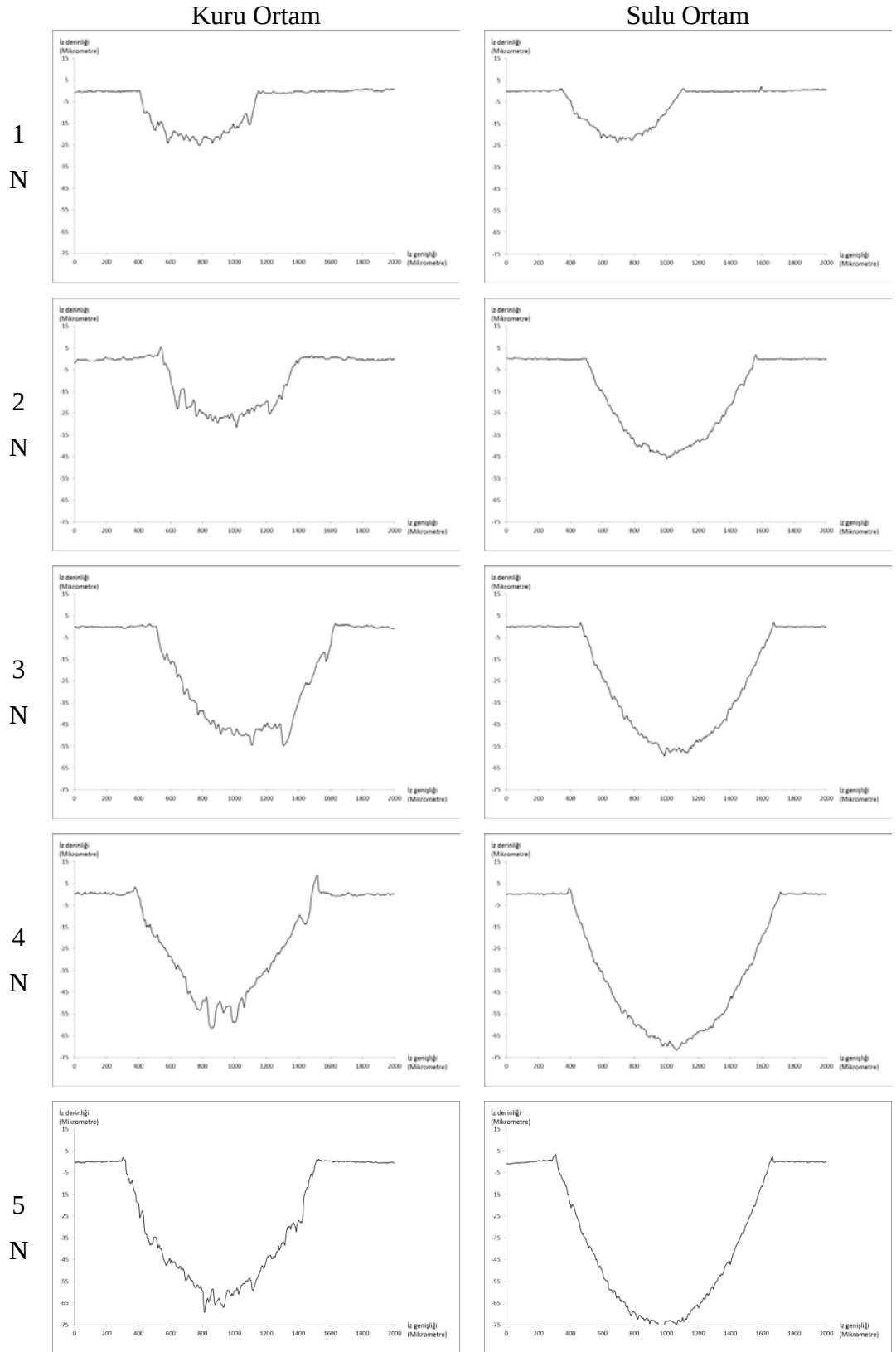
Şekil 5.6 : %60 Al-12Si, %40 SiC ve %40 B₄C takviyeli kompozit kaplamalar için farklı yüklerdeki mikro HV sertlik değerlerinin standart sapmaları ile gösterimi.

5.3 Aşınma Deneyleri

Al 6082 altlık üzerine kaplanan, Al-12Si matrisli, %40 SiC takviyeli kompozit kaplamanın ve Al 6082 altlık malzemesinin, kuru ve sulu ortamda yapılan aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.3.1 Aşınma profilleri ve aşınma kayıpları

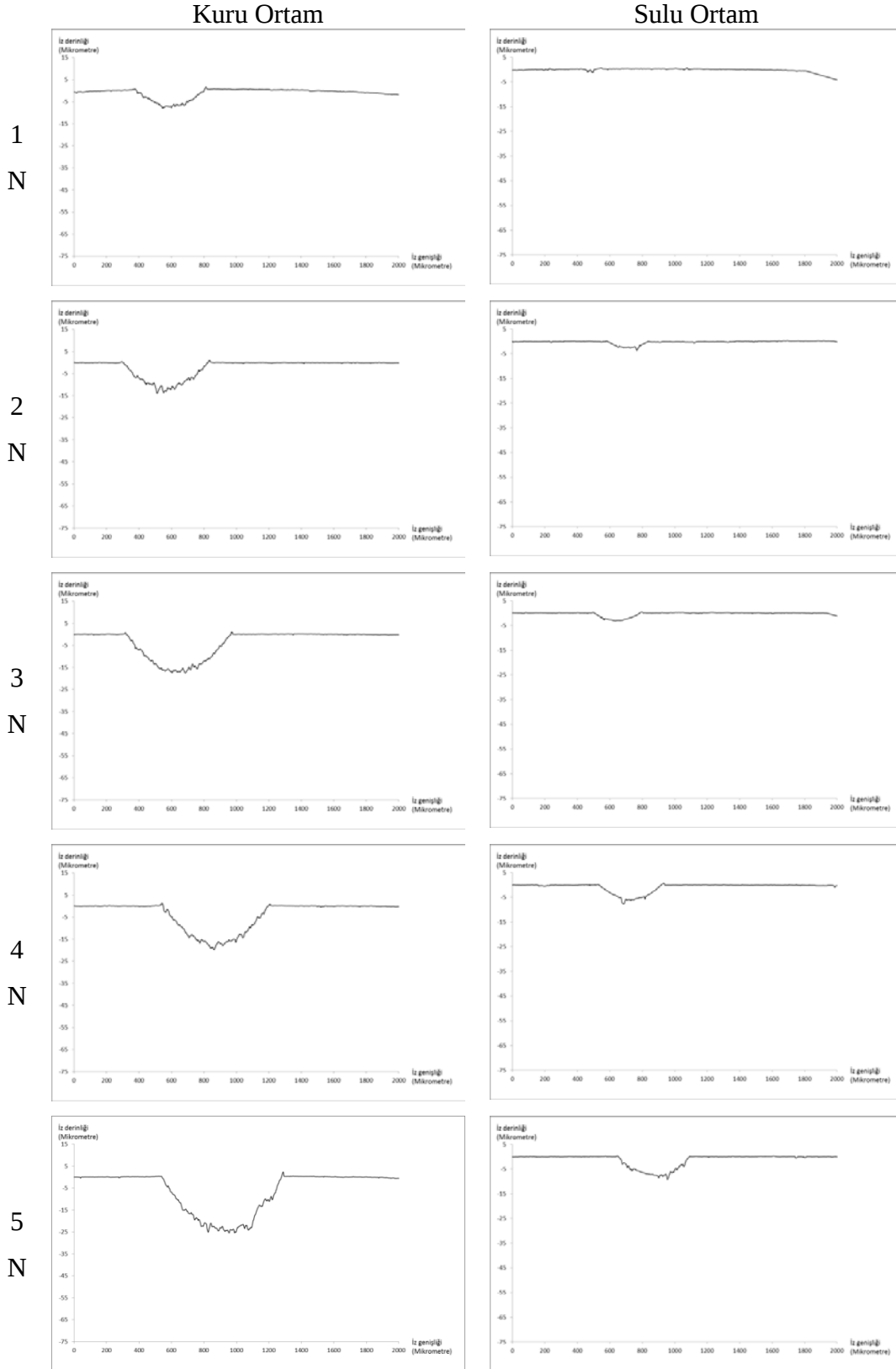
Şekil 5.7’de Al 6082 altlığa, 1-5 N yüklerin kuru ve sulu ortamda uygulanması ile elde edilmiş aşınma izlerinin profil görüntüleri verilmiştir. Profil resimlerinden iz derinliği ve genişliğinin deney yükü ile doğru orantılı arttığı gözlenmektedir. Ayrıca sulu ortam aşınma izlerinin kuru ortama göre daha büyük olduğu göze çarpmaktadır. Bunun ana mekanizması, suyun yağlayıcı değil, korozif bir ortam yaratarak aşınma prosesini hızlandırmasıdır.



Şekil 5.7 : 6082 altlığın 1, 2, 3, 4 ve 5 N yükler altında, kuru-sulu ortam aşınma profilleri.

Şekil 5.8’da %60 Al-12Si, %40 SiC kompozit kaplamaya 1, 2, 3, 4 ve 5 N yüklerin kuru ve sulu ortamda uygulanması sonucu elde edilmiş aşınma izlerinin profil

görüntüleri verilmiştir. Al 6082 altlıkta da görüldüğü gibi deney yükü ile iz derinliği ve genişliği doğru orantılı olarak artmaktadır.

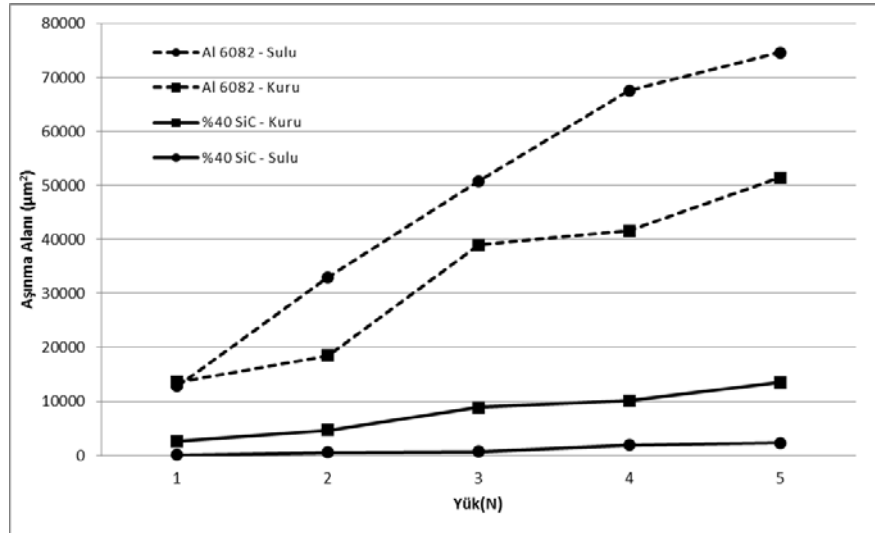


Şekil 5.8 : %60 Al-12Si, %40 SiC 1-5 N yükler için kuru-sulu ortam aşınma profilleri.

%40 SiC takviyeli kaplamanın sulu ortam deneylerinde, Al 6082’de görülenin aksine, aşınma izi büyüklüğünde yüksek miktarda azalma gözlenmektedir. Sulu ortam deneylerinde; kaplama, altlığa nazaran 1 N yük altında 225 kat, 5 N’da 32 kat daha az aşınmaktadır. Bu mekanizma SiC takviyeli kompozitlerde suyun korozyif özellik göstermediğini, aksine yağlayıcı özellik gösterdiğini kanıtlamaktadır. Öyle ki, kaplamanın kuru ortam aşınma izi sulu ortama göre 1 N için 42,6 kat, 5 N için 5,4 kat daha büyüktür. Buradan ise düşük yüklerde suyun daha iyi yağlayıcı özellik gösterdiğini sonucunu çıkarmak mümkündür.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’deki aşınma izi profillerinin genişlik ve derinlikleri ölçülerek Şekil 4.9’daki formüle göre aşınma izi alanları hesaplanmıştır. Her bir aşınma izi için 3 ölçüm yapılarak, ortalama iz alanları hesaplanmıştır. Ölçülen değerler ve yapılan hesaplamalar Çizelge A.2’de verilmiştir.

Şekil 5.9’da Al 6082 altlık ve %60 Al-12Si, %40 SiC kaplama için; 1 - 5 N yük altında, kuru ve sulu ortamda yapılan deney sonuçlarından hesaplanan, aşınma izi alanı grafiği verilmiştir. Grafikte, aşınma izi alanlarının yük ile doğru orantılı olarak arttığı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, sulu ortamın kuru ortama nazaran Al 6082 altlığı daha fazla aşındırdığı ancak, kompozit kaplamayı daha az aşındırdığı söylenebilir.

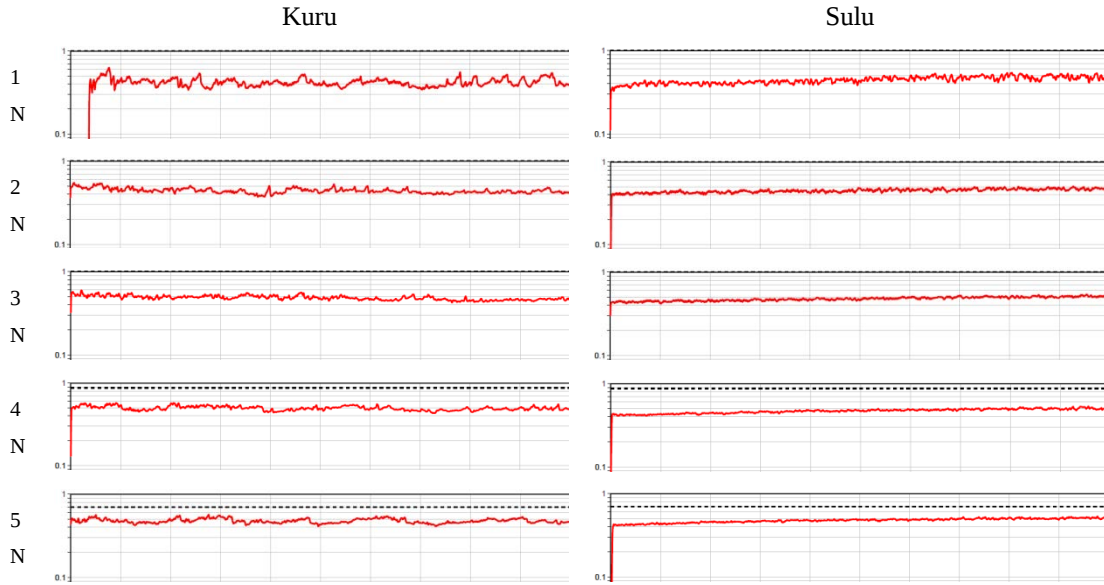


Şekil 5.9 : Altlık ve %40 SiC kaplama için kuru-sulu ortam, yük-aşınma alanı eğrileri.

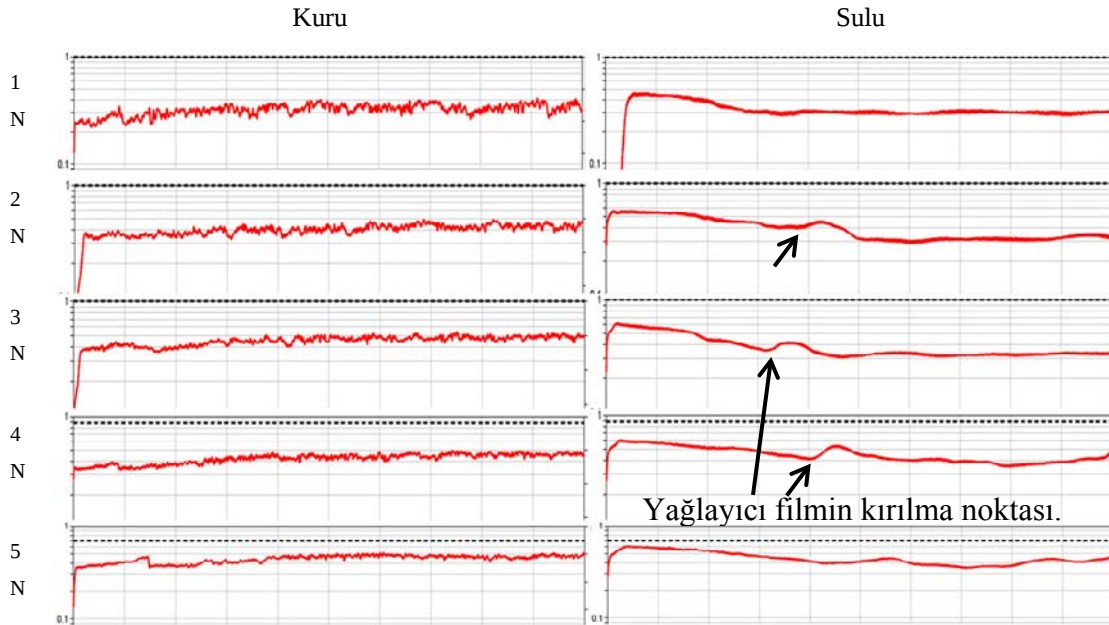
5.3.2 Sürtünme katsayısı

Al 6082 altlığa ait 1, 2, 3, 4 ve 5 N yük altında, kuru ve sulu ortam için zaman-sürtünme katsayısı değişim grafiği Şekil 5.10’da, %40 SiC takviyeli kaplamaya ait 1,

2, 3, 4 ve 5 N grafikleri Şekil 5.11’de verilmektedir. Gerek kuru gerekse sulu ortamda aşınma başlangıcında sürtünme katsayısı hızla arttıktan sonra kararlı bir değere (kararlı sürtünme katsayısı değeri) ulaşmaktadır. Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’den belirlenen kararlı durum sürtünme katsayısı değerleri Çizelge A.3’te listelenmiştir.



Şekil 5.10 : Al 6082 altlık için; 1, 2, 3, 4 ve 5 N yük altında, kuru ve sulu ortamda zaman-sürtünme katsayısı grafikleri.

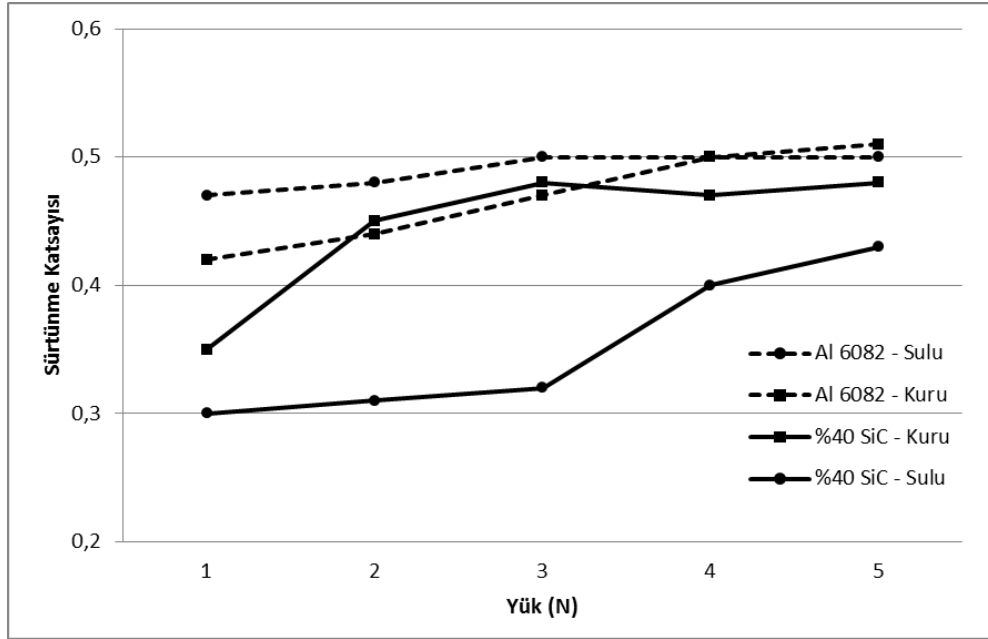


Şekil 5.11 : %40 SiC takviyeli kaplama için; 1, 2, 3, 4 ve 5 N yük altında, kuru ve sulu ortamda zaman-sürtünme katsayısı grafikleri.

%40 SiC takviyeli kaplamanın kuru ortamda yapılan aşınma deneylerinde sulu ortam deneylerine nazaran daha zikzaklı bir grafik elde edilmiştir. Sulu ortam testlerinde sürtünme katsayısı daha düzgündür ve sürtünme katsayısının başlangıçtaki ani

yükselişinden sonra değer zamanla düşmeye başlamaktadır. Sürtünme katsayısındaki bu düşüş yağlayıcı film tabakasının oluştuğunu göstermektedir. Ancak Şekil 5.11’de oklarla gösterildiği gibi, belirli bir süre sonra bu yağlayıcı film tabakası kırılmakta ve sürtünme katsayısı ani olarak yükselmektedir. Bu yükseliş sonrası yeni bir film tabakası oluşmakta ve sürtünme katsayısı tekrar düşmektedir. 1 N için film tabakasının kırılması söz konusu değildir ayrıca; 1, 2 ve 3 N için oluşan nihai yağlayıcı film tabakasının sürtünme katsayısının 0,3 olduğunu söylemek mümkündür. Ancak 4 ve 5 N’da kararlı durum sürtünme katsayısı değerleri 0,3’ün üstüne çıkmaktadır ki bu durum oluştuğu düşünülen yağlayıcı filmin bozulmasıyla ilişkili olabilir.

Şekil 5.12’de Çizelge A.3’te verilen kararlı durum sürtünme katsayılarının deney yükü ile değişimi görülmektedir.

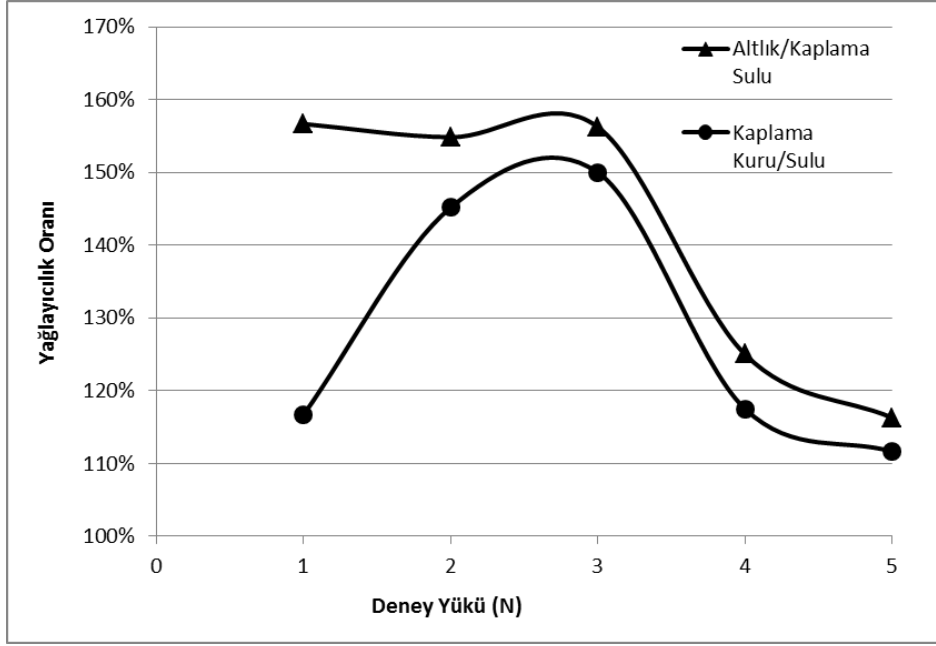


Şekil 5.12 : Altlık ve %40 SiC takviyeli kaplama için farklı yüklerde ölçülen kuru ve sulu ortam, kararlı sürtünme katsayısı değerleri.

Altlık için kararlı sürtünme katsayısı değerleri kıyaslandığında sulu ortam sürtünme katsayısı değerleri kuru ortama göre bir miktar daha fazladır. %40 SiC takviyeli kaplama için ise kuru ortam sürtünme katsayısı değerleri sulu ortama göre %12 ila %50 arasında daha fazladır.

Bu çalışmada %40 SiC’ün sulu ortamdaki sürtünme katsayısında görülen düşüş yağlayıcı etkisi olarak nitelendirilmiştir. Sulu ortamda altlık-kaplama arasındaki ve kaplamanın kuru-sulu ortamdaki sürtünme katsayılarının birbirine oranlanması ile

yağlayıcılık etkisi hesaplanmış ve Şekil 5.13'te görselleştirilmiştir. Şekil 5.13'te görüldüğü üzere, kaplamanın kuru ve sulu ortam sürtünme katsayıları oranlandığında, SiC'ün sulu ortamdaki yağlayıcı etkisi 3 N'a kadar artmakta, ancak bu değerden sonra yağlayıcı etki tekrar azalmaktadır. En iyi yağlayıcı etkiyi ise 2-3 N aralığında göstermektedir. Altlık ve kaplamanın sulu ortam sürtünme katsayıları oranlandığında ise, kaplamanın 1-3 N yük aralığında %55 daha düşük sürtünme direnci gösterdiği ancak 3 N üzeri yüklerde bu etkinin azaldığı belirlenmiştir.

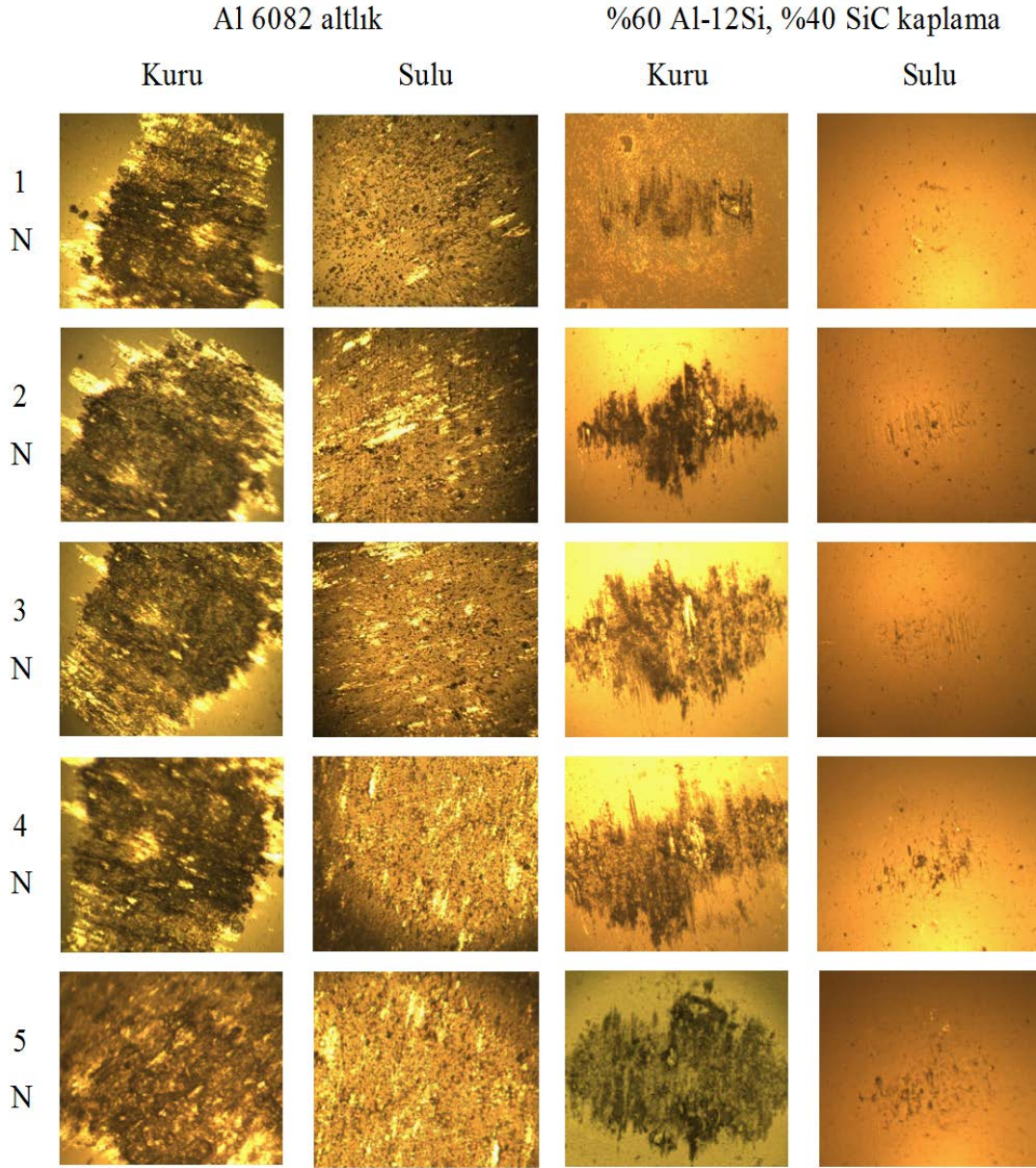


Şekil 5.13 : Altlık ve kaplamanın sulu ortamda, %40 SiC takviyeli kaplamanın kuru ve sulu ortamdaki kararlı sürtünme katsayılarının kıyaslanması.

5.3.3 Aşınma yüzeyleri

Şekil 5.14'te altlık ve kaplamanın aşınma deneylerinde kullanılan Al_2O_3 topun 100x büyütmede çekilmiş aşınma izi fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflardaki koyu bölgeler top üzerine yapışan aşınma ürünleridir. Şekilde görüldüğü gibi deney yükü arttıkça topa yapışan aşınma ürünleri miktarı da artmaktadır. Altlığın sulu ortam deneylerindeki aşınma kayıpları kuru ortama göre daha büyük olmasına rağmen, topun aşınma izleri daha küçüktür. Bu da deneylerde topa yapışan malzeme miktarının artmamasına rağmen altlığın korozyona uğrayarak daha güçlü bir aşınmaya maruz kaldığını göstermektedir. Kaplamanın aşınma deneylerinde kullanılan topun aşınma izleri, altlıkta kullanılabileceğine göre daha küçüktür. Özellikle altlık ve kaplamanın sulu ortam deneyleri kıyaslandığında, topun aşınmasında büyük

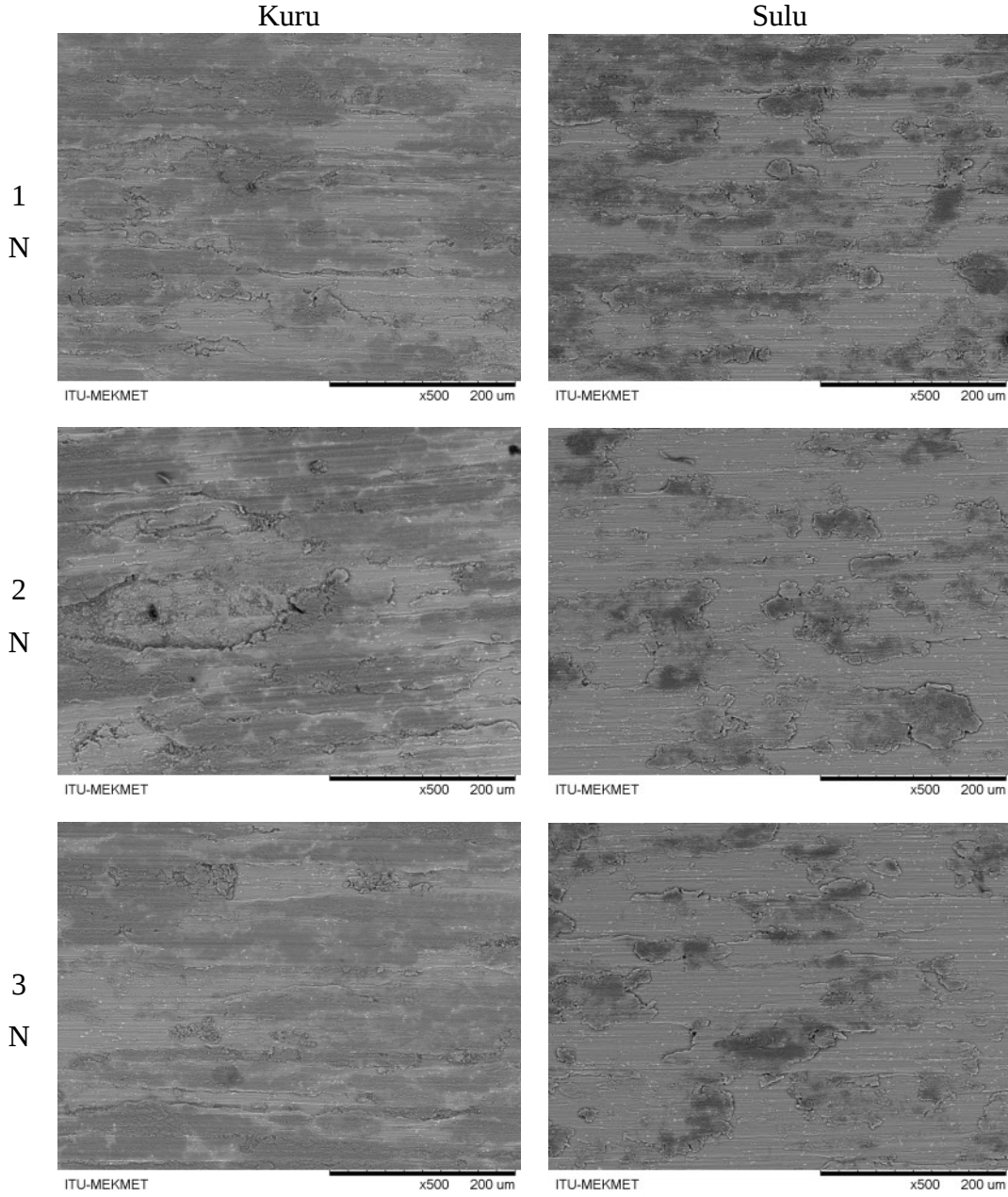
oranda azalma gözlenmektedir. Bu da SiC'ün sulu ortamda yağlayıcı etki gösterdiğini ve topun aşınmasını engellediğini göstermektedir.



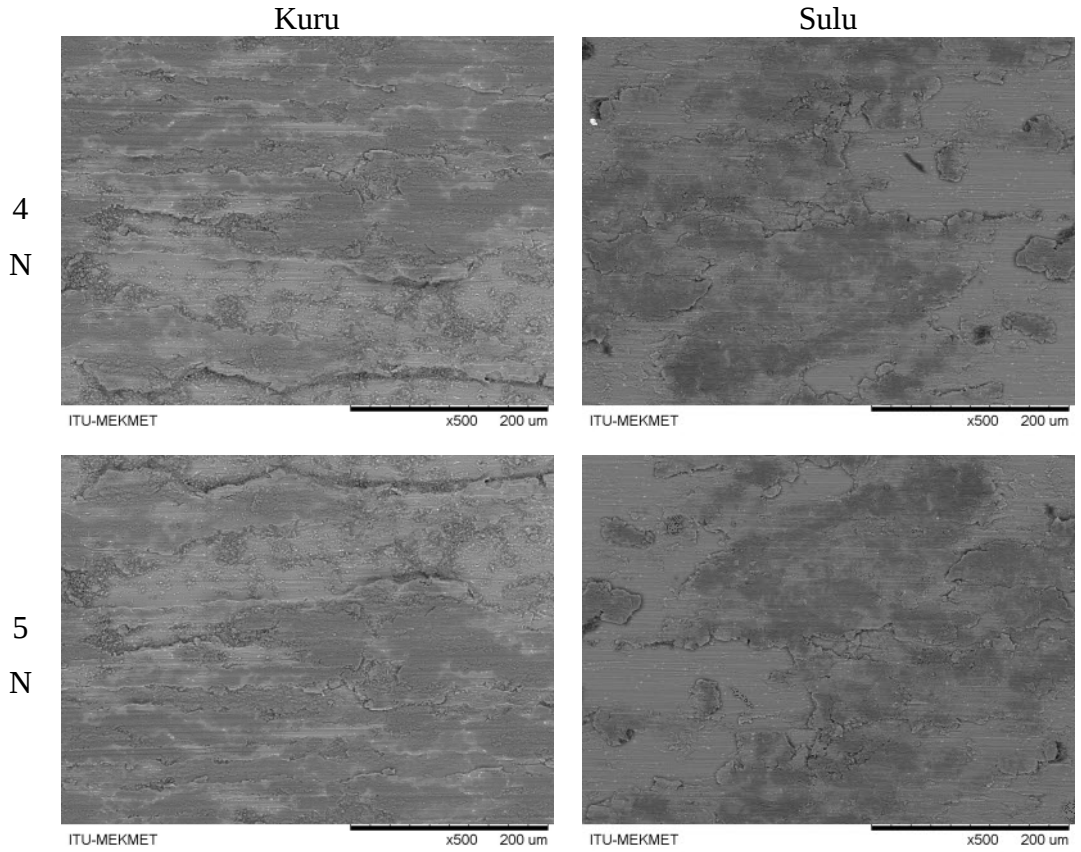
Şekil 5.14 : Al 6082 altlık ve %40 SiC takviyeli kaplamanın, kuru-sulu ortamda, 1 - 5 N yük altındaki aşınma deneylerinde kullanılan Al_2O_3 topun 100x büyütmedeki optik mikroskop aşınma izi görüntüleri.

Al 6082 altlığın, 1-5 N yükler altında, kuru ve sulu ortamda aşındırılması sonucu elde edilen aşınma izlerinin, iz içinden çekilmiş 500x büyütmedeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 5.15'te, 200x büyütmedeki görüntüleri Şekil A.1'de verilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere kuru ortamda ve sulu ortamda aşınma, altlığın delaminasyonu ile gerçekleşmektedir. Bununla beraber, aynı yüklerde sulu ortamdaki tabaka oluşumunun daha fazla olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca sulu ortam

aşınma izi fotoğraflarındaki koyu bölgeler delaminasyonun yanı sıra korozyon ürünlerinin de oluştuğunu göstermektedir.

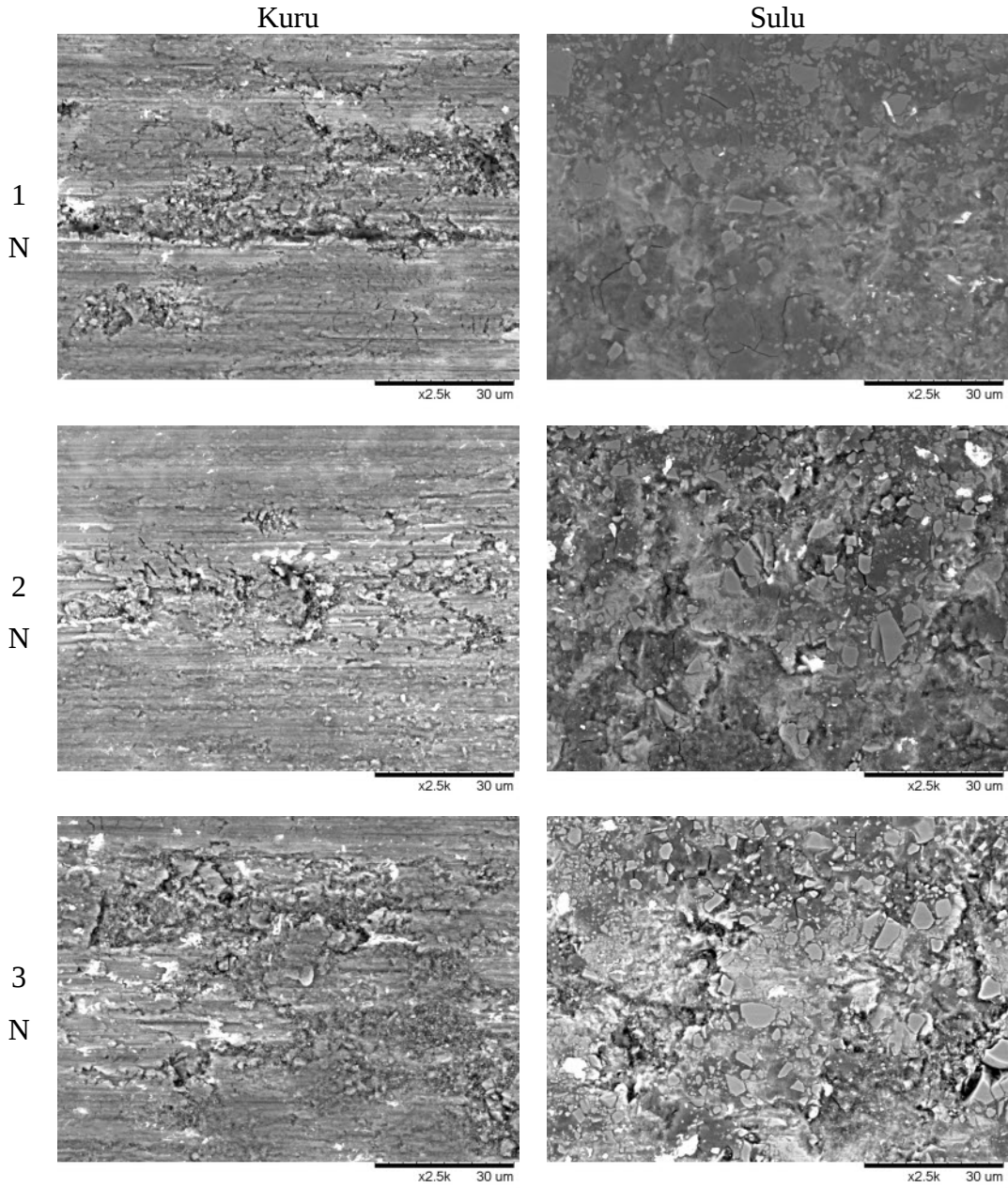


Şekil 5.15 : Al 6082 altlık üzerine, 1-5 N arası yüklerin kuru ve sulu ortamda uygulanması ile oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 500x büyütmedeki tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

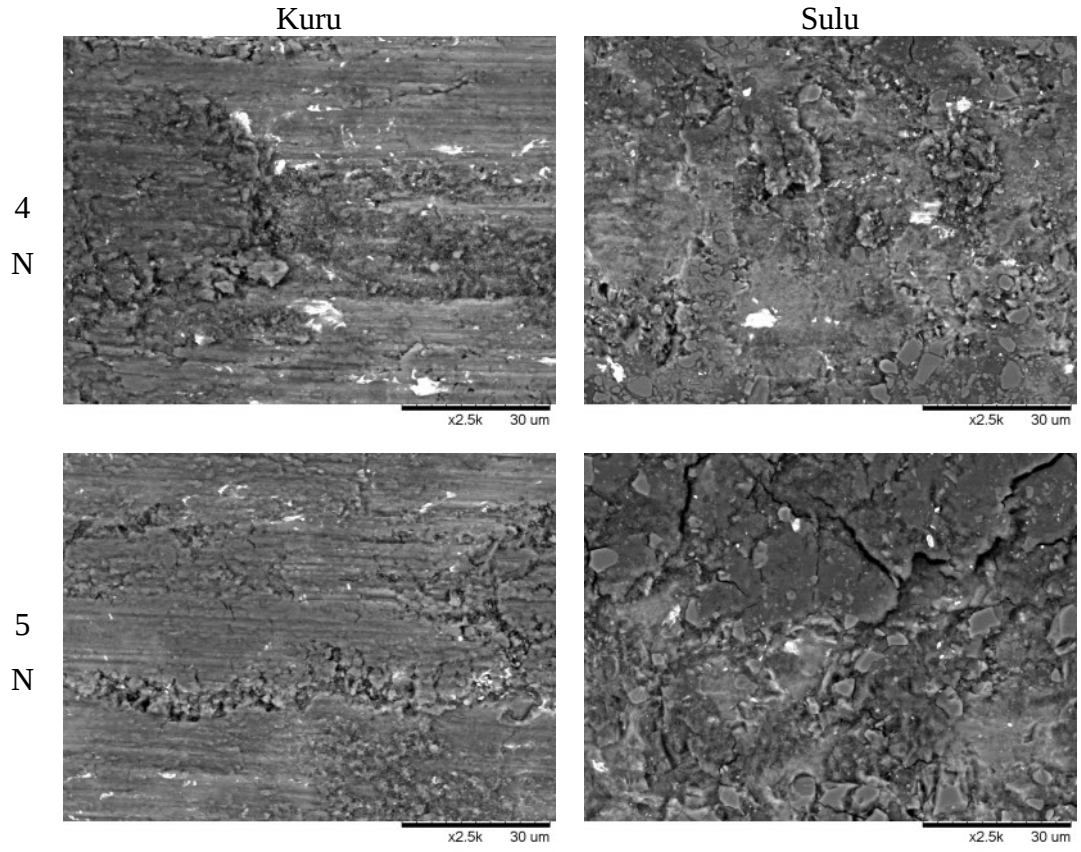


Şekil 5.15 (devam) : Al 6082 altlık üzerine, 1-5 N arası yüklerin kuru ve sulu ortamda uygulanması ile oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 500x büyütmedeki tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

%60 Al-12Si matrisli, %40 SiC takviyeli kompozit kaplamanın, 1-5 N yükler altında, kuru ve sulu ortamda aşındırılması sonucu elde edilen aşınma izlerinin, iz içinden çekilmiş 2500x büyütmedeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 5.16'da verilmiştir. İzlerin 1200x büyütmedeki görüntüleri Şekil A.2'de, 4000x büyütmedeki görüntüleri Şekil A.3'de verilmiştir. Sulu ortam aşınma izlerinin kuru ortama nazaran daha düzgün ve pürüzsüz olduğu tespit edilmiştir. Kuru ortam deneylerinde kaplama üzerinden malzeme koptuğu Şekil 5.16'daki koyu boşluk bölgelerin fazlalığından anlaşılmaktadır ve kopan malzemenin top üzerine yapıştığı Şekil 5.14'te görülmektedir. Kuru ortamda top üzerine yapışan malzeme miktarı deney yükünün artışı ile artmaktadır. Sulu ortam deneylerinde düşük yüklerde tüm karbürlerin kaplama üzerinde kaldığı ve malzeme yapışması sonucu kayıp olmadığı mikroyapı ve top fotoğraflarından anlaşılmaktadır. Ayrıca farklı yüklerde dahi karbürlerin yerlerinden çıkmadığı ve kaplamanın aşınmasını azalttığı gözlemlenmiştir. 1-3 N arası yüklerde aşındırıcı top üzerine malzeme yapışarak aşınma olmadığı ancak 4 ve 5 N'da yapışma mekanizmasıyla kayıplar yaşandığı Şekil 5.14'te de görülmektedir.



Şekil 5.16 : %40 SiC takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 2500x büyütmedeki Tarama Elektron Mikroskobu görüntüleri.



Şekil 5.16 (devam) : %40 SiC takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 2500x büyütmedeki Tarama Elektron Mikroskobu görüntüleri.

6 GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

%60 Al-12Si + %20 Al matrisli, %20 SiC takviyeli; %80 Al-12Si matrisli, %20SiC takviyeli (Kuru Karıştırma ve Mekanik Alaşımlama); %60 Al-12Si matrisli, %40 SiC takviyeli ve %60 Al-12Si matrisli, %40 B₄C takviyeli kompozit kaplamalar Al 6082 altlık üzerine Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme (SDGP) yöntemi ile başarıyla kaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Söz konusu kaplamalar Al 6082 altlık üzerinde iyi yapışma göstermiştir. Matris malzemesinin iyi plastik deformasyonu sayesinde ara yüzeyde herhangi bir boşluk veya süreksizlik gözlenmemiştir.
2. Kaplama işleminde kullanılan harman içerisindeki SiC ve B₄C tanecikleri kaplama yapısında homojen olarak dağılmış, herhangi bir topaklaşma veya yığılma gözlenmemiştir. Ancak yüzeye çarpan SiC ve B₄C taneciklerinin bir kısmında çarpmanın etkisi ile çatlama ve kırılmalar olmuştur. Ayrıca kaplama işlemi sırasında nozülün aşınması sonucu kopan paslanmaz çelik parçacıkları yapı içerisine nüfuz etmiştir.
3. Matris içerisine SiC veya B₄C eklenmesi kaplamanın sertliğinin artmasına neden olmuştur. Aynı oranlarda B₄C ve SiC takviye edilen kompozit kaplamalarda ise B₄C'ün SiC'e nazaran sertliği bir miktar daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Matris malzemesi olarak Al-12Si'a Al tozları ilavesi, yapının sertliğinin düşmesine neden olmaktadır.
4. Aynı kompozisyonlar göz önüne alındığında mekanik alaşımlama ile harmanlanan karışımların kuru karıştırıcıya göre daha ince taneli bir yapıya sahip olduğu ancak biraz daha düşük sertlikle sonuçlandığı tespit edilmiştir. Mekanik alaşımlama ile harmanlanan karışımın kaplanması sonucunda, kuru karıştırmaya nazaran, kaplamaya geçen SiC miktarında düşme gözlenmiştir. Daha yüksek SiC oranlarındaki (>%20) karışımların mekanik alaşımlama ile harmanlanması sonucu, daha yüksek sertlikte ve ince taneli bir kaplamanın elde edilmesi söz konusu olabilir.
5. Kuru ve sulu ortam aşınma deneylerinde gerek altlık malzemesi olan Al 6082'de gerekse Al-12Si matrisli SiC takviyeli kompozit kaplamada yük

arttıkça aşınma izinin ve sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Ancak, %40 SiC takviyeli kaplamalar, Al 6082 altlığı göre özellikle sulu ortamda çok daha yüksek aşınma direnci ve daha düşük sürtünme katsayısı göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Papyrin A.**, 2007, Cold Spray Technology, Chapter 1.
- [2] **Jodoin, B., Ajdelsztajn, L., Sansoucy, E., Zúñiga A., Richer, P., Lavernia, E.J.**, 2006, *Effect of particle size, morphology, and hardness on cold gas dynamic sprayed aluminum alloy coatings*, Surface & Coatings Technology 201, 3422–3429.
- [3] **Karthikeyan, J.**, 2007, *Development of Oxidation Resistant Coatings on GRCop-84 Substrates by Cold Spray Process*, ASB Industries Inc., Barberton, Ohio.
- [4] **Sönmez, C.**, 2009, *Al-12Si ve Al-12Si+Al Matrisli B₄C Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Tekniği ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Danışman Prof. Dr. H. Çimenoglu.
- [5] **Lee, H.Y., Jung, S., H., Lee, S., Y., Ko, K., H.**, 2006, Fabrication of Cold Sprayed Al-intermetallic Compounds Coatings by Post Annealing, Ajou University, South Korea.
- [6] <http://dymet.info/indexe.html> (18.12.2009)
- [7] **Wu J., H., Fang H., Y., Lee L., H., Yoon S., H. and Kim H., J.**, 2006, *Critical and Maximum Velocities in Kinetic Spraying*, Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference, Seattle, Washington, USA.
- [8] **Bartenev S., S., Fedko Y., P. and Grigirov A., I.**, 1982: “Detonation Coatings in Machine Building”, Leningrad: Mashinostroenie (in Russian).
- [9] <http://www.rusonic.com/appli.htm> (02.12.2010)
- [10] **Assadi, H., Gartner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H.**, 2003, *Bonding mechanism in cold gas spraying*, Acta Materialia 51, 4379 - 4394
- [11] **Pressera, V., Nickel, K.G., Krummhauerb, O., Kailerb**, 2009, *A model for wet silicon carbide tribo-corrosion*, Wear 267, 168 – 176
- [12] **Li W.-Y., Zhang C., Guo X., P., Zhang G., Liao H. L., Coddet C.**, 2007, *Deposition Characteristics of Al-12Si Alloy Coating Fabricated By Cold Spraying With Relatively Large Particles*, LERMPS, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France.
- [13] **Zhao, L., Bobzin, K., He, D., Zwick, J., Ernst, F., Lugscheider, E.**, 2006, Advanced Engineering Materials 8, 264 - 267.
- [14] **Wu, J., Yang, J., Fang, H., Yoon, S., Lee, C.**, 2006, Applied Surface Science 252, 7809 - 7814.
- [15] **Wu, J., Fang, H., Yoon, S., Kim, H., Lee, C.**, 2005, Applied Surface Science 252, 1368 - 1377.

- [16] **Sansoucy, E., Marcoux, P., Ajdelsztajn, L., Jodoin, B.,** 2008, *Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process*, Surface & Coatings Technology 202, 3988 – 3996
- [17] **Yandouzi, M., Richer, P., Jodoin, B.,** 2009, *SiC particulate reinforced Al–12Si alloy composite coatings produced by the pulsed gas dynamic spray process: Microstructure and properties*, Surface & Coatings Technology 203, 3260–3270

EKLER

EK A

Çizelge A.1 : Sertlik ölçüm sonuçlarının standart sapmalı ortalama değerleri.

	%60 Al-12Si, %20 Al, %20 SiC		%100 Al12Si %20 SiC		%100 Al12Si %20 SiC	
	Kuru Karıştırma		Kuru Karıştırma		Mekanik Alaşımlama	
	100 g	200 g	100 g	200 g	100 g	200 g
	103	120	172	189	188	206
	121	104	207	190	187	143
	105	101	198	189	176	161
	110	114	169	188	161	158
	152	90	217	186	197	157
	100	106	178	192	185	160
	147	147	210	188	159	154
	111	105	208	191	174	174
	139	94	184	190	177	176
	109	107	192	187	206	150
Ort.	119	109	194	189	181	164
Std.Sapma	20	16	17	2	15	18

	%100 Al12Si %40 SiC					%100 Al12Si %40 SiC				
	Kuru Karıştırma					Kuru Karıştırma				
	25 g	50 g	100 g	200 g	300 g	25 g	50 g	100 g	200 g	300 g
	225	187	200	208	182	290	285	240	205	223
	223	222	221	213	179	292	219	218	203	260
	191	243	229	216	199	202	246	288	226	227
	179	206	239	224	198	204	288	288	210	217
	212	261	239	249	212	257	225	225	225	329
	191	221	248	271	191	197	289	212	209	230
	206	238	258	277	202	297	236	270	227	282
	218	190	258	211	186	307	225	227	236	201
	201	225	257	186	246	235	284	282	205	279
	220	199	219	202	195	189	260	258	205	263
Ort.	207	219	237	226	199	247	255	250	215	251
Std.Sapma	16	25	20	29	20	50	30	31	12	40

Çizelge A.2 : Aşınma izi profillerinden elde edilen genişlik ve derinlik değerleri ile aşınma alanı hesaplarının, ortalama ve standart sapma ile gösterimi.

Al 6082 altlık														
1 N Kuru			2 N Kuru			3 N Kuru			4 N Kuru			5 N Kuru		
Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan
763	24,54	14698	890	26,54	18542	1116	49,87	43689	1122	48,64	42841	1214	29,99	28580
757	18,73	11130	881	27,28	18866	1046	40,40	33173	1093	52,23	44814	1214	62,94	59981
778	24,43	14920	860	26,90	18160	1090	46,76	40010	1081	43,68	37066	1219	68,73	65769
766	22,57	13583	877	26,91	18523	1084	45,68	38957	1099	48,18	41573	1216	53,89	51443
11	3,32	2127	15	0,37	354	35	4,83	5337	21	4,29	4026	3	20,90	20010
Ort.														
Std.Sapma														

Al 6082 altlık														
1 N Sulu			2 N Sulu			3 N Sulu			4 N Sulu			5 N Sulu		
Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan
760	21,70	12946	1075	41,99	35434	1214	55,89	53263	1323	66,11	68659	1290	68,37	69235
733	20,75	11940	1069	44,24	37125	1225	57,24	55043	1317	68,75	71077	1358	74,98	79931
775	22,19	13500	948	35,54	26448	1131	49,70	44125	1290	62,09	62875	1337	71,13	74654
756	21,55	12795	1031	40,59	33002	1190	54,28	50810	1310	65,65	67537	1328	71,49	74607
21	0,73	791	72	4,52	5739	51	4,02	5858	18	3,35	4214	35	3,32	5348
Ort.														
Std.Sapma														

%60 Al-12Si, %40 SiC														
1 N Kuru			2 N Kuru			3 N Kuru			4 N Kuru			5 N Kuru		
Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan
443	7,62	2650	542	11,52	4901	683	20,25	10857	707	22,05	12238	751	24,67	14544
434	6,88	2344	551	10,31	4459	657	16,91	8721	666	17,80	9306	722	19,47	11035
445	8,42	2941	536	11,25	4734	624	14,69	7196	645	17,37	8795	757	25,30	15034
441	7,64	2645	543	11,03	4698	655	17,28	8925	673	19,07	10113	743	23,15	13538
6	0,77	299	8	0,64	223	30	2,80	1839	32	2,59	1858	19	3,20	2181
Ort.														
STDsapma														

%60 Al-12Si, %40 SiC														
1 N Sulu			2 N Sulu			3 N Sulu			4 N Sulu			5 N Sulu		
Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan	Genişlik	Derinlik	Alan
116	0,36	33	282	2,64	584	300	3,28	772	401	6,90	2172	410	6,34	2041
128	0,55	55	282	2,72	602	303	3,02	718	405	5,79	1841	451	7,58	2684
180	0,58	82	262	2,30	473	262	2,46	506	390	5,35	1638	419	6,82	2243
141	0,50	57	275	2,55	553	288	2,92	666	399	6,01	1884	427	6,91	2322
34	0,12	25	12	0,22	70	23	0,42	141	8	0,80	270	22	0,63	329
Ort.														
STDsapma														

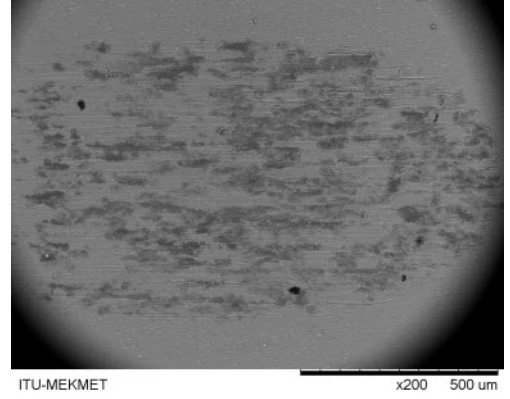
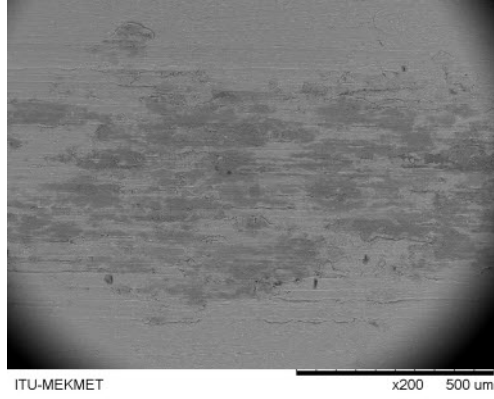
Çizelge A.3 : Al 6082 altlık ve %40 SiC takviyeli kaplama için farklı yüklerdeki kuru ve sulu ortam sürtünme katsayısı değerleri.

Aşınma Yüğü	Sürtünme Katsayısı			
	Al 6082 - Sulu	Al 6082 - Kuru	%40 SiC - Kuru	%40 SiC - Sulu
1	0,47	0,42	0,35	0,30
2	0,48	0,44	0,45	0,31
3	0,50	0,47	0,48	0,32
4	0,50	0,50	0,47	0,40
5	0,50	0,51	0,48	0,43

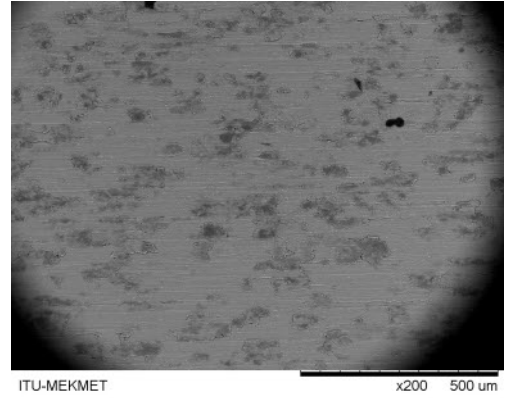
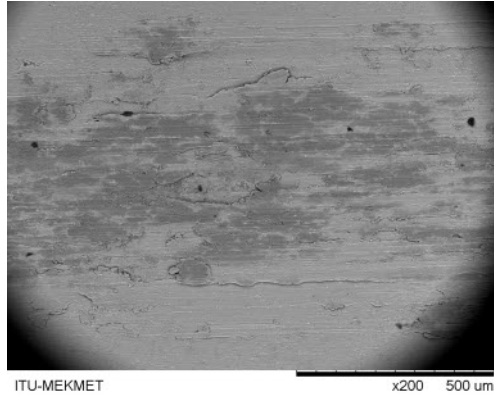
Kuru

Sulu

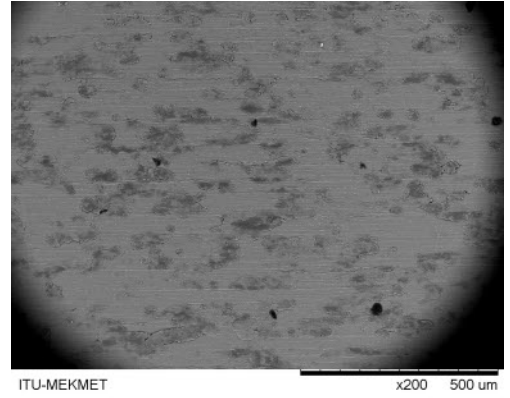
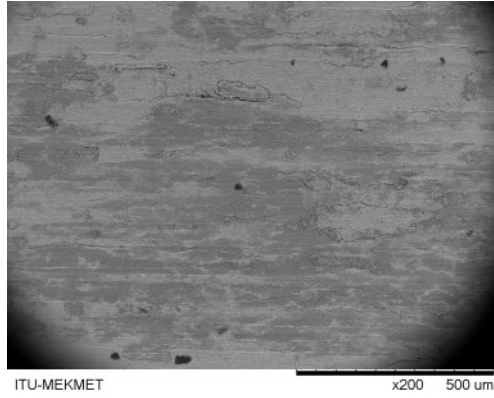
1
N



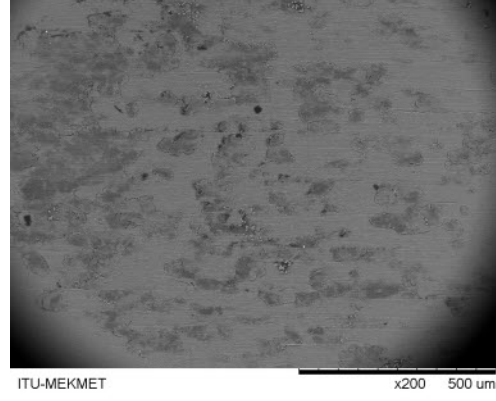
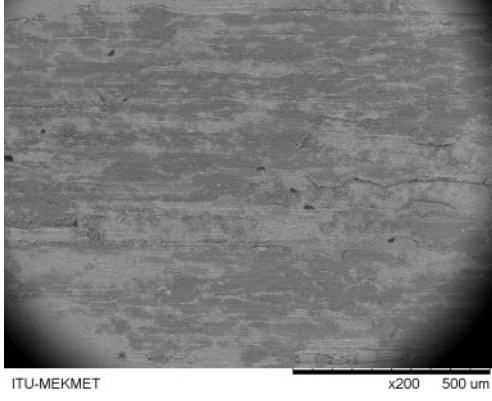
2
N



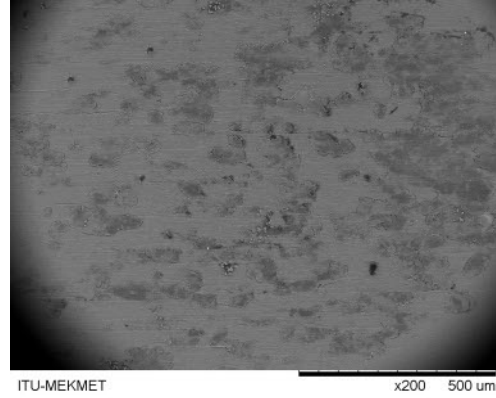
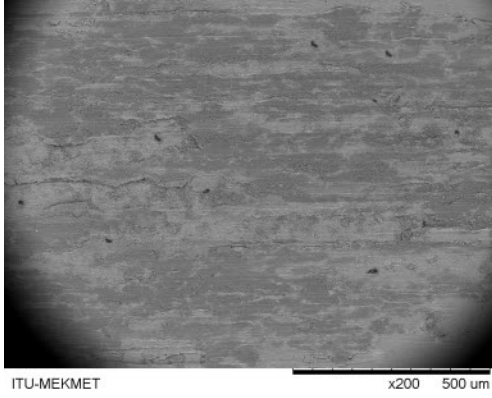
3
N



4
N



5
N

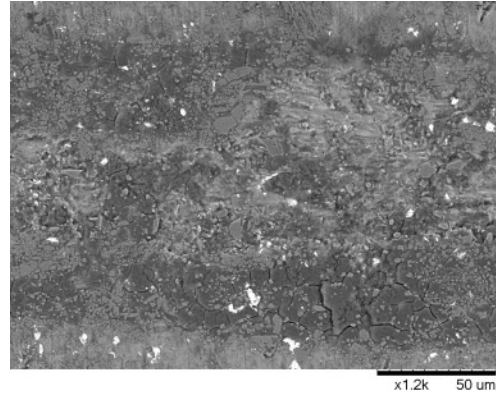
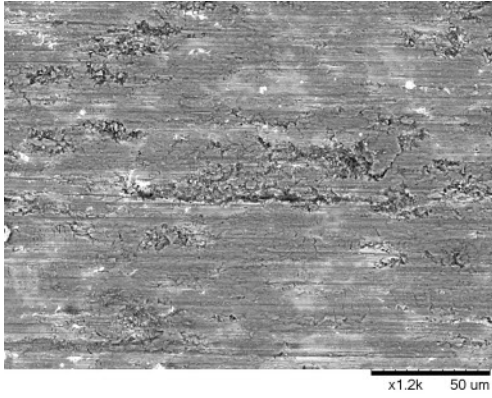


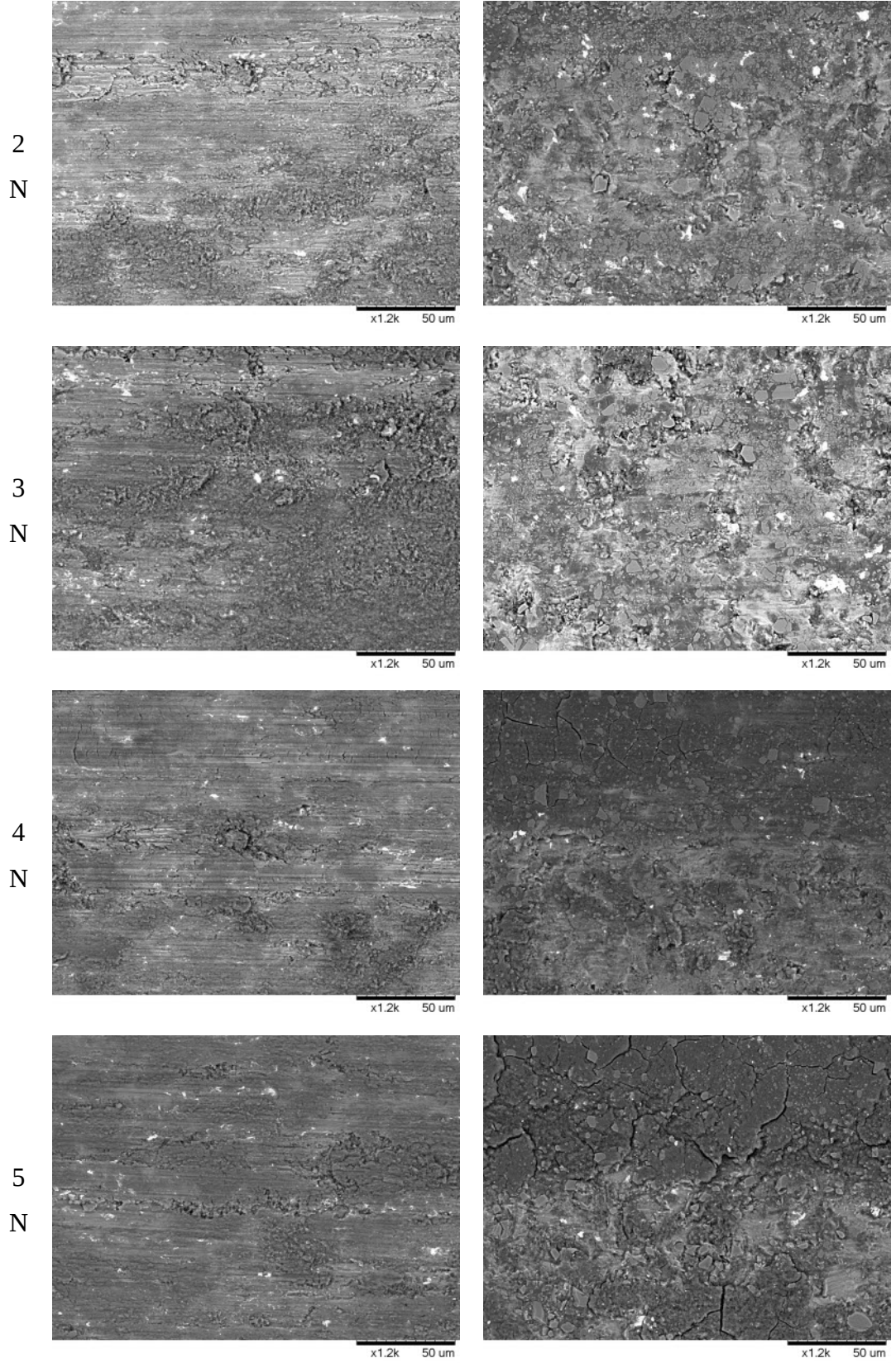
Şekil A.1 : Al 6082 altlık üzerine, 1-5 N arası yüklerin kuru ve sulu ortamda uygulanması ile oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 200x büyütmedeki tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri.

Kuru

Sulu

1
N



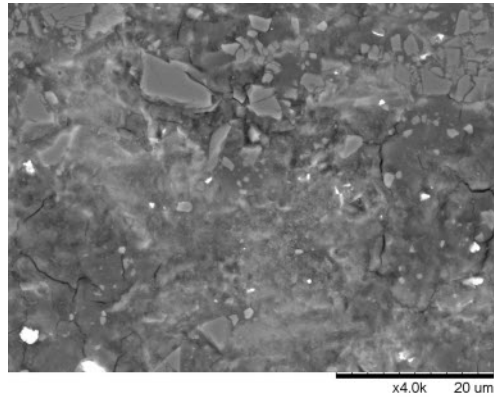
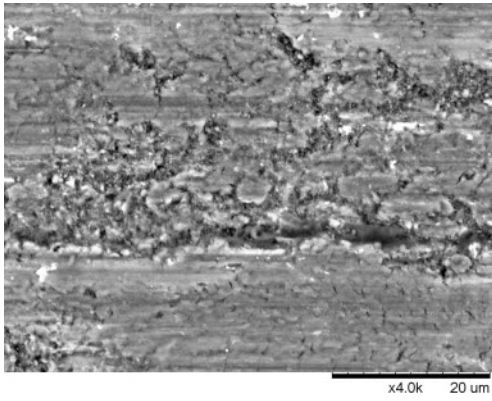


Şekil A.2 : %40 SiC takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 1200x büyütmedeki Tarama Elektron Mikroskobu görüntüleri

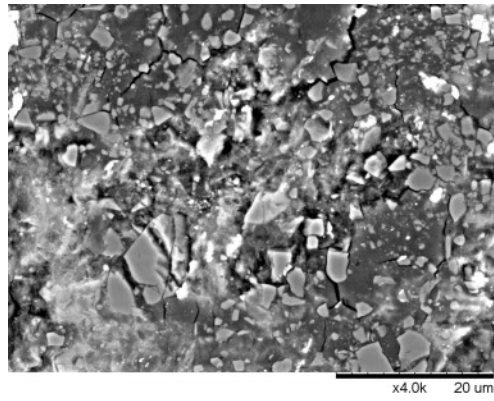
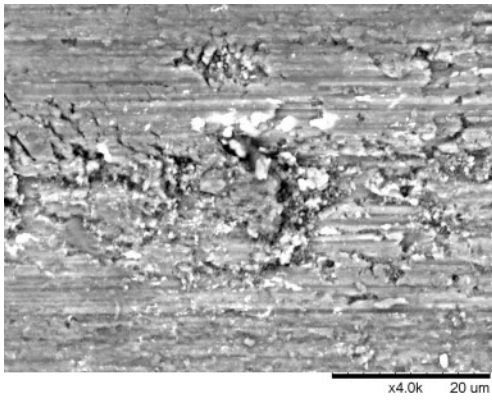
Kuru

Sulu

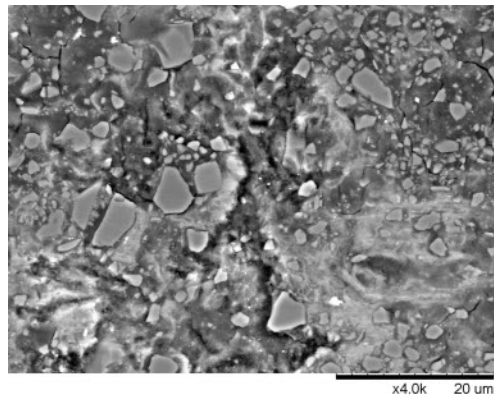
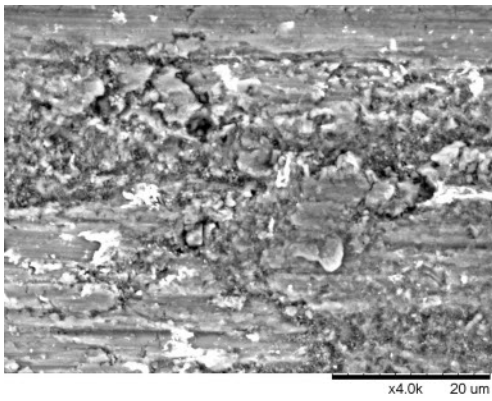
1
N



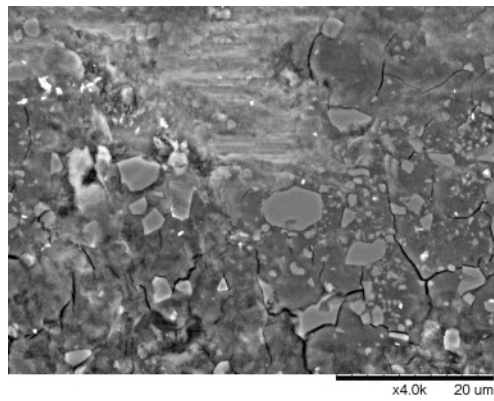
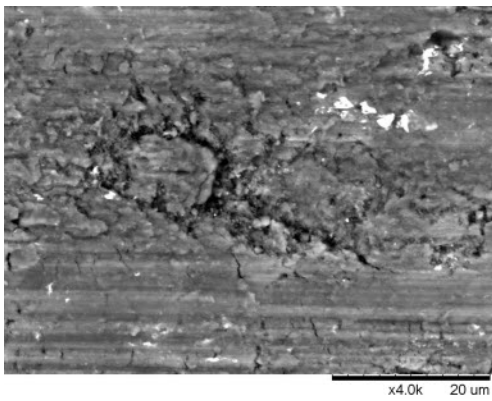
2
N



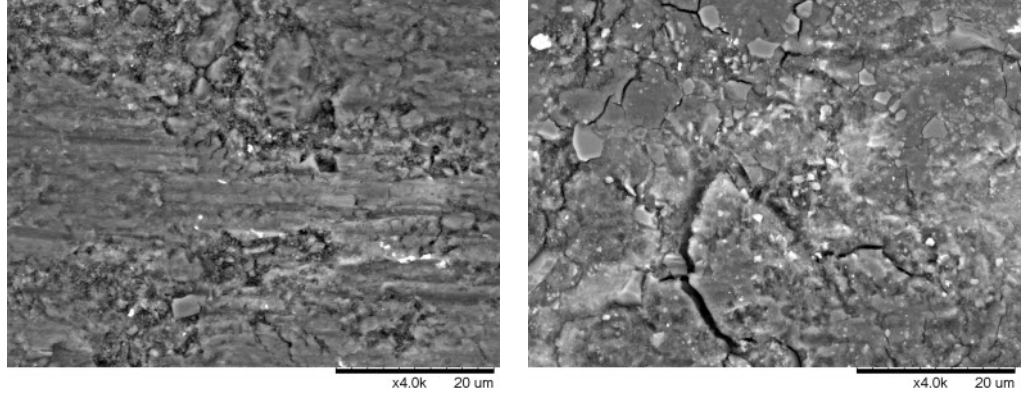
3
N



4
N



5
N

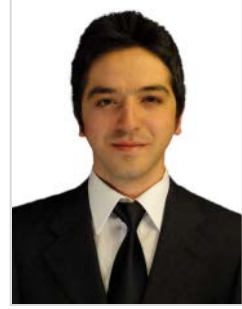


Şekil A.3 : %40 SiC takviyeli kompozit kaplama üzerine, 1-5 N arası yüklerde kuru ve sulu ortamda oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan 4000x büyütmedeki Tarama Elektron Mikroskobu görüntüleri.

ÖZGEÇMİŞ

Salih Emrah BAYRAK

Doğum Tarihi: 1983
Doğum Yeri: Eskişehir, Türkiye
Vatandaşlık: T.C.
Medeni Hali: Bekar



EĞİTİM

- 2010 Oca – Tem** **Eindhoven University of Technology (TU/e)**, Hollanda
Malzeme ve Arayüzey Grubu (SMG)
Araştırma Projesi (Ort. 8,5/10)
- 2007 – 2010** **İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)**, İstanbul
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Prog. (Ort. 3,00/4,00)
- 2001 – 2007** **Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ)**, İstanbul
Kimya-Metalurji Fakültesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (Ort. 2,98/4,00)

PROJELER ve YAYINLAR

- 2010** **Tasarım Projesi, Hipaş Hidrolik A.Ş.** – Mutfak aletleri için hassas bıçak bileme işlemi yapan sisteme, ürün besleme ve tahliye birimi projelendirilmesi. Sistem tasarımı ve 3D çizimlerin yapılması.
- 2009** **Tasarım Projesi, Macera Akademisi Ltd. Şti.** - 7 metre yüksekliğinde ve sökülüp takılabilir bir yapıya sahip, yapay tırmanış duvarı tasarımı.
- 2008** **Tasarım Projesi, Macera Akademisi Ltd. Şti.** - Araç ile çekilebilen ve 9 kano taşıyabilen römork tasarımı projesinde proje yönetimi. Solidworks/Catia ile konsept ve nihai tasarımın yapılması, AnSYS ile yapısal analizlerin yapılması ve üretim sürecinin denetlenmesi.
- 2010** **Makale, TU/e** - P.P. Koets, S.E. Bayrak, J. Laven, G. de With,
Küresel Nano-Boşluklu TiO₂ İleri Seramiklerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu. (yazım aşamasında)
- 2010** **Makale, İTÜ** - S.E. Bayrak, H. Cimenoglu, O. Meydanoglu,
Alüminyum Matrisli SiC ve B₄C Takviyeli Kompozitlerin Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yöntemi ile Üretilmesi, Kuru ve Sulu Ortam Aşınma Davranışları. (yazım aşamasında)