

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALTLIK MALZEME SERTLİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN SOĞUK GAZ  
DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE YAPILAN KAPLAMALARIN  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Özlem ÇETİN**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme Mühendisliği Programı**

**MAYIS 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALTLIK MALZEME SERTLİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN SOĞUK GAZ  
DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE YAPILAN KAPLAMALARIN  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Özlem ÇETİN  
(506121417)**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**

**MAYIS 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121417 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Özlem ÇETİN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ALTLIK MALZEME SERTLİK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE YAPILAN KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Erdem ATAR**      .....

Gebze Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **4 Mayıs 2015**

**Savunma Tarihi :**      **21 Mayıs 2015**



*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince beni destekleyen, teşvik eden, bilgi birikimini ve yardımlarını benden esirgemeyen ve danışmanlığımı üstlenen değerli hocam Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya,

Tezimde kullandığım bakır numunelerimi temin eden SARKUYSAN'a,

Tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan Arş. Gör. Onur TAZEGÜL'e ve laboratuvar çalışmalarım sırasında emeği geçen Arş. Gör. Emre TEKOĞLU'na ve Arş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e,

Zor anlarımda yardımına koşan ve beni yalnız bırakmayan arkadaşım Hasret Ece SÖNMEZ'e,

Deneysel çalışmalarımda yardımcı olan arkadaşlarım Zafer ÇETİN'e ve Ecem ÇIKIT'a,

Tüm hayatım boyunca sevgilerini ve desteklerini eksik etmeyen babam Hikmet ÇETİN, annem Mukadder ÇETİN ve ağabeyim Özcan ÇETİN'e,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2015

Özlem ÇETİN  
Metalurji ve Malzeme Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ.....</b>	<b>3</b>
2.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemi .....	3
2.1.1 SGDP tarihçesi .....	3
2.1.2 SGDP tanımı .....	4
2.1.3 Uygulama alanları .....	8
2.2 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemini Etkileyen Parametreler .....	8
2.2.1 Kullanılan tozun özellikleri.....	8
2.2.2 Nozül geometrisi .....	10
2.2.3 Gaz türü.....	11
2.2.4 Gaz basıncı.....	12
2.2.5 Gaz sıcaklığı.....	13
2.2.6 Nozül ile altlık arasındaki mesafe .....	14
2.3 Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yönteminin Diğer Termal Sprey Yöntemleri ile Karşılaştırılması .....	15
2.3.1 Soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminin avantajları.....	15
2.3.2 Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin dezavantajları .....	17
2.4 Literatürdeki Örnek Çalışmalar.....	17
<b>3. BAĞLANMA MEKANİZMASI.....</b>	<b>21</b>
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>29</b>
4.1 Prosesi Etkileyen Parametrelerin Seçilmesi ve Numunelerin Hazırlanması....	29
4.1.1 Altlık malzemenin sertliği.....	29
4.1.2 Altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğü .....	30
4.1.3 Nozül-altlık arası mesafe .....	31
4.2 Kaplama İşlemi ve Karakterizasyon Testleri .....	32
4.2.1 Kaplama işlemi .....	32
4.2.2 Mikroyapısal incelemeler.....	33
4.2.3 Sertlik ölçümü .....	33
4.2.4 Kaplama yoğunluğu ölçümü .....	34
4.2.5 Yapışma mukavemeti ölçümü.....	35
4.2.6 Elektrik iletkenliği ölçümü.....	35
<b>5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>37</b>
5.1 Mikroyapısal İnceleme Sonuçları.....	37

5.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları .....	48
5.3 Yapışma Mukavemeti Ölçüm Sonuçları .....	51
5.4 Elektrik İletkenliği Ölçüm Sonuçları.....	61
<b>6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>71</b>

## KISALTMALAR

<b>SGDP</b>	: Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>XRD</b>	: X-ışınları Difraksiyonu
<b>HV</b>	: Vickers Sertlik Değeri
<b><math>T_m</math></b>	: Ergime Sıcaklığı
<b><math>T_R</math></b>	: Referans Sıcaklığı
<b><math>\rho</math></b>	: Yoğunluk
<b><math>T_i</math></b>	: Çarpma Sıcaklığı
<b><math>\sigma_u</math></b>	: Akma Gerilmesi
<b><math>R_a</math></b>	: Yüzey Pürüzlülüğü
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>PÇ</b>	: Paslanmaz Çelik
<b><math>F_d</math></b>	: Sürüklenme Kuvveti
<b><math>V_g</math></b>	: Gaz Hızı
<b><math>V_p</math></b>	: Toz Hızı
<b>M</b>	: Mach Sayısı
<b><math>M_w</math></b>	: Molekül Ağırlığı
<b>R</b>	: Gaz Sabiti
<b><math>\gamma</math></b>	: Öz Isı Oranı
<b><math>C_d</math></b>	: Sürüklenme Katsayısı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : Malzemelerin sahip oldukları yaklaşık kritik hızları.....	7
<b>Çizelge 2.2</b> : Kullanılan gazların özellikleri.....	11
<b>Çizelge 4.1</b> : Uygulanan işlem ve elde edilen Cu altlık sertliği ile sahip oldukları ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri .....	30
<b>Çizelge 4.2</b> : Hazırlanan altlık numunelerinin yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleri..	31
<b>Çizelge 4.3</b> : Hazırlanan altlık numunelerinin yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleriyle birlikte kaplamalarda kullanılan nozül-altlık arası mesafeler.....	31
<b>Çizelge 4.4</b> : SGDP yönteminde kullanılan parametreler.....	32
<b>Çizelge 5.1</b> : Kaplama porozitesi değerlerinin karşılaştırılması.....	60



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : SGDP yöntemi ekipmanlarının şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2 : SGDP yönteminde kaplama oluşumu.....	5
Şekil 2.3 : Toz boyutu ve çarpma hızının püskürtülecek malzemenin altlık üzerine çarptığında meydana gelecek olan mekanizmaya etkisi .....	6
Şekil 2.4 : Toz hızı ile birikme verimi arasındaki ilişki.....	6
Şekil 2.5 : SGDP uygulama yerleri; a) erozyona karşı boru iç ve dış çeper kaplama b) elektrik iletkenliği olan kaplamalar c) kaynak dikişi koruma 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 .....	8
Şekil 2.6 : Toz çapı ile toz hızı arasındaki ilişki .....	9
Şekil 2.7 : Toz yoğunluğu ile tozun nozül çıkış hızı arasındaki ilişki .....	9
Şekil 2.8 : Nozül çıkış çapı ile toz hızı arasındaki ilişki .....	10
Şekil 2.9 : Gaz türüne göre toz hızının değişimi .....	12
Şekil 2.10 : Gaz basıncı ile kaplama porozitesi arasındaki ilişki .....	13
Şekil 2.11 : Gaz sıcaklığı ile porozite miktarı arasındaki ilişki .....	14
Şekil 2.12 : Gaz sıcaklığı ile kaplama sertliği arasındaki ilişki .....	14
Şekil 2.13 : Nozül-altlık arası mesafe ile toz hızı arasındaki ilişki .....	15
Şekil 2.14 : Morfoloji görüntüleri: a)Yüzey, Al5052 altlık b) Kesit, Al5052 c)Yüzey, PÇ altlık, d) Kesit, PÇ altlık .....	19
Şekil 3.1 : Paslanmaz çelik altlık üzerine 700 m/s hızlar çarpan Cu tozlarıyla elde edilen yüzeyin enine kesit görüntüsü.....	22
Şekil 3.2 : 20 µm boyutu sahip alüminyum tozlarının 650 m/s hızla bakır altlığa çarptıktan sonraki şekil değişimleri a)5ns b)20ns c)35ns d)50 ns .....	23
Şekil 3.3 : 20 µm boyutu sahip bakır tozlarının 650 m/s hızla alüminyum altlığa çarptıktan sonraki şekil değişimleri a)5 ns b)20 ns c)35 ns d)50 ns .....	24
Şekil 3.4 : Farklı durumlardaki gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.5 : Bakır tozunun 500 m/s hızla bakır altlık yüzeyine çarpmasından 24 ns sonra elde edilen plastik şekil değiştirme ve sıcaklık değişimleri .....	26
Şekil 3.6 : Hıza göre değişen yassılaşma oranı.....	27
Şekil 3.7 : Simüle edilmiş bakır altlık üzerindeki bakır partikülünün çarpışması, ilk hızları 500 m/s ve 600 m/s'dir.....	27
Şekil 4.1 : MECAPOL marka zımparalama ve parlatma cihazı.....	30
Şekil 4.2 : Veeco Dektak 6M profilometre cihazı.....	31
Şekil 4.3 : RUSONIC marka SGDP cihazı.....	32
Şekil 4.4 : Hitachi TM1000 masaüstü taramalı elektron mikroskobu.....	33
Şekil 4.5 : Shimadzu marka HMV model mikro sertlik cihazı.....	34
Şekil 4.6 : Hassas terazi ve Arşimet düzeneği.....	34

<b>Şekil 4.7 :</b> Shimadzu marka çekme testi cihazı.....	35
<b>Şekil 5.1 :</b> 55HV, 107HV, 140HV sertliğine sahip Cu altlık malzemeler kullanılarak yapılan Cu kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	38
<b>Şekil 5.2 :</b> Altlık sertliğinin kaplama kalınlığına etkisi.....	39
<b>Şekil 5.3 :</b> Altlık sertliğinin kaplama porozitesine etkisi.....	39
<b>Şekil 5.4 :</b> Cu tozları kullanılarak 5,10,20 ve 30 mm nozül-altlık arası mesafeler ayarlanarak yapılan kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	40
<b>Şekil 5.5 :</b> Nozül ile altlık arası mesafenin birikme verimi üzerindeki etkisi.....	41
<b>Şekil 5.6 :</b> Altlıktaki ses üstü çarpma zonu şematik gösterimi.....	42
<b>Şekil 5.7 :</b> Nozül-altlık arası mesafenin kaplama kalınlığına etkisi.....	43
<b>Şekil 5.8 :</b> Nozül-altlık arası mesafenin kaplama porozitesine etkisi.....	44
<b>Şekil 5.9 :</b> Farklı yüzey pürüzlülük değerlerine (1.7µm, 1.09µm, 0.46µm ve 0.06µm) sahip Cu altlıklar kullanılarak yapılan Cu kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....	45
<b>Şekil 5.10 :</b> Farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip altlık malzeler üzerine püskürtülen tozların enine kesit simülasyon görüntüleri.....	46
<b>Şekil 5.11 :</b> Yüzey pürüzlülüğünün kaplama kalınlığına etkisi.....	47
<b>Şekil 5.12 :</b> Yüzey pürüzlülüğünün kaplama porozitesine etkisi.....	48
<b>Şekil 5.13 :</b> Kaplama yoğunluğu ölçümü sonuçları.....	48
<b>Şekil 5.14 :</b> Altlık sertliğinin kaplama sertliğine etkisi.....	49
<b>Şekil 5.15 :</b> Nozül-altlık arası mesafenin kaplama sertliğine etkisi.....	50
<b>Şekil 5.16 :</b> Altlık yüzey pürüzlülüğünün kaplama sertliğine etkisi.....	50
<b>Şekil 5.17 :</b> Farklı özelliklere sahip kaplamaların XRD grafikleri.....	52
<b>Şekil 5.18 :</b> Çekme testi sonuçları elde edilen yapışma mukavemeti değerleri.....	53
<b>Şekil 5.19 :</b> Adhesif ve kohezif hata türüne örnek.....	53
<b>Şekil 5.20 :</b> Yapışma mukavemeti sonrası altlık malzeme ve üstünde kalan kaplamanın (sol taraf) ve kaplamadan kopan (sağ taraf) parçaların makro fotoğrafları.....	54
<b>Şekil 5.21 :</b> 120 HV sertliğe ve 0.06 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip Cu altlık üzerine 20 mm nozül-altlık arası mesafesi ile yapılan Cu kaplamanın yapışma mukavemetinden sonra kopan kaplama parçasından çekilen 4000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	55
<b>Şekil 5.22 :</b> Farklı koşullar altında yapılan Cu kaplamaların çekme/yapışma dayanımları.....	57
<b>Şekil 5.23 :</b> Yapışma mukavemeti sonrası altlık malzeme ve üstünde kalan kaplamanın (sol taraf) ve kaplamadan kopan (sağ taraf) parçaların makro fotoğrafları.....	58
<b>Şekil 5.24 :</b> 120 HV sertliğe ve 0.06 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip Cu altlık üzerine 20 mm nozül-altlık arası mesafesi ile yapılan Cu kaplamanın yapışma mukavemetinden sonra kopan kaplama parçasından çekilen 4000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	58
<b>Şekil 5.25 :</b> Yapışma mukavemeti sonrası altlık malzeme ve üstünde kalan kaplamanın (sol taraf) ve kaplamadan kopan (sağ taraf) parçaların makro fotoğrafları.....	59
<b>Şekil 5.26 :</b> 120 HV sertliğe ve 0.46 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip Cu altlık üzerine 10 mm nozül-altlık arası mesafesi ile yapılan Cu kaplamanın yapışma mukavemetinden sonra kopan kaplama parçasından çekilen 4000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	60

# ALTLIK MALZEME SERTLIK VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE YAPILAN KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

## ÖZET

Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi 1980'li yılların ortalarında Rus Profesör Anatolii Papyrin ve onun meslektaşları tarafından keşfedilen yeni bir kaplama tekniğidir ve son yirmi yıl içinde hızla gelişmiştir. Bu yöntemde, küçük toz boyutundaki (genellikle 1-50 $\mu$ m) partiküller sıkıştırılmış gaz sayesinde ses üstü hızlara çıkartılır ve partiküllerin altlık üzerine çarpıp plastik deformasyona uğramasıyla birlikte sistemdeki düşük sıcaklıklar sayesinde katı halde bir kaplama oluşmaktadır.

Geleneksel termal püskürtme yöntemleriyle karşılaştırıldığında soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kullanılan düşük sıcaklıklar kaplama esnasında birçok avantaj sağlamaktadır. Soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinde püskürtülen partikülün ergime sıcaklığının çok altındaki sıcaklıkta bir gaz akımı kullandığı için oksidasyon, ergime, yeniden kristalleşme, kalıntı gerilme ve kopma gibi termal yöntemlerindeki püskürtme yöntemlerinde karşılaşılan yüksek sıcaklığın zararlı etkileri en aza indirgenir.

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde püskürtülen tozların sahip olduğu kritik hız kaplama oluşumunu etkileyen en önemli parametre olarak kabul edilir. Optimum kaplama verimi ve kaplama yoğunluğu (düşük porozite) için yüksek hız gereklidir. Partikülün altlık yüzeyine birikmesi için kritik bir hız değeri vardır. Bu sebeple çeşitli parametreler ve onların toz hızı üzerinde etkisini incelemek için bu zamana kadar birçok çalışma yapılmıştır. Toz hızıyla ilgili yapılan sayısızca çalışma olmasına rağmen, altlık sertliği, altlık yüzey pürüzlülüğü ve nozül-altlık arası mesafenin toz birikmesi üzerindeki etkisi üzerine sadece birkaç araştırmacı yoğunlaşmıştır ve bu çalışmanın amacı da soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemini etkileyen altlık sertliği, altlık yüzey pürüzlülüğü ve nozül-altlık arası mesafe parametrelerini incelemektir.

Altlık sertliğinin kaplama oluşumu üzerindeki etkisini irdelemek için farklı ısıtma işlemleri (275 °C ve 285 °C'de bir saat ) uygulanarak 55 HV ve 107 HV sertliğe sahip bakır altlık malzemeleri elde edilmiştir. Daha yüksek bir sertlik elde etmek amacıyla %85 deformasyon oranı sağlayan basma testi uygulanarak 140 HV sertliği elde edilmiştir. Altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğünün kaplama oluşumu üzerindeki etkisini incelemek için çeşitli metalografik işlemlerle farklı ortalama yüzey pürüzlülüklerine (1.7  $\mu$ m, 1.09  $\mu$ m, 0,46  $\mu$ m ve 0,06  $\mu$ m) sahip dört altlık malzemesi elde edilmiştir. Nozül-altlık arası mesafenin kaplama üzerindeki etkisini incelemek için 5 mm, 10 mm, 20 mm ve 30 mm olmak üzere dört farklı uzaklık değeri seçilmiştir.

Bu çalışmada küresel bakır tozları (d=10  $\mu$ m, %99,9) yüksek saflıktaki Cu altlıkların üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle kaplanmıştır. Boru şeklinde daralan-genişleyen boru tipi bir nozül kullanılmıştır. Tozlar nozülden proseste

kullanılan hava akımına beslenmiştir. Çalışma gazı olarak 6 bar basınca sahip sıkıştırılmış hava kullanılmıştır. Sıkıştırılmış havanın sıcaklığı 400-600 °C arasında değişmiştir.

Kaplamaların karakterizasyonu mikroskopik incelemeler, sertlik, yapışma mukavemeti ve elektrik iletkenliği ölçümleri ile yapılmıştır. Mikroyapısal karakterizasyon optik ile taramalı elektron mikroskop incelemeleri ve X-ışınları difraksiyon analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri kullanılarak kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Kaplama poroziteleri görüntü analiz cihazı ile ölçülmüştür. Kaplama yoğunluğu ölçümleri Arşimet prensibine göre çalışan bir cihaz ile yapılmıştır. Sertlik ölçümleri mikrovickers ölçüm cihazı ile belirlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda genel olarak Cu tozları bakır altlıklar üzerine iyi yapışarak kaplama/altlık arasında boşluk ve/veya süreksizlik görülmemiştir. 140 HV altlık sertliğine sahip Cu numune ile yapılan kaplamada en iyi kaplama özellikleri elde edilmiştir.  $R_a=0,46 \mu\text{m}$  durumda en iyi kaplama özellikleri elde edilmiştir ve 20 mm nozül-altlık arası mesafe bu proses için optimumdur. Çekme testi ile kaplamaların ortalama yapışma mukavemetinin 20 N/mm<sup>2</sup> (MPa) civarında olduğu saptanmıştır. Kaplama sonrası elektrik iletkenliğinin büyük oranda ( $\approx\%50$ ) düştüğü belirlenmiştir.

# **EFFECT OF SUBSTRATE HARDNESS AND SURFACE PROPERTIES ON COATINGS PROPERTIES THROUGH COLD GAS DYNAMIC SPRAY TECHNIQUE**

## **SUMMARY**

Cold spraying is a new coating technique that was developed by the Russian Professor Anatolii Papyrin and his colleagues in the mid-1980s and has been rapidly developing during the past two decades. In this process, small particles (usually 1–50  $\mu\text{m}$  in diameter) are accelerated by a supersonic jet of compressed gas at a temperature that is always lower than the melting point of the material, and then a coating is occurred through the intensive plastic deformation of particles impacting on a substrate in solid state.

It is believed that the coating formation in cold gas dynamic spray is based on conversion of the particles' high kinetic energy to plastic deformation during impacting of particles on the substrate. The observation that various ductile materials can easily be deposited but brittle materials cannot unless they are mixed with a ductile material supports the idea that bonding mechanism is severe plastic deformation of spray particles. Therefore, spray particles should have enough kinetic energy to undergo plastic deformation and thus achieve deposition. This evidence provides an explanation to the critical velocity that is the minimum velocity necessary to achieve deposition.

Actual bonding mechanism could not be understood clearly in the early days of the cold gas dynamic spraying technology. Some scientists claimed that it was necessary for particles accelerated in a gas stream to reach their melting point or a temperature close to their melting point in order to be deposited when they impacted on the substrate surface. On the other hand, some researchers defended the idea that there were no physical changes during coating formation.

Today bonding mechanism has not still been clearly understood and is of great interest. Numerous studies have been conducted in order to investigate the spray particle-substrate and spray particle-spray particle bonding mechanisms. All studies have shown that upon impact of spray particles with high velocity onto the substrate the kinetic energy of the particles is spent for plastic deformation of the particles induced by adiabatic shear stress and for local heat release as well. Disagreement between researchers is whether the amount of heat dissipated upon impact is sufficient to cause localized melting and/or softening of the spray particle. Calculations and numerical models have revealed that particle kinetic energy is not sufficient to melt the particles. This evidence suggests that spray particle temperature stays well below its melting point and there are no physical changes. One can conclude that deposition mechanism is a solid-state process. In order to enhance the understanding of bonding mechanism in cold gas dynamic spray, many simulations have been designed. In conclusion, based on these results, bonding mechanism in cold gas dynamic spray can be attributed to

localized high plastic strain and adiabatic shear instability at the particle-substrate interface as a result of softening of the spray particle due to adiabatic heating which occurs at or beyond the critical velocity. The temperature rise and softening of spray particle can overcome the strain hardening at higher velocities and lead to an adiabatic shear instability at the interface resulting in interlocking of splats. But the full explanation for bonding mechanism in cold gas dynamic spray is still incomplete due to some assumptions made in impact models.

The low temperature in cold spray process compared with conventional thermal spray processes enables more advantages. Cold gas dynamic spraying uses gas stream at a temperature well below the melting point of sprayed particles and this situation improves detrimental effects of high temperature such as oxidation, melting, residual stresses and debonding generally encountered in thermal spray processes are reduced. Cold gas dynamic sprayed coatings are more likely to preserve microstructure, mechanical and chemical properties of the sprayed particles and exhibit no thermal shrinkage therefore no thermal stress and low oxide contents due to relatively low process temperatures. For these reasons, cold gas dynamic spraying offers better control of coating properties as compared to thermal spraying techniques.

Cold spray technology falls under the larger family of thermal spray processes, and it is increasingly used in a variety of industries for corrosion mitigation of sensitive materials, such as: magnesium and aluminum alloys, surface restoration, fabrication of busbars on heated glass, deposition of WC-Co for hard-chrome replacement coatings, electrical and thermal conductive coatings for transition surfaces, braze joint preparation, and deposition of NiCrAlY bond coats for thermal barriers. For many of these applications, cold spray presents itself as a more economical method because it can actually eliminate or reduce fabrication steps.

In the cold spray process, pure metals, metal alloys, polymers and composites were successfully coated on various substrates. This process depends on the deposition of solid powders on substrate surface without melting. There are some process parameters which should be chosen carefully to supply good deposition efficiency such as particle velocity, nozzle geometry, gas type, gas temperature, gas pressure and characteristic properties of sprayed powder but the velocity of the sprayed powder particles is regarded as a main parameter extremely influencing the coating formation. In this respect, previous studies have been made to investigate various spray parameters with regards of its effect on particle velocities. Even though there have been a great number of studies relating to the particle velocity, only few surveys concentrate on the remarkable effect of substrate hardness, substrate average surface roughness and standoff distance on the particle deposition and so the aim of this work is to investigate parameters affecting cold spray process: (i) substrate hardness (ii) substrate surface roughness (iii) standoff distance.

To investigate the effect of substrate hardness on coating formation, two copper substrates having hardness 55 HV and 107 HV values was obtained via different heat treatments (at 275 °C and 285 °C for one hour ). To obtain higher hardness value, copper samples were subjected to compression test which enables the substrates to be applied about 85% deformation ratio and 140 HV hardness value was acquired. To investigate the effect of substrate surface roughness on coating formation, four substrates having different average surface roughness (1.7  $\mu\text{m}$ , 1.09  $\mu\text{m}$ , 0,46  $\mu\text{m}$  and 0,06  $\mu\text{m}$ ) was obtained via various metallographic sample preparation process. To investigate the effect of the standoff distance on coating formation, four different

distance values (5 mm, 10 mm, 20 mm and 30 mm) were selected. These distances were arranged during the coating process.

Spherical Cu ( $d=10\ \mu\text{m}$ , 99.9%) powders were sprayed on high purity Cu substrates cold spray equipment with converging–diverging type tubular nozzle. Powder was fed to the flowing gas downstream from a nozzle. Compressed air at a nozzle inlet pressure of 6 bar was used as a process gas. Compressed air temperature varies between 400-600 °C.

Characterization of coatings were carried out by microscopic investigations, hardness, bond strength and electrical conductivity measurements. Microstructural characterization was carried out by optical and scanning electron microscope examinations and X-ray diffraction analyses. The optical microscope images were used for determining the coating thickness. To determine mechanical properties for these coatings, hardness measurements and adhesion/tensile test were performed. Coating porosity percentages were measured utilizing image analysis software. Coating densities were measured with apparatus work with the principle of Archimedes. Hardness of coatings was measured by a microhardness tester on the polished cross-sections of the coatings with a Vickers indenter.

According to the results obtained from experimental studies, good adherent between coating/substrate interface was obtained and vacancy and/or discontinuity were not seen. The best coating properties were achieved in coatings on copper substrates having 140 HV hardness value. The best coating properties were acquired when the average surface roughness of the substrate is  $0,46\ \mu\text{m}$  and 20 mm standoff distance (between nozzle and substrate) is optimum for this process. Average adhesion strength of cold spray coatings was determined approximately  $20\ \text{N/mm}^2$  (MPa). After coating process, a large decrease ( $\approx 50\%$ ) in electrical conductivity was determined.



## 1. GİRİŞ

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi son yıllarda gelişmekte olan bir kaplama yöntemidir. 1980'li yılların ortasında Rus bilim adamları tarafından iki fazlı sistemlerin (gaz + partikül) ses üstü rüzgar tünelineki davranışlarının incelenmesi sırasında geliştirilmiştir. Basitçe anlatmak gerekirse 50 µm' ye kadar küçük toz parçacıkları sıkıştırılmış gaz ile sağlanan yüksek hıza sahip gaz akımına beslenir ve ses üstü hızlara ulaştırılır. Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde özel olarak tasarlanan nozül (başlangıçta daralan sonra genişleyen) sayesinde yüksek hıza sahip gaz akışı sağlanır. Diğer taraftan cihazın ayrı bir kısmı olan yüksek basınçlı toz besleme ünitesinden gelen tozlar nozüle iletilerek, nozüldeki ses üstü hıza sahip ana gaz akımı ile birleşerek hızlanır. Tozlar nozülü terk ettikten sonra altlık yüzeyine çarparak plastik deformasyona uğrar ve altlık ile mekanik bir bağ oluşturur. Kaplama süresince tozlar birbirlerinin üzerinde birikmeye devam ederek bağ oluşturmaya devam eder. Sonuç olarak altlık malzemesine iyi yapışmış, homojen ve düşük poroziteli bir kaplama elde edilir [1].

Bu yöntem oda sıcaklığında gerçekleştirildiğinden yöntemin adı soğuk dinamik gaz püskürtme olarak nitelendirilmiştir. Soğuk gaz dinamik püskürtme işleminin termal püskürtme yöntemlerinden en önemli farkı tozları altlığa ergime olmaksızın püskürtebilmesidir. Her ne kadar sıkıştırılmış gaz, yüksek basınç etkisiyle, nozülden çıkarken yaklaşık 100 °C civarında bir sıcaklığa ulaşsa da bu sıcaklıkta toz partiküllerinin ve kaplanacak malzemenin kimyasal bozunumdan söz edilemez. Böylelikle kaplama sırasında oksidasyon, ergime, yeniden kristalleşme, kalıntı gerilme ve kopma gibi termal püskürtme yöntemlerinde karşılaşılan yüksek sıcaklığın zararlı etkileri en aza indirgenir [2]. Kaplamanın başarısı tozların plastik deformasyon kabiliyetine bağlıdır. Deformasyon kabiliyeti yüksek olan tozlar, yüzeye sıkıca bağlanırken sert ve kırılabilir tozlar ile kaplama yapmak oldukça güçtür. Ayrıca, proseste kullanılan gazın türü, basıncı ve sıcaklığı, kullanılan tozun özellikleri ve nozül geometrisi gibi çeşitli parametreler soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemini etkilemektedir.

Bu çalışmanın amacı, soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemini etkileyen altlık malzemenin sertliği, nozül-altlık arası mesafe ve altlığın yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin kaplamaya olan etkisini irdelemektir. Bu sebeple saf bakır tozları yüksek saflıktaki bakır altlık üzerine SGDP yöntemi ile 6 bar kurutulmuş hava kullanılarak kaplanmıştır. Ardından kaplamaların karakterizasyonu için mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri, yapışma mukavemeti ölçümü ve elektrik iletkenliği ölçümü yapılmıştır. Böylece hangi parametrelerde en iyi kaplamanın elde edildiği irdelenmiştir ve soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların yapışma mukavemeti değerleri hakkında bilgi edinilmiştir.

## 2. SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ

### 2.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemi

#### 2.1.1 SGDP tarihçesi

Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ilk olarak 1980'li yılların ortalarında Novosibirsk'de Rus Bilim Akademisi Sibiry Bölgesi Teorik ve Uygulamalı Mekanik Enstitüsü'nde geliştirilmiştir. Rus bilim adamları saf metaller, metalik alaşımlar, polimerler ve kompozit gibi çok çeşitli malzemeleri çeşitli altlıklar üzerine başarıyla kaplamışlardır. Ayrıca, soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi kullanılarak çok yüksek kaplama birikme oranları ( $3\text{m}^2/\text{dk}$ ) elde edildiğini göstermişlerdir [3].

Termal püskürtme aşınmaya, korozyona, oksidasyona ve korozyona dayanıklı kaplama gibi çeşitli uygulamalar için aşındırılabilir ve koruyucu kalın kaplamalar üretmeye olanak sağlayan çok yönlü bir tekniktir.

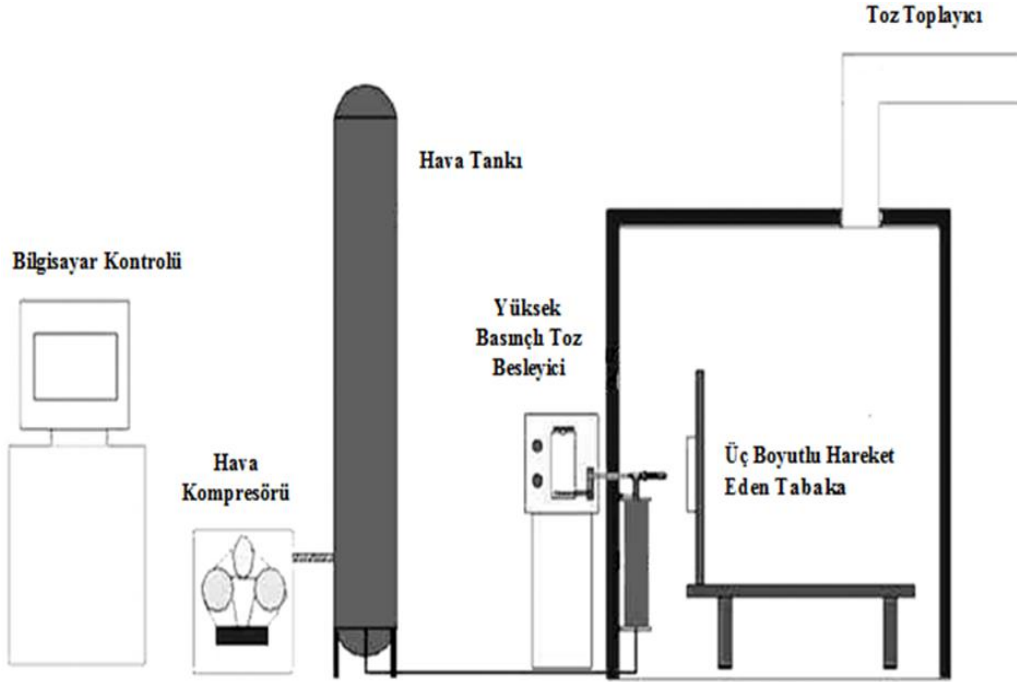
Fakat, bu yöntemde ergime noktasının üzerine çıkılan yüksek sıcaklık değerlerinden dolayı hammaddelerin kimyasal bileşiminde bir değişim meydana gelir. Son on yıl içinde böyle problemleri ortadan kaldırmak için soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi geliştirilmiştir [4].

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].

### 2.1.2 SGDP tanımı

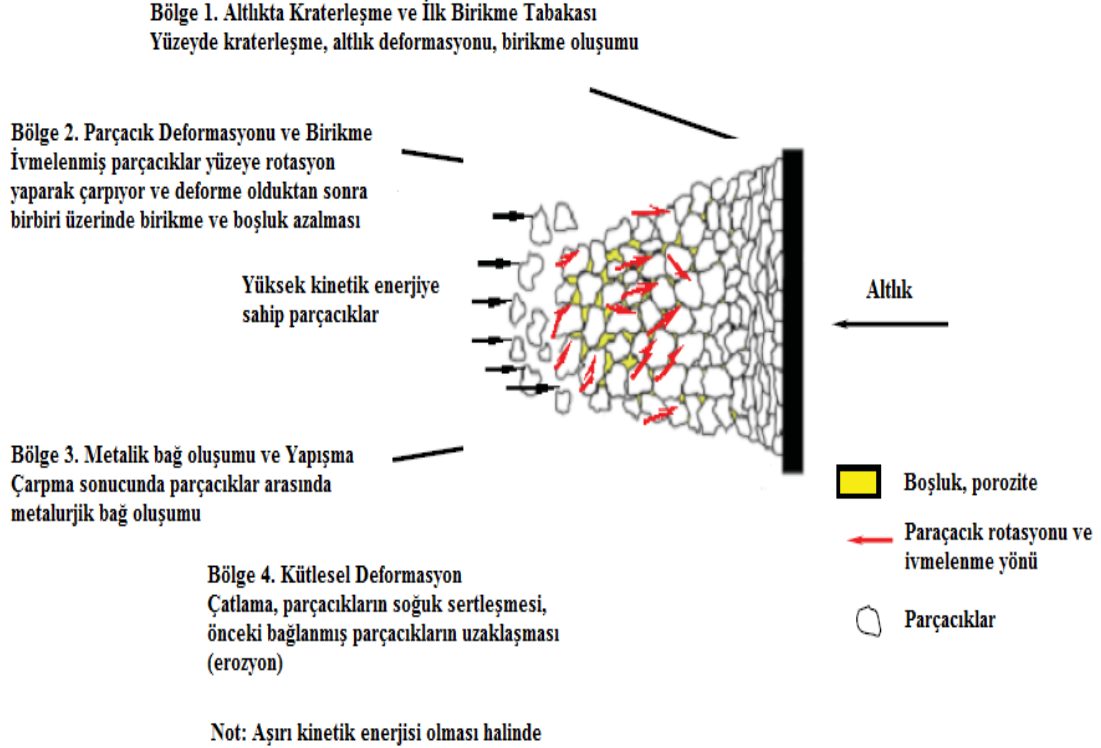
Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi, yüksek basınçlı sıkıştırılmış gaz içinde depolanan enerjinin, ince taneli toz parçacıklarının ( $5-100\mu m$ ) yüksek hızlarda (500-1500 m/s) püskürtülmesi için kullanılmasıdır. Sıkıştırılan gaz, kurutucu üniteden geçtikten sonra soğuk gaz dinamik püskürtme cihazının nozulüne iletilir ve bu tabancanın ucunda bulunan özel tasarlanmış (başlangıçta daralan çıkış noktasına doğru genişleyen) nozulden yüksek hızlarda dışarı çıkar. Diğer yandan cihazın yüksek basınçlı toz besleme ünitesinden nozüle iletilen tozlar, bu yüksek hızdaki hava akımı ile birleşerek bir kaplama jeti oluşturur. Bu akım içerisinde bulunan tozları ergime noktalarının altında, kaplanacak yüzeye süpersonik hızlarda çarparak yüzeyde plastik deformasyona uğratarak kaplamayı oluştururlar [5]. Şekil 2.1’de SGDP yöntemi ekipmanlarının şematik gösterimi vardır.



Şekil 2.1 : SGDP yöntemi ekipmanlarının şematik gösterimi [6].

Prosesin fiziksel temeli püskürtülen tozların çarpma sonucunda kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesi ile ilişkili olarak yüzey ve tozların birbirleri ile etkileşimi sonucu meydana gelen termal deformasyon etkisiyle yüzeyde kaplama birikmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede yoğun ve yüksek yapışma gösteren bir kaplama

tabakası elde edilebilmesine olanak sağlayan bir prosestir [7, 8]. Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kaplama oluşumunun nasıl olduğuna dair şematik gösterim Şekil 2.2’de mevcuttur.



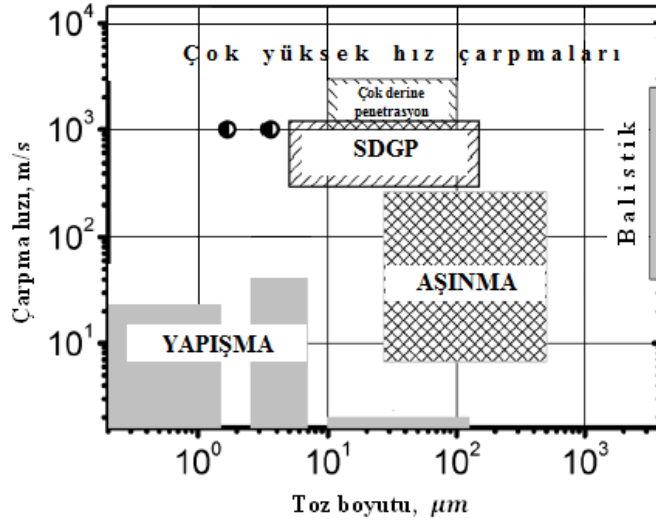
Not: Aşırı kinetik enerjisi halinde

**Şekil 2.2** : SGDP yönteminde kaplama oluşumu [7].

Küçük tozların tüm çarpışmaları plastik deformasyon sonucu yüzeyde birikme ile sonuçlanmaz. Küçük boyuttaki tozların katı bir yüzeye çarpması sırasında pek çok olay gözlemlenebilir. Bu olaylar düşük hızlarda yapışma veya erozyon, yüksek hızlarda balistik ve orta hızlarda soğuk püskürtme birikmesi olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.3’de toz boyutu ile çarpma hızına bağlı olarak altlık yüzeyinde hangi mekanizmanın etkin olacağını göstermektedir. Şekil 2.3’den açıkça görüldüğü gibi yaklaşık 1200 m/sn hıza ve 10-100 µm aralığındaki boyutlara sahip tozlar altlık yüzeyine biriktirilebilir [9, 10].

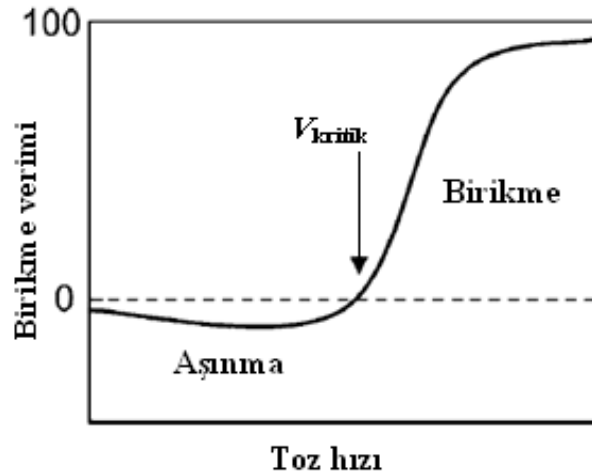
Tozun altlık yüzeyine çarpması sırasındaki birikmenin ya da erozyonun gerçekleşeceğini belirlemesi nedeniyle tozun çarpışma öncesindeki hızı çok önemlidir. Soğuk dinamik gaz püskürtme tekniğinde tozların altlık yüzeyine çarptığında plastik deformasyona uğrayarak altlık yüzeyine tutunması için belirli bir hıza ulaşması gerekmektedir. Bu hız kritik hız olarak adlandırılmaktadır. Bir toz ve altlık ikilisi için kritik toz hızı vardır ve ancak bu hıza veya daha yüksek hıza sahip tozlar yeteri kadar

plastik deformasyona uğrar ve verimli bir şekilde altlık yüzeyine birikir [3, 10-14]. Diğer taraftan kritik hızdan daha düşük hıza sahip tozlar plastik deformasyona uğrayabilmek için yetersiz kinetik enerjiye sahiptir ve altlık yüzeyinde kumlama veya erozyona neden olur [1, 5, 15]. Kritik hız kullandığımız toz malzemenin özelliklerine göre değişim göstermektedir [14]. Kritik hız aynı zamanda kaplama veriminde ani artışın gözlemlendiği eşik hız olarak da tanımlanabilir. Kaplama verimi biriken kaplama ağırlığının püskürtülen tozun ağırlığına oranıdır.



**Şekil 2.3 :** Toz boyutu ve çarpma hızının püskürtülecek malzemenin altlık üzerine çarptığında meydana gelecek olan mekanizmaya etkisi [9].

Şekil 2.4 'de görüldüğü gibi kritik hızın altında birikme verimi sıfırdır. Bunun sebebi püskürtülen tozların tutunması gerekli iken altlık malzeme erozyona uğrar. Ortalama toz hızı kritik bir değeri aştığında birikme düşük verimle başlar ve bu verim toz hızı arttıkça artar [16].



**Şekil 2.4 :** Toz hızı ile birikme verimi arasındaki ilişki [16].

Çizelge 2.1’de Cu,Fe, Ni ve Al malzemelerine ait yaklaşık kritik hız değerleri verilmiştir. Çizelge 2.1’ de de görüleceği üzere püskürtülen malzemenin kritik hız üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. Yapılan çalışmalar sonucunda yapışma için gerekli olan kritik hızın malzemenin özelliklerine bağlı olduğu ve püskürtülen tozun mekanik ve kimyasal özelliklerinden etkilendiği belirlenmiştir [13, 17]. Burdan yola çıkılarak geliştirilen bir denklemle (Denklem 2.1) kritik hız hesaplanabilmektedir [17, 18].

$$V_{kritik} = 667 - 0,014\rho + 0,08(T_m - T_R) + 10^{-7} \sigma_u - 0,4(T_i - T_R) \quad (2.1)$$

Denklemde sırasıyla  $\rho$ ,  $T_m, T_R$ ,  $T_i$ ,  $\sigma_u$ , püskürtülen tozun yoğunluğu, ergime noktası, prosesin referans sıcaklığı (genellikle 273K), çarpma sıcaklığı, akma dayanımını temsil eder.

Denkleme göre kritik hız püskürtülen malzemenin özellikleri ve proses parametrelerine (referans ve çarpma sıcaklıkları) bağlıdır. Fakat bazı araştırmacılar kritik sıcaklığın sadece püskürtülen tozların mekanik ve fiziksel özelliklerine ve altlık malzemeye bağlı olmadığına, altlık malzeme ve püskürtülen tozların yüzey oksitlenmesi durumunun önemi kadar püskürtülen tozların boyutu ve boyut dağılımının da önemli olduğunu belirtmişlerdir [9, 17, 19, 20].

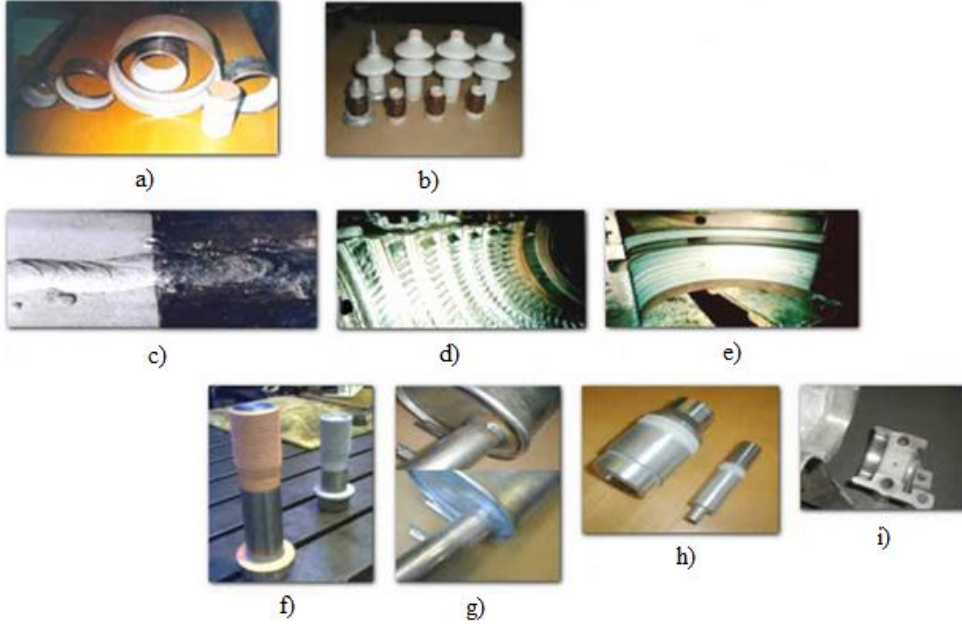
**Çizelge 2.1 :** Malzemelerin sahip oldukları yaklaşık kritik hızları [15].

Malzeme	Kritik hız (m/s)
Bakır (Cu)	560-580
Demir (Fe)	620-640
Nikel (Ni)	620-640
Alüminyum (Al)	680-700

Çizelge 2.1’ye bakıldığında alüminyum malzemesi en düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen en yüksek kritik hıza sahiptir. Bunun sebebi proses sırasında havaya maruz kaldığında alüminyum tozları üzerinde alümina veya koruyucu oksit tabakası oluşumu olabilir. Alümina yüksek sertliğe, hava ortamında mükemmel aşınma ve korozyon dayanıma sahiptir fakat süneklikte azalmaya sebep olmaktadır [21, 22]. Yapılan çalışmalar da yüzeyde oksit tabakasının bulunmasının çarpma esnasında tozların plastik deformasyonunu kısıtladığı bulunmuştur [19, 23]. Bu sebeple tozların yeterli deformasyona uğrayabilmesi ve birikme sağlanması için alüminyum tozlarının yüzeydeki oksit tabakasını ortadan kaldırabilecek seviyede çarpma enerjisine sahip olmalıdır.

### 2.1.3 Uygulama alanları

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi birçok farklı endüstri kollarında geniş ölçekte değişik parçaların üretiminde ve onarımında kullanılmaktadır. 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, elektromanyetik 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. Şekil 2.5'te uygulama alanlarına örnek fotoğraflar görülmektedir [2].



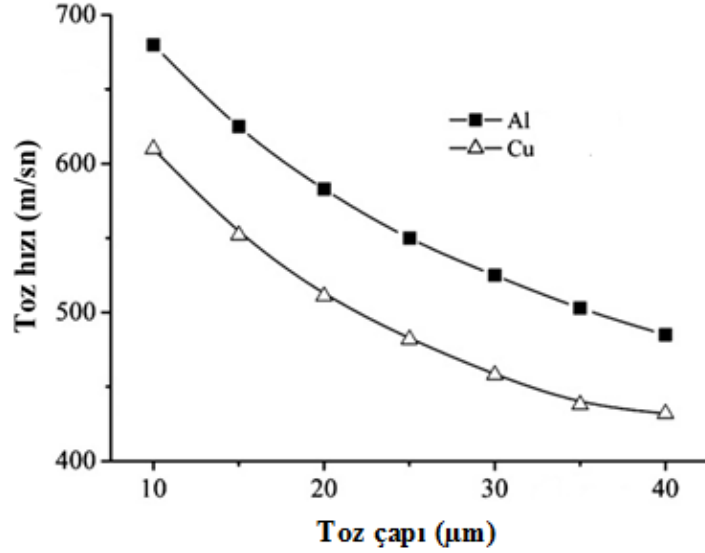
**Şekil 2.5 :** SGDP uygulama yerleri; a) erozyona karşı boru iç ve dış çeper kaplama b) elektrik iletkenliği olan kaplamalar c) kaynak dikişi koruma kaplama d) elektrik motorlarında dönmeyen kısımlara yapılan kaplamalar e) aşınma bölgesi kaplamaları f) boyut uyumsuzluğunu düzeltme amaçlı kaplama g) otomotivde korozyon engelleme amaçlı kaplamalar h) boru ağzı kapama amaçlı kaplamalar i) yatak yuvalarının onarılması [2].

## 2.2 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemini Etkileyen Parametreler

### 2.2.1 Kullanılan tozun özellikleri

Toz ağırlığını belirleyen toz boyutu ve yoğunluğu gibi parametrelerin tozun hızlanma davranışı üzerindeki etkisi büyüktür. Bu şartlar altında, daha küçük boyutlara sahip tozların hızlanmasının daha kolay olması beklenmektedir. Klinkov ve arkadaşlarının

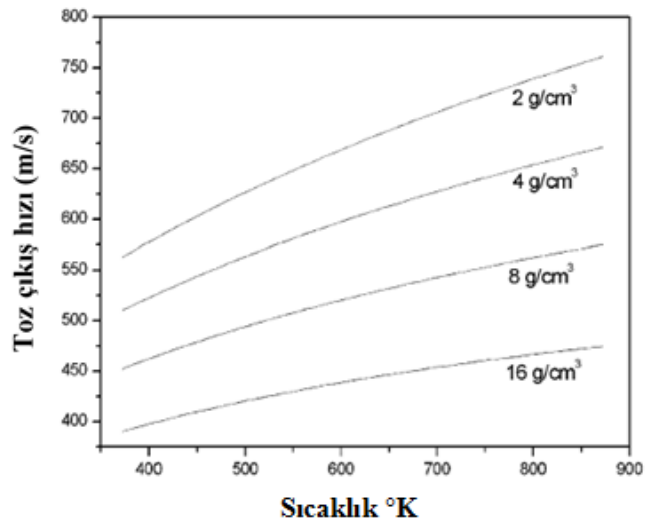
[24] yaptığı bir çalışmada alüminyum altlık üzerine bakır ve alüminyum tozları kullanılarak soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle kompozit kaplama yapılmıştır. Yapılan çalışmada Şekil 2.6' de gösterildiği üzere kullanılan toz boyutu arttıkça toz hızının azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.6 : Toz çapı ile toz hızı arasındaki ilişki [24].

Bu çalışmada kullanılan toz boyutu ve elde edilen toz hızı arasındaki ilişki başka araştırmacılar tarafından çeşitli tozlar ile yapılan kaplama örneklerinde deneysel ve sayısal olarak doğrulanmıştır [11, 25].

Yapılan başka bir çalışmada ise Şekil 2.7'de gösterildiği üzere farklı yoğunluklara sahip 20 µm boyutundaki tozlarla yapılan bir deneyde tozun nozülünden çıkış hızı hesaplanarak yoğunluk ile toz hızı arasındaki ilişkiye bakılmıştır [26].



Şekil 2.7 : Toz yoğunluğu ile tozun nozül çıkış hızı arasındaki ilişki [26].

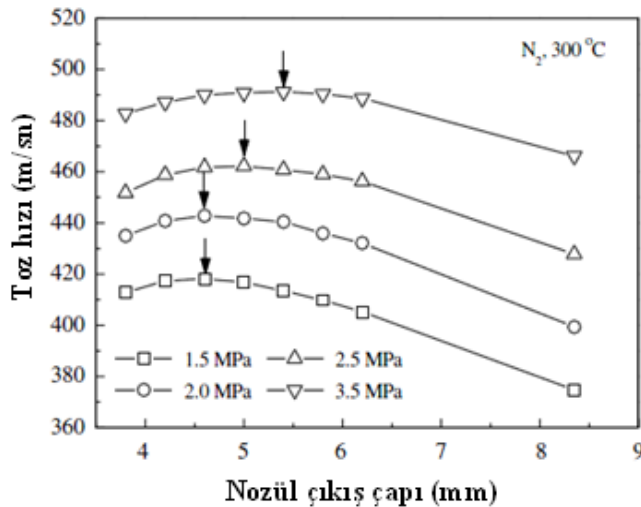
Büyük boyutlardaki ve ağır tozlar, küçük ve hafif tozlar ile karşılaştırıldığında daha düşük hızlara sahiptir. Ancak bu ağır ve büyük boyutlardaki tozların soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kullanılamayacağı anlamına gelmez. Çünkü kritik hızın bulunduğu denkleme bakıldığında daha büyük boyutlardaki tozların yüzey üzerinde birikmesi için ulaşması gereken kritik hız daha düşüktür. Ayrıca büyük tozların hızını dolayısıyla enerjisini daha iyi muhafaza ettiği bilinmektedir. Kaplama verimliliği yüksek sıcaklıkta gaz kullanılarak artırılabilir ve bu da altlık yüzeyine çarpan tozun hızını arttırmaktadır [27].

### 2.2.2 Nozül geometrisi

Nozül geometrisinde en önemli nokta genişleme oranıdır. Genişleme oranı nozülün çıkış alanının (A) nozülün minimum kesit alanına (boğaz, A\*) oranı olarak tanımlanmakta ve nozülün Mach sayısını belirlemektedir. Mach sayısı gazın akış hızının (V) o gazdaki ses hızına (c) oranıdır (Denklem 2.2) [10].

$$\frac{A}{A^*} = M = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (2.2)$$

Bu denklemde  $\gamma$  gazın öz ısılarının oranını ( $C_p/C_v$ ), R öz gaz sabitini (universal gaz sabitinin gazın molekül ağırlığına oranı) ve T gazın sıcaklığını göstermektedir. Yapılan bir çalışmada nozülün minimum kesit alanı sabit tutularak nozülün çıkış alanı arttırıldığında belirli bir genişleme oranına kadar genişleme oranı arttıkça püskürtülen tozun hızının arttığı ve maksimum değere ulaştığı görülmüştür [5]. Şekil 2.8'de bu çalışmadan elde edilen nozül çıkış çapı ile toz hızı arasındaki ilişki grafiği mevcuttur.



Şekil 2.8 : Nozül çıkış çapı ile toz hızı arasındaki ilişki [5].

Bu genişleme oranından daha yüksek genişleme oranlarında püskürtülen tozun yavaşladığı belirtilmiştir. Bu durum tamamen nozülün kesit alanındaki gaz miktarı ile ilişkili olup kesit alanı arttıkça gaz yoğunluğu düşmekte ve dolayısıyla püskürtülen toz üzerine etki eden çekim kuvvetinin azalmasıyla açıklanmaktadır [4, 10].

### 2.2.3 Gaz türü

Soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminde kullanılan gazlar proses içinde ses üstü hızlara ulaşarak toz parçacıklarının ivme kazanmasını sağlamaktadırlar. Gaz dinamik kanunları (denklem 2.3) göz önünde bulundurulduğunda gazın molekül ağırlığı düşürüldüğünde ve/veya öz ısı oranı arttırıldığında daha yüksek gaz akış hızlarına ulaşıldığı bilinmektedir [10]. Böylece, taşıyıcı gaz olarak helyum kullanıldığında yüksek gaz akış hızı kazanılması sayesinde daha yüksek birikme verimi elde edildiği literatürdeki çalışmada belirtilmiştir [14].

Ayrıca, kullanılan gazın soy ya da reaktif olması tozların oksitlenmesi gibi problemlerin yaşanmaması açısından önemlidir. Bir başka önemli husus da kullanılan gazın ekonomik olup olmadığıdır. Çünkü, proses sırasında kullanılan gaz miktarı oldukça fazladır. Bu yöntemde kullanılan gaz türleri ve özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir [10, 14].

**Çizelge 2.2 : Kullanılan gazların özellikleri [28].**

Gaz	Ses Hızı (m/sn)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Soy ya da reaktif	Fiyat
Hava (%80 N <sub>2</sub> + %20 O <sub>2</sub> )	343	1,225	Reaktif	Ucuz
Azot (N <sub>2</sub> )	349	1,185	Yarı reaktif	Ucuz
Hidrojen (H <sub>2</sub> )	1303	0,085	Reaktif	Pahalı
Argon	319	1,69	Soy	Pahalı
Helyum (He)	989	0,168	Soy	Çok pahalı

Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme yönteminde genel olarak kullanılan iki gaz helyum ve azottur ve ikisi de reaktif değildir. Hava da proses gazı olarak kullanılan diğer bir gaz türüdür. Havanın ulaşabildiği ses hızı azotunkinden daha düşüktür fakat azota göre daha ucuzdur. Hava içinde bulunan oksijen sebebiyle tozlar oksitlenme riski taşımaktadır [10].

Xinkun Suo ve arkadaşlarının [14] yapmış olduğu bir çalışmada, taşıyıcı gaz türlerinin toz hızı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Taşıyıcı gaz türü olarak hava, argon ve helyum

kullanılmıştır ve bu üç gaz türü arasından helyumun en yüksek gaz hızına sahip olduğu görülmüştür. Bu durum aşağıdaki gaz dinamiği kanunları ile açıklanmıştır (Denklem 2.3).

$$v = M \sqrt{\frac{\gamma RT}{M_w}} \quad (2.3)$$

M= Mach Sayısı

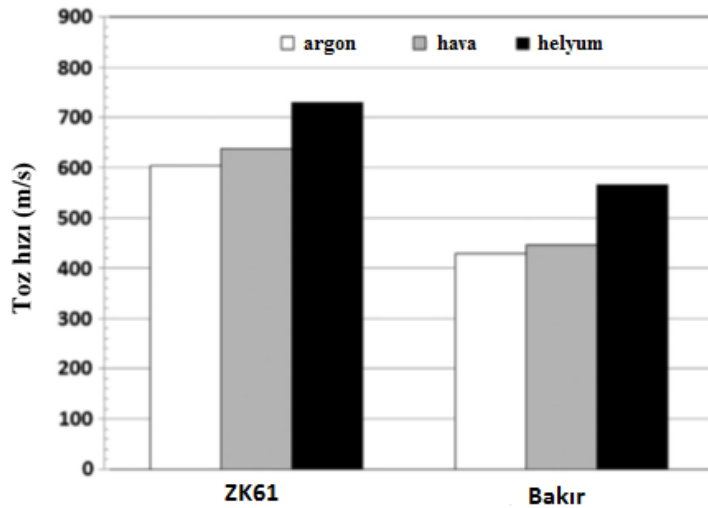
$\gamma$ = Öz ısı oranı ( helyum ve argon için 1.67, hava için 1.4)

R= Gaz sabiti

T= Gaz sıcaklığı

$M_w$ = Molekül ağırlığı (Argon= 40 kg/mol, Hava= 29 kg/mol, Helyum= 4kg/mol)

Eşitliğe göre gaz hızı doğrudan  $\sqrt{\gamma/M_w}$  bağıntısıyla ilgilidir. Bu oran argon için 0.204, hava için 0.220 ve helyum için 0.644 tür. Burdan helyum taşıyıcı gazının en yüksek gaz hızını sağladığı ve dolayısıyla en yüksek toz hızının elde edildiği görülmektedir. Bu durum da göstermektedir ki proste kullanılacak olan gaz türünün toz hızı üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. Şekil 2.9'da kullanılan gaz ile toz hızları arasındaki ilişki verilmiştir [14].



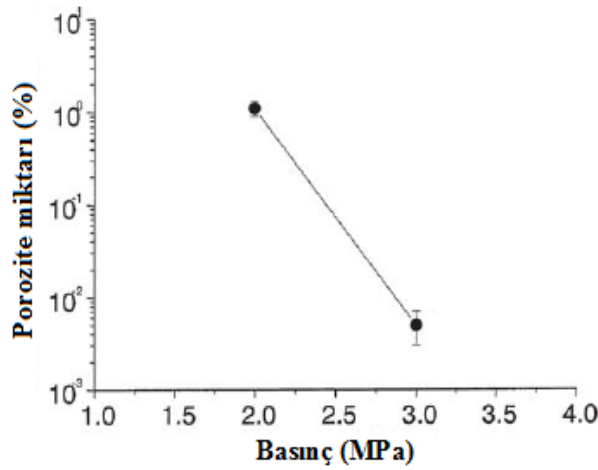
Şekil 2.9 : Gaz türüne göre toz hızının değişimi [14].

#### 2.2.4 Gaz basıncı

Yüksek nozül giriş basıncı nozül boyunca yüksek basınç değerlerinin elde edilmesini sağlar. Bunun sayesinde nozül içi ve dışı arasında yüksek basınç farkı oluşur. Bu

yüksek basınç farkı yüksek gaz akış hızı ve yüksek püskürtme hızlarının elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Yüksek basınç kullanılan sistemlerde kaplama verimliliği artmaktadır [28].

Saden H. Zahiri ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, gaz basıncının porozite üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere gaz basıncı 2 MPa'dan 3 MPa'a çıkarıldığında porozite hacim oranı %60 civarında düşmüştür. Bunun sebebi 2 MPa gaz basıncına sahip olan sistemde 3 MPa'a göre tozların daha düşük hızlara sahip olmasıdır. Böylece daha düşük hıza sahip olan sistemde daha az kinetik enerji ortaya çıkacağından plastik deformasyon için gerekli olan enerjiye tam olarak ulaşamamıştır [29].

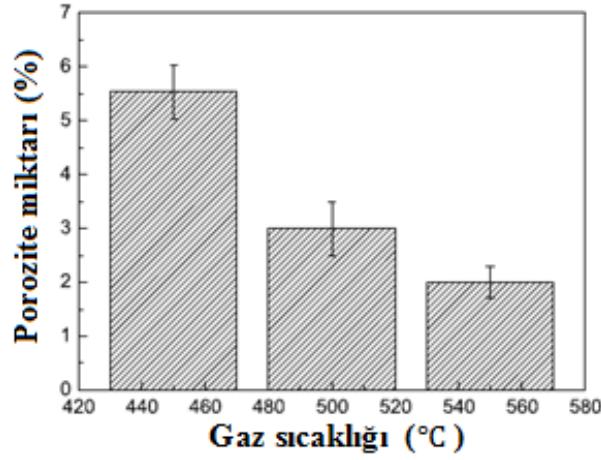


Şekil 2.10 : Gaz basıncı ile kaplama porozitesi arasındaki ilişki [29].

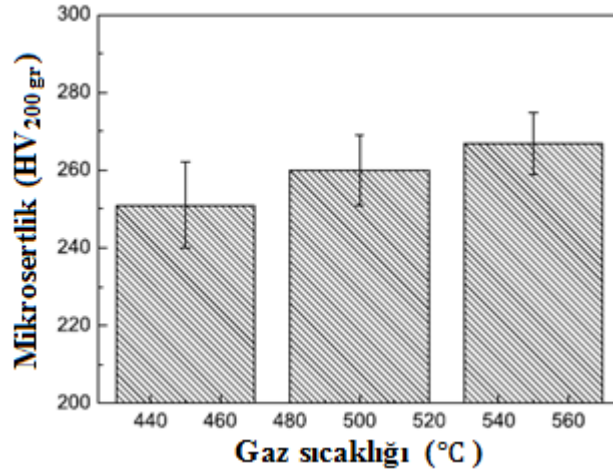
### 2.2.5 Gaz sıcaklığı

Denklem 2.2' den proses gaz sıcaklığı arttırıldığında gaz içerisindeki ses hızının ve dolayısıyla gazın akış hızının artacağı görülmektedir. Junbao Zhang ve arkadaşları [30] soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemiyle 304 kalite paslanmaz çelik tozlarını çelik altlıklar üzerine kaplamışlardır. Bu çalışmada, gaz sıcaklığının kaplama mikroyapısı, mikrosertliği, kohezif bağ dayanımı ve elektrokimyasal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, gaz sıcaklığının artmasıyla birlikte kaplanan tozlar arasındaki bağ dayanımı artmıştır ve daha yoğun bir mikroyapı elde edilmiştir. Bu nedenle, kaplama porozitesi  $6 \pm 0.5$  'dan  $2 \pm 0.3$ 'lere düşerken, kaplama dayanımı  $56 \pm 4$  MPa 'dan  $73 \pm 3$  MPa 'a yükseldiği belirtilmiştir. Ayrıca, kaplamanın korozyon direncinin gaz sıcaklığından etkilendiği bariz bir şekilde görülmüştür. Korozyon davranışı hem tozların uğradığı plastik deformasyondan hem de kaplamanın porozitesinden etkilenmiştir. Yapılan bu

çalışmayla ilgili Şekil 2.11’de gaz sıcaklığı ile porozite miktarı arasındaki ilişki verilirken , Şekil 2.12’de gaz sıcaklığı ile kaplama sertliği arasındaki ilişki verilmiştir.



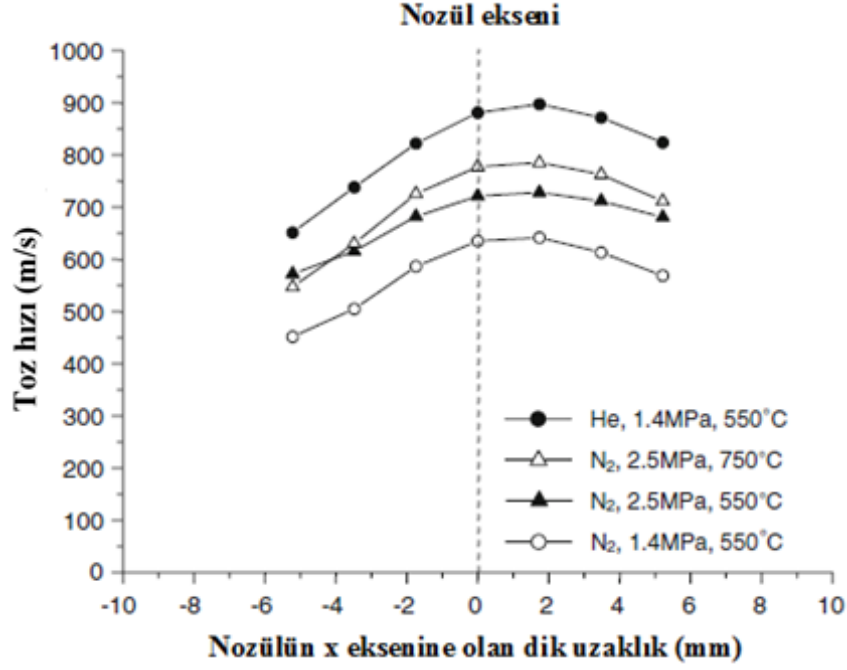
Şekil 2.11 : Gaz sıcaklığı ile porozite miktarı arasındaki ilişki [30].



Şekil 2.12 : Gaz sıcaklığı kaplama sertliği arasındaki ilişki [30].

### 2.2.6 Nozül ile altlık arasındaki mesafe

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde altlık ile nozül arası mesafenin tozların çarpma hızı üzerinde etkisi büyüktür. Dolayısıyla çarpma hızına bağlı olarak birikme verimi bu parametre ile değişmektedir. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar [5, 31-34] ile püskürtülecek tozların nozülden ayrıldıktan sonraki hızlanma davranışları irdelenmiştir ve belirli bir mesafeye göre tozlar hızlanmaya devam ettiği ve belirli bir noktadan sonra hızın düştüğü gözlenmiştir. Şekil 2.13’de yapılan bir çalışmadaki nozül-altlık arası mesafe ile toz hızı arasındaki ilişki verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere optimim bir nozül-altlık arası mesafe değeri vardır ve bu mesafe soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde uygulanan proses şartlarına göre değişim göstermektedir.



Şekil 2.13 : Nozül-altlık arası mesafe ile toz hızı arasındaki ilişki [31].

## 2.3 Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yönteminin Diğer Termal Sprey Yöntemleri ile Karşılaştırılması

### 2.3.1 Soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminin avantajları

SGDP yönteminin diğer klasik kaplama yöntemlerinden en belirgin farkı düşük sıcaklık ve yüksek toz hız parametrelerine sahip olmasıdır. Termal spreyden en temel farkı kaplamanın; işlem sırasında katı hali bozulmayan küçük tane boyutlu tozların oluşması ve difüzyondan yoksun olarak gerçekleştirilmesidir. Kaplamanın düşük sıcaklıklarda üretilebilmesi, kaplanan ve kaplanacak malzemenin yüksek sıcaklığın neden olduğu zararlı etkilerden korunması anlamına gelir ve birçok avantaj elde edilir. Bunlar;

- **Düşük porozite/yüksek yapışma:** Tozlar yüzeye süpersonik hızlarla çarptıklarında yüzeyde ve tozlarda oluşan oksit tabakalarını koparırlar dolayısıyla yüksek yoğunluğa (<0,5 porozite) sahip iyi yapışma gösteren kaplamalar elde edilir.
- **Homojen mikroyapı:** Tozlar yüzeye sesüstü hızlarda kaplanır ve çarpma olayına kadar oda sıcaklığı mevcuttur. Bunun sayesinde termal spreyde meydana gelen gerilme ve istenmeyen kimyasal değişimler olmaksızın homojen bir yapı elde edilir.

- **Oksitsiz Kaplama:** Termal spreyde oluşan gerilmeler ve kimyasal değişimler olmadığı için bu yöntemle kaplanan malzemelerde okside sebep olan hatalar ihmal edilebilir. Bu durum özellikle korozyon uygulamalarında önemli bir avantaj teşkil etmektedir.
- **Proses emniyeti:** İhmal edilebilir bir ısı gerekli olduğundan, bu teknoloji doğası gereği tehlikeli olan endüstriyel alanlarda uygulanabilir güvenle uygulanabilir.
- **Çevre dostu proses:** Yüksek sıcaklıklar, radyasyon, patlayıcı gaz gibi tehlikeli unsurların işlem sırasında bulunmayışı nedeniyle uygulamanın güvenlidir.
- **Çok yönlü olması:** Standart veya özelleştirilmiş donanımına sahiptir. Yumuşak malzemeden sert malzemeye kadar geniş bir alana hitap eder. Herhangi bir saha uygulaması ve tamiri için uygun portatif ve kompakt teçhizata sahiptir. Geniş alan kaplamalarına uygun çoklu sprey nozülleri ve iç/dış boru uygulamaları için 360° dönen nozül tipleri mevcuttur.
- **Proses kabiliyeti yüksek:** yüzey hazırlığı, sistemi kaplamaya hazır hale getirmek çok kısa bir zaman almaktadır. Isı girdisi yüksek olmadığı için soğutma gereksinim bulunmamaktadır. Yüksek birikme verimi ile çalışmaktadır.
- İstenmeyen faz ve oksidasyon oluşumunun olmaması.
- Kaplanan ve kaplanacak malzemelerin işlem sonrası tüm özelliklerinin aynı kalması.
- 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 tozların püskürtülebilmesi
- Altlık ve kaplanacak malzemelerin farklı malzeme grubunda olması halinde bile rahatlıkla çalışılabilmesi.
- Kaplanacak olan malzemenin yüzey hazırlama işlemlerinin minimize edilmesi.
- Kaplama sırasında altlık malzemedeki çok düşük sıcaklık artışı görülmesi [6].

### 2.3.2 Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin dezavantajları

Bu yöntemle çeşitli kompozit tozlar kullanılabilirken, saf seramiklerin ve bazı alaşımlar kullanılamaz. İyi bir yapışma mukavemeti elde edebilmek için altlık malzemesinin belirli bir sünekliğe sahip olması gerekmektedir. Sert malzemelerin kaplanmasında mutlaka bir bağlayıcı gereksinimi bulunmaktadır. Bu sebeple seramik altlıkların üzerine yapılan kaplamalarda bağ kuvvetleri çok zayıf olur. Gaz sarfiyatı fazladır. Her kullanılması maliyeti artırmaktadır. Ayrıca proses gazı olarak helyum kullanılması durumunda üretim maliyeti artmaktadır [7].

### 2.4 Literatürdeki Örnek Çalışmalar

M. Fukumoto ve arkadaşları [35] saf bakır tozlarını soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımı altlıklar üzerine kaplamışlardır. Bu çalışmada toz boyutu, proses gaz çeşidi, gaz hızı ve sıcaklığı, altlık malzemesinin sıcaklığı gibi parametrelerin yapışma davranışı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Deneysel çalışmalar 5 µm, 10 µm ve 15 µm ortalama boyutlara sahip saf bakır tozları ve çalışma gazı olarak hava ve helyum kullanılarak yapılmıştır. Kaplama işlemi esnasında gaz basıncı 1 MPa'a kadar farklı değerlerde ayarlanmıştır. Kaplamalar oda sıcaklığındaki ve 673K'e kadar ısıtılmış altlık malzemeler üzerinde yapılmıştır. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplama sonucunda altlık malzemesi yüzeyinde yarım küresel şekle sahip bakır tozları görülmüştür. Bakır tozların altlık malzemesine çarpması sonucu plastik deformasyona uğramaları sayesinde oluşan bu şekiller, deformasyon sertleşmesi sebebiyle sertlik artışını göstermektedir. Bakır toz hızının, çalışma gazının sıcaklığından ziyade, çalışma gazının basıncından etkilendiği saptanmıştır. Artan gaz basıncının tozların yüzeyde birikmesinde olumlu bir etki yaptığı belirtilmiştir. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalarda, altlık sıcaklığın artırılması ile birlikte altlık yüzeyinde oluşan ilk kaplama tabakasının daha fazla olduğu görülmüştür.

Shuo Yin ve arkadaşları altlık malzemesinin sertliğinin soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemindeki deformasyon davranışına etkisini görmek için sonlu elemanlar analiz yöntemini kullanmışlardır. Bakır tozları alüminyum, nikel ve paslanmaz çelik malzeme yüzeyleri üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle püskürtülmüşlerdir. Bu çalışmanın sonucunda paslanmaz çelik altlık malzeme olarak kullanıldığında püskürtülen tozların altlık malzemeyi deforme edemeyeceğinden sahip

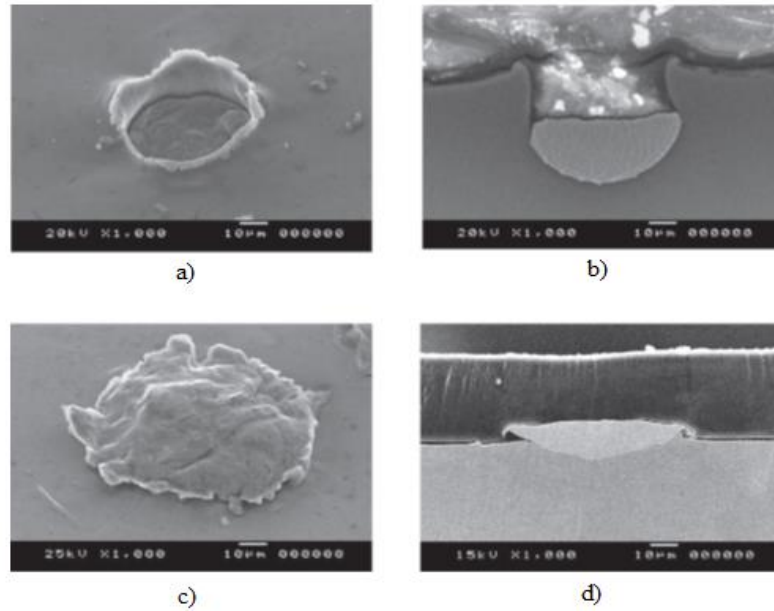
olduğu enerjinin hepsini kendisini deforme etmek için kullanacağını ve altlık malzemedede herhangi bir deforme olmayacağını belirtmişlerdir. Fakat alüminyum altlık malzeme olarak kullanıldığında, altlık malzeme püskürtülen tozdan daha yumuşak olduğu için tozların sahip olduğu kinetik enerji altlık malzemenin deforme olması için kullanıldığını göstermişlerdir. Sonuç olarak tozlar çok az miktarda plastik deformasyona uğramaktadır. Aynı zamanda kaplama kalınlığının az olması durumunda altlık malzemesinin sertliğinin öneminin de büyük olduğunu vurgulamışlardır [36].

Li ve arkadaşları [37] soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminde altlık-nozül arası mesafenin kaplamaya olan etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı boyutlardaki Al, Ti ve Cu tozları kullanılmıştır. Çalışma gazı olarak hava kullanılmış ve basıncı 2.8 MPa ve sıcaklık 520 °C’de püskürtme yapılmıştır. Nozül altlık arası mesafe 10, 30, 50, 70, 90 ve 110 mm olarak ayarlanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, nozülden çıktıktan sonra tozların belirli bir mesafeye kadar hızlanmaktadır ve bu mesafe tozun özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Aynı malzemedede bu mesafe daha büyük boyutlardaki tozlar için küçük boyutlu olanlara göre daha uzundur fakat farklı malzemeler için bu mesafe tozların yoğunluklarına göre değişmektedir. Yapılan bu çalışmada bu mesafenin birikme verimi üzerindeki etkisi alüminyum, bakır ve titanyum tozları için farklı özellik göstermektedir. Bu mesafe artarken alüminyum ve titanyum tozlarının birikme veriminin düştüğü fakat bakır tozları için birikme verimi ise öncelikle belirli bir noktaya (30 mm) kadar arttığı ve sonrasında mesafe artmaya devam ettikçe birikme veriminin düştüğü görülmektedir. Bu durum bakır tozlarının diğer tozlara göre farklı yoğunluğa sahip olmasıyla açıklanmaktadır. Bakır diğer tozlara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptir ve bu yüzden bakırın altlık-nozül arası mesafesi diğer tozlara göre daha yüksektir. Alüminyum ve titanyumun yoğunlukları birbirine yakındır ve gösterdikleri sonuç da birbirine benzerdir sonucu verilmiştir.

S.Kumar ve arkadaşları soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi için sonlu elemanlar analiz metodunu kullanarak simülasyon çalışması ve deneysel çalışma yapılarak bakır tozlarının parlatılmış ve pürüzlü yüzeylerde (alüminyum ve bakır) nasıl bir partikül birikmesi gösterdiğini irdedelemişlerdir. Çalışma gazı olarak azot kullanılmıştır. Nozül-altlık arası mesafe 30 mm olarak alınmıştır. Bakır tozları düz ve kum püskürtülmüş bakır ve alüminyum yüzeylere püskürtülmüştür ve taramalı elektron mikroskobu ve Romulus yapışma dayanımı cihazı ile karakterize edilmiştir. Sonuç olarak düz

yüzeyle göre kum püskürtülmüş yüzeyde deformasyon ve bağlanma daha yüksek olduğu bulunmuştur. Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde yüzey pürüzlülüğünün başlangıç birikme verimi üzerinde olumlu bir faydası olduğu gösterilmiştir. Fakat yüzey pürüzlülüğü değerinin püskürtülen tozun boyutlarına yakın olması durumunda işe yaradığını da vurgulamışlardır. Bu yüzden farklı durumlar için yüzey pürüzlülüğü değerleri optimize edilmelidir [38].

Renzhong ve arkadaşlarının [39] yaptığı bir çalışmada soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle ultra kuvvetli yapışma mukavemetine sahip kaplamalar elde edebilmek için çeşitli altlık malzemeler kullanılarak kaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmada bakır tozlarını alüminyum alaşımları (Al5052 ve Al6063) ve paslanmaz çelik (PÇ) üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle kaplamışlardır ve yapışma mukavemetini incelemişlerdir. Çalışma gazı olarak azot ve helyum kullanılmıştır. Kullanılan gazın basıncı 2 MPa ile 5 MPa arasında değişmekte olup kullanılan gazın sıcaklığı da 473K ile 1273 K arasındadır. Deneyle sonucunda Al alaşımı altlıkların kullanıldığı kaplamalarda deformasyon çoğunlukla altlıklarda meydana gelerek kaplama ile altlık arasında mekanik olarak güçlü bir bağ elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen yüzey ve kesit görüntüleri Şekil 2.14'de görülmektedir.



**Şekil 2.14 :** Morfoloji görüntüleri: a) Yüzey, Al5052 altlık b) Kesit, Al5052 c) Yüzey, PÇ altlık d) Kesit, PÇ altlık [39].

Fakat altlık malzemesi olarak 316L paslanmaz çeliğin kullanıldığı kaplamalarda, paslanmaz çeliğin dayanımı yüksek olduğu için deforme edilmesi güçtür ve sonuç olarak deformasyon çoğunlukla bakır tozlarında görülmüştür. Çalışma gazı olarak

helyum kullanılsa bile alüminyum alaşımı altlıklarda olduğu gibi önemli derecede deformasyon oluşmaz. Bu yüzden paslanmaz çelik ile Cu kaplama arasında mekanik bir kilitlenme görülmesi zordur. Fakat ikisi arasında güçlü bir yapışma mukavemeti (200 MPa'dan fazla) hala sağlanabilir. Ancak efektif bir bağlanma için Cu kaplama ile paslanmaz çelik altlık arasında bir metalürjik bağ meydana getirecek difüzyon gibi bir olayın meydana gelmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanılan gaz basıncıyla birlikte parçacık hızının arttığı dolayısıyla yapışma mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Çalışma gazı olarak da azot yerine helyum kullanılması kaplamaların birikme verimini arttırmaktadır.

### 3. BAĞLANMA MEKANİZMASI

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin ilk çıktığı zamanlarda gerçek bağlanma mekanizması tam olarak anlaşılammıştır. Bazı bilim insanları tozların altlık yüzeyine çarptıklarında birikebilmeleri için gaz akımı içinde hızlandırılmış tozların ergime noktasına ya da ergime sıcaklıklarına yakın sıcaklıklara ulaşmaları gerektiğini iddia etmişlerdir. Diğer yandan, bazı araştırmacılar kaplama oluşumu sırasında fiziksel bir değişimin olduğu düşüncesini reddetmişlerdir [1, 22].

Bugün soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kaplama oluşumunda yüksek kinetik enerjiye sahip olan tozların altlık malzemeye çarpması sırasında bu enerjisini plastik deformasyon için kullandığı düşüncesine inanılmaktadır. Sünek malzemelerin kolayca yüzeyde biriktiği fakat gevrek malzemelerin herhangi bir sünek malzemeyle karıştırılıp kullanılmadığı sürece yüzeyde birikme olmadığı gözlemi bağlanma mekanizmasının püskürtülen malzemelerin plastik deformasyon kabiliyetine bağlı olduğu düşüncesini desteklemektedir [11, 40-42]. Bu yüzden, birikme olabilmesi ve parçacıkların plastik deformasyona uğraması için yeterli kinetik enerjiye sahip olmalıdırlar. Bu da yüzeyde birikme sağlanması için gerekli minimum hız olarak adlandırılan kritik hız olduğu açıklamasına kanıt sağlamaktadır [11, 40, 42, 43].

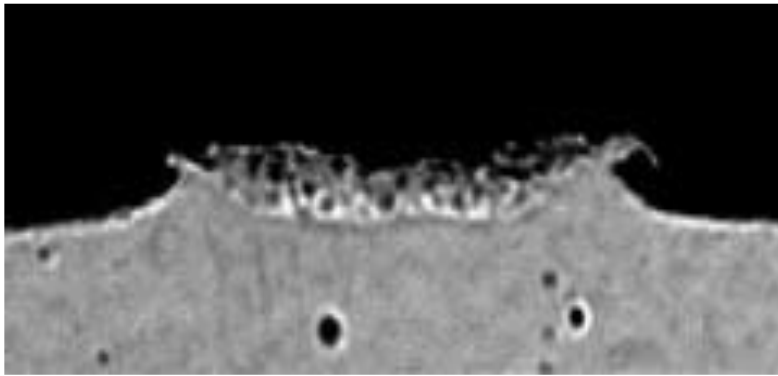
Bu yönteme çok ilgi olmasına rağmen bugün bile hala bağlanma mekanizması açıkça anlaşılammıştır. Tozlar arasında ve kaplama/altlık arasındaki bağlanma mekanizmasını incelemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan bütün çalışmalar yüksek hıza sahip tozların altlık yüzeyine çarpması esnasında sahip oldukları kinetik enerjinin bölgesel ısı yayılımı kadar tozların plastik deformasyonun ortaya çıkardığı adyabatik kayma gerilmeleri için harcadığını göstermiştir [18, 44]. Ortaya çıkan ısı yayılım oranının püskürtülen tozların bölgesel olarak ergimesine ve/veya yumuşamasına sebep olacak derecede yeterli olup olmadığı bazı araştırmacılar arasında bir anlaşmazlık yaratmıştır. Hesaplamalar ve yapılan sayısal modellemeler ile tozların sahip olduğu kinetik enerjinin kendilerini ergitmek için yeterli olmadığı açıklanmıştır [43, 45]. Bu da kaplama esnasında püskürtülen tozların sıcaklığının

ergime noktasının oldukça altında kaldığını ve herhangi bir fiziksel değişiklik olmadığını kanıtlamıştır. Sonuç olarak soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde birikme mekanizmasının bir katı hal prosesi olduğu kanısına varılmıştır.

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemindeki bağlanma mekanizmasındaki mantığı daha iyi anlayabilmek için birçok simülasyon yöntemi dizayn edilmiştir. Aşağıdaki paragraflarda literatürde yapılan sayısal ve deneysel araştırmalar sonucunda elde edilen açıklamalar tartışılmıştır.

İlk bağlanma mekanizması 1990'ların sonlarına doğru Dykhuizen [43, 45] tarafından ortaya atılmıştır. Yaptığı çalışmada yüksek lokal basınç (yüksek hızdaki çarpma) altında ciddi anlamda bir plastik deformasyon meydana geldiği ve bunun sonucunda yüzey üzerinde katı halde bir yüzey filmi oluştuğunu söylemiştir. Sağlanan bu film püskürtülen tozlar ile altlık malzeme arasında daha iyi bir temas ve dolayısıyla daha iyi bir bağlanma sağlayacağını öngörmüştür.

Şekil 3.1'de paslanmaz çelik altlık üzerine bakır tozlarının çarptığı bir görüntü vardır. Bakır tozlarının çarpmasıyla oluşan krater (çukur) oluşumu ve ara yüzeydeki kaplama jeti oluşumu gözlenebilir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda [45] altlık ile tozlar arasında bir kaplama jeti oluştuğu ve iyi bir bağlanma için altlıkta veya tozlarda herhangi bir ergimeye gerek olmadığı gösterilmiştir. Buna benzer bir bağlanma mekanizması olduğunun iddia edildiği başka bir çalışma Van Steenkiste ve arkadaşları tarafından yapılmıştır ve bağlanmanın plastik deformasyon sayesinde olup ergimeye dair bir kanıtın olmadığı söylenmiştir [6].

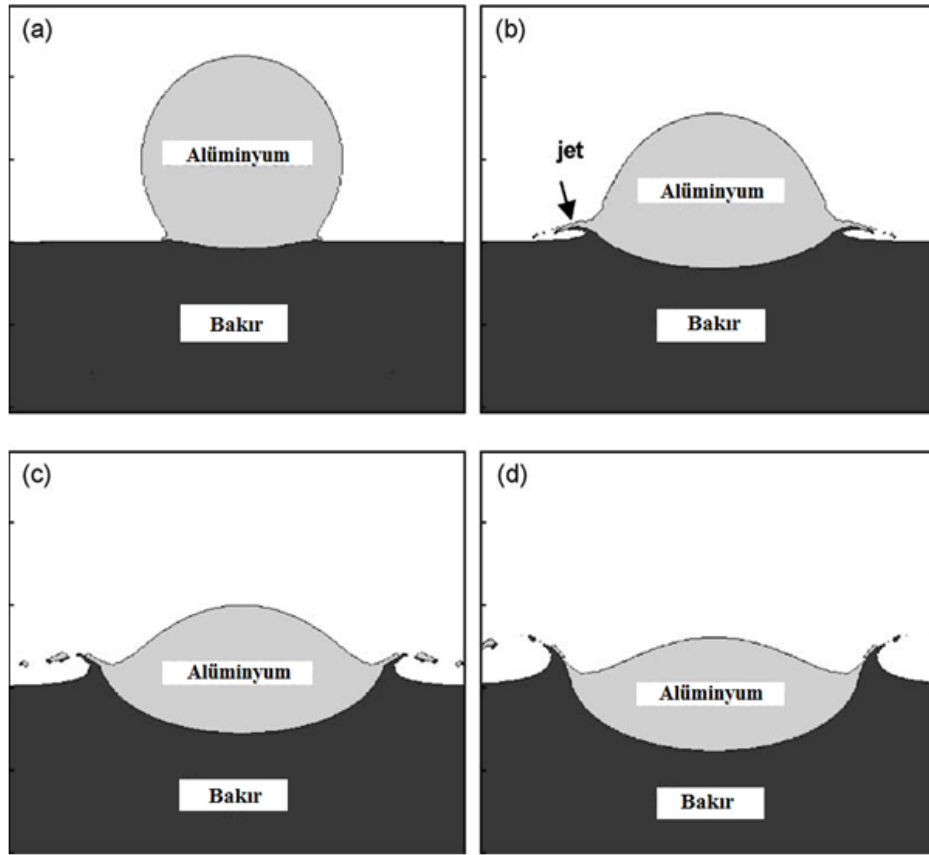


**Şekil 3.1 :** Paslanmaz çelik altlık üzerine 700 m/s hızlar çarpan Cu tozlarıyla elde edilen yüzeyin enine kesit görüntüsü [45].

20 µm boyuta sahip tek bir alüminyum tozunun bakır yüzeyi üzerine, 20 µm boyuta sahip bakır tozunun alüminyum altlık üzerine [41] ve tek bakır tozunun bakır altlık [18, 44] üzerine çarpmasını simüle etmek için sayısal çalışmalar yapılmıştır. Kaplama

esnasında oluşan jet tipi bağlanma mekanizmasını daha iyi incelemek için ve böyle bir jet oluşumunun bağlanmaya nasıl yardımcı olduğunu anlamak için bilgisayarlı simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Şekil 3.2’de ilk toz-altlık temasından sonra 4 farklı zaman (5, 20, 35 ve 50 ns) içerisinde 650 m/s hıza sahip alüminyum tozları ile bakır altlık arasında gerçekleşen simülasyon çarpışma sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında toz-altlık arasındaki temas zamanı arttıkça toz boyut (yükseklik/genişlik) oranı azalırken altlık malzemedeki oluşan çukur derinliği ve genişliği artmaktadır. Bu artma da altlık malzemedeki çukur oluşumuyla birlikte püskürtülen tozlarda yassılaşmaya (yükseklik/genişlik oranında azalma) sebep olan plastik deformasyonun gerçekleştiğini gösterir.

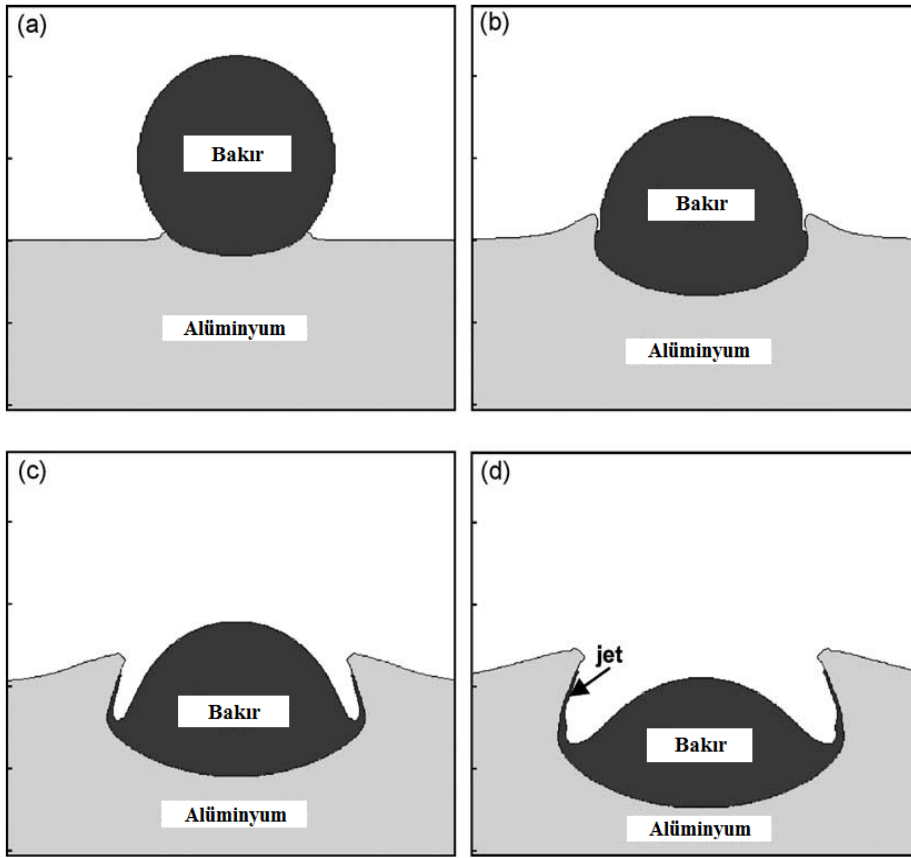


**Şekil 3.2 :** 20 µm boyutu sahip alüminyum tozlarının 650 m/s hızla bakır altlığa çarptıktan sonraki şekil değişimleri a)5ns b)20ns c)35ns d)50 ns [41].

Şekil 3.3’de gösterildiği üzere benzer sonuçlar 650 m/s hıza sahip bakır tozları ve alüminyum altlık üzerinde de görülmüştür. Fakat bu durumda daha küçük toz-altlık arası temas yüzey alanıyla sonuçlanmasına sebep olan altlıkta daha derin çukurlar oluştuğu ve püskürtülen tozun daha az yassılaşma oranına sahip olduğu görülmüştür.

Bu olay bakır tozlarıyla karşılaştırıldığında alüminyumun daha düşük dayanıma sahip olması ve daha ağır olan bakır tozlarının ağırlığına bağlı olarak daha fazla kinetik enerjiye sahip olmasına dayandırılabilir.

Çünkü deformasyon kullanılan altlık ve kaplama malzemesinin dayanımına bağlıdır ve altlık malzemesinin çukurlaştığı durum her zaman altlık ve kaplama malzemesi arasında görülmez [46]. Örnek olarak, alüminyum tozlarının çelik altlık üzerine birikmesi zordur çünkü kaplama esnasındaki deformasyon oranı çeliğe kıyasla alüminyumun daha düşük bir dayanıma sahip olması yüzünden kısıtlanmaktadır [47, 48].



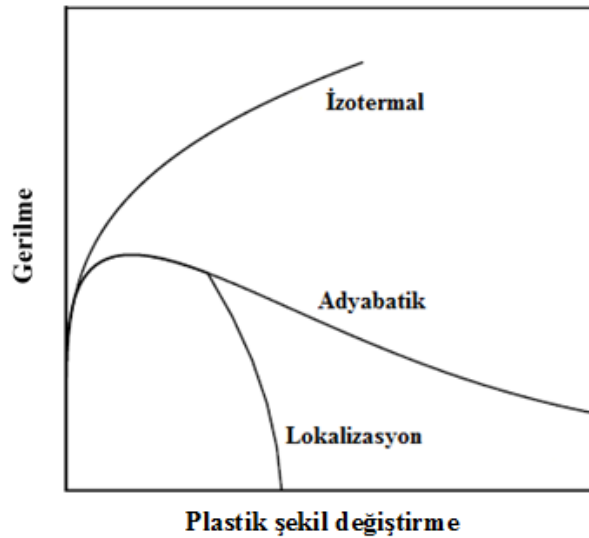
**Şekil 3.3** : 20 µm boyutu sahip bakır tozlarının 650 m/s hızla alüminyum altlığa çarptıktan sonraki şekil değişimleri a)5 ns b)20 ns c)35 ns d)50 ns [41].

Çarpmadaki püskürtülen tozların deformasyonunu araştırmak için son zamanlarda yapılan sayısal modellemeler soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde bağlanma mekanizmasını adyabatik kayma kararsızlıklarına dayandırmaktadır [18, 49]. Mevcut bağlanma mekanizması adyabatik kayma kararsızlığı olarak adlandırılan hızlı bölgesel ısınma ve kayma olayıdır. Adyabatik kayma kararsızlığı mekanizması ilk ayrıntılı olarak Wright [22, 50] tarafından tanımlanmıştır ve akabinde Assadi ve arkadaşları

tarafından soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi prosesi boyunca püskürtülen tozların kendi aralarındaki ve kaplama-altlık arasındaki bağlanmayı ve dolayısıyla deformasyon mekanizmasını açıklamak için kullanılmıştır [18].

Adyabatik kayma kararsızlığını basit olarak anlamak için, klasik gerilme- plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.4’de verilmiştir. Adyabatik olmayan şartlar altında malzemede klasik bir deformasyon sertleşmesi için, plastik şekil değiştirme arttıkça gerilme de artar. Diğer yandan, adyabatik şartlar altında, plastik şekil değiştirme enerjisi sıcaklık artışına sebep olan ısı enerjisi olarak malzemeye yayılır ve malzeme yumuşar.

Sıcaklık artışı deformasyon sertleşmesi etkisinin üstesinden gelir ve sonuç olarak maksimum değere ulaşıldıktan sonra şekil değiştirmeye devam ettikçe gerilme azalır. Bu durum Şekil 3.4’de adyabatik yazan eğride gösterilmiştir. Teorik olarak homojen bir mikroyapıda homojen dağılıma sahip gerilme, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık ile birlikte ideal bir malzemede yumuşama süresiz olarak devam edebilir. Fakat gerçek malzemelerde gerilmadaki, plastik şekil değiştirmedeki, sıcaklıktaki veya mikroyapıdaki dalgalanmalar ve deformasyon yumuşamasının özünde olan kararsızlık bölgesel plastik akışa sebep olabilir. Bu şartlarda malzemenin etrafını saran bölgelerde plastik şekil değiştirme ve ısınma ( dolayısıyla yumuşama) pratikte dururken, plastik akış ve ısınma büyük ölçüde bölgeselleşir. Bu da dolayısıyla gerilmenin hızla sıfıra düşmesine neden olur.

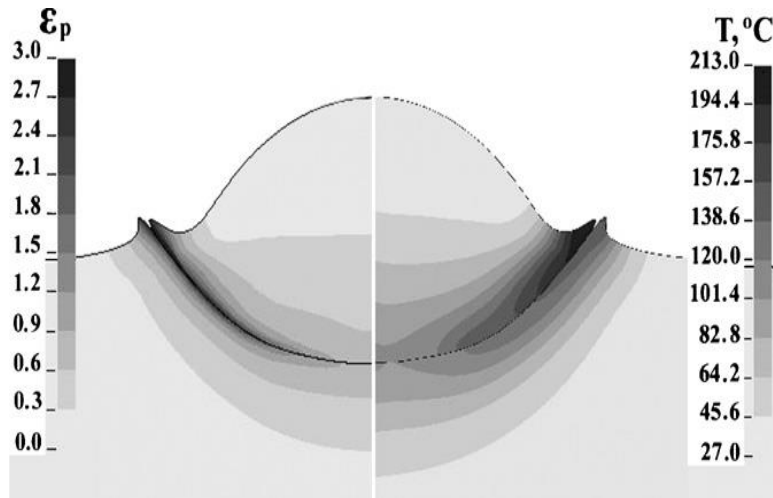


**Şekil 3.4 :** Farklı durumlardaki gerilme-plastik şekil değiştirme eğrisinin şematik gösterimi [50].

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde adyabatik kayma kararsızlığı olarak tanımlanan bağlanma mekanizması adyabatik sıcaklık yükselmesi yüzünden arayüzey bölgesinde malzemenin bölgesel yumuşaması esasına dayanmaktadır. Bu bölgelerde yüksek çarpma hızından kaynaklanan yüksek plastik şekil değiştirme oranları kayma kararsızlıklarına ve malzeme deformasyon mekanizmasının plastik akıştan viskoz akışa doğru değişmesine sebep olur .

Tozlar arası ve toz-altlık arası etkileşimlerin adyabatik olduğu düşünülmektedir çünkü çarpma esnasındaki termal difüzyon için gerekli olan mesafe temas süresi az olduğu için kısadır [41].

Şekil 3.5’de tek bir bakır tozunun 27°C ‘de 500 m/s hızla bakır altlık yüzeyine çarpmasından 24 ns sonra elde edilen efektif plastik gerinim ve sıcaklık değişimleri verilmiştir. Bu durum simülasyon ile elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları yüksek oranda deformasyonun dar arayüzey bölgelerinde ve maksimum plastik deformasyonun ilk çarpmanın orta noktasından çok temas bölgesinin çevresinde oluştuğunu ortaya çıkarmıştır [44]. Aynı zamanda adyabatik kaymalar yüzünden büyük oranda deforme olmuş arayüzeyde önemli ölçüde ısı ortaya çıkmıştır [13, 42, 44, 50]. Plastik deformasyon boyunca açığa çıkan ısı adyabatik olarak bölgesel sıcaklığı artırır ve adyabatik kayma kararsızlığına sebep olan malzemenin yumuşamasını sağlar. Adyabatik kayma kararsızlığı denilen durum da toz-kaplama arayüzey arasındaki plastik deformasyonu ve bağlanmayı kolaylaştırır. Sıcaklık plastik şekil değiştirme yüzdesiyle orantılıdır bu yüzden sıcaklık dağılımı plastik şekil değiştirme ile benzerdir [44].



**Şekil 3.5:** Bakır tozunun 500 m/s hızla bakır altlık yüzeyine çarpmasından 24 ns sonra elde edilen plastik şekil değiştirme ve sıcaklık değişimleri[44].



Sonuç olarak yapılan bu çalışmalara göre soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde bağlanma mekanizması kritik hızda veya ötesinde sağlanan adyabatik ısınmanın sebep olduğu ve püskürtülen tozların yumuşamasıyla sonuçlanan, toz-altlık ara yüzeyinde meydana gelen bölgesel yüksek plastik deformasyon ve adyabatik kayma kararsızlıklarına dayandırılabilir.

Yüksek hızlarda, sıcaklık yükselmesi ve püskürtülen tozların yumuşaması deformasyon sertleşmesi etkisinden kurtulabilir ve bu durum da arayüzeyde bağlanmayı sağlayan adyabatik kayma kararsızlıklarına sebep olur [17, 18]. Fakat soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemindeki bağlanma mekanizmasıyla ilgili durum hala tam anlamıyla açıklanamamıştır.

## **4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1 Prosesi Etkileyen Parametrelerin Seçilmesi ve Numunelerin Hazırlanması**

SGDP kaplama yöntemi de diğer yöntemler gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Yapılan çalışmalarda temel olarak proseste kullanılan tozun özellikleri, nozül geometrisi, gaz türü, sıcaklığı ve basıncı gibi faktörlerin kaplamaya olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ise yelpazeyi biraz genişleterek kaplama işleminde kullanılan altlık malzemesinin sertliği, altlık malzemesinin yüzey pürüzlülüğü ve nozül-altlık arasındaki mesafe değiştirilerek soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların ne gibi özellikler gösterdiği irdelenmiştir.

Öncelikle elimizde olan yüksek saflıktaki 30 cm bakır profil çubuğundan 20mm x15mm olacak şekilde bakır numuneleri kesilmiştir. Daha sonra uygulanan işlemler ilerideki bölümlerde anlatılmıştır.

#### **4.1.1 Altlık malzemenin sertliği**

Altlık sertliğinin kaplamaya olan etkisini görebilmek için orijinal sertliği yaklaşık 120 HV<sub>0,3</sub> sertliğe sahip bakıra çeşitli işlemler uygulanarak 3 farklı sertlik değeri elde edilmiştir. Bu farklı sertliklerdeki numunelerin yüzey pürüzlülüklerini eşitlemek için 2500 gritlik zımparaya kadar zımparalanmıştır ve ardından 3 µm' lik elmas süspansiyonla parlatılmıştır. Zımparalama ve partlatma işlemleri Şekil 4.1'de görülen MECAPOL marka P 220S model cihazla yapılmıştır. Çizelge 4.1'de uygulanan işlemlerle ve bu işlem sonucundan elde edilen farklı sertlikteki altlık malzemelerinin sahip oldukları yüzey pürüzlülükleri verilmiştir. Orijinalinde 120 HV sertliğe sahip olan saf bakır numune bir saatte 275 °C'ye çıkarılmış olan fırına koyularak 1 saat bekletilmiştir. Bir saat sonunda alınan numune su altında soğutulmuştur. Bu işlemin sonucunda bakırın sertliği 107 HV'ye düşmüştür. Başka bir bakır numune aynı şekilde 285 °C'ye çıkmış olan fırına koyularak 55 HV sertliğe sahip bakır numuneler elde edilmiştir. Ayrıca 120 HV sertliğe sahip bakır numunelere basma testi uygulanarak sertliği 140 HV' ye çıkarılmıştır. %85 oranında bir deformasyona maruz kalmıştır.

**Çizelge 4.1 :** Uygulanan işlem ve elde edilen Cu sertliği ile sahip oldukları ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Uygulanan İşlem	Cu sertliği	Ort. Yüzey pürüzlülüğü
275°C fırında 1 saat bekleme	107 HV	0,06µm±0,02µm
285°C fırında 1 saat bekleme	55 HV	0,06µm±0,02µm
%85 soğuk deformasyon	140 HV	0,06µm±0,02µm

Elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü ise Şekil 4.2' de gösterilen Veeco Marka Dektak 6M Profilometre cihazı ile yapılmıştır.



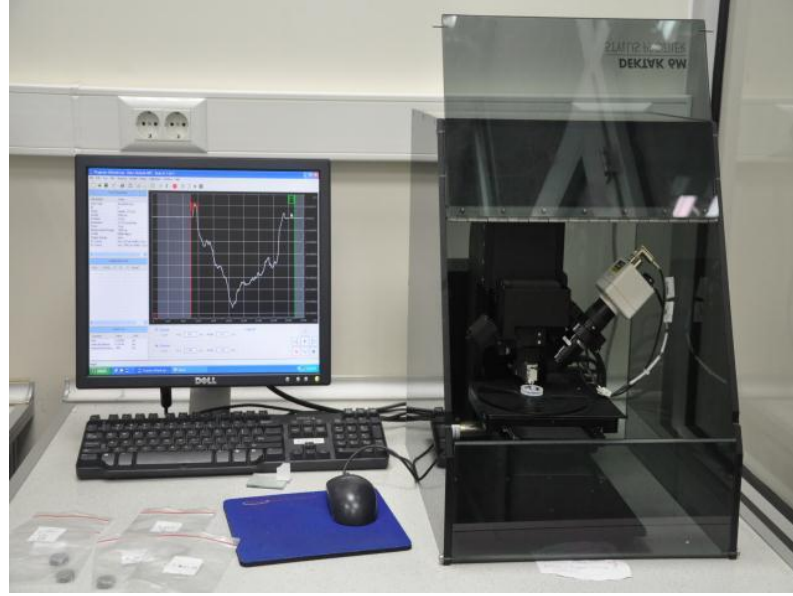
**Şekil 4.1 :** MECAPOL marka zımparalama ve parlatma cihazı [55].

#### 4.1.2 Altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğü

Farklı yüzey pürüzlülükleri elde etmek için her numune için sırasıyla 80, 120, 400 gritlik ve 2500 gritlik zımpara kağıtları kullanılmıştır. Üç farklı yüzey pürüzlülüğü için farklı zımpara kağıtları kullanılırken dördüncü yüzey pürüzlülüğü için numune zımparalandıktan sonra parlatma işlemi uygulanmıştır. Sırasıyla 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2500 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanan numune ardından 3 µm' lik elmas süspansiyonla ve yağlayıcıyla parlatılmıştır. Yapılan zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra yüzey pürüzlülükleri (R<sub>a</sub>) profilometre cihazı ile ölçülmüştür. Böylece kaplama prosesi için dört farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip bakır altlık numuneleri elde edilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 4.2'de elde edilen bakır numunelerin sahip oldukları yüzey pürüzlülükleri ile altlık sertliği hakkındaki diğer bilgiler verilmiştir.

**Çizelge 4.2 :** Hazırlanan altlık numunelerinin yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleri.

Ort. yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ )	Altlık sertliği ( $HV_{0,3}$ )
$1,7 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$	120 HV
$1,09 \mu\text{m} \pm 0,15 \mu\text{m}$	120 HV
$0,46 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$	120 HV
$0,06 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$	120 HV



**Şekil 4.2 :** Veeco Dektak 6M profilometre cihazı.

#### 4.1.3 Nozül-altlık arası mesafe

Nozül ile altlık arasındaki mesafenin kaplamaya olan etkisini incelemek için 4 farklı uzaklık değeri kullanılmıştır. Bunun öncesinde yüzey pürüzlülüklerini eşitlemek için aynı metalografik işlemler uygulanmıştır. Numunelere sırasıyla 320, 400, 600, 800, 1200 ve 2500 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanıp, ardından  $3 \mu\text{m}$ ' lik elmas süspansiyonla ve yağlayıcıyla parlatılmıştır. Bakır numunelerin orijinal sertliği korunmuştur. Elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve kullanılan nozül-altlık arası mesafe değerleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3 :** Hazırlanan altlık numunelerinin yüzey pürüzlülük ve sertlik değerleriyle birlikte kaplamalarda kullanılan nozül-altlık arası mesafeler.

Nozül-altlık arası mesafe (mm)	Ort. yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ )	Altlık sertliği ( $HV_{0,3}$ )
5	$0,06\mu\text{m} \pm 0,02\mu\text{m}$	120 HV
10	$0,06\mu\text{m} \pm 0,02\mu\text{m}$	120 HV
20	$0,06\mu\text{m} \pm 0,02\mu\text{m}$	120 HV
30	$0,06\mu\text{m} \pm 0,02\mu\text{m}$	120 HV

## 4.2 Kaplama İşlemi ve Karakterizasyon Testleri

### 4.2.1 Kaplama İşlemi

Kaplama çalışmalarında %99,9 saflığa sahip küresel bakır tozları kullanılmıştır. Kaplama işlemi öncesi yüzey temizliği amacıyla bakır altlıklar oksit kırıcıya koyularak ultrasonik temizleyicide alkol içerisinde bekletilmiştir. Bakır tozları RUSONIC marka (Şekil 4.3) soğuk dinamik gaz püskürtme cihazı ile bakır altlığa püskürtülmüştür. Hızlandırıcı gaz olarak 6 bar nozül giriş basıncına sahip hava kullanılmıştır. Nozül çıkışı ile numune arasındaki mesafe, bu mesafenin etkisinin incelendiği numuneler hariç 10 mm olarak ayarlanmış ve sabit tutulmuştur. Bakır altlık servo motor kontrollü bir tutucuya bağlanmış ve kaplama işlemleri 1 paso ve çizgi halinde uygulanmıştır.



Şekil 4.3 : RUSONIC marka SGDP cihazı [56].

Kaplama işlemlerinde cihaz üzerinde bulunan 8 kademeli toz besleme hızlarından 2. kademe kullanılmış olup, seçilen parametreler Çizelge 4.4' de özetlenmiştir.

Çizelge 4.4 : SGDP yönteminde kullanılan parametreler.

SGDP yönteminde kullanılan parametreler	
Çalışma Gazı (Hava)	6 bar
Kaplama Hızı	5 mm/sn
Nozül-Altlık Arası Mesafe	10 mm
Paso Sayısı	1
Besleme Hızı	2/8 kademe
Gaz Sıcaklığı	400-600 °C

#### 4.2.2 Mikroyapısal incelemeler

SDGP yöntemi ile kaplanan numuneler, kaplanan yüzeye dik yönde Buchler Isomet hassas kesici ile kesilerek bakalite alınmıştır. 400,600, 800, 1000, 1200 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanan numuneler 3 µm 'lik elmas pasta ile MD Mol tipi çuha kullanılarak parlatılmıştır. Ardından Fe(III)Cl ile dağlanmışır. Dağlanan numunelerin kesit mikroyapıları Leica DM 6000M optik mikroskobu ve Hitachi TM1000 masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 4.4'de kullanılan taramalı elektron mikroskobunun görüntüsü mevcuttur. 500 büyütmedeki mikroyapı fotoğrafları kullanılarak kaplamaların içerisindeki porozite miktarı Clemex görüntü analiz etme programı ile bulunmuştur. Ayrıca mikroyapı fotoğrafları kullanılarak kaplama kalınlıkları ölçülmüştür.



Şekil 4.4 : Hitachi TM1000 masaüstü taramalı elektron mikroskobu [57].

Kaplamaların yapısında oksit olup olmadığını anlamak için Bruker D8 Advance X ışınları difraktometresinde Cu K $\alpha$  ışınları altında 20° -100° tarama aralığında analiz edilmiştir.

#### 4.2.3 Sertlik ölçümü

Saf bakır tozlarıyla üretilmiş kaplamaların yüzey sertlikleri 200 gram yük altında (HV<sub>0.2</sub>) 10 sn uygulama süresiyle, elmas piramit batıcı uç kullanılarak Shimadzu HMV mikrosertlik cihazında ölçülmüştür. Her numune için kaplamanın farklı bölgelerinden yaklaşık 20 ölçüm alınmıştır ve bu değerlerin ortalaması alınarak bir sertlik değeri bulunmuştur.



**Şekil 4.5 :** Shimadzu marka HMV model mikro sertlik cihazı [58].

#### **4.2.4 Kaplama yoğunluğu ölçümü**

Yapışma mukavemetini bulmak için yapılan çekme testinin ardından kopan parçalar kullanılarak arşimet prensibiyle kaplama yoğunluğu değerleri bulunmuştur. Bir çeşit numune için 3 farklı numunenin yoğunluğu hesaplanarak ortalaması alınmıştır. Şekil 4.6'daki PRECISA marka Hassas Terazî/Arşimet Yoğunluk Ölçüm cihazı kullanılarak kaplama yoğunlukları bulunmuştur.



**Şekil 4.6 :** Hassas terazi ve Arşimet düzeneği.

Yoğunluğu ölçülecek numunelerin öncelikle kuru ağırlıkları ( $m_1$ ) tartılmıştır. Arşimet metodu ile yoğunluk ölçümünde ölçümü yapılacak numunelerin açık gözenekleri su ile doldurulmalıdır. Fakat bakırın oksitlenmeye eğilimi olduğu için bu işlem alkol ile yapılmıştır. Bekletme süresi sonucunda numunelerin yaş ağırlıkları ( $m_2$ ) ve son olarak

numunelerin suyun içerisinde askıdaki ağırlıkları ( $m_3$ ) Şekil 4.6'da gösterilen Arşimet düzeneğiyle tartılmıştır.

$$\rho = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \quad (4.1)$$

$\rho$  = Numunenin yoğunluğu ( $\text{g/cm}^3$ )

$m_1$  = Numunenin kuru ağırlığı (g)

$m_2$  = Numunenin suda asılı ağırlığı (g)

$m_3$  = Numunenin su emdirildikten sonraki yaş ağırlığı (g)

#### 4.2.5 Yapışma mukavemeti ölçümü

Yapılan kaplamaların yapışma mukavemetini bulmak için çekme cihazı kullanılmıştır. 14x20 mm boyutlara sahip dikdörtgen şeklindeki numuneler çekme aparatlarına epoksi bazlı reçine ile yapıştırılmıştır ve çekme cihazında 1 mm/sn hızla çekilmiştir.



Şekil 4.7 : Shimadzu marka çekme testi cihazı.

#### 4.2.6 Elektrik iletkenliği ölçümü

Saf bakır tozları ile yapılan kaplama numunelerinin yüzeyinden Hocking AutoSigma 3000 Electrical Conductivity Meter cihazı ile numune başına 10 adet olmak üzere iletkenlik değerleri alınmış ve bu değerlerin ortalaması kullanılarak kaplamanın elektrik iletkenliği üzerine etkileri incelenmiştir.



## 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 5.1 Mikroyapısal İnceleme Sonuçları

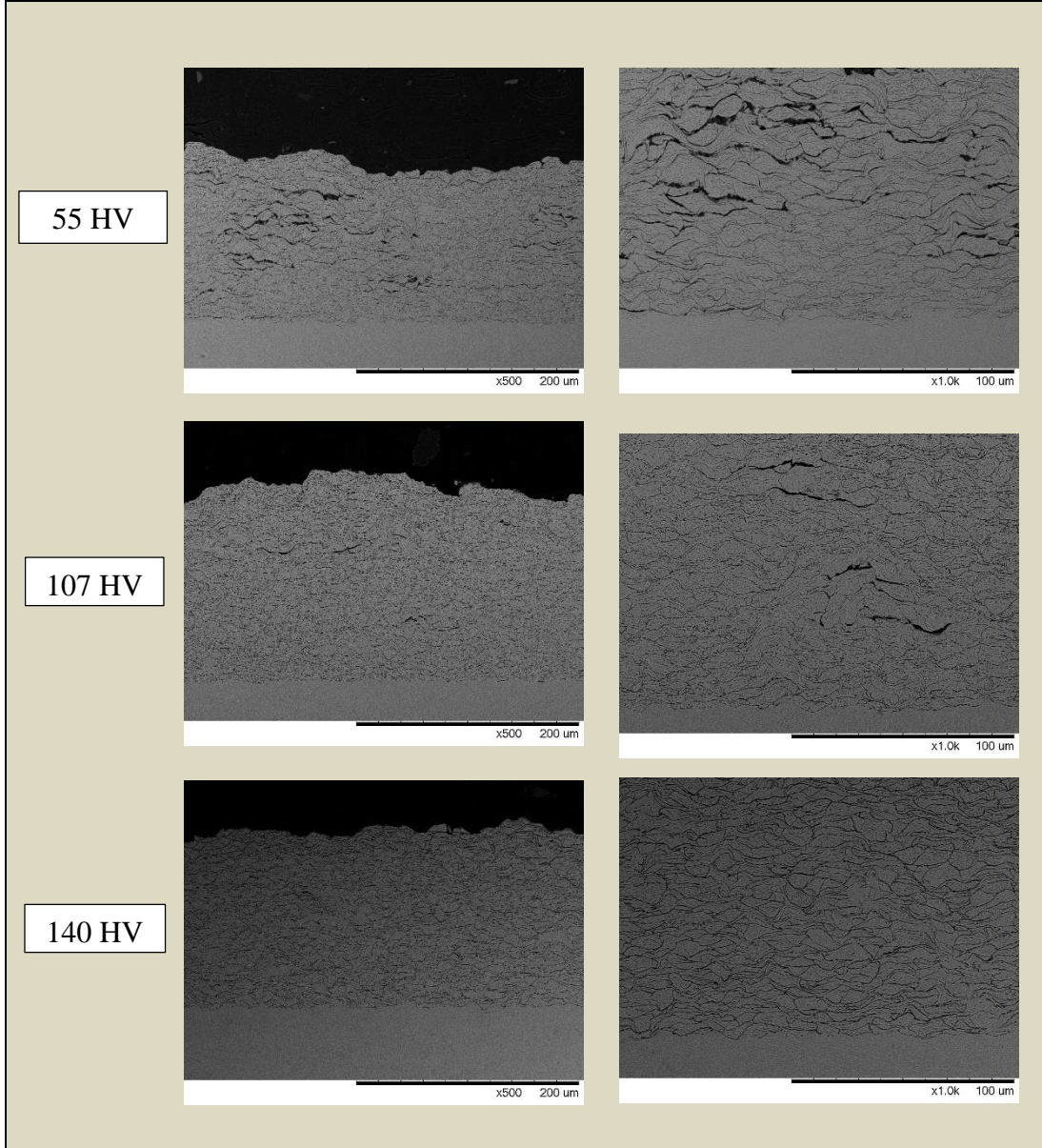
Yüksek saflıktaki bakır çubuklardan istenilen ölçülerde kesilerek elde edilen bakır altlık malzemelerine deneysel çalışmalar bölümünde anlatılan çeşitli işlemler uygulanarak istediğimiz özelliklere sahip altlık malzemeler elde edilmiştir.

Farklı sertliğe (55 HV, 107 HV ve 140 HV) sahip Cu altlık malzemeler ve farklı yüzey pürüzlülüğüne ( $R_a=1.7 \mu\text{m}$ ,  $R_a=1.09 \mu\text{m}$ ,  $R_a=0.46 \mu\text{m}$  ve  $R_a=0.06 \mu\text{m}$ ) sahip Cu altlık malzemeleri hazırlanmıştır. Farklı nozül-altlık arası mesafeler yapılan kaplama işlemi esnasında ayarlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü parametresi hariç bütün Cu bakır altlık malzemelerinin yüzey pürüzlülükleri  $0.06 \mu\text{m}$  olarak eşitlenmiştir. Nozül-altlık arası mesafesinin etkisinin incelendiği durum haricinde kaplama prosesi esnasında kullanılan nozül-altlık arası mesafe 10 mm olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak farklı özelliklere sahip altlık malzemeleri (farklı altlık sertliklerine sahip ve farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip Cu numuneler) kullanılarak yapılan kaplamaların davranışları irdelenmiştir.

Öncelikle altlık sertliğinin kaplamaya olan etkisini incelemek için basma testi ve tavlama işlemleri gibi farklı yöntemler kullanılarak elde edilen farklı sertliklere sahip bakır altlık malzemesi üzerine Cu tozları kaplanmıştır. Bunun sonucunda kaplamalar kesilerek bakalite alınmıştır ve enine kesit görüntüleri kullanılarak incelenmiştir. Optik mikroskop görüntülerinden kaplama kalınlığı, kaplama porozite değerleri bulunmuştur ve mikrovickers sertlik cihazı ile kaplama sertlikleri ölçülmüştür. Çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak irdelenmiştir. Bu işlem diğer parametreler için de yapılmıştır.

55HV, 107 HV ve 140 HV altlık sertliğine sahip Cu altlık malzemeler kullanılarak yapılan kaplamalara mikroyapısal incelemeler bölümünde anlatılan metalografik işlemler uygulanmıştır ve taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu görüntüler göz önünde bulundurularak kaplamaların altlık malzeme yüzeyi ile ilişkileri kontrol edilmiştir. Genel olarak kaplama/altlık arayüzeyinde

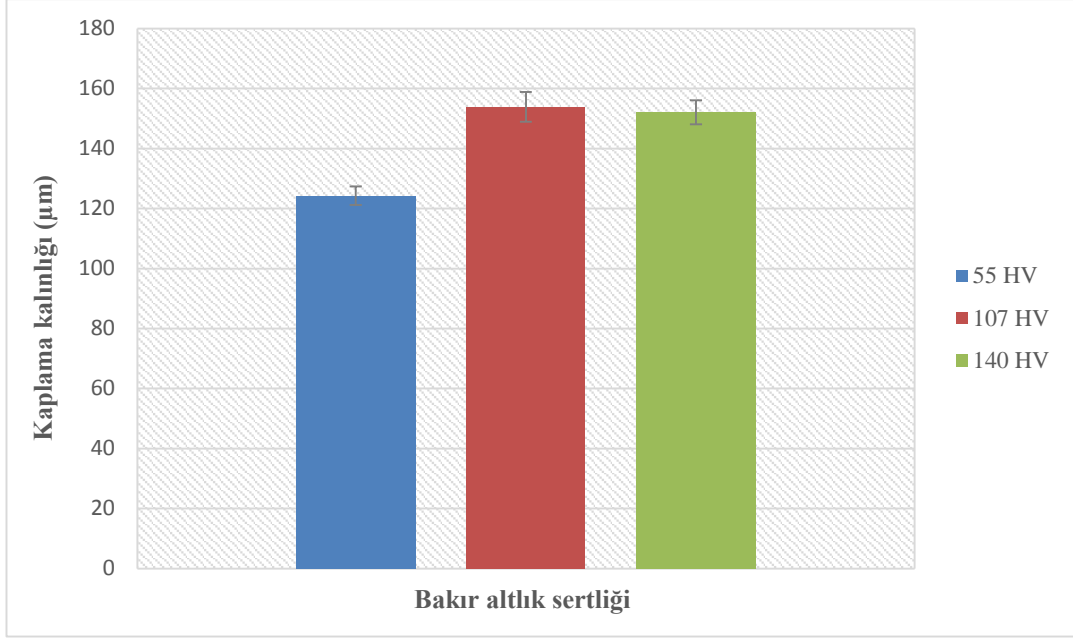
süreksizlik görülmemektedir. Kaplamaların kalınlık ve porozite değerleri Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de verilmiştir. Farklı sertliklere sahip altlık malzemelere ait kaplama kalınlıklarına bakılacak olursa 107 HV ve 140 HV sertlikteki altlık malzemesinin sağladığı kaplama kalınlıkları 150 µm civarlarında olup birbirine çok yakın iken 55 HV sertliğe sahip altlık malzemesinde yaklaşık olarak 125 µm’lik bir kaplama kalınlığı elde edilmiştir.



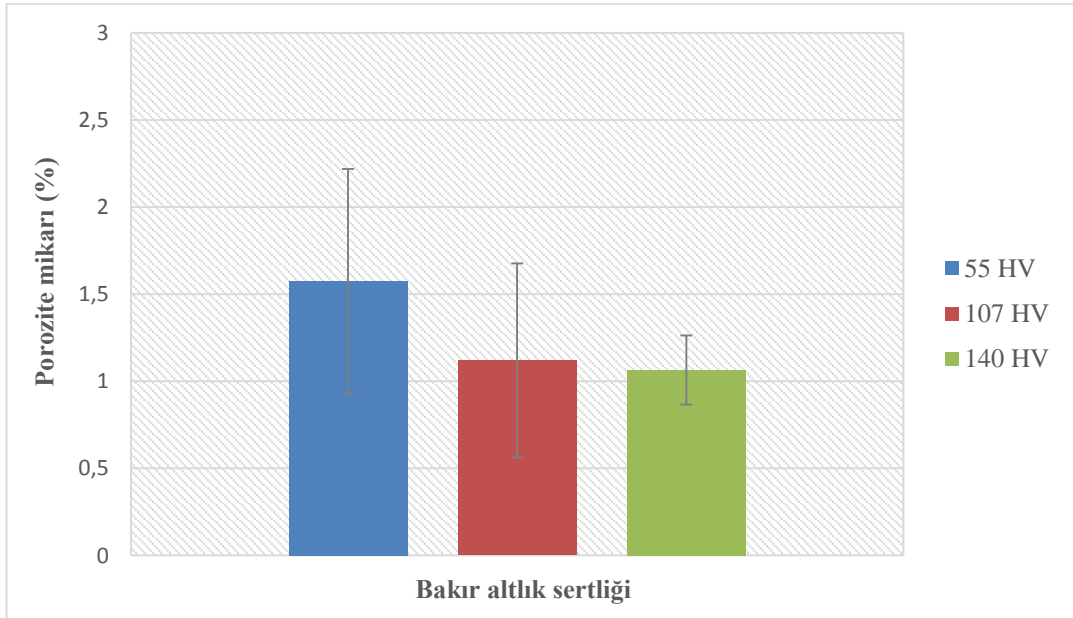
**Şekil 5.1** : 55 HV, 107 HV, 140 HV sertliğine sahip Cu altlık malzemeler kullanılarak yapılan Cu kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Düşük sertlikte altlık malzeme kullanıldığında püskürtülen tozların altlık malzemedен daha sert olması durumunda altlık üzerinde gömülerek birikmesine sebep olabileceğinden kaplama kalınlığının diğerlerine göre daha az olması beklenen bir

sonuç olabilir. Kaplamaların porozite miktarları karşılaştırıldığında taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden de görüleceği üzere düşük sertliğe (55 HV) sahip altlık malzemeye kıyasla daha yüksek sertliğe (107 HV ve 140 HV) sahip altlık malzemeleri kullanılarak yapılmış kaplamalarda daha yoğun bir kaplama yapısı elde edilmiştir. Kaplamaların porozite yüzdeleri sırasıyla 1.58, 1.12 ve 1,07'dir.



**Şekil 5.2 :** Altlık sertliğinin kaplama kalınlığına etkisi.



**Şekil 5.3 :** Altlık sertliğinin kaplama porozitesine etkisi.

Altlık sertliğinin yüksek olduğu durumlarda elde edilen kaplama porozitesinin daha düşük olmasının sebebi tozların sahip oldukları kinetik enerjinin çoğunu kendileri için

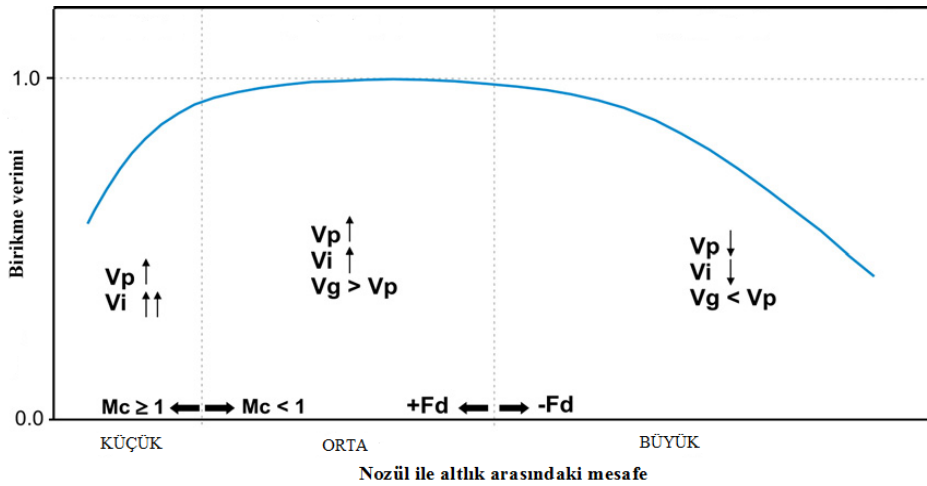
kullanması olabilir. Çünkü altlık malzemenin yumuşak olması durumunda tozların sahip oldukları enerjinin çoğu altlık malzemeyi deforme etmek için kullanılır [36].

Nozül-altlık arası mesafenin kaplama/altlık arayüzeyine ve kaplama kalınlığı, porozitesi ve sertliğine etkisini görebilmek için yapılan deneysel çalışmalarda 5 mm, 10 mm, 20 mm ve 30 mm gibi farklı mesafe aralıkları seçilerek yapılan kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.5’de verilmiştir. Bu görüntüler göz önünde bulundurularak kaplamaların altlık malzeme yüzeyi ile ilişkileri kontrol edilmiştir. Kaplamaların taramalı elektron mikroskobu görüntülerine bakıldığında nozül-altlık arası mesafenin 5 mm olduğu durumda altlık ile kaplama arasında bir süreksizlik olduğu fakat bu mesafe 10, 20 veya 30 mm olduğunda altlık ile kaplama arasında herhangi bir süreksizlik söz konusu olmadığı görülmektedir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda nozül-altlık arası mesafenin soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalara etkisi üzerinde kesin bir fikir birliği olmamakla birlikte çeşitli varsayımlar mevcuttur. Bu düşüncelerden biri proste kullanılan gazın şartları ve rölatif gaz-toz hızına bağlı olarak nozül dışında, kullanılan gazın oluşturduğu akımın içindeki sürüklenen tozların hızı azalabilir veya artabilir yönündedir [34]. Nozül-altlık arası mesafenin birikme verimi üzerindeki etkisi Şekil 5.4’de verilmiştir.

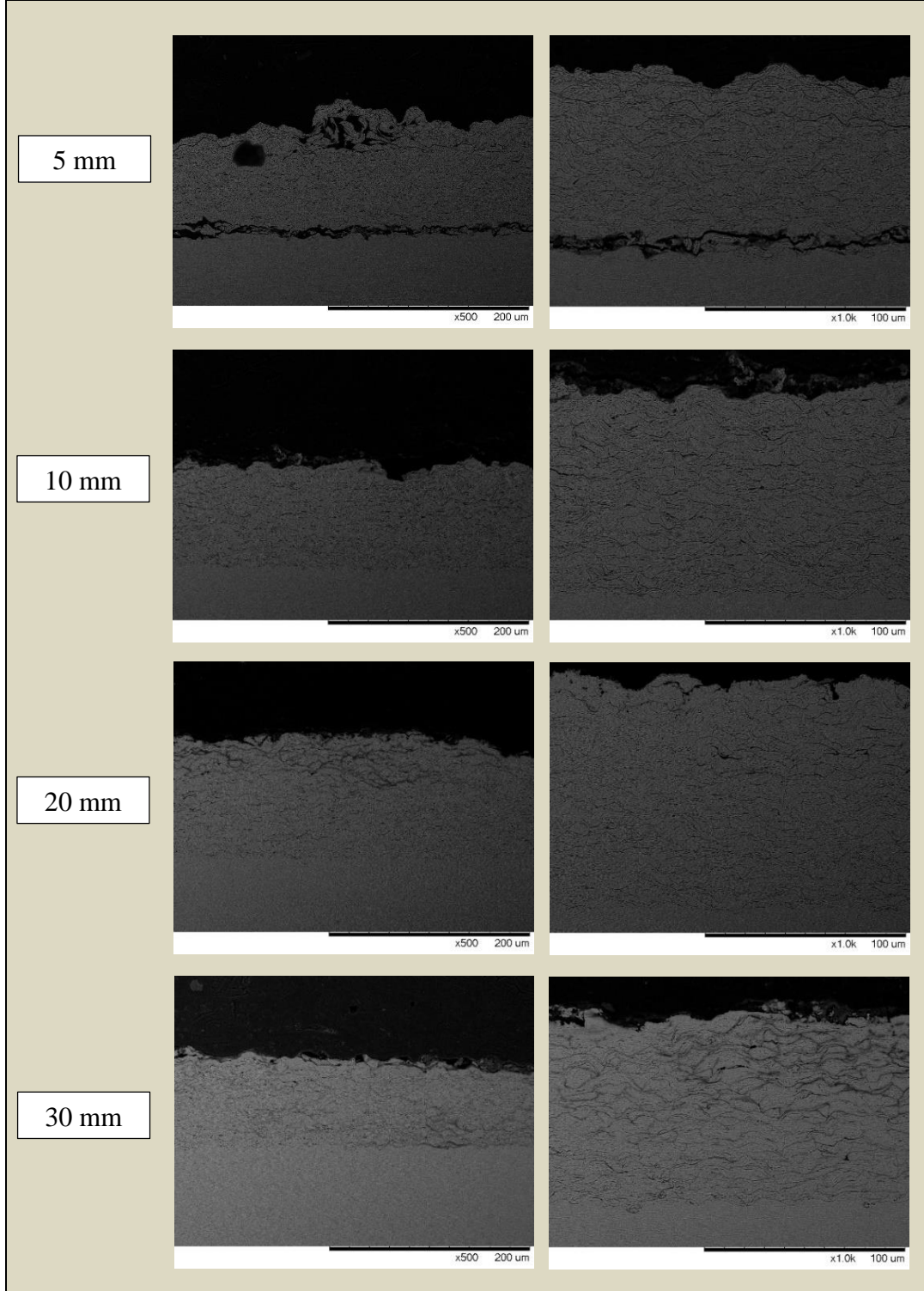
$$F_d = \frac{C_d A_p \rho_g (V_g - V_p)^2}{2} \quad (5.1)$$

$F_d$  = Sürüklenme kuvveti,  $A_p$  = Tozun önündeki alan,  $\rho_g$  = Gaz yoğunluğu,

$C_d$  = Sürüklenme katsayısı,  $V_g - V_p$  = Rölatif gaz-toz hızı



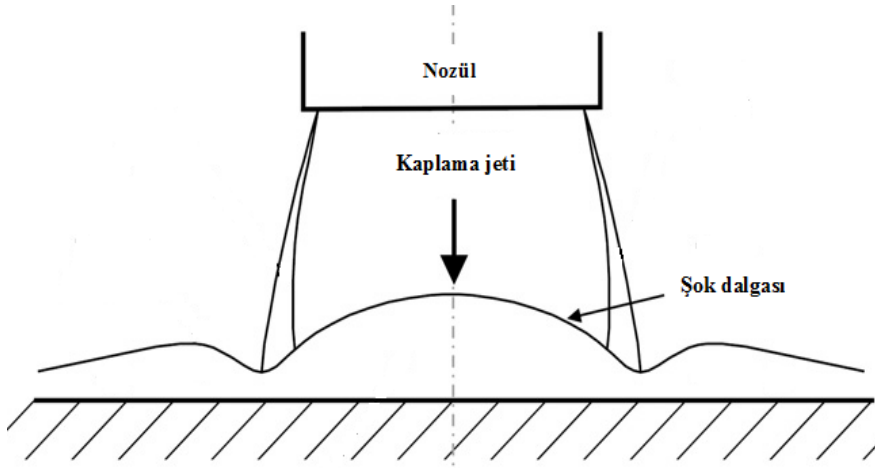
Şekil 5.4 : Nozül-altlık arası mesafenin birikme verimi üzerindeki etkisi [34].



**Şekil 5.5 :** Cu tozları kullanılarak 5,10,20 ve 30 mm nozül-altlık arası mesafeler ayarlanarak yapılan kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Şu ana kadar kabul edilen fikirlerden diğeri kaplama işlemi esnasında oluşan şok dalgalarıdır. Kaplama işlemi esnasında sesüstü hızlara çıkılması sebebiyle nozül ile altlık malzeme arası mesafenin az olduğu durumlarda ortamda bulunan hava taneciklerinin kaplama jeti içerisinde altlık malzemeye doğru giden tozların önünden

çekilmeye zamanları olmayacaktır. Bu sebeple ortamda sıkışan hava tanecikleri altlık malzeme önünde birikerek bir şok dalgası oluşturmaktadır ve bu durum da birikme verimini olumsuz yönde etkilemektedir [34]. Şekil 5.6'da çarpma esnasında oluşan şok dalgasının şematik gösterimi vardır. Şimdiye kadar anlatılan teoriyi özetlemek gerekirse, tozun çarpma hızı ve dolayısıyla birikme verimi nozül-altlık arası mesafeye bağlıdır. Fakat nozül çıkışında toz hızını etkileyen birbiriyle rekabet içinde olan iki mekanizma mevcuttur. Bunlar; proseste kullanılan gaz akımına göre toz hızlanması/yavaşlaması ve şok dalgası oluşması durumunda püskürtülen tozların yavaşlamasıdır [34].



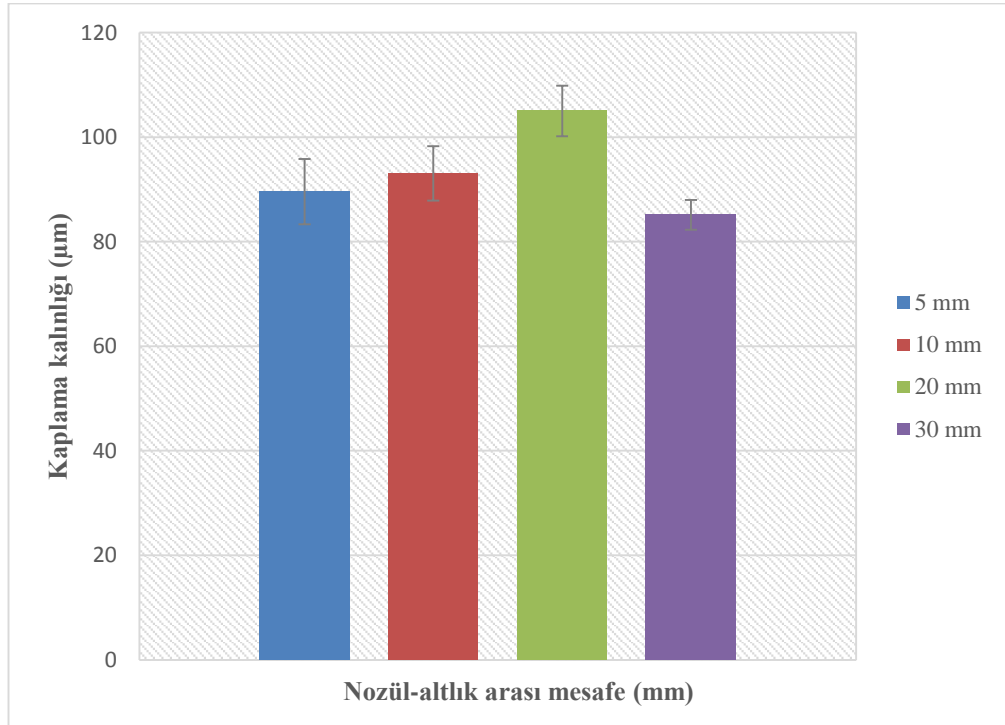
**Şekil 5.6 :** Altlıktaki ses üstü çarpma zonu şematik gösterimi [34].

Yapılan bu çalışmada ise optik mikroskop görüntüleri üzerinden kaplama kalınlığı ölçümü yapıldığında başlangıçta nozül ile altlık arası mesafe arttıkça birikme veriminin arttığı fakat belirli bir uzaklıktan sonra azalmaya başladığı görülmüştür. Sonuç olarak en yüksek birikme verimi mesafenin 20 mm olduğu kaplamada elde edilmiştir.

Burdaki hakim olan mekanizma öncelikle şok dalgasının oluşmasıdır. İlk mesafe 5 mm olduğunda altlık malzeme ile kaplama arasında iyi bir bağlanma sağlanamamıştır. Bunun sebebi proseste ses üstü hızlara ulaşıldığı için ortamdaki hava moleküllerinin kaplama jeti önünde kaçacak zamanının olmayıp altlık malzemesi üzerinde bir şok dalgası oluşturmasıdır. Bu şok dalgasının tozların kritik hıza ulaşmasını engellediği düşünülebilir ve bu sebeple tutunma sağlanamamış olabilir. Orta olarak adlandırabileceğimiz nozül-altlık arası mesafelerde (10 mm ve 20 mm) ortamdaki hava moleküllerinin kaçmaya zamanı olacağından şok dalga etkisi gittikçe azalmakta,

ve gaz hızı tozların hızından daha büyük olduğu (pozitif sürüklenme kuvveti) duruma kadar birikme verimi de artmaya devam etmektedir. Daha büyük nozül-altlık arası mesafelerde (30 mm) ise toz kritik hızına ulaşılmış olabilir ama gaz hızının toz hızından daha düşük olduğu (negatif sürüklenme kuvveti) durumdan itibaren birikme verimi de düşmektedir. Bu sebeple yapılan bu çalışmada optimum nozül-altlık arası mesafe 20 mm olarak seçilmiştir.

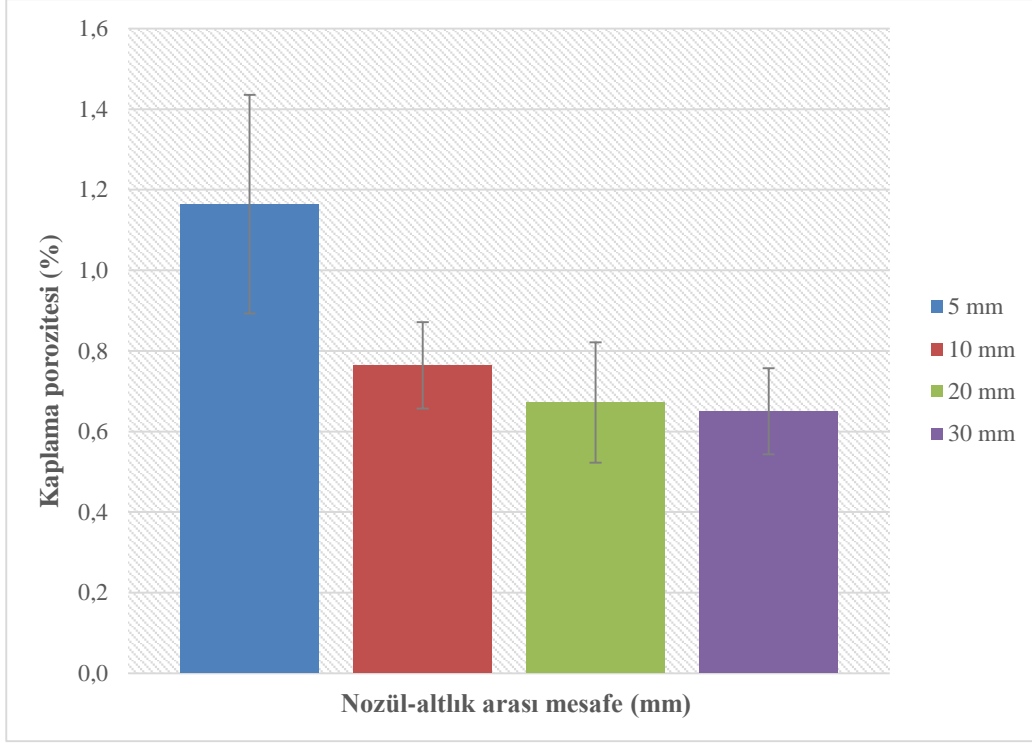
Bu bilgiler doğrultusunda elde edilen kaplama kalınlıkları ve kaplamanın porozite miktarları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’ de verilmiştir. Nozül-altlık arası mesafenin 5 mm, 10 mm, 20 mm ve 30 mm olduğu durumlarda elde edilen kaplama kalınlıkları sırasıyla 89.60  $\mu\text{m}$ , 93.05  $\mu\text{m}$ , 105.02  $\mu\text{m}$  ve 85.15  $\mu\text{m}$ ’dir.



**Şekil 5.7 :** Nozül-altlık arası mesafenin kaplama kalınlığına etkisi.

Yukarıda verilen bilgilere göre püskürtülen tozların belirli bir mesafede maksimum hıza sahip oldukları ve bu hız kritik hızın üzerinde olduğu için o mesafede birikme veriminin yüksek olması normaldir. Çünkü kritik hızı aşmış her toz yüzeye çarptığında yüzeyi deforme ederek tutanacaktır ve sonuç olarak çarpıp geri dönen tozlar olmadığı sürece birikme verimi artacaktır. Bu çalışmada 20 mm uzaklık optimum olduğuna göre birikme veriminin bu mesafede yüksek olması kaçınılmazdır. Nozül-altlık arası mesafenin kaplama porozitesine etkisine bakıldığında 20 mm ve 30 mm nozül-altlık arası mesafelerde elde edilen kaplamaların porozite değerleri %0,6 civarında olup

diğerlerine nazaran daha düşüktür. Bunun sebebi optimum mesafenin 20 mm olması halinde altlık yüzeyine çarpan her tozun kritik hıza ulaşip yüzeyde birikmesini sağlamış olabilir. 20 mm'den düşük mesafelerde gelen tozların yüzeyde erozyon etkisi yaparak yüzeye çarpıp geri dönmeleri kaplamada porozite miktarının artmasına sebep olabilir.

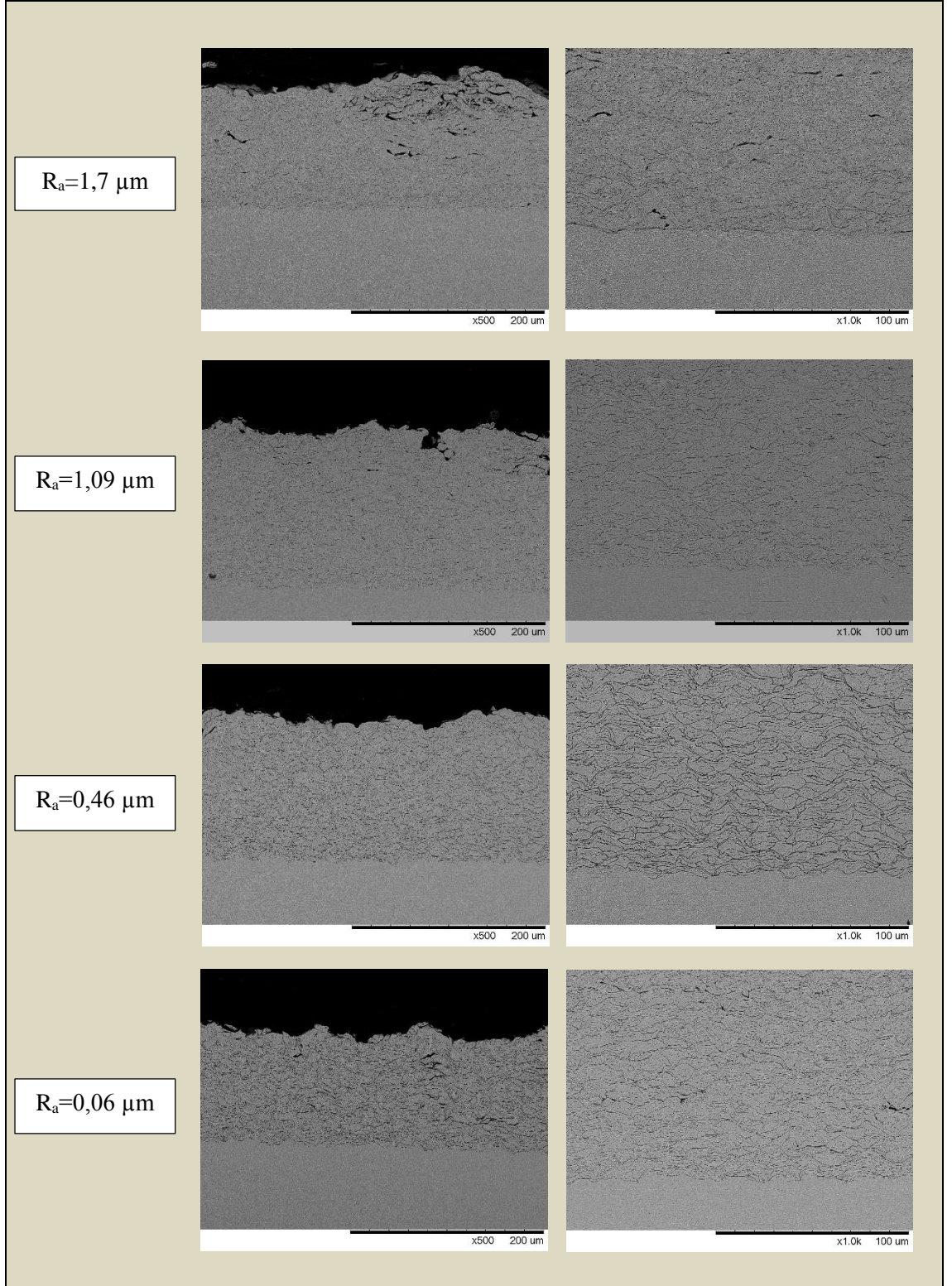


**Şekil 5.8 :** Nozül-altlık arası mesafenin kaplama porozitesine etkisi.

Altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğünün kaplama/altlık arayüzeyine ve kaplama kalınlığı, porozitesi ve sertliğine etkisini irdelemek için farklı yüzey pürüzlülüklerine (sırasıyla bu değerler 1.7  $\mu\text{m}$ , 1.09  $\mu\text{m}$ , 0.46  $\mu\text{m}$  ve 0.06  $\mu\text{m}$ ) sahip bakır altlık malzemeleri kullanılarak yapılan kaplamaların taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 5.9'de verilmiştir. Bu görüntüler göz önünde bulundurularak kaplamaların altlık malzeme yüzeyi ile ilişkileri kontrol edilmiştir. Bu görüntülere bakıldığında yüzey pürüzlülüğü değeri 1,7  $\mu\text{m}$  olan kaplamada altlık malzeme ile kaplama arasında süreksizlik olduğu görülmektedir.

Bu zamana kadar yüzey pürüzlülüğünün soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalara etkisini irdelemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. P. Richer ve arkadaşlarının [51] yaptığı bir çalışmada kaba ve ince zımpara kullanılarak iki farklı yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Kaba zımpara ile yapılan yüzeyin pürüzlülük değeri

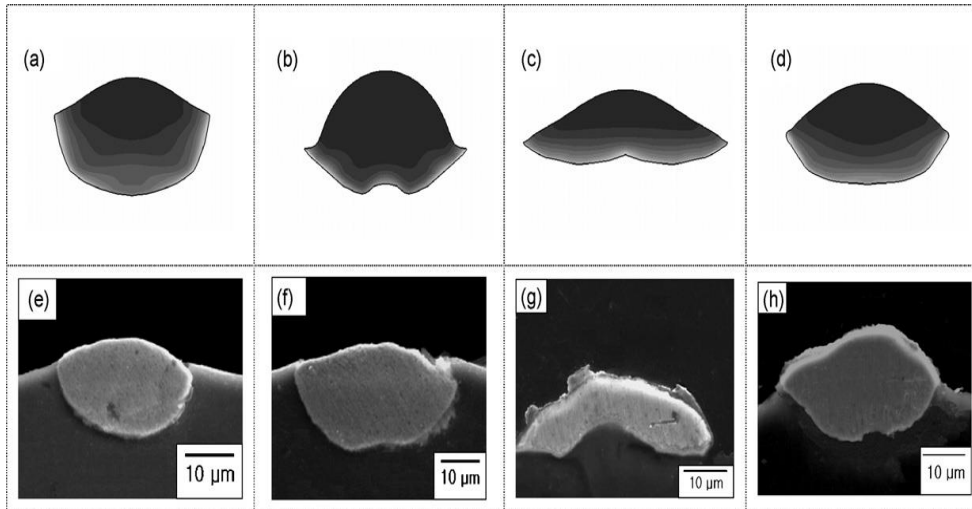
316 ± 57 µm iken ince zımparalama ile yapılan yüzeyin pürüzlülük değeri 134 ± 20 µm bulunmuştur.



**Şekil 5.9 :** Farklı yüzey pürüzlülük değerlerine (1.7µm, 1.09 µm, 0.46 µm ve 0.06 µm) sahip Cu altlıklar kullanılarak yapılan Cu kaplamaların 500 ve 1000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüleri.

Bu yüzeylere sahip altlık malzemeleri kullanılarak yapılan kaplamalarda kaba zımpara ile hazırlanan yüzeyde birikme verimi diğer yüzeye göre %10 daha fazla olmuştur. Bu durum kaba zımparanın sağladığı büyük yüzey alanı sayesinde daha çok miktarda toz altlık malzeme ile temasta bulunacağı düşüncesiyle açıklanmıştır. Sonuç olarak püskürtülen tozlar ile oluşturan ilk katmandaki birikme veriminin %10 oranında artış göstermesinin beklenen bir sonuç olduğu söylenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda kaplamanın ilk katmanı yani kaplama/altlık arayüzeyi için büyük yüzey pürüzlülüklerinin faydalı olduğu görülmüştür.

Bazı çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünün kaplama/altlık ara yüzeyi için faydalı olduğu düşüncesi varken bazı araştırmacılar da yüzey pürüzlülüğünün önemli olduğunu fakat bu değer optimize edilmesi gerektiğini savunmaktadırlar. S. Kumar ve arkadaşlarının [38] yaptığı bir çalışmada ise bakır tozları düz ve pürüzlü yüzeylere (alüminyum ve bakır) soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle kaplanmışlardır. Yüzeylerin pürüzlülüğü proste kullanılan parçacık boyutlarına göre sınıflandırılmıştır. Bunlar toz boyutunun yarısı kadar (Şekil 5.10b), toz boyutu kadar (Şekil 5.10c) ve toz boyutunun iki katı kadar (Şekil 5.10d) pürüzlülük olarak ayrılmıştır. Kaplama/altlık ara yüzeyini temas yüzey alanı, temas süresi ve temas sıcaklığı gibi parametrelerin etkilediğini savunmuşlardır. Pürüzlü yüzeylerdeki temas süresi düz yüzeylere göre daha uzun olduğu deneysel çalışmalar ile bulunmuştur ve modelleme çalışmalarından düz yüzeylerde çarpma hızı artırılarak da toz parçacığı/altlık temas süresinin artırılacağı bulunmuştur. Sonuç olarak düz ve pürüzlülüğü belli bir değer üstüne çıkan yüzeylerde benzerlik olduğu saptanmıştır.

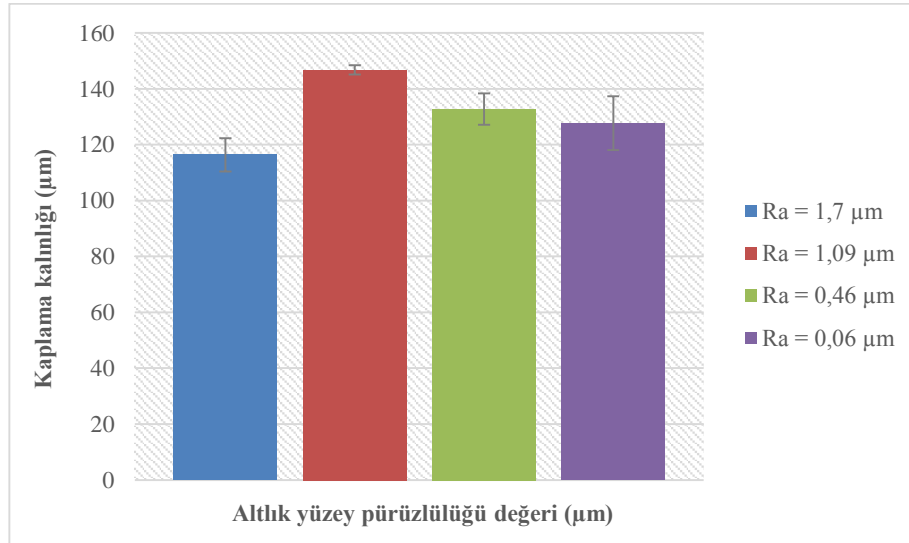


**Şekil 5.10 :** Farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip altlık malzeler üzerine püskürtülen tozların enine kesit simülasyon görüntüleri [38].

Şekil 5.10'da farklı pürüzlülüğe sahip yüzeylerde biriktirilen tozların enine kesit simülasyon görüntüleri vardır. Bu görüntülere de bakıldığında Şekil 5.10a (düz) ve 5.10d (çok pürüzlü)'de ki tozların yüzeyde birikme yapılarının benzer olduğu görülmektedir.

Maksimum deformasyonun görüldüğü durum ise yüzey pürüzlülüğünün kullanılan toz boyutuna yakın olduğu Şekil 5.10c'de görülmektedir. Artan yüzey pürüzlülüğü değerlerinde deformasyonun veya püskürtülen tozların yassılaşıma oranının azaldığı görülmektedir.

Kaplamaların kalınlık ve porozite değerleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere en iyi kaplama kalınlığı  $R_a$  değerinin  $1,09 \mu\text{m}$  olduğu durumda elde edilirken, en kötü kaplama kalınlığı  $R_a$  değerinin  $1,7 \mu\text{m}$  olduğu durumda elde edilmiştir.  $R_a$  değerinin  $0,46 \mu\text{m}$  ve  $0,06 \mu\text{m}$  olduğu kaplamalarda kalınlık birbirlerine yakın çıkmıştır.  $1,7 \mu\text{m}$ ,  $1,09 \mu\text{m}$ ,  $0,46 \mu\text{m}$  ve  $0,06 \mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüklerine sahip Cu altlıklar ile yapılan kaplamaların sahip oldukları kalınlıklar sırasıyla  $116,4 \mu\text{m}$ ,  $146,8 \mu\text{m}$ ,  $132,7 \mu\text{m}$  ve  $127,7 \mu\text{m}$  ve sahip oldukları poroziteler sırasıyla % 1,61, % 1,41, % 0,80, % 1,20 'dir.

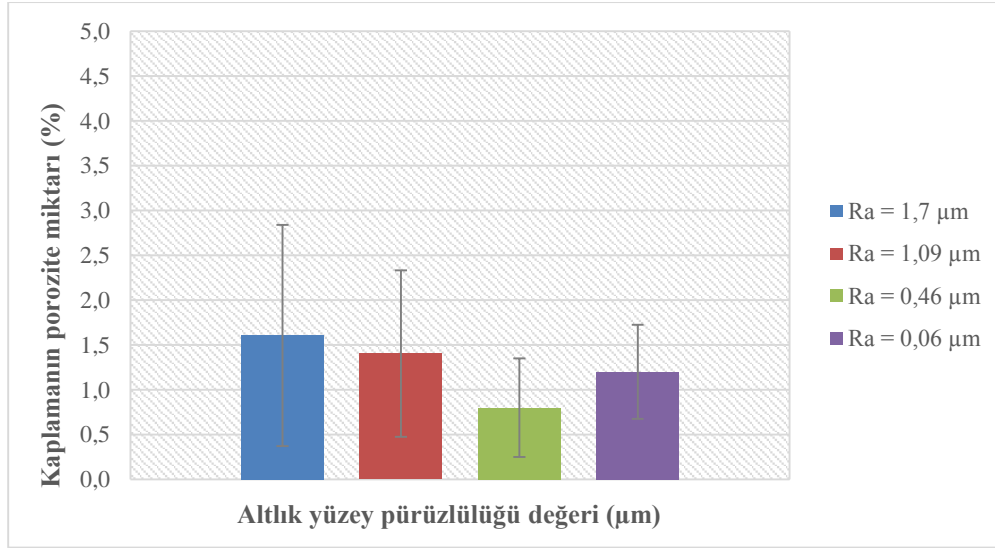


**Şekil 5.11 :** Yüzey pürüzlülüğünün kaplama kalınlığına etkisi.

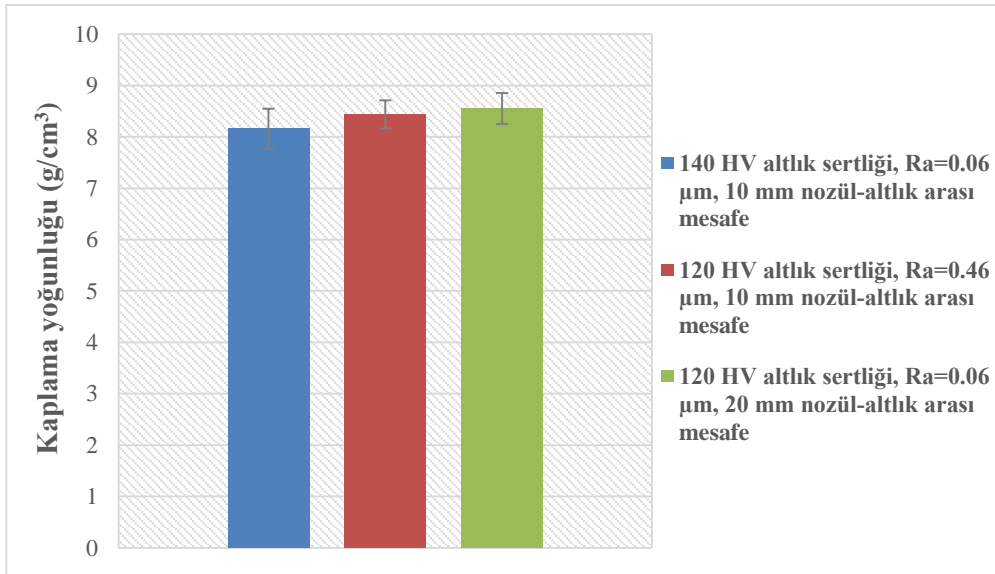
Bu sonuçlardan yola çıkarak altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğünün kaplamaya etkisinden daha çok kaplama/altlık arayüzeyi üzerinde etkisi olduğu söylenebilir.

Her parametreden bir numune çeşidi seçilerek yapılan kaplama yoğunluğu testi sonuçları Şekil 5.13'de verilmiştir. Bu ölçüm yapışma mukavemetini bulabilmek için yapılan çekme testinden sonra kopan parçalardan yapılmıştır. Bu sonuçlar yapışma

mukavemeti sonuçları açıklandıktan sonra irdelenmiştir. Kaplama yoğunluğu değerlerinden yola çıkılarak rölatif kaplama porozite değerleri elde edilmiştir ve ilk aşamadaki enine kesit görüntülerinden elde edilen kaplama porozite değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.12: Yüzey pürüzlülüğünün kaplama porozitesine etkisi.

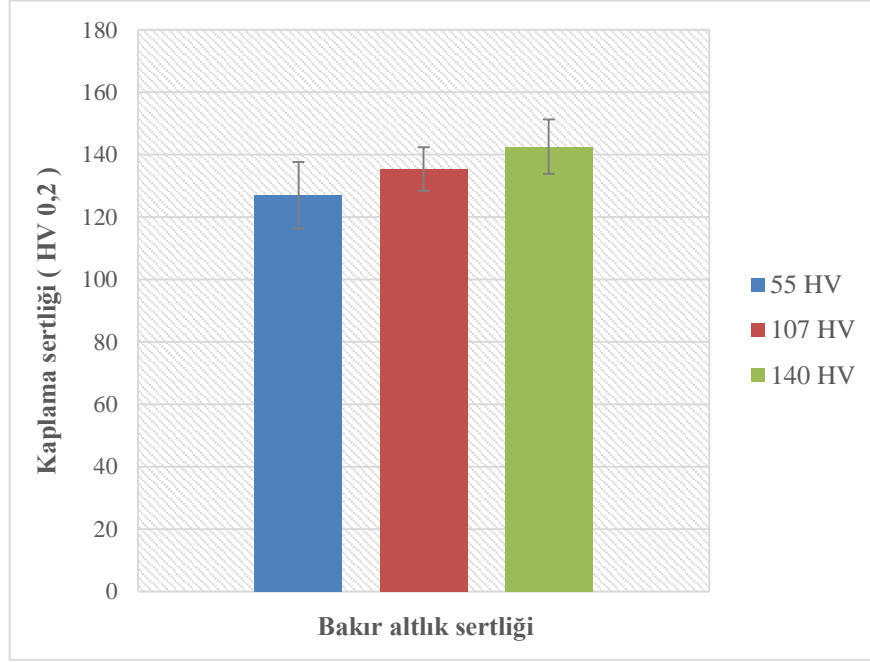


Şekil 5.13 : Kaplama yoğunluğu ölçümü sonuçları.

## 5.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Altlık sertliğinin soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların özelliklerine etkisini irdellemek için kullanılan farklı sertlikteki (55 HV, 107 HV ve 140 HV) Cu altlık malzemeleri ile yapılan kaplamaların sertliği Şekil 5.14'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere en sert kaplama altlık sertliğinin 140 HV olduğu

numunede elde edilmiştir. Sırasıyla elde edilen kaplama sertlikleri 127 HV<sub>0,2</sub>, 135.4 HV<sub>0,2</sub>, HV<sub>0,2</sub> ve 142.6 HV<sub>0,2</sub> dir.

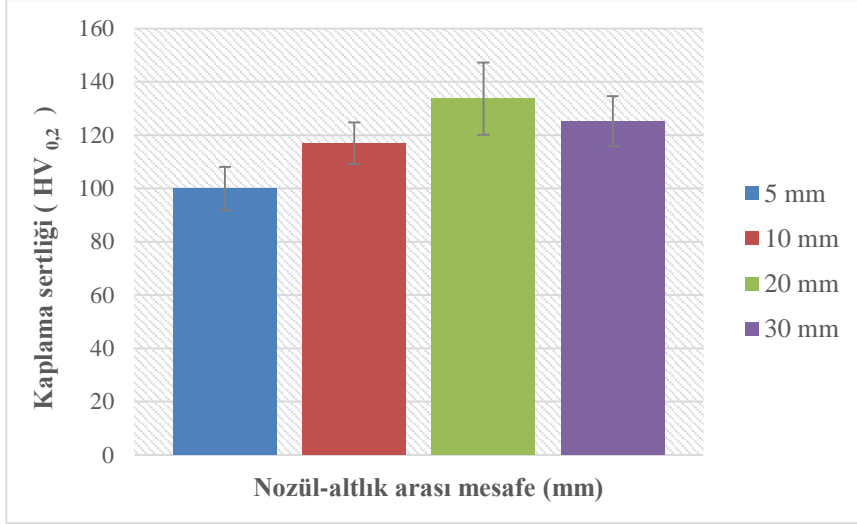


**Şekil 5.14 :** Altlık sertliğinin kaplama sertliğine etkisi.

Bunun sebebi, prosteşte yumuşak altlık kullanıldığı zaman bakır tozlarının sahip olduğu kinetik enerji altlığı deforme etmekte kullanılır ve kaplamayı oluşturacak tozların plastik deformasyonu için gerekli olan kinetik enerji azalır. Fakat sert altlık malzeme kullanıldığında Cu tozlarının sahip olduğu kinetik enerji altlık malzemeyi az deforme ettiğinden ya da yeterli plastik deformasyonu sağlayamadığından sahip olduğu kinetik enerjisinin büyük bir kısmını kaplamadaki tozları deforme etmek için kullanmıştır. Dolayısıyla 140 HV sertlikteki bakır altlık ile yapılan kaplamanın sertliği diğer numunelere göre daha yüksektir. Literatürde deneysel ve modelleme çalışma yöntemleriyle altlık sertliğinin kaplamaya olan etkisi irdelenmiştir ve buna benzer sonuçlar elde edilmiştir [36, 39]

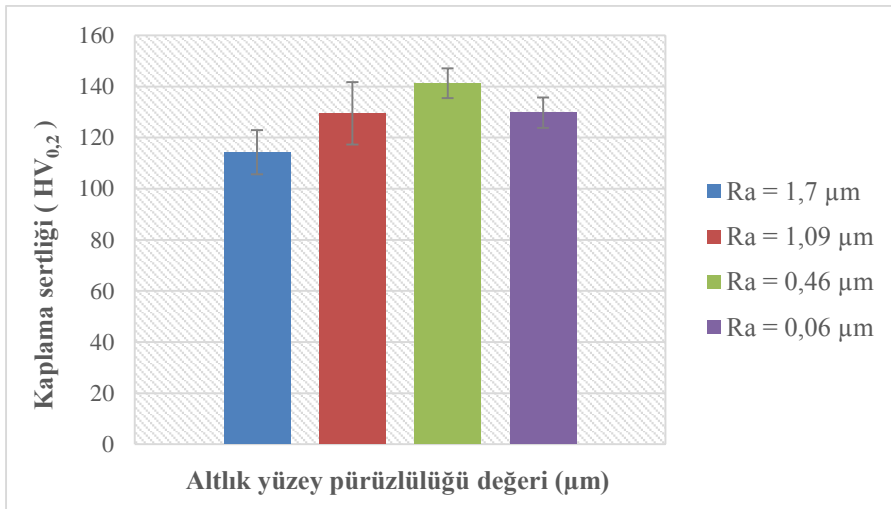
Nozül-altlık malzeme arasındaki mesafeler 5,10,20,30 mm seçilerek yapılan kaplamaların sertlik değerleri Şekil 5.15’de verilmiştir. En iyi kaplama sertliği nozül-altlık arası mesafenin 20 mm olduğu kaplamada elde edilmiştir. Kaplama kalınlıkları hakkında bilgi verirken en yüksek kaplama kalınlığının nozül-altlık arası mesafenin 20 mm olduğunda elde edildiği belirtilmiştir. 20 mm nozül-altlık arası mesafede birikme veriminin en yüksek olması tozların sahip oldukları hızın o mesafede daha fazla olduğu yorumu yapılabilir ve böylece tozların sahip olduğu kinetik enerjinin

fazla olması durumunda plastik deformasyon için kullanılan enerji artmaktadır. Dolayısıyla elde edilen kaplama sertliği artmaktadır. Ayrıca artan kaplama kalınlığıyla birlikte üst üste gelen deformasyona uğramış toz miktarı artacağından kaplama sertliğinin en yüksek kaplama kalınlığı elde edilen numunede ortaya çıkması normaldir.



**Şekil 5.15 :** Nozül-altlık arası mesafenin kaplama sertliğine etkisi.

Farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip (sırasıyla bu değerler 1.7  $\mu\text{m}$ , 1.09  $\mu\text{m}$ , 0.46  $\mu\text{m}$  ve 0.06  $\mu\text{m}$ ) bakır altlık malzemeleri kullanılarak kaplamaların sertlikleri Şekil 5.16’da verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerinin 0,46  $\mu\text{m}$  olduğu altlık malzemesiyle yapılan kaplama en sert olanıdır. Yüzey pürüzlülük değerleri 1.7  $\mu\text{m}$ , 1.09  $\mu\text{m}$ , 0.46  $\mu\text{m}$  ve 0.06  $\mu\text{m}$  olduğunda elde edilen kaplama sertlikleri sırasıyla 114.3 HV, 129.4 HV, 141.3 HV, 129.7 HV’dir.



**Şekil 5.16 :** Altlık yüzey pürüzlülüğünün kaplama sertliğine etkisi.

Altlık sertliği, altlık yüzey pürüzlülüğü ve nozül-altlık arası mesafenin kaplamaya olan etkisini inceledikten sonra aralarından en iyi kaplama özelliklerini veren altlık sertliğine, altlık yüzey pürüzlülüğüne ve nozül-altlık arası mesafesine karar verilmiştir.

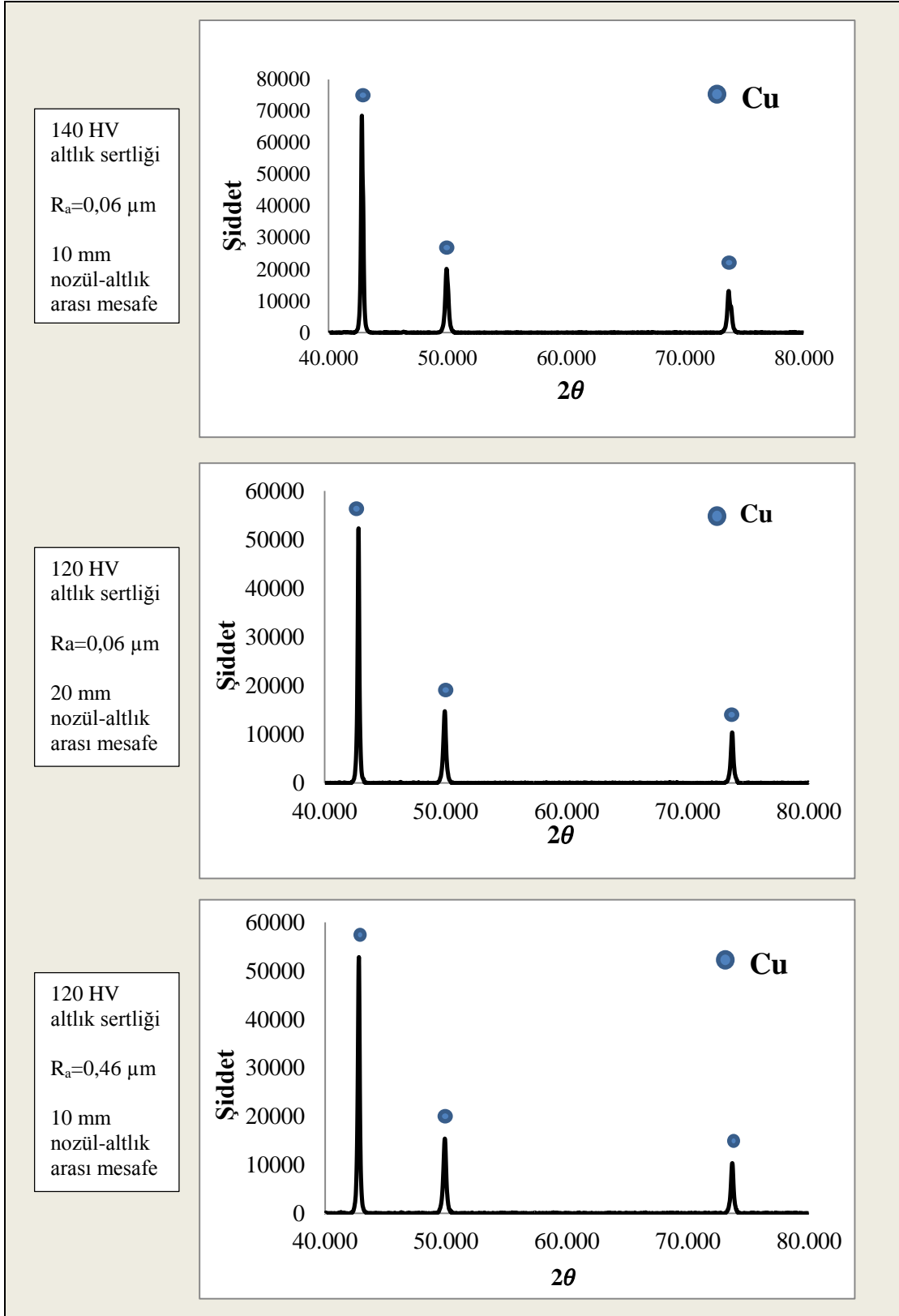
En iyi sonucu veren parametrelerin seçilmesinin sebebi yapışma mukavemetinin de o parametrelerde en yüksek çıkmak ihtimali olduğu içindir. Daha sonra karar verilen bu parametrelerle diğer testlere devam edilmiştir. Bunlar; XRD analizi, kaplama yoğunluğu ölçümü, elektrik iletkenliği testi ve yapışma mukavemeti testidir.

Bakır tozları ile yapılan kaplamaların yapılarındaki fazları analiz etmek için yapılan XRD deneylerinin sonuçları Şekil 5.17’de verilmiştir. Kaplamalarda herhangi değişik bir faz ortaya çıkmamıştır. Ayrıca sonuçlarda kaplamalarda bakır oksit fazı da görülmemektedir. Eğer kaplama bakır oksit içeriyor olsa da bu miktar cihazın görebileceği minimum değerin altında olduğu söylenebilir. Kaplamalarda herhangi bir oksit tabakasının olmaması soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin diğer yöntemlere göre sağladığı avantajlardan biri olup kaplama kalitesinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu da soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalardan beklenen bir özelliktir.

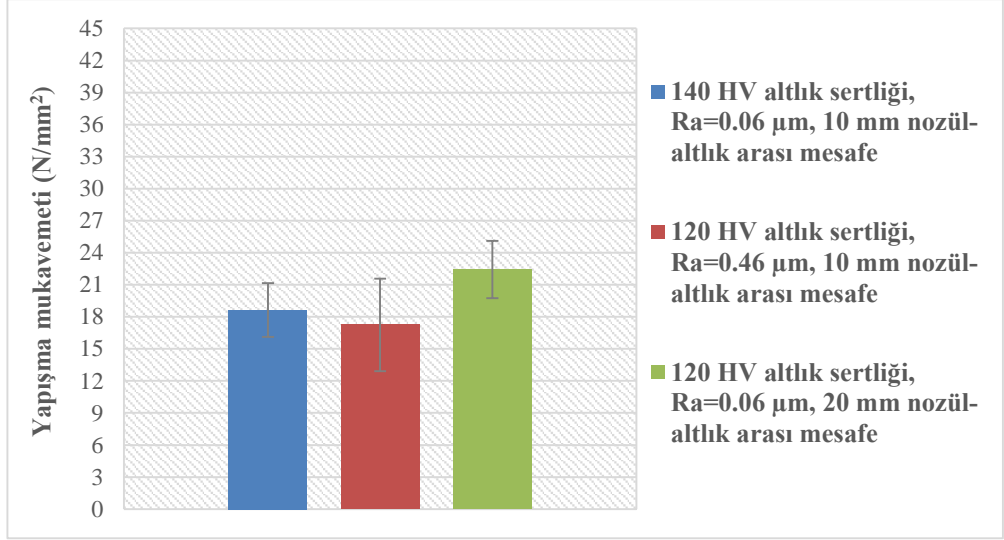
### **5.3 Yapışma Mukavemeti Ölçüm Sonuçları**

Kaplamaların yapışma mukavemetini bulmak için yapılan çekme testi sonuçları Şekil 5.18’de verilmiştir. Altlık malzemesi sertliği, altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve nozül-altlık arası mesafenin kaplamaya olan etkisi irdelendikten sonra her parametrede en iyi kaplamanın elde edildiği değer seçilerek yapılan yapışma mukavemeti testi sonucunda bütün numunelerde kaplama kalitesinin yüksek olduğu ve bu yüzden ayrılmanın altlık/kaplama arayüzeyinden gerçekleştiğini söylemek mümkündür. Her parametreden en iyi olanın seçilip yapışma mukavemeti testi yapılması mukavemet değerinin seçilen bu parametrelerde en yüksek çıkması düşünöldüğu içindir. Ayrılmanın altlık/kaplama arayüzeyinden gerçekleşmesi kaplamanın sahip olduğu kohezif kuvvetinin adhesiv (yapışma) mukavemetinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplama çalışmaları yapışma testi yapıldığında ortaya çıkan iki tip hata türü vardır; bunlar eğer hata kaplamanın içinden gerçekleşiyorsa kohezif, kaplama/altlık arayüzeyinden gerçekleşiyorsa adhesif olarak tanımlanmaktadır [52, 53]. Eğer yapılan kaplamada kohezif ayrılma gerçekleştiğinde kaplama/altlık arayüzeyinin daha kuvvetli olduğu

söylenirken, adhesif ayrılma gerçekleşiyorsa kaplama/altlık arayüzeyinin daha zayıf olduğu yorumu yapılabilir. Şekil 5.19’da literatürden alınan bir makalede ortaya çıkan adhesif ve kohezif hata türlerine örnek verilmiştir [52].

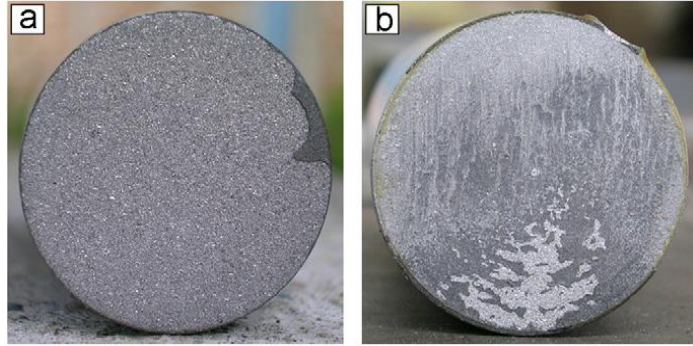


Şekil 5.17: Farklı özelliklere sahip kaplamaların XRD grafikleri.



**Şekil 5.18 :** Çekme testi sonuçları elde edilen yapışma mukavemeti değerleri.

Hızlandırıcı gaz olarak 6 bar nozül giriş basıncına sahip hava kullanılarak yapılan soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile elde edilen kaplamaların yapışma mukavemetleri ortalama  $19,44 \pm 2,69 \text{ N/mm}^2$  (MPa) olarak bulunmuştur. Bu proses koşullarında yapılan kaplamaların sahip oldukları mukavemet değerlerinin  $20 \text{ N/mm}^2$  (MPa) civarında olacağı hakkında öngörüde bulunulabilir.



**Şekil 5.19 :** Adhesif ve kohezif hata türüne örnek [52].

Şekil 5.20’de ise parametreleri yanında yazdığı şekilde bu çalışmada kullanılan bakır altlıkların ve onlardan kopan bakır kaplamaların makro fotoğrafları mevcuttur.

Şekil 5.20’ de görüldüğü üzere kaplamanın altlık/kaplama arayüzeyinden ayrıldığını görmekteyiz. Yani kaplama (kohezif) dayanımının yapışma mukavemetinden daha yüksek olduğu fikrini çıkarabiliriz. Bu kaplamanın yapışma mukavemeti  $18,64 \pm 2,53 \text{ N/mm}^2$ ’dir.

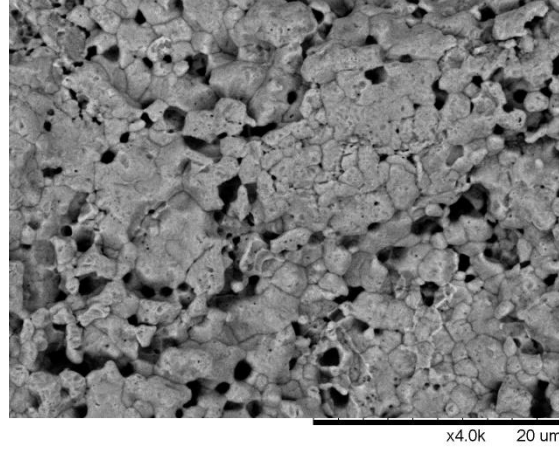
Şekil 5.21’ da 140 HV altlık sertliğine  $0,06 \mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğüne sahip bakır altlık malzeme üzerine 10 mm’ den bakır tozları püskürtülerek yapılmış kaplamanın çekme testi yapıldıktan sonra kopan kaplamanın yüzeyinden çekilmiş 4000 büyütmedeki

taramalı elektron mikroskobu görüntüsü vardır. Bu görüntüye bakıldığında çekme testi sırasında oluşan boşluklar/poroziteler görülmektedir.



**Şekil 5.20 :** Yapışma mukavemeti sonrası altlık malzeme ve üstünde kalan kaplamanın (sol taraf) ve kaplamadan kopan (sağ taraf) parçaların makro fotoğrafları.

Bu kopmanın arayüzeyden kopmasının çeşitli sebepleri olabilir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde altlık ile kaplama arasındaki bağlanma mekanizması tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Fakat bağlanma mekanizmasına etki eden çeşitli parametreler olduğu düşünülmektedir. Bunlardan biri de altlık malzemesinin sertliğidir. Yapılan bir çalışmada [54] soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde hangi parametrelerin bağlanma mekanizmasına etkisi olduğunu irdelemek için Al5052, Al6063 ve Cu altlık olmak üzere üç farklı malzeme ortalama 18 µm çapa sahip olan Cu tozları ile kaplanmıştır. Çalışma gazı olarak azot ve helyum kullanılmıştır.



**Şekil 5.21** : 140 HV sertliğe ve 0.06 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip Cu altlık üzerine 10 mm nozül-altlık arası mesafesi ile yapılan Cu kaplamanın yapışma mukavemetinden sonra kopan kaplama parçasından çekilen 4000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüsü.

Gaz basıncının etkisini görmek için de 2,3,4 MPa olan azot ve helyum gazı kullanılmıştır. Gaz sıcaklığının parçacık hızına etkisi dolayısıyla bağlanma mekanizması etkisine görmek için de Helyum gazı için sıcaklık 600°C iken, azot gazı için sıcaklık 200-1000°C arasında değiştirilmiştir. Nozül-altlık arası mesafe 30 mm'dir.

Şekil 5.22'de üç farklı altlık malzeme üzerine Cu tozları kaplanılarak elde edilen kaplamaların yapışma mukavemeti değerleri gösterilmektedir. Şekil 5.21'den de görülebileceği üzere gaz sıcaklığının artışıyla birlikte kaplamaların çekme dayanımında artış görülmektedir. Elde edilen çekme dayanımlarına bakıldığında çalışma gazı olarak azot kullanıldığında gaz basıncının 3 MPa'dan 4 MPa'a çıkarılmasıyla birlikte çekme dayanımında hafif bir yükselme olmuştur. Fakat çalışma gazı olarak azot yerine helyum kullanıldığında, çekme dayanımı azot gazı kullanılan kaplamalara göre oldukça yüksektir. Al5052 ve Al6063 altlıklar kullanılarak yapılan kaplamaların çekme dayanımları birbirine yakındır, fakat bakır altlık üzerine yapılan kaplamalarda bazı farklılıklar mevcuttur. Düşük çalışma gazı sıcaklıklarında bakır altlıklar ile yapılan kaplamalar Al alaşımları altlıklar kullanılarak yapılan kaplamalara göre daha düşük yapışma mukavemetine sahiptir. Daha efektif bir bağlanma sağlanması için Al alaşımı altlıklar ile karşılaştırıldığında Cu altlık malzemesinin daha yüksek oranda plastik deformasyona uğraması için daha yüksek toz hızına sahip olması gerekir denilebilir.

Eğer gaz sıcaklığı 800 °C'nin üzerine çıkarsa ayrılmanın bütün kaplama numunelerinde altlık/kaplama arayüzeyinden koparak değil de kaplama içinden

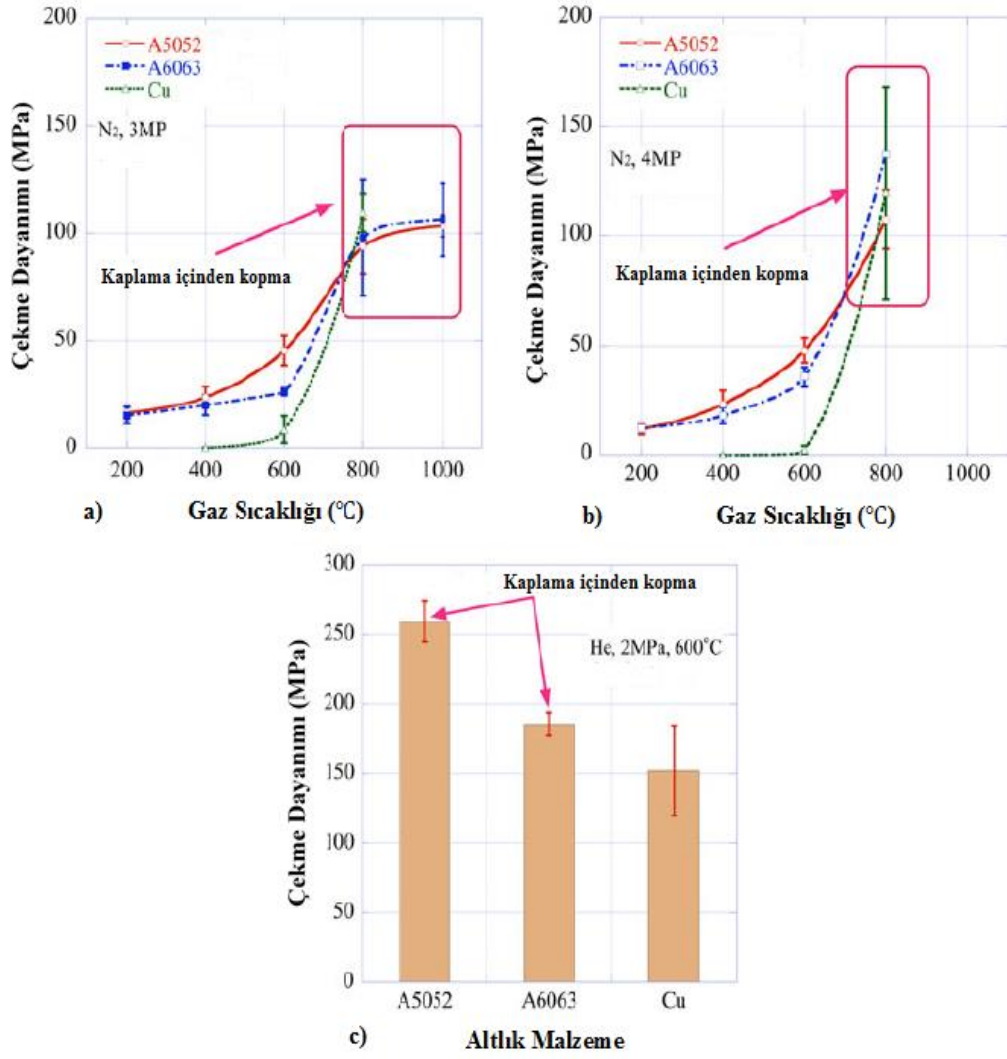
gerçekleşmiştir. Bu durum bakır altlıklarda bile yeterli deformasyonu sağlayarak tozlar ile altlık malzeme arasında iyi bir bağlanma sağlayan toz hızları elde edilmiş olduğunu göstermektedir. Ayrılmanın kaplamanın içinden kopmasının nedenlerinden biri de kaplama içindeki gerilme konsantrasyonudur. Sonuç olarak yapışma mukavemetinin kaplama dayanımından yüksek olması ayrılmanın kaplama içinden gerçekleşmesine sebep olmuştur [54].

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde altlık malzeme sertliğinin kaplama/altlık arayüzeyine etkisini özetlemek gerekirse; altlık malzeme ile püskürtülecek malzeme arasındaki sertlik farkının yüksek olduğu durumlarda, genellikle altlık malzemenin püskürtülecek toz malzemesinden daha sert olması halinde, tozların altlığı çok fazla deforme edemeyeceği düşünülürse tozlar ile altlık malzeme arasında yeterli derecede kuvvetli bir mekanik bağlanma gerçekleşmeyebilir. Arayüzeyde plastik deformasyon oranının az olması soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde bağlanma mekanizmasını olumsuz yönde etkileyebilir. Sonuç olarak bu durum yapışma mukavemetinin düşmesine sebep olacaktır.

Bizim yapışma mukavemeti ölçtüğümüz numunelerdeki bakır altlık sertlikleri 120 HV ve 140 HV'dir. Altlık sertliklerinin birbirinden farklı olmasına rağmen yapışma mukavemeti değerleri ( yaklaşık olarak  $20 \text{ N/mm}^2$  ) birbirine çok yakındır. Bu durumdan kullanılan altlık sertliği değerleri aralığının prosesi etkileyecek derecede geniş olmadığı sonucu çıkarılabilir ve bu yüzden yapışma mukavemeti değerlerinin birbirinden çok farklı olmadığı söylenebilir.

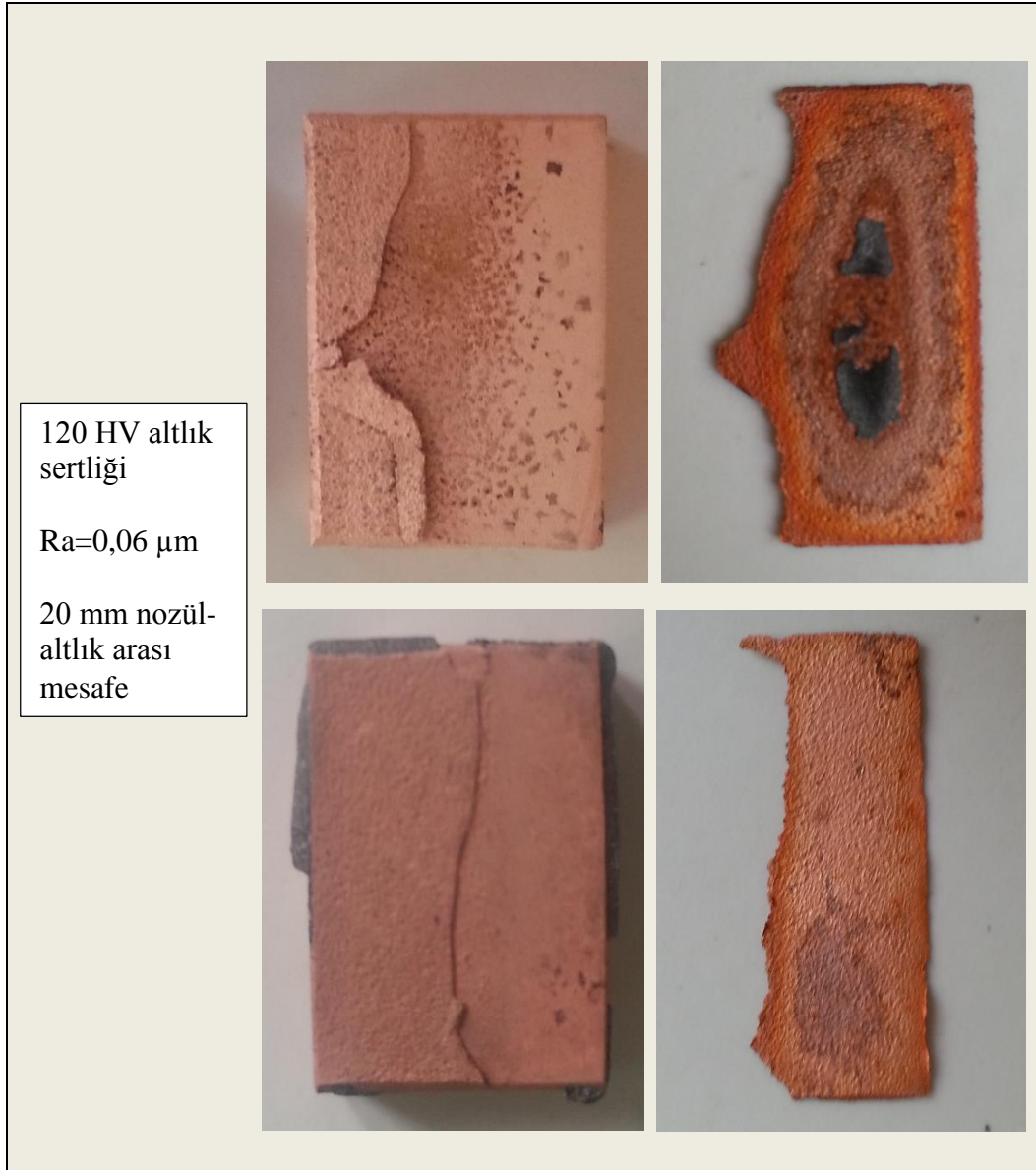
Şekil 5.23'de farklı özelliklere sahip (120 HV altlık sertliği  $R_a=0,06 \mu\text{m}$ ) altlık malzeme kullanılarak yapılan kaplamanın çekme testinde sonra kopan bakır kaplamaların makro fotoğrafları vardır. Fotoğraftan görüldüğü üzere kaplamanın yine altlık/kaplama arayüzeyinden ayrıldığını görmekteyiz. Yani kaplama (kohezif) dayanımının yapışma mukavemetinden daha yüksek olduğu fikrini bu kaplamada da çıkarabiliriz. Bu kaplamanın yapışma mukavemeti  $22,43 \pm 2,68 \text{ N/mm}^2$  'dir.

Şekil 5.24' de 120 HV altlık sertliğine  $0,06 \mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğüne sahip bakır altlık malzeme üzerine 20 mm' den bakır tozları püskürtülerek yapılmış kaplamanın çekme testi yapıldıktan sonra kopan kaplamanın yüzeyinden çekilmiş taramalı elektron mikroskobu görüntüsü vardır. Bu görüntüye bakıldığında çekme testi sırasında oluşan çekme boşlukları görülmektedir.

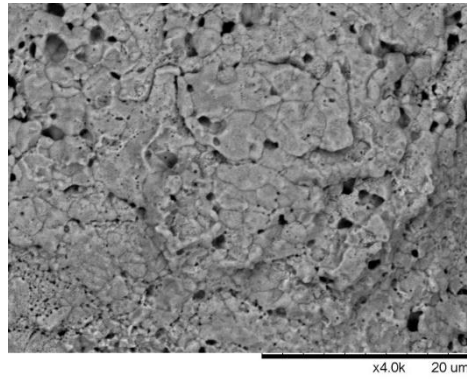


**Şekil 5.22 :** Farklı koşullar altında yapılan Cu kaplamaların çekme/yapışma dayanımları [54].

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde altlık ile kaplama ara yüzeyinin bağlanmasındaki en önemli parametrenin kritik hız olduğu söylenmektedir. Kritik hızı etkileyen parametrelerden biri ise nozül-altlık arası mesafedir. İlk aşamada yapılan deneylerde nozül-altlık arası mesafenin 5 mm olduğu durum haricinde diğerlerinde kaplama ile altlık malzeme arasında herhangi bir süreksizlik görülmemesine rağmen, bu demek değildir ki kaplama ara yüzeyinin yapışma mukavemeti çok yüksektir. Eğer elde edilen kaplama kalitesi iyiye ve kaplamanın kohezif kuvveti ara yüzeyin yapışma mukavemetinden daha iyiye kopmanın ara yüzeyden gerçekleşmesi muhtemeldir. Yapışma mukavemetinin direkt olarak nozül-altlık arası mesafeyle alakası olmamasına rağmen dolaylı yoldan etkisi olabilir. Çünkü tozların belirli bir mesafede sahip oldukları hızları sayesinde altlığı deforme etme oranları artabilir ve bu da kaplama/altlık arayüzeyinin iyileşmesini sağlar.



**Şekil 5.23 :** Yapışma mukavemeti sonrası altlık malzeme ve üstünde kalan kaplamanın (sol taraf) ve kaplamadan kopan (sağ taraf) parçaların makro fotoğrafları.



**Şekil 5.24 :** 120 HV sertliğe ve 0.06  $\mu$ m yüzey pürüzlülüğüne sahip Cu altlık üzerine 20 mm nozül-altlık arası mesafesi ile yapılan Cu kaplamanın yapışma mukavemetinden sonra kopan kaplama parçasından çekilen 4000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.25’de farklı özelliklere sahip altlık malzeme kullanılarak yapılan kaplamanın çekme testinde sonra kopan bakır kaplamaların makro fotoğrafları vardır. Şekil 5.25’de görüldüğü üzere ayrılmanın altlık/kaplama ara yüzeyinden olduğu görülmektedir. Yani kaplama (kohezif) dayanımının yapışma mukavemetinden daha yüksek olduğu fikri bu kaplama örneğimde de çıkarılabilir. Bu kaplamanın yapışma mukavemeti  $17,24 \pm 4,34 \text{ N/mm}^2$  ’dir.



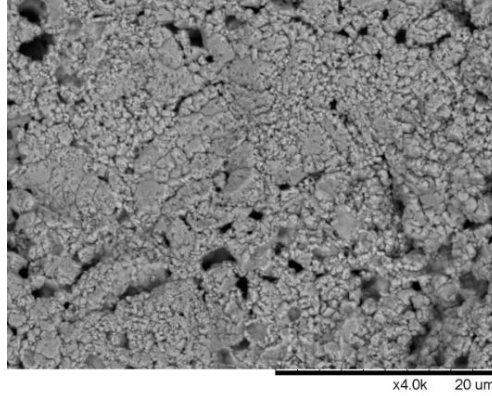
**Şekil 5.25 :** Yapışma mukavemeti sonrası altlık malzeme ve üstünde kalan kaplamanın (sol taraf) ve kaplamadan kopan (sağ taraf) parçaların makro fotoğrafları.

Şekil 5.26’ da 120 HV altlık sertliğine  $0,46 \mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğüne sahip bakır altlık malzeme üzerine 10 mm’ den bakır tozları püskürtülerek yapılmış kaplamanın çekme testi yapıldıktan sonra kopan kaplamanın kırılma yüzeyinden çekilmiş taramalı elektron mikroskobu görüntüsü vardır. Bu görüntüye bakıldığında yüzeyin diğer yüzeylere göre daha fazla pürüzlü olduğu çıplak gözle dahi görülmektedir. Çizelge 5.1’de çekme testi uygulandıktan sonra kopan parçadan Arşimet prensibine dayanarak yapılan kaplama yoğunluğu testinden elde edilen yoğunluklardan Denklem 5.1 ve

Denklem 5.2 kullanılarak hesaplanan % porozite değerleri gösterilmiştir. Hesaplamalar bakırın teorik yoğunluğundan yola çıkılarak aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

$$\frac{\rho_{deneyset}}{\rho_{teorik}} \times 100 = \text{Rölatif Yoğunluk (\%)} \quad (5.1)$$

$$100 - \text{Rölatif yoğunluk (\%)} = \text{Porozite değeri (\%)} \quad (5.2)$$



**Şekil 5.26 :** 120 HV sertliğe ve 0.46 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip Cu altlık üzerine 10 mm nozül-altlık arası mesafesi ile yapılan Cu kaplamanın yapışma mukavemetinden sonra kopan kaplama parçasından çekilen 4000 büyütmedeki taramalı elektron mikroskop görüntüsü.

**Çizelge 5.1 :** Kaplama porozitesi değerlerinin karşılaştırılması.

<b>Kaplama özellikleri</b>	<b>Kaplama porozitesi (%) (Metalografik yapı)</b>	<b>Kaplama porozitesi (%) (Arşimet prensibi)</b>
140 HV altlık sertliği, 0.06 µm yüzey pürüzlülüğü, 10 mm mesafe	1.07±0.20	9±0.044
120 HV altlık sertliği, 0.46 µm yüzey pürüzlülüğü, 10 mm mesafe	0.80±0.50	6±0.031
120 HV altlık sertliği, 0.06 µm yüzey pürüzlülüğü, 20 mm mesafe	0.67±0.15	5±0.034

İlk aşamada Clemex görüntü analiz programı ile enine kesit mikroyapı fotoğraflarından elde edilen porozite miktarları %1 civarındadır. Fakat çekme testi sonrası kaplamalardan kopan parçalar ile Arşimet prensibi kullanılarak yoğunluk ölçümünden bulunan yoğunluk değerlerinde ise % porozite değerleri çok daha yüksek

çıkıştır. Bu durumun birkaç sebebi olabilir. Öncelikle yapılan ilk porozite ölçümü enine kesit mikroyapı fotoğraflarından ölçüldüğü için yanıltıcı olabilir fakat arşimet prensibiyle yapılan ölçüm daha güvenilirdir. Fakat yine de ilk bölümde yapılan kaplamalar arasında bir karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılabilir. Çünkü ilk aşamada bulunan porozite değerleri kaplama sonrası kopan parçadan Arşimet yöntemiyle bulunan kaplama yoğunlukları sıralama açısından tutarlıdır. Farkın bu kadar fazla olmasının diğer bir sebebi de çekme testi sonrası kaplamanın içinde çekme boşluklarının oluşmasıdır.

#### **5.4 Elektrik İletkenliği Ölçüm Sonuçları**

Kaplama öncesi yüksek saflıktaki bakır altlık malzemesinin elektrik iletkenliği 57 MS/m civarında bulunmuştur. Fakat yapılan bakır kaplama sonrasında elektrik iletkenliğinin büyük oranda ( $\approx\%50$ ) düşerek ortalama 26 MS/m olarak ölçülmüştür. Soğuk işlemin elektrik iletkenliğini düşürdüğü kabul edilmekle birlikte bu büyük düşüşün sebebinin elektrik iletkenliği ölçümü öncesi kaplama kalınlığının mikron seviyesinde olmasından dolayı zımparalama işleminin yeterli seviyede yapılamamasına ve dolayısıyla prob ile kaplama yüzeyi arasında tam bir temas sağlanamamasına dayandırılabilir.



## 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

%99,9 saflığa sahip küresel bakır tozları farklı özelliklere sahip yüksek saflıktaki bakır altlıklar üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme (SGDP) yöntemi ile kaplanmıştır. Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Genel olarak Cu tozları bakır altlıklar üzerine iyi yapışarak kaplama/altlık arasında boşluk ve/veya süreksizlik görülmemiştir.
2. 140 HV sertliğe sahip Cu altlık malzemesiyle yapılan kaplamada elde edilen kaplama sertliği diğer kaplamalara göre yüksek çıkmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar irdelenerek bunun sebebinin de altlık malzemesinin sertliği arttıkça tozların plastik deformasyonu için kullanılan kinetik enerjinin arttığı kanısına varılmıştır. Dolayısıyla kullanılan altlık malzemesinin özelliklerinin kaplama/altlık arayüzeyi ve kaplama özellikleri üzerinde etkisi olduğu anlaşılmıştır.
3. Ortalama altlık yüzey pürüzlülüğü değerinin 0,46  $\mu\text{m}$  olduğu bakır altlık malzemesi kullanılarak yapılan kaplamada en yüksek kaplama kalınlığı elde edilememesine rağmen mikroyapı resimleri ve kaplama sertlik değerlerine bakıldığında genel olarak en iyi sonuç alınmıştır. Böylece soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde altlık malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün optimum değerinde olması gerektiği sonucuna varılmıştır.
4. Nozül-altlık arası mesafenin 20 mm olduğu kaplamalarda birikme veriminin maksimuma ulaştığı bulunmuştur. Elde ettiğimiz deneysel çalışmalar ve literatürde yapılan çalışmalara dayanarak bu mesafenin az olduğu durumlarda altlık üzerinde şok dalgası oluşması ihtimalinin yüksek olabileceği ve bu yüzden birikme veriminin düşük olacağı sonucuna varılmıştır.
5. İncelenen üç parametre sonucunda en iyi kaplama özelliklerinin elde edildiği şartlar seçilerek yapılan çekme testi sonucunda kaplamaların sahip oldukları yapışma mukavemeti değerleri 20 N/mm<sup>2</sup> (MPa) civarında bulunmuştur. Genel

olarak bu proses şartlarında soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle elde edilen kaplamaların yapışma mukavemeti değerinin ortalama  $20 \text{ N/mm}^2$  (MPa) seviyesinde olacağı söylenebilir. 120 HV ve 140 HV gibi farklı sertliklere sahip altlık malzemeler kullanılmasına rağmen yapışma mukavemetlerinin aynı seviyede çıkmasının sebebi kullanılan altlık arayüzey sertlik aralığının bu değeri etkileyecek derecede geniş olmamasından dolayıdır. Ayrıca, bütün ayrılmalar kaplama/altlık arayüzeyinden gerçekleşmiştir. Bu durumda yapışma mukavemetinin kaplamanın kohezif dayanımından daha düşük olduğu düşünülmektedir.

6. Kaplamadan önce bakırın elektrik iletkenliği ölçülmüştür ve  $57 \text{ MS/m}$  bulunmuştur. Kaplama sonrası yapılan ölçümde bu değer büyük oranda ( $\approx\%50$ ) düştüğü gözlenmiştir. Bu düşüşün sebebinin kaplama kalınlığının mikron seviyesinde olmasından dolayı ölçüm öncesi yeterli derecede zımpara yapılamamasından kaynaklandığına ve yüzeyin düz olmaması sebebiyle prob ile kaplama arasında tam bir temas sağlanamadığı düşüncesine dayandırılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Meydanoğlu, O.** (2012). *Surface modification of metals by metals of cold gas dynamic technique* (doktora tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [2] **Bayrak, S. E.** (2011). *Al-12Si matrisli seramik partikül takviyeli kompozit kaplamaların soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile üretilmesi ve karakterizasyonu* (yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [3] **Ning, X.-J., Jang, J.-H., Kim, H.-J.** (2007). The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process. *Applied Surface Science*;253,18. p: 7449-55.
- [4] **Han, T., Zhao, Z., Gillispie, B. A., Smith, J. R.** (2005). Effects of spray conditions on coating formation by the kinetic spray process. *Journal of thermal spray technology*;14,3. p: 373-83.
- [5] **Li, W.-Y., Liao, H., Douchy, G., Coddet, C.** (2007). Optimal design of a cold spray nozzle by numerical analysis of particle velocity and experimental validation with 316L stainless steel powder. *Materials & design*;28,7. p: 2129-37.
- [6] **Van Steenkiste, T., Smith, J., Teets, R.** (2002). Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles. *Surface and Coatings Technology*;154,2. p: 237-52.
- [7] **Altuncu, E., Üstel, E.** Soğuk Sprey (Cold Sapray) Teknolojisi ve Uygulama Alanları. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası.
- [8] **Zhao, Z., Gillispie, B., Smith, J.** (2006). Coating deposition by the kinetic spray process. *Surface and Coatings Technology*;200,16. p: 4746-54.
- [9] **Klinkov, S. V., Kosarev, V. F., Rein, M.** (2005). Cold spray deposition: significance of particle impact phenomena. *Aerospace science and technology*;9,7. p: 582-91.
- [10] **Yumuşak, G.** (2012). *Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yöntemi ile Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kaplamasının Üretimi ve Karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [11] **Grujicic, M., Zhao, C., Tong, C., DeRosset, W., Helfritch, D.** (2004). Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials Science and Engineering: A*;368,1. p: 222-30.

- [12] **Jen, T.-C., Li, L., Cui, W., Chen, Q., Zhang, X.** (2005). Numerical investigations on cold gas dynamic spray process with nano-and microsize particles. *International journal of heat and mass transfer*;48,21. p: 4384-96.
- [13] **Richer, P., Zúñiga, A., Yandouzi, M., Jodoin, B.** (2008). CoNiCrAlY microstructural changes induced during cold gas dynamic spraying. *Surface and Coatings Technology*;203,3. p: 364-71.
- [14] **Suo, X., Yin, S., Planche, M.-P., Liu, T., Liao, H.** (2014). Strong effect of carrier gas species on particle velocity during cold spray processes. *Surface and Coatings Technology*.
- [15] **Li, C.-J., Li, W.-Y.** (2003). Deposition characteristics of titanium coating in cold spraying. *Surface and coatings Technology*;167,2. p: 278-83.
- [16] **Klinkov, S., Kosarev, V.** (2006). Measurements of cold spray deposition efficiency. *Journal of thermal spray technology*;15,3. p: 364-71.
- [17] **Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., Kreye, H.** (2006). Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia*;54,3. p: 729-42.
- [18] **Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H.** (2003). Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*;51,15. p: 4379-94.
- [19] **Li, W.-Y., Liao, H., Li, C.-J., Bang, H.-S., Coddet, C.** (2007). Numerical simulation of deformation behavior of Al particles impacting on Al substrate and effect of surface oxide films on interfacial bonding in cold spraying. *Applied Surface Science*;253,11. p: 5084-91.
- [20] **Kim, H.-J., Lee, C.-H., Hwang, S.-Y.** (2005). Fabrication of WC–Co coatings by cold spray deposition. *Surface and Coatings Technology*;191,2. p: 335-40.
- [21] **Balani, K., Laha, T., Agarwal, A., Karthikeyan, J., Munroe, N.** (2005). Effect of carrier gases on microstructural and electrochemical behavior of cold-sprayed 1100 aluminum coating. *Surface and Coatings Technology*;195,2. p: 272-9.
- [22] **Ajdelsztajn, L., Zuniga, A., Jodoin, B., Lavernia, E.** (2006). Cold gas dynamic spraying of a high temperature Al alloy. *Surface and Coatings Technology*;201,6. p: 2109-16.
- [23] **Li, W.-Y., Zhang, C., Wang, H.-T., Guo, X., Liao, H., Li, C.-J., et al.** (2007). Significant influences of metal reactivity and oxide films at particle surfaces on coating microstructure in cold spraying. *Applied Surface Science*;253,7. p: 3557-62.
- [24] **Klinkov, S., Kosarev, V., Sova, A., Smurov, I.** (2008). Deposition of multicomponent coatings by cold spray. *Surface and Coatings Technology*;202,24. p: 5858-62.
- [25] **Wang, H.-R., Li, W.-Y., Ma, L., Wang, J., Wang, Q.** (2007). Corrosion behavior of cold sprayed titanium protective coating on 1Cr13 substrate in seawater. *Surface and Coatings Technology*;201,9. p: 5203-6.

- [26] **King, P. C., Zahiri, S. H., Jahedi, M. Z.** (2008). Rare earth/metal composite formation by cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*;17,2. p: 221-7.
- [27] **Taylor, K., Jodoin, B., Karov, J.** (2006). Particle loading effect in cold spray. *Journal of thermal spray technology*;15,2. p: 273-9.
- [28] **Tazegül, O.** (2012). *Surface modification of electrical contacts by cold gas dynamic spraying process* (Yüksek lisans tezi). Adres: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- [29] **Zahiri, S. H., Fraser, D., Gulizia, S., Jahedi, M.** (2006). Effect of processing conditions on porosity formation in cold gas dynamic spraying of copper. *Journal of thermal spray technology*;15,3. p: 422-30.
- [30] **Meng, X., Zhang, J., Zhao, J., Liang, Y., Zhang, Y.** (2011). Influence of gas temperature on microstructure and properties of cold spray 304SS coating. *Journal of Materials Science & Technology*;27,9. p: 809-15.
- [31] **Zahiri, S. H., Yang, W., Jahedi, M.** (2009). Characterization of cold spray titanium supersonic jet. *Journal of thermal spray technology*;18,1. p: 110-7.
- [32] **Stoltenhoff, T., Kreye, H., Richter, H.** (2002). An analysis of the cold spray process and its coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*;11,4. p: 542-50.
- [33] **Gilmore, D., Dykhuizen, R., Neiser, R., Smith, M., Roemer, T.** (1999). Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*;8,4. p: 576-82.
- [34] **Pattison, J., Celotto, S., Khan, A., O'neill, W.** (2008). Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process. *Surface and Coatings Technology*;202,8. p: 1443-54.
- [35] **Fukumoto, M., Wada, H., Tanabe, K., Yamada, M., Yamaguchi, E., Niwa, A., et al.** (2007). Effect of substrate temperature on deposition behavior of copper particles on substrate surfaces in the cold spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*;16,5-6. p: 643-50.
- [36] **Yin, S., Wang, X.-f., Li, W., Jie, H.-e.** (2011). Effect of substrate hardness on the deformation behavior of subsequently incident particles in cold spraying. *Applied Surface Science*;257,17. p: 7560-5.
- [37] **Li, W.-Y., Zhang, C., Guo, X., Zhang, G., Liao, H., Li, C.-J., et al.** (2008). Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying. *Materials & Design*;29,2. p: 297-304.
- [38] **Kumar, S., Bae, G., Lee, C.** (2009). Deposition characteristics of copper particles on roughened substrates through kinetic spraying. *Applied Surface Science*;255,6. p: 3472-9.
- [39] **Huang, R., Ma, W., Fukanuma, H.** (2014). Development of ultra-strong adhesive strength coatings using cold spray. *Surface and Coatings Technology*;258. p: 832-41.
- [40] **Dykhuizen, R., Smith, M.** (1998). Gas dynamic principles of cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*;7,2. p: 205-12.

- [41] **Grujicic, M., Saylor, J., Beasley, D., DeRosset, W., Helfrich, D.** (2003). Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process. *Applied Surface Science*;219,3. p: 211-27.
- [42] **Li, W.-Y., Zhang, C., Guo, X., Li, C.-J., Liao, H., Coddet, C.** (2007). Study on impact fusion at particle interfaces and its effect on coating microstructure in cold spraying. *Applied Surface Science*;254,2. p: 517-26.
- [43] **Lima, R., Karthikeyan, J., Kay, C., Lindemann, J., Berndt, C.** (2002). Microstructural characteristics of cold-sprayed nanostructured WC–Co coatings. *Thin Solid Films*;416,1. p: 129-35.
- [44] **Li, W.-Y., Liao, H., Li, C.-J., Li, G., Coddet, C., Wang, X.** (2006). On high velocity impact of micro-sized metallic particles in cold spraying. *Applied Surface Science*;253,5. p: 2852-62.
- [45] **Dykhuzen, R., Smith, M., Gilmore, D., Neiser, R., Jiang, X., Sampath, S.** (1999). Impact of high velocity cold spray particles. *Journal of Thermal Spray Technology*;8,4. p: 559-64.
- [46] **Champagne Jr, V. K., Helfrich, D., Leyman, P., Grendahl, S., Klotz, B.** (2005). Interface material mixing formed by the deposition of copper on aluminum by means of the cold spray process. *Journal of thermal spray technology*;14,3. p: 330-4.
- [47] **Li, W.-Y., Zhang, C., Guo, X., Zhang, G., Liao, H., Coddet, C.** (2007). Deposition characteristics of Al–12Si alloy coating fabricated by cold spraying with relatively large powder particles. *Applied surface science*;253,17. p: 7124-30.
- [48] **Zhang, D., Shipway, P., McCartney, D.** (2005). Cold gas dynamic spraying of aluminum: the role of substrate characteristics in deposit formation. *Journal of thermal spray technology*;14,1. p: 109-16.
- [49] **Van Steenkiste, T., Smith, J., Teets, R., Moleski, J., Gorkiewicz, D., Tison, R., et al.** (1999). Kinetic spray coatings. *Surface and coatings technology*;111,1. p: 62-71.
- [50] **Grujicic, M., Zhao, C., DeRosset, W., Helfrich, D.** (2004). Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials & design*;25,8. p: 681-8.
- [51] **Richer, P., Jodoin, B., Ajdelsztajn, L.** (2006). Substrate roughness and thickness effects on cold spray nanocrystalline Al– Mg coatings. *Journal of thermal spray technology*;15,2. p: 246-54.
- [52] **Vencl, A., Arostegui, S., Favaro, G., Zivic, F., Mrdak, M., Mitrović, S., et al.** (2011). Evaluation of adhesion/cohesion bond strength of the thick plasma spray coatings by scratch testing on coatings cross-sections. *Tribology International*;44,11. p: 1281-8.
- [53] **Ziemian, C., Sharma, M. M., Bouffard, B. D., Nissley, T., Eden, T.** (2014). Effect of substrate surface roughening and cold spray coating on the fatigue life of AA2024 specimens. *Materials & Design*;54. p: 212-21.

- [54] **Huang, R., Fukanuma, H.** (2012). Study of the influence of particle velocity on adhesive strength of cold spray deposits. *Journal of thermal spray technology*;21,3-4. p: 541-9.
- [55] **Url-1** <<http://itulabs.itu.edu.tr/Cihaz.aspx?id=bfcf7c1e-63bc-4ed6-9d1e-3470de642dd9>>, alındığı tarih: 27.04.2015.
- [56] **Url-2** <<http://itulabs.itu.edu.tr/Cihaz.aspx?id=a22c3834-0c60-4ffe-a979-cdcc16397416>>, alındığı tarih: 27.04.2015.
- [57] **Url-3** <<http://itulabs.itu.edu.tr/Cihaz.aspx?id=b3b981a3-8ad1-4fe3-942c-83d9632f3861>>, alındığı tarih: 27.04.2015.
- [58] **Url-4** <<http://itulabs.itu.edu.tr/Cihaz.aspx?id=539ac045-96bc-49f9-842b-e3409261f06c>>, alındığı tarih: 27.04.2015.



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad** : Özlem ÇETİN  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Bakırköy/İstanbul , 10 Ekim 1988  
**E-Posta** : ozlemcetin1988@gmail.com

### **ÖĞRENİM DURUMU:**

- **Lisans** : 2007-2012  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği

