

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**SDGP YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KAPLAMALARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN SİMÜLASYON DESTEKLİ İNCELENMESİ**

Ayça DEMİRER KAHRAMAN

**Danışman
Doç. Dr. Osman ÇULHA**



MANİSA-2019

**Ayça
DEMİRER
KAHRAMAN**

**SDGP YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KAPLAMALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
SİMÜLASYON DESTEKLİ İNCELENMESİ**

2019

TEZ ONAYI

Adı SOYADI tarafından hazırlanan "**SDGP YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN KAPLAMALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SİMÜLASYON DESTEKLİ İNCELENMESİ**" adlı tez çalışması 05/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	Doç. Dr. Osman ÇULHA Manisa Celal Bayar Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU Manisa Celal Bayar Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğretim Üyesi Mustafa EROL Dokuz Eylül Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç.Dr. Hülya DURMUŞ Manisa Celal Bayar Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğretim Üyesi Onur ERTUĞRUL İzmir Katip Çelebi Üniversitesi	

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ayça DEMİRER KAHRAMAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ	VIII
TEŞEKKÜR.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yöntemi	4
2.1.1. Tanımı ve kısa tarihçesi	4
2.1.2. Soğuk Püskürtme Yönteminin Temelleri	5
2.1.3. Soğuk Püskürtme Yöntemleri	9
2.1.3.1. Yüksek basınçlı soğuk püskürtme (HPCS) yöntemi	9
2.1.3.2. Düşük basınçlı soğuk püskürtme (LPCS) yöntemi	10
2.1.3.3. HPCS ve LPCS yöntemlerinin birbirinden farkları	11
2.1.4. Soğuk püskürtme yönteminin termal püskürtme yöntemlerinden farkları	12
2.1.5. Soğuk Püskürtme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	13
2.1.6. Soğuk Püskürtme Yönteminde Tabaka Oluşumu	14
2.2. Bilyalı Dövme Yöntemi	19
2.2.1. Bilyalı Dövme Yönteminin Tanımı	19
2.2.2. Bilyalı Dövme İşleminin Mekanizması	20
2.3. Mekanik Özelliklerin Tespiti.....	23
2.3.1. İndentasyon.....	23
2.3.2. Nanoindentasyon	26
2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile İndentasyon Analizi	32
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	34
3.1. Materyal.....	35
3.2. Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Sistemi-SDGP	38
3.3 Test ve Analiz Teknikleri	39

3.3.1 Mikroyapı İncelemesi ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri.....	39
3.3.2 XRD Analizleri	40
3.3.4 Mekanik Testler	41
3.3.4.1 Mikro Sertlik Testi.....	41
3.3.4.2 Nanoindentasyon Testi	42
3.3.4.3 Yüzey Pürüzlülüğü Testi	43
3.3.5 Sonlu elemanlar simülasyon yöntemi ile kaplama gerilme analizi ve arayüzey incelemesi.....	44
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	47
4.1. Toz karakterizasyonu	47
4.2. Al-Zn-Al ₂ O ₃ kaplama yapısına ait SEM-EDS ve Optik Mikroskop inceleme sonuçları	49
4.2.1 Soğuk Püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi	50
4.2.1.1. SEM-EDS İnceleme sonuçları	50
4.1.2. X-Işınları difraksiyonu.....	60
4.2.2 Bilyalı Dövme işleminin Soğuk Püskürtme işleminde üretilen tabakaların kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi.....	61
4.2.1. AA6082 Al alaşımı levha yüzey pürüzlülük incelemesi	62
4.2.2. AA6082 Al alaşımı levha yüzey sertliği incelenmesi.....	64
4.2.3. SDGP yöntemi ile Al-Zn-Al ₂ O ₃ kompozit kaplama üretimi ve karakterizasyonu	65
4.2.3.1. Metalografik inceleme	66
4.2.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu incelemeleri (SEM-EDS)	70
4.2.3.3 Nanoindentasyon yöntemi ile mekanik özelliklerin belirlenmesi.....	84
4.2.3.4 Nanoindentasyon yöntemi ile mekanik özelliklerin belirlenmesi.....	96
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	117

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SDGP	Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yöntemi
HPCS	Yüksek Basıncılı Soğuk Püskürtme
LPCS	Düşük Basıncılı Soğuk Püskürtme
M	Mack Sayısı
Al₂O₃	Alüminyum Oksit (Alümina)
V_{kr}	Partikül kritik hızı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
HV	Vickers Sertlik Birimi (Hardness Vickers)
XRD	X-ışınları Difraksiyonu (X-Ray Diffractometer)
EDS	Enerji Dağılımlı Spektrometre (Energy Dispersive Spectrometer)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Termal sprey yöntemlerinde karşılaşılan sorunlar	5
Şekil 2.2. Yakınsak/ıraksak de Laval nozulunun genel çalışma prensibi	6
Şekil 2.3. Nozul girişinden altlık yüzeyine kadar parçacığın sıcaklık değişiminin şematik gösterimi	7
Şekil 2.4. HPCS yönteminin şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.5. Bir yüksek basınçlı soğuk püskürtme tabancasının (torcunun) şematik gösterilişi	10
Şekil 2.6. LPCS yönteminde kullanılan püskürtme tabancasının şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.7. Çeşitli kaplama yöntemlerinde kullanılan gaz sıcaklığı ve partikül hızı.....	12
Şekil 2.8. Çeşitli kaplama yöntemlerinde elde edilen birikme miktarı ve verim	13
Şekil 2.9. Dört farklı partikül hızı için bakır altlık üzerine alüminyum kaplanması sırasında partikül-altlık malzeme ara yüzeyinde zamana bağlı olarak sıcaklığın değişimi	14
Şekil 2.10. Soğuk püskürtme yönteminde kaplama oluşumunun şematik gösterilişi	15
Şekil 2.11. Cu altlık üzerine soğuk püskürtülmüş Cu parçacıklarının (25 µm) çarpması a) darbeden önce, b) 2 ns sonra, c) 5 ns sonra ve d) 18 ns sonra. Renkler darbe esnasında meydana gelen basınç dağılımını göstermektedir.....	16
Şekil 2.12. Cu altlık üzerine soğuk püskürtülmüş Cu parçacıklarının çarpması	
Şekil değiştirme dağılımı [48]: a) 0.01 µs sonra, malzeme jeti oluşumunun başlaması ve b) 0.05 µs sonra oluşumu. Sıcaklık dağılımı : c) 0.05 µs sonra ve d) 0.05 µs sonra.	17
Şekil 2.13. Çarpışma ara yüzeylerinde jet oluşumu: (a) çarpma sonrası 15 nano saniye, (b) çarpma sonrası 30ns, (c) farklı çarpma hızları için hesaplanan arayüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi, (d) tek bir parçacık kesit alanı....	18
Şekil 2.14. Soğuk püskürtme yönteminde parçacıkların birbiri üzerine etkisi ilk partikülün çarpmasından a) 5ns sonra b) 10ns sonra c) 15ns sonra.....	19
Şekil 2.15. Yüzeye çarpan bir bilyanın yarattığı etkiler.....	21
Şekil 2.16. Bilyalı dövme sonucu oluşan basma artık gerilmesi	21
Şekil 2.17. Bilyalı dövme işlemi sonucunda oluşan tipik bir artık gerilme profili.....	22
Şekil 2.18. Vickers sertlik deneyi ve oluşan izin şematik görünümü	24
Şekil 2.19. Rockwell sertlik deneyinin temel prensibi.....	25
Şekil 2.20. Brinell sertlik deneyi	25
Şekil 2.11 (a) Berkovich indenter uç ile yapılmış bir indentasyonun SEM görüntüsü (b) Berkovich indenter ucunun indentasyon parametreleri	27
Şekil 2.22. Önemli parametreleri gösteren bir indentasyon yük-yer değiştirme eğrisinin şematik çizimi	28
Şekil 2.23. Farklı malzeme tepkileri ve özellikleri için yük-yer değiştirme eğrilerinin şematik örnekleri: (a) elastik katı, (b) kırılğan katı, (c) sünek katı, (d) kristalli katı, (e) yükleme sırasında çatlama ile kırılğan katı, ve (f) katlanma sergileyen polimer	31
Şekil 3.1. Çalışmalarda kullanılan DYMET firmasına ait 412K model düşük basınçlı soğuk püskürtme cihazı	39

Şekil 3.2. Nikon LV 100 optik mikroskobu (a), Carl Zeiss 300VP taramalı elektron mikroskobu (b) ve Jeol JSM 6060 taramalı elektron mikroskobu	40
Şekil 3.3. Rigaku DMAX 2000 X-Ray difraktometre	41
Şekil 3.4. Future Tech FM 700 marka mikrosertlik cihazı	41
Şekil 3.5. Fischer-Cripps Lab. Pty. Limited nanoindentasyon test cihazı	43
Şekil 3.6. Mitutoyo SurfTest SJ 201 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	43
Şekil 3.7. 500 µm tabaka kalınlığı için kullanılan sonlu eleman modeli	44
Şekil 4.1. Şekil 4.1 K 10-04 kumlama tozuna ait SEM görüntüleri.....	47
Şekil 4.2 K 20-11 kaplama tozuna ait SEM görüntüleri.....	47
Şekil 4.3. D5 numunesinde tespit edilen kısmi ve çok ince tabaka	50
Şekil 4.4. N5 numunesinde tespit edilen kısmi ve çok ince tabaka	51
Şekil 4.5. N6 numunesinde tespit edilen kaplama	52
Şekil 4.6. N7 numunesinde tespit edilen kaplama	53
Şekil 4.7. N8 numunesinde tespit edilen kaplama	54
Şekil 4.8. Y5 numunesinde tespit edilen kaplama	55
Şekil 4.9. Y6 numunesinde tespit edilen kaplama	56
Şekil 4.10. Y7 numunesinde tespit edilen kaplama	57
Şekil 4.11. Y8 numunesinde tespit edilen kaplama	58
Şekil 4.12. Aynı toz besleme hızında farklı hava basınçları ile elde edilen numunelerin XRD pikleri; Toz besleme 7 g/dak D7: basınç 0,45 MPa N7: 0,60 MPa, Y7:0,70 MPa.....	59
Şekil 4.13. Normal hava basıncı (0,60MPa) ile farklı toz besleme hızlarında elde edilen kaplama numunelerinin XRD pikleri (N5: 5 g/dak, N6: 6 g/dak, N7: 7 g/dak, N8: 8 g/dak, N9: 9 g/dak).....	60
Şekil 4.14. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğü (Ra) diyagramı.....	62
Şekil 4.15. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzeyinde derinliğe bağlı sertlik değişimi	63
Şekil 4.16. Deneysel çalışmalar sırasında kızılötesi ışınlar ile sıcaklık ölçümünün yapılması	64
Şekil 4.17. Farklı dövme süreleri ile bilyalı dövme yöntemi ile dövülmüş numunelerin soğuk püskürtme yöntemi ile kaplanmasında elde edilen tabakaların üst, orta ve altlıkla birleşme bölgelerine ait içyapı.....	66
Şekil 4.18. Farklı dövme süreleri ile bilyalı dövme yöntemi ile dövülmüş numunelerin soğuk püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaların faz oranları...	68
Şekil 4.19. SDGP işlemi sonrası kompozit kaplama kesitindeki faz tanımlamaları 1:Al, 2: Zn ve 3: Al ₂ O ₃	69
Şekil 4.20 SDGP işlemi sonrası kompozit kaplama kesitindeki faz tanımlamaları.....	70
Şekil 4.21. 30s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi	71
Şekil 4.22. 60s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi	72
Şekil 4.23. 90s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi	73

Şekil 4.24. 120s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi	74
Şekil 4.25. 180s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi	75
Şekil 4.26. 240s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi	76
Şekil 4.27. a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, d) 120 s, e) 180 s ve f) 240 s işlem görmüş yüzey üzerine kaplama uygulaması ve kalınlık incelemesi	78
Şekil 4.28. a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, d) 120 s, e) 180 s ve f) 240 s işlem görmüş yüzey üzerine kaplama uygulaması ve elementel analiz sonuçları	81
Şekil 4.29. AA6082 Al alaşımından üretilmiş altlık olarak kullanılacak levhaya yapılan a) yükleme-yük boşaltma, b) Elastisite Modülü-İndentasyon sertliği ve c) % elastik toparlanma oranı-batma derinliği ilişkisi	84
Şekil 4.30. 30 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ esaslı kompozit kaplama, b) 30 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi	86
Şekil 4.31. 60 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ esaslı kompozit kaplama, b) 60 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi	87
Şekil 4.32. 90 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al ₂ O ₃ esaslı kompozit kaplama, b) 90 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi	88
Şekil 4.33. 120 s kodlu numunenin a) Al-Zn- Al ₂ O ₃ esaslı kompozit kaplama, b) 120 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi	89
Şekil 4.34. 180 s kodlu numunenin a) Al-Zn- Al ₂ O ₃ esaslı kompozit kaplama, b) 180 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi	90
Şekil 4.35. 240 s kodlu numunenin a) Al-Zn- Al ₂ O ₃ esaslı kompozit kaplama, b) 240 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi	91
Şekil 4.36. a) Part modülü, b) Batıcı uç ile yüzey temas noktasında hassas sonuç almak için sınıflandırma işlemi, c) Malzeme dataları, d) Step modülü, e) Yükleme, f) sınır şartları, g) Mesh çözüm ağı ve h) Hassas mesh ağ yapısı ..	97

Şekil 4.37. 30s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları	99
Şekil 4.38. 60s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları	100
Şekil 4.39. 90s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları	100
Şekil 4.40. 120s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları	101
Şekil 4.41. 180s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları	101
Şekil 4.42. 240s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları	102
Şekil 4.43. a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, d) 120 s, e) 180 s ve f) 240 sn kodlu numunelerin ortalama yükleme-yük boşaltma eğrileri ile simülasyon sonucu elde edilen eğrilerin karşılaştırılması	105

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Soğuk püskürtme yöntemlerinde kullanılan tipik püskürtme parametreleri	12
Tablo 3.1. AA6082 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağı.)	35
Tablo 3.2. DYMET K-10-04 numaralı kumlama tozun kimyasal kompozisyonu (% ağı.)	36
Tablo 3.3 K-80-13 kodlu tozun kimyasal bileşimi	37
Tablo 3.4. Soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin araştırılmasında kullanılan işlem parametreleri	37
Tablo 3.5. Bilyalı dövme işlem sürelerine bağlı olarak numunelerin adlandırılması	38
Tablo 4.1. Soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin araştırılmasında kullanılan işlem parametreleri ve numuneler	48
Tablo 4.2. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a)	62
Tablo 4.3. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_z)	63
Tablo 4.4. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak üretilen kaplamaların faz oranları	67
Tablo 4. 5. Deneysel indentasyon verileri analizi	93
Tablo 4.6. İndentasyon deneyi verileri	98
Tablo 4.7. Simülasyon destekli indentasyon analizi veri dağılımı ve sonuçları .	98

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman ÇULHA' ya, en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübesi ile doktora öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, sevgili eşim Sayın Fatih KAHRAMAN' a,

Soğuk püskürtme uygulamaları için bana zaman ayıran ve gerekli çalışma imkanlarını sağlayan DYMET Metal ve Kaynak Tekn. San. Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkürü borç bilirim.

Doktora çalışmalarım sırasında metalografik inceleme kademelerinde bana yardımcı olan Araş.Gör. Haydar KAHRAMAN ve Araş. Gör. Coşkun YOLCU'ya ve nano indentasyon testlerinde yaptığı katkılardan dolayı Dr. Öğretim Üyesi Metin YURDDAŞKAL'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen, hedeflerime ulaşmam için her zaman arkamda durarak güçlü hissetmemi sağlayan canım anneme, babama ve sevgili kardeşlerime teşekkür ederim.

Ayça DEMİRER KAHRAMAN
Manisa, 2019

ÖZET

Doktora Tezi

SDGP yöntemi ile üretilen kaplamaların mekanik özelliklerinin simülasyon destekli incelenmesi

Ayça DEMİRER KAHRAMAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Osman ÇULHA

Soğuk Sprey Yöntemi, mikro boyuttaki parçacıkların bir laval nozul içerisinde ses hızından daha yüksek hızlara (süpersonik hızlara) ulaştırılarak altlık üzerine püskürtülmesi ve parçacıkların plastik deformasyona uğratılması sonucunda altlık malzeme üzerinde bir kaplama oluşturulması prensibine dayanmaktadır.

Bu tez çalışması, soğuk püskürtme işlem parametrelerinin ve altlık malzemesine uygulanan bilyalı dövme ile ön deformasyon işleminin kaplama kalitesi üzerine etkilerinin simülasyon destekli incelenmesi olmak üzere iki farklı amaçla yapılmıştır. Çalışmalarda altlık malzemesi olarak AA6082 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Soğuk püskürtme işleminde parçacık hızının süpersonik hızlara ulaşması için gazın basıncı ve bu gaz jeti içerisindeki toz besleme hızının (parçacık miktarına) optimize edilmesi için bir deney planı yapılmıştır. İşlem parametrelerinin kaplama kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi çalışmalarında iki farklı kaplama toz karışımı kullanılmış olup kompozisyonlarında % 23-27 Al_2O_3 - % 33-37 Al- % 38-42 Zn (DYMET K-20-11) ve % 28-32 Al_2O_3 - % 53-57 Al- % 13-17 Zn (DYMET K-80-13) olmak üzere farklı oranlar içermektedir. Bu toz karışımlarından da anlaşılabileceği üzere kaplama ser-met olarak tariflenen kompozit kaplama oluşumu için uygundur. Soğuk spreyle kaplama işlemi sonucunda Al_2O_3 takviyeli metal matrisli kompozit bir kaplama yapısı elde edilmiştir. Toz karışımları 10 mm sabit püskürtme mesafesinde, 5-9 g/dak arasında değişen toz besleme hızı ve 0,45-0,70 MPa arasında değişen basınç değerleri arasında soğuk püskürtme işlemine tabi tutularak en uygun kaplama proses şartları ortaya çıkarılmıştır. Optimum değerlerin 0,6 MPa basınç, nozul-yüzey arası mesafe 10 mm ve 8 g/dk toz besleme hızında gerçekleşeceği sonucuna ulaşılmıştır.

Deneyisel çalışmalar sonucunda tozlar için kritik hız, gaz basıncı ve toz besleme hızı tespit edilmiştir. Proses parametrelerine bağlı olarak yapılan kaplama işleminde toz karışımındaki Al_2O_3 dışında kalan Al ve Zn miktarının depozitlenme mekanizmasında önemli rolü olduğu anlaşılmıştır. Soğuk spreyle kaplama işlemi plastik deformasyon esasına göre yapılan depozitlenme mekanizmasına sahip olduğundan, yapıda sertliği sağlayan oksit çeşidi ve miktarında bir değişikliğe gidilmeden toz içinde Zn miktarının artırılması kaplama oluşumunu olumlu yönde etkilemiş ve toz birikmesi stabil gerçekleşmiştir. Bu tespit sonrasında AA6082 Al alaşımından üretilmiş bir levha yüzeyine 30-240 sn arasında bilyalı dövme işlemi

uygulanarak, yüzey sertliğinin soğuk sprey ile kaplama üretiminde kaplama birikmesine ve kaplamanın mikro mekanik özelliklerine olan etkisi ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. İndentasyon yöntemi ile Elastisite modülü, sertlik, % elastik toparlanma oranı gibi karakteristik mekanik özelliklere ulaşılmış olup bu değerler; indentasyon işleminin sonlu elemanlar simülasyon programı ile analizi sonucunda kaplamanın hasar veya failure gerilmesi olarak tariflenen kritik gerilme ve deformasyon davranışı (pile-up ve sink in), akma gerilmesi, kaplama-altlık malzemesi arayüzey gerilme dağılımlarını elde etmek amacı ile kullanılmıştır.

Karakterizasyon çalışmaları kapsamında; optik mikroskop ve SEM-EDS yardımı ile kaplama kalınlığı, porozite, faz dağılımı ve boyutları, elementel çizgisel ve bölgesel haritalama çalışmaları ve kullanılan tozlara ait boyut dağılımı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Soğuk sprey hammaddesi olarak kullanılan tozların dağılımları ve bu tozlar kullanılarak üretilen kaplamanın metalografik incelemeleri ile proses şartlarının kaplama oluşumu üzerindeki etkisi de ortaya çıkarılmıştır. 30-240 sn bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Alüminyum alaşımından üretilmiş levhanın yüzey pürüzlülüğü ve kesit boyunca sertlik değerleri ölçülerek başlangıç yüzeyin mekanik özelliklerinin, kaplama mekanik özelliklerine ve kaplama-altlık arayüzeyine olan etkisi araştırılmıştır. Kaplama, bilyalı dövme bölgesi ve altlık malzemesine indentasyon testleri uygulanarak; yükleme-yük boşaltma eğrileri, Elastisite Modülü, sertlik ve % elastik toparlanma oranları tespit edilmiştir. Sonuçların uygulanan indentasyon yükünden etkilenmemesi için yük kontrollü indentasyon deneyleri yapılarak yük optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. 50, 75 ve 100 mN yüklerde optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiş olup, 100 mN yük altında sonuçların kaplama ve altlık malzemesini temsil edecek kadar homojen bir batma izi alanı oluşturduğu tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar destekli indentasyon analizi ile kaplamaların plastik deformasyon özellikleri, kritik hasar gerilmesi, akma gerilmesi ve strain değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk püskürtme yöntemi, kaplama, bilyalı dövme, indentasyon, sonlu elemanlar simülasyonu

2019, 116 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

Simulation assisted examination of mechanical properties of coatings produced by CGDS method

Ayça DEMİRER KAHRAMAN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman ÇULHA

The Cold Spray Method is based on the principle that micro-sized particles are sprayed onto the substrate by reaching higher velocities than sound velocity (supersonic velocities) in a laval nozzle and the particles undergo plastic deformation to form a coating layer on the base material.

This study was carried out for two different purposes, to investigate the effects of the cold spray process parameters on the quality of the layer and the effects of the shot peening process on the quality of the layers produced in the cold spray process. AA6082 aluminum alloy is used as the base material. In the studies on the effects of the process parameters on the layer quality, DYMET K-80-13 was selected as coating powder and the experiments were made with different powder feed rates and gas pressure parameters.

In order to particle velocity to reach supersonic velocities in the cold spraying process, an experimental plan was made to optimize the gas pressure and the powder feed rate (particle quantity) in this gas jet. In the study of the effects of the process parameters on the coating quality, two different powder mixture compositions of the coating as 23-27 % Al_2O_3 - 33-37 % Al - 38-42% Zn (DYMET K-20-11) and 28-32 % Al_2O_3 - 53-57 % Al-13-17 % Zn (DYMET K-80-13) were used. As can be understood from these powder mixtures, the coating is suitable for the formation of the composite coating described as cermets. As a result of cold spray coating process, Al_2O_3 reinforced metal matrix composite structure was obtained. To reveal optimum coating process conditions, the powder mixtures were subjected to cold spray at a constant spraying distance of 10 mm, with a powder feed rate ranging between 5-9 g / min and pressures ranging from 0.45 to 0.70 MPa. It is concluded that the optimum values will be realized at a feed rate of 0.6 MPa and a nozzle-to-surface distance of 10 mm and 8 g / min.

As a result of experimental studies, critical velocity, gas pressure and powder feed rate were determined for this powder mixtures. In the coating process, depending on the process parameters, it was found that the amount of Al and Zn other than Al_2O_3 in the powder mixture had an important role in the depositing mechanism. Since the cold spray coating process has a depositing mechanism on the basis of plastic deformation, increasing the amount of Zn in the powder

without any change in the type and amount of oxide that provides the hardness in the structure has positively affected the coating formation and the deposition has become stable. After this determination, it was aimed to reveal the effect of surface hardness on the coating deposition and the micro mechanical properties of the coating in cold spray coating production by applying a shot peening treatment between 30-240 sec treatment times. Characteristic mechanical properties such as elasticity modulus, hardness, % elastic recovery rate have been reached by indentation methods. These values have been used to obtain the critical stress and deformation behavior (pile-up and sink in), yield stress, coating-substrate material interface stress distributions described as damage or failure stress of the coating by the finite element simulation program analysis of the indentation method.

Within the scope of characterization studies; coating thickness, porosity, phase distribution and dimensions, elemental linear and regional mapping studies and size distribution of the used powders were performed by the optical microscope and SEM-EDS. The distributions of the powders used as cold spray coating materials and the metallographic examinations of the coatings produced by the using these powders and the effect of the process parameters on the coating formation were also revealed. The surface roughness and hardness values of the substrate made of AA6082 Aluminum alloy which was subjected to shot peening between 30-240 sec treatment times were measured and the effect of the mechanical properties of the substrate surface on the coating mechanical properties and on the coating-substrate interface was investigated. The loading-unloading curves, elasticity modulus, hardness and elastic recovery rates were determined by applying indentation tests to the coating, shot peened area and base material. Load-controlled indentation experiments were performed to ensure that the results were not affected by the applied load. An optimization study was carried out at 50, 75 and 100 mN loads and it was found that under 100 mN load, the results formed a homogenous impression area to represent the coating and substrate material. Plastic deformation properties, critical damage stress, yield stress and strain values of the coatings were determined by indentation analysis with finite element.

Keywords: Cold spraying method, coating, shot peening, indentation, finite element simulation

2019, 116 pages

1. GİRİŞ

Soğuk Püskürtme, küçük parçacıklar içeren süpersonik bir gaz jeti ile metalik veya metal-seramik kompozit kaplamaların çeşitli yüzeylere kaplanması için geliştirilmiş bir yöntemdir. Soğuk püskürtme işlemi termal püskürtme yöntemleri içerisinde yer almakta olup [1] Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme, Kinetik Püskürtme, Yüksek Hızlı Parçacık Konsolidasyonu (HVPC), Yüksek Hızlı Toz Biriktirme ve Süpersonik Parçacık/Toz Biriktirme (SPD) gibi farklı isimleri bulunmaktadır. Soğuk püskürtme işleminde bir laval nozul kullanılarak oluşturulan 300 ile 1200 m/s arasındaki yüksek hız gaz jeti, 1 ile 25 μ m boyutundaki toz parçacıklarını hızlandırmak için kullanılır ve nozul çıkışından yaklaşık 25 mm mesafede bulunan bir yüzeye püskürterek kaplama oluşturabilmektedir[2]. Parçacık hızı kritik bir hızı aştığında, altlık malzeme yüzeyine çarparak plastik deformasyona uğrar ve birikim göstererek tabakayı meydana getirmektedir [3,4,5,6].

Soğuk püskürtme işleminde, sıcaklık daima püskürtülen tozların ergime sıcaklığından daha düşük olduğundan kaplama oluşumu katı haldeki parçacıklardan elde edilmektedir. Bu nedenle, toz partiküller geleneksel termal püskürtme işleminde olduğu gibi erime ve katılaşma işlemine maruz kalmamaktadır [7, 8, 9]. Bu durumda, yüksek sıcaklıkta meydana gelen oksidasyon, buharlaşma, erime, kristalleşme, artık gerilmeler, bağlanma, gaz oluşumu gibi kaplama özelliklerine olumsuz etkisi olan faktörlerin oluşumunun engellenmesi anlamına gelmektedir. Yöntem plastik deformasyona dayalı bir birikme mekanizmasına sahip olduğu için kaplama içerisinde çekme gerilmeleri yerine basma gerilmeleri oluşmakta ve bu durumda birleşme hatası bulunmayan çok yoğun ve kalın (5-50 mm) tabakalar elde edilmesini sağlamaktadır. Kaplama oluşturma işleminde ortaya çıkan düşük sıcaklık nedeniyle oksitlere ve diğer inklüzyonlara sahip olmayan, dövme benzeri mikro yapıya sahip kaplamalar meydana gelmektedir [10].

Bu yöntem oda sıcaklığında gerçekleştirildiğinden yöntemin adı soğuk dinamik gaz püskürtme olarak nitelendirilmiştir. Her ne kadar sıkıştırılmış gaz, yüksek basınç etkisiyle, nozülünden çıkarken yaklaşık 100°C civarında bir sıcaklığa ulaşsa da bu sıcaklıkta toz partiküllerinin ve kaplanacak malzemenin kimyasal bozunumundan söz edilemez. Dolayısıyla kaplama sırasında herhangi bir difüzyon

olayı gerçekleşmez, yani üretim sürecinde oluşan kaplamaların yapısında kimyasal bir bozunumdan söz etmek mümkün değildir. Böylelikle kaplama sırasında herhangi bir faz değişimi, kalıntı gerilme oluşumu, kaplanacak ve kaplanan malzemelerin termal genleşme farklılıklarından dolayı özellikle ara yüzeyde herhangi bir çekme karakterli iç gerilme oluşumu da ortaya çıkmamaktadır.

Soğuk püskürtme işlemi bazı tamirat işlerinde de kullanılmaktadır [11,12] . Özellikle Al, Mg ve Ti ve alaşımları gibi demir dışı malzemelerden yapılmış yapısal olmayan parçaların boyutlarının restore edilmesi ve onarılması için uygun bir yöntemdir. Böyle bir soğuk püskürtme uygulamasında başarılı bir yapışma için, altlık malzeme yüzeyi kumla işlemine tabi tuularak temizlenir.

Termal püskürtme kaplamalarında metal altlık malzemeye tabakanın birleşmesi kritiktir ve çoğu termal spre kaplamalar metal altlık malzemeye esas olarak mekanik bağ ile birleşir. Yüzey temizliği ve pürüzlülük, yapışmayı etkileyen en önemli faktörlerdir [13]. Pürüzlendirme, atomik ve metalurjik etkileşimi artırarak parçacık-yüzey teması için yüzey alanını önemli ölçüde artırır ve ayrıca mekanik kenetlenme için birçok fırsat sağlar [13]. Kumlama işleminin malzeme yüzeyinin sertliğini arttırdığı iyi bilinmektedir. Biriktirme işleminde, altlık malzemenin sertliği önemli rol oynamaktadır.

Soğuk püskürtme yönteminde altlık malzeme yüzey sertliğinin kaplama kalitesine etkisi pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmaların çoğu, farklı yüzey sertliğine sahip farklı malzemelerin veya farklı yüzey işlemlerine tabi tutulmuş numunelerin birbirleri ile kaplama özelliklerinin karşılaştırılmasını ele almışlardır. Bu çalışmalar sonucunda altlık malzemenin deforme edilebilirliğinin azalmasıyla bağlanma kolaylığının arttığı sonucuna varmışlardır [1,14].

Kaplamaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde temel olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Birincisi ve en yaygın kullanılanı nanosertlik deneyidir. Nano boyutta sertlik deneyinde elmas gibi sert bir metalden yapılan standart bir uç özellikleri bilinmeyen malzemeye bastırılır ve malzemenin buna gösterdiği direnç ölçülür. Diğer bir yöntem ise simülasyon yardımıyla mekanik özelliklerin

incelenmesi yöntemidir. Simülasyon yöntemi deneysel yöntemlere göre daha kolay, hızlı ve pratik olması nedeniyle son yıllarda giderek yaygınlaşmaktadır. Bu nedenle kaplamaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde simülasyon destekli analizler büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı; soğuk püskürtme işlem parametreleri ile farklı sürelerde bilyalı dövme işlemi uygulanarak sertliği artırılmış altlık yüzeyinin kaplamanın mekanik ve fiziksel özelliklerine olan etkisinin simülasyon destekli olarak araştırılmıştır. Çalışmalarda altlık malzeme olarak AA6082 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. İşlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi çalışmalarında kaplama tozu olarak % 28-32 Al_2O_3 - % 53-57 Al- % 13-17 Zn toz içeriğine sahip DYMET K-80-13 seçilmiş ve farklı toz besleme hızları ve gaz basıncı parametreleri ile kaplanarak proses optimizasyonu sağlanmıştır. Bilyalı dövme işleminin soğuk püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaların mikroyapısal (yoğunluğuna, mikroyapı, tane yapısı, bağlanma) ve mekanik özelliklere (Elastisite modülü, sertlik ve elastik toparlanma oranı, vs.) etkisinin araştırılması kapsamında 30 sn-240 sn arasında işlem görmüş altlık yüzeylerine kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama işlemi sırasında gazı basıncı 0,6 MPa, nozul-yüzey arası mesafe 10 mm ve toz besleme hızı 8 g/dk olarak belirlenmiştir. Bilyalı dövme işlemi sonrası farklı yüzey sertliğine sahip numuneler % 23-27 Al_2O_3 - % 33-37 Al- % 38-42 Zn toz içeriğindeki DYMET K-20-11 kodlu kaplama tozu kullanılarak kaplanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yöntemi

2.1.1. Tanımı ve kısa tarihçesi

Soğuk Dinamik Gaz Sprey Yöntemi (SDGP), mikro boyuttaki parçacıkların bir laval nozul içerisinde ses hızından daha yüksek hızlara (süpersonik hızlara) ulaştırılarak altlık üzerine püskürtülmesi ve burada plastik deformasyona uğrayarak bir kaplama oluşturması prensibine dayanmaktadır [10, 15-19].

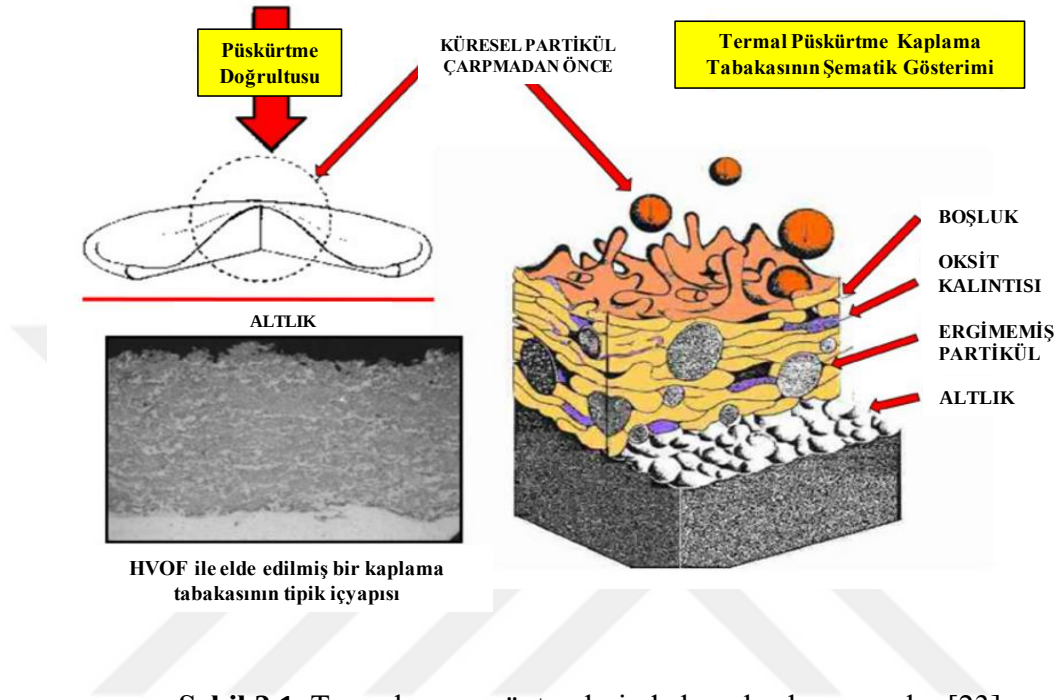
İlk defa; 1980'li yılların ortalarında Novosibirsk'te bulunan Rus Bilimler Akademisi'nde, Prof. Dr. Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından geliştirilmiştir [20, 21]. Papyrin ve ark. bu yöntemle farklı altlıklar üzerine metal, metal alaşımları ve kompozitten oluşan birbirinden farklı kaplamaları oluşturabilmiş ve soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinin birçok alanda uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır. Bu teknolojiye ait ilk Amerika patenti 1994'te, ilk Avrupa patenti 1995'te alınmıştır [22].

Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme (SDGP, çalışmada bundan sonra soğuk püskürtme olarak kullanılacaktır) teknolojisi bir gaz akımı içinde, ses hızından daha yüksek hızlarda iki fazlı (gaz + katı parçacıklar) akış çalışmalarının modellenmesi çalışmaları sırasında ortaya çıkmıştır [20]. Soğuk Püskürtme yönteminde kaplama işlemi, sıkıştırılmış gaz ile elde edilmiş süpersonik bir jet içinde hızlandırılmış küçük parçacıkların (1 ila 50 μm) yüksek hızlı (300 ila 1200 m/s) bir jetle, metalik veya dielektrik (yalıtkan) bir altlık yüzey üzerine püskürtülmesi ile yapılmaktadır [21].

Kaplama işlemi mümkün olan en düşük sıcaklıkta püskürtme yapılmasına izin veren parçacık boyutu, sıcaklığı ve hız kombinasyonunun seçilmesi ile yapılır. Soğuk püskürtme işleminde toz parçacıkları, malzemenin ergime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta olan süpersonik gaz jeti ile hızlandırılır ve katı haldeki parçacıkların malzeme yüzeyine yüksek hızla çarpması sonucunda meydana gelen plastik deformasyonla yüzeyle birleşir ve bir kaplama tabakası oluşturur.

Ergime sıcaklığından çok daha düşük bir sıcaklıkta işlem gerçekleştiğinden dolayı, geleneksel termal spre yöntemlerinde karşılaşılan yüksek sıcaklıkta

oksidasyon, buharlaşma, ergime, kristalleşme, artık gerilme oluşumu, yapışma mukavemeti düşüklüğü (soğuk püskürtme yöntemine göre daha düşük), artık gaz oluşumu gibi sorunlar Soğuk Püskürtme yönteminde ortadan kalkar veya en aza indirilmiş olur (Şekil 2.1).



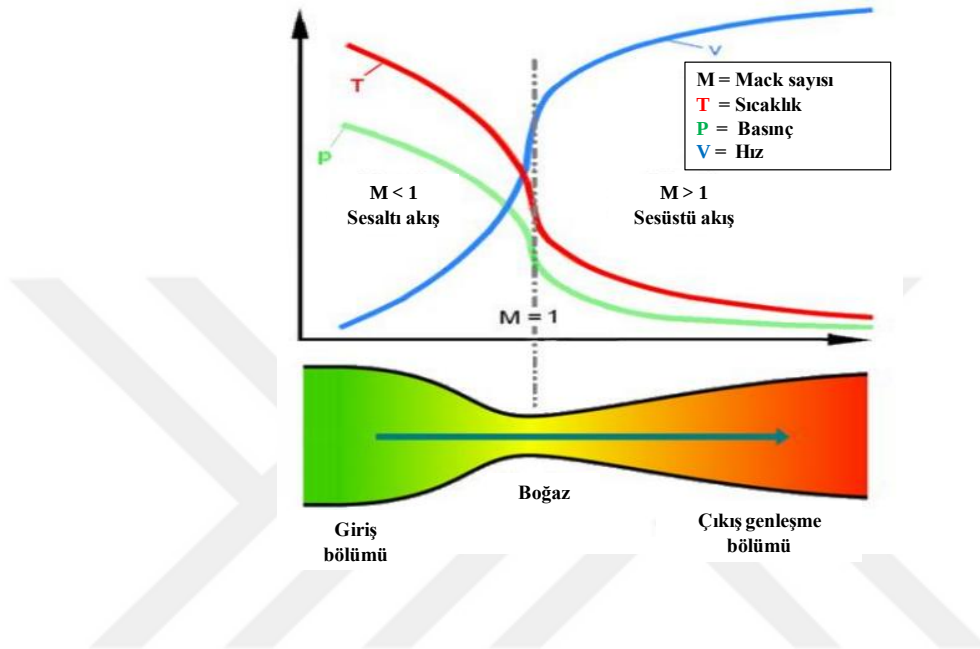
Şekil 2.1. Termal sprey yöntemlerinde karşılaşılan sorunlar [23]

2.1.2. Soğuk Püskürtme Yönteminin Temelleri

Soğuk püskürtme yönteminde, toz parçacıklar çok yüksek bir kinetik enerjiyle (yüksek hız nedeniyle) yüzeye çarparak deforme olur ve böylece hem altlık malzemeye ve hem de diğer toz parçacıklarla birleşerek kaplama tabakasını oluştururlar [15-18]. Yöntemde bir gaz (N_2 , He veya hava) «de Laval tipi nozul veya yakınsak/ıraksak nozul» ile süpersonik bir hıza hızlandırılır. Toz partikülleri bu süpersonik gaz akışı içerisine verilir ve böylece bu süpersonik akış içerisinde hızlanan partiküller alt tabakaya püskürtülürler [16]. Soğuk püskürtme işleminde kaplamanın oluşumu toz partiküllerinin hızına bağlıdır. Her malzemede kaplama işleminin meydana gelebilmesi için belirli bir kritik hıza (V_{kr}) sahip olması gerekir.

De Laval nozulu Gustaf de Laval tarafından 1897'de buhar türbinleri için icat edilmiştir ve daha sonra Robert Goddard tarafından bir uzay roketi için kullanılmıştır. De Laval nozulunun çalışma prensibi şu şekildedir: Yüksek basınç

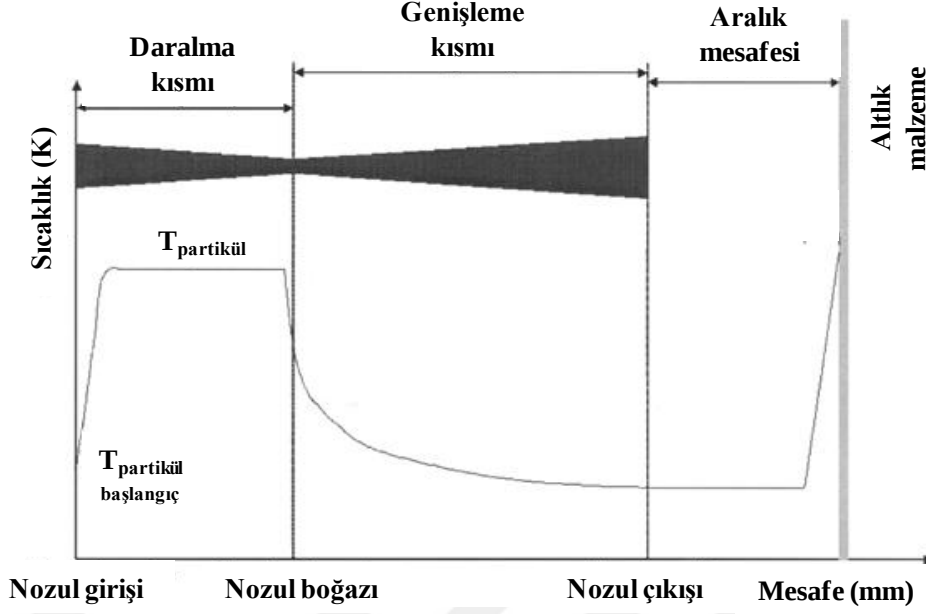
gazı memeden çıkmaya zorlarken, Bernoulli Prensibine göre nozul çapı küçüldüğü için gazın hız artar (kütle akışı sabit olduğu için Şekil 2.2'ye bakınız). Odacıktaki basınç yeterli bir seviyeye ulaştığında, gaz nozulun en dar kısmı olan boğazda ses hızına ulaşır. Ardından, kesit alanı genişledikçe gaz süpersonik hızlara ulaşır. [24, 25]



Şekil 2.2. Yakınsak/ıraksak de Laval nozulunun genel çalışma prensibi [26]

Gaz soldan sağa doğru giderken de Laval nozulunun farklı bölgeleri için basınç (P), sıcaklık (T) ve çıkış gazı hızını (V) göstermektedir. Soldaki gazın hızı subsoniktir (Mach sayısı, $M_i < 1$). Boğazdaki kesikli çizgi, gaz hızı sonik hızla gösterir ($M_t = 1$). Püskürtücü çıkışında, gaz süpersoniktir ($M_e > 1$). Mach sayısı, hareket halindeki bir **kütlenin hızının**, kütlenin bulunduğu şartlardaki **ses hızına oranıdır**.

Kaplama prosesinde ön ısıtılmış gaz sıcaklığı 0-800 °C arasında ve basınç ise 0.6-3.5 Mpa arasında değişmektedir. Proses sıcaklığı püskürtülecek kaplama malzemesinin ergime sıcaklığının altındadır. Nozul çıkışında sıcaklık düşmekte ve toz besleme ile birlikte daha da azalmaktadır (Şekil 2.3) [15, 27, 28].



Şekil 2.3. Nozul girişinden altlık yüzeyine kadar parçacığın sıcaklık değişiminin şematik gösterimi [29].

Soğuk püskürtme işleminde kaplama oluşumu ve birikim verimliliği; parçacık boyutu, parçacık sıcaklığı, altlık malzemesi ve kaplama malzemesinin özellikleri gibi parametrelere bağlıdır [15, 16, 30]. Ayrıca başarılı bir birleşme için, birikme işlemi sırasında parçacıkların yüzeylerindeki oksit tabakalarının da çarpma sırasında uzaklaştırılması gereklidir [30].

İyi bir bağ oluşumu veya birleşme için parçacıkların çarpmaları sırasında yüksek miktarda plastik deformasyona neden olmaları da gerekir [17, 20, 30]. Bu nedenle yöntemde kullanılan tozların seçiminde en önemli unsur yüksek hızla çarpma esnasında deformasyon kabiliyetine sahip olmasıdır. Al, Cu, Ag, Au, Pt, Ni ve γ -Fe gibi yüzey merkezli kübik kristal kafas yapısına sahip metaller hacim merkezli kübik kristal (W, Ta, Mo, Nb, V, Cr, α -Fe, β -Ti) ve sıkı paket hegzagonal (Cd, Zn, Co, Mg, Ti) kafes yapısına sahip metallere göre daha fazla deformasyon kabiliyetine sahip olmalarından dolayı soğuk sprey yöntemlerinde öncelikli olarak Al, Fe, Cu, Ni esaslı kaplamalar üzerinde çalışmalar sürdürülmüştür [22].

Soğuk püskürtme yöntemi ile demir esaslı, demir dışı metal ve alaşımlar (NiCr, Zn-Al, Ti-6-8Al-4V, 316, 316L, NiCrAlY) dışında metal/seramik (WC-Co,

NiCr-Cr₃C₂) ve kompozit (Al-Al₂O₃, Al-SiC, Al-TiN) esaslı kaplamalar üretilebilmektedir [31-37]. Ayrıca polimerik esaslı kaplamalar da soğuk püskürtme ile uygulanabilmektedir [38].

Kaplama kalitesi püskürtme koşullarına da bağlıdır. Özellikle, işlem gazının ön ısıtma sıcaklığının, partikül hızına ve kaplama kalitesi üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan bazı çalışmalar ile ortaya konmuştur [15, 16, 39]. Gazın ön ısıtılması, gazın viskozitesini düşürür ve bu da gaz hızını artırır ve böylece de parçacık hızı artar [40]. Yüksek hız dolayısıyla daha yüksek kinetik enerjiye sahip olan parçacıklar daha yüksek miktarda deformasyona neden olur ve bunun sonucunda kaplamanın yapısı daha yoğun hale gelir ve kaplamanın mekanik özellikleri iyileşir [41, 42]. Daha yüksek işlem sıcaklığı, daha yüksek basınç ile birlikte, termal yumuşama ve lokal kayma instabilitesinden dolayı daha yoğun kaplama yapısına neden olur [5, 18,43]. Buna ek olarak, parçacık ara yüzlerinde adyabatik basınçtan (adyabatik lokalizasyon) (ve termal yumuşama) dolayı sıcaklık artar [5]. Soğuk püskürtme bir üretim yöntemi olarak patlamalı kaynağa çok benzerdir [32, 33], grup olarak her ikisi de soğuk basınç kaynağıdır. Yüksek gaz hızı, yüksek partikül hızına neden olur [15, 39, 46]. Bu amaçla, parçacıkların hızını arttırmak için gaz ön ısıtmaya tabi tutulur, sıcaklığın artmasıyla basınç artar ve dolayısıyla da hız artar [15, 16, 39].

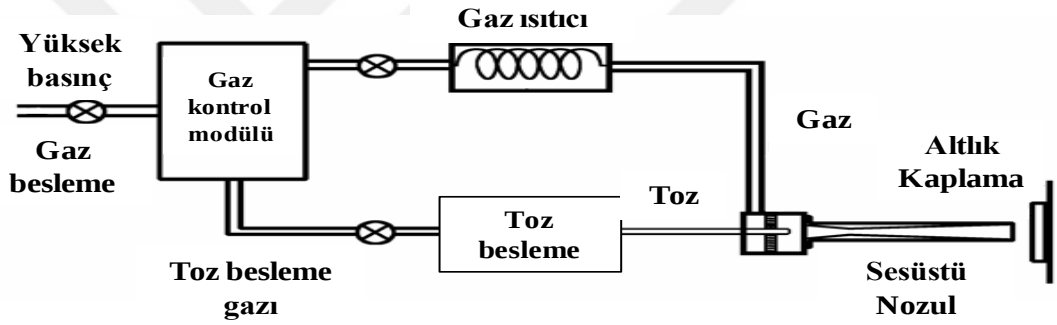
Yüksek hızlar, altlık malzeme ve kaplama ara yüzeylerinde ve partiküllerin birbirlerine yüksek darbe ile çarpmasına ve yüksek deformasyonlara neden olurlar [16, 47, 48]. Ayrıca, gaz ve parçacık sıcaklıklarının artışı soğuk püskürtme kaplama kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yüksek sıcaklık, yüksek hız ve dolayısıyla da daha güçlü darbelere neden olmaktadır [20, 40, 49, 50]. Böylece, birikme verimi (deposition efficiency= DE) gaz sıcaklıklarına bağlı olduğu için, gaz sıcaklıkları arttıkça birikim verimliliği de artmaktadır [47, 48, 51-53]. Ayrıca, altlık malzemeye uygulanan ön işlemlerin birikim verimi üzerinde bir etkisi olduğu bildirilmektedir. Kumlama işlemi sonucunda altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğünün artmasına bağlı olarak birikme verimi de bir miktar artmaktadır.

2.1.3. Soğuk Püskürtme Yöntemleri

Soğuk püskürtme yöntemi, kullanılan basınç seviyesine göre iki farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlardan birincisi yüksek basınçlı soğuk püskürtme (HPCS) ve ikincisi düşük basınçlı soğuk püskürtme (LPCS) yöntemidir.

2.1.3.1. Yüksek basınçlı soğuk püskürtme (HPCS) yöntemi

HPCS yönteminde 40 bar gibi yüksek bir basınç ve maksimum 800°C gibi ön ısıtma sıcaklıklarına ulaşılmaktadır. HPCS işleminde saf ve alaşım halinde Cu, Al, Ta, Ni, Cu-Sn, NiCr ve Ni-Al gibi metalik malzemeler toz olarak kullanılır. HPCS yönteminde LPCS yöntemine göre malzeme seçim aralığı daha geniştir. Şekil 2.4'de HPCS yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

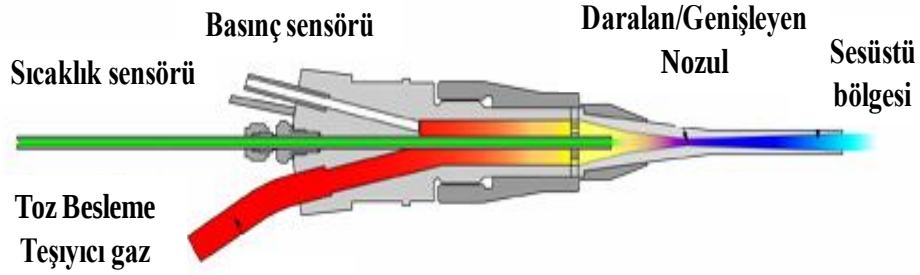


Şekil 2.4. HPCS yönteminin şematik gösterimi [54].

Temel olarak, HPCS yönteminde, toz taşıyıcı olarak görev yapacak olan yüksek basınçlı gaz (N_2 , He veya bu gazların bir karışımı) ısıtılır ve nozula verilir. Ardından, yüksek hız elde edilen nozula gaz-toz karışımı beslenir. Bundan sonra, partikül-gaz akışı yüksek hızla memeden çıkar ve püskürtülen yüzeye darbe ile çarpar. HPCS prosesi bir kontrol ünitesi ile kontrol edilir. Soğuk püskürtme işleminde, parçacıkların süpersonik hıza ulaştırıldığı yakınsak-ıraksak nozulda (converging-diverging nozzle) süpersonik gaz akış hızı, nozulun genişleyen kısmında nozul boğazında elde edilir.

Toz, taşıyıcı gazla aksel yönde beslenir ve daha sonra ana gaz ile karıştırılarak memeden önce bir partikül-gaz akışı oluşturulur. Bir yüksek basınçlı

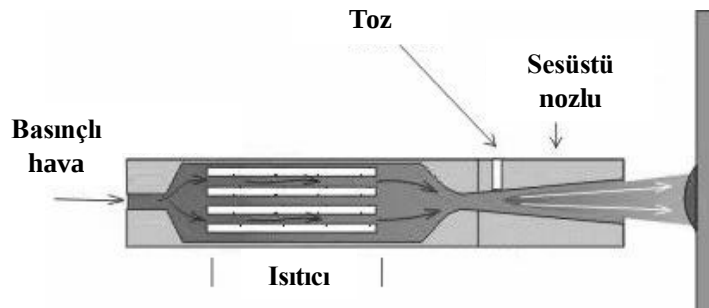
soğuk püskürtme tabancasının (torcunun) şematik gösterilişi Şekil 2.5'de verilmiştir. Renkler torcun farklı bölgelerindeki farklı sıcaklıkları göstermektedir. Daha sıcak olan giriş kısımlarında kırmızı ve daha soğuk (mavi) olan çıkış kısımlarında ise mavi olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Bir yüksek basınçlı soğuk püskürtme tabancasının (torcunun) şematik gösterilişi [55].

2.1.3.2. Düşük basınçlı soğuk püskürtme (LPCS) yöntemi

LPCS yönteminde, işlem gazının ön ısıtma sıcaklıkları oda sıcaklığı (Room temperature=RT) ile 650 ° C arasında ve basınç ise 5 ila 9 bar arasındadır. Toz de Laval nozulunun genişleyen kısmından radyal olarak verilir (Şekil 2.6). Genellikle, toz karışımlarını püskürtmek için sıkıştırılmış hava işlem gazı olarak kullanılır [56]. HPCS yöntemindekiyle benzer şekilde LPCS yönteminde de toz karışımı olarak seramik tozu (Al_2O_3 , SiC) eklenmiş metalik tozlar (örneğin Cu, Al, Ni, Zn) püskürtülerek kaplama işlemi yapılır.



Şekil 2.6. LPCS yönteminde kullanılan püskürtme tabancasının şematik gösterimi [57, 58].

Seramik tozunun üstlendiği ana görev, püskürtülen yüzeyi aktifleştirmek (kaplamaya uygun hale getirmek) ve torç içerisindeki nozulu temiz tutmak, tıkanmasını engellemektir. Ayrıca, seramik partiküller altlık malzemesini/püskürtülmüş tabakaya mekanik olarak dövme yaparak (çekiçleyerek) etki eder, genellikle bu etki parçacık darbeleriyle bilyalı dövme olarak adlandırılır [57, 59]. Toz karışımlarındaki seramik parçacık ilavesi, darbeler sırasında sıkıştırıcı bir etkiye sahiptir ve metal kaplamaların kaplama özelliklerini iyileştirir ve birikim verimliliğini artırır [60-62]. LPCS işleminde bu sert fazlar takviye elemanı olarak da görev yapar ve metalik matrisi mukavemetlendirir [63].

2.1.3.3. HPCS ve LPCS yöntemlerinin birbirinden farkları

HPCS ve LPCS proseslerinde kullanılan püskürtme tabancaları arasındaki temel fark, LPCS prosesinde, tozun Şekil 6'da gösterildiği gibi nozülün ıraksak (genişleyen) kısmından gaz akışına dikey olarak (radyal enjeksiyon) beslenmesidir. Ancak, Papyrin ve ark. [64] aynı anda iki toz besleyici kullanarak iki farklı tozu vererek (örneğin Cu + Al ve Cu + SiC) kompozit kaplamalar da oluşturmuşlardır.

LPCS ve HPCS prosesleri arasındaki bir diğer fark da gazın ısıtılması LPCS yönteminde sadece püskürtme tabancasından yapılması, buna karşın HPCS yönteminde püskürtme tabancasından yapılan ısıtmaya ek olarak ayrı bir ısıtma ünitesinden de gazın önceden ısıtılmış olmasıdır.

LPCS prosesinde toz besleme oranları daha düşük olmasına rağmen, gaz akışındaki partikül konsantrasyonu HPCS prosesine göre daha yüksek olabilir [46]. İki soğuk püskürtme işleminde kullanılan tipik püskürtme parametreleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Ana farklılıklar, kullanılan yöntem gazı ve basınç seviyesidir. Buna ek olarak, HPCS sistemi daha yüksek gaz akışı ve toz besleme oranları ile daha yüksek verimlidir.

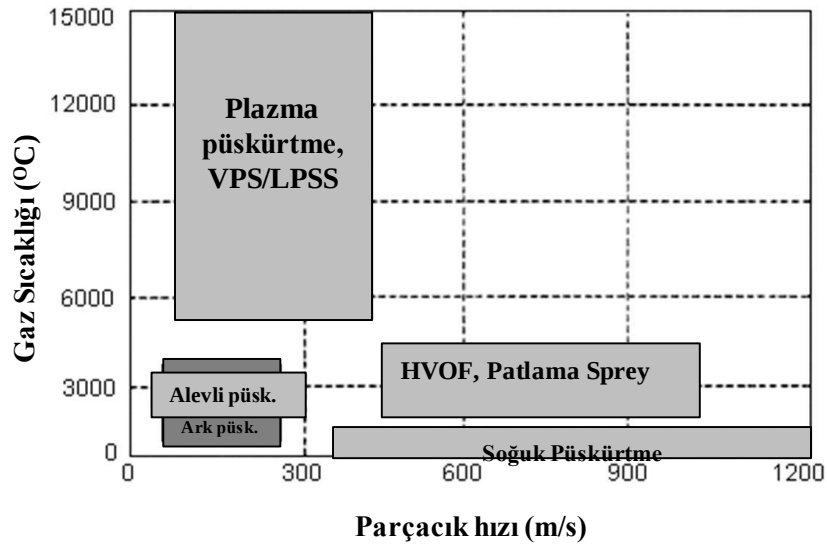
HPCS yönteminde malzeme seçim aralığı ve kaplama kalitesinin yüksek olmasına karşın ilk yatırım maliyeti LPCS yöntemine göre çok daha yüksektir ve LPCS yönteminde ekipmanlar portatiftir taşınabilir ancak HPCS ekipmanları sabittir taşınamaz.

Tablo 2.1. Soğuk püskürtme yöntemlerinde kullanılan tipik püskürtme parametreleri

Püskürtme Yöntemi	Yüksek Basıncılı Soğuk Püskürtme	Düşük Basıncılı Soğuk Püskürtme
Yöntem Gazı	N ₂ , He, N ₂ - He Karışımı	Basıncılı Hava
Basınç (bar)	7-40	6-10
Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	20-550-800	20-650
Gaz Debisi (m ³ /min)	0.85-2.5 (N2) max. 4.2 0.3-0.4 (He)	0.3-0.4
Toz Besleme Hızı (kg/h)	4.5-13.5	0.3-3
Püskürtme Mesafesi (mm)	10-50	5-15
Partikül Boyutu (µm)	5-50	5-30

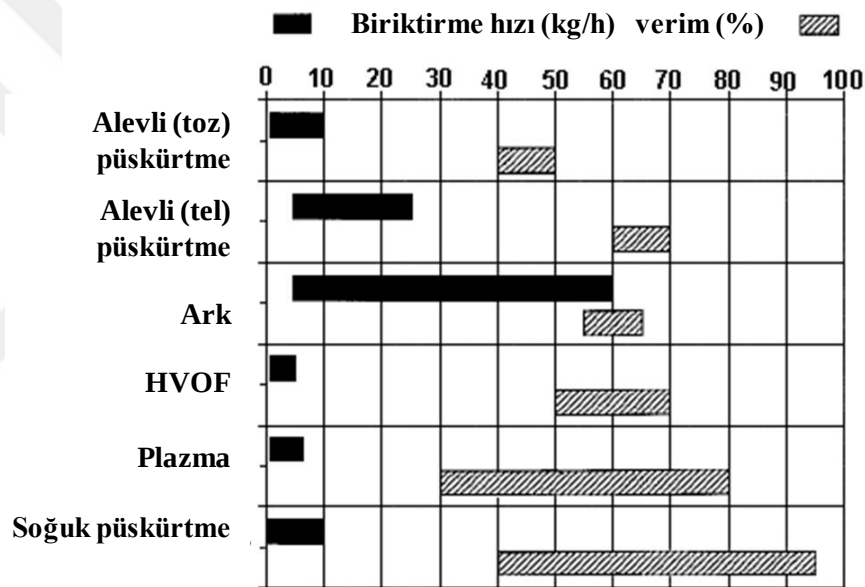
2.1.4. Soğuk püskürtme yönteminin termal püskürtme yöntemlerinden farkları

Soğuk püskürtme yöntemi diğer termal sprej proseslerine göre ergime olmaksızın katı halde parçacıkların çok yüksek hızda ve düşük sıcaklıkta püskürtülerek daha yoğun kaplama üretimine olanak sağlamaktadır Şekil 2.7’de gaz sıcaklığı ve partikül hızı arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Çeşitli kaplama yöntemlerinde kullanılan gaz sıcaklığı ve partikül hızı

Soğuk püskürtme, çok düşük gözenekliliğe sahip yoğun kaplamaların ve düşük oksit içeriğine sahip saf kaplamaların üretilmesinde etkili bir yöntemdir [65]. Bu durum, elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci gibi bazı önemli malzeme özellikleri bakımından önemli bir avantajdır [22]. Soğuk püskürtme işleminde (katı hal prosesi) püskürtülen malzemede, faz dönüşümü ve ergime meydana gelmez, buna ek olarak, oldukça yoğun metalik kaplamaların üretimine imkân tanır (Şekil 2.8) [15, 22, 65]. Ayrıca yapılan pek çok çalışmada kaplamadaki oksijen içeriğinin, kullanılan tozdaki seviyeyle karşılaştırıldığında yaklaşık aynı seviyede olduğunu göstermektedir [15, 20, 36].



Şekil 2.8. Çeşitli kaplama yöntemlerinde elde edilen birikme miktarı ve verim

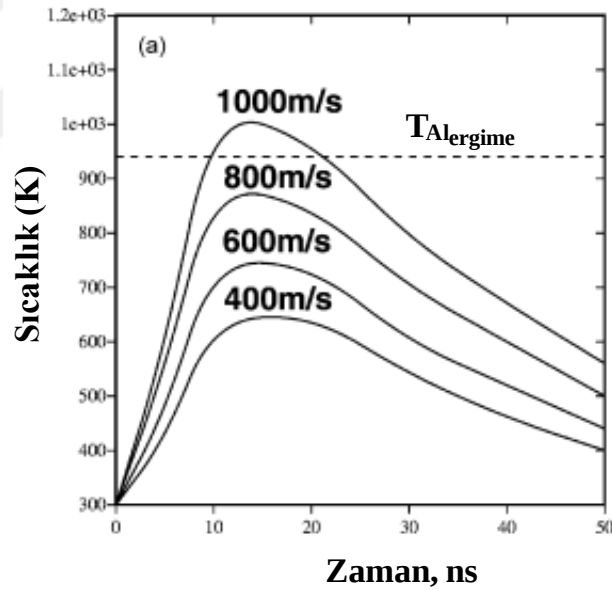
2.1.5. Soğuk Püskürtme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Genellikle, soğuk spreyci prosesi, yüksek birikim verimi, yüksek birikim oranı, yüksek yoğunluk, altlık malzemeye minimum ısı girdisi, bası şeklinde artı gerilme oluşumu, oksidasyon olmaması ve altlık malzemede faz değişikliğine neden olmaması gibi avantajlara sahiptir. Diğer taraftan, soğuk püskürtmeye uygun malzemelerin sınırlı olması (sünek metaller ve alaşımlar soğuk püskürtme yönteminde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir), termal püskürtme yöntemlerinde olduğu gibi soğuk püskürtme yönteminde de kaplamaların

sünekliğinin püskürtülmemiş malzemeye (başlangıçtaki haline) göre düşüklüğü soğuk püskürtme yönteminin dezavantajları olarak kabul edilebilir [20].

2.1.6. Soğuk Püskürtme Yönteminde Tabaka Oluşumu

Soğuk püskürtme işleminde en çok kabul edilen birleşme mekanizmaları atomik difüzyon, yüzey yapışması ve plastik deformasyondur. Ancak Grujicic ve diğ. [66] partikül-altlık malzeme ara yüzeyindeki atomik difüzyonun etkin bir birleşme (bağlanma) mekanizması olmadığını, bu nedenle atomik difüzyon mekanizmasının ihmal edilebileceğini öne sürmektedirler. Bu araştırmacılar, yaptıkları çalışmalar sonucunda parçacık-altlık malzeme ara yüzeyinin en yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı 20 ns (Şekil 2.9) zaman periyodu sırasında atomik difüzyon mesafesinin 0.004 ila 0.1 nm arasında bulunduğunu, bu miktarın da atomlar arası mesafeden daha küçük olması nedeniyle difüzyonun gerçekleşmesi için yeterince zamanın bulunmadığını belirtmektedirler [66].

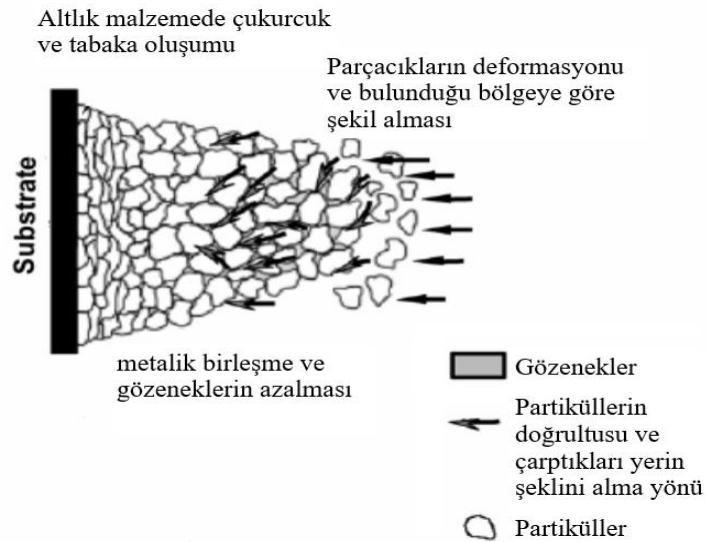


Şekil 2.9. Dört farklı partikül hızı için bakır altlık üzerine alüminyum kaplanması sırasında partikül-altlık malzeme ara yüzeyinde zamana bağlı olarak sıcaklığın değişimi [66].

Genel olarak, soğuk püskürtme işleminde başarılı kaplama oluşumu için toz parçacıklarının belirli kritik hıza (V_{kr}) ulaşması gerekir. V_{kr} 'nin üstünde parçacıklar

plastik deformasyona uğrayarak alt tabakaya yapışır ve kaplamanın oluşumuna neden olur.

Parçacık hızı malzemeye bağlı olarak belirli bir kritik hızın altında ise, erozyon ve/veya parçacıklar çarparak saçılırlar ve kaplama oluşturamazlar [16-18, 39,67, 68]. Bu saçılma sonucunda sadece püskürtme yüzeyinin aktivasyonu (temizleme) oluşur [17, 46, 69]. Sadece parçacık hızı kritik hızın üzerindeyse, parçacıklar plastik deformasyonla [69] yüzeyle birleşir ve kaplama tabakası oluştururlar [18]. Kritik hız genel olarak kaplama tozu malzemesine ve kalitesine, toz parçacık ve altlık malzemenin sıcaklığına ve parçacık boyutuna bağlı olarak değişir. [18]. Soğuk püskürtme yönteminde kaplama oluşumu Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10. Soğuk püskürtme yönteminde kaplama oluşumunun şematik gösterilişi [17].

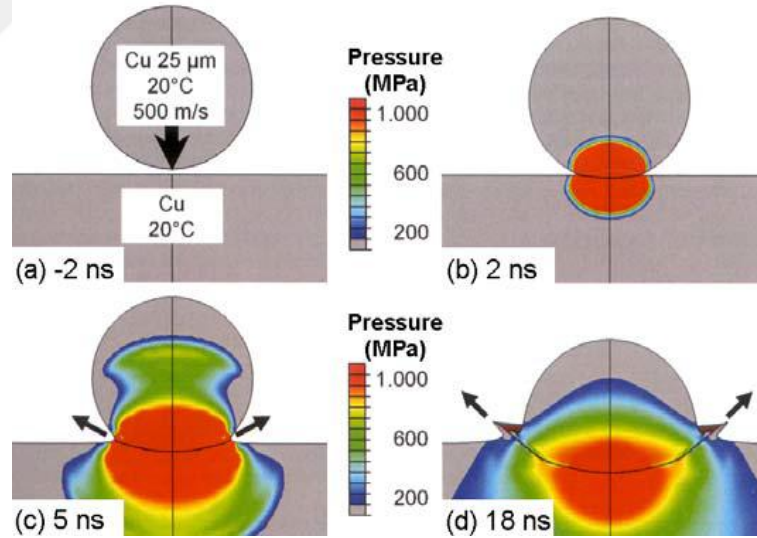
Soğuk püskürtme kaplamanın oluşumu iki aşamada gerçekleşir:

- 1- ilk tabaka oluşumu (parçacık-altlık malzeme etkileşimleri) ve
2. kaplamanın birikmesi (parçacık-parçacık etkileşimleri).

İlk gelen partiküllerden bir kısmı altlık malzemeye çarparak saçılırlar ve altlık malzemede çukurcukların oluşmasına neden olurken ve bir kısmı da yüzeyle

birleşerek tabakanın oluşmasına neden olurlar [17, 70]. İlk aşamada, birleşme oluşumu yüksek oranda altlık ve kaplama malzemesine ve altlık malzemesinin yüzey durumuna bağlıdır. Sonradan gelen parçacıklar önceki parçacıklara çarparak deforme olurlar ve çarptıkları yerin şeklini alarak birleşirler ve böylece tabaka oluşumu başlar. İkinci aşamada, partiküller birbirleriyle etkileşime girerler ve kaplama yapısını oluştururlar [69]. Bu kademedeki püskürtme işlemi süresince çarpan partiküller hem birleşmeyi arttırırlar ve hem de gözeneklerin azalmasına neden olurlar ve böylece kaplamanın yoğunluğu artar. Ayrıca çarpma sonucunda bir miktar deformasyon sertleşmesine de neden olurlar [17].

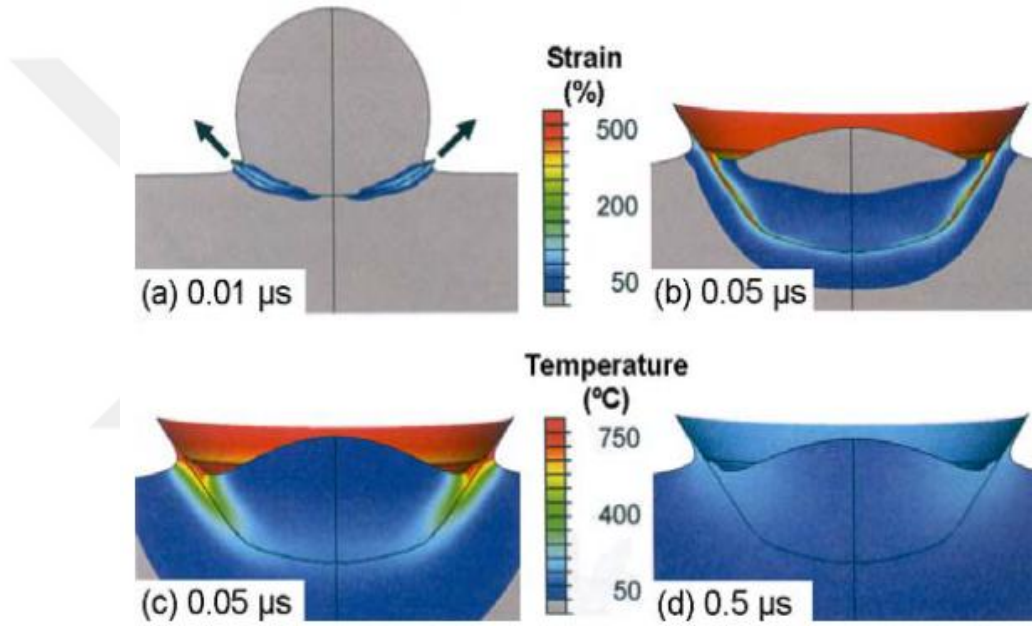
Toz parçacık çarpmaları sırasında, partikül-altlık malzeme arayüzünde çok yüksek miktarda temas basıncı oluşur. Çarpma sırasında oluşan basınç seviyesi Şekil 2.11'de görülmektedir. Schmidt'in Cu altlık üzerine Cu parçacıklarının (25 μm) püskürtüldüğü çalışmasına göre en yüksek basıncın parçacık ve altlık malzemenin etkileşim noktasında oluştuğu bildirilmiştir [71].



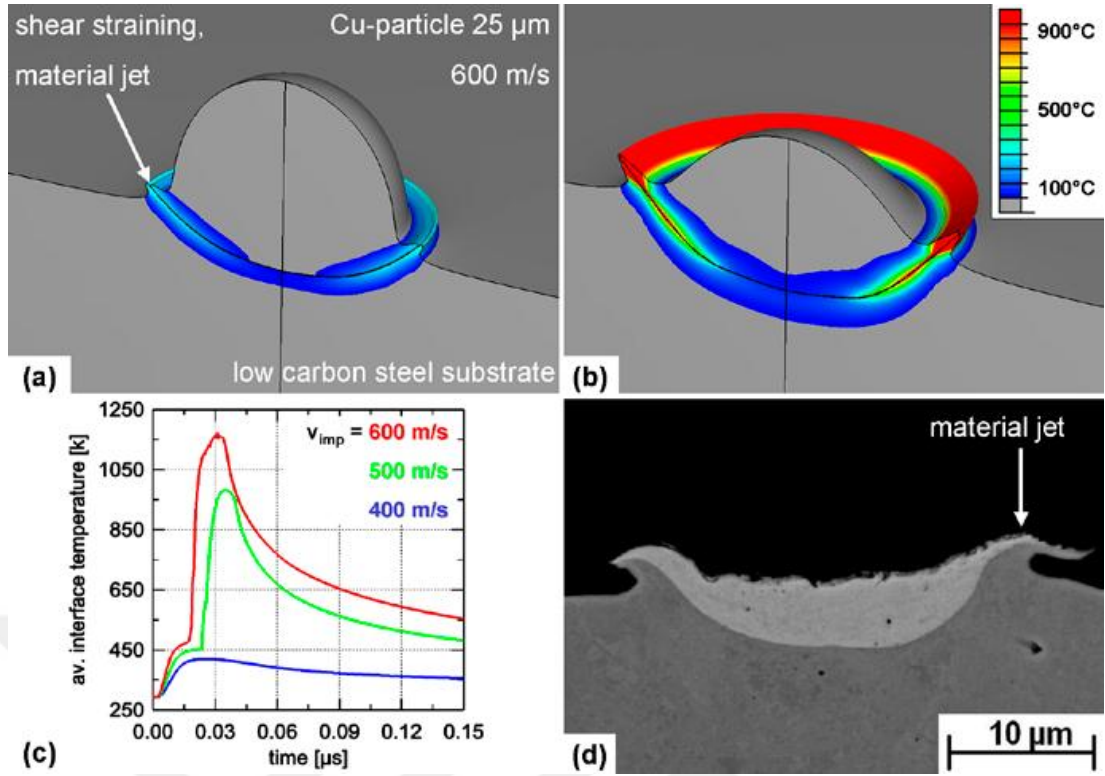
Şekil 2.11. Cu altlık üzerine soğuk püskürtülmüş Cu parçacıklarının (25 μm) çarpması a) darbeden önce, b) 2 ns sonra, c) 5 ns sonra ve d) 18 ns sonra. Renkler darbe esnasında meydana gelen basınç dağılımını göstermektedir [71].

Partikül çarpması sırasında yüksek miktarda şekil değişimi partikül-altlık malzeme arasında ve partikül-partikül ara yüzeyinde meydana gelir. 0.01 μs ve 0.05 μs sonra oluşan şekil değişimi Şekil 2.11.a ve 2.11.b de görülmektedir. Jet oluşumu

ile çok yüksek şekil değişimi meydana gelmektedir [68]. Ayrıca yüksek basınç seviyelerine ve şekil değiştirme miktarlarına ek olarak çarpma işlemi nedeniyle özellikle jet bölgelerinde yoğunlaşan partiküllerin çarpma yüzeyinde sıcaklık da yükselmektedir [71]. Ancak çarpma süresi içerisinde sıcaklık çok hızlı bir şekilde hemen düşmektedir. Bu durum Şekil 11.c ve 11.d de ve Şekil 2.12 de görülmektedir. Parçacıkların yapışması ve birleşmesi sırasında kinetik enerji, ısıya ve şekil değiştirme enerjisine dönüşmektedir [17, 65]. Sıcaklık ve şekil değiştirme heterojen bir şekilde dağıldığından yerel deformasyonlar meydana gelir. Parçacık deformasyonu da yerel temas yüzeylerinde çok daha yüksek miktarda oluşur [67].



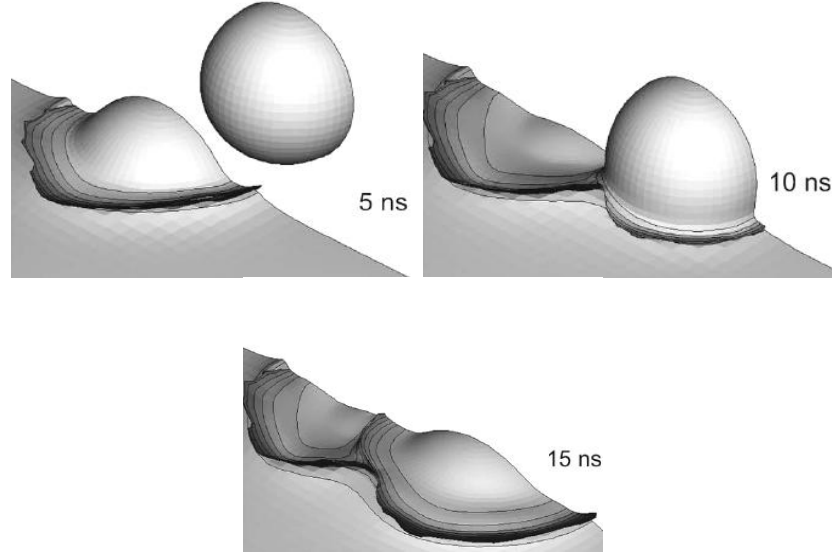
Şekil 2.12. Cu altlık üzerine soğuk püskürtülmüş Cu parçacıklarının çarpması şekil değiştirme dağılımı [48]: a) 0.01 μ s sonra, malzeme jeti oluşumunun başlaması ve b) 0.05 μ s sonra oluşumu. Sıcaklık dağılımı [71]: c) 0.05 μ s sonra ve d) 0.5 μ s sonra.



Şekil 2.13. Çarpışma ara yüzeylerinde jet oluşumu: (a) çarpma sonrası 15 nano saniye, (b) çarpma sonrası 30ns, (c) farklı çarpma hızları için hesaplanan arayüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi, (d) tek bir parçacık kesit alanı [18].

Şekil 2.12c de kritik hıza bağlı olarak oluşan sıcaklık değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi görülmektedir. Tabaka oluşumu parçacıkların çarpışmasıyla meydana geldiğinden, yapının oluşumu komşu parçacıklara da bağlıdır [17]. Yöntemde parçacıkların çarpması sırasında meydana getirdiği deformasyon zamana bağlı olarak Şekil 2.13'de görülmektedir. Yüzeye çarpan iki parçacık aynı zamanda birbirini üzerine de etki etmektedir. Şekilden görüleceği üzere çarpan parçacıklar yüksek miktarda deforme olurken, parçacık darbe bölgesi çevresinde de halka şeklinde malzeme jetleri oluştururlar.

İlk parçacıkların deformasyonunu daha sonra gelen parçacıkların bunların üzerine yığılması takip eder ve böylece birikirler. Son durumda parçacıklar yüksek miktarda deforme olarak yassılaşırlar [43,72] .



Şekil 2.14. Soğuk püskürtme yönteminde parçacıkların birbiri üzerine etkisi ilk partikülün çarpmasından a) 5ns sonra b) 10ns sonra c) 15ns sonra [43, 72]

2.2. Bilyalı Dövme Yöntemi

2.2.1. Bilyalı Dövme Yönteminin Tanımı

Bilyalı dövme işlemi küre şekilli, küçük ve dövülecek malzemelerden daha sert (dökme demir, çelik, cam, seramik gibi) malzemelerden [73] imal edilmiş bilyaların parça üzerine kontrollü şartlarda (dövülecek malzeme üzerine batmasını sağlayacak büyüklükteki bir hızda) püskürtülerek yüzeyde bir plastik deformasyon yapılması işlemidir [74, 75]. Bilyalı dövme genellikle soğuk uygulanan bir mekanik yüzey işlemi olmakla birlikte, son yıllarda ılık uygulamalarla ilgili çalışmalar da yapılmaktadır.

Bilyalı dövme işlemi genellikle değişken yük altında çalışan parçaların yorulma ömrünü iyileştirmek için kullanılan bir yüzey işlemidir. Bu işlem sübap yaylarının üzerindeki yağların temizlenmesinde kullanılan kumlama işlemi yerine çakıl taşlarının kullanılması sonrasında yayların ömürlerinin iyileşmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Başlangıçta parça yüzeyinin temizlenmesi sonucunda parça ömrünün arttığına inanılırken General Motor firmasının yaptığı çalışmalar sonucunda ömür artışının yüzeyde oluşturulan bası gerilmelerinden kaynaklandığı anlaşılmıştır [76].

Makina parçaları imal edilirken kullanılan talaşlı imalat, plastik deformasyon veya ısıl işlemler sonucunda malzemede artık çeki gerilmelerine neden olmaktadır. Artık çeki gerilmeleri de parçanın tekrarlı yük altında ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Malzemede bulunan bu artık çeki gerilmeleri bilyalı dövme yöntemi sonucunda artık bası gerilmelerine dönüştürülmekte ve hem parçanın yük kapasitesi ve hem de tekrarlı yük altında ömürleri artmaktadır [77].

Bilyalı dövme işlemi genellikle kumlama ile karıştırılsa da her iki işlemin etkileri birbirinden farklıdır. Kumlama işlemi, temel olarak korozyon ve metallerin yüzeylerindeki kirlerin, pisliklerin veya pasların uzaklaştırılması, yüzey pürüzlendirme gibi işlemler için kullanılırken, bilyalı dövme işlemi yüzeyde deformasyon sertleşmesi yaratmak ve yorulma mukavemetini arttırmak için kullanılmaktadır.

Son yıllarda bilyalı dövme işlemi üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda yöntemde farklı bilyalar (boyutu, tipi, sertliği ve şekli), farklı darbe açıları, bilya debisi, bilya hızı, nozul çapı ve dövme süresi gibi pek çok parametre değiştirilerek malzemenin fiziksel özelliklerinin değiştirilebileceği ortaya konmuştur [78].

2.2.2. Bilyalı Dövme İşleminin Mekanizması

Bilyalı dövme işlemi, bir bası artık gerilim tabakası oluşturmak ve metallerin mekanik özelliklerini değiştirmek için kullanılan bir soğuk deformasyon işlemidir. Yöntemde bir yüzeyde plastik deformasyon oluşturmak için yeterli bir kuvvetle bilyalarla (yuvarlak metalik, cam veya seramik partiküllerle) yüzey darbeye maruz bırakılır.

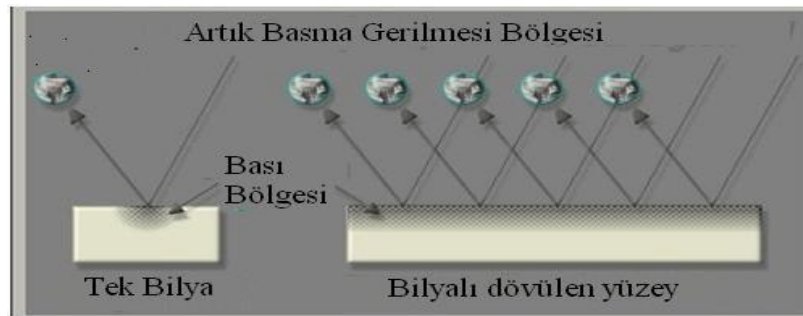
Püskürtülen bilyaların oluşturduğu bilya jeti dövülen malzemenin yüzeyinde deformasyona neden olarak bir malzeme akışına neden olur. Bu malzeme akışı sonucunda bu bölgeler genişlemeye çalışacaktır. Oysa parçanın iç kısımlarında hala plastik deformasyona uğramamış kısımlar vardır. Plastik deformasyona uğramayan bu iç kısımlar malzeme akış hareketine izin vermez. Yüzey ve yüzeyin altındaki bölgelerin deformasyonları arasındaki bu farkın bir sonucu olarak artık bası gerilmeleri meydana gelir (Şekil 2.15). Bunun sonucunda yüzeyde belli bir derinliğe kadar, kalıcı artık bası gerilmesi tabakası olur. Plastik ve elastik şekil değişikliğinin

bir arada görülmesi kalıcı basma gerilmesinin ortaya çıkmasında etkili olmaktadır [75, 77].



Şekil 2.15. Yüzeye çarpan bir bilyanın yarattığı etkiler

Hızla gelip çarpan her bir bilya yüzey üzerinde bir çukur meydana getirir. Yüzey ve çukurun altındaki küçük bir kısımda büyüme (esneme) meydana gelir. Parçanın geri kalan kısımları ise şekil değiştiren bu alanı orijinal şekline geri getirmeye çalışır, böylece bu alanda bası gerilmesinin oluşmasına neden olurlar Şekil 2.14.b. Üst üste binen çukurlar, üniform bir artık bası gerilmesi tabakası oluşmasına neden olurlar (Şekil 2.15) [79]. Yüzeyde oluşan bu artık bası gerilmesinin değeri, yüzeyin altında oluşan artık çekme gerilmesi değerinden iki-üç kat büyük olabilir. Meydana gelen bu bası gerilmeleri de çeki gerilmeleri altında çalışan parçaların yorulma ömrünün artmasına neden olur.

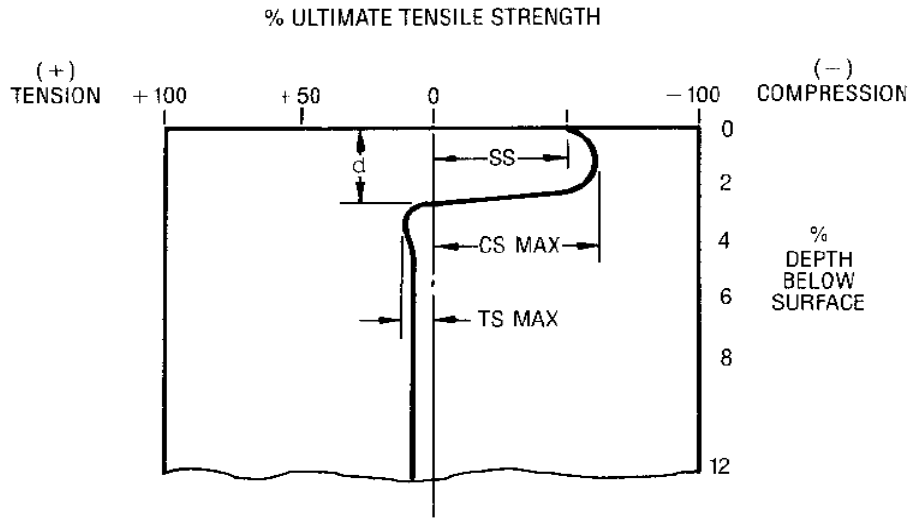


Şekil 2.16. Bilyalı dövme sonucu oluşan basma artık gerilmesi [79].

Bilyalı dövme işleminin yoğunluğuna bağlı olarak elde edilen bu tabakanın derinliği de değişmektedir [80]. Kostilnik de benzer şekilde dövme işlemi

parametrelerine bağı olarak yüzeyin 0,5 mm altına kadar bu tabakanın genişleyebileceğini belirtmiştir (Şekil 2.16) [81]. Aslında bilya (çapı, şekli ve malzemesi) sabit olmak koşuluyla diğer tüm parametreler parça yüzeyine gelen partikül (bilya) miktarını belirlemektedir ve bu nedenle pratikte bilyalı dövme işleminde işlem süresi değiştirilerek yüzey özellikleri değiştirilir [80, 82]. Bilyalı dövme işleminin sağladığı avantajların tamamı oluşturulan artık bası gerilmesi ile ilgili olduğu görülmektedir. Derinliğe bağı olarak oluşan tipik bir artık bası gerilmesi profili Şekil 2.17’de gösterilmektedir. Bu profilde dört önemli büyüklük vardır:

- 1) SS: Yüzeyde oluşan gerilim, yüzeyde ölçülen gerilim
- 2) $C_{s_{max}}$: Maksimum bası gerilmesi, yüzeyin hemen altında en yüksek değerde oluşan bası gerilmesinin maksimum değeri,
- 3) d: derinlik, bası gerilmesi derinliği, bası gerilmesinin nötr eksen üzerinden geçtiği ve çeki gerilmesine döndüğü noktadır
- 4) $T_{s_{max}}$: Maksimum çeki gerilmesi, oluşan çeki gerilmesinin maksimum değeri. $T_{s_{max}}$ ın herhangi bir iç hata oluşturacak kadar büyük olmasına izin verilmemelidir.



Şekil 2.17. Bilyalı dövme işlemi sonucunda oluşan tipik bir artık gerilme profili [79].

2.3. Mekanik Özelliklerin Tespiti

2.3.1. İndentasyon

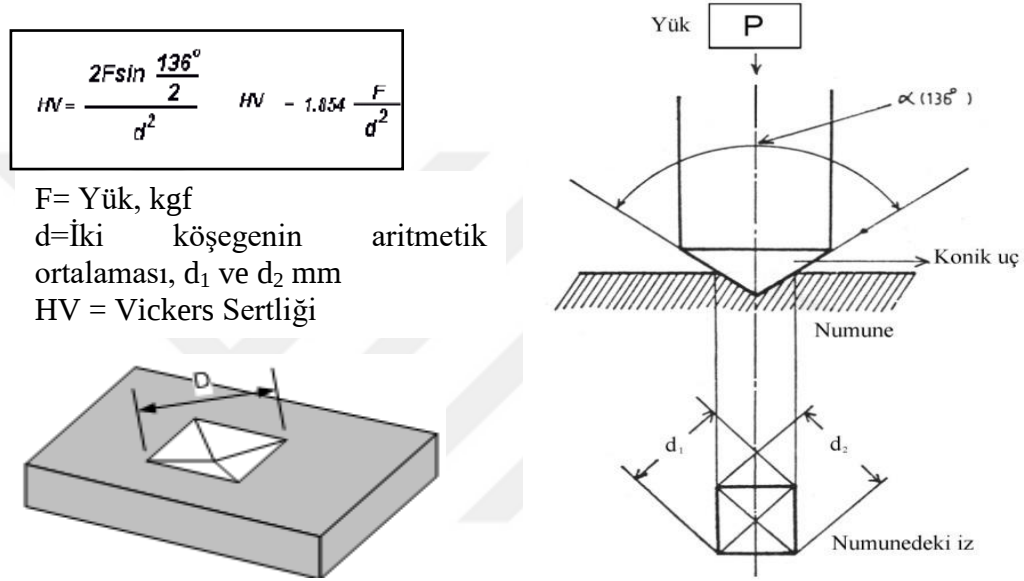
Günümüzde endüstriyel çalışma hayatında çok fazla sayıda ve farklı özelliklerde malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin uygun bir şekilde kullanılabilmesi için mekanik davranışlarını ve özelliklerini bilmek gerekmektedir. Bu nedenle malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli standart test yöntemleri mevcuttur. Bir malzemenin en önemli karakteristik özelliklerinden birisi de sertliğidir. Tanım olarak sertlik, rijit ve test edilecek malzemeye kıyasla daha sert standart batıcı ucun uyguladığı kuvvete ve penetrasyona karşı test malzemesinin gösterdiği dirençtir [83].

Uzun zamandan beri malzeme karakterizasyonunda standart bir yöntem olarak kullanılan indentasyon testlerinde, sertlik testleri diye de adlandırılmaktadır, indentasyon ucu olarak yaygın olarak elmas veya Tungsten karbür uçlar kullanılmaktadır [84]. Sertlik testleri, metal endüstrisinde ve araştırmalarda en yaygın kullanılan muayene yöntemlerinden biridir, çünkü geliştirilen veya yeni bir malzemenin temel özelliklerini tespit edebilmek için kolay, ucuz ve güvenilir bir yöntemdir. Sertlik testinde kullanılan indentasyon ucu (indenter) o kadar küçüktür ki, ana malzemeye çok az zarar verir. Bu nedenle tahribatsız muayene olarak da adlandırılabilir [85, 86]. Herhangi bir malzemenin sertlik değerini bulmak için kullanılan genel yöntem, belirli bir süre için uygulanan belirli bir kuvvet ile belirli bir şeklin girintisinin derinliğini veya alanını ölçmektir.

Sertlik ölçümünde öncelikle mekanik özellikleri bilinen uç ile özellikleri bilinmeyen malzeme yüzeyine bir kuvvet uygulanır. Uygulanan kuvvet ile malzemedan daha sert ucun malzeme yüzeyinden içeri girmesi sağlanır. Yükleme yapıldıktan sonra bir süre bekletilebilir veya bekletilmeden yük geri boşaltılır. İndentasyon işlemi sonucunda sertlik (H), bırakılan izin alanın hesaplanması ile veya maksimum yüklenmenin (P_{max}), etki ettiği alana (A), bölünmesiyle elde edilir [87, 88, 89].

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (2.1)$$

Sertlik ve iz büyüklüğü arasındaki ilişkiyi ifade etmek için üç ana standart test yöntemi vardır; bunlar Vickers, Rockwell ve Brinell sertlik ölçüm yöntemidir. Vickers indenter, yüzler arasında 136 derecelik bir açığa ve 1:1'lik diyagonallerin bir oranına (Şekil 2.18'de gösterildiği gibi) sahip kare tabanlı bir piramittir. Vickers sertlik ölçümü, en yaygın kullanılan sertlik ölçümlerinden biridir. Vickers sertliği, HV, indenter yükü ve izin yüzey alanı kullanılarak hesaplanır. Elde edilen değerin büyüklüğü genellikle kgf/mm^2 olarak verilir [90, 91].

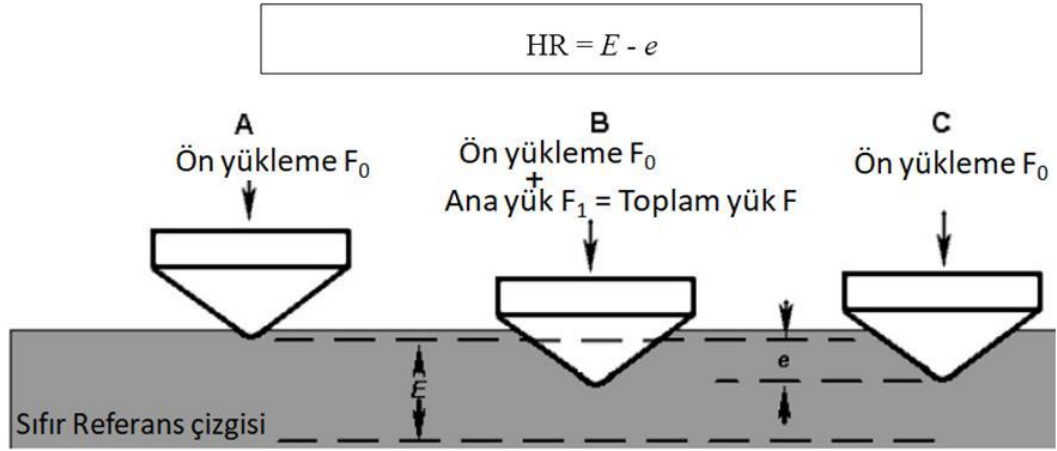


Şekil 2.18. Vickers sertlik deneyi ve oluşan izin şematik görünümü

Rockwell sertlik testi yönteminde, indenter olarak elmas koni veya sertleştirilmiş çelik bilye kullanılır. İndenter, genellikle 10 kgf küçük bir ön yükleme F_0 altında test malzemesine yük uygular [92, 93]. Dengeye ulaşıldığında, indenterin hareketlerini izleyen ve böylece indenterin penetrasyon derinliğindeki değişikliklere tepki veren bir gösterge cihazı sayesinde bir sıfır noktası konumuna ayarlanır. Küçük ön yük uygulanırken, penetrasyonda ortaya çıkan artışla birlikte ek bir ana yük uygulanır.

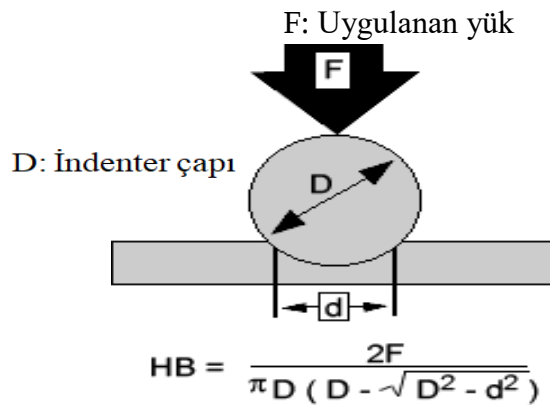
Dengeye tekrar ulaşıldığında, ek ana yük kaldırılır, ancak küçük ön yük kalır. Ek ana yükün kaldırılması kısmi bir geri kazanım sağlar, bu nedenle penetrasyon derinliği azalır. Ek ana yükün uygulanması ve çıkarılmasından kaynaklanan

penetrasyon derinliğinde kalıcı artış, Şekil 2.19'da gösterildiği gibi Rockwell sertlik değerini hesaplamak için kullanılır [90, 94].



Şekil 2.19. Rockwell sertlik deneyinin temel prensibi

Brinell sertlik testi yönteminde test malzemesi üzerine 10 mm çapında sertleştirilmiş çelik veya karbür bilyeyle 3000 kg'lık bir yük uygulanır. Daha yumuşak malzemeler için, çok büyük bir iz oluşumunu önlemek için yük 1500 kg veya 500 kg'a düşürülür. Test malzemesinde kalan girintinin çapı düşük enerjili bir mikroskopla ölçülür. Brinell sertlik değeri, Şekil 2.20'da görüldüğü gibi uygulanan yükün oluşan iz yüzey alanına bölünmesiyle bulunur.



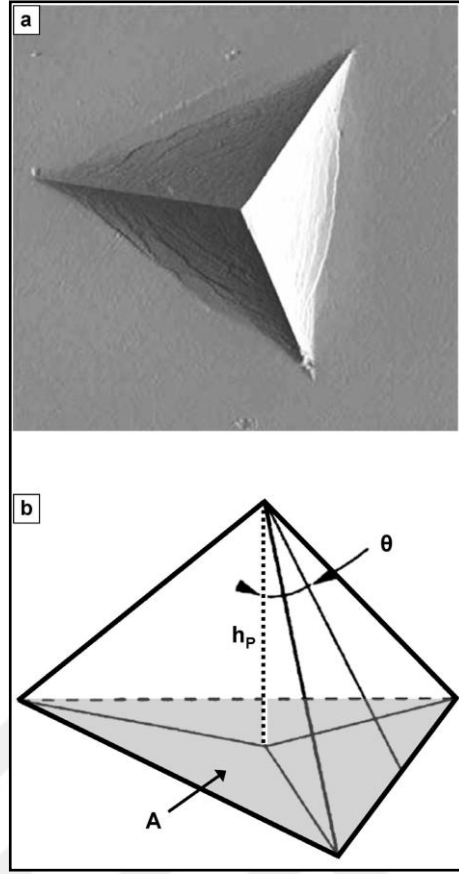
Şekil 2.20. Brinell sertlik deneyi

2.3.2. Nanoindentasyon

Makro ve mikro sertlik deneyleri ile belirli boyutlardaki malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilebilirken ince filmler, mikroelektronikler, MEMS, biyomateryaller gibi çok küçük hacimli malzemeler üzerinde bu yöntemlerle ölçüm alındığında yeterince hassas bilgiler elde edilememekte ve hatta bazen yanlış sonuçlar ortaya çıkmaktadır. 1970'lerin ortalarında geliştirilen Nano Sertlik Testleri, çok küçük boyutlardaki malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır [95-99].

Nanoindentasyon yönteminde sertlik hesabı daha ufak bir ölçekte yapılmaktadır. Uygulanan yükler ve ulaşılan derinlikler daha ufaktır ancak deney prensibi aynıdır [100]. Nanoindentasyon yöntemi, mikro ve makro boyutlarda yapılan indentasyon testlerini nano boyuta indirgeyerek, daha düzgün ve hassas bir uç kullanarak, eş zamanlı olarak yükleme-deplasman (yer değiştirme) verilerini sağlamaktadır. [95].

İndentasyon tekniği, sadece birkaç mikronluk iz oluşumuna yol açar ve optik mikroskoplar kullanılarak bu iz boyutunun ölçülmesi çok zordur. Bu nedenle, indenterin altındaki batma derinliği, yükün indenterine uygulanması ile ölçülür, böylece temas alanının boyutunun belirlenmesi sağlanır. İndentasyon testi genellikle küresel veya piramit şeklindeki indenter kullanılarak yapılır. En yaygın kullanılan indenter uç Berkovich indenterdir. Figur 2.21 (a) ve (b) 'de, Berkovich indenter ucu ve indikatörün şematik parametreleri görülmektedir. Burada A oluşan temas alanı, h_p temas alanının kenarından itibaren ölçülen batma derinliği ve θ ise indenter ucun yüzeylerindeki yarı-açıdır [101]. Şekil 2.21 (a) 'da gösterilen Berkovich indenter, genellikle küçük ölçekli indentasyon çalışmalarında kullanılır ve piramit kenarlarının noktasal temas etme avantajına sahiptir.

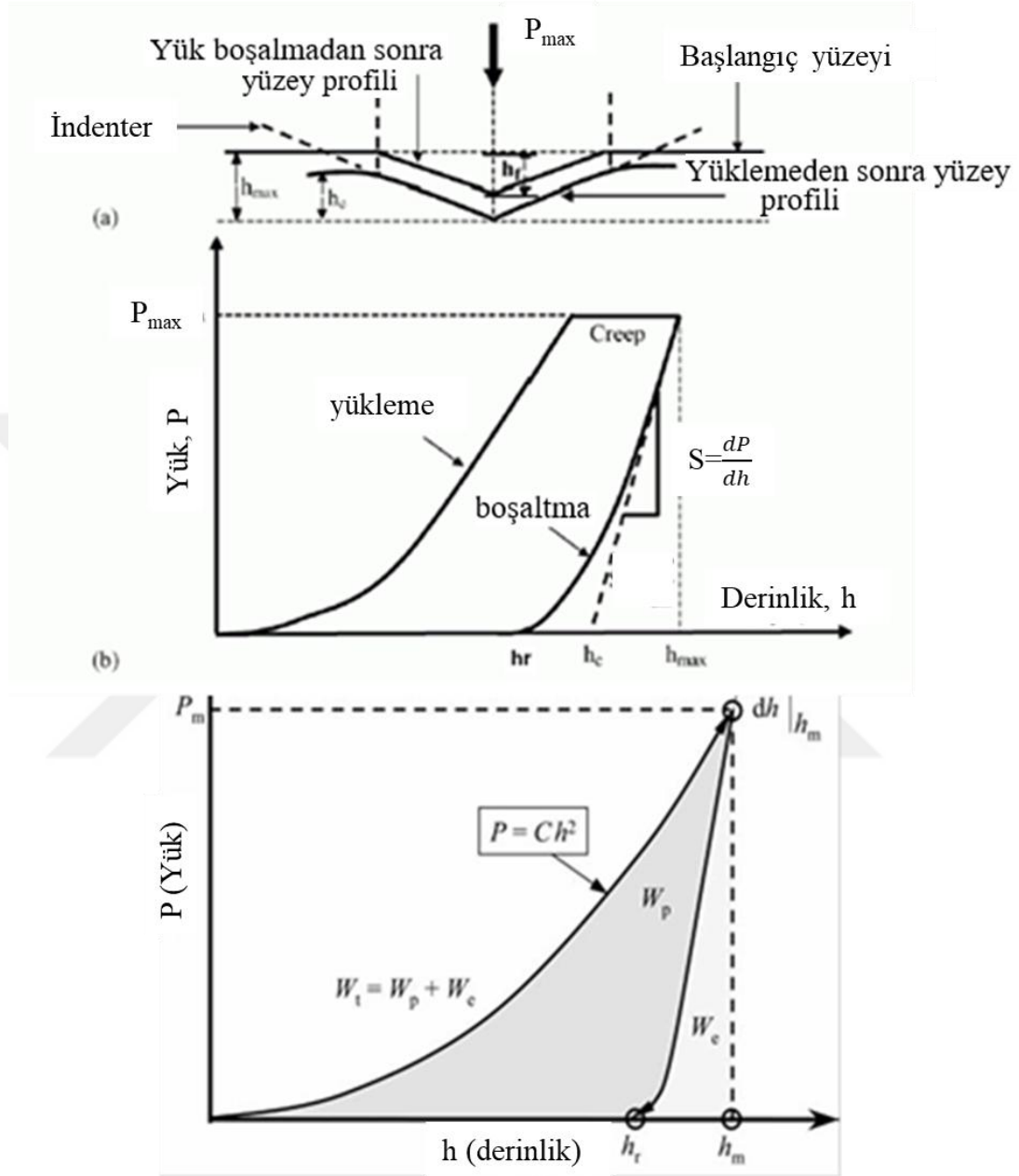


Şekil 2.21. (a) Berkovich indenter uç ile yapılmış bir indentasyonun SEM görüntüsü (b) Berkovich indenter ucunun indentasyon parametreleri [90].

Yöntem, bir yükleme ve boşaltma döngüsü sırasında elde edilen indentasyon yükü- yer değiştirme (deplasman) verilerinden sertlik ve elastite modülü gibi mekanik parametreleri ölçmek için geliştirilmiştir. Berkovich indentasyon yöntemi ile elde edilen tipik bir yük-derinlik diyagramı Şekil 2.21'de gösterilmektedir, burada P yükü tanımlamaktadır ve h başlangıçtaki deforme olmamış yüzeye göre şekil değiştirmedir veya batma derinliği olarak tariflenir[102].

Yük-yer değiştirme (deplasman) verilerinden, ölçülecek üç önemli büyüklük vardır: maksimum yük P_{max} , maksimum yer değiştirme (deplasman) h_{max} ve Boşaltma işleminin ilk aşamalarında (sabit sertlik) ve malzemelerin toplam elastik-plastik çalışma değerleri süresince boşaltma eğrisinin üst kısmının eğimi olarak tanımlanan elastik boşaltma sertliği $S = dP / dh$. Diğer bir önemli parametre ise

indenter tamamen boşaltıldıktan sonra kalıcı penetrasyon derinliği olan son derinliktir (Şekil 2.22) [90].



Şekil 2.22. Önemli parametreleri gösteren bir indentasyon yük-yer değiştirme eğrisinin şematik çizimi [90].

Yüklem sırasında oluşan genellikle Kick Yasası tarafından tanımlanan ilişkiyi izler: $P = Ch^2$, burada C yüklem eğriliğidir. Ortalama temas basıncı, $p_{ave} = P_{max} / A_{max}$, indentasyonu yapılan malzemenin sertliğine bağlıdır. W_t , yüklem

sırasında P yükü tarafından yapılan toplam iş, W_e boşaltma sırasında serbest bırakılmış (elastik) iş ve depolanmış (plastik) iş ise $W_p = W_t - W_e$ 'dir. Boşaltma sonrası tamamen kalan indentasyon derinliği h_r 'dir [103, 104].

Sertlik (H) ve elastisite modülünü (E) ölçmek için kullanılan en doğru yöntemler, Şekil 2.21'te şematik olarak gösterilen boşalma yöntemlerine dayanmaktadır. Yükleme sırasında indenterin altında derinliğin artışına bağlı olarak hem elastik ve hem de plastik deformasyon meydana gelir. Boşalma eğrisinde elastik şekil değiştirme baskındır. Bu nedenle sertlik değeri maksimum yük noktasında indenterin altındaki basınca bağlı olarak hesaplanır. Boşalma eğrisinden ayrıca indentasyonu yapılan malzemenin elastiklik modül de bulunabilir çünkü belirtildiği üzere burada baskın olan elastik şekil değişimidir. Yükleme sırasında herhangi bir zaman için toplam yer değiştirme; [105].

$$h = h_c + h_s \text{ dir.} \quad (2.2)$$

burada h_c , temasın yapıldığı dikey mesafe (temas derinliği) ve h_s temasın olduğu çevrede yüzeyin yer değiştirmesidir [106].

Temel varsayım, indenterin çevresinin, düz bir elastik yarı-alanın basit geometrili sert uçla girmesi için indentasyon için modellerle tarif edilen bir şekilde çökmesidir. Daha sonra, temas çevresi içinde biriken malzemenin önemsiz olduğunu varsayarsak, elastik modeller, içeri girme miktarının aşağıdaki gibi verildiğini gösterir:

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (2.3)$$

Burada ε indenter geometrisine bağlı sabit. Denklem 2.3 ve Şekil 2.21 kullanılarak, temas çevresinin dikey yer değiştirmesi h_c , şu şekilde verilebilir:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S} \quad (2.4)$$

Temas alanı A , h_f' nin bir fonksiyonu olarak tanımlandığında, numunenin sertliği şu şekilde hesaplanabilir:

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (2.5)$$

Boşalma sırasında önemli bir elastik toparlanma varsa, tahmini sertlik değerinin geleneksel sertlik değerinden sapabileceği, ancak sadece malzemenin çok küçük bir E / H değerine sahip olduğunda dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır. Ölçülen boşalma sertliği daha sonra şu şekilde bulunabilir:

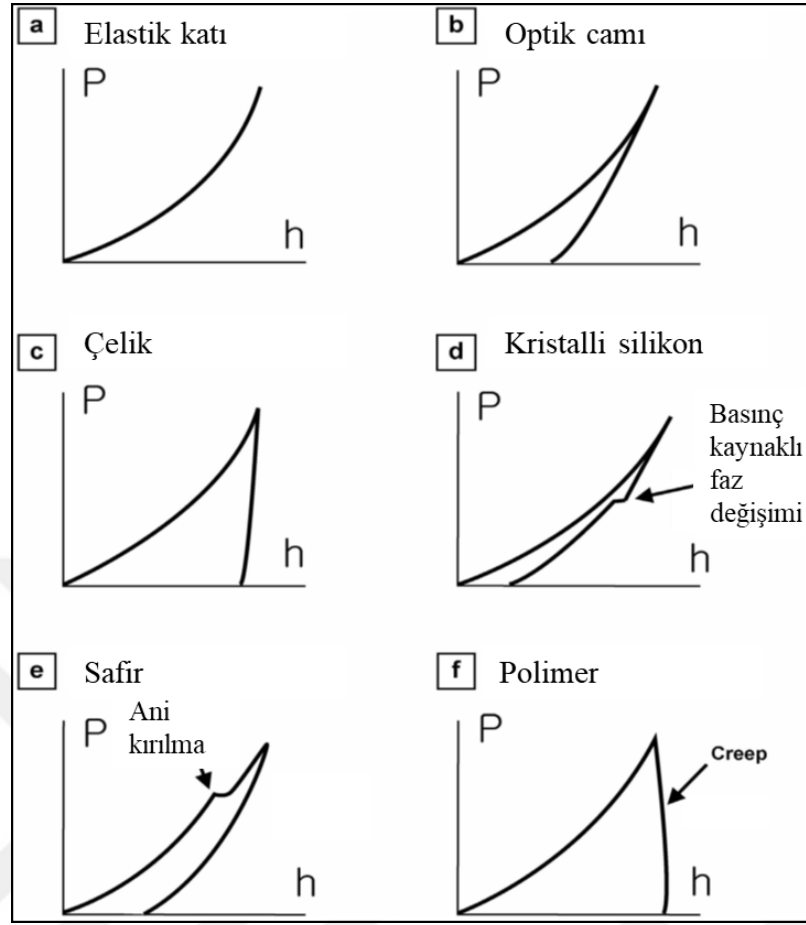
$$S = \frac{dP}{dh} = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_{eff} \sqrt{A} \quad (2.6)$$

Burada β , boyutsuz parametre ve E_{eff} , aşağıdakiler tarafından tanımlanan efektif elastite modülüdür:

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1-v^2}{E} + \frac{1-v_i^2}{E_i} \quad (2.7)$$

Burada E ; Young modülü ve v ; Poisson oranıdır. E_i indenterin Young modülü ve v_i ise indenterin Poisson oranıdır.

Her yükleme ardı ardında kısmi boşaltma, yükleme sırasında salınım hareketinin üst üste yerleştirilmesi ve yükün maksimum yükte sabit tutulması ve derinlikte değişiklikler kaydedilmesi gibi temel yükleme-boşaltma döngüsünde olası varyasyonlar vardır. Bu farklı test türleri, malzemenin viskoelastik özelliklerini ölçmek için fırsatlar sunar. Pratik olarak, nanoindentasyon testi, yumuşak polimerlerden elmas benzeri karbon ince filmlere kadar çeşitli maddeler için kullanılabilir. Bu nedenle, yük değiştirme eğrisinin şekli, sadece malzemenin mekanik parametrelerini ölçmek için değil, aynı zamanda faz dönüşümleri, filmlerin çatlaması ve tabakalara ayrılması gibi doğrusal olmayan olayların girmesi için de zengin bir bilgi kaynağı olarak gösterilir. Farklı materyaller için yaygın olarak gözlemlenen yük-yer değiştirme eğrilerinin şematik örneği Şekil 2.23'de gösterilmiştir [101].



Şekil 2.23. Farklı malzeme tepkileri ve özellikleri için yük-yer değiştirme eğrilerinin şematik örnekleri: (a) elastik katı, (b) kırılkan katı, (c) sünek katı, (d) kristalli katı, (e) yükleme sırasında çatlama ile kırılkan katı, ve (f) katlanma sergileyen polimer [102].

Malzemelerin minyatürleştirilmesinin yanı sıra, ileri malzemelerin geliştirilmesi ile malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti nanoindentasyon teknikleriyle yapılmaktadır. Ancak Oliver ve Pharr [102] tarafından açıklanan geleneksel yöntemeye dayanan sertlik ölçümleri, küçük indentasyon derinliklerinin ölçülmesinde çeşitli hatalara sahiptirler ve bunlardan bazıları, indentasyon büyüklüğünü etkilemektedir. Ayrıca test edilen malzemenin sürünmesi, yüzey pürüzlülüğü, indikatörün uç yarıçapı ve metodoloji gibi indentasyon testi verilerinde hataya neden olan bazı faktörlerin bulunduğunu bildiren bazı çalışmalar da vardır [101].

Ayrıca, test verilerindeki hatalar, indentasyon işleminde indenter kenarlarındaki malzemenin yığılmasına da bağlıdır. Nanoindentasyon testi kullanıldığında, küçük indentasyon derinliklerinde daha dikkatli olunmalıdır. İndentasyon derinliği sıfıra yaklaştıkça, işlem hatalı sertlik ve Young modülü değerleri verir, çünkü temas alanı sıfıra yaklaştıkça batma derinliği veya alan için doğru değerler sağlanamaz. Bu hata nanometre ölçeklerindeki indentasyon büyüklüğüne daha fazla etki eden bir faktördür.

2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile İndentasyon Analizi

İndentasyon simülasyonunda, nonlinearliğin iki kaynağı vardır: malzeme nonlinearliği ve geometrik nonlinearliktir. Çoğu metal, düşük gerinim değerlerinde oldukça doğrusal bir gerilim / gerinim ilişkisine sahiptir, fakat daha yüksek gerinimlerde malzeme geri dönemez ve nonlinear olmaya başladığı noktada akar (malzeme nonlinearliği). Aynı zamanda, indentasyon yöntemi, indenter altında ve yakınındaki katılarda büyük deformasyon meydana getirir. Yer değiştirmenin büyüklüğü yapının tepkisini etkilemektedir (geometri nonlinearliği).

ABAQUS programı nonlinear problemler için çözümler elde etmek için Newton-Raphson yöntemini kullanmaktadır. Çözüm, belirtilen yükleri kademeli olarak uygulayarak ve en sonunda nihai çözüme doğru adım adım çalışarak bulunur. Bu nedenle ABAQUS, simülasyonu bir dizi yük artışına ayırır ve her yük artışının sonunda yaklaşık denge konfigürasyonunu bulur. Genellikle, belirli bir yük artışı için kabul edilebilir bir çözüm belirlemek için ABAQUS birkaç tekrarını yapar (iterasyonunu alır). Artımlı tüm cevapların toplamı, doğrusal olmayan analiz için yaklaşık çözümdür.

Bir simülasyon için yükleme geçmişi bir veya daha fazla adımdan oluşur. Kullanıcılar, genellikle bir analiz yöntemi seçeneği, yükleme seçenekleri ve çıktı istekleri seçeneklerinden oluşan adımları tanımlar. Bir artış bir adımın bir parçasıdır. Nonlinear analizde, bir adımda uygulanan toplam yük, doğrusal olmayan çözüm yolunun takip edilebilmesi için daha küçük artışlara bölünür. Kullanıcılar, ilk artış miktarını verir ve ABAQUS, sonraki artışların miktarını otomatik olarak seçer. Her bir artışın sonunda, yapı yaklaşık olarak dengelenir ve sonuçlar yeniden başlatma, veri veya sonuç dosyalarına yazabilmek için kullanılabilir haldedir. Her bir işlemde,

ABAQUS denge çözümünü bulmak için birkaç iterasyon kullanır (tekrar yapar). Nonlinear bir analizde, bir adım, “zaman” ın sınırlı bir periyodu boyunca gerçekleşir, ancak atalet etkisi veya hıza bağlı davranış önemli olmadığı sürece bu “zaman”ın, fiziksel bir anlamı yoktur.



3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu tez çalışmasında; AA6082 alüminyum alaşımı üzerine Soğuk dinamik gaz püskürtme (SDGP) teknolojisi ile Al-Zn-Al₂O₃ esaslı tozlar kullanılarak kompozit yüzey kaplamaları elde edilmiştir. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında; optik mikroskop ve SEM-EDS yardımı ile kaplama kalınlığı, porozite, faz dağılımı ve boyutları, elementel çizgisel ve bölgesel haritalama çalışmaları ve kullanılan tozlara ait boyut dağılımı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. İndentasyon yöntemi ile Elastisite modülü, sertlik, % elastik toparlanma oranı gibi karakteristik mekanik özelliklere ulaşılmış olup bu değerler; indentasyon işleminin sonlu elemanlar simülasyon programı ile analizi sonucunda kaplamanın indentasyon sırasındaki hasar veya failure gerilmesi olarak tariflenen kritik gerilme ve deformasyon davranışı (pile-up ve sink in), akma gerilmesi, kaplama-altlık malzemesi arayüzey gerilme dağılımlarını elde etmek amacı ile kullanılmıştır.

DeneySEL çalışmaların ilk aşamasında; AA6082 Alüminyum alaşımlı levha üzerinde kompozit kaplama oluşturmak için soğuk gaz dinamik püskürtme teknolojisi proses parametreleri olan gaz basıncı ve toz besleme hızına ait optimum kaplama oluşturma değerleri elde edilmiştir. Proses optimizasyonu kapsamında % 28-32 Al₂O₃ - % 53-57 Al- % 13-17 Zn (DYMET K-80-13) kaplama tozu kullanılmış olup, gaz basıncı 0,45-0,70 MPa ve toz besleme hızı ise 5-9 g/dk arasında değiştirilerek kaplama oluşumu incelenmiştir. Optimum değerlerin 0,6 MPa basınç, nozul-yüzey arası mesafe 10 mm ve 8 g/dk toz besleme hızında gerçekleşeceği sonucuna ulaşılmıştır.

İkinci aşamada ise; AA6082 alaşımlı levha yüzeyi mekanik olarak kumlama işlemi ile temizlendikten sonra, yüzey sertliği ve pürüzlülüğünün arttırılarak kaplama yapışma davranışının geliştirilmesi amacı ile 30-240 sn aralıklarında bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sırasında levha yüzeyinde aşırı plastik deformasyon sonucunda herhangi bir çatlak oluşturmayacak işlem süre aralığı belirlenmiştir. SDGP teknolojisi ile kaplama parametreleri optimizasyonu ve AA6082 yüzey özellikleri geliştirilmesi faaliyetleri sonucunda yapışma / kaplama veriminin arttırılması amacı ile kullanılan toz karışımında Zn: Çinko miktarında artışa gidilmiştir. SDGP proses parametrelerinde optimizasyon çalışmaları

tamamlandıktan sonra kaplamalar % 23-27 Al₂O₃ - % 33-37 Al- % 38-42 Zn (DYMET K-20-11) toz karışımı kullanılarak üretilmiştir.

Tez çalışması kapsamındaki çalışmalar proje yönetimi esasında tasarlanmış olup bu faaliyetlerin her aşamasında Test ve Karakterizasyon faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. AA6082 Alüminyum alaşımı, toz ve kaplama karakterizasyonları metalografik işlemlerden geçirilen numunelere spektral analiz, optik mikroskop ve SEM-EDS cihazları yardımı ile, mekanik ve fiziksel karakterizasyon ise yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve nanosertlik ölçüm yöntemleri kullanılarak ölçülmüştür. Sonlu elemanlar destekli analizler ile deneysel olarak ölçülen yükleme-yük boşaltma eğrilerinden elde edilemeyen kaplamaya ait akma/hasar gerilmesi ve gerilme / strain dağılımları elde edilmiştir. Bu süreçte, kaplamaya ait deneysel indentasyon verileri ile sayısal simülasyon destekli sonuçların örtüşmesi amacı ile lineer elastik-ideal plastik malzeme davranışı seçilmiş olup, kaplamanın plastik deformasyona geçiş noktası yani akma gerilmesi, indentasyon sırasında oluşabilecek pile-up veya sink in mekanizması ortaya çıkarılmıştır. Bu analizler için Abaqus simülasyon programı kullanılmıştır.

3.1. Materyal

Tez çalışmasında, boyutları 100x100x5 mm olan AA6082 alüminyum alaşımı (Tablo 3.1) altlık malzemesi olarak kullanılmıştır. Altlık malzemesi olarak kullanılan bu levhanın kimyasal kompozisyonu spektrometre yardımı ile ölçülmüş olup AA6082 standardına uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.1. AA6082 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlık)

Element	Si	Cr	Mn	Mg	Cu	Ti	Fe	Zn	Al
% Değer	0,70	0,00	0,40	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	Kalan
	-	-	-	-	-	-	-	-	
	1,30	0,25	1,00	1,20	0,10	0,10	0,50	0,20	
Spektral ölçüm sonucu	1,122	0,186	0,762	0,781	0,042	0,048	0,212	0,117	Kalan

Bu tez çalışması, soğuk püskürtme işlem parametrelerinin ve altlık malzemesine uygulanan bilyalı dövme ile ön deformasyon işleminin kaplama kalitesi üzerine etkilerinin simülasyon destekli incelenmesi olmak üzere iki farklı amaçla yapılmıştır. Soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması safhasından geçerli olmak üzere altlık olarak kullanılacak olan AA6082 Al alaşımı levha SDGP ile kaplama yapılmadan önce DYMET K-10-04 numaralı Al_2O_3 içeren toz ile kumlama işlemi uygulanmış ve mekanik temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında kullanılan tozun kimyasal içeriği Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. DYMET K-10-04 numaralı kumlama tozun kimyasal kompozisyonu (% ağı.)

Kimyasal adı	(%)
Alüminyum oksit (99.4% saflık)	83-87
Alüminyum (99.6% saflık)	13-17

SDGP yöntemi ile yüksek yoğunluklu kaplamalar oluşturmak amacıyla mikron boyutundaki besleme tozlarını, malzemeye göre değişim gösteren bir kritik hıza çıkarılarak, altlık üzerinde bir kaplama oluşturulmaktadır. Bu teknik, ergimemiş parçacıkların püskürtme ile kazandıkları kinetik enerji kullanılarak, çarpmanın etkisi ile çok yüksek bölgesel basınçlar altında parçacıkların plastik deformasyon ile birbirlerine yapışarak kaplama oluşturulması temeline dayanmaktadır. Bu işlem sırasındaki temel parametreler ise; besleme hızı, basınç ve nozul mesafesidir. Tez çalışmasının amaçlarından olan kompozit kaplama oluşturmak için gerekli işlem parametrelerinin optimizasyonu için DYMET K-80-13 kodlu toz kullanılmış olup kompozisyonu ve miktar dağılımları Tablo 3.3’te verilmiştir. Kumlama tozu olarak kullanılan toz karışımından farklı olarak Zn: Çinko ilavesi sözkonusudur. Karışımındaki Zn varlığı kaplama oluşumuna olumlu etkide bulunmaktadır.

Tablo 3.3 K-80-13 kodlu tozunun kimyasal bileşimi

Kimyasal adı	(%)
Alüminyum oksit (99.4% saflık)	28-32
Alüminyum (99.6% saflık)	53-57
Çinko (96% saflık)	13-17

Soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması çalışmalarda farklı toz besleme hızları ve gaz basıncı parametreleri ile kullanılarak kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. SDGP yönteminde püskürtülen parçacığın altlığa bağlanması birçok değişik faktöre bağlıdır. Bu faktörler; temas yüzey alanı, kraterin derinlik-genişliği gibi geometrik parametrelerle beraber plastik şekil değiştirme kabiliyeti, akma mukavemeti, basınç ve sıcaklık gibi termo mekanik değişkenlerdir. Bu parametreler partikül çarpma hızı ile doğrudan ilişkilidir. Çalışmada kullanılan işlem parametreleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin araştırılmasında kullanılan işlem parametreleri

SGDP Yöntemi İşlem parametreleri		Toz Besleme Hız (g/dak)			
		5	6	7	8
Hava Basıncı (MPa)	0,45	D5	D6	D7	D8
	0,60	N5	N6	N7	N8
	0,70	Y5	Y6	Y7	Y8

Bilyalı dövme işlemi uygulaması sonrası yüzey sertliği ve pürüzlülüğü değiştirilmiş altlık üzerine SDGP yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamadaki amaç ise altlık malzemesinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kaplama kalitesine olan etkisinin ortaya çıkarılmasıdır. A6082 Alüminyum alaşımının yüzeyi farklı işlem sürelerinde bilyalı dövme (shot peening) işlemi ile dövülerek hem yüzeyi pürüzlendirme hem de yüzeyde deformasyon sertleşmesi

sonucunda sertlik artışı sağlanmıştır. Bilyalı Dövme işleminde S280 mesh (nominal çap 0.0280 inç) – 0.711 mm ve S330 mesh (nominal çap 0.0330 inç) – 0.838 mm olan iki farklı çelik bilyanın %50-%50 karışımı kullanılmıştır. İşlem süresinin etkisini incelemek amacı ile 30-240 sn arasında 6 farklı süre elirlenmiştir. Tablo 3.5'te çalışmalarda kullanılan numune kodlaması gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Bilyalı dövme işlem sürelerine bağlı olarak numunelerin adlandırılması

İşlem Süresi (s)	0	30	60	90	120	180	240
Numune Adı	0	30s	60s	90s	120s	180s	240s

Bilyalı dövme işleminden sonra soğuk püskürtme yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması faaliyetleri SDGP yöntemi optimizasyon çalışmaları kapsamında gaz basıncı, toz besleme hızı ve nozul mesafesine bağlı olarak kaplama numuneleri üretilmiştir. İlk aşamadaki bu örnek üretimler sonucunda; gazı basıncı: 0,6 MPa, nozul-yüzey arası mesafe:10 mm ve toz besleme hızı:8 g/dk olacak şekilde şartlar optimize edilmiştir. AA6082 Al alaşımı levha yüzeyine farklı sürelerde uygulanan bilyalı dövme sonucu yeni mekanik özelliklere sahip yüzeye K-20-11 tozu kullanılarak Al-Zn-Al₂O₃ kompozit kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir. Böylece optimie edilmiş soğuk dinamik gaz püskürtme işlem parametrelerinin kaplama oluşumu üzerine etkileri ortadan kaldırılmış ve sadece altlık malzeme yüzey özelliklerinin tabaka oluşumu üzerine etkisi incelenebilmiştir.

3.2. Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Sistemi-SDGP

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

3.1’de belirtilen DYMET 412K modeli düşük basınçlı soğuk püskürtme cihazı kullanılmıştır. Soğuk püskürtme işleminde gaz olarak hava kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Çalışmalarda kullanılan DYMET firmasına ait 412K model düşük basınçlı soğuk püskürtme cihazı

3.3 Test ve Analiz Teknikleri

SDGP yöntemi ile üretilen Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama numuneleri çeşitli test ve analizlere tabi tutularak karakterize edilmiştir. Kaplanmış numuneler optik mikroskop ve SEM ile mikroyapısal olarak incelenmiştir. Bu işlemten sonra seçilen numunelere metalografik ve mekanik karakterizasyon testleri uygulanmıştır.

3.3.1 Mikroyapı İncelemesi ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri

Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplamanın mikroyapısal özellikleri ve morfolojik yapısı optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) kullanılarak incelenmiştir. Test işlemleri başlamadan önce numunelere standart metalografik hazırlık aşamaları uygulanmıştır. Kaplama kesit alan incelemesi için Struers Labotom-3 masaüstü numune kesme cihazıyla kesilmiştir. Kesilen numuneler Struers CitoPress-1 otomatik bakalite alma cihazı yardımıyla bakalite alınmıştır. Bu işlemlerin ardından standart olarak gerçekleştirilen zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Numuneler sırasıyla 400, 800, 1200 ve 2000 gritlik SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalandıktan sonra 1µm’luk elmas süspansiyon ile parlatılmıştır. Nikon LV 100 marka optik mikroskop (Şekil 3.2-a) yardımıyla farklı büyütmelerde fotoğraflar alınmıştır. Jeol JSM-6060 ve Carl Zeiss 300VP SEM

cihazındaki (Şekil 3.2-b) yüksek çözünürlüklü secondry (SE) ve Backscattered electrons (BSEs) modunda numunelerin kesitinden fotoğraflar alınmış ve aynı fotoğraflardan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ve haritalama yapılarak kaplama yapısı incelenmiştir. Seçilen borlanmış numunelerin kesitinden, aşınma testi öncesi ve sonrası yüzeyinden EDS yöntemiyle noktasal ve alansal olmak üzere elementel analizleri yapılmıştır. Ayrıca belirlenen numunelerin kesitinden çizgisel analiz yapılarak yüzeyden içeriye doğru Al ve Zn değişimi saptanmaya çalışılmıştır. EDS analizleri Carl Zeiss 300VP SE cihazına entegre olan EDS dedektörü ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Nikon LV 100 optik mikroskobu (a), Carl Zeiss 300VP taramalı elektron mikroskobu (b) ve Jeol JSM 6060 taramalı elektron mikroskobu

3.3.2 XRD Analizleri

Kaplama işleminden sonra oluşan fazların analizinde şekil 3.3'te gösterilen Rigaku DMAX 2000 X-ray Difraktometre (XRD) kullanılmıştır. XRD analizleri, CuK_α radyasyonu kullanılarak $\theta / 2\theta$ tarama yöntemiyle ve 30° - 90° aralığında her bir numune için 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Rigaku DMAX 2000 X-Ray difraktometre

3.3.4 Mekanik Testler

3.3.4.1 Mikro Sertlik Testi

Mikrosertlik ölçümleri Future Tech FM 700 (Şekil 3.4) marka mikrosertlik cihazında Vickers ucu kullanılarak 100 g yükün 10 sn boyunca uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler ASTM C1327 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Farklı işlem sürelerinde uygulanan bilyalı dövme işlemi sonucunda meydana gelen sertlik değişimi ve sertlik derinliğinin (sertleşmiş tabaka kalınlığı) tespiti için yüzeyden malzeme içerisine doğru 100 er mikron aralıklarla Vickers sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde 100g yük ve 10 s bekleme süresi altında sertlik deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.4. Future Tech FM 700 marka mikrosertlik cihazı

3.3.4.2 Nanoindentasyon Testi

Nano indentasyon test cihazı değişik malzemelerden oluşturulan ince filmlerin mekanik özelliklerini (sertlik, elastisite modülü) belirlemekte kullanılır. Uygun bir indenter kullanılarak örnek yüzeyine dik olacak şekilde belirlenen bir maksimum değere kadar yük uygulanır ve bu maximum yük değerine ulaştıktan sonra tekrar dereceli olarak geri yükleme yapılır. Yükleme ve geri yükleme sonucunda elde edilen Yük (N) – Derinlik (nm) eğrileri analiz edilerek numunenin mekanik özellikleri belirlenir. Nanosertlik ölçümleri kaplama yüzeyinden malzemeye doğru kaplamada 5 adet ölçüm olmak üzere her numunede toplam 15 indentasyon yapılmıştır. İndentasyon ölçümleri maximum yüke çıkarken 20 data yükleme, 20 data da boşaltma esnasında alınarak deney gerçekleştirilmiştir. Nanoindentasyon testleri bir Berkovich indenter (Fischer-Cripps Lab. Pty. Limited, Şekil 3.5) ile donatılmış bir IBIS nanoindentasyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. İndentasyon testleri, kaplamaların farklı bölgelerine beş kez uygulanmıştır.



Şekil 3.5 Fischer-Cripps Lab. Pty. Limited nanoindentasyon test cihazı

3.3.4.3 Yüzey Pürüzlülüğü Testi

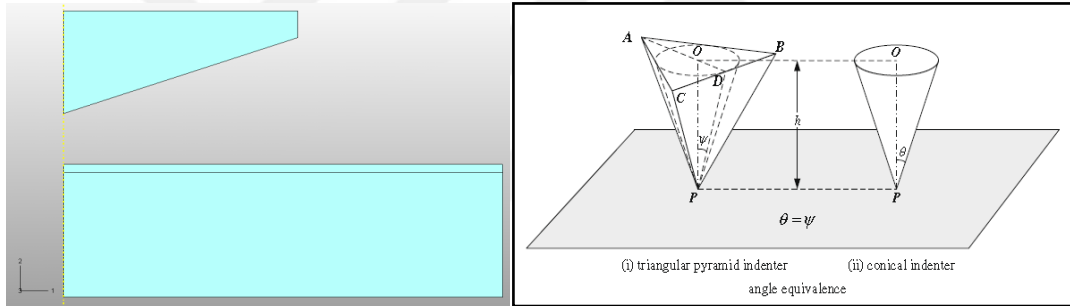
Bilyalı dövme işlemi sonrasında elde edilen yüzey pürüzlülüğünü R_a ve R_z olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mitutoyo (model: SJ-201P, şekil 3.5) yüzey pürüzlülük cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İşlem görmemiş altlık malzemeden 4 adet ölçüm yapılmış, bilyalı dövme işlemi yapılan numunelerden ise 10'ar adet ölçüm yapılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri bulunmuştur.

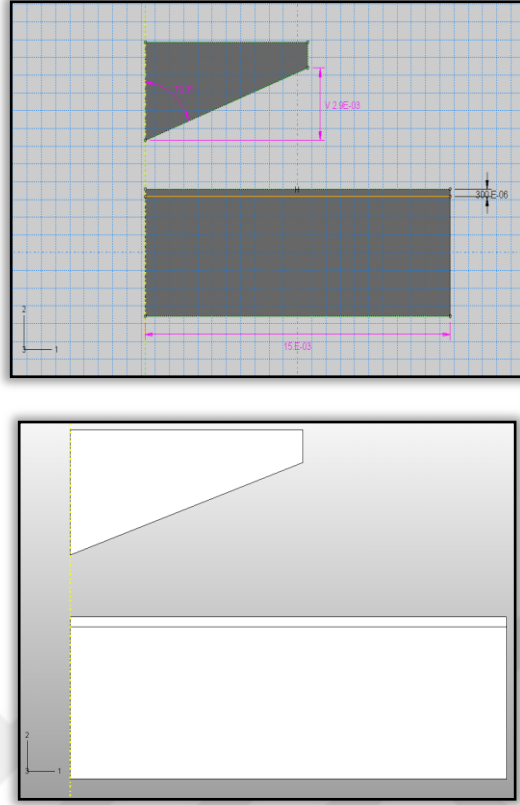


Şekil 3.6 Mitutoyo Surftest SJ 201 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

3.3.5 Sonlu elemanlar simülasyon yöntemi ile kaplama gerilme analizi ve arayüzey incelemesi

Sonlu Elemanlar Modellemesi (FEM), ABAQUS 6.6-1 ticari yazılım paketi ile yapılmıştır. Model, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi aksisimetrik geometri ile inşa edilmiştir. Model oluşturulurken Berkovich indenter eşdeğer konik alanı elde edilmiş ve sonra simetrik eksenli modeli tanımlanmıştır. İndenter, şekil 3.6'da gösterildiği gibi, Berkovich ve Vickers girintileriyle aynı alan derinliği işlevini veren 70.3° yarı dikey açılı konik ipuçları uçlara sahiptir. İndenter malzemesi olarak elmas alınmış ve Young modülü $E_s = 1140$ GPa ve Poisson oranı $= 0.04$ değerleri ile elastik olduğu kabul edilmiştir [108]. Çalışmada kaplama kalınlığı olarak aynı malzemedeki kaplama kalınlığı seçilmiştir. Şekil 3.6; 500 μm tabaka kalınlığı için kullanılan sonlu eleman modelinin şemasını göstermektedir.





Şekil 3.7 500 µm tabaka kalınlığı için kullanılan sonlu eleman modeli

Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplamaların mikro mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile nanosertlik testi ile elde edilen 100 mN maksimum yük değerinde yükleme-yük boşaltma eğrilerinin simülasyon destekli olarak analiz edilmiştir. Deneysel eğri ile sonlu elemanlar destekli eğrinin benzer davranış göstermesi için simülasyon verisi olarak akma mukavemeti değişkenine dayalı simülasyon dataları elde edilmiştir. Bu simülasyon uygulaması deneysel çalışmalarda olduğu gibi yükleme, bekleme ve yük boşaltma aşamalarından oluşmaktadır. Batıcı uç ilk başta indenter yüzeye temas edinceye kadar hareket ettirilmiş ve yüzey ile temas etikten sonra istenilen batma yükü ve batma deplasmanı belirlenmiştir. Akma mukavemetinin yani batıcı uçla yüzeydeki kaplama malzemesinin temasına müteakip oluşan gerilme dağılımlarının hem kaplama malzemesiyle hemde altlık malzemesiyle olan etkileşimleri incelenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta yüzeydeki kaplama tabakasının akma mukavemeti değeri, yani plastik deformasyona geçiş değeridir. Bu nedenle soğuk püskürtme yöntemi ile kaplanmış numunelerin nano indentasyon deneyleri yapılmış ve indentasyon yapılmış bu numunelere teker

teker simülasyon modeli uygulanmıştır. İstenen batma derinliğine kadar yükleme yapılmış ve tüm numuneler için stres, strain, yükleme, yük boşaltma eğrilerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu işlemleri yaparken dikkat edilmesi gereken bir nokta ise her aşamada her numune için ait akma gerilmesi değerinin 250-600 MPa arasında değiştirilmesidir (simülasyon sonuçlarında yer verilmiştir.). Plastik strain değerini sıfır aldığımızda malzeme akma mukavemeti lineer elastik perfect plastik dediğimiz sertleşme üstelinin sıfır olduğu değere doğru kademeli olarak yükseltilmiştir.



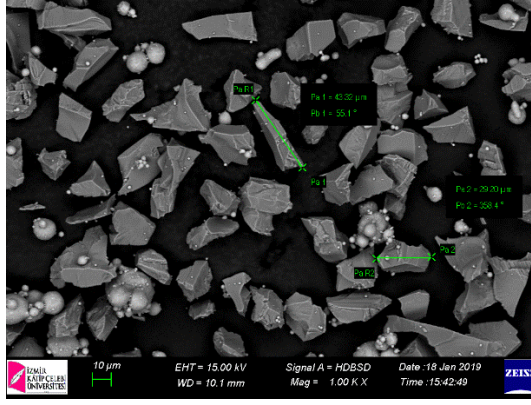
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının amacı; soğuk dinamik gaz püskürtme işlem parametreleri ile farklı sürelerde bilyalı dövme işlemi uygulanarak sertliği ve pürüzlülüğü değiştirilmiş altlık yüzeyinin kaplamanın mekanik ve fiziksel özelliklerine olan etkisinin simülasyon destekli olarak araştırılmasıdır. Çalışmalarda altlık malzeme olarak AA6082 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bilyalı dövme işleminin soğuk püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaların mikroyapısal (yoğunluğuna, mikroyapı, tane yapısı, bağlanma) ve mekanik özelliklere (Elastisite modülü, sertlik ve elastik toparlanma oranı, vs.) etkisinin araştırılması kapsamında 30 sn-240 sn arasında işlem görmüş altlık yüzeylerine kaplama işlemi uygulanmıştır.

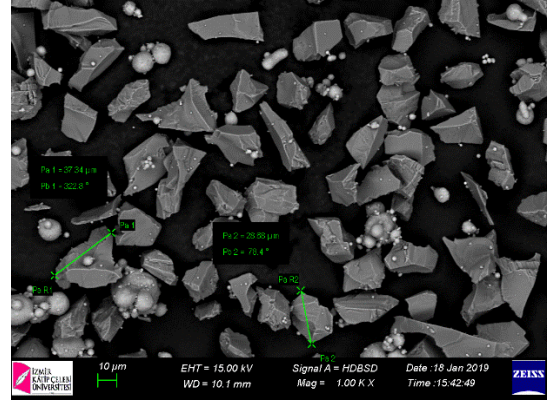
Kaplama işlemi sırasında gazı basıncı 0,6 MPa, nozul-yüzey arası mesafe 10 mm ve toz besleme hızı 8 g/dk olarak belirlenmiştir. Bilyalı dövme işlemi sonrası farklı yüzey sertliğine sahip numuneler % 23-27 Al_2O_3 - % 33-37 Al- % 38-42 Zn toz içeriğindeki DYMET K-20-11 kodlu kaplama tozu kullanılarak kaplanmıştır. Tez çalışması kapsamındaki üretim ve karakterizasyon çalışmalarında soğuk dinamik gaz püskürtme yönteminde kullanılacak olan tozlar başlangıç aşamasını oluşturmaktadır. Toz karakterizasyonu, kaplama işlemi ve kaplamanın metalografik karakterizasyonu ve mekanik özelliklerinin ölçülmesi aşamalarını takip eden bir test planı yapılmıştır.

4.1. Toz karakterizasyonu

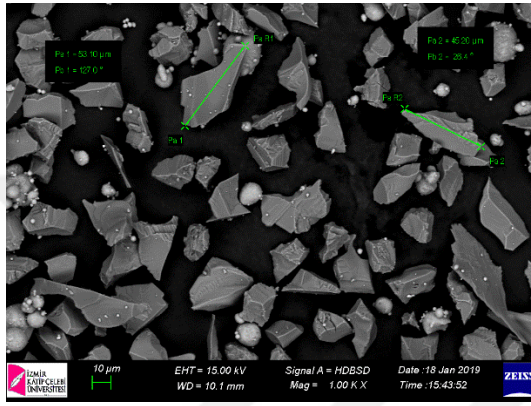
Tez çalışması kapsamında DYMET K-10-04, DYMET K-80-13 ve DYMET K-20-11 olmak üzere üç farklı toz kullanılmıştır. AA6082 Al alaşımı yüzey temizleme amacı ile kumlama yapmak için K 10-04, soğuk dinamik gaz püskürtme işlem parametrelerinin kaplama oluşumuna etkisinin araştırılması için K-80-13 ve bilyalı dövme işlemi ile yüzeyin fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişmesinin kompozit kaplama mekanik özelliklerine olan etkisinin araştırılması amacı ile K-20-11 tozları kullanılmıştır. K 10-04 kumlama tozu tane boyutu dağılımının 23-45 mikrometre arasında olduğu elektron mikroskobu yardımı ile belirlenmiştir. K-20-11 tozunda ise 15-25 mikrometre Al_2O_3 ve 5-15 mikrometre arasında Al-Zn partüküllerine rastlanmıştır. Şekil 4.2’de SEM sonuçları gösterilmektedir.



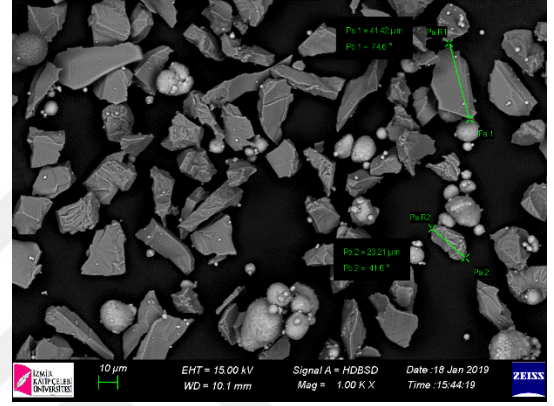
a)



b)

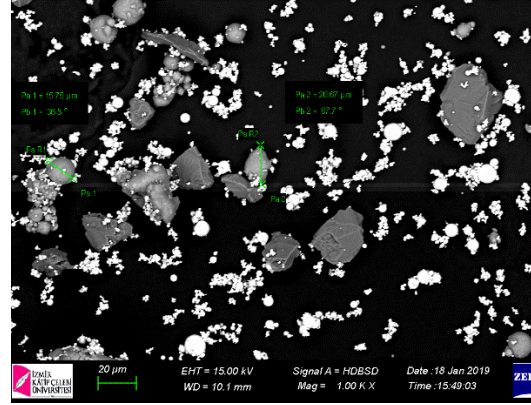


c)

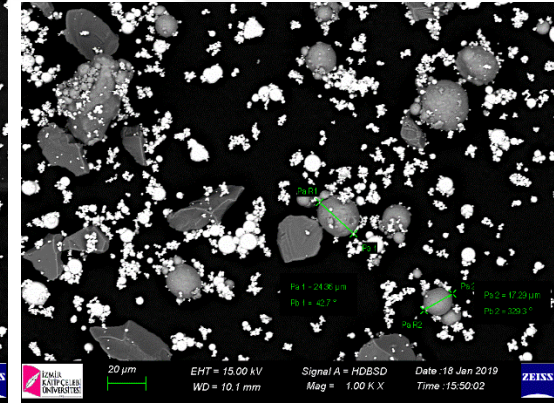


d)

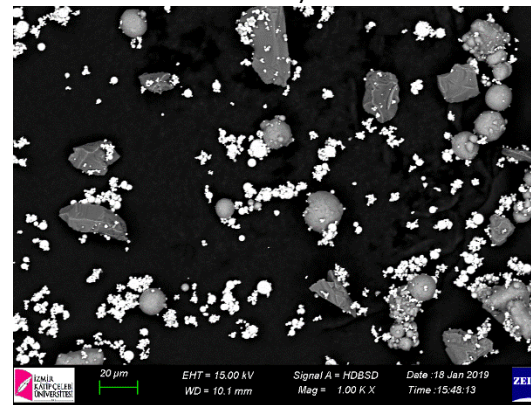
Şekil 4.1 K 10-04 kumlama tozuna ait SEM görüntüleri



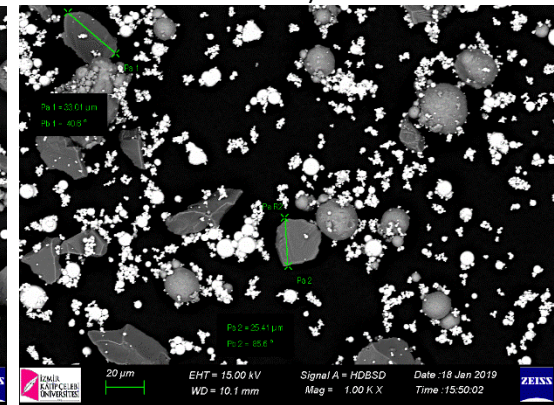
a)



b)



c)



d)

Şekil 4.2 K 20-11 kaplama tozuna ait SEM görüntüleri

4.2. Al-Zn-Al₂O₃ kaplama yapısına ait SEM-EDS ve Optik Mikroskop inceleme sonuçları

Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi oda sıcaklığında kaplama üretebilen bir sisteme sahiptir. Sistemde sıkıştırılmış gaz, yüksek basınç etkisiyle nozülünden çıkarken sıcaklık yükselse de toz partiküllerinin ve kaplanacak malzemeyi etkilememektedir. Bu düşük sıcaklık nedeni ile kaplama sırasında herhangi bir difüzyon olayı gerçekleşmediği ve kaplamaların yapısında kimyasal bir etkileşim gözlemlenmeyeceği ifade edilmektedir. Böylelikle kaplama sırasında herhangi bir faz değişimi, kalıntı gerilme oluşumu, kaplanacak ve kaplanan malzemelerin termal genişleme farklılıklarından dolayı özellikle arayüzeyde herhangi bir iç gerilme oluşumu, oksitlenme, buharlaşma, ergime, kristalleşme, bağların kopması, istenmeyen gazların açığa çıkması, soğuma hızının kontrol edilememesinden kaynaklanan büzülme gibi diğer termal spreyci yöntemlerinde karşılaşılabilecek faktörler burada bulunmamaktadır. SDGP yöntemi ile Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kaplama üretimi sonucunda elde edilen numuneler mikroyapısal incelemeler için zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiş ve optik mikroskop ile mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Tez çalışmasında hem soğuk spreyci proses parametrelerinin hemde bilyalı dövme işlemi ile yüzey sertleştirme ve pürüzledirme faaliyetlerinin kaplama özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Metalografik incelemeler bu iki durum için ayrı ayrı incelenmiş olup iki farklı bölümde sonuçları açıklanmıştır. Tablo 4.1’de verilen değişkenlere göre üretimi gerçekleştirilen kaplamalar ait metalografik inceleme sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin araştırılmasında kullanılan işlem parametreleri ve numuneler

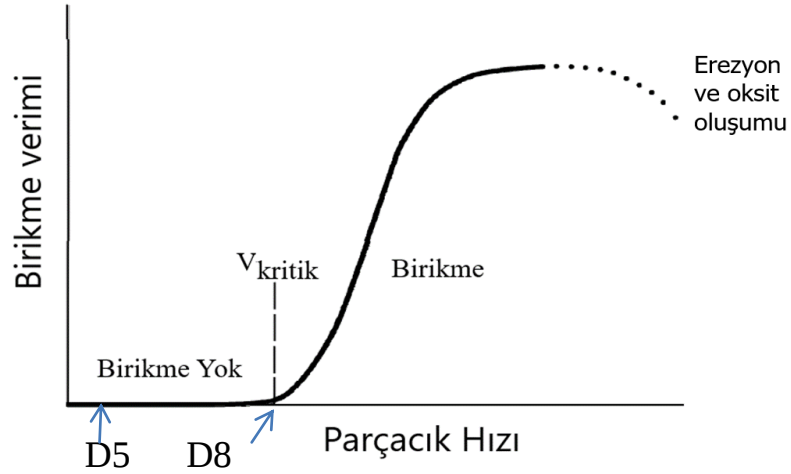
SGDP Yöntemi İşlem parametreleri		Toz Besleme Hız (g/dak)				Metalografik İnceleme
		5	6	7	8	
Hava Basıncı (MPa)	0,45	D5	D6	D7	D8	Yapıldı
	0,60	N5	N6	N7	N8	Yapıldı
	0,70	Y5	Y6	Y7	Y8	Yapıldı

4.2.1 Soğuk Püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi

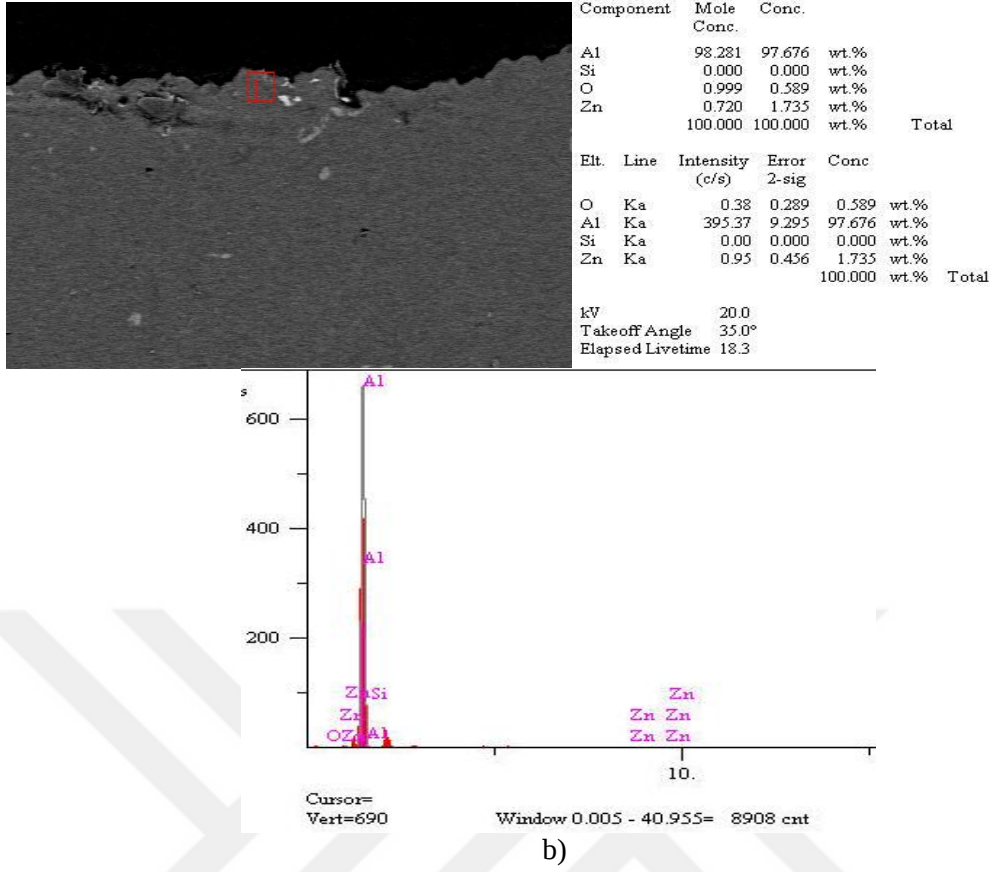
Soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması çalışmalarında farklı toz besleme hızları ve gaz basıncı parametreleri ile kullanılarak kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler ve sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

4.2.1.1. SEM-EDS İnceleme sonuçları

SEM-EDS incelemeleri sonucunda düşük hava basıncı (0,45 MPa) dolayısıyla elde edilen düşük hızlarda yapılan kaplama işlemlerinde plastik deformasyonun gerçekleşmemesi ve altlık yüzeyine çarpan tanelerin büyük oranda birikmeden saçılması nedeniyle kaplama tabakası belirgin bir biçimde gözlemlenememiştir. Şekil 4.3-a) da birikme verimi ve parçacık hızına bağlı kaplama oluşumu parametrelerinin değişimi gösterilmektedir. Sadece 5 g/dak lık düşük toz besleme hızında kısmi ve çok ince bir tabaka oluşumu tespit edilebilmiştir (Şekil 4.3). Ancak toz besleme hızının artmasına bağlı olarak gaz jeti içerisinde toz miktarı artmakta ve düşük hızdaki gaz jeti içindeki toz partikül hızları da azalmaktadır. Partikül hızlarının azalması nedeniyle kritik hızın altına düşülmekte dolayısıyla da bu toz besleme hızlarında kaplama oluşmamaktadır (Şekil 4.3).

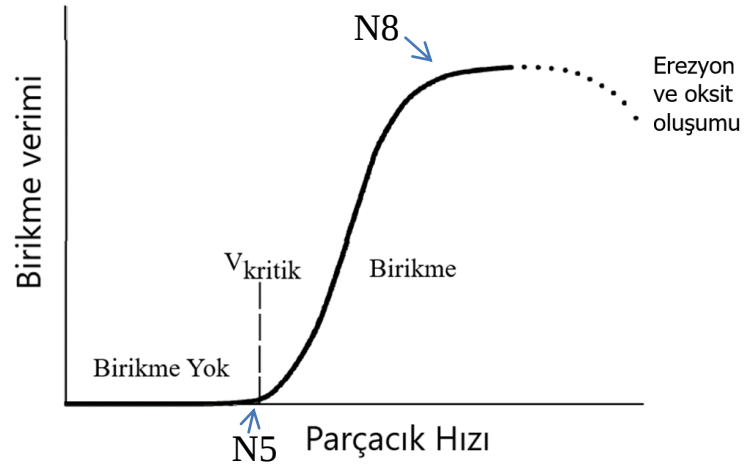


a)

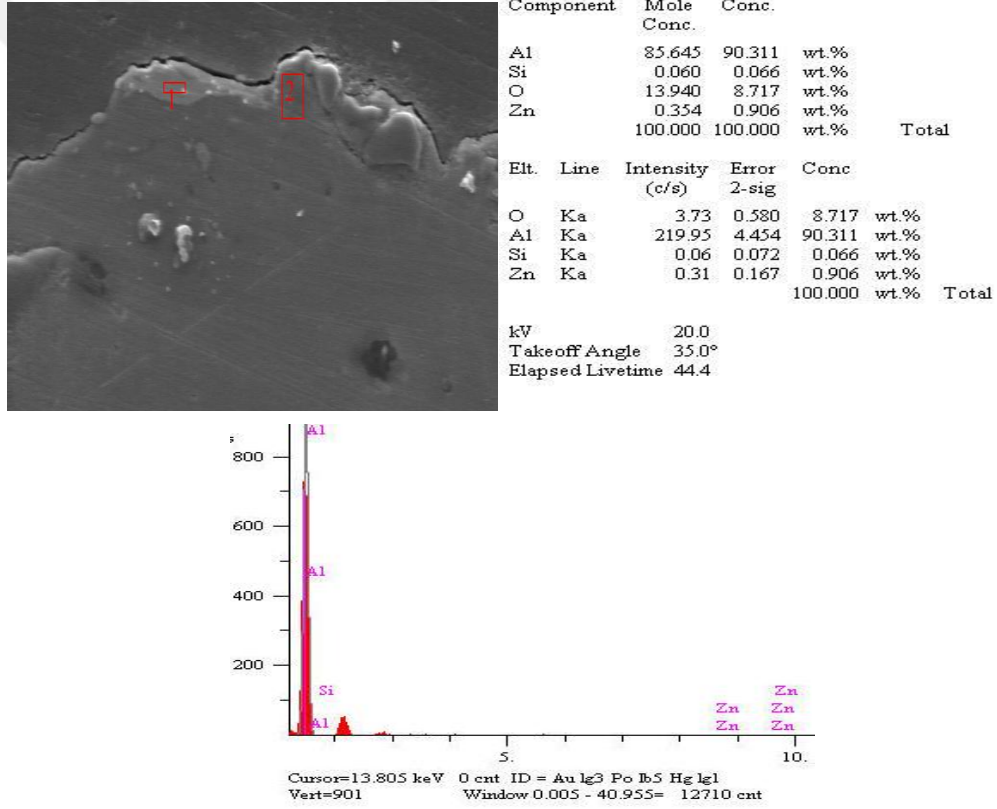


Şekil 4.3. D5 numunesinde tespit edilen kısmi ve çok ince tabaka

Normal veya orta hava basıncında (0,6 MPa) gaz jeti hızı basıncın artmasına bağlı olarak birikme artmıştır. Daha yüksek hızlara sahip olan bu gaz jeti içerisine verilen partiküllerin hızları da bu nedenle artmaktadır. Partiküllerin hızlarının artmasına bağlı olarak kullanılan toz partiküller altlık malzemeye çarptıklarında plastik deformasyona uğradığı ve böylece birikerek tabaka oluşturmaya başladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.4). Ancak toz besleme hızının artmasına bağlı olarak partiküllerin hızları azaldığından belirli bir toz besleme hızından sonra tabaka oluşumu azalmaktadır. Bu basınç değerlerinde 8 g / dakika lık toz besleme hızlarına birikme verimi yüksek iken 9 g/dakika lık besleme hızında birikme verimi azalmakta ve dolayısıyla da tabaka oluşumu azalmaktadır (Şekil 4.8).

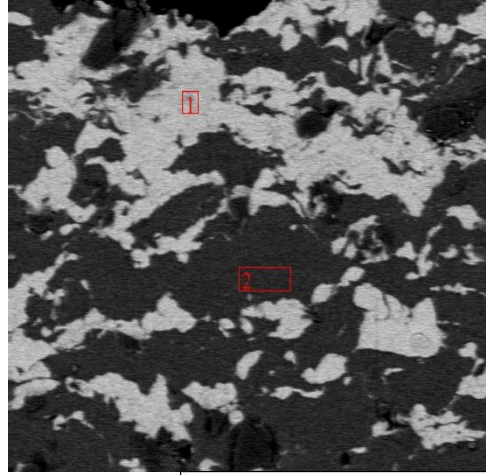


a)



b)

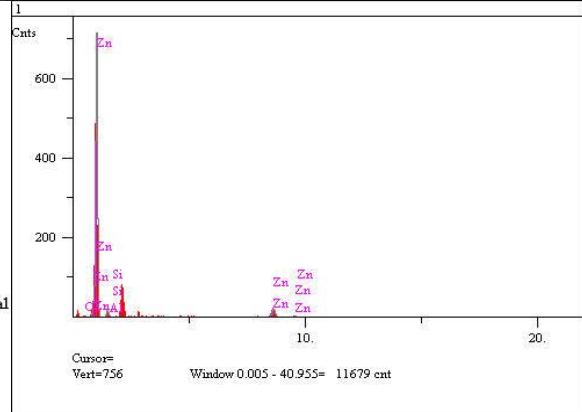
Şekil 4.4. N5 numunesinde tespit edilen kısmi ve çok ince tabaka



Component	Mole Conc.	Conc.		
Al	30.450	17.277	wt. %	
Si	1.568	0.926	wt. %	
O	11.253	3.786	wt. %	
Zn	56.730	78.011	wt. %	
	100.000	100.000	wt. %	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	0.55	0.212	3.786	wt. %
Al	Ka	4.37	0.598	17.277	wt. %
Si	Ka	0.25	0.144	0.926	wt. %
Zn	Ka	8.19	0.819	78.011	wt. %
				100.000	wt. % Total

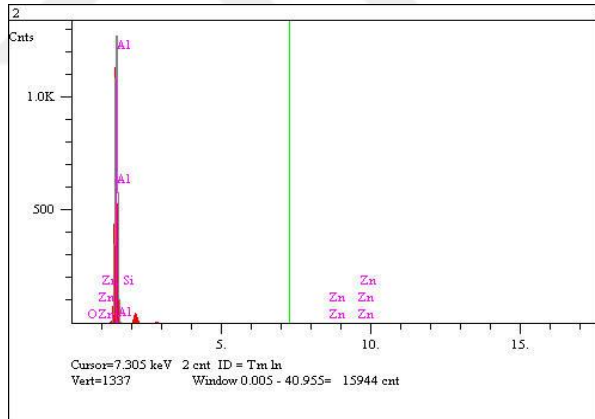
kV 20.0
 Takeoff Angle 35.0°
 Elapsed Livetime 48.9



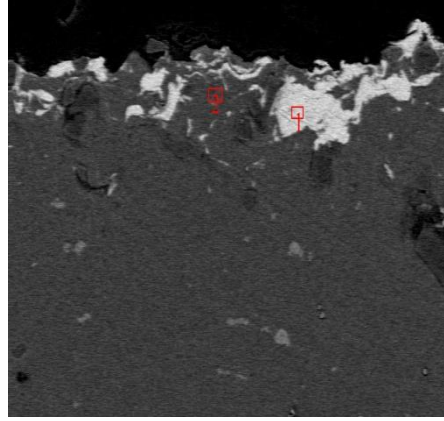
Component	Mole Conc.	Conc.		
Al	98.844	98.397	wt. %	
Si	0.000	0.000	wt. %	
O	0.650	0.384	wt. %	
Zn	0.506	1.220	wt. %	
	100.000	100.000	wt. %	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	0.26	0.178	0.384	wt. %
Al	Ka	420.78	7.174	98.397	wt. %
Si	Ka	0.00	0.000	0.000	wt. %
Zn	Ka	0.70	0.292	1.220	wt. %
				100.000	wt. % Total

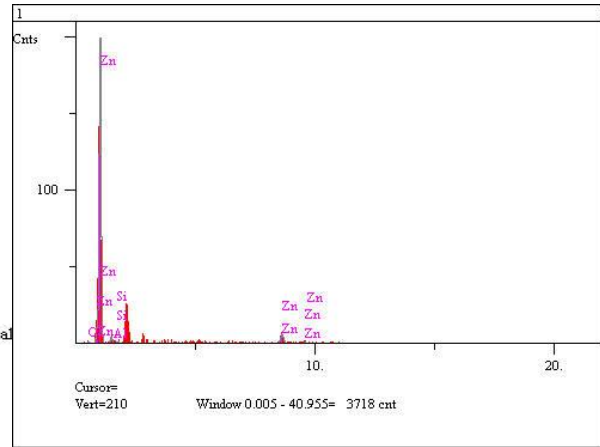
kV 20.0
 Takeoff Angle 35.0°
 Elapsed Livetime 32.7



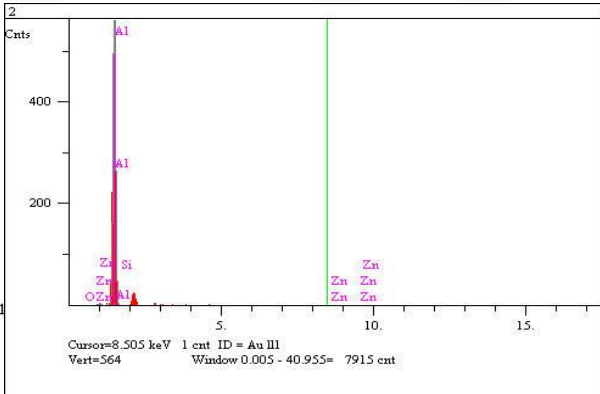
Şekil 4.5. N6 numunesinde tespit edilen kaplama



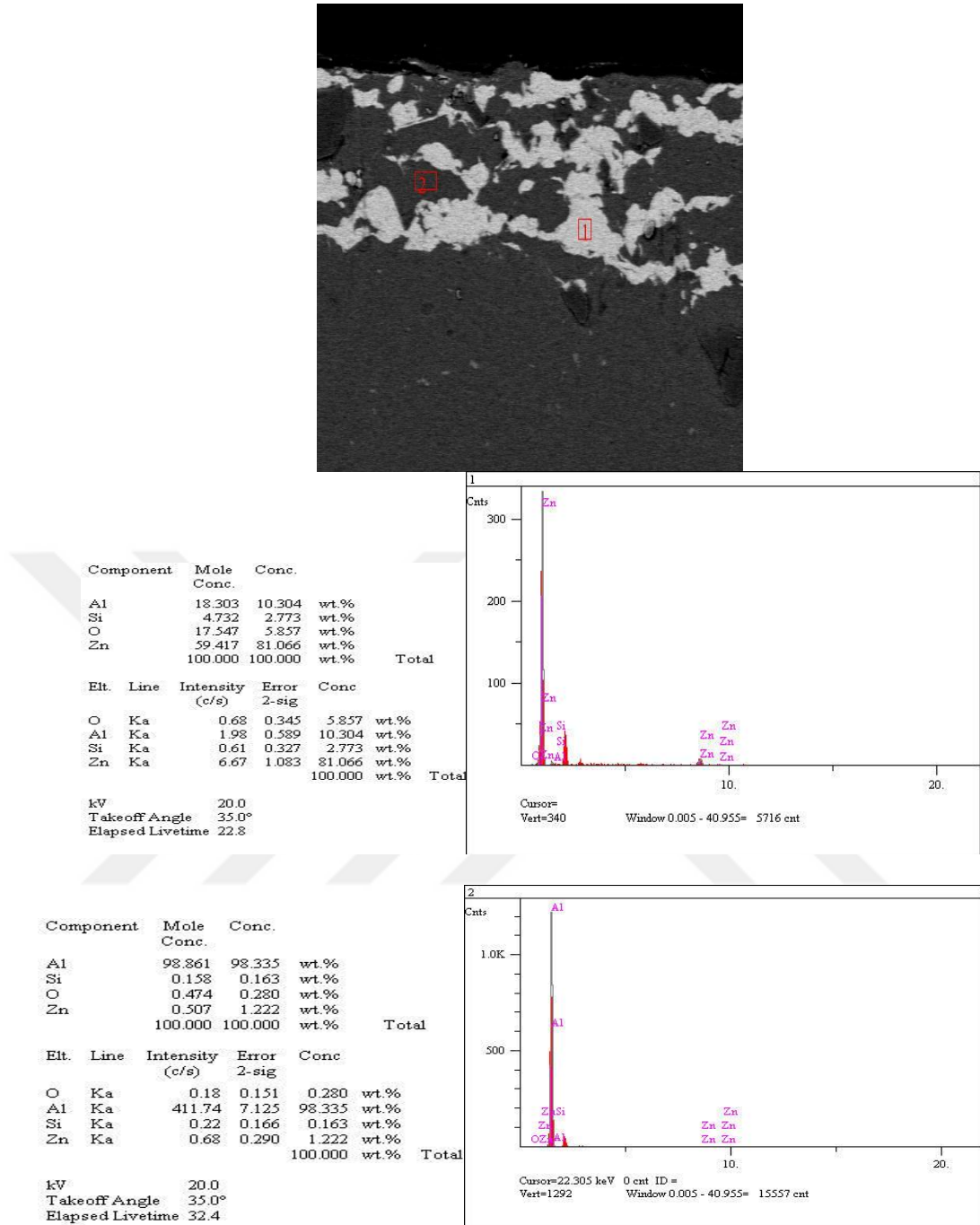
Component	Mole Conc.	Conc.	
Al	24.270	14.433	wt. %
Si	4.647	2.877	wt. %
O	18.150	6.400	wt. %
Zn	52.934	76.291	wt. %
	100.000	100.000	wt. %
Total			
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig
O	Ka	0.81	0.475
Al	Ka	3.16	0.940
Si	Ka	0.69	0.440
Zn	Ka	6.86	1.386
		100.000	wt. %
Total			
kV	20.0		
Takeoff Angle	35.0°		
Elapsed Livetime	14.3		



Component	Mole Conc.	Conc.	
Al	99.141	98.262	wt. %
Si	0.000	0.000	wt. %
O	0.180	0.106	wt. %
Zn	0.680	1.633	wt. %
	100.000	100.000	wt. %
Total			
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig
O	Ka	0.07	0.132
Al	Ka	399.56	10.051
Si	Ka	0.00	0.000
Zn	Ka	0.90	0.476
		100.000	wt. %
Total			
kV	20.0		
Takeoff Angle	35.0°		
Elapsed Livetime	15.8		

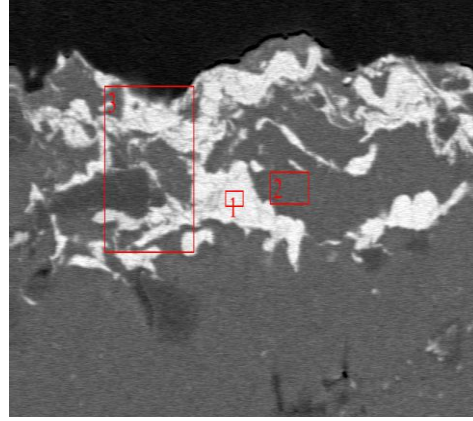


Şekil 4.6. N7 numunesinde tespit edilen kaplama

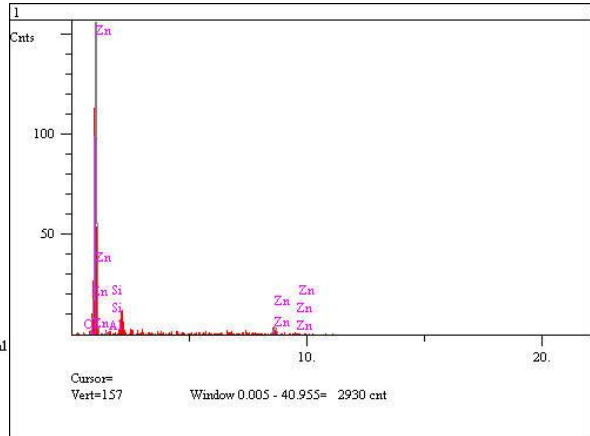


Şekil 4.7. N8 numunesinde tespit edilen kaplama

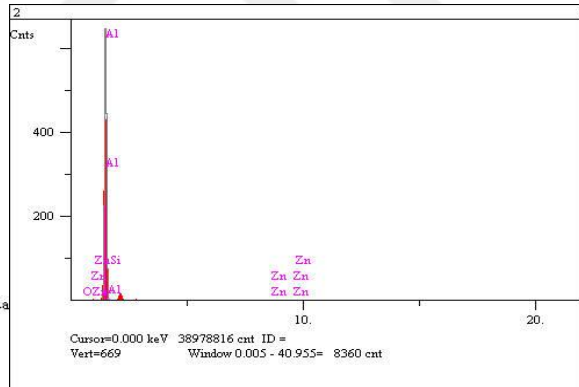
Yüksek hava basıncı (0,7 MPa) dolayısıyla elde edilen yüksek hızlarda yapılan kaplama işlemlerinde 5 ve 6 g/dakikalık düşük toz besleme hızlarında partiküllerin altlık malzeme yüzeyine çaptıklarında deforme olduğu ve böylece tabaka oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.8). Ancak toz besleme hızı 6 g/dakikanın üzerine çıktığında altlık malzeme üzerinde oksitlenmenin meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.11).



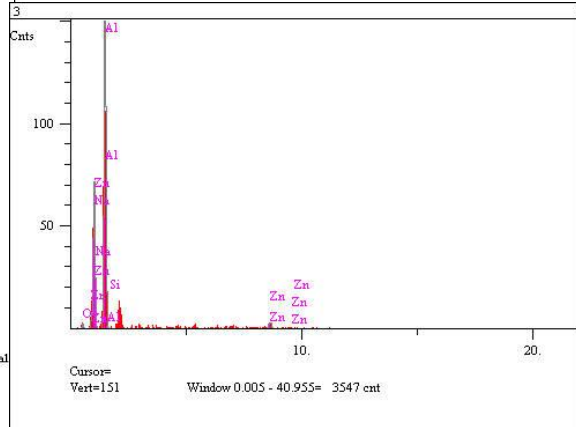
Component	Mole Conc.	Conc.			
Al	13.442	7.643	wt. %		
Si	2.809	1.663	wt. %		
O	23.742	8.005	wt. %		
Zn	60.007	82.690	wt. %		
	100.000	100.000	wt. %	Total	
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	1.15	0.700	8.005	wt. %
Al	Ka	1.74	0.864	7.643	wt. %
Si	Ka	0.44	0.436	1.663	wt. %
Zn	Ka	8.25	1.879	82.690	wt. %
				100.000	wt. %
					Total
kV		20.0			
Takeoff Angle		35.0°			
Elapsed Livetime		9.3			



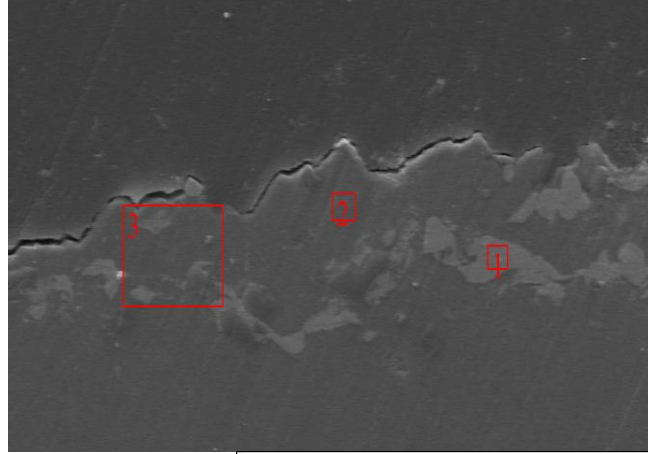
Component	Mole Conc.	Conc.			
Al	98.888	97.738	wt. %		
Si	0.295	0.303	wt. %		
O	0.000	0.000	wt. %		
Zn	0.818	1.959	wt. %		
	100.000	100.000	wt. %		
			Total		
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	0.00	0.000	0.000	wt. %
Al	Ka	453.57	10.780	97.738	wt. %
Si	Ka	0.47	0.346	0.303	wt. %
Zn	Ka	1.24	0.563	1.959	wt. %
				100.000	wt. %
					Total
kV		20.0			
Takeoff Angle		35.0°			
Elapsed Livetime		15.6			



Component	Mole Conc.	Conc.			
Al	84.688	80.488	wt%		
Si	0.413	0.409	wt%		
O	8.745	4.929	wt%		
Zn	6.154	14.175	wt%		
Na	0.000	0.000	wt%		
	100.000	100.000	wt%		
Total					
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	2.25	0.917	4.929	wt%
Na	Ka	0.00	0.000	0.000	wt%
Al	Ka	160.57	7.743	80.488	wt%
Si	Ka	0.38	0.375	0.409	wt%
Zn	Ka	5.13	1.384	14.175	wt%
				100.000	wt%
Total					
kV		20.0			
Takeoff Angle		35.0°			
Elapsed Livetime		10.7			



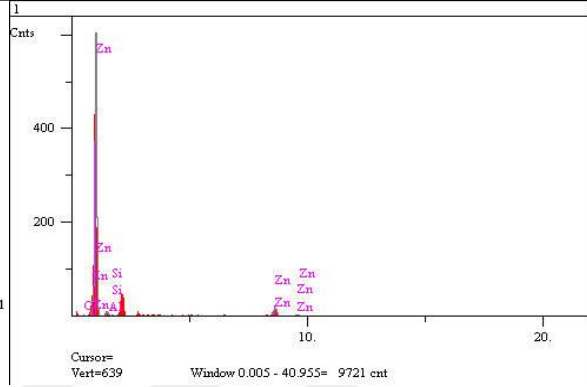
Şekil 4.8. Y5 numunesinde tespit edilen kaplama



Component	Mole Conc.	Conc.	
Al	23.106	12.679	wt. %
Si	5.511	3.148	wt. %
O	10.706	3.484	wt. %
Zn	60.676	80.690	wt. %
	100.000	100.000	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	0.51	0.230	3.484	wt. %
Al	Ka	3.18	0.573	12.679	wt. %
Si	Ka	0.88	0.302	3.148	wt. %
Zn	Ka	8.59	0.942	80.690	wt. %
				100.000	Total

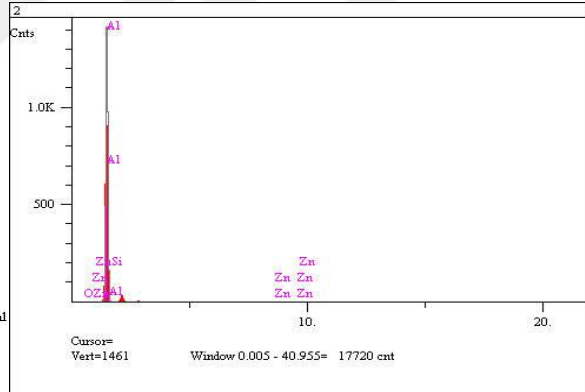
kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 38.7



Component	Mole Conc.	Conc.	
Al	99.221	98.841	wt. %
Si	0.000	0.000	wt. %
O	0.396	0.234	wt. %
Zn	0.383	0.925	wt. %
	100.000	100.000	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	0.16	0.132	0.234	wt. %
Al	Ka	425.80	6.840	98.841	wt. %
Si	Ka	0.00	0.000	0.000	wt. %
Zn	Ka	0.53	0.241	0.925	wt. %
				100.000	Total

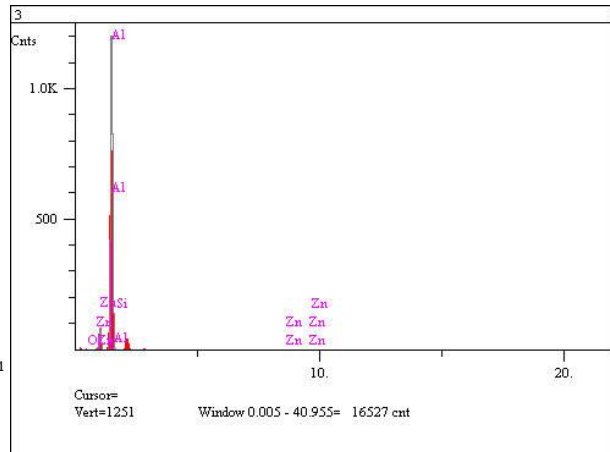
kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 36.4



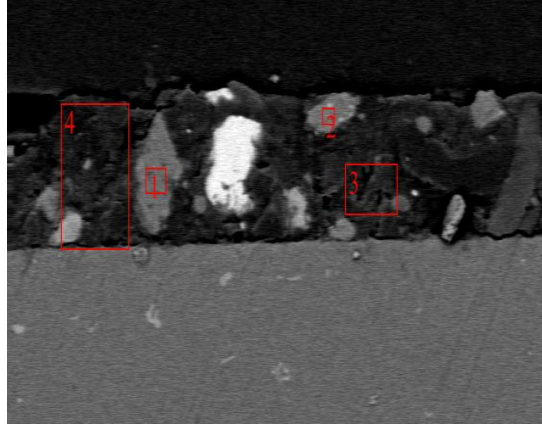
Component	Mole Conc.	Conc.	
Al	96.053	96.083	wt. %
Si	0.143	0.149	wt. %
O	2.978	1.767	wt. %
Zn	0.826	2.002	wt. %
	100.000	100.000	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	0.98	0.310	1.767	wt. %
Al	Ka	323.95	5.654	96.083	wt. %
Si	Ka	0.17	0.129	0.149	wt. %
Zn	Ka	0.93	0.303	2.002	wt. %
				100.000	Total

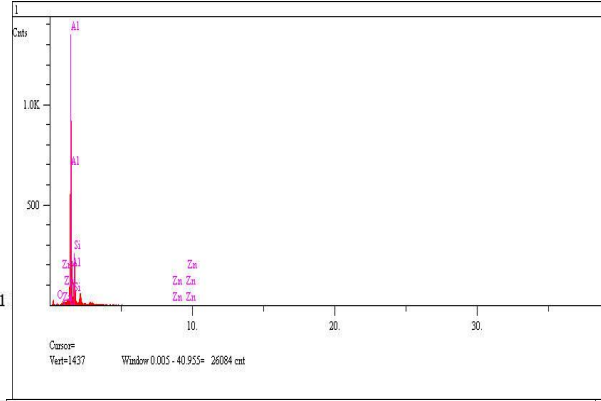
kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 40.5



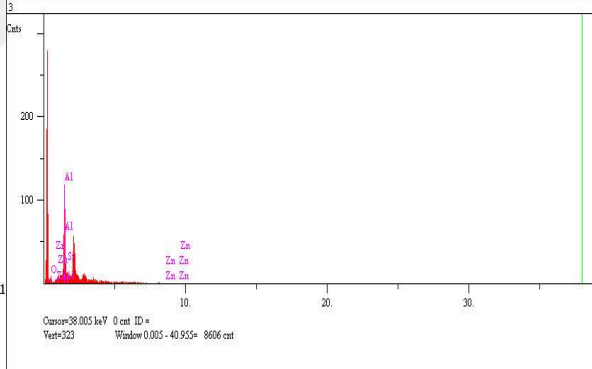
Şekil 4.9. Y6 numunesinde tespit edilen kaplama



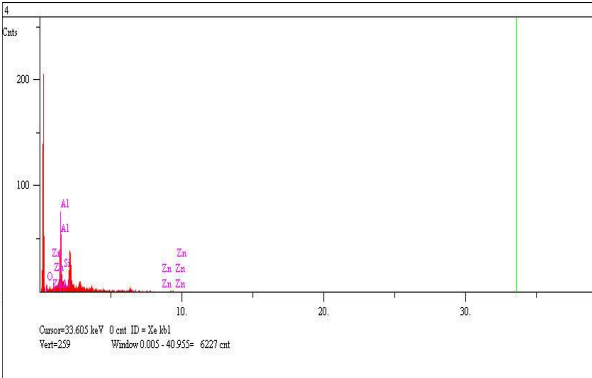
Component		Mole Conc.	Conc.		
Al		67.671	67.549	wt. %	
Si		29.106	30.242	wt. %	
O		3.059	1.811	wt. %	
Zn		0.164	0.398	wt. %	
		100.000	100.000	wt. %	Total
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	1.45	0.384	1.811	wt. %
Al	Ka	374.87	6.179	67.549	wt. %
Si	Ka	71.82	2.704	30.242	wt. %
Zn	Ka	0.29	0.173	0.398	wt. %
				100.000	wt. %
Total					
kV		20.0			
Takeoff Angle		35.0°			
Elapsed Livetime		39.3			



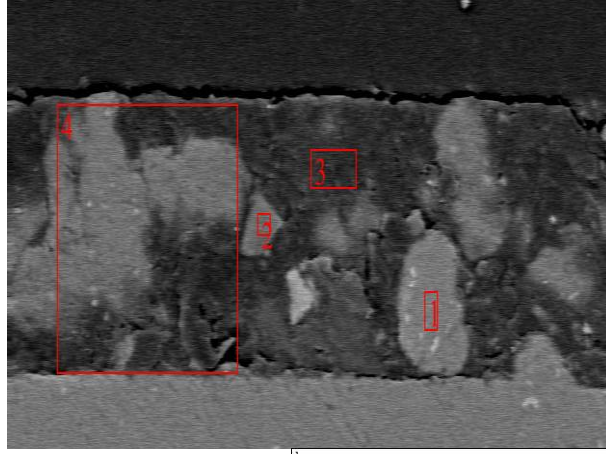
Component		Mole Conc.	Conc.		
Al		68.163	73.182	wt. %	
Si		1.987	2.220	wt. %	
O		27.004	17.192	wt. %	
Zn		2.846	7.407	wt. %	
		100.000	100.000	wt. %	Total
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	1.65	0.407	17.192	wt. %
Al	Ka	30.25	1.741	73.182	wt. %
Si	Ka	0.43	0.207	2.220	wt. %
Zn	Ka	0.52	0.228	7.407	wt. %
				100.000	wt. %
					Total
kV		20.0			
Takeoff Angle		35.0°			
Elapsed Livetime		39.9			



Component		Mole Conc.	Conc.		
Al		67.216	72.466	wt. %	
Si		2.301	2.583	wt. %	
O		27.714	17.718	wt. %	
Zn		2.768	7.233	wt. %	
		100.000	100.000	wt. %	Total
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	1.50	0.461	17.718	wt. %
Al	Ka	26.38	1.934	72.466	wt. %
Si	Ka	0.44	0.250	2.583	wt. %
Zn	Ka	0.45	0.251	7.233	wt. %
				100.000	wt. %
					Total
kV		20.0			
Takeoff Angle		35.0°			
Elapsed Livetime		28.2			



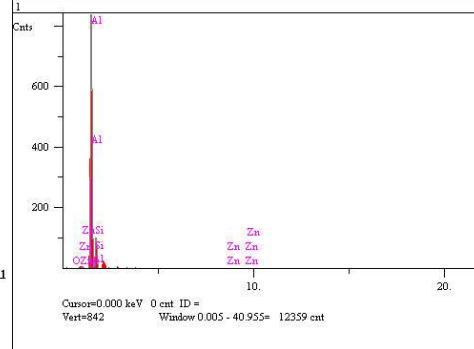
Şekil 4.10. Y7 numunesinde tespit edilen kaplama



Component	Mole Conc.	Conc.	
Al	76.171	75.446	wt. %
Si	23.192	23.911	wt. %
O	0.489	0.287	wt. %
Zn	0.148	0.355	wt. %
	100.000	100.000	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	0.23	0.200	0.287	wt. %
Al	Ka	414.69	8.563	75.446	wt. %
Si	Ka	51.85	3.028	23.911	wt. %
Zn	Ka	0.26	0.213	0.355	wt. %
				100.000	Total

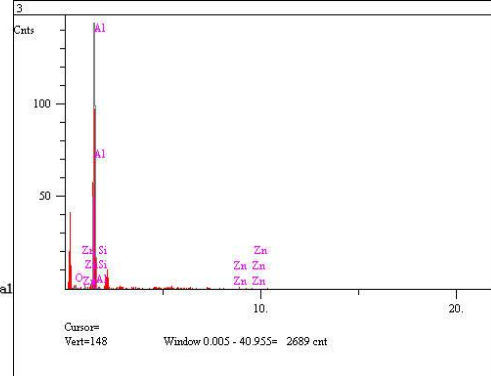
kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	22.6



Component	Mole Conc.	Conc.	
Al	85.624	89.023	wt. %
Si	1.873	2.028	wt. %
O	11.850	7.306	wt. %
Zn	0.652	1.644	wt. %
	100.000	100.000	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	2.21	0.931	7.306	wt. %
Al	Ka	154.41	7.783	89.023	wt. %
Si	Ka	1.28	0.709	2.028	wt. %
Zn	Ka	0.40	0.397	1.644	wt. %
				100.000	Total

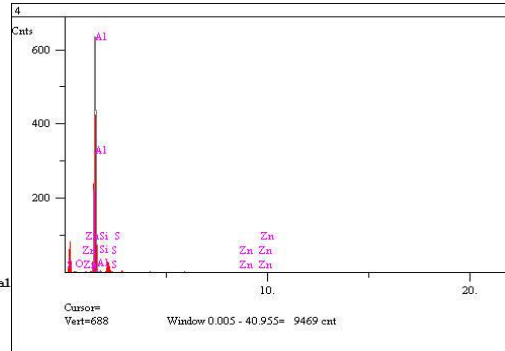
kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	10.2



Component	Mole Conc.	Conc.	
S	0.765	0.915	wt. %
Al	92.349	92.934	wt. %
O	4.481	2.674	wt. %
Si	1.716	1.798	wt. %
Zn	0.688	1.678	wt. %
	100.000	100.000	Total

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc	
O	Ka	1.31	0.458	2.674	wt. %
Al	Ka	279.46	6.703	92.934	wt. %
Si	Ka	1.88	0.550	1.798	wt. %
S	Ka	1.41	0.477	0.915	wt. %
Zn	Ka	0.69	0.334	1.678	wt. %
				100.000	Total

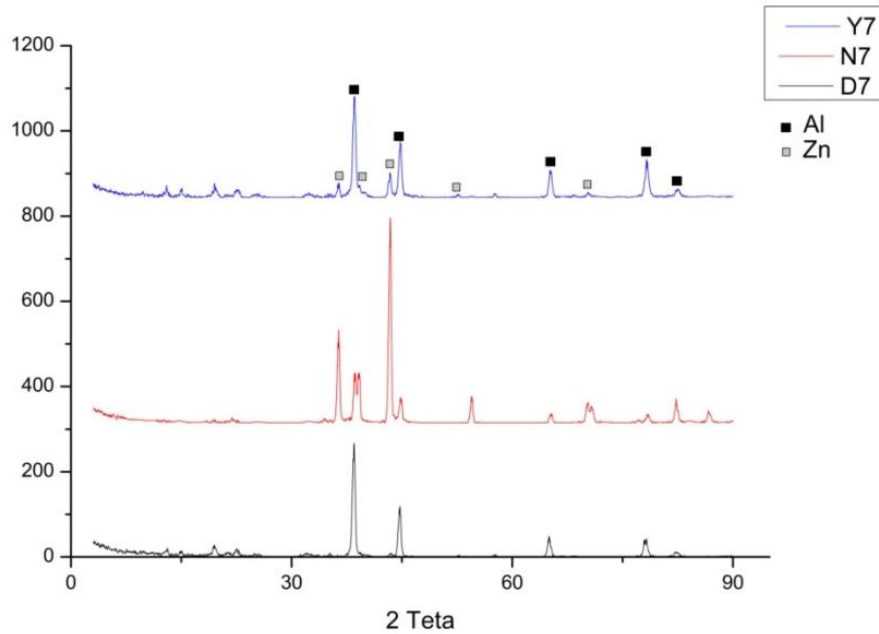
kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	24.9



Şekil 4.11. Y8 numunesinde tespit edilen kaplama

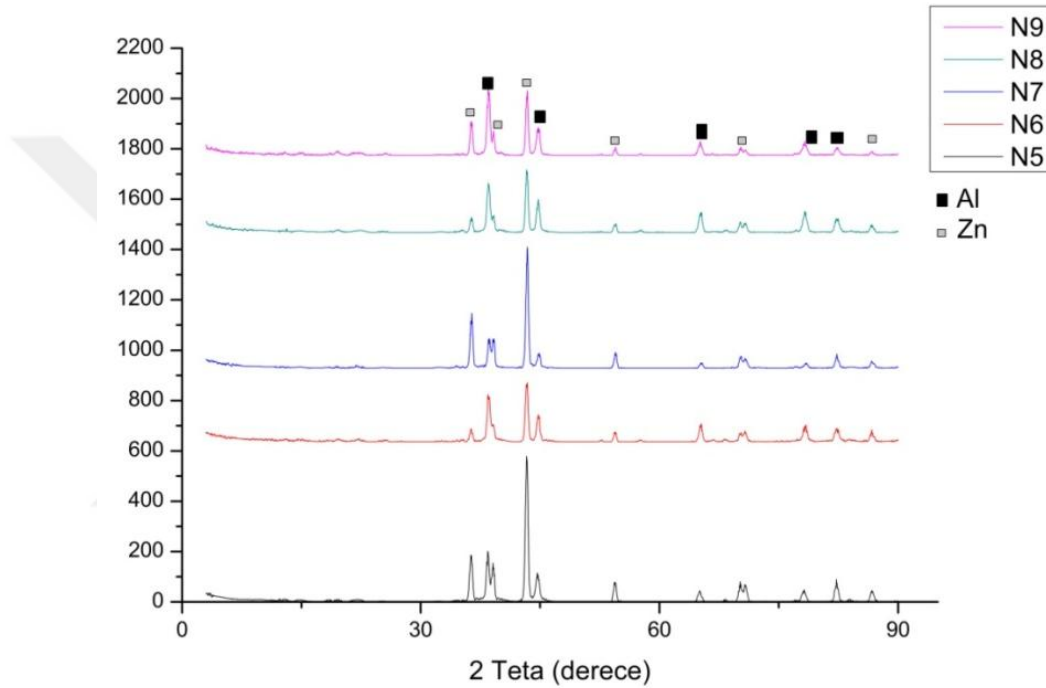
4.1.2. X-Işınlari difraksiyonu

Tez çalışmasında yapılan test planında, basınç ve toz besleme hızına bağılı olarak Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplamaların soğuk spre y yöntemi ile depozitlenme durumları ve kaplama oluşum mekanizması hakkında detay bilgilere ulaşılması ve sonrasında optimum kaplama üretim parametreleri elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda Tablo 4.1 de belirtilen değişkenlere bağılı olarak örnek üretimler sonucunda numuneler üretilmiştir. Test planında SEM-EDS analizlerinde de ifade edildiğı üzere D5-D8 kodlu numunelerde basınç ve toz besleme değerlerine bağılı olarak kaplama oluşumu için kiritk toz hızına ulaşmadığı için kaplama gerçekleşmemiştir. XRD analizleri ise test planındaki proses parametrelerine bağılı olarak kaplama oluşumu ve toz depozitlenmesi gerçekleşen numuneler üzerinden yapılmıştır. Analiz sonucunda düşük hava basınçlı numunelere ait pikler incelendiğinde sadece altlık malzemeye ait piklerin varlığı görölmektedir. Bu da optik mikroskop ve SEM incelemeleri sonucunda tespit edilen yüzeyde tabaka birikmediğini, yüzeye çarpan tanelerin birikmeden saçıldığını sonuçlarını kanıtlamaktadır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Aynı toz besleme hızında farklı hava basınçları ile elde edilen numunelerin XRD pikleri; Toz besleme 7 g/dak D7: basınç 0,45 MPa N7: 0,60 MPa, Y7:0,70 MPa

Normal ve yüksek hava basınçlarında yapılan kaplama işlemlerine ait XRD pikleri incelendiğinde alüminyum pikleri haricinde kaplama tozu içerisinde bulunan çinko pikleri de belirgin bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.13). İncelenen numune yüzeylerinde herhangi bir Al_2O_3 pikine rastlanmamıştır. Al ve Zn fazı ve farklı şiddetlerde pik değerlerine sahip olması kaplama birikmesi sırasında elementel yoğunluk açısından değişim bölgeleri oluştuğunu göstermektedir. Kompoit kaplama oluşumu için toz içinde yer alan Al_2O_3 partikülleri ise Al ve Zn tarafından tamamen kesit içinde çevrelenmiş olarak depozitlendiği düşünülmektedir.



Şekil 4.13. Normal hava basıncı (0,60MPa) ile farklı toz besleme hızlarında elde edilen kaplama numunelerinin XRD pikleri (N5: 5 g/dak, N6: 6 g/dak, N7: 7 g/dak, N8: 8 g/dak, N9: 9 g/dak)

4.2.2 Bilyalı Dövme işleminin Soğuk Püskürtme işleminde üretilen tabakaların kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi

Kaplama işlemlerinde altlık malzemesinin mekanik özellikleri partiküllerin depoiztlenme işlemini etkileyen faktörler arasındadır. Özellikle yüzeyin Brinell sertliği ve pürüzlülük artışına bağlı olarak depozitlenme mekanizmasının karakterize edilerek kaplama mekanik özelliklerin yüzeydeki plastik deformasyon miktarına göre değişimi ortaya çıkarılmıştır. Tez çalışmasında soğuk spre y yöntemi ile üretimi

gerçekleştirilen Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplamaların altlık ile olan arayüzey uyumunun sağlanması ve mukavemetinin dolaylı olarak arttırılması için AA6082 Al alaşımı levha yüzeyi kumlama işleminden sonra bilyalı dövme uygulamasına tabi tutulmuştur. İşlem süresinin 30-240 sn arasında 8 adımda değişimi ile a) Kaplama – Altlık arayüzey uyumu ve b) Pürüzlülük ve sertlik artışına bağlı olarak kaplama mekanik özellikleri incelenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

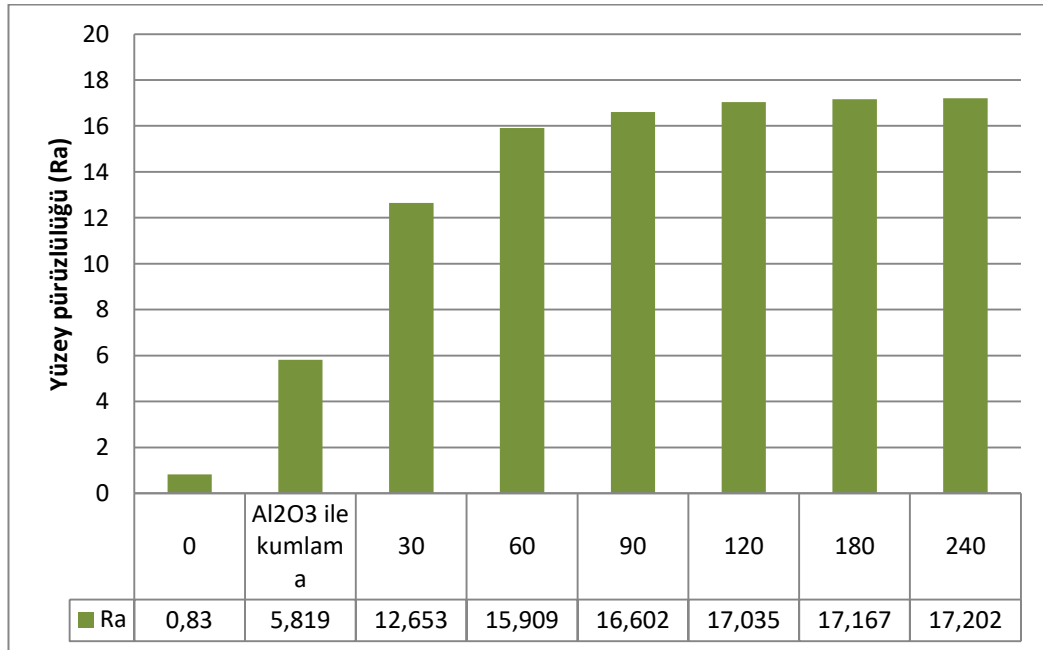
Soğuk sprej ile kaplama işlemi plastik deformasyon esasına göre yapılan depozitlenme mekanizmasına sahip olduğundan, yapıda sertliği sağlayan oksit çeşidi ve miktarında bir değişikliğe gidilmeden toz içinde Zn miktarının arttırılması kaplama oluşumunu olumlu yönde etkilemiş ve toz birikmesi stabil gerçekleşmiştir. Bu tespit sonrasında AA6082 Al alaşımından üretilmiş bir levha yüzeyine 30-240 sn arasında bilyalı dövme işlemi uygulanarak, yüzey sertliğinin soğuk sprej ile kaplama üretiminde kaplama birikmesine ve kaplamanın mikro mekanik özelliklerine olan etkisi ortaya çıkarılmıştır.

4.2.1. AA6082 Al alaşımı levha yüzey pürüzlülük incelemesi

Bilyalı dövme işleminin diğer bir sonucu da artan yüzey pürüzlülüğü değerleridir. İşlem süresinin 30-240 sn arasında uygulanması ile pürüzlülük değerlerinde R_a: 0,80 µm seviyesinden 17 µm'ye R_z ise 4,53 µm'den 112 µm'ye artış göstermiştir. Tablo 4.2 ve 4.3'te yüzey pürüzlülüğü değerlerinin bilyalı dövme işlem süresi ile olan değişimi gösterilmiştir. 120 sn sonunda pürüzlülük değerlerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiş olup değerler R_a (aritmetik ortalama sapması) bazında 2 µm değişim göstermiştir.

Tablo 4.2. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a)

	İşlem görmemiş	Al_2O_3 ile yüzey temizleme amaçlı kumlama	Bilyalı dövme işlem Süresi (sn)					
			30	60	90	120	180	240
R_a (μm)	0,81	5,33	14,33	15,2	16,28	15,69	17,78	18,39
	0,80	6,30	13,15	16,1	17,52	17,53	18,01	15,88
	0,84	6,08	12,33	15,14	16,17	17,49	16,78	17,52
	0,87	4,30	11,19	16,48	17,08	16,8	14,7	20,34
		6,64	15,97	14,88	14,23	18,59	16,79	18,73
		5,30	11,65	19,14	16,47	18,81	18,5	17,58
		6,01	10,68	14,02	16,87	16,59	15,87	17,83
		6,30	14,21	18,14	16,67	17,15	18,87	13,8
		5,65	11,55	17,37	18,02	16,51	18,95	16,29
		6,28	11,47	12,62	16,71	15,19	15,42	15,66
Ortalama $R_a(\mu m)$	0,83	5,82	12,66	15,91	16,60	17,04	17,167	17,20



Şekil 4.14. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğü (R_a) diyagramı

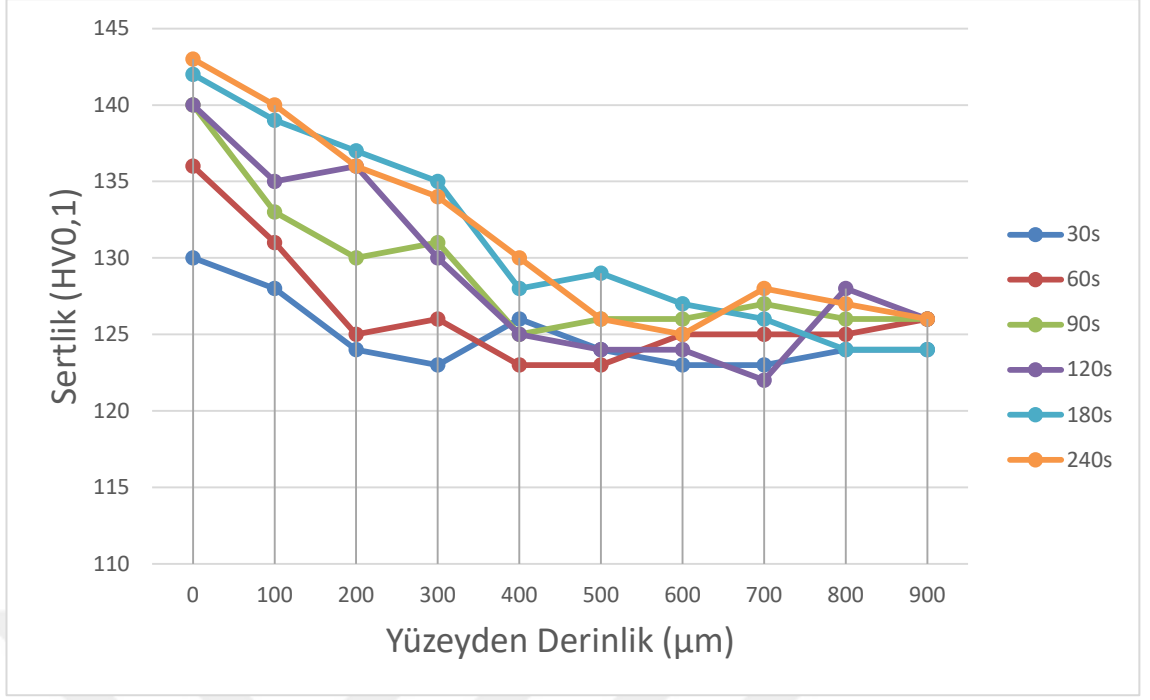
Tablo 4.3. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_z)

	İşlem görmemiş	Al_2O_3 ile yüzey temizleme amaçlı kumlama	Bilyalı dövme işlem Süresi (sn)					
			30	60	90	120	180	240
R_z (μm)	4,63	43,26	83,76	103,32	107,49	84,93	119,09	101,71
	4,18	46,61	102,71	96,98	119	112,45	120,21	102,37
	4,57	41,15	88,23	96,89	102,58	114,17	118,61	103,51
	4,75	44,1	91,58	132,64	125,28	112,86	97,26	121,18
		43,84	90,97	98,09	90,36	107,7	102,58	133,38
		41,67	89,4	101,99	120,18	118,63	117,46	113,35
		42,53	105,05	92,01	109,58	117,59	99,45	97,41
		59,71	103,92	111,79	114,28	118,33	127	110,21
		44,9	79,18	105,06	113,82	112,9	119,12	129,26
		50,46	93,61	79,92	102,67	117,34	96,94	110,3
Ortalama R_z (μm)	4,53	45,83	92,84	101,87	110,52	111,69	111,772	112,268

4.2.2. AA6082 Al alaşımı levha yüzey sertliği incelenmesi

Bilyalı dövme işlemi sonrası malzemede deformasyon sertleşmesi meydana gelmiş ve buna bağlı olarak da sertlik değerleri artmıştır. Sertlik artışı deformasyon miktarına bağlı olduğundan en yüksek sertlik değerleri (HV0,1)tüm numunelerde yüzeyde meydana gelmiştir. Yüzeyden içeri doğru ilerledikçe sertlik değerleri azalmaktadır (Şekil 4.15).

Benzer şekilde deformasyon miktarının artışına bağlı olarak en yüksek sertlik değerleri ve en geniş sertleşmiş bölge (en kalın sertlik tabakası) de en uzun dövme süreleri sonunda elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak altlık malzemesi yüzeyinde derinliğe bağlı sertlik değişimi

4.2.3. SDGP yöntemi ile Al-Zn-Al₂O₃ kompozit kaplama üretimi ve karakterizasyonu

AA6082 Al alaşımlı levha yüzeyi yüksek Al₂O₃ partikül içeriğindeki DYMET K-10-04 tozu ile mekanik temizleme / kumlama sonrası S280 mesh (nominal çap 0.0280 inç) – 0.711 mm ve S330 mesh (nominal çap 0.0330 inç) – 0.838 mm olan iki farklı bilyanın %50-%50 karışımı çelik bilyalar ile 30-240 sn arasında dövme işlemine tabi tutulmuştur.

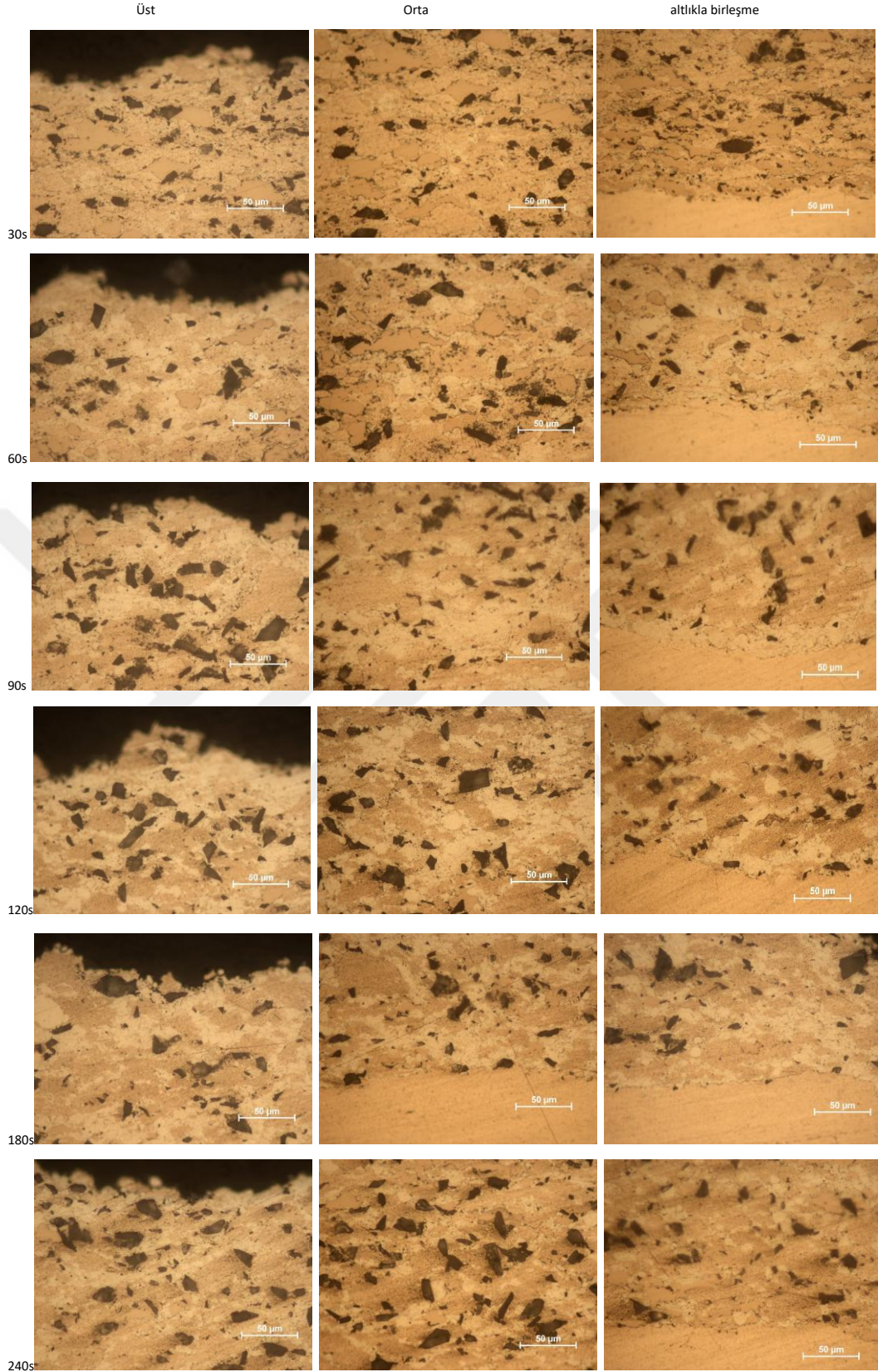
Altlık yüzeyi kaplama işlemi için hazırlandıktan sonra proses parametreleri optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen basınç değeri 0,6 MPa basınç, nozul-yüzey arası mesafe 10 mm ve toz besleme hızı 8 g/dk hızlarında 5 pas geçişle % 23-27 Al₂O₃ - % 33-37 Al- % 38-42 Zn (DYMET K-20-11) tozu kullanılarak kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama işlemi sırasında oluşan sıcaklık ölçülerek SDGP işlemi kontrol altında tutulmuştur. 30-240 sn bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş yüzeylerin kaplama işlemi sırasında, sıcaklık 50-60 °C arasında değişim göstermiş olup sıcaklık aralığı işlem için uygundur. Şekil 4.16 da kaplama işlemi sırasındaki ölçüm sonucu gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Deneysel çalışmalar sırasında kızılötesi ışınlar ile sıcaklık ölçümünün yapılması

4.2.3.1. Metalografik inceleme

Farklı işlem sürelerinde bilyalı dövme ile dövülen numuneler belirlenen soğuk püskürtme işlem parametreleri ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi sonucunda elde edilen tabakaların optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.17’de görülmektedir. Optik mikroskop altında yapılan incelemeler sonucunda oluşan tabaka içerisinde bulunan Al_2O_3 partiküllerinin homojene yakın dağıldığı görülmüştür. Şekil 4.17 ve Tablo 4.4 ifade edilen faz oranları da bu durumu desteklemektedir. Ayrıca optik mikroskop incelemelerinde tespit edilen bir diğer husus da altlık malzeme yüzeyine yakın yerlerde Al_2O_3 partiküllerinin de boyut olarak giderek küçülmesidir (Şekil 4.17). Ancak bilyalı dövme sonucunda elde edilen altlık malzeme yüzey sertlik değerlerinin birbirlerine çok yakın olması (ancak sertlik tabakasının derinliği farklıdır) nedeniyle bilyalı dövme işlem süresinin artışına bağlı olarak bu bölgede Al_2O_3 partiküllerinin boyutunda kayda değer bir farklılık tespit edilememiştir.

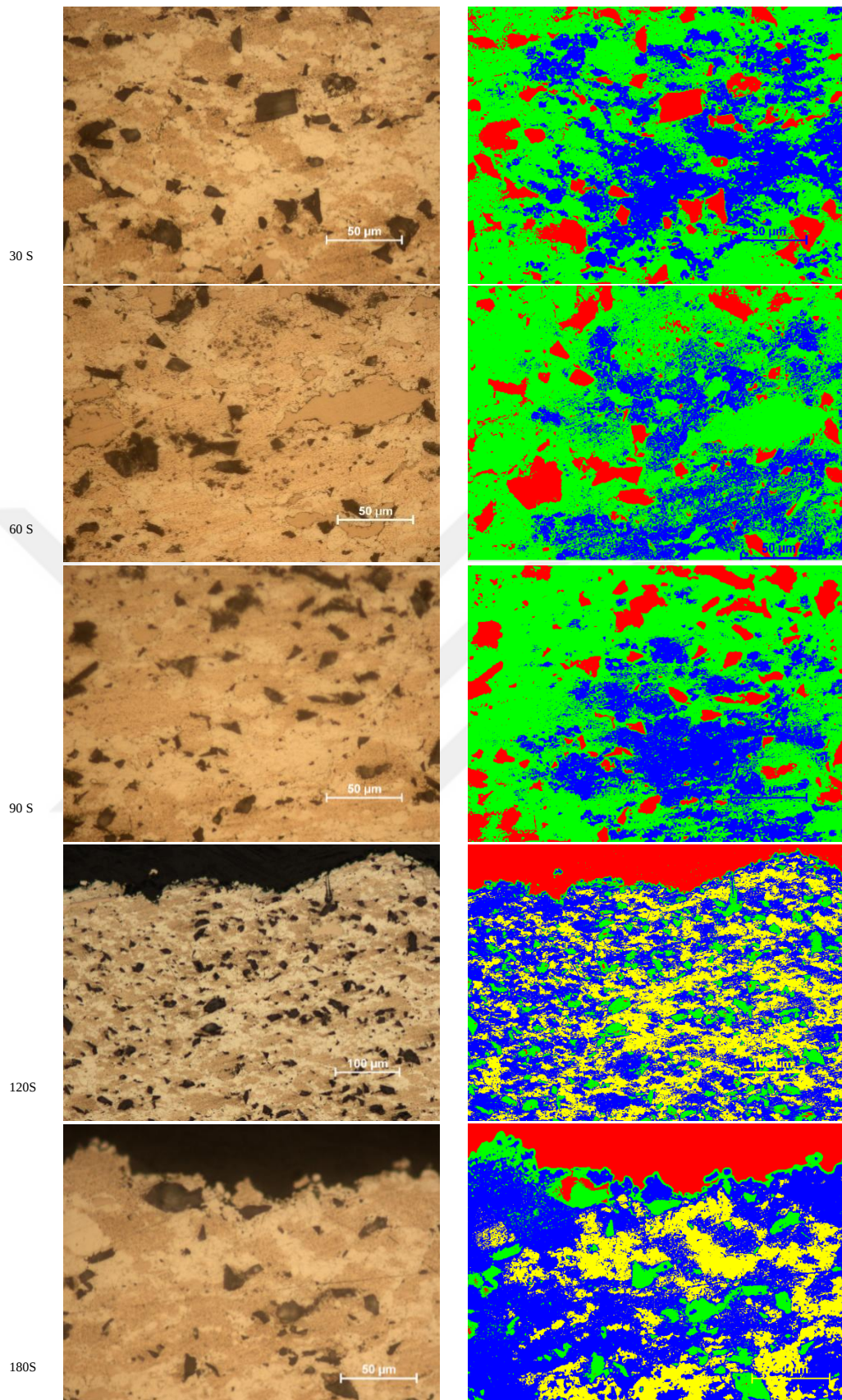


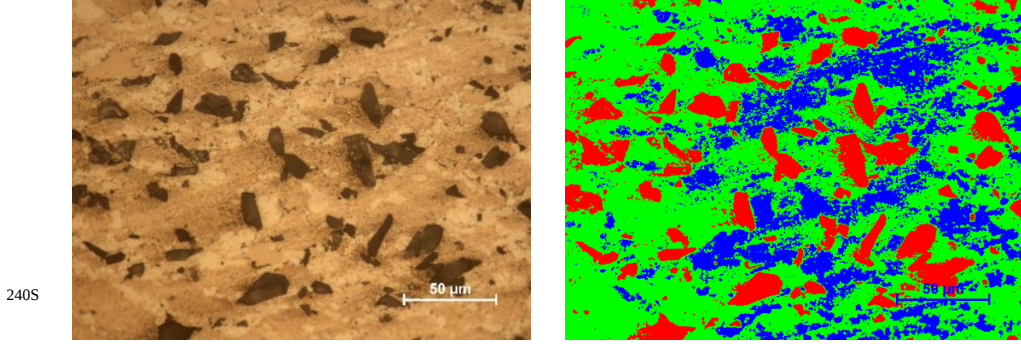
Şekil 4.17. Farklı dövme süreleri ile bilyalı dövme yöntemi ile dövülmüş numunelerin soğuk püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaların üst, orta ve altlıkla birleşme bölgelerine ait içyapı görüntüleri

Soğuk püskürtme yöntemi ile kaplama işleminde kullanılan toz karışımı ile kaplama kesiti boyunca yapılan faz analizi sonuçları karşılaştırılması sonucunda, işlem verimliliği hakkında sayısal analiz sonuçlarına ulaşılmıştır. DYMET K-20-11 toz bileşimi % Al: 33-37, % Zn: 38-42 ve % Al_2O_3 miktarı ise 23-27 arasında değişmekte iken metalografik inceleme sonucunda bu değerlere ulaşılmadığı görülmüştür. Toz besleme hızı ve basınç ile birlikte yüzey mesafesine bağlı olarak kompozit toz karışımındaki Al_2O_3 partikülleri saçılma eğiliminde artış göstermekte ve yüzeye yapışmadan yüksek hız nedeni ile sıçramaktadır. Zn (7.14 cm^3) ise Alüminyum (2.7 g/cm^3) a göre daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan gaz jeti içerisinde Zn toz partikülleri daha düşük hızlara ulaşmaktadır. Bu düşük hız nedeni ile de alüminyum a göre daha düşük oranlarda birikmektedir. Şekil 4.18 ve Tablo 4.4'te faz analizi ve analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Bilyalı dövmede işlem sürelerine bağlı olarak üretilen kaplamaların faz oranları

Kaplama işleminde kullanılan DYMET K-20-11 toz bileşimi	Al (%)	Zn (%)	Al_2O_3 (%)
	33-37	38-42	23-27
Bilyalı dövme işlem süresi (s)	Al-Zn- Al_2O_3 kompozit kaplama faz analizi sonuçları		
30	57,061	29,677	13,262
60	63,668	25,306	11,025
90	62,939	24,314	12,746
120	49,454	36,911	13,634
180	60,255	26,538	13,205
240	60,549	22,991	16,460

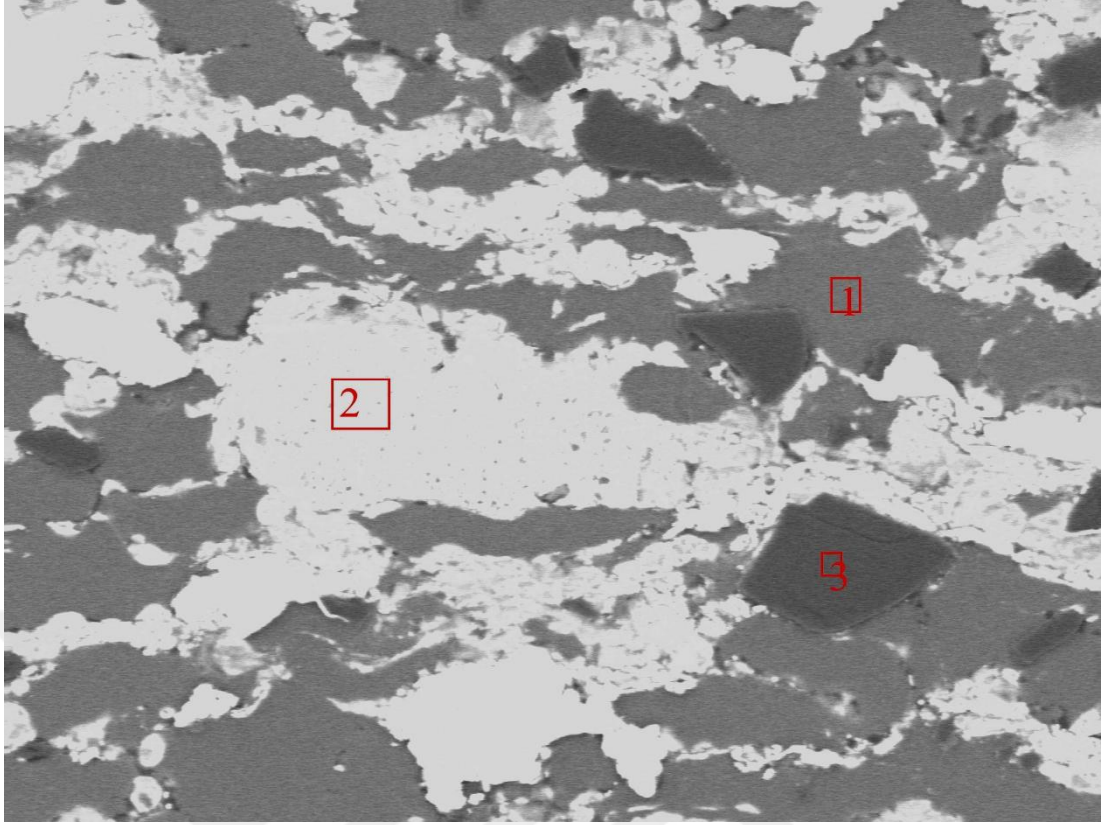




Şekil 4.18. Farklı dövme süreleri ile bilyalı dövme yöntemi ile dövülmüş numunelerin soğuk püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaların faz oranları

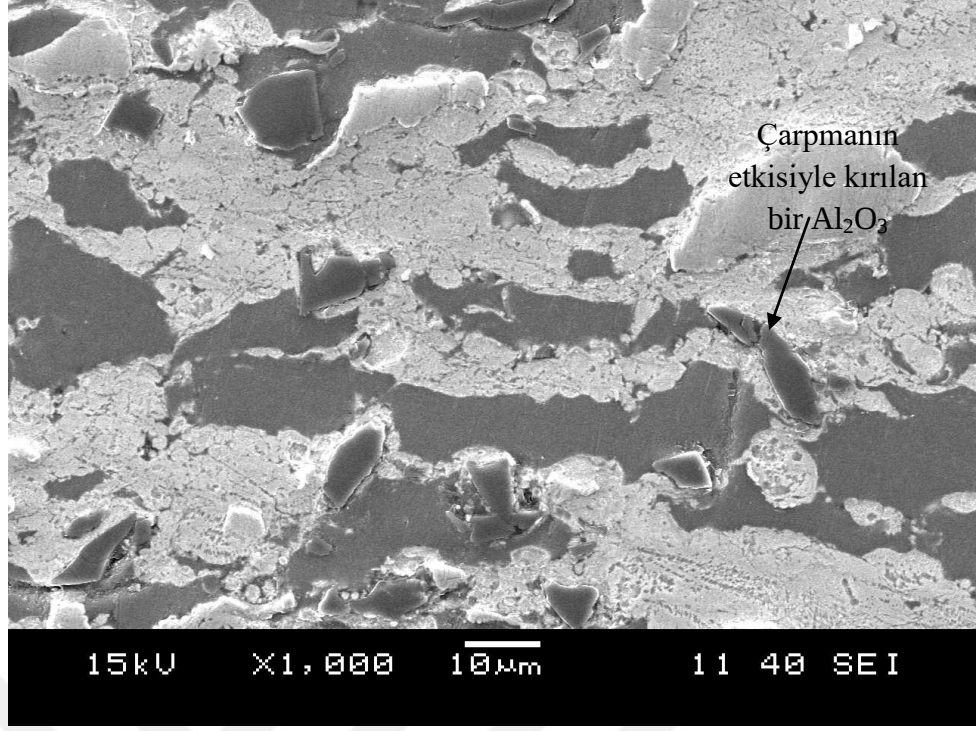
4.2.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu incelemeleri (SEM-EDS)

Taramalı elektron mikroskobu incelemeleri ile, optik mikroskop ile görüntülenemeyen yapısal incelemelerin, faz morfolojisinin ve dağılımın, altlık-kaplama arayüzey uyumunun, kompozit kaplama oluşumu ve fazlar arasındaki etkileşimin ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak secondary electron ve back scattered elektron modunda ön incelemeler gerçekleştirilerek fazların tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Soğuk püskürtme ile kompozit kaplama oluşturma plastik deformasyon ile birikme esasında gerçekleştiği için 30-240 sn bilyalı dövme uygulanan AA6082 Al alaşımından üretilen farklı sertlik değerlerine sahip levha yüzeyine biriktirilen kaplamaların altlık-kaplama arayüzeyi ve mikroyapısal karakterizasyonunda, elementel analiz, haritalama ve çizgisel analiz desekli EDS incelemeleri yapılmıştır. Şekil 4.19’da gösterildiği üzere; optimum proses parametreleri belirlenmiş soğuk spray işlemi ile üretilmiş kaplamadaki SEM-EDS analizinde Al: koyu gri renkte, Zn: açık gri renkte ve Al_2O_3 ise keskin köşeli morfolojide ve siyah renkte görünmektedir.



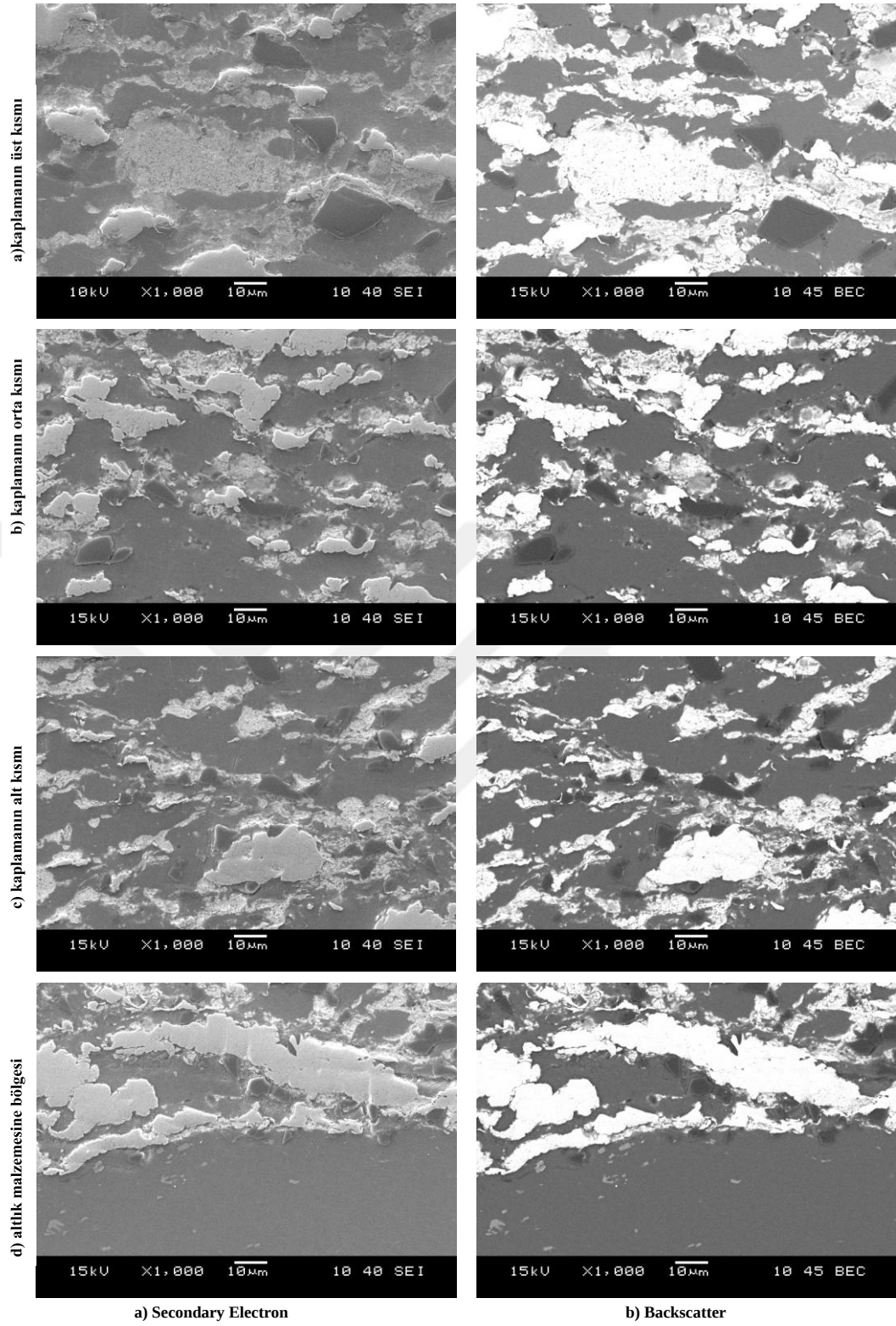
Şekil 4.19. SDGP işlemi sonrası kompozit kaplama kesitindeki faz tanımlamaları
1:Al, 2: Zn ve 3: Al_2O_3

Kaplamayı oluşturan alüminyum ve hem de çinko metali partiküllerinin yüzeyden altlık malzemeye doğru deformasyonun etkisiyle yassılaştığı SEM incelemesinde görülmektedir. Çinko partikülleri sahip olduğu düşük sertlik ve dayanımı nedeniyle altlık malzemeye yaklaşıldıkça aynı zamanda parçalanarak ufalanmaktadır (Şekil 4.19). Buna ek olarak kaplama tabakası içerisinde gözenek oluşumunun da çok sınırlı ve hatta bazı numunelerde ise oluşmadığı tespit edilmiştir. Kaplama toz karışımı içerisinde temel olarak yüzeyi aktif hale getirmek için konulan Al_2O_3 partiküllerinin kaplama işlemi sonrasında tabaka içerisinde kaldığı ve tabakanın üst yüzeyinden altlık malzemeye doğru inildikçe boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi bilyalı dövme sonucu elde edilen sert yüzeye çarpan Al_2O_3 partiküllerinin çarpmanın etkisiyle kırılarak ufalanmasıdır. Bu ufalanmaya neden olan kırılmaların bir kısmı, bazı Al_2O_3 partikülleri üzerinde bulunan kırıklardan da görülmektedir (Şekil 4.20).

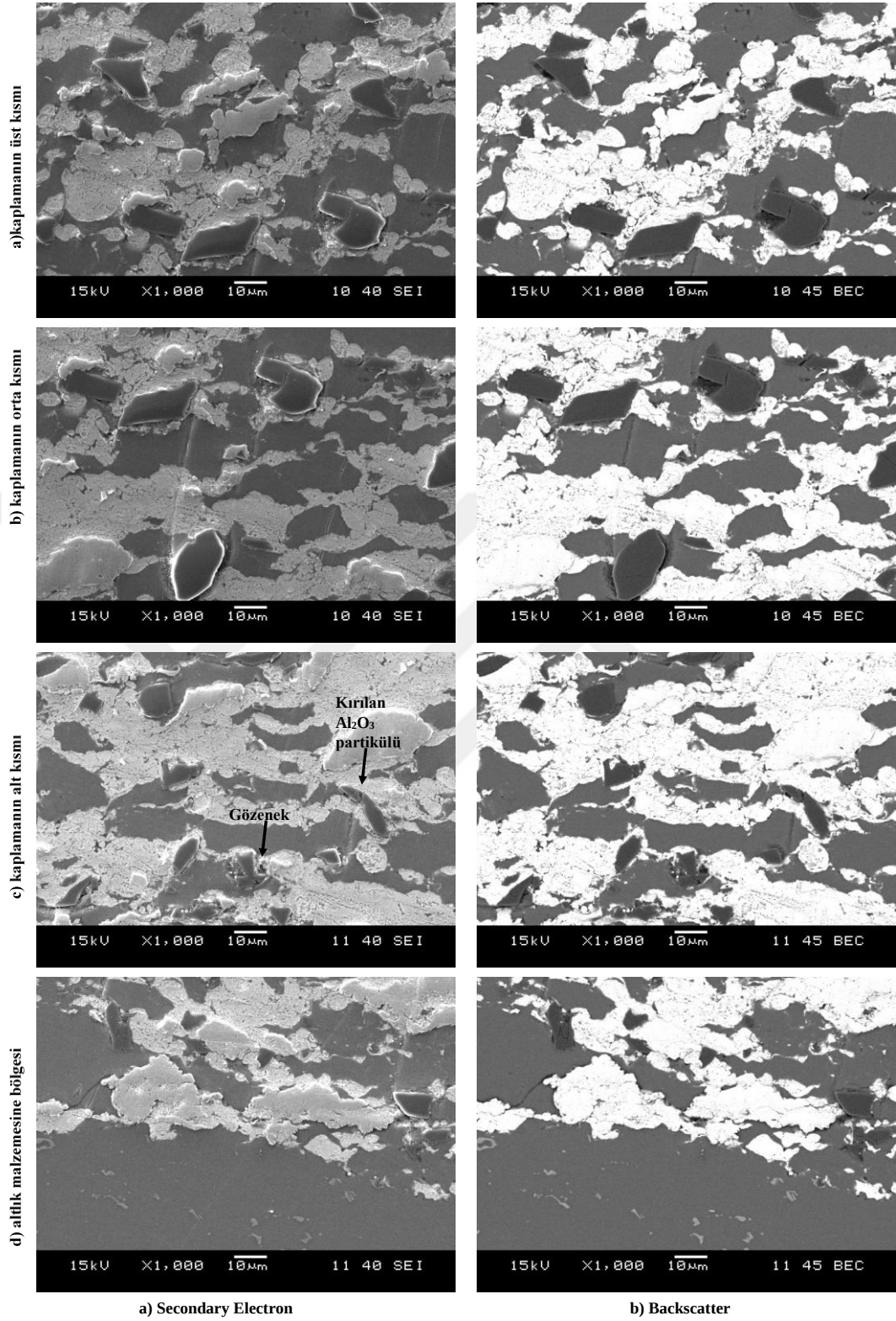


Şekil 4.20. SDGP işlemi sonrası kompozit kaplama kesitindeki faz tanımlamaları

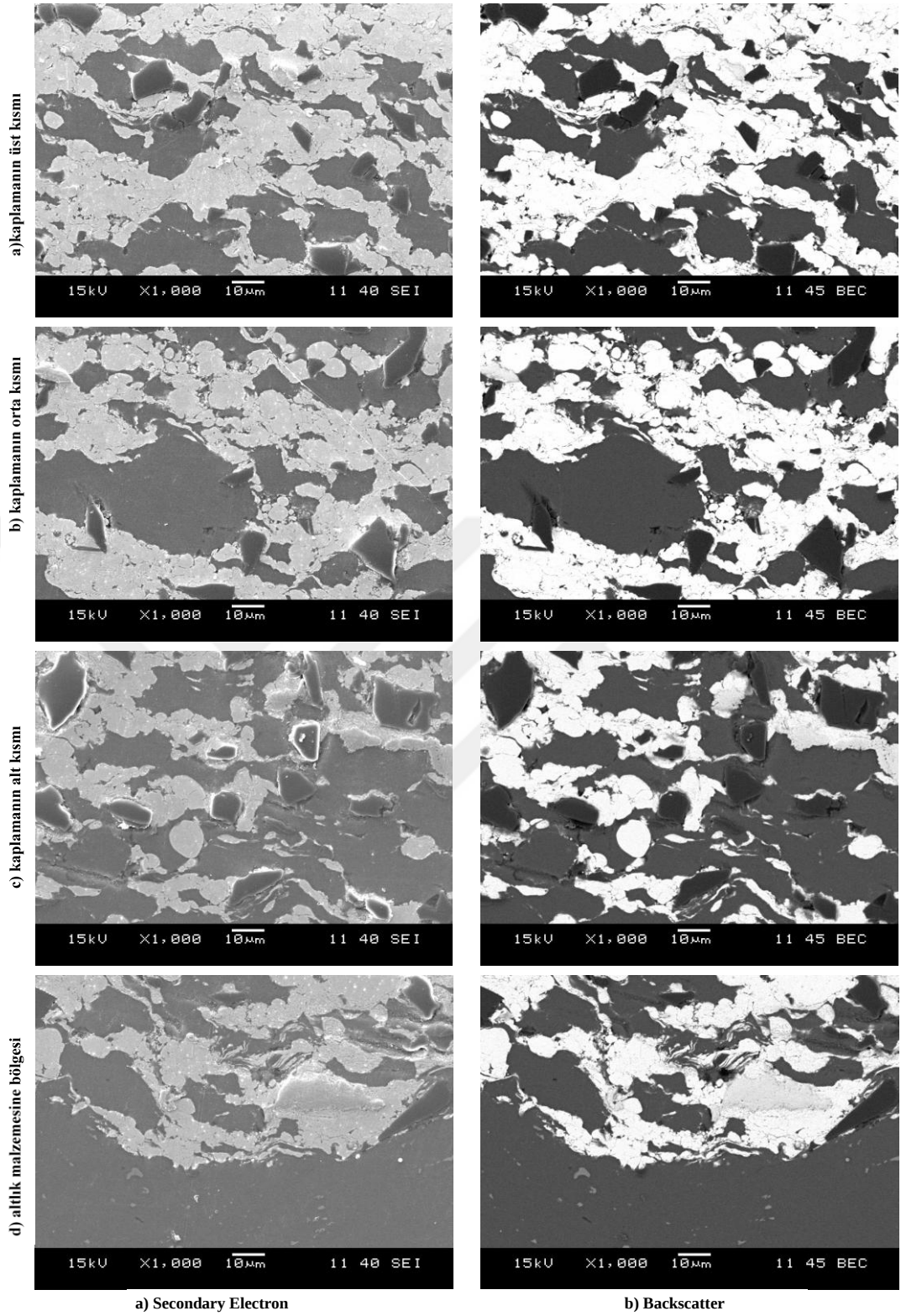
Bilyalı dövme işlemine tabi tutulan altlık malzemesi yüzeyinde oluşturulan kompozit kaplamalara ait incelemeler ise süre ve kaplama kesiti boyunca incelenmiştir. Şekil 4.21-4.26'da 30-240 sn arasında bilyalı dövme işlemine tabi yüzeylere oluşturulan kaplama faz ve morfolojik özellikleri gösterilmiştir.



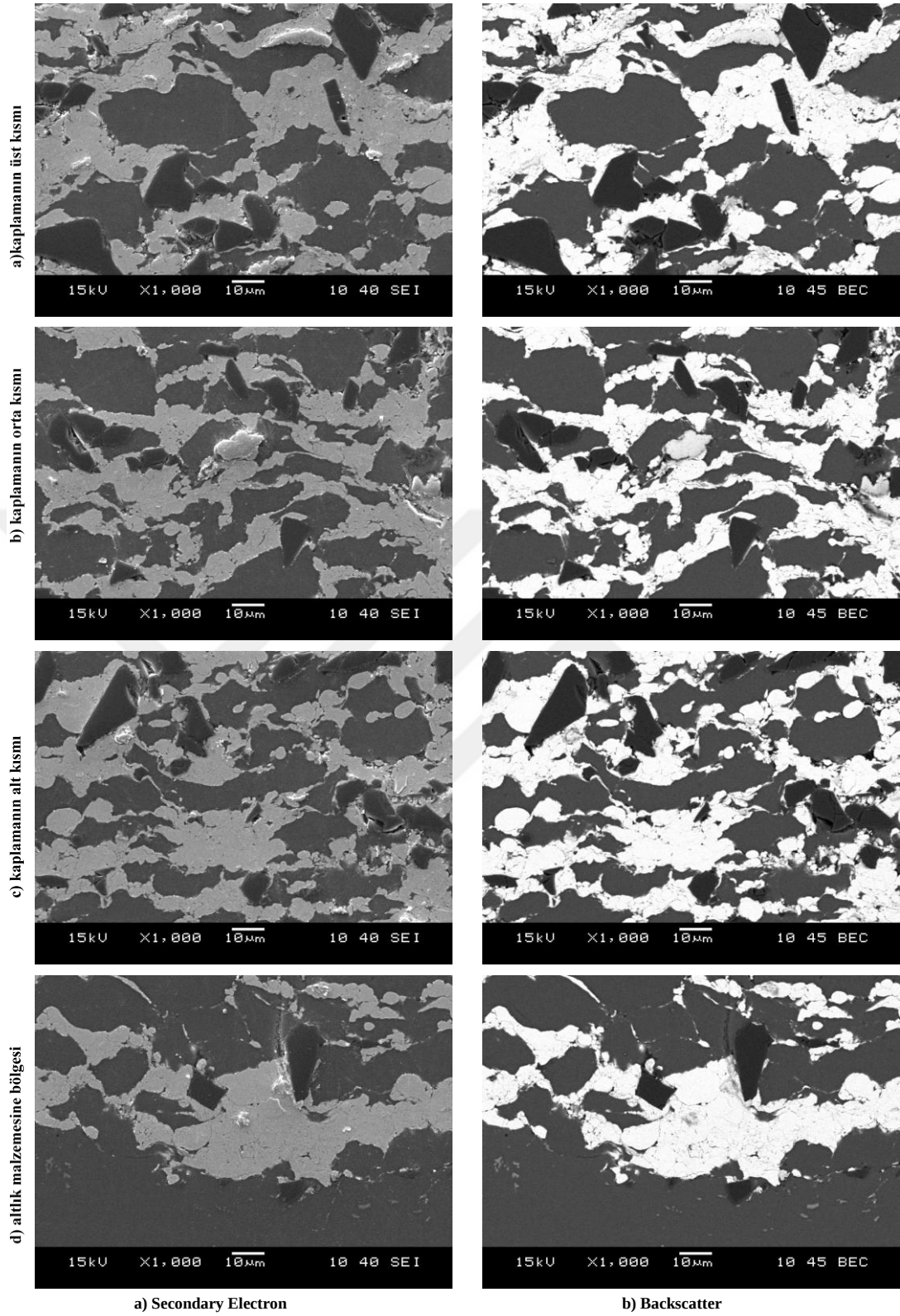
Şekil 4.21. 30s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi



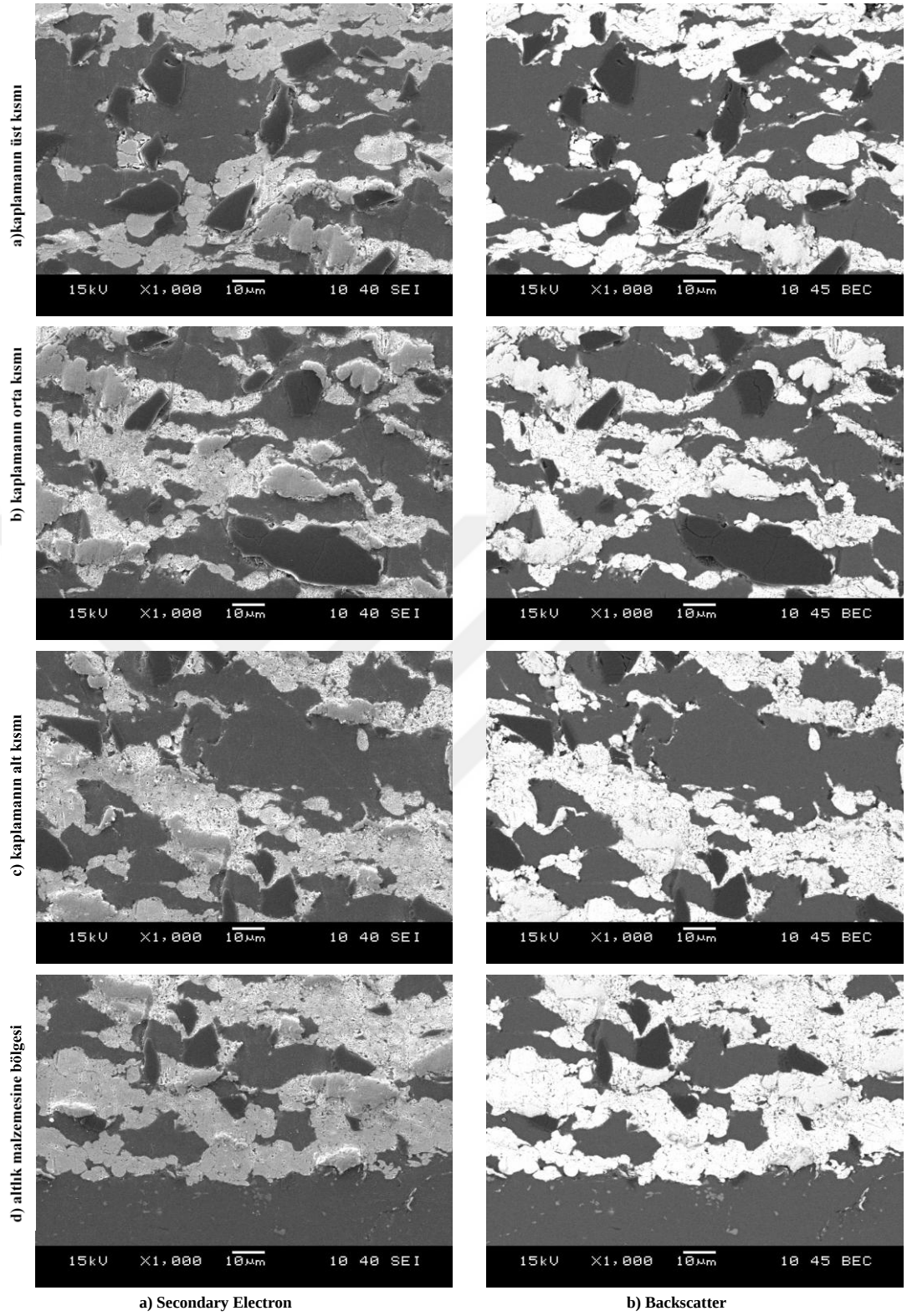
Şekil 4.22. 60s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi



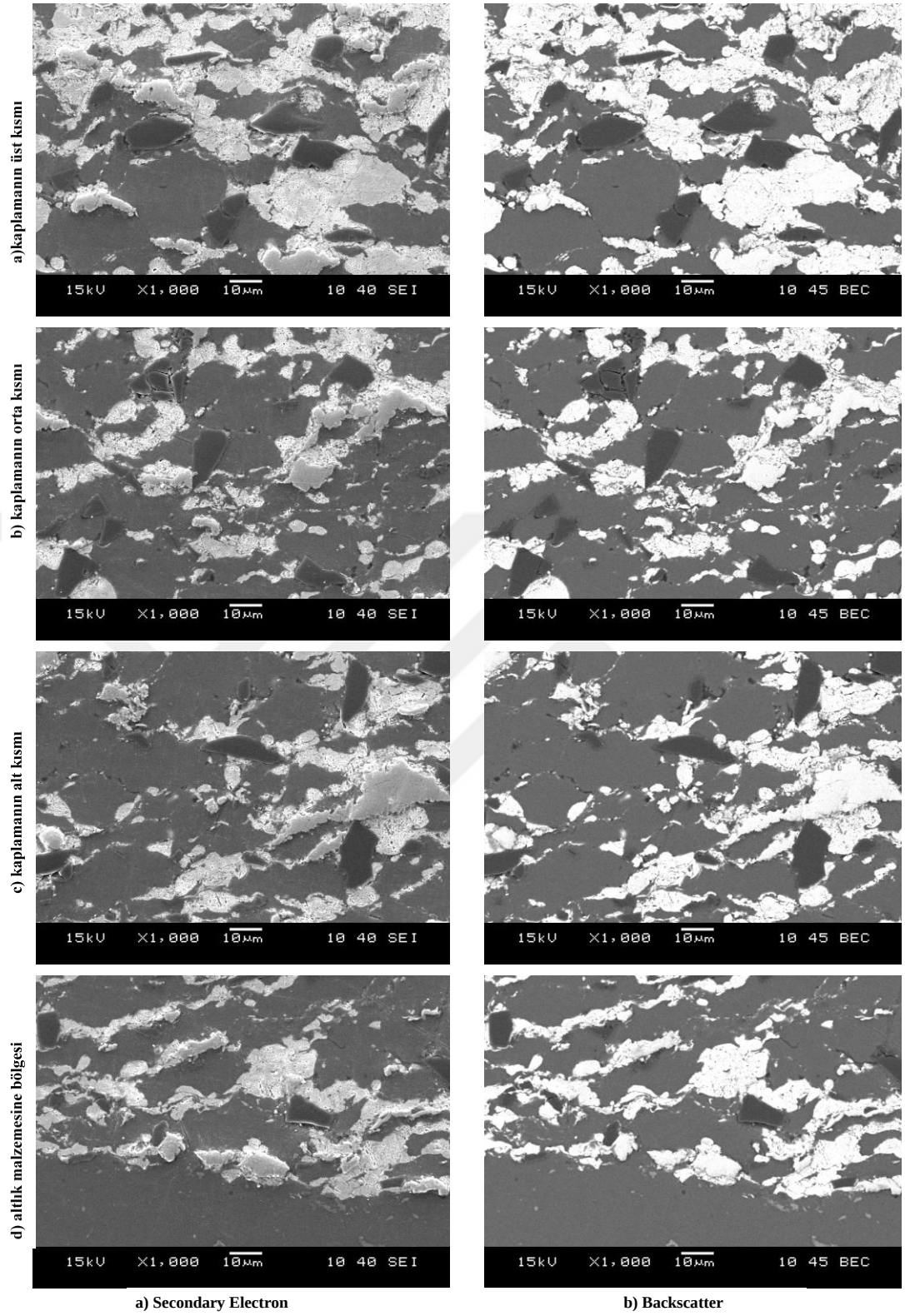
Şekil 4.23. 90s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi



Şekil 4.24. 120s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi



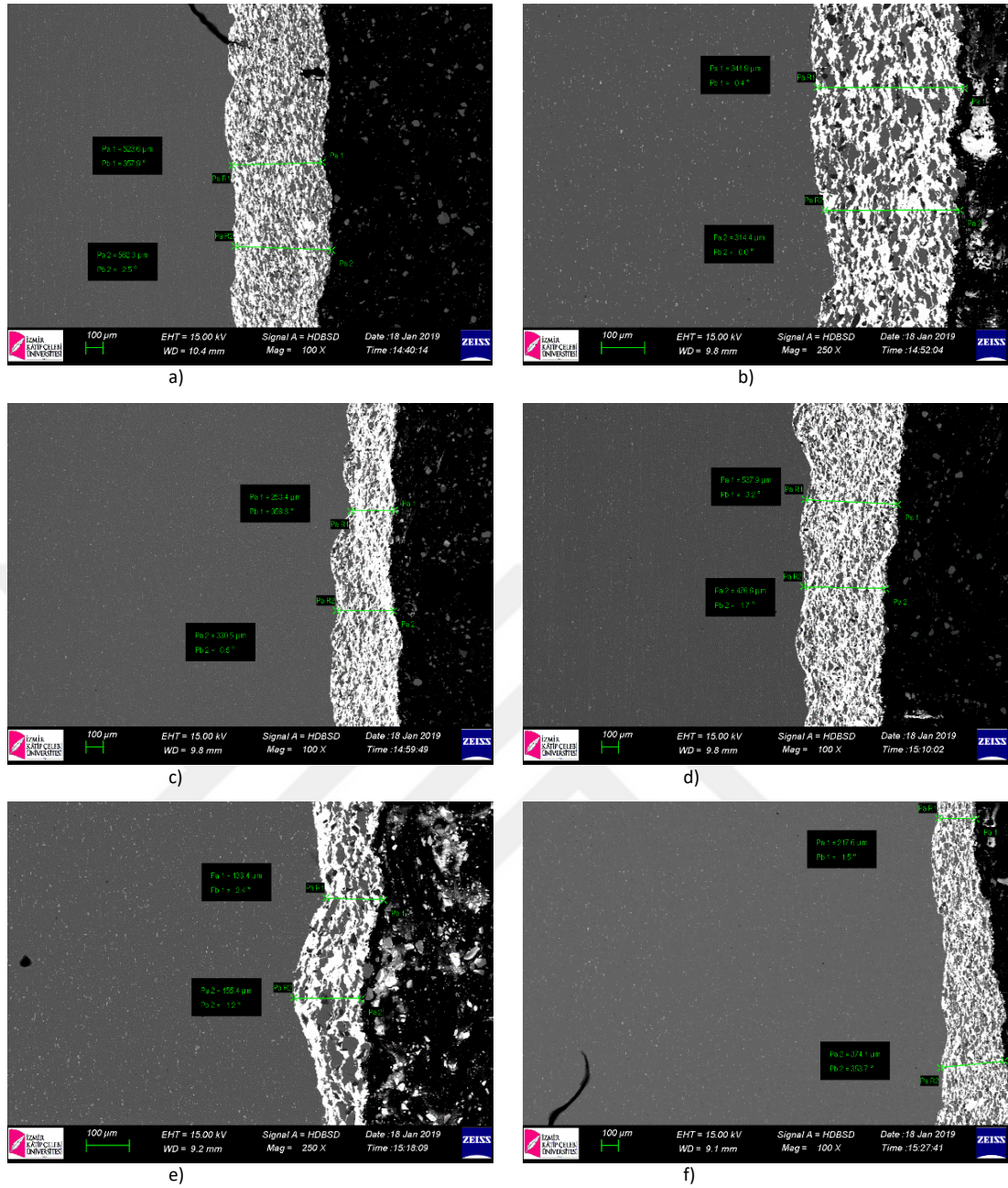
Şekil 4.25. 180s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi



Şekil 4.26. 240s numunesinde kaplama işlemi sonrasında kompozit yapıyı oluşturan metal ve seramik partiküllerin yüzeyden itibaren boyut ve şeklinin değişimi

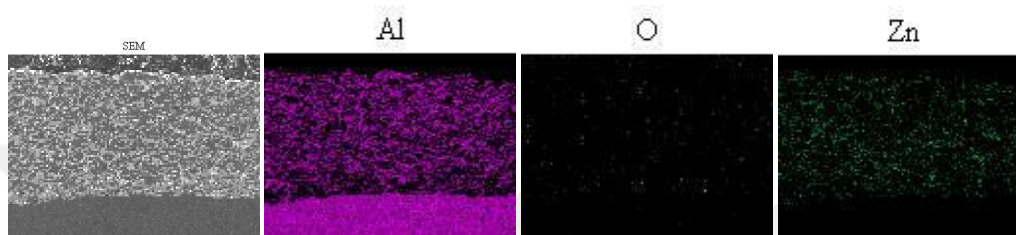
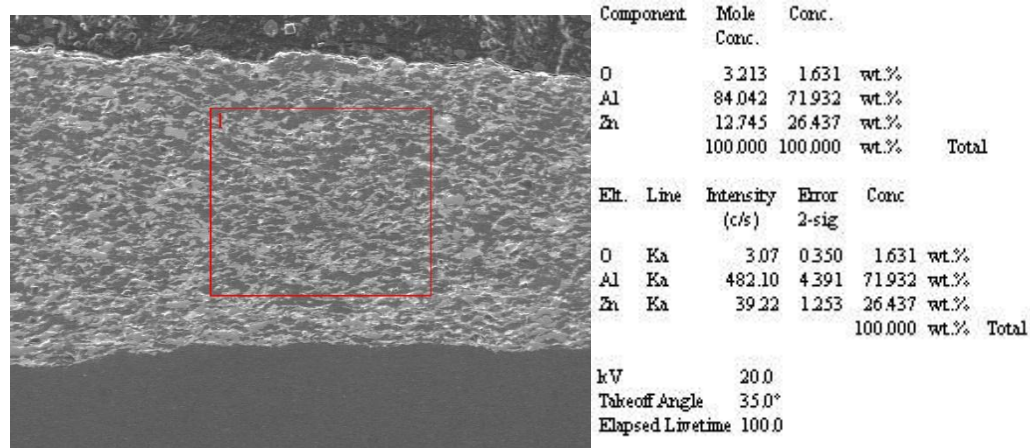
SDGP yönteminde, kaplama veya altlık yüzeyine toz biriktirme işlemi yüksek hızlarda yüzeye çarpan ve saçılan partiküllerin etkileşimleri ile gerçekleşmektedir. Geri seken bazı partiküllerin geri dönüş açısı gelme açısıyla aynı veya yakın olduğu zamanlarda bu partiküller geri dönerken kendini yine arkadan gelen akış yoğunluğu içerisinde bulur ve tekrar geri dönerek kaplanacak malzemeye bir daha çarparlar. Bu bir döngü içerisinde devam ettikçe, geri dönen partiküllerin geri dönüş mesafeleri zamanla azalmaktadır. Sonuç olarak yüzeye gelen ve saçılan partiküller arasındaki yoğun etkileşimden konsantrasyonu giderek artan bir bölge oluşmaktadır. Yüzeyde bu mekanizma gerçekleşirken altlık malzemesinin mekanik özellikleri de büyük önem taşımaktadır. Altlık sertliği arttıkça Al ve Zn tozların plastik deformasyonu artarken Al_2O_3 esaslı tozlar ya kırılarak parçalanıp depozitlenir yada geri saçılmaktadır. Şekil 4. 21-26 arasında 30 s ve 240 s bilyalı dövme işlemi uygulanmış AA6082 al alaşımı yüzey sertlikleri 130-145 HB arasında değişmekte ve işlem süresi arttıkça sertlik derinliği 200 μm 'den 600 μm 'ye artış göstermektedir. Tozların yüksek hızlar ile çarptığı yüzey sertlik değerinde maksimum 15 HB yaklaşık olarak 52 MPa mukavemet farkı ortaya çıkması; Al_2O_3 partiküllerinin 240 sn işlem görmüş yüzeyde (8-10 μm) 30 sn işlem görmüş yüzeye (12-15 μm) göre daha ince dağıldığı ve bazı noktalarda kırılmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir.

SEM incelemelerinde kaplama kalınları da belirlenmiştir. Kaplamanın 3 farklı yerinden alınan ölçümlerde ortalama kaplama kalınlığı; 30 s: 532 μm , 60 s: 321 μm , 90 s: 295 μm , 120 s: 485 μm , 180 s: 145 μm ve 240 s: 292 μm olarak hesaplanmıştır. Ancak kaplama işlemi manuel olarak yapıldığından işlem parametrelerinin kaplama kalınlığına etkisi ele alınmamıştır. Ölçüm sonuçları şekil 4.27'de verilmiştir.

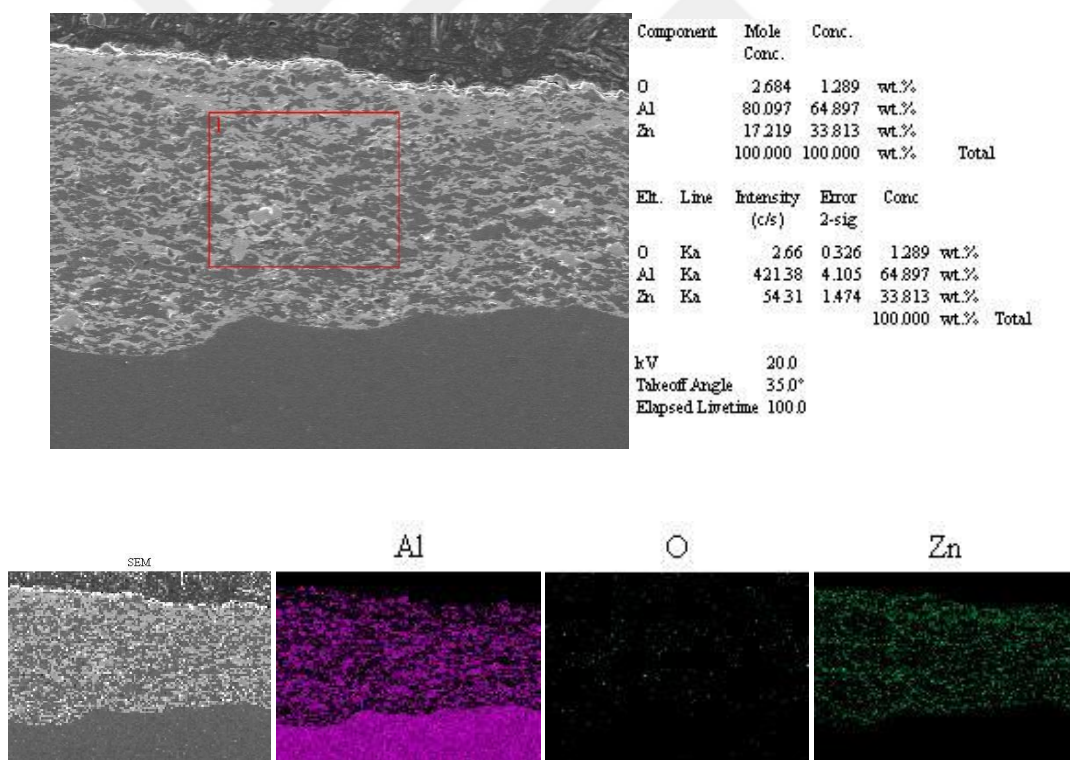


Şekil 4.27. a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, d) 120 s, e) 180 s ve f) 240 s işlem görmüş yüzey üzerine kaplama uygulaması ve kalınlık incelemesi

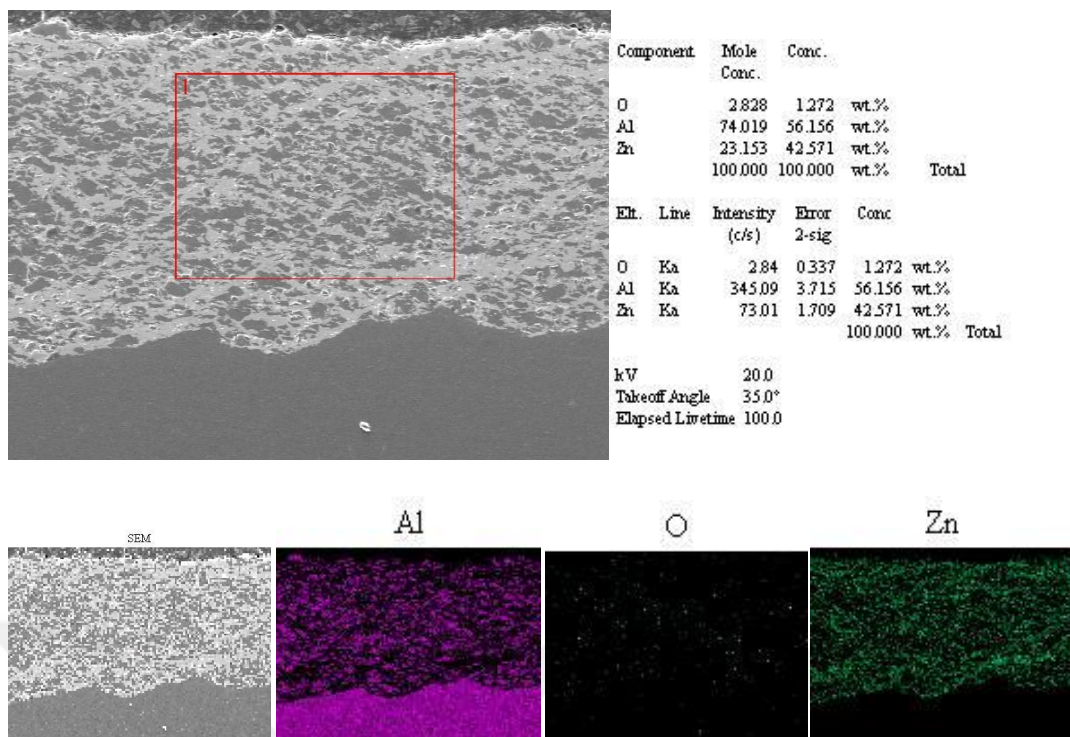
SEM-EDS analizleri ile kompozit kaplamalara ait elementel dağılım ve oranları belirlenmiştir.



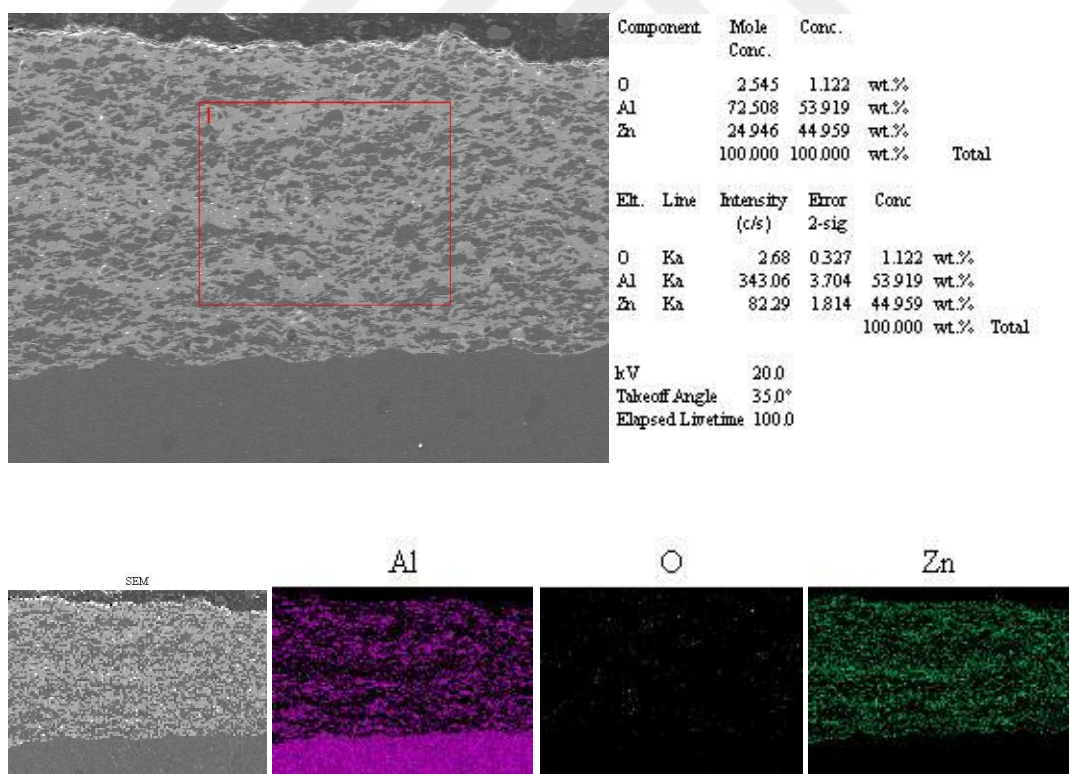
a)



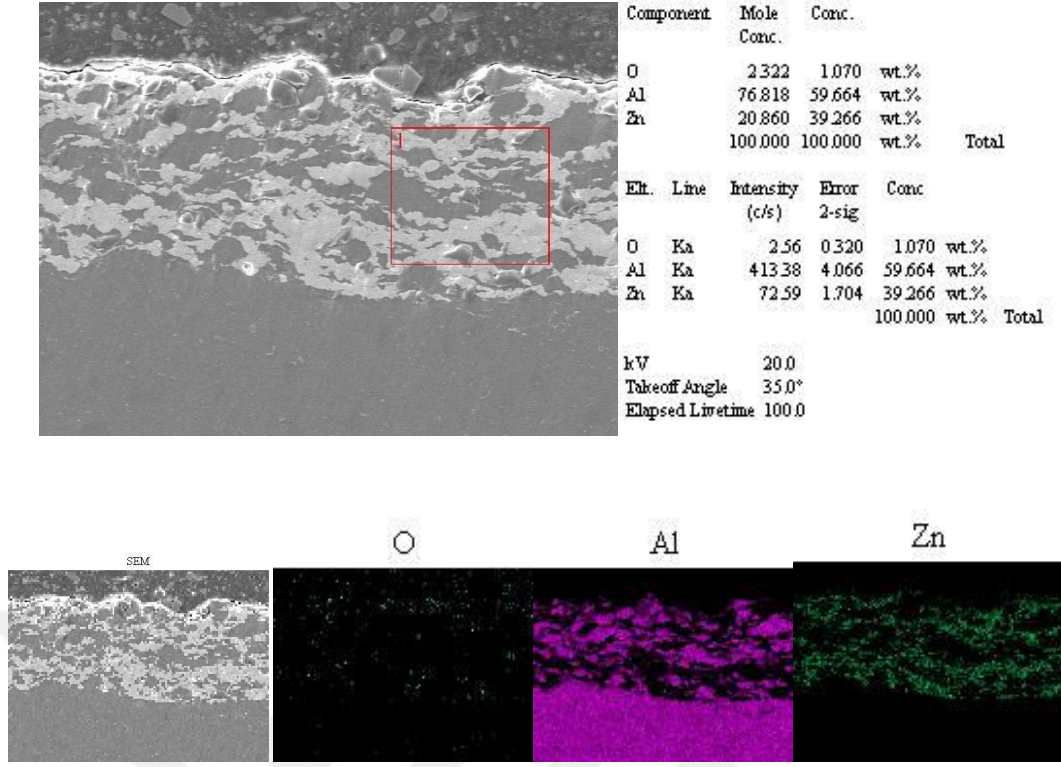
b)



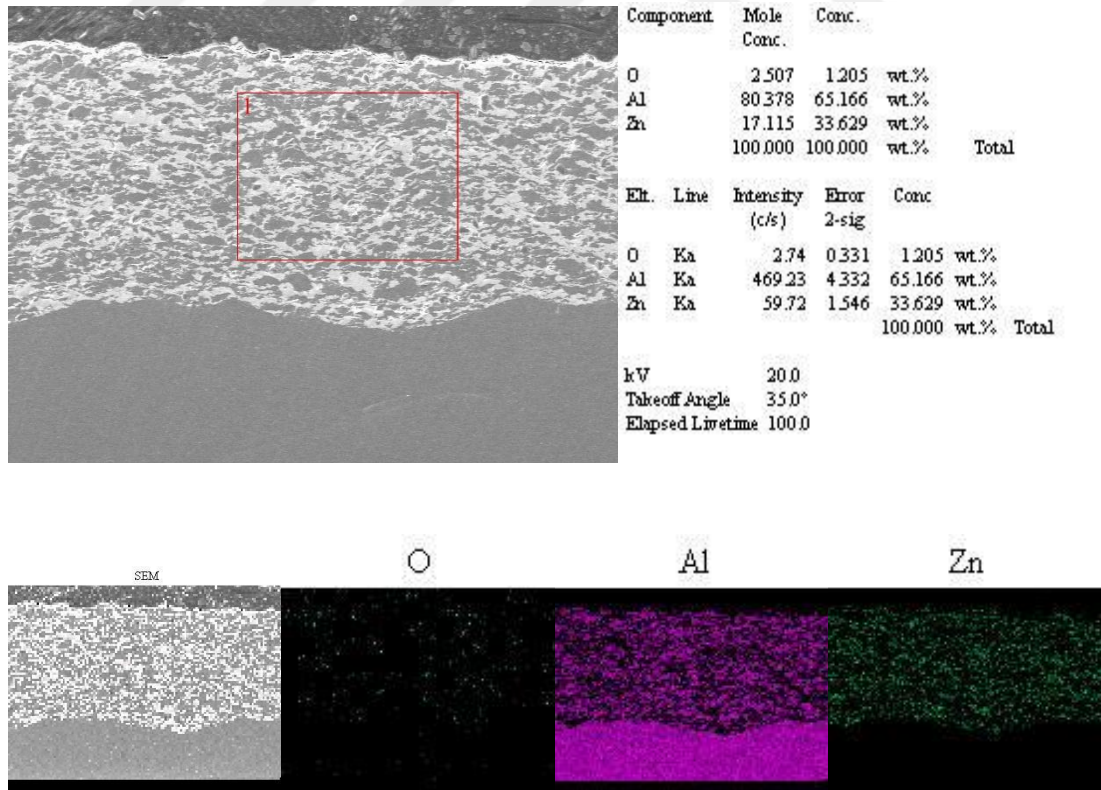
c)



d)



e)



f)

Şekil 4.28. a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, d) 120 s, e) 180 s ve f) 240 s işlem görmüş yüzey üzerine kaplama uygulaması ve elementel analiz sonuçları

SEM-EDS incelemelerinde kompozit kaplama kesitinde Al ve Zn miktarındaki değişimi incelenmiştir. EDS analizinde oksijen tespiti zor ve sapması yüksek gerçekleştiği için analizlerde dikkate alınmayarak yorum yapılmaktadır. Kesit içinde 30 s ile 240 s kodlu numunelerde Zn miktarında % 26,43 ten % 33, 629 a artış, Al (d: 2,7 gr/cm³, E: 70 GPa, Sertlik: 160 -550 MPa) miktarında ise % 71,93 ten % 65,16 ya düşüş söz konusu olmuştur. EDS analizi spektral analiz kadar doğru sonuç vermese de haritalama ile bağlı olarak değişim gözlemlenebilmektedir. Bu sonuçlar altlık malzeme sertliği arttıkça sert olan metalik kaplama tozunun (Zn, d: 7,14 gr/cm³, Sertlik: 327-412 MPa, E: 108 GPa) daha fazla biriktiğini göstermektedir. Benzer şekilde altlık malzeme sertliği arttıkça da yumuşak olan metalik kaplama tozunun (Al) daha az biriktiğini göstermektedir. Bu sonuç Hussein ve ark. bakır üzerine Al kaplama ve alüminyum üzerine bakır kaplama yaptığı çalışmaların sonucuna benzerdir [109]. Tanvir ve ark. bakır üzerine alüminyumun daha fazla birikmesinin sebebini yüzey sertliğinin artmasının biriken tozlardaki deformasyon miktarını arttırmasına ve dolayısıyla da metalurjik birleşmeyi (soğuk kaynak olarak) arttırmasına bağlamaktadırlar.

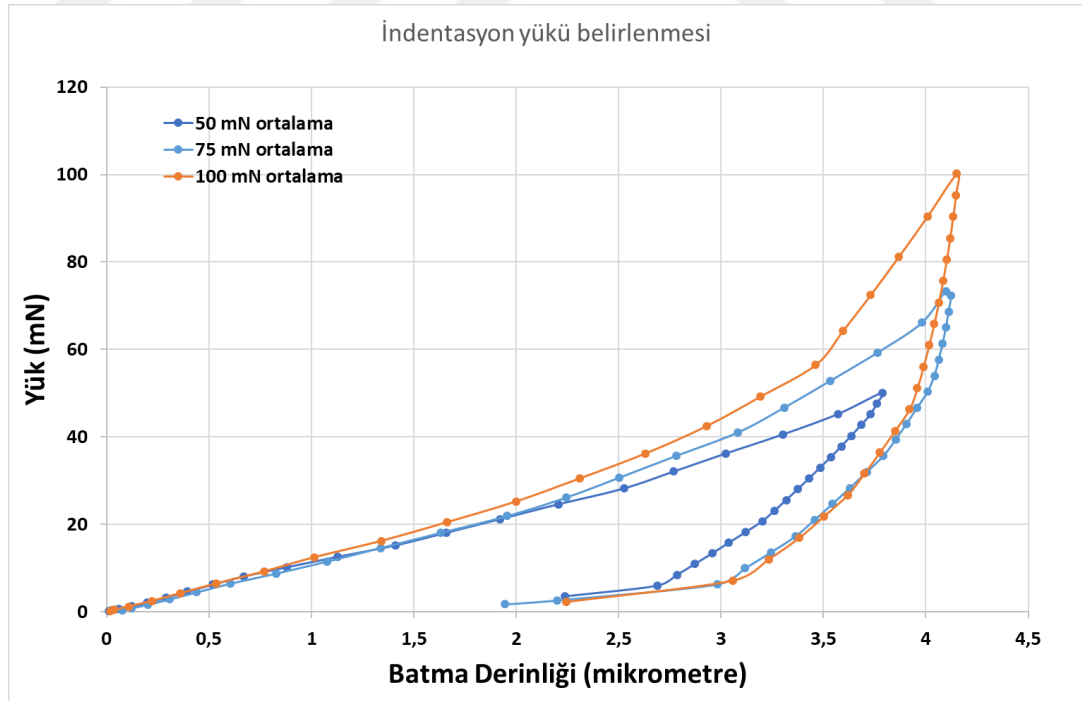
Aynı üretim şartlarında sadece altlık malzemesinin yüzey sertliği ve setlik derinliği değişimi ile kaplamanın ilk oluşan tabakası ile bunun üzerine biriken tabakalarda Al-Zn-Al₂O₃ yapısında Şekil 4.28’de gösterildiği gibi dağılım ve oransal değişimler ortaya çıkarılmıştır. Kaplama yapısı genel olarak homojen ve düşük poroziteye sahip olacak şekilde oluşmuştur.

4.2.3.3 Nanoindentasyon yöntemi ile mekanik özelliklerin belirlenmesi

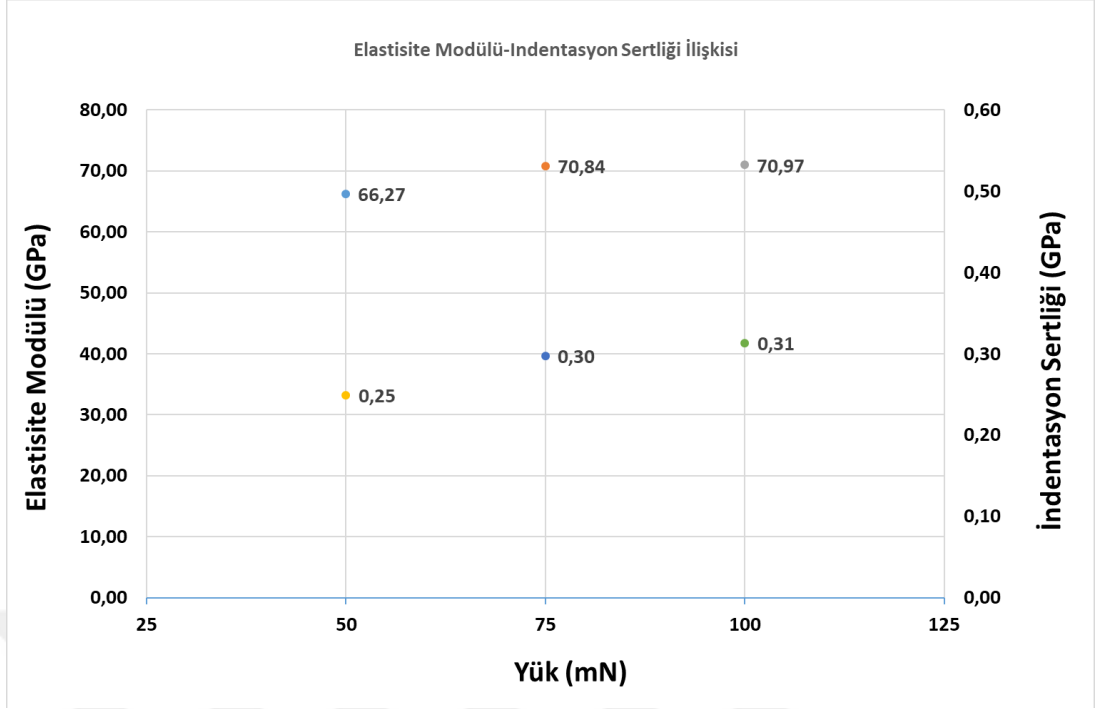
SDGP yöntemi ile üretilen Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplamaların mekanik özellikleri nanoindentasyon testi ile belirlenmiştir. Bu test sonucunda sertlik, elastisite modülü, % elastik toparlanma oranı gibi elasto plastik malzeme davranışları analiz edilerek mekanik karakterizasyon tamamlanmıştır. Kaplama yapısında farklı dağılım, oran ve morfolojide elementel / faz özellikleri belirlenmesi, AA6082 Al alaşımına bilyalı dövme işlemi uygulanması ve bu nedenle kaplama-altlık arasında mekanik açıdan uyum / uyumsuzluk seviyesinin belirlenmesinin yanı sıra bir sonraki aşama olan simülasyon destekli analizlerde kaplamanın akma / hasar (failure) gerilmesi ve test sırasında plastik davranışının (pile-up ve sink-in) ortaya çıkarılması için veriler elde edilmiş olacaktır.

Bu yöntemde; konik bir indenter numuneye bastırıldığında hem elastik hem de plastik deformasyon bir arada meydana gelmektedir. Oluşan iz tamamen indenterin şeklini almaktadır. Fakat ilk boşaltma boyunca elastik toparlanma, temas şeklinin değişmesine neden olur. Tekrar yüklemede ise tamamen elastik deformasyonla iz, yeniden indenterin şeklini alır. Bu çevrimde boşaltmada meydana gelen olay, tekrar yüklemede meydana gelenin tam tersidir. Nano indentasyon cihazı ile 0.1 mN'a kadar düşük büyüklüklerde yük uygulanabilmektedir. Bu şekilde ince filmlerin mekanik özellikleri de ölçülebilmektedir. Bir ölçüm içerisinde birden çok yükleme geri yükleme yapılarak derinliğe bağlı mekanik özelliklerin değişimi belirlenebilmektedir.

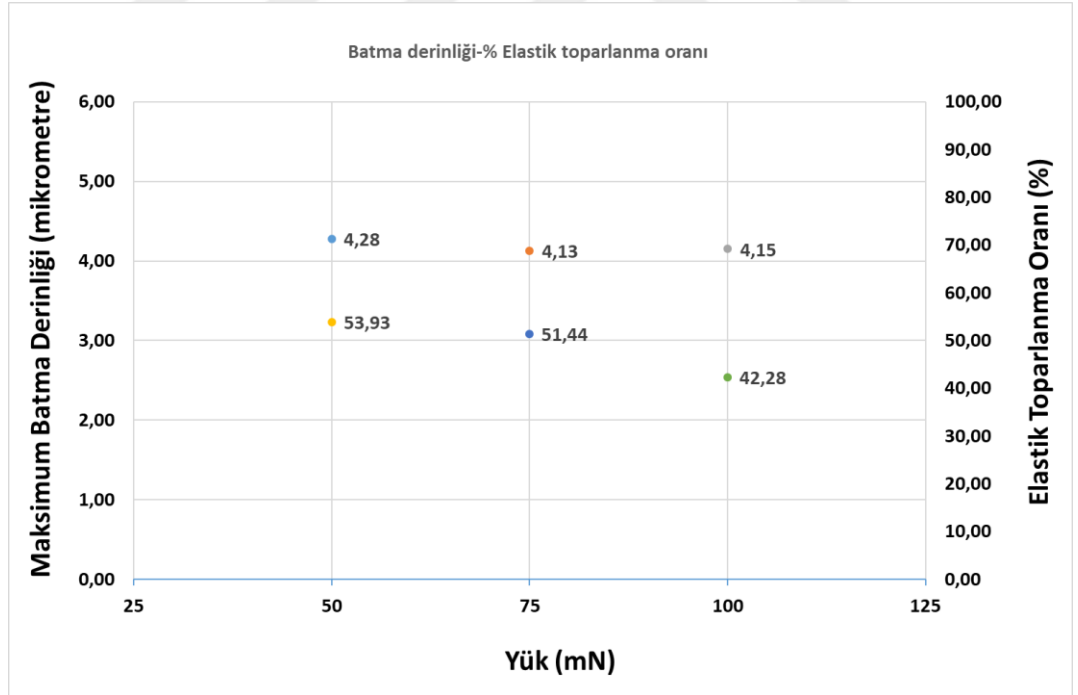
Teste başlamadan önce kaplama veya test edilecek malzeme için test yükünün belirlenmesi amacı ile load-profile testi uygulanmıştır. 50, 75 ve 100 mN yük altında yükleme – yük boşaltma eğrisi (loading-unloading), elatisite modülü, sertlik, % elastik toparlanma-batma derinliği ilişkisi incelenerek test yükü belirlenmesi Şekil 4.29'da gösterildiği gibi yapılmıştır.



a)



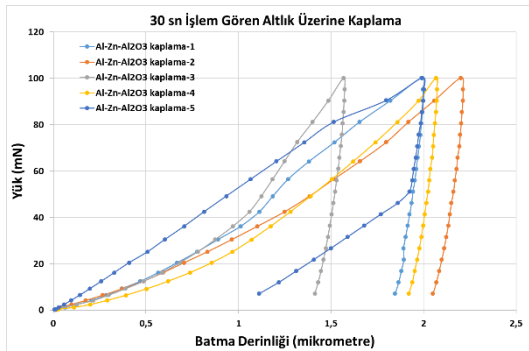
b)



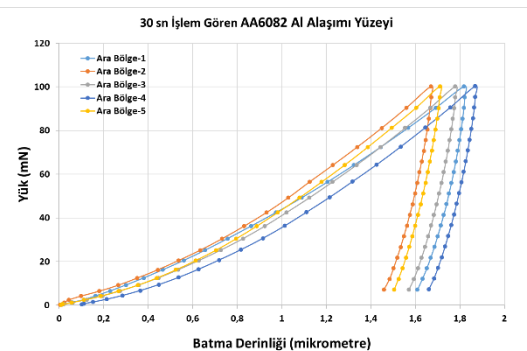
c)

Şekil 4.29. AA6082 Al alaşımından üretilmiş altlık olarak kullanılacak levhaya yapılan a) yükleme-yük boşaltma, b) Elastisite Modülü-İndentasyon sertliği ve c) % elastik toparlanma oranı-batma derinliği ilişkisi

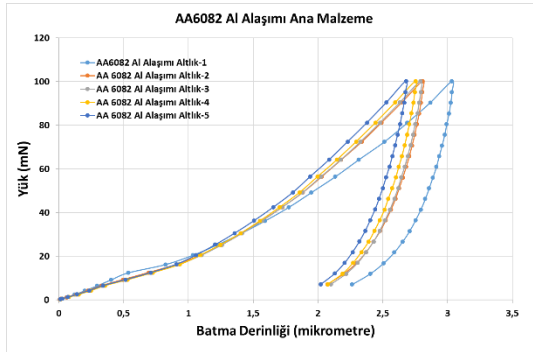
İndentasyon test yükü belirlenmesi amacı ile 50, 75 ve 100 mN maksimum yük değerine sahip yükleme-yük boşaltma eğrileri elde edilmiştir. Her bir yükte toplam 5 test yapılmış olup, şekil 4.29-a'da ortalama değerler alınarak grafik çizilmiştir. Eğrilerin yük boşaltma bölgesinden yapılan Elastisite modülü hesaplamasından elde edilen değerler ise yüke bağlı olarak elde edilmiş olup, şekil 4.29-b'de verilmiştir. Uyglanan yük altında elde edilen maksimum batma derinliği ve yük boşaltıldıktan sonra elde edilen artık batma derinliği baz alınarak malzemenin elastik toparlanma oranı hesaplanmıştır. Bu testlerin farklı yüklerde yapılmasının gerekçesi ise; test edilen malzemenin makro boyuttaki özelliklerine yaklaşacak bir test değeri bulmaktır. 75 ve 100 mN değerlerindeki Elastisite modülü 70,84 ve 70,97 GPa olarak ölçülmüş olup, makro değerlere (yaklaşık 70 GPa) en yakın seviyededir. Benzer durum sertlik değerleri içinde geçerlidir. Elastisite modülünün yükle olan değişimi 100 mN'dan sonra stabil olacağı ve dolayısı ile 125 ve 150 mN gibi yüklerde test yapılmasına gerek olmadığı ortaya çıkarılmıştır. SDGP yöntemi ile üretilen Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplamaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde 100 mN yük uygulanmasına karar verilmiştir. Şekil 4.30-4.35 arasındaki grafiklerde 30, 60, 90, 120, 180 ve 240 sn bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (kaplama-anametal ara bölgesi), ana malzeme ve kompozit kaplamaya 100 mN yük altında nanoindentasyon testi uygulanmıştır. Test sonucunda Elastisite modülü, sertlik ve % elastik toparlanma oranı, batma derinliklerine ait sonuçlar gösterilmektedir.



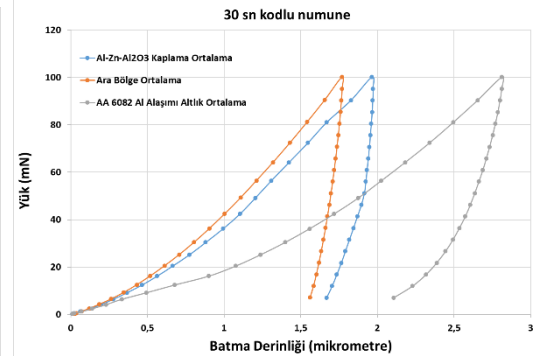
a)



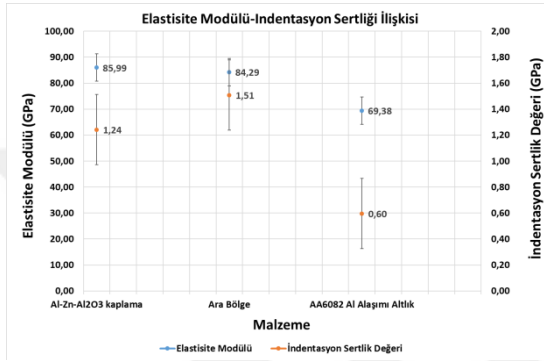
b)



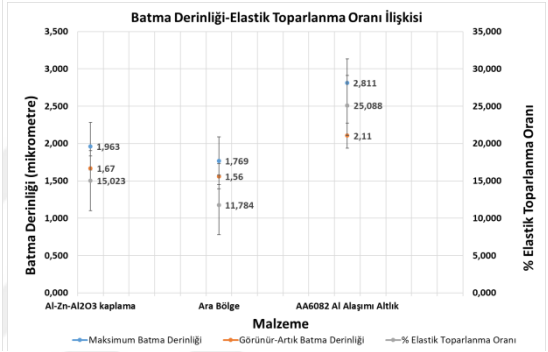
c)



d)

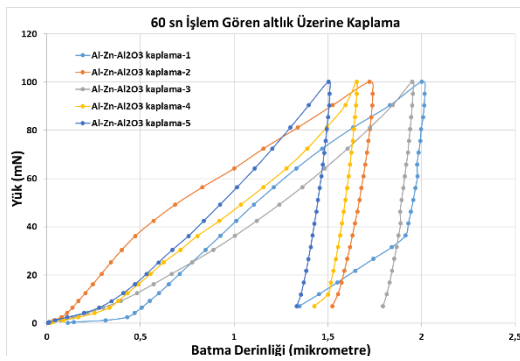


e)

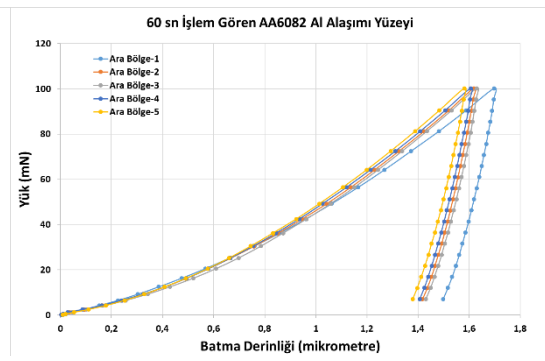


f)

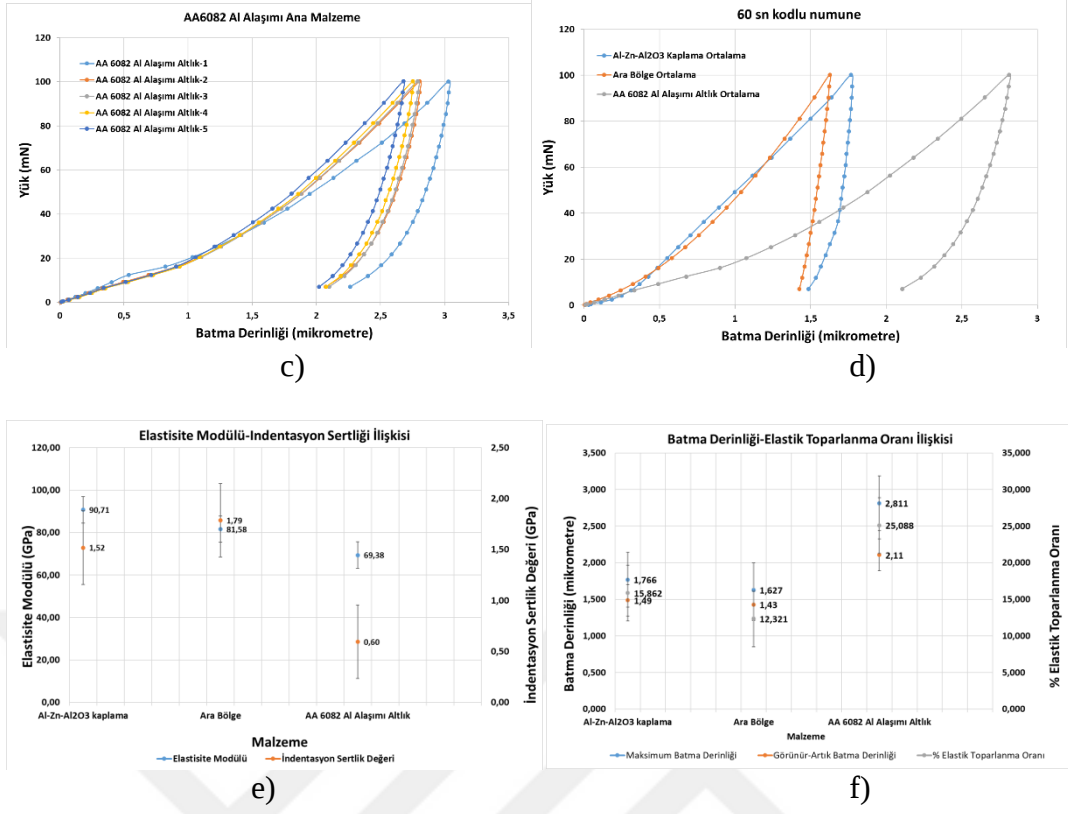
Şekil 4.30 30 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama, b) 30 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi



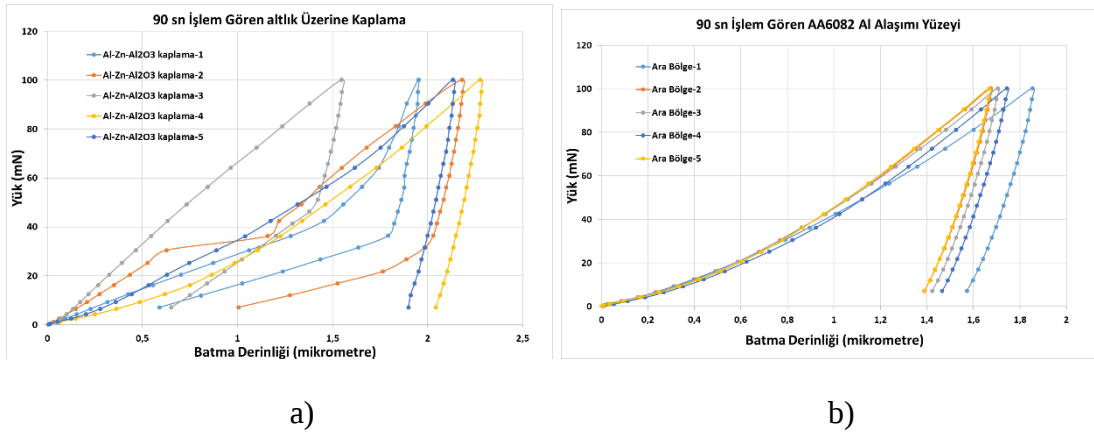
a)

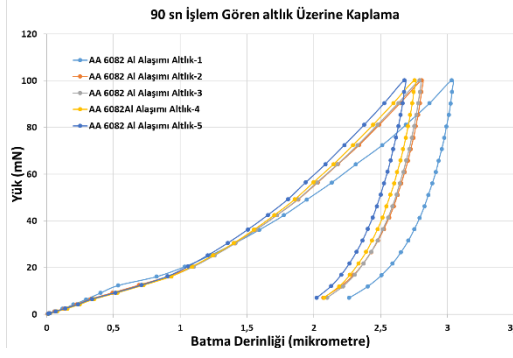


b)

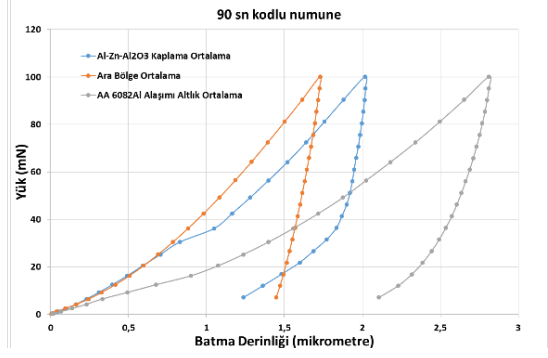


Şekil 4.31. 60 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama, b) 60 s bilyalı dövme işleme tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi

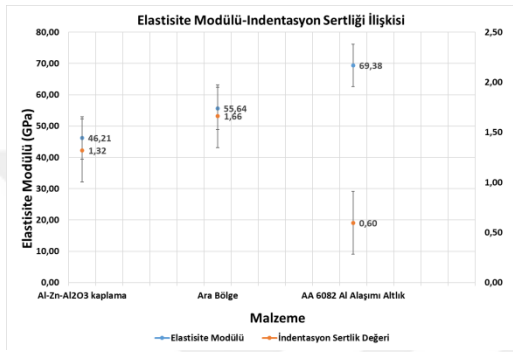




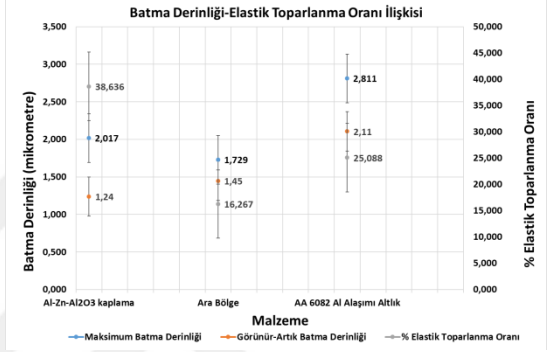
c)



d)

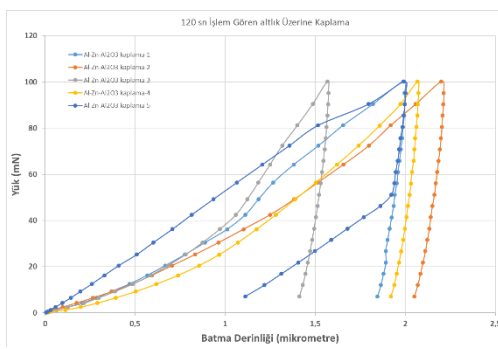


e)

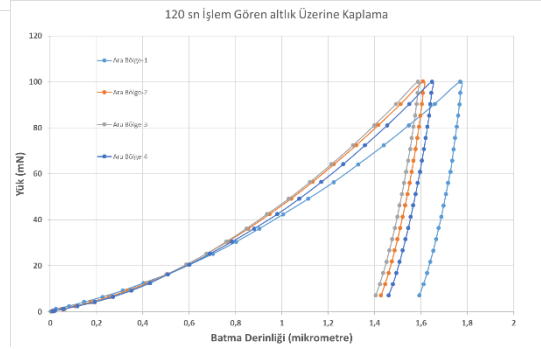


f)

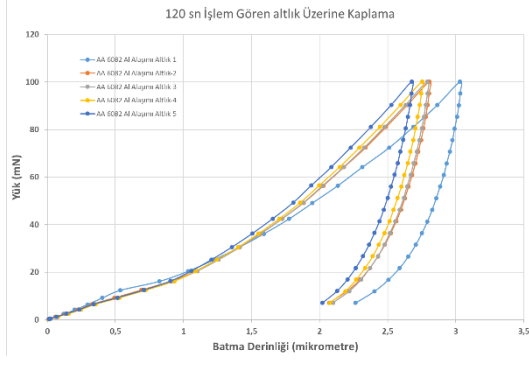
Şekil 4.32. 90 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama, b) 90 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi



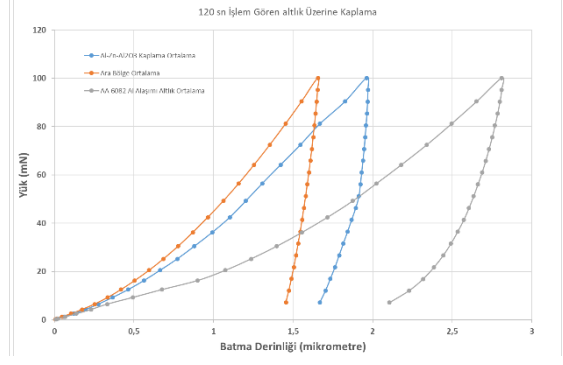
a)



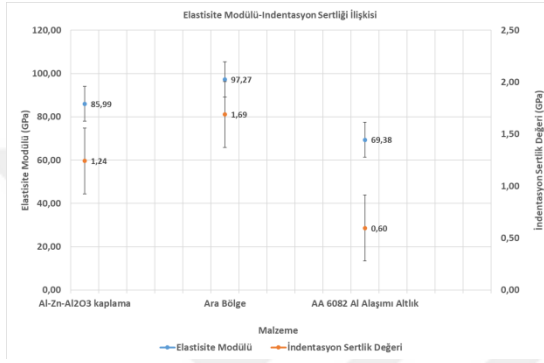
b)



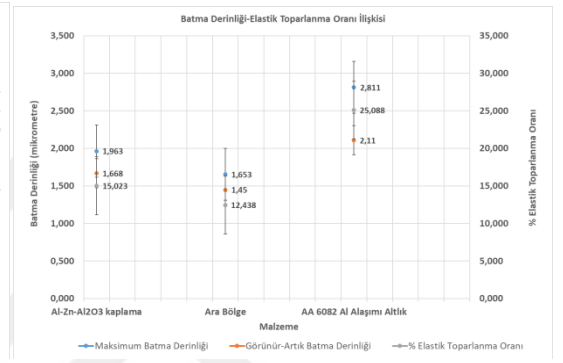
c)



d)

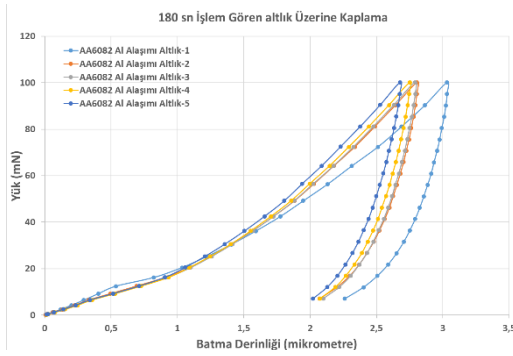


e)

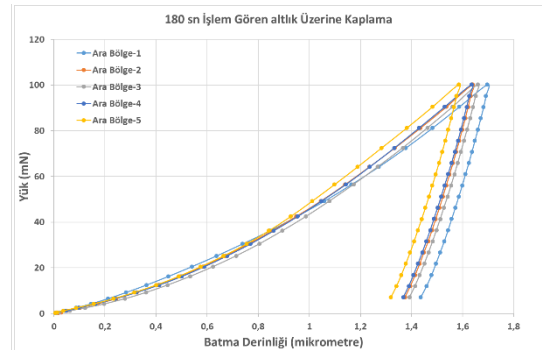


f)

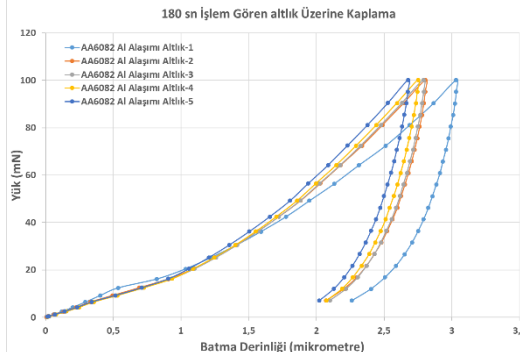
Şekil 4.33. 120 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama, b) 120 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi



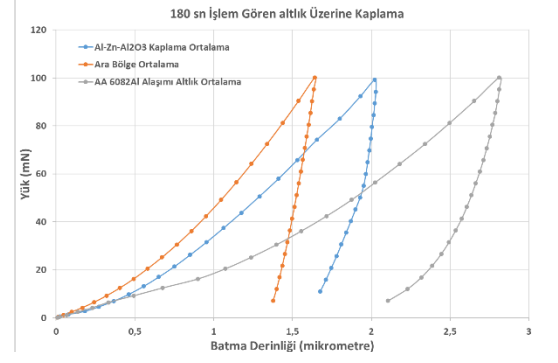
a)



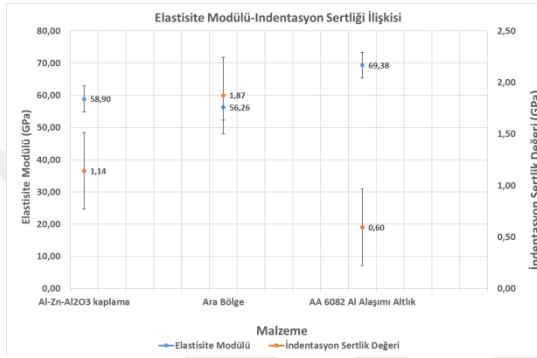
b)



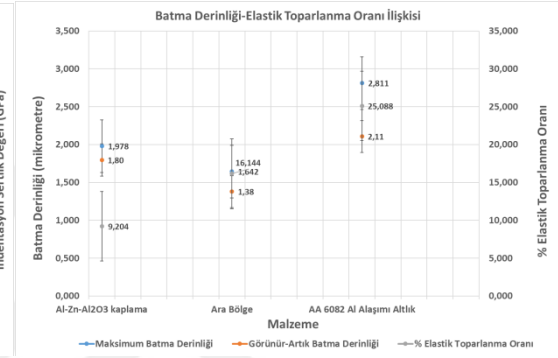
c)



d)

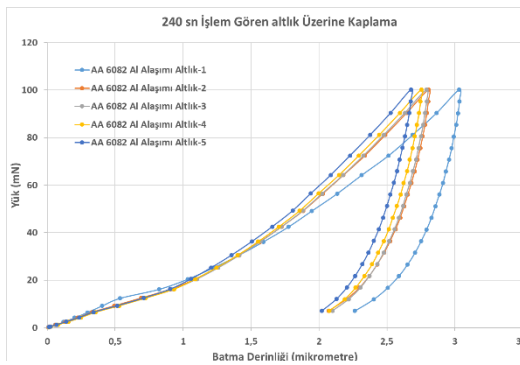


e)

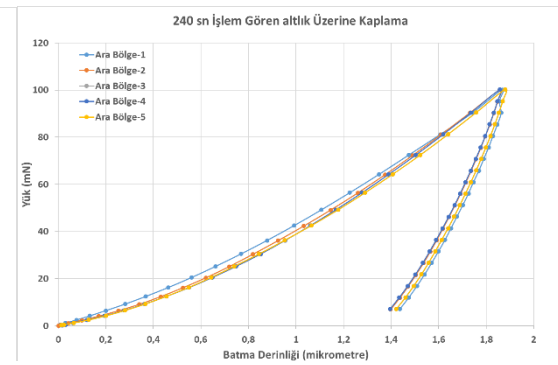


f)

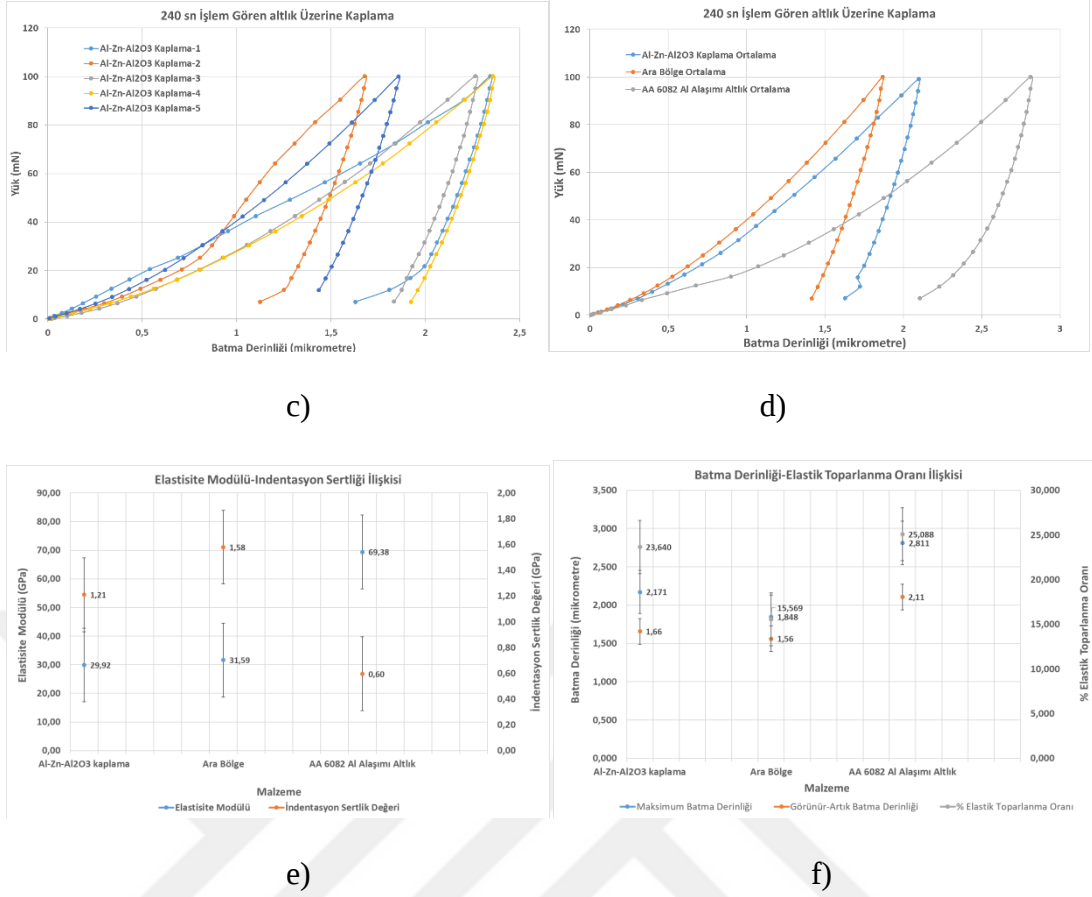
Şekil 4.34. 180 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama, b) 180 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi



a)



b)



Şekil 4.35. 240 s kodlu numunenin a) Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama, b) 240 s bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş AA6082 Al alaşımı yüzeyi (ara bölge) ve c) AA 6082 Al alaşımı, d) ortalama yükleme-yük boşaltma, e) Elastisite modülü değişimi ve f) Batma derinliği-% elastik toparlanma oranı ilişkisi

Deneyssel olarak gerçekleştirilen indentasyon deneyleri sonucunda; kompozit kaplama, ara bölge ve altlık malzemesine ait mekanik özellik değerlerine ulaşılmıştır. İndentasyon sertliği-Elastisite modülü ile batma derinliği-% elastik toparlanma oranlarının elde edilmesi sonucunda bilyalı dövme işkemi ile yüzey sertliğine bağlı değişimler ortaya çıkarılmıştır. Sonuçların tartışılması amacı ile 100 mN yük altındaki veriler tek bir tablo hazırlanmıştır. Al-Zn-Al₂O₃ kompozit kaplama malzemesinin Elastisite modülü, altlık malzemenin 30, 60, 90, 120, 180 ve 240 sn ye artan bilyalı dövme işlemi sonucunda sırasıyla 85,99 GPa 90,71 GPa, 46,21 GPa, 85,99 GPa, 58,90 GPa ve 29,92 GPa, Ara Bölgenin 84,29 GPa, 81,58 GPa, 55,64 GPa, 97,27 GPa, 56,26 GPa ve 31,59 GPa ve son olarak AA 6082 Al alaşımı altlığın elastisite modülü ise 69,38 GPa olarak ölçülmüştür.

Sertlik değişimleri ise benzer sürelerde bilyalı dövme maruz bırakılan yüzeylere yapılan aynı kaplama üretim parametrelerinde incelenmiştir. 100 mN yük altında yapılan indentasyon deneyi sonucunda Al-Zn-Al₂O₃ kompozit kaplama elde edilen sertlik değerleri ise belirtilen sürelerle bağlı olarak 1,24 GPa, 1,52 GPa, 1,32 GPa, 1,24 GPa, 1,14 GPa, 1,21 GPa olarak ölçölmüştür. Ara bölge sertlik değişimi ise 1,51 GPa ile 1,58 GPa arasında değişmektedir. AA 6082 Al alşımlı altlık sertliği ise 0,60 GPa olarak ölçölmüştür.



Tablo 4. 5. Deneyisel indentasyon verileri analizi

Bilyalı Dövme süresi	Malzeme	F (mN)	hm (µm)	hort (µm)	hr (µm)	hr ort (µm)	% ERR	E (GPa)	E ort (GPa)	Hin (MPa)	H ort (GPa)	C mN/µm	C ort mN/µm
30 sn	Al-Zn-Al ₂ O3 kompozit kaplama	100	1,98756	1,963	1,845592	1,67	15,023	87,84	85,99	1,12	1,24	25,31392588	27,06094271
			2,199588		2,049669			78,64		0,91		20,66889774	
			1,56754		1,412019			131,36		1,83		40,69703188	
			2,066655		1,919871			100,31		1,02		23,41337569	
			1,991594		1,111573			31,79		1,33		25,21148235	
	Ara Bölge		1,818258	1,769	1,609089	1,56	11,784	82,89	84,29	1,37	1,51	30,24746521	32,11230603
			1,669739		1,458677			88,52		1,65		35,8676413	
			1,778596		1,570209			82,53		1,45		31,6115199	
			1,868596		1,660209			83,29		1,58		28,63974655	
			1,710085		1,504752			84,23		1,49		34,19515722	
	AA6082 Al Alaşımlı Altlık		3,031029	2,811	2,262363	2,11	25,088	62,11	69,38	0,52	0,60	10,88478404	12,7151517
			2,805439		2,072092			76,43		0,62		12,70569248	
			2,790097		2,0997			71,23		0,62		12,84580709	
			2,752742		2,074873			68,21		0,64		13,19681054	
			2,678102		2,021622			68,93		0,58		13,94266435	
60 sn	Al-Zn-Al ₂ O3 kompozit kaplama	100	2,001316	1,766	1,348588	1,49	15,862	65,83181	90,71	1,14	1,52	24,96713244	33,16048864
			1,721981		1,52409			76,78337		1,58		33,72432683	
			1,950035		1,794522			89,99175		1,17		26,29754381	
			1,653561		1,427878			107,5583		1,66		36,57291348	
			1,503453		1,33457			113,3968		2,04		44,24052662	
	Ara Bölge		1,698297	1,627	1,498447	1,43	12,321	79,72482	81,58	1,619829	1,79	34,67150671	37,83457009
			1,618849		1,417308			80,39239		1,807113		38,15815057	
			1,630055		1,430792			83,38235		1,768846		37,63530877	
			1,60636		1,406937			80,0769		1,841701		38,753795	
			1,582047		1,37971			84,33585		1,893156		39,95408939	

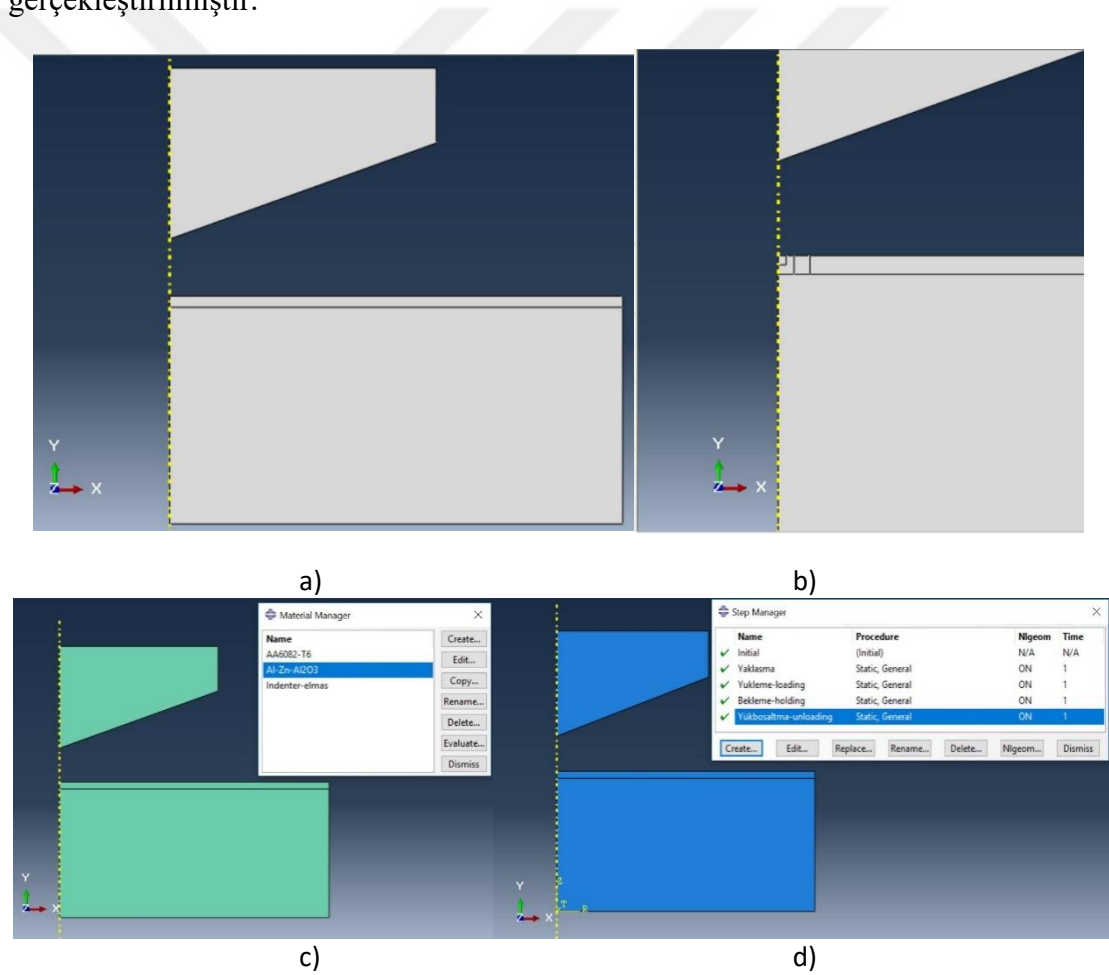
	AA6082 Al Alaşımlı Altlık		3,031029	2,811	2,262363	2,11	25,088	62,11	69,38	0,52	0,60	10,88478404	12,7151517
		2,805439	2,072092		76,43			0,62		12,70569248			
		2,790097	2,0997		71,23			0,62		12,84580709			
		2,752742	2,074873		68,21			0,64		13,19681054			
		2,678102	2,021622		68,93			0,58		13,94266435			
90 sn	Al-Zn-Al ₂ O ₃ kompozit kaplama	100	1,951169	2,017	0,5905028	1,24	38,636	43,20145	46,21	1,30	1,32	26,26698496	26,07206499
			2,17925		1,005513			46,50787		0,98		21,05648575	
			1,547895		0,6528713			42,50042		2,41		41,73659405	
			2,275481		2,042069			48,41729		0,89		19,31317043	
			2,132633		1,898517			50,44547		1,02		21,98708978	
	Ara Bölge		1,854061	1,729	1,571818	1,45	16,267	52,75373	55,64	1,409676	1,66	29,09055203	33,59893213
			1,674566		1,388754			56,21278		1,782758		35,66115965	
			1,704294		1,422903			56,35968		1,706256		34,42793465	
			1,743505		1,465214			55,24578		1,620485		32,8967963	
			1,668563		1,390059			57,60549		1,788839		35,918218	
	AA6082 Al Alaşımlı Altlık		3,031029	2,811	2,262363	2,11	25,088	62,11	69,38	0,52	0,60	10,88478404	12,7151517
			2,805439		2,072092			76,43		0,62		12,70569248	
			2,790097		2,0997			71,23		0,62		12,84580709	
			2,752742		2,074873			68,21		0,64		13,19681054	
			2,678102		2,021622			68,93		0,58		13,94266435	
	Al-Zn-Al ₂ O ₃ kompozit kaplama	100	1,98756	1,963	1,845592	1,668	15,023	82,24	85,99	1,02	1,24	25,31392588	27,06094271
			2,199588		2,049669			71,64		0,91		20,66889774	
			1,56754		1,412019			121,16		1,94		40,69703188	
			2,066655		1,919871			92,31		1,01		23,41337569	
			1,991594		1,111573			66,79		1,12		25,21148235	
	Ara Bölge		1,769777	1,653	1,571818	1,45	12,438	98,40816	97,27	1,439029	1,69	31,92735245	35,123
			1,609096		1,388754			98,63189		1,781584		38,62211828	

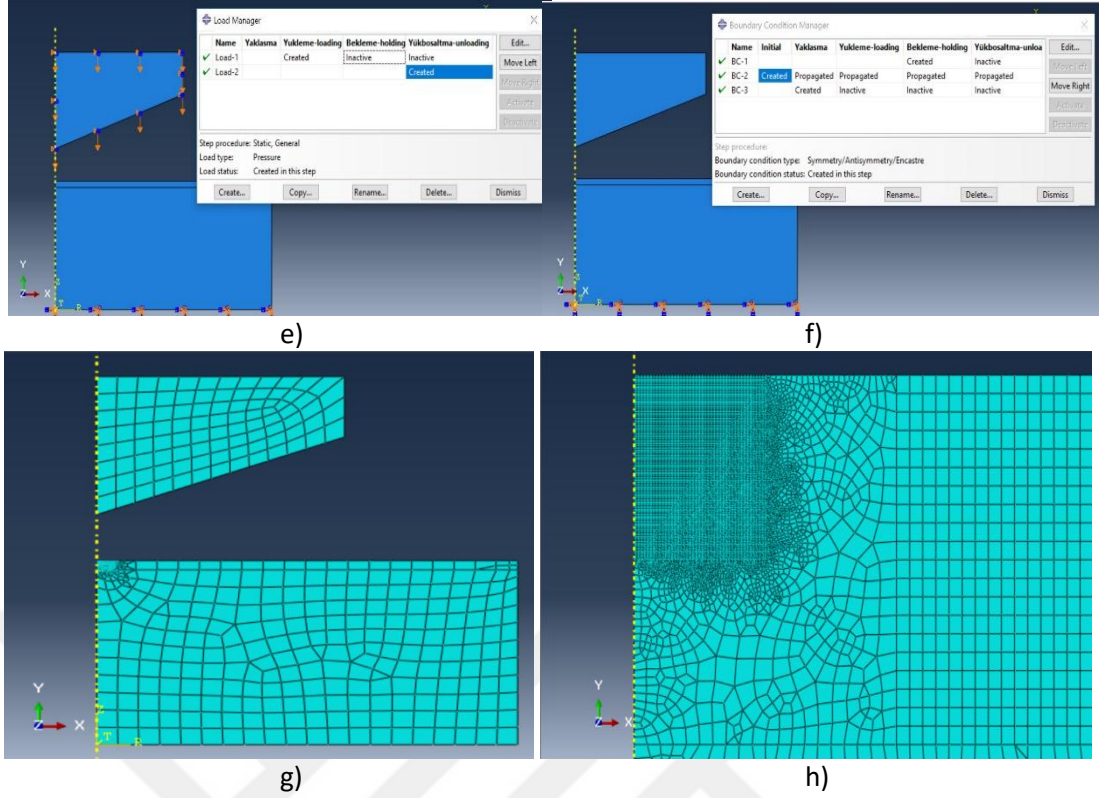
120 sn			1,587655		1,422903			98,28015		1,837239		39,67233194	
			1,647052		1,465214			93,75524		1,700072		36,86255033	
					1,390059								
	AA6082 Al Alaşımlı Altılık		3,031029	2,811	2,262363	2,11	25,088	62,11	69,38	0,52	0,60	10,88478404	12,7151517
			2,805439		2,072092			76,43		0,62		12,70569248	
			2,790097		2,0997			71,23		0,62		12,84580709	
			2,752742		2,074873			68,21		0,64		13,19681054	
			2,678102		2,021622			68,93		0,58		13,94266435	
180 sn	Al-Zn-Al ₂ O ₃ kompozit kaplama		1,951958	1,978	1,707175	1,80	9,204	61,02176	58,90	1,22	1,14	26,24575452	25,95765086
			2,16195		1,937051			50,31821		0,99		21,39482353	
			2,112136		1,88463			49,16888		1,05		22,41590318	
			1,884108		1,654996			66,00874		1,31		28,17010156	
			1,78		1,54			68				31,56167151	
	Ara Bölge	100	1,696204	1,642	1,435357	1,38	16,144	55,73767	56,26	1,730412	1,87	34,75712405	37,12830014
			1,638379		1,373842			56,37368		1,88132		37,25385797	
			1,658719		1,39125			54,83119		1,836537		36,34581078	
			1,634534		1,367215			55,68772		1,897937		37,42933252	
			1,584005		1,318458			58,67369		2,028204		39,85537536	
	AA6082 Al Alaşımlı Altılık		3,031029	2,811	2,262363	2,11	25,088	62,11	69,38	0,52	0,60	10,88478404	12,7151517
			2,805439		2,072092			76,43		0,62		12,70569248	
			2,790097		2,0997			71,23		0,62		12,84580709	
			2,752742		2,074873			68,21		0,64		13,19681054	
			2,678102		2,021622			68,93		0,58		13,94266435	
	Al-Zn-Al ₂ O ₃ kompozit kaplama	100	2,344154	2,171	1,628923	1,66	23,640	26,17012	29,92	0,92	1,21	18,19817015	22,32266602
			1,679361		1,124153			36,86227		2,02		35,45780713	
			2,264871		1,833877			27,97281		0,99		19,49454297	
			2,357795		1,922781			26,61621		0,91		17,9882086	

240 sn			Oca.00		1,78			32				20,47460126	
	Ara Bölge		1,866882	1,848	1,609089	1,56	15,569	34,69042	31,59	1,538886	1,58	28,69235947	29,30306659
			1,857595		1,458677			32,04262		1,603053		28,97997011	
			1,879912		1,570209			31,41992		1,565089		28,29599433	
			1,857423		1,660209			31,80898		1,610522		28,98533753	
			1,78		1,504752			28				31,56167151	
			3,031029		2,811			2,262363		2,11		25,088	
	AA6082 Al Alaşıımı Altılık		2,805439	2,072092		76,43	0,62	12,70569248					
			2,790097	2,0997		71,23	0,62	12,84580709					
			2,752742	2,074873		68,21	0,64	13,19681054					
			2,678102	2,021622		68,93	0,58	13,94266435					

4.2.3.4 Nano indentasyon yöntemiyle belirlenen mekanik özelliklerin simülasyon destekli incelenmesi

Deneyisel olarak gerçekleştirilen nano boyuttaki indentasyon deneyleri sonucunda Elastisite modülü ve sertlik değerlerine ulaşılabilmektedir. Fakat bu işlem sırasında ortaya çıkan temas noktasındaki gerilme- strain dağılımları, akma-hasar gerilmesi gibi değerler ancak deneyisel indentasyon verileri ile sonlu elemanlar destekli çözümlerin analiz edilmesi ile ortaya çıkarılabilmektedir. Modelde 500 mikrometre kalınlığındaki kaplama kullanılmıştır. Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplamaların mikro mekanik özelliklerinin simülasyon destekli olarak belirlenmesi sırasında 100 mN maksimum yük değerinde yükleme-yük boşaltma eğrilerine farklı plastik özellikler varyasyonları oluşturularak yaklaşılmaya çalışılmıştır. Bu aşamada ABAQUS programında şekil 4.36'da belirtilen modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.





Şekil 4.36. a) Part modülü, b) Batıcı uç ile yüzey temas noktasında hassas sonuç almak için sınıflandırma işlemi, c) Malzeme dataları, d) Step modülü, e) Yükleme, f) sınır şartları, g) Mesh çözüm ağı ve h) Hassas mesh ağ yapısı

Batıcı uç ile yüzey arasındaki temas ve bu bölgeden daha hassas veri almak amacı ile simetrik eksenli model seçilmiş olup lineer simetrik eksen gerilme ailesinden 4 nodlu CAX4R element tipi kullanılmıştır. Kaplama yüzeyi temas bölgesinden ana modele doğru element sıklığı değişimi sırasıyla 15.625, 1924, 400 ve 78 olmak üzere kaplamada toplam 18.627 element kullanılmıştır. Ana metalde detaylı bir analiz gerektirmediği için 350 element kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar simülasyon modelinde kullanılan analiz girdileri ise aşağıdaki tabloda verilmiştir. Elastisite modülü ve sertlik değerleri deneysel olarak elde edilen verilerden alınmıştır. Kompozit kaplamaya ait elasto-plastik malzeme datası olan akma mukavemeti değerleri değiştirilerek deneysel elde edilen indentasyon eğrisine yaklaşılmak istenmiştir. Diğer yandan indentasyon işleminin sonlu elemanlar simülasyon programı ile analizi sonucunda kaplamanın indentasyon sırasındaki hasar veya failure gerilmesi olarak tariflenen kritik gerilme ve deformasyon davranışı

(pile-up ve sink in), akma gerilmesi, kaplama-altlık malzemesi arayüzey gerilme dağılımları incelenmiştir.

Tablo 4.6.' da indentasyon verileri ve kompozit kaplamaya ait numune isimlendirmesi bulunmaktadır. Deneysel olarak elde edilen bu datalar yardımı ile Tablo 4.7.' de verilen analiz sonuçlarına ulaşılmıştır. Deneysel indentasyon eğrisi ile simülasyon destekli eğrinin benzer karakteristikte olması için kompozit yüzey kaplamasına ait elastoplastik özelliklerden akma mukavemeti / simülasyonda failure-hasar (def. Başlangıcı) değerleri 250-600 MPa arasında değiştirilerek maksimum batma derinliği ve artık derinlik (yük kaldırılınca ortaya çıkan) değerleri elde edilmiş ve % sapma değerleri hesaplanmıştır.

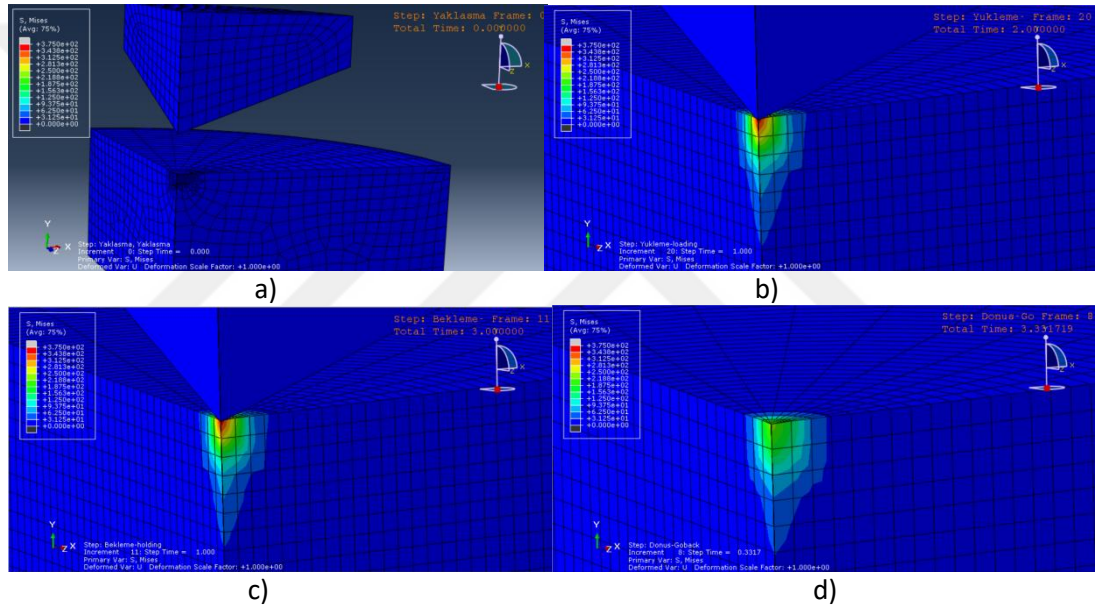
Tablo 4.6. İndentasyon deneyi verileri

Malzeme	İndentasyon deney verileri					Teorik veriler
		Elastisite Modülü, GPa	Poisson oranı, v	Maksimum Batma derinliği, μm	Artık Batma Derinliği, μm	Akma Mukavemeti, MPa
AA 6082 Al alaşımı		70,00	0,26	2,811	2,110	280
Al-Zn-Al ₂ O ₃ esaslı kompozit kaplama	30 sn	85,99		1,963	1,67	-
	60 sn	90,71		1,766	1,49	-
	90 sn	46,21		2,017	1,24	-
	120 sn	85,99		1,963	1,668	-
	180 sn	58,90		1,978	1,80	-
	240 sn	29,92		2,171	1,66	-
Elmas Batıcı uç		1040		0,07		

Tablo 4.7. Simülasyon destekli indentasyon analizi veri dağılımı ve sonuçları

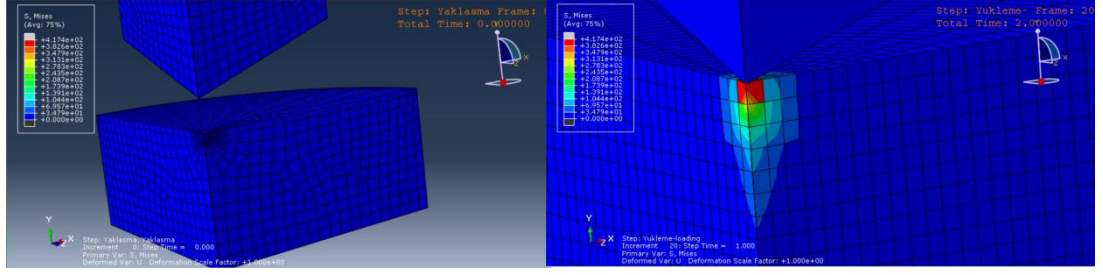
Sonlu elemanlar analiz kodu	Simülasyon verileri						Deneysel indentasyon verisi ile karşılaştırma		
	Elastisite Modülü, GPa	Poisson oranı	Akma mukavemeti değişimi, MPa	Belirlen en Gerilme (akma-failure), MPa	Maks. Batma Derinliği, μm	Artık Batma Derinliği, μm	Maks. Batma Derinliği, μm	Artık Batma Derinliği, μm	Genel Sapma, %
S30	85,99	0,26	250-600	375	1,944	1,431	1,963	1,67	$\pm 0,97$
S60	90,71			425	1,676	1,212	1,766	1,49	$\pm 0,51$
S90	46,21			275	2,095	1,105	2,017	1,24	$\pm 3,86$
S120	85,99			375	1,944	1,431	1,963	1,67	$\pm 0,98$
S180	58,90			300	1,932	1,564	1,978	1,80	$\pm 2,32$
S240	29,92			245	2,201	1,344	2,171	1,66	$\pm 1,38$

Abaqus programında, yukarıdaki tablolara göre ortaya çıkan sayısal verilerin görsel modelleri ise şekil 4.37-4.43 arasında sunulmuştur. Bu simetrik eksendeki modelde batıcı ucun yüzeye yaklaşması, maksimum yükte batma, yükün geri çekilmesi ve batıcı ucun başlangıç konumuna dönüşü sırasında ortaya çıkan gerilme dağılımları, yüzeyin plastik deformasyonu ve toparlanma davranışı, batıcı ucun yüzeye teması sonucunda temas noktasında ortaya çıkan pile-up veya sink – in oluşumu gözlemlenmiştir. Elastisite modülü ve akma mukavemeti değerleri arttıkça yüzeyin elastik davranışı ve toparlanması artış göstermiş ve gerilme dağılımları yük kaldırıldıktan sonra daha az gerçleşmiştir.



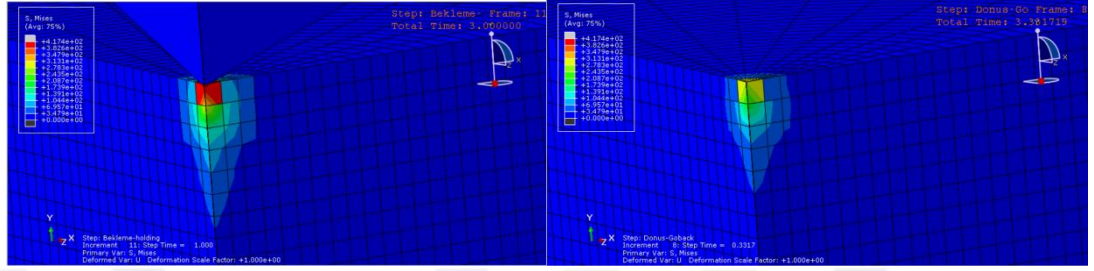
Şekil 4.37. 30s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları

30s kodlu numuneye ait analizde akma mukavemeti 250-600 MPa arasında değiştirilerek çözüm üretilmiştir. Analizdeki akma mukavemeti 375 MPa ve Elastisite modülü 85,99 GPa olarak belirlendiği durumda maksimum batma ve artık derinlik değerleri deneysel indentasyon verilerine en yakın değerlerde bulunmuştur. S60, S90, S120, S180 ve S240 kodlu numunlere ait sonuçlarda sırasıyla şekil 4.38-4.43'de verilmiştir. Benzer çıktılara ulaşmak adına itersyonlar yapılarak çözüm oluşturulmuştur.



a)

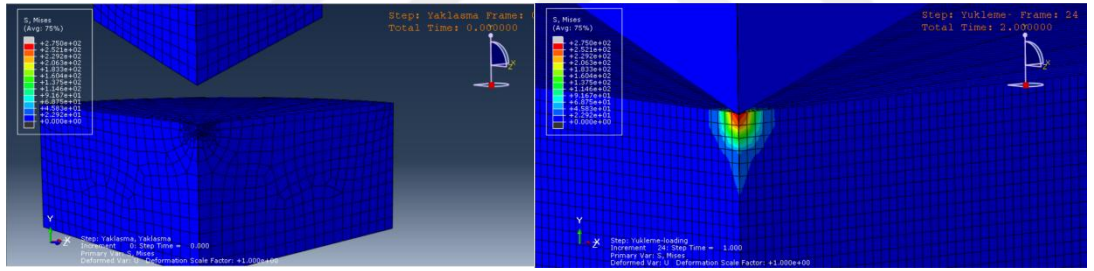
b)



c)

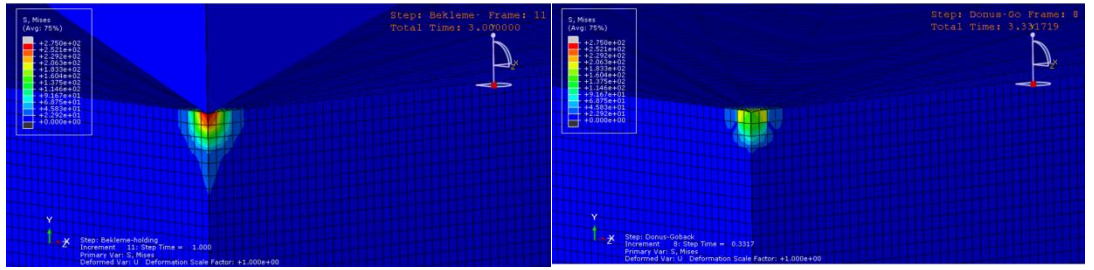
d)

Şekil 4.38. 60s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları



a)

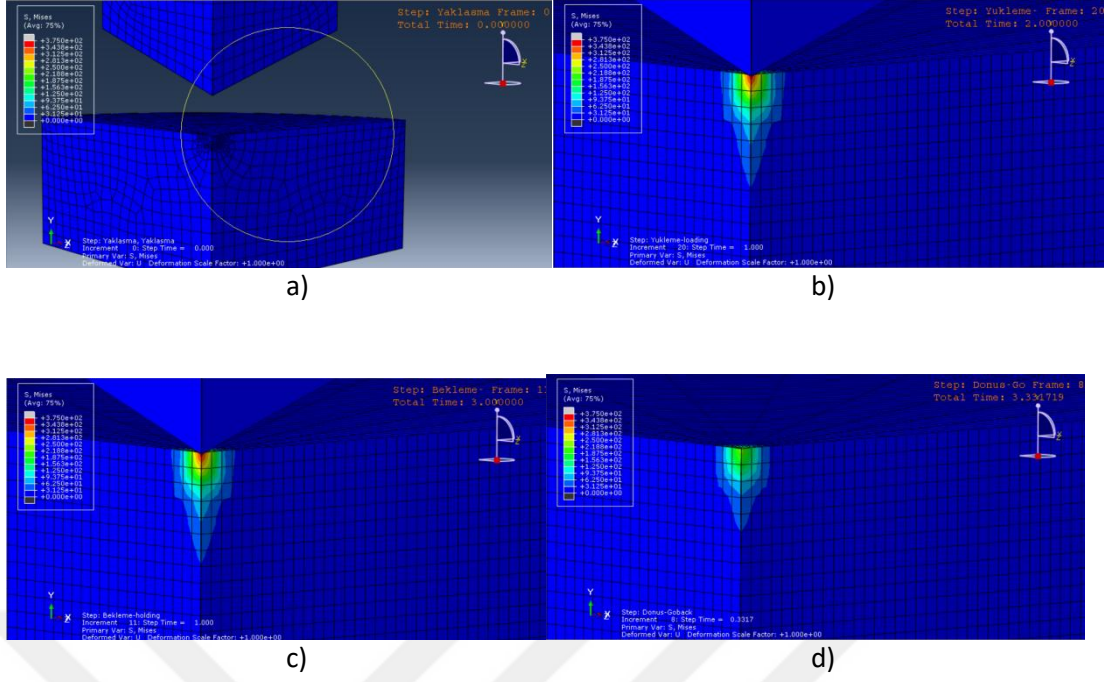
b)



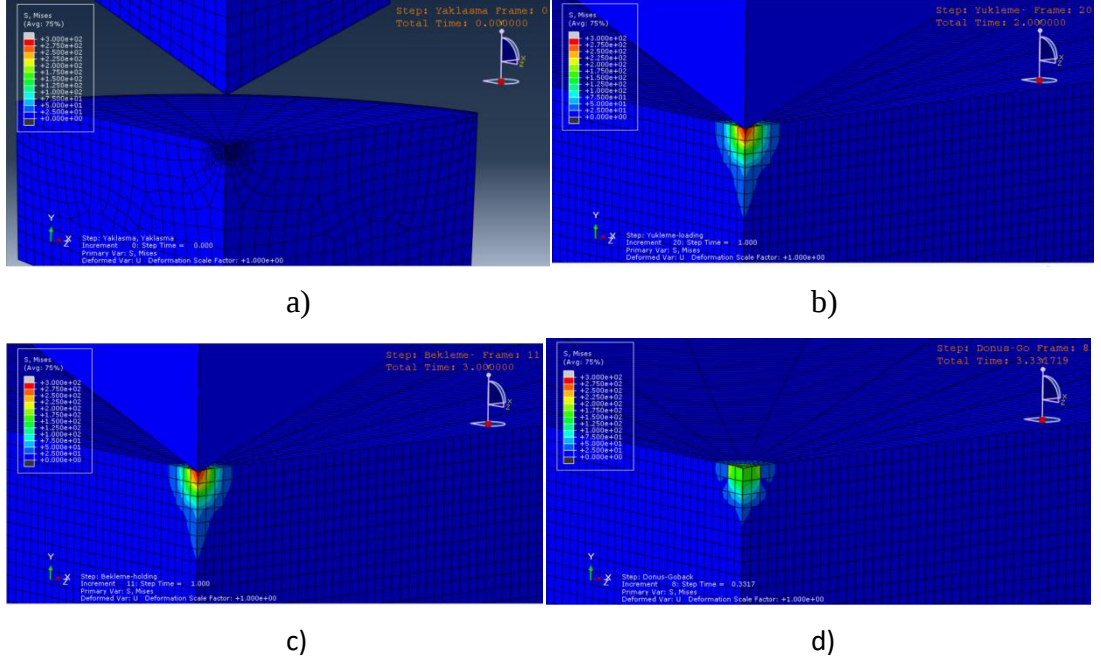
c)

d)

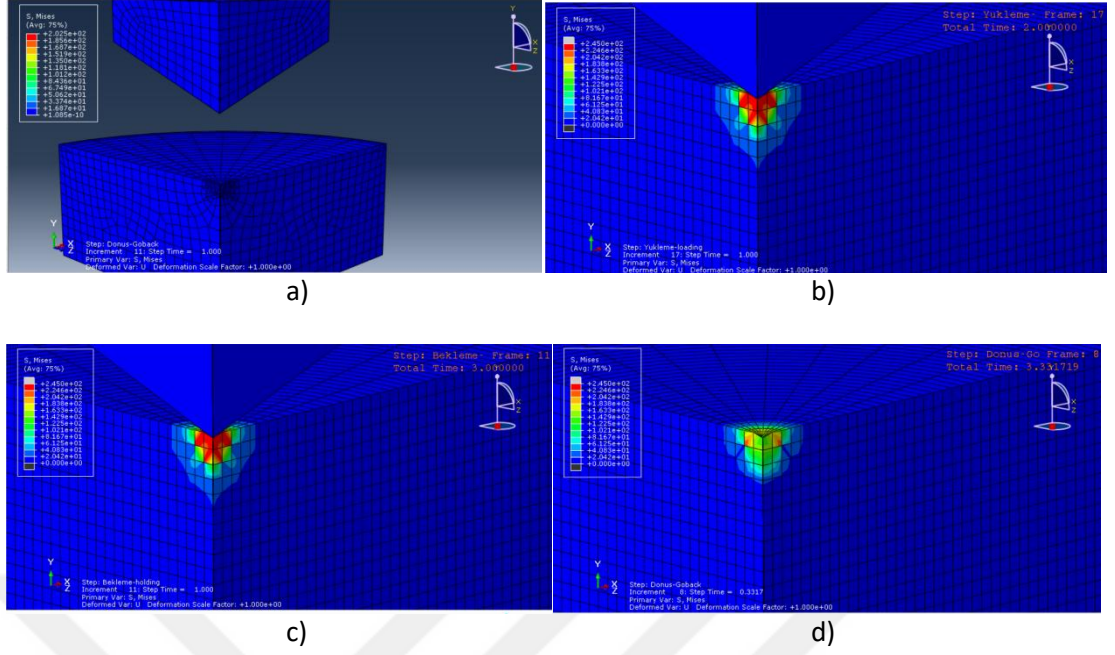
Şekil 4.39. 90s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları



Şekil 4.40. 120s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları

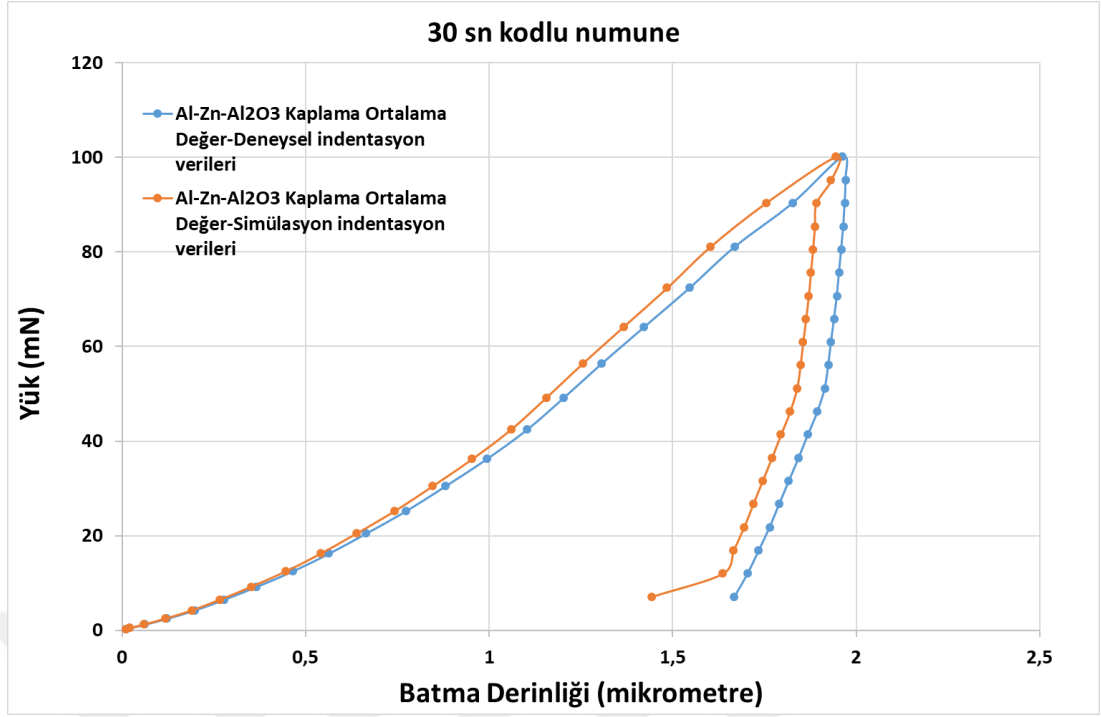


Şekil 4.41. 180s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları

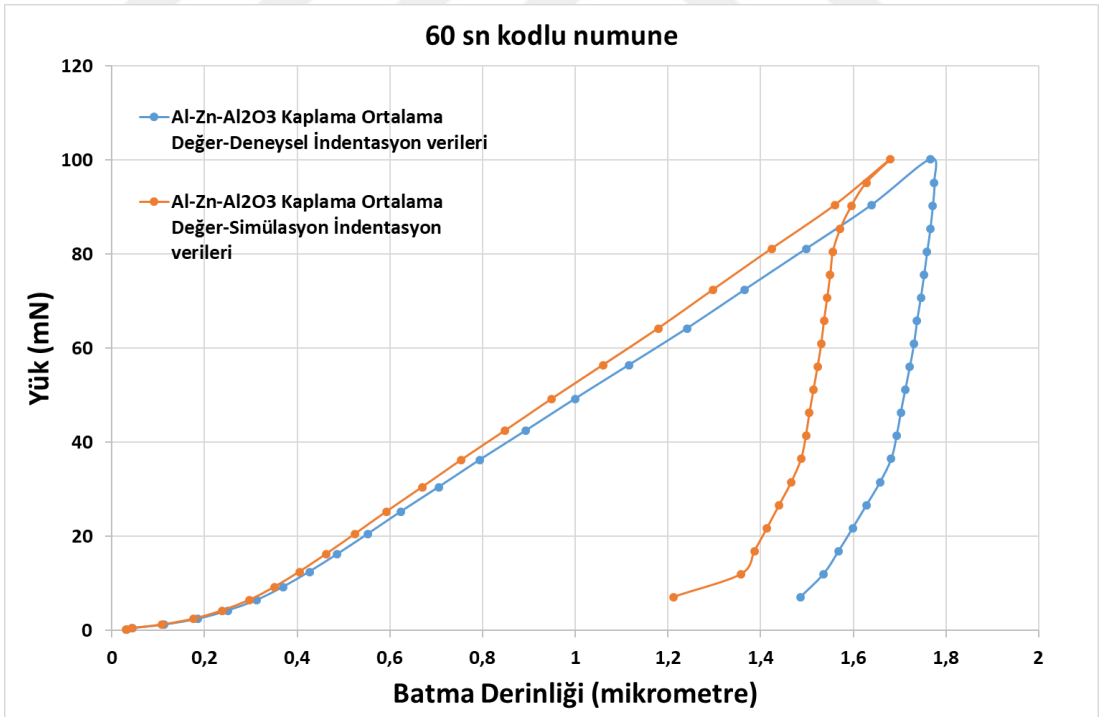


Şekil 4.42. 240s kodlu simülasyon verilerine göre analiz sonuçları a) batıcı ucun yüzeye yaklaşması, b) yükleme, c) bekleme ve d) Yük boşaltma sürecinde oluşan gerilme dağılımları

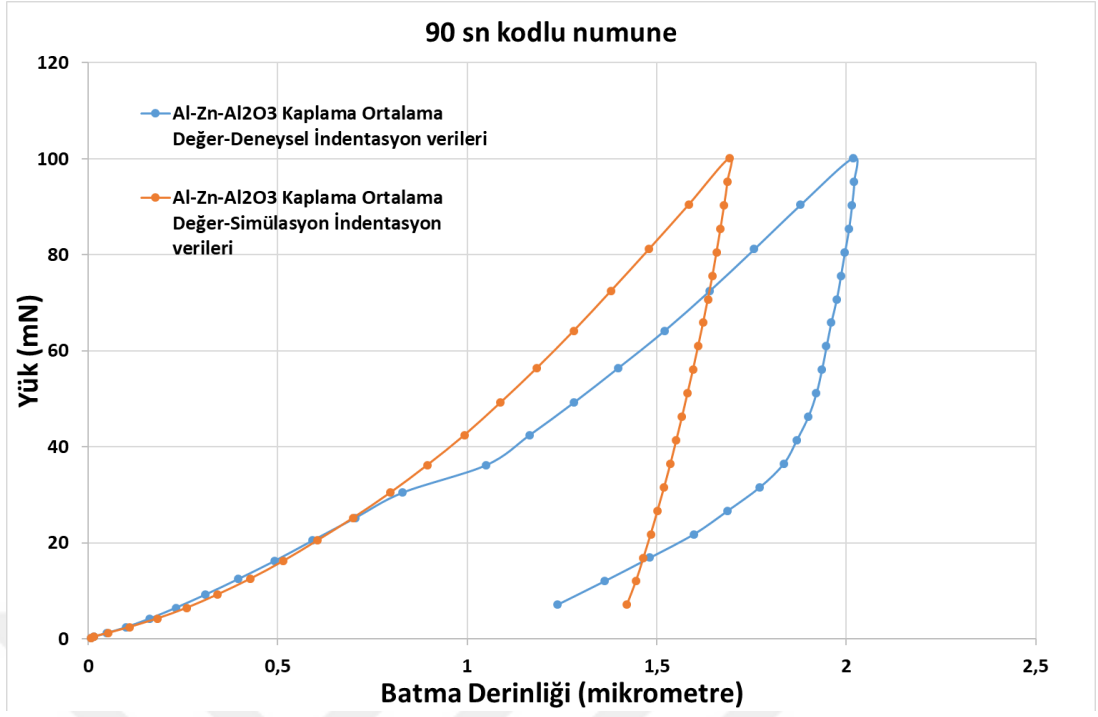
Sonlu elemanlar modelinde elde edilen bu gerilme dağılımlarına karşılık gelen yükleme-yük boşaltma eğrileri ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırması ile şekil 4.43 a)-f) arasında sunulmuştur. Sayısal modelde uygulanan verilerin doğruluğunun kanıtlanması için bu eğrilerin de birbiri ile uyumlu olması gereklidir. Bu eğriler ile birlikte gerilme dağılımı ve batıcı uç yüzey temasından kaynaklı pile-up (yığılma) ve sink –in (çökme) karakteristikleri de ortaya çıkarılmıştır.



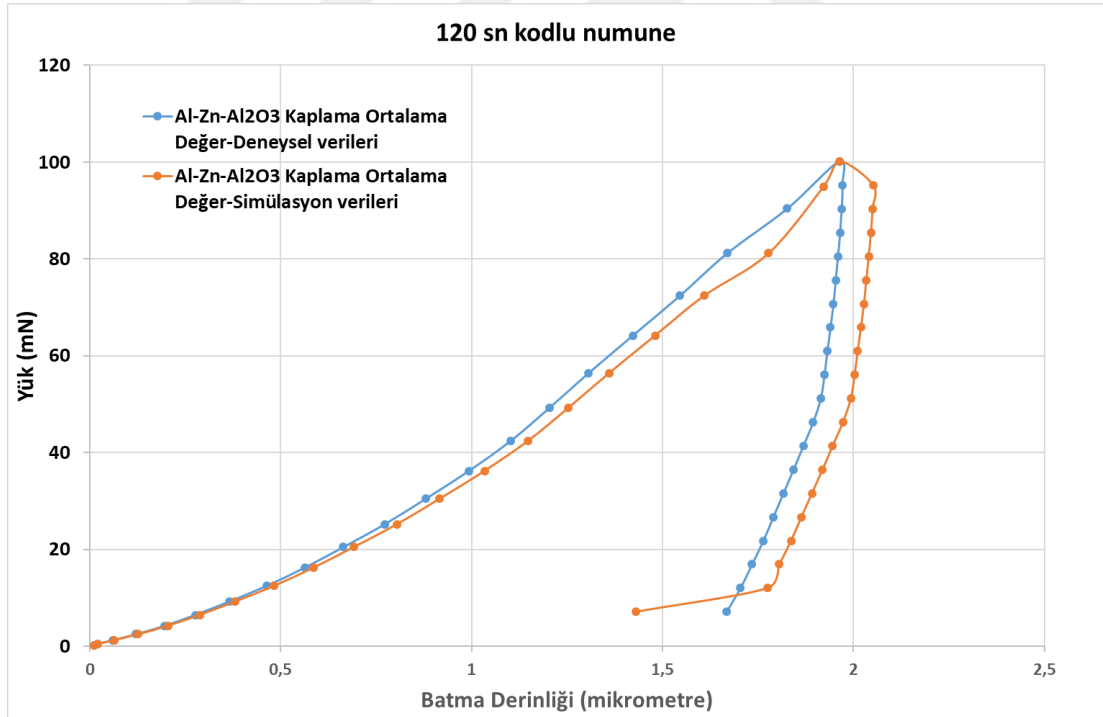
a)



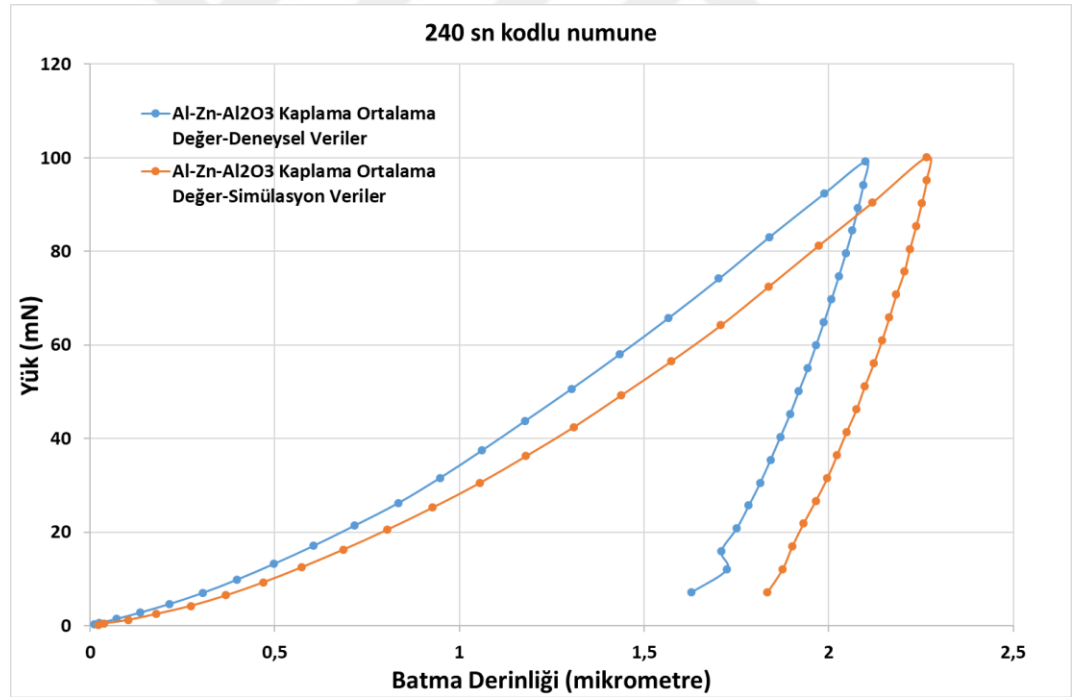
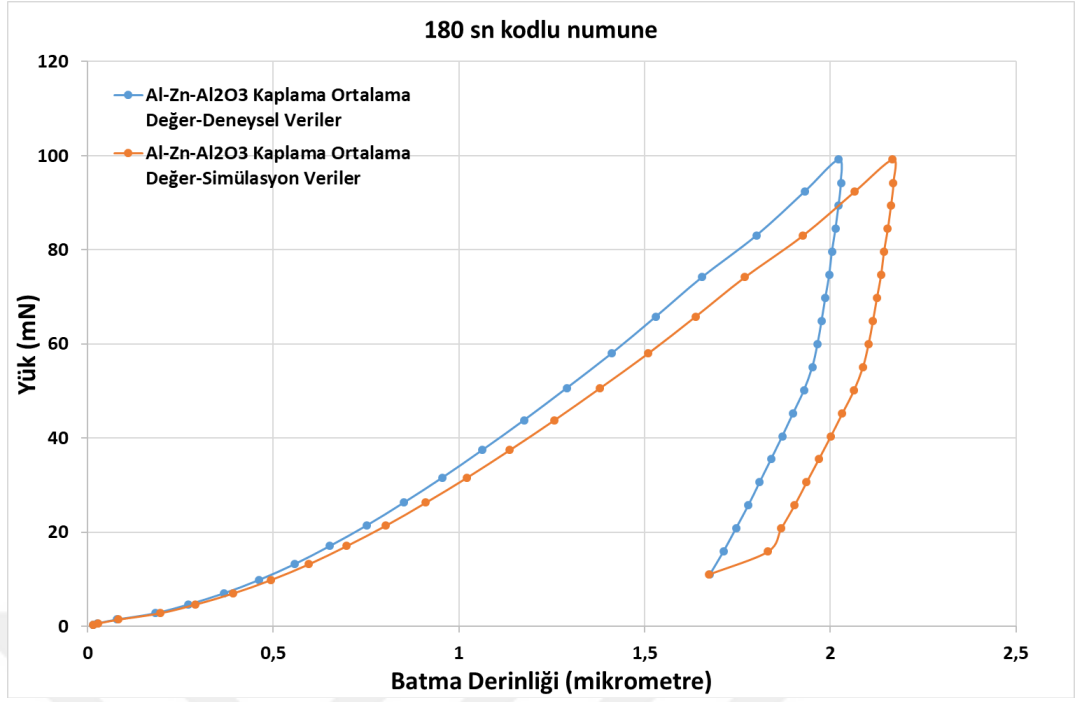
b)



c)



d)



Şekil 4.43. a) 30 s, b) 60 s, c) 90 s, d) 120 s, e) 180 s ve f) 240 sn kodlu numunelerin ortalama yükleme-yük boşaltma eğrileri ile simülasyon sonucu elde edilen eğrilerin karşılaştırılması

Deneyisel ve simülasyon ortalama yükleme-yük boşaltma eğrileri sonuçları karşılaştırıldığında elde edilen verilerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da sonlu elamanlar modelinde elde edilen gerilme dağılımlarının ve dolayısıyla bu modelde uygulanan verilerin deneyisel verilerin sapması da dikkate alındığında doğru olduğunu göstermektedir. Hem deneyisel ve hemde simülasyon yükleme – yük boşaltma eğrileri sonuçlarından, altlık malzeme yüzey sertliğinin artmasına bağlı olarak kompozit kaplama tabakasının elastik davranışı ve toparlanması artış göstermiş, ve gerilme dağılımlarında yük kaldırıldıktan sonra daha az gerçekleştirilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması soğuk püskürtme işlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin ve bilyalı dövme işleminin soğuk püskürtme işleminde üretilen tabakaların kalitesi üzerine etkilerinin simülasyon destekli incelenmesi olmak üzere iki farklı bölümde yapılmıştır. Çalışmalarda altlık malzeme olarak AA6082 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. İşlem parametrelerinin tabaka kalitesi üzerine etkilerinin incelenmesi çalışmalarında kaplama tozu olarak DYMET K-80-13 seçilmiş ve farklı toz besleme hızları ve gaz basıncı parametreleri ile kaplanmıştır. Bu kısımda yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen bulgular ve ileride yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıdaki gibidir;

Soğuk püskürtme işleminde parçacık hızı süpersonik gaz jetini oluşturacak olan gazın basıncına ve bu gaz jeti içerisindeki toz besleme hızına (parçacık miktarına) bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Dolayısıyla yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aynı toz parçacıklar için sabit bir kritik hızın, farklı gaz basıncı ve farklı toz besleme hızlarına göre elde edilebileceği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda toz partiküllerin kritik bir hıza ulaşmasında gaz basıncının daha etkin olduğu görülmüştür. Çalışmamızda hava basıncının 0,45 MPa gibi düşük değerlerde olduğu deneysel çalışmalarda kaplama tabakası oluşmamıştır. Dolayısıyla bu çalışma için toz partiküllerin kritik hıza ulaşması için hava basıncının en az 0,60 MPa olması gerektiği söylenebilir. Gaz basıncının 0,6 MPa ve üzerinde olması durumunda toz besleme hızları değiştirilerek toz partikülleri kritik hıza ve üzeri hızlara ulaşılarak kaplama tabakası oluşturulabilir.

Bilyalı dövme işleminin soğuk püskürtme yöntemi ile üretilen tabakaların mikroyapısal ve mekanik özellikleri ve kaplama kalitesi (yoğunluğuna, mikroyapı, tane yapısı, bağlanma ve mekanik özellikler) üzerine etkilerinin simülasyon destekli araştırılması çalışmalarında altlık malzeme olan AA6082 alüminyum alaşımı önce farklı işlem sürelerinde bilyalı dövme (shot peening) yöntemi ile dövülmüştür. Daha sonra bilyalı dövme işlemi ile farklı yüzey özelliklerine sahip numuneler DYMET K-20-11 numaralı kaplama tozu kullanılarak soğuk püskürtme yöntemi ile kaplanmıştır. Bu kısımda yapılan araştırmalar sonucunda;

Haddelenmiş olarak satın alınan altlık malzemenin bilyalı dövme işleminden sonra yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. Bilyalı dövme işlem süresinin artışına bağlı olarak belirli bir işlem süresine (120 s) kadar Ra ve Rz değerleri artmaya devam etmiş, bu işlem süresinden sonra yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

Bilyalı dövme işlemi sonrası malzemede deformasyon sertleşmesi meydana gelmiş ve buna bağlı olarak da sertlik değerleri artmıştır. En yüksek sertlik değerleri tüm numunelerde malzeme yüzeylerinde elde edilmiştir. Sertlik değerleri yüzeyden içeri doğru ilerledikçe azalmaktadır.

Optik mikroskop altında yapılan incelemeler sonucunda oluşan tabaka içerisinde bulunan Al_2O_3 partiküllerinin homojene yakın dağıldığı görülmüştür. Altlık malzeme yüzeyine doğru yaklaştıkça kaplama içerisindeki Al_2O_3 partiküllerinin sert altlık malzeme yüzeyine çarparak sıçraması nedeniyle bir miktar azalmaktadır. Ayrıca yüksek hızla gelen sert Al_2O_3 partiküllerinin çarpıp ufalandığı ve bu nedenle altlık malzeme yüzeyine yakın yerlerde Al_2O_3 partiküllerinin boyut olarak da giderek küçüldüğü tespit edilmiştir. Ancak bilyalı dövme sonucunda elde edilen yüzeylerin sertlik değerlerinin birbirlerine yakın olması nedeniyle bilyalı dövme işlem süresinin artışına bağlı olarak Al_2O_3 partiküllerinin boyutunda kayda değer bir değişim tespit edilememiştir.

Metalografik incelemeler sonucunda kaplama içerisinde birleşen tanelerin deformasyon doğrultusuna dik yönde yassılaştığı, altlık malzeme yüzeyine yaklaştıkça yassılaşma miktarının da arttığı tespit edilmiştir.

SEM-EDS incelemelerinde malzeme sertliği arttıkça yumuşak olan metalik kaplama tozunun (Zn) daha fazla biriktiğini görülmüştür. Benzer şekilde altlık malzeme sertliği arttıkça da sert olan metalik kaplama tozunun (Al) daha az biriktiği tespit edilmiştir. Bu sonucun literatür çalışmaları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

İndentasyon deneyleri ve ABAQUS programında yapılan simülasyon işlemlerinden elde edilen ortalama yükleme-yük boşaltma eğrileri sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da sonlu

elamanlar modelinde elde edilen gerilme dağılımlarının ve dolayısıyla bu modelde uygulanan verilerin doğru olduğunu göstermektedir.

Hem deneysel ve hemde simülasyon yükleme – yük boşaltma eğrileri sonuçlarından, altlık malzeme yüzey sertliğinin artmasına bağlı olarak kompozit kaplama tabakasının elastik davranışı ve toparlanma miktarı artış göstermiş ve gerilme dağılımları da yük kaldırıldıktan sonra daha az gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak gelecek çalışmalara yol gösterebilecek öneriler aşağıda sunulmuştur:

- 500 μm ve üzeri kaplama kalınlıklarında kompozit kaplama-altlık arayüzey yapışma mukavemetinin ölçülmesi ve altlık malzemesinin yüzey özelliklerinin yapışma mukavemetine olan etkisi ve
- Al-Zn-Al₂O₃ esaslı kompozit kaplama korozyon özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Malachowska, Aleksandra. Analysis of the Cold Gas Spraying Process And Determination of Selected Properties of Metallic Coatings on Polymers. Université De Limoges, Sciences Et Ingénierie En Matériaux, Mécanique, Energétique Et Aéronautique, Faculté Des Sciences Et Techniques De Limoges, Limoges, France, 2016, 154 s. (Doktora Tezi)
2. Vadla, S., Doom J. Analysis of jet characteristics among various cold spray nozzles. *Journal of Thermal Spray and Engineering*. 2018, 1(1): 24-31.
3. K.Petráčková, J.Kondás, M.Guagliano. Fixing a hole (with cold spray). *International Journal of Fatigue*. 2018,110, 144-152
4. Villafuerte J. *Modern Cold Spray: Materials, Process, And Applications*, 1st ed. Springer International Publishing, Windsdor, 2015, 429s.
5. Grujicic, M., Zhao, C. L., DeRosset, W. S., Helfritch, D. Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials Design*. 2004, 25 (8), 681-688.
6. Assadi, H., Schmidt, T., Richter, H., Kliemann, J.O., Binder, K., Gärtner, F., Klassen, T., Kreye, H. On parameter selection in cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011, 20 (6), 1161-1176
7. Singh, H., Sidhu, T.S., Kalsi, S.S., Karthikeyan, J. Development of cold spray from innovation to emerging future coating technology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2013, 35(3), 231–245.
8. Singh, H., Sidhu, T.S., Kalsi, S.S. Cold spray technology: Future of coating deposition processes. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2012, 22, 69-84
9. Pathak, S., Saha, G. C. Development of sustainable cold spray coatings and 3D additive manufacturing components for repair/manufacturing applications: a critical review. *Coatings*. 2017, 7(8), 122, 1-27.
10. Dykhuizen, R., Smith, M. Gas dynamic principles of cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1998, 7(2), 205- 212.
11. Kay, C.M., Karthikeyan. J. *High pressure Cold Spray Principles And Applications*, (1st ed.), ASM International, Ohio, 2016, 300 s.
12. Champagne, V. K. *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals And Applications*, 1st ed. Woodhead Publishing, Maryland, 2007, 376 s.
13. Dominic J., Varacalle. Jr., Guillen, D. P., Deason, D. M. Rhodaberger, W. Sampson, E. Effect of grit-blasting on substrate roughness and coating adhesion. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006, 15 (3), 348–355.
14. Vlcek J., Huber H., Voggenreiter H., Fischer A., Lugscheider E. Kinetic Powder CoMPaction Applying the Cold Spray Process: A Study on Parameters. *International Thermal Spray Conference*, 28-30 May, 2001, Singapore (Proceedings of the ITSC 2001), 417 s.
15. Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkimov, A., Fomin, V. *Cold Spray Technology*, 1st ed., Elsevier, Netherlands, 2007, 328 s.
16. Stoltenhoff, T., Kreye, H., Richter, H. An Analysis of the cold spray process and its coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2001, 11(4), 542-550.
17. Steenkiste, T. V., Smith, J., Teets, R. Aluminum Coatings via kinetic spray with relatively large powder particles. *Surface Coating Technology*. 2002, 154, p 237-252.
18. Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., Kreye, H. Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia*. 2006, 54 (3), 729-742.

19. Koivuluoto, H. Microstructural Characteristics and Corrosion Properties of Cold-Sprayed Coatings. Tampere University of Technology, Department of Materials Science, Tampere, Finland, 2010, 84 s. (Doktora Tezi)
20. Bayrak S.E., Al-12Si Matrisli Seramik Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Yöntemi İle Üretilmesi ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, 2011, 86 s. (Yüksek Lisans Tezi)
21. Papyrin, A. Cold spray technology. Advanced Materials & Processes. 2001, 49-51.
22. Altuncu E., Üstel F. Soğuk sprej (cold spray) teknolojisi ve uygulama alanları. Türk Mühendis Ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi. 2010, 157, 29-40.
23. <http://www.thermalsprayusa.com/thermal-spray-101/thermal-spray-up-close/> 2018 tarihinde alınmıştır.
24. Pawlowski, L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. John Wiley & Sons Ltd., New York, USA, 1995, 414 s.
25. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:558756/FULLTEXT01.pdf> 2018 tarihinde alınmıştır.
26. Veräjänkorka, S., Lagerbom, J., Vuoristo, P. Influence of Powder Type and Properties on Ceramic Layer Deposition by Cold Spraying. Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success, Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y.-C., Lima, R., Voyer J. ASM International, Seattle, Washington, USA, 2006, 396s.
27. Davis J.R. Cold Spray Process, Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International, Materials Park, Ohio, 2004, 332s.
28. Steenkiste T. V., Smith J. R., Teets R. E., Moleski J. J., Gorkiewicz D. W., Tison R. P., Marantz D. R., Kowalsky K. A., Riggs W. L., Zajchowski P. H., Pilsner B., Mccune R. C., Barnett K. J. Kinetic spray coatings. Surface and Coatings Technology. 1999, 111 (1), 62-71.
29. Kairet T. A Contribution To The Study Of Cold Gas Dynamic Spraying Of Copper: Influence Of The Powder Characteristics On The Mechanical Properties Of The Coating. Université Libre de Bruxelles, Faculty of Applied Sciences, Chemicals and Materials Department, Bruxelles, Belgium, 2007, 183 s. (Doktora Tezi).
30. Borchers, C., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Assadi, H., Kreye, H. Microstructural and macroscopic properties of cold sprayed copper coatings. Journal of Applied Physics. 2003, 93(12), 10064-10070
31. Mccune R.C., Papyrin A.N, Hall J.N., Riggs W.L., Zachowski P.H., Ed: Berndt, C.C., SaMPath, S. An Exploration of the Gold Gas-Dynamics Spray Method for Several Materials Systems, Thermal Spray Science and Technology, ASM International, 1995, 1110 s.
32. Kim H.-J., Lee C.-H., Hwang S.-Y. Superhard nano WC12%Co coating by cold spray deposition. Materials Science and Engineering A. 2005, 391 (1-2), 243-248.
33. Karthikeyan J., Kay C.M., Lindeman, J., Lima R.S., Berndt C.C., Cold Spray Processing Of Titanium Powder Ed: Berndt, C.C. Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research, ASM International, USA, 2000, 1410 s.
34. Vlcek J., Gimeno L., Huber H., Lugscheider E., A systematic approach to material eligibility for the cold spray process Ed: Marple B.R., Moreau, C. Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology, ASM International, USA, 2003, 1566 s.

35. Irissou, E., Legoux, J.-G., Arsenault, B., Moreau, C. Investigation of Al-Al₂O₃ cold spray coating formation and properties. *Journal of Thermal Spray Science and Technology*. 2007, 16, 661-668.
36. Sansoucy, E., Marcoux, P., Ajdelsztajn, L., Jodoin, B. Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process. *Surface and Coating Technology*. 2008, 202, 3988-3996.
37. Li, W.Y., Zhang, G., Liao, H.L., Coddet, C. Characterizations of cold sprayed TiN particle reinforced Al2319 composite coating. *Journal of Material Processing Technology*. 2008, 202, 508-513.
38. Xu, Y., Hutchings, I.M. Cold spray deposition of thermoplastic powder. *Surface and Coatings Technology*. 2006, 201(6), 3044-3050.
39. Champagne, V. *The Cold Spray Materials Deposition Process: Fundamentals and Applications*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, 2007, 362 s.
40. Richter, P., Höll, H. Latest Technology for Commercially Available Cold Spray Systems. *Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success*, Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y.-C., Lima, R., Voyer J. ASM International, Seattle, Washington, USA, 2006, 396s.
41. Steenkiste, T. V., Gorkiewicz, D. Analysis of tantalum coatings produced by the kinetic spray process. *Journal Thermal Spray Technology*. 2004, 13(2), 265-273.
42. Price, T., Shipway, P., McCartney, D., Calla, E., Zhang, D. A Method for characterizing the degree of inter-particle bond formation in cold sprayed coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007, 16(4), 566-570.
43. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H. Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia*. 2003, 51, 4379-4394.
44. Calla, E., McCartney, D., Shipway, P. Effect of Heat Treatment on the Structure and Properties of Cold Sprayed Copper. *Thermal Spray 2005: Explore its surfacing potential!*. ASM International, Basel, Switzerland, 2005, 84 s.
45. Schmidt, T., Gärtner, F., Kreye, H. High Strain Rate Deformation Phenomena in Explosive Powder Compaction and Cold Gas Spraying. *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology*, Ed: Moreau, C., Marple B., ASM International, Orlando, Florida, USA, 2003, 710 s.
46. Maev, R., Leshchynsky, V. Air gas dynamic spraying of powder mixtures: theory and application. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006, 15(2), 198-20.
47. Shin, S., Yoon, S., Kim, Y., Lee, C. Effect of particle parameters on the deposition characteristics of a hard/soft-particles composite in kinetic spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2006, 201, 3457-3461.
48. Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F., Richter, H., Stoltenhoff, T., Kreye, H., Klassen, T. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009, 18(5- 6), 794-808.
49. Kreye, H., Schmidt, T., Gärtner, F., Stoltenhoff, T. *The Cold Spray Process and Its Optimization*. *Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success*, Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y.- C., Lima, R., Voyer J. ASM International. Seattle, Washington, USA, 2006, 396 s.
50. Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T., Kreye, H. The cold spray process and its potential for industrial applications. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006, 15(2), 223-232.
51. Schmidt, T., Gärtner, F., Kreye, H. New developments in cold spray based on higher gas and particle temperatures. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006, 15(4), 488-494.

52. Sakaki, K., Tajima, T., Li, H., Shinkai, S., Shimizu, Y. Influence of Substrate Conditions and Traverse Speed on Cold Sprayed Coatings. Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application. ASM International. Osaka, Japan, 2004, 1118 s.
53. Legoux, J., Irissou E., Moreau, C. Effect of Substrate Temperature on the Formation Mechanism of Cold Sprayed Aluminum, Zinc and Tin Coatings. Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y., Li, C.-J., Lima, R., Montavon G. ASM International. Beijing, China, 2007, 1180 s.
54. <https://www.adandp.media/articles/high-velocity-materials-improvement>, 2018 tarihinde alınmıştır.
55. http://www.cmit.csiro.au/innovation/2003-08/cold_spray.cfm, 2018 tarihinde alınmıştır.
56. Kashirin, A., Klyuev, O., Buzdygar, T., Shkodkin, A. Dymet Technology Evolution and Application. Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y., Li, C.-J., Lima, R., Montavon G. ASM International. Beijing, China, 2007, 1180 s.
57. Djordjevic, B., Maev, R. SIMATTM Application for Aerospace Corrosion Protection and Structural Repair. Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success. Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y.- C., Lima, R., Voyer J. ASM International. Seattle, Washington, USA, 2006, 396 s.
58. <http://dymet.amazonit.ru/eindex.html>, 2018 tarihinde alınmıştır.
59. Sova, A., Papyrin, A., Smurov, I. Influence of ceramic powder size on process of cermet coating formation by cold spray. Journal of Thermal Spray Technology. 2009, 18(4), 633-641.
60. Shkodkin, A., Kashirin, A., Klyuev, O., Buzdygar, T. The Basic Principles of Dymet Technology. Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success, Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y.- C., Lima, R., Voyer J. ASM International. Seattle, Washington, USA, 2006, 396 s.
61. Shkodkin, A., Kashirin, A. Determination of the parameters of the process of gas-dynamic deposition of metallic coatings. Welding International. 2006, 20(2), 161-164.
62. Karthikeyan, J., Laha, T., Agarwal, A., Munroe, N. Microstructural and Electrochemical Characterization of Cold-Sprayed 1100 Aluminum Coating. Thermal Spray 2004: Advances in Technology and Application. ASM International. Osaka, Japan, 2004, 1118 s.
63. Weinert, H., Maeva, E., Leshchynsky, E. Low Pressure Gas Dynamic Spray Forming Near-net Shape Parts. Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success, Ed: Marple, B., Hyland, M., Lau, Y.- C., Lima, R., Voyer J. ASM International. Seattle, Washington, USA, 2006, 396 s.
64. Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Sova, A., Smurov, I., Bertrand, P. Investigation Of Composites: Metal - Ceramics And Metal - Metal Coatings Produced With Cold Spray Equipment With Ejector. Thermal Spray 2008: Thermal Spray Crossing Borders, Ed: Lugscheider, E. Springer US. Maastricht, The Netherlands, p 396 s.
65. Steenkiste, T. V., Smith, J., Teets, R., Moleski, J., Gorkiewicz, D., Tison, R., Marantz, D., Kowalsky, K., Riggs, II, W., Zajchowski, P., Pilsner, B., McCune, R., Barnett, K. Kinetic spray coatings. Surface and Coatings Technology. 1999, 111, 62-71.

66. Grujicic, M., Saylor, J.R., Beasley, D.E., DeRosset, W.S., Helfrich, D. Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process. *Applied Surface Science*. 2003, 219, 211–227.
67. Li, C.-J. Li, W.-Y. Examination Of The Critical Velocity For Deposition Of Particles In Cold Spraying. *Thermal Spray 2005: Explore its surfacing potential!*, ASM International, Basel, Switzerland, 2005, 84 s.
68. Borchers, C., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H. Formation of persistent dislocation loops by ultra-high strain-rate deformation during cold spraying. *Acta Materialia*. 2005, 53, 2991-3000.
69. Klinkov, S., Kosarev, V., Rein, M. Cold spray deposition: Significance of particle impact phenomena. *Aerospace Science and Technology*. 2005, 9(7), 582-591.
70. Papyrin, A., Klinkov, S., Kosarev, V. Effect Of The Substrate Surface Activation On The Process Of Cold Spray Coating Formation. *Thermal Spray 2005: Explore its surfacing potential!*, ASM International, Basel, Switzerland, 2005, 84 s.
71. Schmidt, T. Kaltgassspritzen. Eine Analyse Des Materialverhaltens Beim Partikelaufrall Und Die Daraus Abgeleitete Prozessoptimierung. *Werkstofftechnik*, Shaker Verlag, Hamburg, Germany, 2007, 151 s.
72. Gärtner, F., Borchers, C., Stoltenhoff, T., Kreye, H., Assadi, H. Numerical and Microstructural Investigations of the Bonding Mechanisms in Cold Spraying. *Thermal Spray 2003: Advancing the Science & Applying the Technology*, Ed: Moreau, C., Marple B., ASM International, Orlando, Florida, USA, 2003, 710 s.
73. Alkan, Z., Varol, R., Selver, R. Bilyeli dövme uygulanmış AA1050 alüminyum malzemenin metalografik incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. (2016), 20 (3), 524-529.
74. Varol, R., Tunay, R. Bilyalı Dövülmüş AA2024 Alüminyum Alaşımının Aşınma Özellikleri. *Mühendis ve Makine*. 2001, 42(497), 1-12.
75. Başaran, A. Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta* , 2007, 192 s. (Doktora Tezi).
76. Ay, İ., Sakin, R. Kumlama ile parça temizleme ve bilyalı dövme prosesi. *Makina & Metal Teknolojisi*. 1998, 79, 68-72
77. <https://www.wheelabratorgroup.com/en-us/my-application/application-by-process/what-is-shot-peening>, 2018 tarihinde alınmıştır.
78. <https://superiorshotpeening.com/shot-peening>, 2018 tarihinde alınmıştır.
79. Champaigne, J. Shot Peening Overview. *Metal Improvement Co. Milshawaka, USA*, 2001, 37s.
80. Kleber, X., Pirfo Barroso, S. Investigation of shot-peened austenitic stainless steel 304L by means of magnetic Barkhausen noise. *Materials Science and Engineering: A*. 2010, 527(21–22), 6046-6052.
81. Kostilnik, T. Surface Engineering: Shot Peening. In: *ASM Handbook*, vol. 5, Ed: Reidenbach, F. ASM International, Ohio, USA, 1994, 1056 s.
82. Sorsa, A., Santa-aho, S., Warttinen, J., Suominen, L., Vippola, M., Leiviskä, K. Effect of shot peening parameters to residual stress profiles and Barkhausen noise. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2018, 37(10), 1-11.

83. Kayalı, E.S., Çimenoglu, H., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. Hasar Analizi Seminar Notları. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Seminar Notları, TMMOB yayınları, İstanbul, Türkiye, 1997, 36s.
84. Carter, G. F., Carter G.F., Paul, D.E. Materials Science and Engineering. ASM International, Ohio, USA, 1991, 369 s.
85. Baykal, M., Karaca, İ. Zn ilavesinin BiPbSrCaCuO süperiletkenlerinin mikrosertlik özellikleri üzerine etkileri. e-Journal of New World Sciences Academy NWSA-Physical Sciences. 2012, 7, (1), 1-11.
86. Datcheva, M., Chalakova, G., Iankov, R., Kyrychok, V., Stoychev, D. Numerical Simulation Of Nanoindentation Tests - Lessons Learned, Advanced Techniques in NDT. International Conference NDT Days 2017, June 12-16, Sozopol, Bulgaria
87. Sakharova, N. A., Prates, P. A., Oliveira, M. C., Fernandes, J. V., Antunes. J. M. A simple method for estimation of residual stresses by depth-sensing indentation. Strain. 2011, 48(1),75 – 87
88. Antunes, J.M., Cavaleiro, A., Menezes L.F., Simoes M.I., Fernandes J.V. Ultra-microhardness testing procedure with Vickers indenter. Surface and Coatings Technology. 2002, 149, 27–35
89. Calabri, L., Pugno N., Menozzi C., Valeri S. AFM nanoindentation: tip shape and tip radius of curvature effect on the hardness measurement . Journal Of Physics: Condensed Matter, 2008, 20 (47), 395002–395013.
90. Çulha, O. Optimization of Superconducting and Mechanical Properties of Coated Superconductor Films. Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Metallurgical and Materials Engineering Program, İzmir, 2011, 243 s. (Doktora Tezi).
91. Broitman, E. Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. Tribology Letters. 2017, 65:23.
92. Zhou Y., Yang L., Huang Y. Micro- and Macromechanical Properties of Materials. CRC Pres Taylor & Francis Group. Florida, USA, 2014, 578 s.
93. Grous, A. Applied Metrology for Manufacturing Engineering, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2013, 544 s.
94. Yao, Z. Development of An Indentation Method For Material Surface Mechanical Properties Measurement. West Virginia University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Morgantown, Virginia. 2005,156 s. (Doktora Tezi).
95. Biçer, E. D. Sol – Jel Yöntemi İle Hazırlanan TiO₂ – SiO₂ Nanokompozit İnce Filmlerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2015, 129 s. (Yüksek Lisans Tezi).
96. Poon, B., Rittel, D., Ravichandran, G. An analysis of nanoindentation in linearly elastic solids. International Journal of Solids and Structures. 2008, 45, 6018–6033.
97. Bulychev, S.I., Alekhin, V.P., Shorshorov, M.K., Ternovskii, A.P., Shnyrev, G.D. Determining Young’s modulus from the indenter penetration diagram. Zavodskaya Laboratoriya. 1975, 41 (9), 1137–1140.
98. Loubet, J.L., Georges, J.M., Marchesini, O., Meille, G. Vickers indentation curves of magnesium oxide (MgO). Journal of Tribology. 1984, 106(1), 43–48.
99. Newey, D., Wilkins, M.A., Pollock, H.M. An ultra-low-load penetration hardness tester. Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1982, 15, 119–122.

100. Gül, K. A. Nanoindentasyon Deneyi ile Malzeme Davranışlarını İnceleme, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Simulasyonu ve Tersinir Davranış Tanımlama. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, İstanbul, 2010, 133 s. (Yüksek Lisans Tezi).
101. Ficher-Cripps, A.C., Ling, F.F. Nanoindentation. Springer-Verlag, London, 2002, 164 s.
102. Oliver, W.C., Pharr, G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by indentation. Journal of Materials Research. 2004, 19, 3-20.
103. Kiat, T. K. Formulation of Constitutive Relations Based on Indentation Tests. National University of Singapore, Department of Civil Engineering, 2005, 189 s. (Doktora Tezi).
104. Kulkarni, K. Experimental Characterization and Finite Element Simulation of Laser Shock Peening Induced Surface Residual Stresses using Nanoindentation, University of Cincinnati, the School of Dynamic Systems College of Engineering and Applied Science 2012, 89 s. (Yüksek Lisans Tezi).
105. Institute of Physics. The Physical Measurement of Bone. Ed: Langton C. M., Njeh, C. F. Bristol and Philadelphia, 2003, 612 s.
106. Oliver, W. C., Pharr, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. Journal of Materials Research. 1992, 7(6), 1564-1583.
107. Abaqus Theory Manual Version 6.1. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Michigan, USA, 2000, 841
108. Brookes, C.A., Indentation Hardness Of Diamond, In Properties of Diamond, Ed: Field, J.E. Academic Press, London, 1979, 586 s.
109. Hussain, T., McCartney, D. G., Shipway P. H. Bonding between aluminium and copper in cold spraying: story of asymmetry. Materials Science and Technology. 2012, 28(12), 1371-1378

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ayça DEMİRER KAHRAMAN

Doğum Yeri ve Yılı : İmranlı, 1983

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : demirer.ayca.ad@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : İbrahim Bodur Lisesi, 1997-2000

Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Seramik Mühendisliği Bölümü, 2005-2005

Yüksek Lisans : Dumlupınar Üniversitesi, Seramik ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 2007-2009

Mesleki Deneyim

Yorglas Yorgancılar Dekoratif Cam Sanayi ve Ticaret A.Ş.
(Kalite Güvence Mühendisi) 2007-2011

Ege Üniversitesi, Ege Meslek Yüksek Okulu,
Öğretim Görevlisi (31. madde) 2008-2009

Yayınları

Emrullahoğlu, C. B., Hıdıroğlu Akdemir, B., Deveci, L., Demirer, A. Borik Asit Katkısının Kordiyerit Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi, III. Uluslararası Bor Sempozyumu, 2-4 Kasım, 2006, Ankara

Demirer, T., Köse, H., Demirer, A. Tarımda Zeolitin Yeri. Hasad Dergisi. 2010, Temmuz, sayı: 302, s: 92-95. In agriculture, the importance of Zeolite, 2010, 302, 92-95.

Demirer, A., Kahraman, F., Babayev, Y. HVOF Yönteminin Özellikleri Ve Uygulama Alanları, Journal Of Qafqaz University- Mechanical And Industrial Engineering. 2013, 1(1), 21-25

Demirer, A., Yılmaz B. Wettability of Cement and Pozzolan Particle Surfaces, Advances in Cement Research, 2015, 27(3), 124-134

Kahraman, F., Yolcu, C., Demirer Kahraman, A. Ultrasonik Darbe Yöntemi (UDY) İle Kaynaklı Bağlantıların Yorulma Dayanımının İyileştirilmesi, IMSP'2016 16th International Materials Symposium 12-14 October 2016, Denizli – Turkey

Kahraman, F., Kasman, Ş., Aydın, A., Emiralioğlu, A., Demirer Kahraman, A. TIG, MIG VE FSW Kaynak Yöntemleri İle Kaynak Edilmiş AA6082-T6 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması, IMSP'2016 16th International Materials Symposium 12-14 October 2016, Denizli – Turkey

Kahraman, F., Kahraman, H., Demirer Kahraman, A., Yolcu, C. Bir Krank Milinde Oluşan Yorulma Çatlağının İncelenmesi”, IMSP'2016 16th International Materials Symposium 12-14 October 2016, Denizli – Turkey

Kahraman, F., Kasman, Ş., Kahraman, A.D., Tunuslu, O. “Östenitik Paslanmaz Çelikler İle Takım Çeliklerinin Birbirleri İle Kaynağında Oluşan Kaynak Bölgesinin İncelenmesi”, 4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri – 4. International Conference on Welding Technologies and Exhibition 11-13 May 2016, Gaziantep-Turkey

Kahraman, F., Kahraman, H., Yolcu, C., Demirer Kahraman, A. Wear Behavior of Ultrasonic IMPact Treated S235JR Steel, MP Materials Testing, 2017, 59 (5), 445-449

Kahraman F., Gençer G.M, Kahraman A. D. Surface nanocrystallization of SAE 1008 steel by single and multipass thread rolling process, Materials Science & Engineering Technology, 2017, 48, 639- 645

Kahraman F, Gençer G.M, Yolcu, C., Demirer Kahraman, A., Dilbaz, M. E. Soğuk Metal Transfer (CMT) ve Darbeli Soğuk Metal Transfer (Darbeli CMT) Kaynak İşlemleri ile Birleştirilmiş AA5754 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018, 20(59), 625-636

Kahraman F, Gençer G.M, Demirer Kahraman, A., Yolcu, C., Kahraman, H. Low-Temperature Nitriding Behavior of Compressive Deformed AISI 316Ti Austenitic Stainless Steels, Surface Review and Letters, 2018,