

**DALDIRILMAMIŞ ÇARPAN JETLERDE
ELEKTROKİMYASAL KAPLAMA**

Uğur KAHRAMAN

**Yüksek Lisans Tezi
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı
Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ
2019
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DALDIRILMAMIŞ ÇARPAN JETLERDE ELEKTROKİMYASAL
KAPLAMA**

Uğur KAHRAMAN

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her Hakkı Saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

DALDIRILMAMIŞ ÇARPAN JETLERDE ELEKTROKİMYASAL KAPLAMA

Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ danışmanlığında, Uğur KAHRAMAN tarafından hazırlanan bu çalışma 16/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı – Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.3/.3.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Özlem KORKUT

İmza :

Üye : Doç. Dr. Jülide ERKMEN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **26.09/2019** tarih ve **38.../99** nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP, projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 2011/140

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DALDIRILMAMIŞ ÇARPAN JETLERDE ELEKTROKİMYASAL KAPLAMA

Uğur KAHRAMAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Temel İşlemler ve Termodinamik Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

Bu tezde, konvektif kütle ve ısı artırma tekniklerinden birisi olan çarpan jetlerin elektrokimyasal kaplama sistemi ile birlikte kullanılması durumunda elde edilen kaplamaların özelliklerinin nasıl etkilendiği belirlenmeye çalışılmıştır. Jet akışının üretildiği nozul içine yerleştirilen bir anot ve çarpma yüzeyi olarak kullanılan katot arasına DC gerilim uygulanarak ve elektrolitin jet akışı halinde doğrudan katot yüzeyine çarptırılması ile elektrokimyasal kaplama yapılır. Jetin çarpma yüzeyi ile 90° açı yapacak şekilde konumlandırılması ile jet durgunluk noktasında en yüksek ısı, kütle ve momentum transferi meydana geldiği için mevcut tez çalışmasında jet akışı numunelere dik olarak çarptırılmıştır. Bu çalışma bir jet hücresi içinde daldırılmamış çarpan konvansiyonel jet kullanılarak üretilen elektrokimyasal kaplamaların, kristal boyutu (nm), kaplama kalınlığı (μm) ve yüzey pürüzlülüğü üzerine jet hidrodinamik parametreleri olan jet hızı V_j , boyutsuz nozul-çarpma yüzeyi mesafesi (H/d) ile elektrolit sıcaklığının etkilerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, artan V_j 'ye bağlı olarak akım yoğunluğundaki artışın kristal büyüklüğünü artırdığı, pürüzlülüğü azalttığı ve kaplama kalınlığını artırdığı belirlenmiştir. Sıcaklıktaki artışın pürüzlülüğü artırdığı ve (H/d)'deki artışın ise kristal büyüklüğünü azalttığı tespit edilmiştir.

2019, 144 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, elektrokimyasal kaplama, kütle aktarımı, kristal boyutu, pürüzlülük.

ABSTRACT

MSc Thesis

UNSUBMERGED IMPINGING JETS IN ELECTROPLATING

Uğur KAHRAMAN

Atatürk University
Institute of Science And Technology
Chemical Engineering Department
Unit Operations and Thermodynamics Discipline

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ

In this thesis, it is tried to determine how the properties of the coatings obtained by using impinging jets, which is one of the convective mass and heat increase techniques, together with electrochemical coating system, are affected. Electrochemical coating is made by applying DC voltage between an anode placed inside the nozzle where jet flow is produced and cathode used as target surface and impinging the electrolyte directly to the cathode surface as jet flow. Since the highest heat, mass and momentum transfer occurs at the jet stagnation point on the target surface, the jet flow was impinged perpendicularly to the samples in the present thesis. In this study, the properties of such as crystal size (nm), coating thickness (m) and surface roughness of electrochemical coatings produced by using conventional immersed impinging jet in a jet cell, how changes with jet the hydrodynamic parameters such as jet velocity V_j , dimensionless nozzle-target surface distance (H/d) and electrolyte temperature were determined. According to the results, it was determined that increasing the current density increases the crystal size, decreases the roughness and increases the coating thickness due to the increasing V_j . It was found that the increase in temperature increases the roughness and the increase in (H / d) decreases the crystal size.

2019, 144 pages

Keyword: Impinging jet, electrochemical coating, mass transfer, crystal size, roughness.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Emin ARZUTUĞ'a, çalışmalarım sırasında yardımlarını gördüğüm Kimya Mühendisliği bölümünün öğretim üyeleri ve personeline teşekkür ederim.

Çalışmamızın değişik aşamalarında, okul, laboratuvar ve atölyede kendi yoğunluklarına rağmen bana her zaman, vakit ayıran arkadaşlarım Betül SOLAK, Kader ÇALIŞKAN'a, çok teşekkür ederim.

Ayrıca öğrenim hayatım boyunca maddi manevi yanımda olan anne ve babama sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Son olarak sevgi, ilgi ve desteğiyle daima yanımda olan, varlığıyla güç aldığım eşim Alev KAHRAMAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen 2011/140 nolu, “Çarpan Jet Elektrokaplama Tekniği Kullanılarak Kompozit Film Üretimi” başlıklı bilimsel araştırma projesi desteği ile gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Atatürk Üniversitesi yönetimine ve BAP koordinasyon birimine teşekkür ederim.

Uğur KAHRAMAN

Eylül, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Özetleri.....	8
2. KURAMSAL TEMELLER.....	18
2.1. Çarpan Jet Nedir, Kaça Ayrılır?	18
2.2. Çarpan Jet Kaplamanın Özelliği.....	20
2.3. Çarpan Jet Kaplamanın Önemi.....	21
2.3.1. Çarpan jetin kullanım alanları	23
2.3.2. Jet sistemler	25
2.3.3. Çarpan jetle elektrokimyasal ve elektrokimyasal kaplamanın karşılaştırılması	26
2.4. Elektrokimyasal Kaplama Proseslerine Etkileyen Parametreler	27
2.5. Adezyon ve Kohezyon	28
2.6. Kütle Transferi	29
3. MATERYAL ve YÖNTEMLER.....	32
3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler	32
3.2. Deney Düzenegi	32
3.3. Deneyin Yapılışı.....	34
3.3.1. Numunelerin hazırlanması ve ön işlemler.....	36
3.3.2. Elektrolit çözeltisinin (CuSO_4 çözeltisi) ve Bakır miktarının tayini için EDTA çözeltilerinin hazırlanması	37
3.3.2.a. H_2SO_4 hazırlanması	38
3.3.2.b. Müreksit indikatörü ile EDTA hazırlanması ve Cu tayini	39
3.3.2.c. Elektrolitin hazırlanması.....	40

3.3.2.d. Sınırlayıcı akım	40
3.3.3. Kimyasal kaplama reaksiyonu.....	41
3.3.4. Elektrokimyasal kaplama proseslerine etkileyen parametreler	43
3.3.4.a. Geçen akım	43
3.3.4.b. Çarpma yüzeyi mesafesi.....	45
3.3.4.c. Nozul	45
3.3.4.d. Jet hızı.....	46
3.3.4.e. Anot ve katot	47
3.3.4.f. Banyo geometrisi	48
3.3.4.g. Kaplama banyosunun konsantrasyonu	48
3.3.4.h. Elektrolitin hareketi	48
3.3.4.ı. Banyo sıcaklığı	49
3.3.4.i. Banyo pH değeri.....	49
3.3.4.j. Cu kullanılmasının Sebebi	50
3.3.4.k. Bakırın elektrokimyasal özelliği	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	52
4.1. Çarpan Jetin Elektrokimyasal Kaplama Üzerine Etkisi	52
4.1.1. Kaplama kalınlığının SEM ile tespit edilmesi.....	54
4.1.2. Kristal büyümesinin X-RAY analizi ile belirlenmesi	57
4.1.3. Kütle transfer katsayılarının belirlenmesi ve parametreler göre değişimi	63
4.1.4. Numune görüntüleri	72
4.1.5. Pürüzlülük	72
4.2. (H/d)'nin Kaplama Üzerindeki Etkisi	75
4.3. Sıcaklığın Kaplama Üzerine Etkisi	76
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR	80
EKLER.....	82
EK 1.....	82
EK 2.....	115
ÖZGEÇMİŞ	145

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Akım
cm ²	Santimetrekare
d	Anot nozul çapı(mm)
dk	Dakika
dm ²	Desimetrekare
g	Gram
H	Jet çıkışı ile çarpma yüzeyi (mm)
L	Litre
m	Metre
M	Molar
mA	Miliamper
ml	Mililitre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
°C	Santigrat
pH	Çözeltinin asitlik veya bazlık derecesi
s	Saniye
V _j	Jet hızı

Kısaltmalar

(H/d)	Boyutsuz Nozul-Jet Çarpma Yüzeyi Mesafesi
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
CGDS	Soğuk Gaz Dinamik Sprey
Cu ₂ SO ₄	Bakır (II) Sülfat
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme

ÇJS	Çarpan Jet Sistem
DC	Doğru Akım
FFM	Atomik Force Mikroskobu
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
GPM	Galon Bölü Dakika
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
HVOF	Yüksek Hızlı Oksi Yakıt
MAO	Mikro Ark Oksitlenme
PEO	Plazma Elektrolitik Oksitlenme
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
Re	Reynold Sayısı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Sh	Sherwood sayısı
TME	Geçirimli Elektron Mikroskobu
XRD	X-Işınları Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Daldırılmamış çarpan jet akış profili	19
Şekil 2.2. Daldırılmış çarpan jet akış profili	20
Şekil 2.3. Çarpan jetin akış bölgeleri	21
Şekil 2.4. ÇJS tekniğiyle kaplanmış bir roket motoru manifoldu.....	24
Şekil 2.5. Parçanın dönüşü hakkında bilgi toplamak için ÇJS tekniği uygulanarak üretilen sensör kaplamaları	25
Şekil 2.6. ÇJS ile elektrokimyasal kaplamanın üst tabakalara doğru oluşan boşluklu yapı	26
Şekil 2.7. Metal yüzeyindeki atomların diğerlerine nazaran daha yüksek serbest enerjiye sahip olduğunun görüntüsü.....	28
Şekil 3.1. Çarpan jet elektrokimyasal kaplama sistemi	33
Şekil 3.2. Deney düzeneği	34
Şekil 3.3. Kaplama için hazırlanan katot numunelerin görüntüleri	36
Şekil 3.4. Hidrasyon suyu	38
Şekil 3.5. Sınırlayıcı akım grafiği	41
Şekil 3.6. (a-b)'de nozul (anot) bölgesi, (H/d) mesafesi, katot çarpma bölgesi	46
Şekil 3.7. Cu elementi.....	50
Şekil 4.1. Artan jet hızı ile difüzyon tabakasının incelmesi sonucunda bakırın birikim hızı artmıştır.....	52
Şekil 4.2. En kesit SEM görüntülerinin alınması için hazırlanan numuneler.....	54
Şekil 4.3. (H/d)=1'de $V_j=4,46$ (m/s)'de Cu alt malzeme üzerine yapılan kaplamanın SEM görüntüsü	55
Şekil 4.4. (H/d)=1'de $V_j=3,47$ (m/s)'de Cu alt malzeme üzerine yapılan kaplamanın SEM görüntüsü	56
Şekil 4.5. (H/d)=1'de kaplama kalınlıklarının V_j 'ye göre değişimi	56
Şekil 4.6. (H/d)=0,5'te Jet durgunluk noktasındaki Ni kaplamaların V_j göre değişimi	57
Şekil 4.7. T=20°C'de ki 3,47 (m/s) hıza bağlı (H/d)=1 şartlarında kaplanan numunenin X-Ray grafiği.....	58

Şekil 4.8. Kaplamaların X-Ray grafiklerinde gözlenen Cu pikleri ve diğer pikler	59
Şekil 4.9. $T=20^{\circ}\text{C}$ 'de ki hıza bağlı kristal büyüklüğü	60
Şekil 4.10. $T=30^{\circ}\text{C}$ 'de ki hıza bağlı kristal büyüklüğü	60
Şekil 4.11. $T=40^{\circ}\text{C}$ 'de ki hıza bağlı kristal büyüklüğü	61
Şekil 4.12. Katot yüzeyi üzerindeki Cu'nın konsantrasyon polarizasyon grafiği.....	62
Şekil 4.13. Mevcut çalışmada hesaplanan ortalama kütle transfer katsayıları	64
Şekil 4.14. Bir daldırılmış tip çarpan jetin çarpma yüzeyi üzerinde radyal yöndeki ELDCT ile belirlenen kütle transfer katsayısı dağılımı.....	65
Şekil 4.15. $V_j=4\text{ m/s}$ 'de farklı (H/d) değerlerindeki nikel kaplamaların yüzey fotoğrafları.....	66
Şekil 4.16. $T=20^{\circ}\text{C}$ 'de ki (H/d) nozul-jet çarpma yüzeyi mesafesine bağlı kristal büyüklüğü.....	67
Şekil 4.17. $T=30^{\circ}\text{C}$ 'de ki (H/d) nozul-jet çarpma yüzeyi mesafesine bağlı kristal büyüklüğü.....	67
Şekil 4.18. $T=40^{\circ}\text{C}$ 'de ki (H/d) nozul-jet çarpma yüzeyi mesafesine bağlı kristal büyüklüğü.....	68
Şekil 4.19. (H/d)=1'de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü	69
Şekil 4.20. (H/d)=1,5'de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü	69
Şekil 4.21. (H/d)=2'de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü	70
Şekil 4.22. (H/d)=2,5'de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü	70
Şekil 4.23. Bakır kaplamaların farklı sıcaklıklardaki SEM görüntüleri	71
Şekil 4.24. Banyo sıcaklığındaki değişime bağlı olarak kristal büyüklüğünün değişimi	71
Şekil 4.25. Kaplama sonrası numunelerin görüntüsü	72
Şekil 4.26. (H/d)=1,0'de farklı sıcaklıklarda jet hızına (V_j) göre pürüzlülüğün değişimi.	73
Şekil 4.27. (H/d)=1,0'de farklı V_j değerlerinde sıcaklığa bağlı olarak (R_a değerlerine göre) pürüzlülüğün değişimi	74
Şekil 4.28. Farklı kaplama sıcaklıklarında $2\times 2\text{ }\mu\text{m}$ AFM görüntülerinde hesaplanan R_a değerlerine göre pürüzlülükler	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deneysel parametrelerin seviyeleri.....	34
Çizelge 3.2. Bakırın elektrokimyasal özelliği.....	51

1. GİRİŞ

Son birkaç yıl içerisinde özellikle otomobil, uzay ve elektronik endüstrisinde hafif metallerin (Al, Ti, Mg) alaşımlarının kullanımı büyük oranda artmıştır. Bu artışın başlıca sebepleri; hafif metallerin çok iyi mekanik özelliklere sahip olması ve iyi kalıplanabilmesidir. Mesela taşıtların daha hafif üretilmesi yakıt tüketimini düşürmekte ayrıca çevre için olumsuz gaz salınımında olumlu etkilemektedir.

Üretilen parçalar kullanım alanlarına göre mekanik olarak yıpranma ve deformasyonlar oluşmaktadır. Bu sorunları çözmek için metallere, alaşımlara farklı kaplama yöntemleri uygulanmalıdır. Uygulanan kaplama modifikasyonunun daha etkili yollarından birisi yüzeyde iyonlar oluşturmakla mümkündür. Bu ise çarpan jet sistemi ile gerçekleştirilip, doğaya zararsız, kompleks yüzeylerin kaplamasını imkan sağlamaktadır. Bu yöntem bir elektrolitin anottan yüksek hızla koparttığı iyonları katoda çarptırılması ile oluşan kaplama işlemidir. Bu kaplama sonrasında kaplanan malzeme kullanılan ortama ve çevreye karşı dirençli ve uzun ömürlü olmaktadır. İkinci yararı ise eğri, delikli ve kaplama imkanı zor olan metal yüzeylerin kaplanmasına olanak oluşturmaktadır. Bu nedenden yüzeyin bir tarafını değil her yerini homojen kaplamaktadır (Tekin vd 2008).

Örnek olarak Kuzey Amerika'da korozyona uğramış materyallerin değiştirilme maliyetleri yıllık olarak 90 milyar doları geçmektedir. Üretilen demirin %20'si paslanma sonucunda, parçalanmış ürünlerin ise değiştirilmesi gereklidir. Çevresel (aşınma, oksitlenme vb.) olumsuz şartlardan kurtulmanın yolu kaplanacak yüzeyin temasının yok edilmesidir. Bu doğrultuda yüzey ince bir film katmanla kaplanır. Ayrıca bu işlemi diğer metotlarla karşılaştırıldığında oldukça ucuzdur. Bir kaplama, nemin ve havanın metal yüzeyle temasını önleyecek bir şekilde boyanada bilir. Birçok sektörde, bir alaşım veya metalin uzun ömürlü olan başka bir metal tabaka ile kaplanma işlemi yapılmaktadır. Demiri örnek verirse hem ucuz hemde fiziksel özellikleri iyi olan bir metaldir, bu metalin elektrokimyasal yöntemlerle Cu, Cr, Ni, Ag ve Sn ile kaplanmaktadır. Bu metal tabakalar, boyanmış tabakalara göre daha uzun ömürlü, daha kullanışlıdır. Metallerin elektrolitik olarak kaplanması genellikle elektrolitik hücrelerin dışında gerçekleştirilir.

Kullanılan doğru akım, bir pil tarafından sağlanır. Teller, enerjinin iki uçundan elektrolitik hücreye uzanır. Tellerden biri ucu anoda, bir ucuda katoda bağlıdır. Her iki elektrot, çeşitli pozitif ve negatif iyonlar (yükli atom ve moleküller) içeren sulu bir çözelti içine batırılarak hazırlanır (Anonim 2007).

Elektrokimyasal kaplama işlemi yaklaşık olarak 150 yıldan beri kullanılmaktadır ve son zamanlarda daha fazla gelişim göstermektedir. Elektrokimyasal kaplama iyonik yüklü bir çözeltiye metalin (iletkenin) daldırılması ile elektrik akımı yardımı ile kaplamanın yapılmasıdır. Bu işlem için elektrolitin biriktirilecek olan elektrotu içerir. Avantajları kullanım kolaylığı, düşük maliyet, ısı ve elektrik iletkenliği dekorasyon amaçlı korozyon ve aşınma direncinin iyileştirilmesi vardır. Elektrokimyasal kaplama eşsiz özelliği ile karmaşık şekilleri düzenli ve gözenekli yapılar bile kaplamaya izin vermektedir. Son zamanlarda bakır kaplama yarı iletken entegre devre ve çip üretiminde önem teşkil etmektedir (Igorovich 2012).

Çarpan jetler konvektif ısı kütle artırma yöntemlerinden birisidir ve yüksek kontrollü lokal ısı kütle transfer katsayısı elde edilmesinde oldukça etkilidir. Bu teknik uygulamada şu alanlarda kullanılır; yüksek sıcaklık gaz türbinlerinde, soğutma sistemlerinde, elektronik bileşenin soğutulmasında, tahtanın kurutulması, tahta, tekstil, kağıt film endüstrilerinde, kurutma amacıyla, cam levhaların üretiminde, metal ve plastik levhaların temperlenmesinde ve son yıllarda endüstriyel gıda proseslerinde çalışmalarında kullanılmaktadır (Şara *et al.* 2007).

Elektrokimyasal kaplama, banyo olarak adlandırılan bir elektrolit içine daldırılan anot ve katotdan akım geçirilmesi ile bir metal üzerine başka bir metalin depolanması procestir. Bu proceste depolanmak istenen malzemenin kaynağı veya çözünen madde anot olarak görev yapar. Katot malzemesi substrat olarak adlandırılıp metalin biriktiği elektrottur ve negatif kutba bağlıdır. Anot(+), katot(-), elektrolit ise metal iyonlarının uygulanan akım ile iyonların transfer olduğu ortamdır. Akım uygulandığı zaman metal iyonların taşınmasına müsaade eder. Ortamda genellikle akım olarak doğru akım güç kaynağıdır. Elektrokimyasal kaplama proseslerinde ana amaç kaplanacak yüzey

(malzeme) üzerinde uniform (depozit) her yerde eşit kalınlıkta kaplama sağlamaktadır. Elektrokimyasal kaplama proseslerini etkileyecek birçok parametre vardır. Banyonun geometrisi, kaplama banyosunun konsantrasyonu, elektrolitin hareketi, banyo sıcaklığı, banyonun pH, geçen akım, anot, katot ayrımı.

Çarpan jet sistemleri yüksek hızlı kütle transferi sağlamasının yanında çalışma yüzeyinin çok spesifik bir özelliğine sahip olmasını sağlar. Bir klasik çarpan jet sisteminde nozul içine yerleştirilen anot ya gözenekli bir metal veya yüzük şeklinde olabilir. Anottan katoda doğru olan çalışma yüzeyi arasına bir potansiyel fark uygulandığı zaman jet çözeltisi içindeki iyonlardan pozitif yüklü olanlar katoda doğru hareket eder. Nispeten yüksek voltajlarda istenmeyen yan reaksiyonlar meydana gelebilir ki bunlar toplama üzerinde bozucu bir etkiye sahiptir. Bu nedenle sınırlayıcı akım yoğunluğu karşılık gelen voltaj değerleri altında çalışılır. Elektrokimyasal kaplamanın pratik uygulamalarında sınırlayıcı akım altındaki akım yoğunluğu değerlerini veren voltajlar uygulanır. Bu çalışmada iki boyutlu çarpan jet akısı ile çarpma yüzeyi üzerindeki elektrolitik kaplama için bir matematiksel formül geliştirildi (Li and Walker 1996).

Yakıtların jet halinde fişkırtılması genellikle; benzinli, dizel sistemlerde, uçak motorlarında ve fabrika ocaklarında görülmektedir, bunun için ise hızlı karışım ve gazlaşmaya bağlı olarak yakıt hacminin artması ile gerçekleşmektedir. Bu sistemlerle ilgili kabul edilmiş bir yöntem tam olarak bulunmamaktadır. Bunun için farklı laboratuvar çalışmaları yapılmalıdır. Bir jet akışının özellikleri, nozul içindeki ve çıkışındaki akış özelliklerine, türbülans özelliklerine, jetin nozuldan çıktıktan sonra türbülans şiddetinin değişmesine nozul eksenini boyunca bozulmasına ve jet akışı içinde oluşan dalga gelişimine bağlıdır (Yeşildal ve Günay 2007).

Yüzeye dik çarpan bir jet çarpma noktası etrafındaki bir bölgede uniform bir akım yoğunluğu dağılımı verir. Jetin belli bir açıda konumlandırılması ile en büyük akım değerleri çarpma bölgesi içerisinde ilk çarpma noktasından daha ileri bir noktaya kayar. Jet belli bir açıda konumlandırıldığında nispeten dar bir bölgede elektrolitik kaplama hızları yüzeyin yakınındaki viskoz kesme davranışının var olduğu gösterir. Daldırılmamış

çarpan jetler daldırılmış olanlara kıyasla bir kademe daha viskoz kesme davranışın var olduğu gösterir. Jet durgunluk noktasında en yüksek ısı, kütle transferi meydana gelir. Sınırlayıcı akım etkisi ile kütle transferi öncelikli olarak çarpma noktasında elde edilir. Uygulanan voltaj artması ile yüzey konsantrasyonu kademeli olarak azalmaya başlar. Bu yüzden sınır tabakadaki geçişi sadece akım değerinde lokal bir artış verir (Li and Walker 1996).

Endüstriyel elektrolitik metal kaplama uygulamalarında kaplama hızı önemli bir kriterdir. Konvektif ısı ve kütle transferi artırma tekniklerinden olan daldırılmamış çarpan jet sistemleri, lokal elektrolitik kaplama alanında son yıllarda büyük ilgi çekmiştir. Çünkü bu konfigürasyonlar, kaplama yapılacak taban malzeme üzerinde lokal olarak kaplama yapabilmeye imkan vermesi yanında, yüksek transfer hızları da sağlamaktadır. Çarpan jet elektrolitik kaplama sistemi elektrolitik kaplamadaki sınırlayıcı akım yoğunluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Böylece kaplama hızı çarpan jet kullanılmayan konvansiyonel elektrolitik kaplamaninkinden yaklaşık olarak 10 kat daha hızlı olmaktadır. Özellikle ısıl işlem uygulanamayan bir metal yüzey üzerinde ihtiyaç duyulan sertleştirme uygulamaları, bu tekniğin kullanımını daha da cazip hale getirmektedir.

Bir konvansiyonel çarpan jet sisteminde, nozul içine anot olarak ya gözenekli bir elek veya yüzük şeklinde bir elektrot yerleştirilir. Anot ve kaplanacak metal parça (katot) arasına bir potansiyel (DC akım) uygulandığı zaman, oluşan elektrik alanı içinde nozuldaki jet olarak çıkan elektrolit içinde bulunan pozitif iyonlar (katyonlar) katotta toplanırlar. Bu teknik kullanılarak, çarpan jet hücreesindeki elektrolit içine nano boyuttaki partiküller eklenerek bir metalik yüzey üzerinde lokal olarak mekaniksel ve tribolojik özellikleri artırmak amacıyla kompozit kaplamalar daha hızlı üretmek mümkün olmaktadır. Özellikle mikro elektromekanik sistemlerdeki mikro sertleştirme uygulamalarında bu tekniğin kullanımı çok caziptir (Arzutuğ ve Ezirmik 2009).

Elektrokimyasal kimyasal bir hücre yardımıyla bir çözelti içindeki metallerin katot üzerinde indirgenmesiyle gerçekleşir. İndirgenmek istenen, yani katot üzerinde depozit etmek istenen metalin standart elektrot potansiyeline göre hücreye belirli bir değer

voltaj uygulanır ve böylelikle metal katot üzerinde birikir. Elektrokimyasal kaplama birçok fen bilimleri ve mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır.

Elektrokimyasal kaplamanın amaçları;

- i. Görünüm: Pek çok defa görülmüştür ki ışıltılı ya da paslanmaz görünüş metalik yüzeyin satılabilirlik epeyce yükseltmektedir,
- ii. Koruma: Genellikle plastik gibi bir malzemenin ağır olmaması onun tercih edilmesini sağlar. Plastiğin modern türleri daha sağlam ve bir kısmı diğerlerine göre sıcaklığa daha mukavemetlidir, ancak tamamının ortak durumu güçlü olmayışlarıdır. Dolayısıyla plastik tabakanın kaplanması güzel bir düşünce gibi görünmektedir,
- iii. Özel yüzey özellikleri
- iv. Mühendislik ve mekanik özellikler: Gelecekte malzemelerin, hele de metallerin, muhafazası çok önemli ve vakit doldukça bu mevzu daha da önem almaktadır. Ne yazık ki doğal kaynaklarımız azalmaktadır. Doğal kaynaklarımızı korumalıyız.

Galvanik bazlı uygulamaların önemi her geçen gün artmaktadır. Kaplanacak malzeme korozyona karşı dayanım ve dekoratif bazı kullanım bunun en önemli sebebidir. Metaller başka kullanım alanlarında kullanılmak üzere yüzey özellikleri fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmek gereklidir. Bakırın yüzeyinin kaplanmasıdaki amaçlar bakırın yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolgu enstrüsünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik ve elektronik sanayi, inşaat sanayi, ulaşım, kimya gibi alanlarda kullanılmaktadır.

- Yüzey görüntüsünün iyileştirmek (dekoratif) Ni, Cr, Au, Zn, kaplama ile sağlanmakta,
- Aşınma dayanımını arttırmak (ana yüzey olarak pirinç, Cd, akımsız Ni)
- Daha dayanıklı aşınma kuvvetine erişmek (güçlü Cr, akımsız Ni)
- Lehimleme ve kaynak yapılabilme durumunu arttırmak(Sn, Zn, Ag, Ni)
- Elektriksel iletkenliği arttırmak (Ag, Au, akımsız Ni)

Maddeler açık ortamda uzun süre kalması neticesinde içinde bulunduğu bölgenin hava şartlarına göre yüzeysel oksitlenme ve paslanmaya uğrayabilir. Bakır üzerinde meydana gelen bu bozulma sürecine kimya dilinde korozyon adı verilir. Korozyonun meydana gelmesinin sebebi maddenin dış kısmının baz özellik taşıyan karbonat ile kaplanmasıdır. Başka bir özelliği ise asit ortamda havayla daha çok oksidasyona (molekülden elektron uzaklaşması, molekülden hidrojen atomunun uzaklaşması, molekülden hidrür iyonun uzaklaşması yada molekülle oksijen sokulması) girebilir (Osborne and Packer 1996).

Metalik kaplamalar korozyondan koruma, bakım, onarım harcamalarının azaltılması, ürün kalitesinin yükseltilmesi ve malzeme tasarrufu açısından büyük önem taşırlar. Nikel kaplama diğer kaplama türlerine göre işlem maliyeti ve kolaylığı açısından özellikle tercih edilmektedir. Ürün geliştirmenin ana hedeflerinden birinin korozyondan koruma olduğu düşünülürse, endüstride sürekli artan nikel ve nikel alaşımlı kaplamaların kullanımının sebebi ortaya çıkmaktadır. Bu sayede makine, malzeme, enerji ve iş gücü kayıpları önleniği gibi dekoratif bir görünüm de elde edilmektedir (Hasçalık ve Özek 2002).

Yüzeye çarpan jet akısı yüzeye yayılır jet çözelti içine daldırılmış elektroda karşı direnç uygulanır. Jetin merkezinde uzaklaştıkça kesme eylemi azalır. Jetin merkezinde yok denilecek kadar azdır. Jetin nozuldan çıkan basınç değeri kaplanacak elektroda doğru azalma gösterecektir. Eğer kaplanacak yüzeyi sonsuz bir ifade olarak göz önüne alırsak ilk enerji boşalana kadar bu işlem gerçekleşecek yada sınır etkisi isabet eden akım bölgesine değdiğinde yayılır çözelti içine jet difüzyon enerji çevreleyen sıvı içine boşalana kadar devam eder. Kaplanacak elektrot nozul giriş yerine yakınsa yüksek basınç bölgesi oluşur. Yüksek kesme gerilmeleri sınır tabaka yakınında mevcuttur ve sıkışma noktası etrafında negatif basınçlar mevcut olabilir (George 1980).

Elektrokimyasal kaplama seçicilik ve birikimi yüksek hızda endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmalar yüksek kütle transferi oranları sunmaktadır. Jet sistemlerde bir anot bir gözenekli yüzük yapıya sahip potansiyel farklı uygulanarak püskürtme yardımıyla çalışma yapılan parça katot arasında gerçekleşir. Birinci durumda kaplanacak parça (katot) durgun hava ile sınırlı jet direk kaplanacak yüzeye uygulanır.

İkinci durum ise katot çözelti içindedir. Jet artık çözelti ile temas halindedir. Elektriksel akım yoğunluğu dağılım farklılıklar gösterecektir. Çarpan jet sistemleri üç bölgeye ayrılır;

- i. Serbest jet bölgesi (nozul altı)
- ii. Durgunluk noktası (sıkışma bölgesi)
- iii. Duvar jet bölgesi (dıştan durgunluk bölgesi) akışkan yüzeye çarpar.

Çarpma noktasında bölünür yüzey boyunca yayılır, sürtünmesiz jet akışı burada hidrodinamik sınır tabaka oluşturur. Varsayılan bu tabaka iyonlar katotta tüketilir, dahası katotta bir difüzyon tabakası oluşur. Çözelti içinde ki difüzyon tabakası hidrodinamik tabakadan çok daha incedir. Son olarak daha ince elektrokimyasal tabaka katottun hemen yakınında oluşur (Li and Walker 1996).

Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) tekniği ile kaplama üretiminde artırma işlemi, parçacıkların yüksek sıcaklıktan ayrı yüksek hıza sahip olması kuralına dayanmaktadır. Bu nedenle işlem sıcaklıkları öbür termal sprey yöntemlerine göre fazla aşağılara çekilebilmektedir. Katı parçacıklar hayli düşük sıcaklıklarda, ses üstü hıza sahip "inert" gaz akışı ile 300-1200 m/s aralığında yüksek hızlara çıkmaktadır. Böylelikle kaplama olayı için ihtiyaç olan enerji, dibe çarpan parçacıkların kinetik enerjisinden elde edilmiş olur. Bazı incelemelerde patlamalı kaynak mekanizmasıyla CGDS prosesinin bağlanma düzeneğinin benzer olduğu sanılmaktadır. Patlamalı kaynakta iki kaplanacak tabakanın birbirine yüksek hızlarda çarpması ile bölgesel yumuşamalar oluşmakta ve netice de katı halde metal jetler oluşmaktadır. Oluşan bu metal jetlerin, yüzeydeki oksitlerin arındırılması, sonuç olarak da metaller arasında daha yakın ve temiz bir temas olmasına yol açtığı ve böylece metaller arası bağların daha güçlü olduğu kabul edilmektedir.

Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme olayından farklı olarak bu yöntemde, gaz sıcaklığı parçacıkların erimesine izin etmeyecek kadar düşük olmaktadır. Çoğunlukla N elementi veya He elementinden oluşan taşıyıcı gazlar 700°C gibi sıcaklıklara kadar bir ön işleminden geçip. Bu ön işlemin amacı, parçacıkların termal enerjisini artırmaktan ziyade gazların

yüksek surata çıkarılmasını sağlamak ve dolaylı olarak parçacıkların kinetik enerjisini artırmaktadır (Karaoğlu vd 2013).

1.1. Kaynak Özetleri

Bu bölümde önce çarpan akışkan jetler ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar uygun konu başlıkları altında özetlenmiştir.

“Vorteksle kontrol edilen asimetric çarpan jetle ısı transferi ve akış yapısı” adlı çalışmada vorteks çifti ile kontrol edilen bir çarpan jetin akış ve ısı transferi karakteristikleri araştırmak için bir deneysel çalışma icra edilmiştir. Vorteks kontrolü için iki tür kontrol metodu uygulanmıştır. ikincil kesme akışı ve akustik karıştırma akustik hareketlenme metotları lokal nürsel sayıları çarpma yüzeyi üzerinde oluşmuştur. Hız ölçümleri akış görüntüleme türbülans şiddeti ve FFT analizleri akış yapısını yapmak için kullanılır. Isı transferindeki artma veya azalma akış yapısının değiştirilmesi sebebiyle vorteks çiftinin kontrol edilmesi ile kontrol edilir. Isı transferindeki artma yada azalma yüksek ısı transfer hızları büyük mesafelerde elde edilir. Jetlerin akış yapısı nozul çıkış şartlarından ve jet etrafında üretilen vortekslerden oldukça büyük oranda etkiler çarpan jetin akış özellikleri vorteksin kontrol edilmesi ile iyi bir şekilde değiştirilebilir. Çarpma yüzeyindeki ısı transfer karakterisizlikleri jet akış yapısının değişiminden etkilenir.

“Jet ile elektrokimyasal kaplama” adlı çalışmada bir düz yüzey üzerine çarptırılan iki boyutlu elektrolit jetinden elektrolitik biriktirme hızları tahmin etmek için bir matematiksel model ve nümerik algoritma geliştirilmiştir. Kaplama için uygulanan voltaj sınırlayıcı akım altındaki akım yoğunluğu üreten voltajtır (gerilim). Bu çalışmada daldırılmış ve daldırılmamış jetler dikkate alınır. Bu çalışmanın sonuçları göstermiştir ki nispeten yüksek elektrokimyasal birikim hızları jet durgunluk noktası ve etrafında meydana gelmiştir, yüzeye göre jet açısının değiştirilmesi lokal elektrolitik biriktirme hızlarını önemli ölçüde belirlemiştirlerdir. İki boyutlu bir jetin bir yüzeye farklı açılarda konumlandırılması ile sonsuz bir düzlem yüzeyi üzerinde meydana gelerek elektrolitik kaplama hızlarını belirlemek için bir metot geliştirmektir. Jetin durgunluk bölgesinden

dışa doğru dinamik sınır tabaka gelişir ve bu tabaka için çözüm nümerik olarak elde edilir. Daha ince difüzyon tabakasının gelişimi hem dinamik sınır tabaka üst kısmı ile birleşen viskoz kesme ile difüzyon tabaka içine uygulanan akım ilede kontrol edilir (Li and Walker 1996).

“Elektrokimyasal kaplama” adlı çalışmada elektroliz hücre diye adlandırdığımız katot (negatif elektrot) arasında oluşan iyon ortamı içerisinde potansiyel bir fark uygulanarak anottan kopan elektrotlar katot üzerinde birikir (Osborne and Packer 1996).

“Çarpan jet elektrot kullanılarak bakır-alümina nanokompozit film kaplama” adlı çalışmada bakır içerisine alümina partiküllerini elektrolitik olarak çöktürmek için bir daldırılmamış çarpan jet sistemi geliştirmek ve elde edilen sonuçlar döner elektrolit ile karşılaştırmaktadır. Bu çalışmada kaplama numuneleri üzerindeki partikül dağılımı SEM kullanılarak tespit edilmiştir. Üretilen filmlerin yüzey morfolojisi ise SEM ile analiz edilmiştir. Üretilen metalik filmlerin tane boyutunu belirlemek için TME kullanılmıştır (Osborne *et al.* 2007).

“Metal yüzey üzerinde jet kaplamanın dağıtımı” adlı çalışmada sabit katot akım verimine sahip bir elektrolitik kaplama için metal kaplamanın lokal kalınlığı lokal akım yoğunluğu ile orantılıdır. Mevcut çalışmanın kaplama geometrisi için toplam katot alanı belirlenememiştir bu nedenle jet kaplamada uygulanan geometrik ortalama akım yoğunluğunu belirlemek için bir karaktersilik miktar olarak nozul çıkış alanı kullanılmıştır. Bu durumda katot yüzeyi üzerinde lokal akım yoğunluğunu için matematiksel ifade çıkarılmıştır (Karakus and Chin 1994).

“Temel değerlendirmeler” adlı çalışmada jet kaplamanın özelliği yüzey üzerinde nozul eksenin yüksek kütle transferi meydana getirmek yani burada en fazla kütle transferini (H/d) maksimum alan merkezde jet durgunluk noktasında, noktasal kaplama yapmada daha elverişli jet kaplama tekniği yapar. Jet kaplama noktasından nozulun konveksiyonel kaplamaya kıyasla 15 kat daha fazla olduğu görülür (Paunovic *et al.* 2010).

“Çarpan jet tekniği kullanılarak kompozit filmlerin elektrolitik olarak kaplanması ” adlı çalışmada daldırılmamış çarpan jet elektrolitik kaplama tekniği ve konvansiyonel elektrolitik kaplama tekniği kullanılarak bakır numunelerinin yüzeyleri nikel-alümina nanokompozit filmi ile kaplandı. Artan jet hızı ve elektrolit içindeki nanopartikül yükünün artması ile partikül birikim hızının lineer bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Maksimum partikül birikim hızı elektrolit içinde Al_2O_3 yükünün 30 g/l olduğu ve jet hızının 0,3 m/s olduğu durumda elde edilmiştir. Genellikle jet ile oluşturulan nanokompozit kaplamaların sertliği, konvansiyonel teknikle oluşturulan kaplamalarınkine kıyasla daha yüksektir. Bu durum, jet ile nanopartiküllerin birikimine ve nikel matris yapısındaki modifikasyonların bir sonucudur. Çarpan jet elektrokimyasal kaplama tekniği kullanılarak konvansiyonel nikel kaplama tekniğinden 10 kat daha hızlı kaplama yapılabilmektedir. Kaplama hızındaki bu artış, çarpan jet tekniği kullanılan durumda diğerine kıyasla daha büyük konvektif kütle transferi hızı sağlanmasına atfedilmiştir (Arzutug ve Ezirmik 2009).

“Pirofosfat banyosunda nikel elektrokimyasal kaplama” adlı çalışmada nikel kaplama yöntemi son zamanlarda en çok tercih edilen kaplama yöntemlerindedir. Nikel kaplamasının metaller üzerinde doğrudan uygulanması zordur. Watt tipi banyoda pirofosfat çözeltisinde nikel kaplamalar için uygun çözelti olduğu bilinmektedir. Bu makalede ki çalışma koşulları geniş aralıklarda yapılmıştır. Bunlar tuz banyosunda daha etkin şekilde gerçekleştirilmektedir. Elektrokimyasal kaplama işlemi farklı molaritede, pH, sıcaklık ve banyo voltajlarında gerçekleşmiştir. Bakırın; nikel, çinko, pirinç ile kaplanması yumuşak, beyaz, ince yapılı parlak bir görünüm sağlamıştır. Deneysel sonuçlar pirofosfat çözeltisinin nikel kaplamalar için çok olumlu bir kimyasal olduğu ispatlanmıştır (Panikkar and Char 1959).

“Paslanmaz çelik üzerine yüksek hızlı galvanik nikel kaplama” adlı çalışmada geçmişte paslanmaz çelik parçaları krom nikel alaşımları kaplamaktaydı. Ama iki yüzey arasında hatalar oluşmaktaydı özellikle paslanmaz çelik ile nikel kaplama arasında kimyasal bağ yeterli seviyede olmamıştır. Bundan dolayı nikel kaplama çok hızlı bir şekilde yapılmış, bir yöntemle tercih edilmeye başlanmıştır. Endüstriyel olarak nikel kaplama birçok

alandaki kullanılması sağlanmış otomotivde taşıt gövdesi, kapı kolları diğer fonksiyonel yerlerde dekoratif olarak örnek gösterilebilir. Hem ürünün dayanaklığını arttırmakta hem de estetik bir görüntü sağlamaktadır (Abdolahi 2010).

“Dairesel nozuldan pürüzsüz düz yüzeye hava jeti geçirilmesi ile yerel ısı transferinin dağılımı” adlı çalışmada deneysel çalışma pürüzsüz ve düz bir yüzeye dairesele olarak yüksek hızda ve sıcaklıkta bir levhaya havanın ısı transfer özelliği üzerinde çalışılmıştır. Isı transfer dağılımı plaka üzerindeki etkileri arasında reynold sayısı incelenmiştir farklı (H/d) oranlarındaki çalışmalar yapılmıştır. Farklı nozul çıkışlarında, çaplarında reynold sayılarında plaka özellikleri kızılötesi termal görüntüleme tekniği ile kullanılarak görüntüler kaydedilmiştir. Jet durgunluk noktasında ısı transfer statik duvar basınç dağılımı analiz edilmiştir. Akışkanın yarı durgunluk bölgesindeki ısı transfer için elverişli basınç farkı ile eksenel akım sınır tabakası göz önünde bulundurulmuş. Duvar jet bölgesinde ısı transferi sabit ısı akısı düz bir plaka üzerinde sıvı akışı dikkate alınarak incelenmiştir. Geçiş bölgesinde ısı transferi bu bölgede rapor edilen akışkan dinamik davranışları ile açıklanmıştır (Katti and Prabhu 2006).

“Çarpan jetler” adlı çalışmada farklı çarpan jet sistemleri karşılaştırılmıştır. Çözelti banyosuna giren bir serbest jetin çözelti içindeki hızları ve basınçları karşılaştırılmıştır. Daldırılmamış çarpan jetlerde maksimum basınç ve kuvvetler elde edilmiştir. Maksimum basınç nozulun durgunluk basıncına eşittir. Eğik jetlerde ise jet durgunluk noktası değişmiştir, ama kaplamada büyük değişiklik olmamıştır. Ayrıca durgunluk noktasına yakın basınç profilleri dairesele jet için simetrik düzlemi uzak bir üstel bozulma oluşturmuştur. Daldırılmış jetlerde akış daldırılmamış jetlere benzerlik göstermektedir. Akış bölgesi çıkış noktasına göre dışarı doğru kaymaktadır konili bir görüntüye sahiptir. Deneysel çalışmada tablo oluşturulmuştur, tabloda kurulan akışın sınırları akış bölgeleri ve yüksek basıncın olumsuz sorunları incelenmiştir (George 1980).

“Nanokristalin nikel kaplamaların elektrokimyasal kaplama parametrelerinin mikroyapı üzerine etkisi” adlı çalışmada nikel nanokristaller ile elektrokimyasal kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olup optimum koşullarda sağlanmıştır. Nikel nanokristal, kaplama

üzerinde ki proses parametreleri geniş bir aralıkta incelenmiştir, watt tipi banyoda nikel nanokrsital yataklarının optimizasyon ve sentez koşulları sonuçları sunulmuştur. Watt banyosunda gerçekleştirilmiş, banyo sıcaklığı, akım yoğunluğu, sakarin tane boyutu parametrelerinden etkilenmiştir. SEM de yapılan görüntülenme sonucunda 75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda kaplama yüzeyi piramit şeklinde bir kaplama görünümü sağlamaktadır. Kaplama sıcaklığı 55°C kadar arttığı buda kaplamayı arttırdığı artan banyo sıcaklığı ilede kaplamanın tanecik büyüklüğü azalmıştır. 75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ki artış 3gr/l sakarin eklenmesi nikel kaplamada artışa tanecik büyüklüğünü azalttığı gözlenmiştir (Rashidi and Amadeh 2009).

“Çarpan jetten elektro biriktirme oranlarının belirlenmesi” adlı çalışmada çarpan jetlerle elektrokimyasal kaplama işleminde kaplama oranlarını bulabilmek için matematiksel ve sayısal algoritma geliştirilmiştir. Metal yüzeyi üzerinde altın elektro birikimi oluşturan bir elektrokimyasal çözelti kullanılmıştır. Daldırılmış ve daldırılmamış çarpan jet sistemleri olarak iki farklı çalışma yapılmış. Eğik ve düz çarpan jetler karşılaştırılmış, düz püskürtme çarpma alanına yakın bir kaplama sağlamakta iken açılı yapılan kaplama çarpma bölgesinden giderek daha dar bir alana kayar. Görülmesi gerekli başlıca durumlar, uygulanan gerilimin sınırlayıcı akım altındaki akım yoğunluklarında çalışılması kaplama yüzeyi üzerinde jet ince katmanlı indükleyici ve yüksek hızda tabakası olduğu varsayılıp oluşan ince kaplama zaman içerisinde kalınlaşmaktadır. Jetin çıkış noktası kaplanacak yüzey arasındaki ilişki çok önemlidir, sonuçlar yüksek kaplamayı jetin çarpma noktası ve çarpma noktasına yakın yerlerde meydana gelmiştir. Jetin uygun açıda da konumlandırılması ile kaplama noktası değişecektir (Li and Walker 1996).

“Elektrokimyasal kaplama yöntemi uygulamalarında analogi kavramını kullanarak ısı transferi” adlı çalışmada ısı transferi çalışmalarına benzetilerek elektrokimyasal kaplama yöntemi sağlanmıştır. Isı transfer sistemi mantığı ile sınırlayıcı akım altında elektrokimyasal kaplama yardımıyla kütle transferi gerçekleştirilmiştir. Akışkan için laminer ve türbilans akış şartları incelenmiştir. Buna göre ısı transfer korelasyonları oluşturulmuştur. Test sonuçlarında ısı transfer ve kütle transferi yakın sonuçlar çıkmıştır. Analogi yöntemi elektrokimyasal kaplama yöntemi için uygun bulunmuştur. Ayrıca gazın

yüksek hızdaki ısı transferi değeri doğal ısı transferine göre 50 kat daha yüksektir. Deneysel ve teorik sonuçlar birbirini doğrular niteliktedir (Ko *et al.* 2005).

“Kapalı dönen bir sistemde elektrokimyasal yöntemle kütle transferi” adlı çalışmada çarpan jet dönen disk yardımıyla elektrokimyasal kütle transferi sağlamaktadır. Döner disk birçok pratik sistemlerde idealize edilebilir bundan dolayı ısı ve kütle transferinde sık kullanılır. Bu deneysel çalışma, jet sıkıştırma olmadan kaplanacak yüzeyi ortalama kütle transfer korelasyonları geliştirmek amaçlanmıştır. Döner diskten çıkan çarpan sıvı jeti yerel kütle transferi, sınırlayıcı akım tekniği kullanılmış ve düşük hızda gerçekleştirilmiştir. Kütle transfer katsayıları elektrokimyasal kaplama sınırlayıcı difüzyon akım tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Re: $3,4 \times 10^4$ ile $1,2 \times 10^5$ disk aralığı 2-8 parametreleri çarpan jet döner diskle kütle transferi, çarpan jetle olmayan sistemlere göre daha fazladır (Şara *et al.* 2007).

“Katkı maddeleri Cu elektro birikimini nasıl etkiler” adlı çalışmada elektrokimyasal biriktirme işlemi farklı mekanizmaların daha dayanıklı malzemeler üretmektir. Bu çalışmada tiyol moleküllerin adsorpsiyon metal gibi bir elektrot- elektrolit ara yüzünde bulunan çeşitli olaylar üzerinde durulmuştur. Yapılan kaplamalar kızılötesi tarama mikroskobu ile incelenmiştir (Igorevich 2012).

“Çarpan jetin ile nanopartüküllerin kütle transferi üzerine etkisi” adlı çalışmada kütle transferi ile ilgili çarpan jet sisteminde incelenmiş ölçüm akımı, 0.01 M potasyum ferrisiyanüre ek olarak, 50 nm aleminyum nanotanecikleri ile yük değerleri 50-160 gr/l, akış hızı 1-6 l/dk aralığında incelenmiştir. Buna göre 6,1 l/dk en yüksek akış hızı olarak belirlenmiştir. En az tanecik yükü 65 gr/l, akış hızı 3 l/dk dır. Daha yüksek akış hızlarında elektrotla temas halinde daha fazla parçacıklar getirerek daha yüksek kaplama yapılabilir (Sirajuddin and Talbot 2011).

“Daldırılmış çarpan jet tekniği ile yüzey kayma gerilmesi” adlı çalışmada elektrokimyasal daldırılmış çarpan jet sistemi kullanılan jetin çarptığı noktada yüzey kayma gerilimi değerleri incelenmiştir. Sulu sodyum hidroksit ile desteklenen potasyum ferri ve

ferrosiyonat oluşan elektrolit ile mevcut teknik sıralama elektrokimyasal yöntem kullanılarak düz bir yüzeye çarpan tam gelişmiş türbülanslı hız profil ile yuvarlak nozul daldırılmış çarpan jet sisteminde yerel yüzey kayma gerilim değerleri davranışları üzerinde deneysel parametreler tartışılmıştır. Sonuçlarda boyutsuz yerel kayma gerilmeleri değerleri reynolds sayısının artması ile azaldığı gözlenmiş yüksek reynolds sayılarında kesişme eğilimi vardır. Kayma gerilmelerinde reynolds sayısındaki değişim farklı kayma gerilmelerin getirmektedir (Yapıcı *et al.* 1998).

“Türbilanslı çarpan jet akışı altında jet sıkışma bölgesinde korozyon kontrollü ve kütle transferi” adlı çalışmada asitleştirilmiş dikromat çözeltisi dik girişli çarpan jet tekniği kullanılarak çarpma bölgesinde difüzyon kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada değişken olarak çözelti hızı, çözeltinin fiziksel özellikleri, nozul çapı, direnç azaltan polimerlerin etkisi incelenmiştir. Kütle transfer kontrollü sıkışma bölgesindeki korozyon hızı denklemi Sh (sherwood sayısı) denklemi ile bulunmaktadır. Kontrollü çarpma bölgesinde korozyon oranı üzerinde kütle transfer destekli sürüklenme azaltıcı polimer oranı %29.9-68.9 arasında, elektrolit konsantrasyonu, nozul çapı değişkendir. Giriş jeti ile hedeflenen alt kısımda çarpma bölgesinde kütle transfer kontrollü çarpma bölgesindeki korozyon boyutsuz kütle transfer korelasyonu ile ölçülmüştür. Çarpma bölgesinde difüzyon kontrollü, aşınma hızı çarpan jetin yüzeye mesafe ve Re sayısına bağlı olarak korozyon değeri değişmektedir. Sürüklenme azaltıcı polimer konsantrasyonu %29.9-68.9 bağlı olarak değişen miktarda nozul çapı, elektrolit konsantrasyonu gibi değişkenlerin değişmesi çarpma bölgesindeki difüzyon kontrollü sıkışma korozyonu etkilemektedir. Ayrıca sürüklenme azaltıcı polimer varlığı metal yüzeyinde mevcut olabilecek bir oksit tabakası koruyucu etkisi sağlamakta ve jetin çarptığı bölgede kesme stresi azaltmak için polimer moleküllerinden dolayı korozyon karşı direnç göstermektedir (Zahran *et al.* 2006).

1940’ların başlarında çalışırken laboratuvarında uğraşarak, belki de dünyadaki ilk jet ve sprej kaplama yapmak için uğraşı vermektedir. Aslında bu fikir yeni değildi, ayna yapmak için gümüş solüsyonlarını sprej için Peacock metodu çok da iyi bilinmekteydi. Bu proste gümüş solüsyonu temiz cam yüzey üzerine püskürtülür ve metalik gümüşle

sonuçlanan kimyasal reaksiyon oluşmuştur. Aynı fikirden yola çıkarak bunu elektrokimyasal kaplama üzerine uygulamaya çalışmış. Amaçları düz bakır levha üzerine küçük ebatlı daire şeklinde ağır bir bakır kaplaması yapmaktır. Fikrinin işe yaradığını anlaşılmış ve akımı tersine çevirince, neredeyse bakır levha üzerinde bir delik açmak bile mümkün olmuştur. Bir de şu öğrenildi; ince spreylere meydana gelen damlacıklar yüzünden spreysel jet kadar iyi netice vermiyor, çünkü kopan damlacıklar akımda kesinti yaratıyor. Bu çalışmadan yola çıkarak bu alanda elektronik endüstrisinde bir standart oluşturmaya kadar gidildi.

“Plazma spreysel yöntemi ile kaplama ve spreysel karakteristiklerinin incelenmesi” adlı çalışmada günümüzde metal ve alaşımlarının, yüksek sıcaklık, korozyon, aşınma gibi ağırlaşan çalışma şartlarında arzu edilen özellikleri sağlayamadığı durumlarda lastikler, kompozitler, süper alaşımlar ve ileri teknoloji seramikleri gibi yeni malzeme grupları devreye girmektedir. Bu nedenle ileri teknoloji seramikleri, metal malzeme yüzeyine oksit, karbür, nitrür, borür veya sermetler şeklinde farklı kaplama teknikleri ile (CVD, PVD, termal spreysel vb.) uygulanmaktadır. Metallerin korozyona, yüksek sıcaklık oksitasyonuna ve aşınmaya karşı dirençlerinin artırılması seramik kaplamalarla gerçekleştirilmektedir. Bu tür kaplamaların uygulanması plazma spreysel kaplama teknolojisiyle de mümkün olmaktadır. Bu çalışmada spreysel mekanizması detaylı olarak incelenmiş ve atomizerler hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Plazma spreysel kaplama prosesi tanıtılmış, AISI 1020 ve AISI 304 çelikleri üzerinde seramik ve metalik esaslı tozlar ile gerçekleştirilen kaplamaların, yapışma mukavemetlerini bulmak amacıyla çekme gerilmesi deneyi uygulanmış, ilgili kaplamaların metalografik incelenmesi yapılmış, kaplamanın sertlik değerleri ölçülmüştür. Metalografik inceleme sonucu kaplama tabakalarının lamelli ve benzer katlardan oluşan bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Kaplama tabakasında bulunan oksit, boşluk ve ergimemiş partiküllerin miktarının tabakanın mekanik özelliklerini etkilediği tespit edilmiştir. Kaplama tabakalarının yapışma mukavemetlerinin tabaka kalınlığı ile azaldığı ve farklı tozlarla yapılan kaplamaların farklı mukavemet değerleri gösterdiği tespit edilmiştir (Yeşildal ve Günay 2007).

“6082 Alüminyum alaşımında plazma elektrolitik oksidasyon ve sert eloksal kaplamaların mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine bir araştırma” adlı çalışmada aşınma ve korozyondan dolayı dünyada her yıl önemli kayıplar oluşmakta ve buna bağlı olarak ekonomiye ve çevreye önemli zararlar verilmektedir. Ülkelerin aşınma ve korozyondan dolayı oluşan kayıpları, milli gelirlerinin %3,5-5’ine karşılık gelmektedir. Bu kayıpların yanı sıra endüstrideki gelişmelere bağlı olarak hafif, kararlı malzemeye olan ilginin artması, çevre bilincinin giderek önem kazanması yeni malzemelerin ve tekniklerin kullanılması sunucunu doğurmuştur. Plazma Elektrolitik oksitlenme (PEO) tekniği, diğer bir adıyla Mikro Ark Oksitlenme (MAO) tekniği, Al, Ti, Mg (valf metaller) ve bunların alaşımlarının yüzeylerinin ultra sert ve kalın bir oksit tabakasıyla kaplanmasında kullanılır. PEO, plazma kimyasal-elektrokimyasal sıra dışı bir tekniktir. Proses süresince oluşan birçok görünür kıvılcım ve mikroark, çözelti içinde hızla hareket ederek metal yüzeyine yayılır. Mikroarkların yüzeyde açtığı deşarj kanalları içinde bölgesel sıcaklık ve basınç aniden çok yüksek değerlere ulaşır. Deşarj kanallarında sıcaklıktaki ani artıştan dolayı oksitler sin terlenerek yüzeyin kaplanmasını sağlar (Tekin vd 2007).

“Soğuk gaz dinamik sprej (CGDS) kaplama teknolojisi ve uygulamaları” adlı çalışmada termal sprej kaplamalar, kaplanacak malzeme üzerine yüksek ısı ve/veya kinetik enerjiye sahip, erimiş ya da yarı erimiş formdaki toz parçacıkların gönderilmesi yoluyla elde edilmekte. Günümüzde termal sprej kaplamalar; havacılık ve savunma sektörleri başta olmak üzere otomotiv, enerji, elektronik ve biyomedikal vb. uygulamalar gibi birçok alanda kullanım olanı bulmaktadır. Uygulandıkları yüzeyler üzerinde aşınma, oksidasyon, korozyon ve yüksek mekaniksel dayanım gibi üstün özelliklerin eldesine imkân veren bu kaplamalar istenilen yüzey özelliklerine göre farklı sprej kaplama yöntemleri kullanılarak uygulanabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan hızlı, ekonomik ve verimli bir kaplama üretimine olanak veren plazma sprej kaplamaların yanında yüksek kaliteye sahip kaplama üretimine olanak veren Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF) kaplamalarda endüstride geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmakta ancak kullanılan ekipman ve proses özellikleri yönüyle daha maliyetli bir teknolojiye sahiptir. Son yıllarda, plazma sprej ve HVOF kaplamalara alternatif olarak üstün özelliklerde,

oksitsiz ve yoğun kaplama yapısının elde edildiği Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) kaplamalar ön plana çıkmaktadır. Bu sistemin ‘Soğuk Gaz Dinamik Sprey’ olarak isimlendirilmesinin sebebi, göreceli olarak nozuldaki mevcut olan gaz çıkış sıcaklığının diğer yöntemlere göre düşük olmasıdır. Bu çalışmada, araştırmacı ve endüstriyel kullanıcılar için ilgi odağı oluşturan CGDS kaplama teknolojisi ele alınarak açıklanmaya çalışılmıştır (Karaoğlu vd 2012).

“Soğuk sprej teknolojisi ve uygulama alanları” adlı çalışmada endüstriyel uygulamalarda özellikle aşınmaya, korozyona, oksidasyona ve yüksek sıcaklığa dirençli kaplamaların üretiminde hızla pazar gücünü geliştiren termal sprej prosesleri (ark sprej, alev sprej, plazma sprej, yüksek hızda oksijen yakıt sprej) yeni fonksiyonel kaplama ünitelerinin gelişimi, artan otomasyon kabiliyeti, daha güçlü ve efektif tabanca tasarımlarının geliştirilmesi ile sektörel beklentileri önemli ölçüde karşılamaktadır. Termal sprej prosesleri ile üretilen kaplama mikro yapılarında ergitme ve hızlı katılaşma nedeniyle kaplama kesiti boyunca farklı boyut ve dağılımda süreksizlikler (porozite, çatlak, oksit vb.) ile artık gerilmeler ve inklüzyonlarla karşılaşılması olasıdır. Proses parametreleri, hızlı püskürtme koşulları ve kontrollü atmosfer ortamında süreksizlikler belirli ölçüde engellenebilmesine karşın proses maliyetleri ve uygulama pratikliği açısından sürekli yeni proses arayışları sürmektedir. Soğuk sprej prosesi diğer termal sprej proseslerine göre ergime olmaksızın katı halde parçacıkların çok yüksek hızda ve düşük sıcaklıkta püskürtülerek daha yoğun kaplama üretimine olanak sağlamaktadır. Günümüzde soğuk sprej prosesi güvenilir ve çevre dostu bir teknoloji olup, özellikle metalik esaslı kaplamaların endüstriyel uygulamalarında birçok açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır. İlerleyen bölümlerde soğuk sprej prosesinin temel prensipleri, termal sprej prosesleri ile karşılaştırmalı olarak avantaj ve dezavantajları, kaplama üretiminde etkili proses parametreleri ve uygulama alanları ile ilgili bilgiler sunulmaktadır (Altuncu ve Üstel 2010).

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu sistemde anot püskürtme nozulu içinde akış yönüne doğru yerleştirilir ve elektrik akımı katot serbest jet boyunca noktasal olarak çarpan bölgede gerçekleşir. Buda yüksek hızlı kaplama koşulları sağlamaktadır (Alkire and Chen 1982). Çarpan jetler ile kaplamalarda nozul şekilleri, jet yönünü dolayısıyla kaplamanın yapısını belirlemektedir.

Çarpan jet sistemlerde;

- i. Daldırılmış ve daldırılmamış çarpan jetler,
- ii. Eğik ve normal püskürtmeler,
- iii. Nozul kısmı şekil yapısı yuvarlak yuva ve elipstik jetler,
- iv. Darbe yüzeyinin düz yada işlenmiş olması,
- v. Jet püskürtme noktası tekli yada çoklu yapı yüzey üzerine çarpan jet,

2.1. Çarpan Jet Nedir, Kaça Ayrılır?

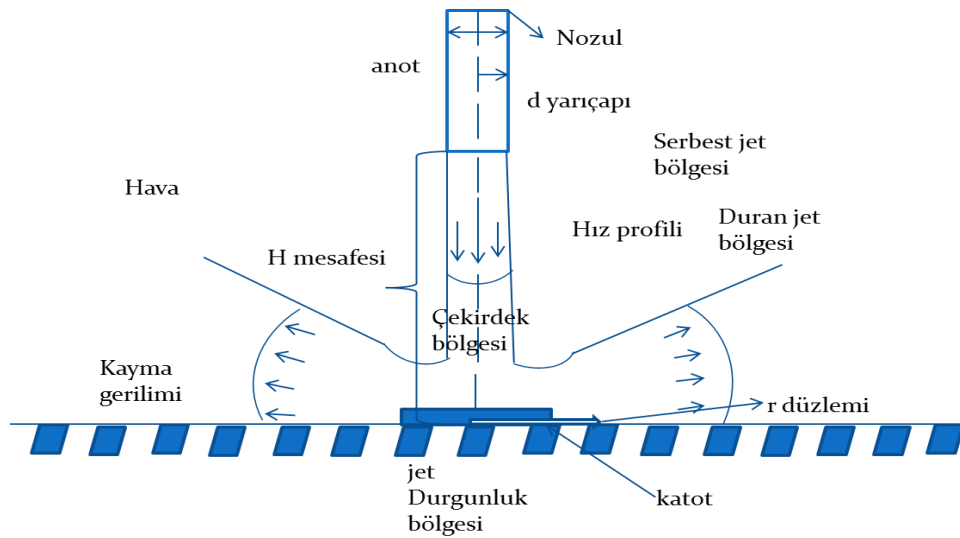
Jet kaplama oldukça hızlı elektrokimyasal kaplama yöntemlerinden biridir. Jetin özel akış karakteristiklerine sahip olmasından dolayı bir katot yüzeyi üzerinde elektrokimyasal kaplama reaksiyonunu noktasal olarak uygulamaktır. Elektrolitik kaplama, jet nozulu içine yerleştirilen bir anot ve katot arasına elektrik akımı uygulanarak yapılır ve jet kaplama çözeltisi doğrudan katot yüzeyine gönderilir. Uygulanan elektrik akımı jet akımı içinde katoda hareket eder. Elektrokimyasal kaplama reaksiyonu katot yüzeyi üzerinde yalnızca jetin çarptığı (lokal bölgede oluşur) alanda meydana gelir (Karakus and Chin 1994).

Bu çalışmada çarpma yüzeyine yönlendirilen jetin etkisi dikkate alınmış ve katottaki akım yoğunluğunun dağılımı üzerine olan büyük bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Jetin belli bir açıda konumlandırılması ile de en büyük akım değerleri çarpma bölgesi içerisinde ilk çarpma noktasından daha ileri bir noktaya kayar. Ayrıca elektrolitik

kaplama hızları yüzeyin yakınındaki viskoz kesme davranışının var olduğunu gösterir. Akım yoğunluğu jet durgunluk noktasında en yüksek ısı, kütle ve momentum transferi meydana gelir. Kaplamanın merkezinden radyal yönde artan mesafe ile azalır (simetrik olarak). Akım yoğunluğu dikkate alındığında çarpma yüzeyinde merkezden aynı boyutsuz nozul çarpma yüzeyi mesafesi (H/d) de kaplama kalınlığı artan akım yoğunluğuna bağlı olarak azalmaktadır. Endüstriyel elektrokimyasal kaplama proseslerinde esas amaç kaplanacak yüzey(malzeme) üzerinde uniform kalınlıkta kaplama sağlamaktır. Çarpan jetlerle kaplama tekniği en fazla bakır, altın ve nikel için kullanılmaktadır.

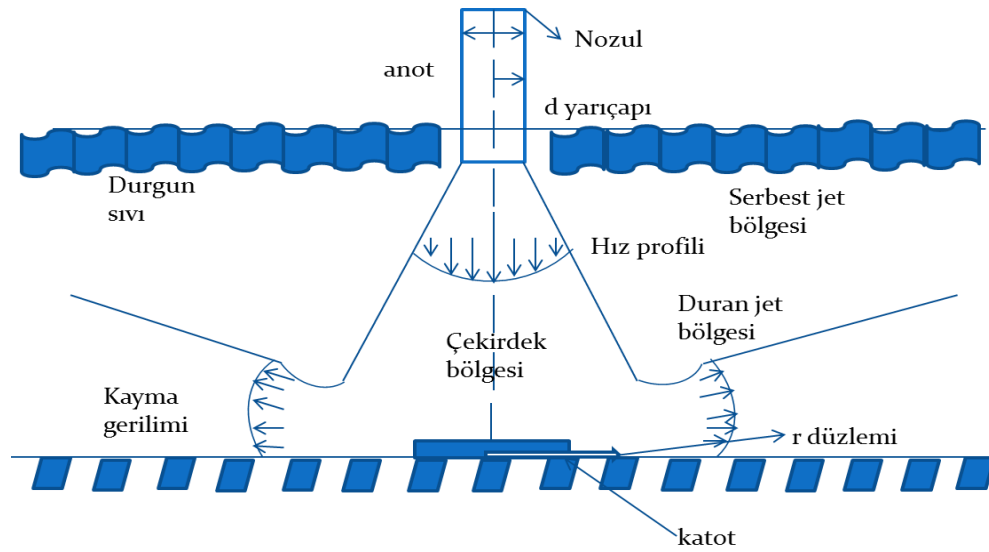
Reaksiyon veren iyonları içeren bir sulu çözelti için iki farklı tür çarpan jet akışı uygulanabilir;

i. Daldırılmamış çarpan jetler: Daldırılmamış durumlarda çarpan jet (sıvı jet) çarpma yüzeyine yönlendirilen akışkan, durgun hava ile çevrilidir. Elektrolitik biriktirme prosesi sıvı jet sınırları içerisinde elektrik alanı içinde gerçekleşir. Daldırılmamış çarpan jetler daldırılmış olanlara kıyasla çarpma yakınında daha yüksek akım değerleri üretirler buda daha iyi bir kaplama sağlar.



Şekil 2.1. Daldırılmamış çarpan jet akış profili

ii. Daldırılmış çarpan jetler: Daldırılmamış durumlarda (jet akışı elektrolit içine daldırılmıştır) elektrik alanı artık jet içinde sınırlandırılmaz. Kaplanacak yüzey bir banyo içinde bulunmakta, banyonun dışından yüksek hızda aynı çözelti kaplanacak yüzeye doğru uygulanır. Banyoya çarpan sıvı kesme işlemi yaparak açılır yüzeye daha geniş ve daha az hızda basınç uygular (George 1980).



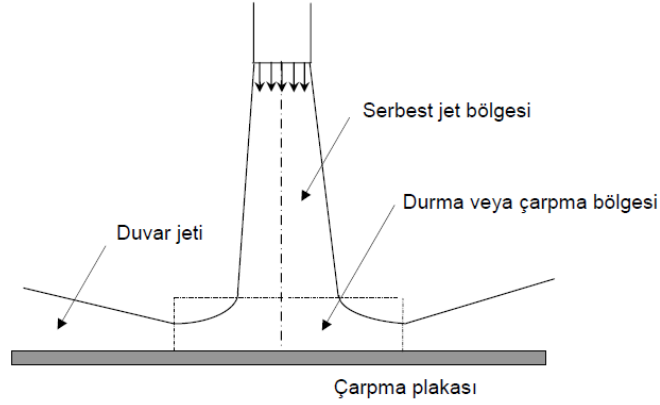
Şekil 2.2. Daldırılmış çarpan jet akış profili

2.2. Çarpan Jet Kaplamanın Özelliği

Çarpan jet akış bölgelerine ayrılır;

- i. Serbest jet bölgesi (nozulun alt akım bölgesidir).
- ii. Çarpma noktası yakınındaki durgunluk bölgesi.
- iii. Durgunluk bölgesi dışında kalan duvar jet bölgesi.

Türbülans çarpan jetin akış özellikleri yüzey üzerinde farklı seviyelerde eksenel jet simetrileri yaptığı gözlemlendi (Li and Walker 1996;Yapıcı vd 1998).



Şekil 2.3. Çarpan jetin akış bölgeleri

Nozuldan çıkan akışkan yöneltiği yüzeye dar bir bölge içinde yakın viskoz kesme davranışı göstermektedir. Nozuldan çıkan akışkan sınır tabakası dışında ana hız değişimi sıkışma noktasının yakınında çok yoğun olduğu daha sonra elektro birikiminin artması ile kesme geriliminin yüksek değerlere çıktığı görüldüğü bu özellikle jet çarpmaya yakın kesme geriliminin ani bir değişiklik ile sonuçlanır. Çarpma bölgesinin aşağısını türbülans hal alarak belirtmek gerekir, buda çarpma bölgesini dıştan keskin lokal artışlara yol açmaktadır. Türbülans tabaka katot üzerinde sınır tabaka içinde oluşur sınırlayıcı akımın sınır tabakaya yakın bölgelerde pek etkisinin olmadığı anlaşırmıştır. Sınırlayıcı akım ilk çarpma bölgesinde uzaklaştıkça etkisi azalmaktadır alt uygulamalı voltajlarda, türbülans akıştan dolayı elektrik alanı ile hidrodinamik alt difüzyon ve elektrokimyasal katmanları arasında oluşur (Li and Walker 1996).

Metallerin jet oluşumu sadece çarpan parçacıklarda değil, aynı zamanda parçacığın altlıkla temas ettiği noktada, altlık yüzeyinde de gözlemlenebilmektedir. Jet oluşumuyla yüzeyler oksitten arınmış olurlar. Yüksek hızlı parçacıktan gelen enerji sayesinde basınç artışı olur ve böylelikle metalürjik bağlar meydana gelir.

2.3. Çarpan Jet Kaplamanın Önemi

Diğer kaplama metotlarına göre kompozit elektrolitik kaplamanın avantajları şunlardır. Uniform elektrokimyasal kaplama, kompleks şekillerin cisimleri kaplamada, atık

miktarının azalması, özelliklede sprej tekniği ile kıyaslandığı zaman düşük seviyede kirlilik ve sürekli kaplama kabiliyeti. Ek olarak bu proseste yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta görülen problemlerle karşılaşılmaz elektrolitik olarak üretilen kompozit kaplamaların konvansiyonel prosesleri ile üretilen film kaplamalara göre azalan tanecik gelişimi daha yüksek sertlik, azalan sürtünme ve korozyon direnci ve daha yüksek akış gerilimi gösterdiği tespit edilmiştir (Osborne *et al.*2007).

Korozyon; metallerin ortamla teması sonucu metal, ara yüzey ve ortam üçlüsünün etkileşimi ile yüzeyde oluşan bozulmadır. Korozyondan korunma önlemlerinin temelinde de bu üç faktörün özelliklerini ve birbirleri ile ilişkilerini iyi bilmek ve gerekli değişiklikleri gerçekleştirmek yatar. Metallerin ortama daha dayanıklı kılınması için, korozyon yapıcı etkenlerin kontrol altına alınması yanında, ara yüzeyi değişik malzemelerle kaplamak bu tür önlemlerin başında gelmektedir (Hasçalık ve Özek 2002).

Elektroliz ile kaplama işlemlerinde Faraday yasasına göre kaplanan ürün miktarı aşağıdaki formülle hesaplanır;

$$G=Ae*F*I*t*\eta_k \quad (2.1)$$

Bu formülde; G kaplanan ürün miktarını (gr), Ae teorik olarak katotta toplanan 1 Amper/Saatlik ürün miktarını (gr), F kaplanacak olan numune alanını (dm²), I akım yoğunluğunu (A/dm²), t kaplama süresini (saat) ve η_k katot akım etkinliğini göstermektedir (Hasçalık ve Özek 2002).

Jet kaplamanın orijinalliği yüzey üzerinde nozul eksenin yüksek kütle transferi meydana getirmek yani burada en fazla kütle transferi (H/d) max olan burada merkezde jet durgunluk noktasında noktasal kaplama yapmada daha elverişli jet kaplama tekniği yapar. Jet kaplama noktasında nozulun konvansiyel kaplama kıyasla 15 kat daha fazla olduğu görülür. Jet kaplamada, malzemeye koruyucu bir kaplama sağlamak, görünümünü değiştirmek, yapılan çalışmaya özel yüzey özellikleri kazanmak, mühendislik ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır (Electroplating).

Çarpan jet sistemlerinde reynolds sayısı, püskürtme plaka aralığı, durgunluk noktasından radyal mesafe, prandtl sayısı, hedef plaka eğimi, jet hapsi, püskürtme nozulu, hedef plakanın pürüzsüzlüğü, türbülans yoğunluğu kaplanacak malzemeye etki etmektedir (Katti and Prabhu 2006).

2.3.1. Çarpan jetin kullanım alanları

Çarpan jet özellikle elektrolitik altın kaplamada kullanılır. Elektronik endüstrisinde altının korozyona karşı oldukça yüksek dirençli olması ve yüksek elektriksel iletkenlik sağlaması sebebiyle elektrolitik altın kaplama prosesi yaygın bir şekilde kullanılır (Li and Walker 1996).

Elektrolitik kaplama birçok teknolojik alanda önemli rol oynar. Spesifik uygulamaları kesme malzemeleri için yüzey kaplaması için, aktif olarak soğutulan malzemeler yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerin gerilmelerinin dağıtılması, güneş enerjisi dönüşümünde ve zehirli artık uygulamalarında elektro kataliz için büyük yüzeyli elektro üretiminde yüzeylerin yağlanması ve aşınmaya dirençli yüzeyler olarak sıralanabilir (Osborne *et al.* 2007).

Jet sıkıştırma aktif ısı ve kütle transferi yöntemlerinden biridir ve bu işlem yüksek kontrollü ısıtma, soğutma ve kurutma sistemlerinde kullanılır. Jet sistemleri elektronik bileşenlerin soğutmasında, ahşap kurutma, gaz türbinleri, soğutma sistemleri, tekstil, kağıt film endüstrisi, cam sanayi, metal plastik levhaların tavlama, endüstriyel gıda işleme vb.

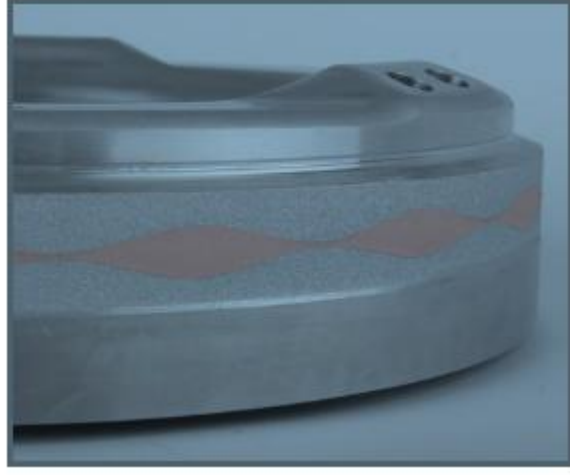
Elektrokimyasal kaplama işlemi korozyona karşı güçlendirmek, mikro sertlik, ısı stabilitesi ve direncinin artırmak aşınması ve çeşitli metallerden oksitasyonu önlemektir. Teknik genel olarak havacılık, inşaat, enerji üretimi ve otomotiv sanayi kompozit malzemeleri yapmak için kullanılır (Sirajuddin and Talbot 2011).

Çarpan jet sistemleri tekniği ile üretilen kaplamalar günümüzde mekanik, ısı, elektriksel, korozyon ve aşınma dayanımı gibi özelliklerin ön plana çıktığı havacılık ve uzay, savunma, otomotiv, enerji, elektronik ve yarı iletken, kimya ve biyomedikal endüstrisi gibi birçok alanda kullanım olanağı bulmaktadır. Şekil 2.4’de roket motorlarındaki paslanmaz çelik mani foldun üzerine, ÇJS yöntemiyle üretilen 2.5 mm kalınlığındaki bakır kaplama gösterilmektedir. Bu şekilde eskiden kullanılan günler alan uzun sürece sahip elektrolitik prosesler yerine ÇJS tekniğiyle saatlik bir işleme işleme ve diğer gibi birçok test operasyonu için gerekli şartları sağlayan kaplama yapısı üretilmektedir.



Şekil 2.4. ÇJS tekniğiyle kaplanmış bir roket motoru manifoldu

Havacılık dışında diğer birçok alanda olduğu gibi ÇJS prosesi elektronik endüstrisinde de kullanılmaktadır. Şekil 2.5’de hibrid motorlarda, otomotiv endüstrisinde, sensör teknolojilerinde kullanılan soğuk sprey kaplamalar gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Parçanın dönüşü hakkında bilgi toplamak için ÇJS tekniği uygulanarak üretilen sensör kaplamaları (Karaoğlu vd 2013)

2.3.2. Jet sistemler

Çok etkin şekilde yüzeyde konvektif kütle aktarım elde etmede çarpan jet sistemleri kullanılmaktadır. Endüstriyel ve teknolojik uygulamaları geniş bir yelpazeye sahiptir. Çarpan jet akış sistemlerinde yüksek konvektif aktarımlar vardır. Metal plastik levhaların tavlama, cam plakaların temperlenmesinde tekstil, kâğıt, kaplama, türbin motorlarında vs. kullanılmaktadır (Yapıcı vd 1999).

- Isıtma, soğutma ve kurutma sistemlerinde,
- Cam veya çeliğin işlenmesi,
- Elektrolitik altın kaplamada (yüksek dirençli ve elektriksel iletkenlikten dolayı)
- Güneş enerjisi dönüşümlerinde
- Tahtaların kurutulmasında (tahta, tekstil, kâğıt ve film endüstriyelerinde)
- Metal ve plastik levhaların temperlenmesinde
- Jet motorları ve sıvı yakıt brülörlerinin kullanıldığı yanma sistemleri.



Şekil 2.6. ÇJS ile elektrokimyasal kaplamanın üst tabakalara doğru oluşan boşluklu yapı (Karaoğlu vd 2013)

Çarpan jetlerle kaplama sistemlerin prosesinde yukarı tabakalara doğru çıkıldıkça gözlemlenen lameller arası boşluklarda ki artıştır. Bunun temel nedeninin alt tabakalardaki parçacıkların kendi enerjilerinin dışında arkalarından gelen parçacıklar tarafından da ezildikleri ve daha çok deformasyona uğramaları sonucu olduğu öne sürülmüştür. Böylelikle alt tabakalarda lameller arası boşluk deformasyona bağlı olarak daha az, üst tabakalarda ise daha fazladır. Bu mekanizmanın şematik olarak gösterimi Şekil 2.6’da verilmiştir (Karaoğlu vd 2013).

2.3.3. Çarpan jetle elektrokimyasal ve elektrokimyasal kaplamanın karşılaştırılması

Çarpan jet elektrokimyasal kaplama tekniği kullanılarak konvansiyonel nikel kaplama tekniğinden 10 kat daha hızlı kaplama yapılabilmektedir. Kaplama hızındaki bu artış, çarpan jet tekniği kullanılan durumda diğerine kıyasla daha büyük konvektif kütle transferi hızı sağlanmasına atfedilmiştir (Arzutuğ ve Ezirmik 2009).

- 1) Çözeltinin elektrot yüzeyine doğru kütle transferi difüzyon ve konveksiyon ile metal iyonlarını toplu olarak taşır.
- 2) İyonların anot yüzeyinden uzaklaşmasıyla birlikte yük tabakaya geçmeleri ve elektrotunda iyonları ve elektrona transferi.
- 3) Yeni bir aşamada çekirdeklenme, büyüme ve kristalleşme olmaktadır (Igorevich 2012).

Çarpan jetle elektrokimyasal kaplama yöntemi geleneksel kaplama yöntemleriyle kaplanamayan yüzeyin kaplanmasına imkân tanır. Çevreye karşı duyarlı ve pahalı olmayan elektrolitler kullanılır, kaplama rengi değiştirilerek dekoratif amaçlı kullanılabilir, yüksek sertliğe sahip kaplamalar elde edilmektedir, düşük sürtünme katsayılı yüzeyler, çeşitli ortamlarda korozyona karşı dayanıklı olması olarak sıralanabilir (Şimşek 2014).

2.4. Elektrokimyasal Kaplama Proseslerine Etkileyen Parametreler

Elektrokimyasal kaplama proseslerinde yapılan araştırmalarda kaplama prosesini etkileyen değişkenlerin şunlar olduğu tespit edilmiştir. Akış hidrodinamiği, akım yoğunluğu, partikül özellikleri, banyo geometrisi ve partikül banyo çözeltisi(elektrolit), iç etkileşimleri (Osborne *et al.* 2007).

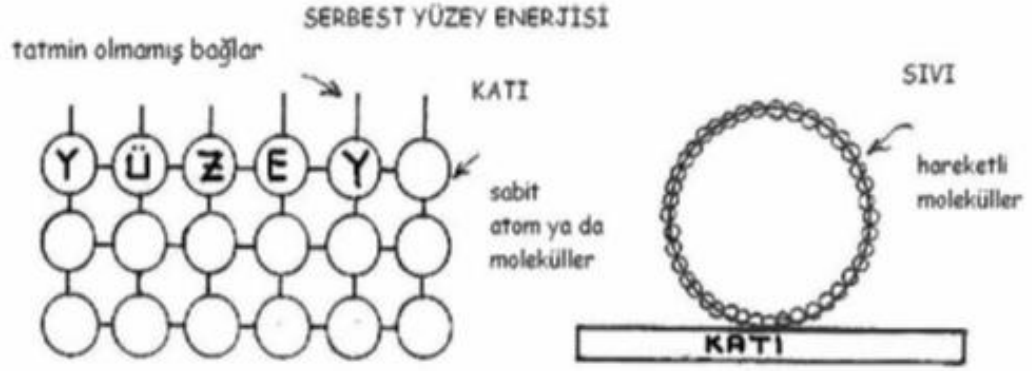
Katot yüzeyi üzerindeki metal kalınlığı dağılımı; akım yoğunluğu, elektrolitik bileşimi, elektrolitin hızı ve nozul yüksekliği fonksiyonu olarak araştırılmıştır (Karakus and Chin 1994).

Elektrokimyasal kaplama proseslerinde ana amaç kaplanacak yüzey üzerinde uniform (depozit) her yerde eşit kalınlıkta kaplama sağlamaktır. Elektrokimyasal kaplama proseslerini etkileyen birçok parametre vardır. Banyonun geometrisi, kaplama banyosunun konsantrasyonu, elektrolitin hareketi, banyo sıcaklığı, banyo pH, geçen akım, anot, katot ayrımı (Paunovic *et al.* 2010). Literatürde akım yoğunluğu, hidrodinamik banyo bileşimi, pH ve parçacık işlem koşulları çeşitlilik göstermektedir.

Çarpan jet sistemlerinde kontrol edilen karakteristikler akım yoğunluğu, voltaj, elektrolit bileşimi, sıcaklık vb. değiştirilerek farklı yapı ve özelliklere sahip kaplamalar üretilmektedir. Üretilen kaplamanın yüzeyi mikro seviyede pürüzlülüğü sahip olduğundan dekoratif veya işlevsel amaçlı ikincil kaplamaların yüzeylerine uygulanmasına imkân vermektedir.

2.5. Adezyon ve Kohezyon

Pozitif yüklü metal atomlarının negatif yüklü serbest metal atomlarını çekmesi metalleri bir arada tutan kohezyon kuvveti olarak adlandırılır. Metalin içindeki her atom uniform bir elektron “bulutu” ile çevrelenmiştir. Ama yüzeyde bu böyle değildir (Şekil 2.7). Burada metale farklı özellikler veren, bağ yapma kapasitesine sahip metal atomları bulunmaktadır. Daha önceden öğrenmiş olduğumuz enerji terimiyle ifade edecek olursak, metal yüzeyindeki atomlar diğerlerine nazaran daha yüksek serbest enerjiye sahiptir. Her zaman olduğu gibi doğa bu enerjiyi düşürmeye çalışacaktır.



Şekil 2.7. Metal yüzeyindeki atomların diğerlerine nazaran daha yüksek serbest enerjiye sahip olduğunun görüntüsü

Bunu yapmanın bir yolu, yüzey alanının hacme oranını düşürmektir. Sıvı moleküllerinin hareket kabiliyeti daha yüksek olduğu için ve kolaylıkla akış oluşabildiğinden, sıvı

en küçük yüzey alanına sahip olacak şekli kendiliğinden alır. Sıvı damlacıkları küre şeklini alırlar ve belli bir miktardaki madde en küçük yüzey alanına sahip olur. Ancak metal atomları bu hareket kabiliyetine sahip değildirler ve bu yüzden onlar ne olursa olsun dış şekillerini korumak zorunda kalırlar.

Bu serbest enerjiyi azaltmanın bir diğer yolu da yüzeye bağlanacak başka atomlar ya da moleküller bulmaktır. Mesela, eğer çevrede bulunan oksijen molekülleri yüzeydeki bağ

yapmamış metal atomları tarafından çekilirse, serbest yüzey enerjisini oldukça azaltan oksitlenme olayı meydana gelir. Ya da başka tip moleküller zayıf bağlar yapacak ve yüzeye yapışacaklardır (Van Der Waals bağları) ki bu da serbest yüzey enerjisini azaltacaktır.

Eğer metalin yüzeyi kirli ya da yağlı değilse ve aynı tür metal atomları ile kaplanırsa, yüzey atomlarının bağ yapma istekleri giderilir ve yapışkan görevini gören elektron bulutu kaplanmış tabakanın içinde serbestçe hareket edebilir. Kaplama tabakasının yüzeye yapışma kuvveti ancak metalin kendisine bağlanma kuvveti kadar olacaktır. Aslında teorik olarak, yeni bağlanan metal atomları ve metal arasındaki bağ metalin herhangi bir yerindeki bağ kadar sağlamdır. Bağ kuvveti orijinal metalin kohezyon kuvvetine denk diyebiliriz.

Eğer yüzeye farklı bir metal ile kaplanırsa aynı atomik kuvvetler yine iş başındadır ve kaplama esas metale, en az esas metal atomlarının arasındaki bağ kuvveti kadar bir

kuvvetle bağlanır. Artık burada bahsedilen kaplanacak metal ile kaplama atomları arasındaki kohezyon kuvveti değil, kaplanacak metal atomları arasındaki adezyon kuvvetidir. Benzer atomlar arasındaki çekim kuvvetleri kohezyon kuvvetleri olarak ifade edilirken. Farklı atomlar arasında çekim kuvvetleri ise adezyon kuvvetleri olarak ifade edilir.

Bu kaplamada çarpan jet sistemi ile adezyon ve kohezyon dan oluşacak olumsuzlar giderilmiştir olacaktır (Anonim 2010).

2.6. Kütle Transferi

Galvanik olarak yüksek oranda kütle transferini arttırabilmek için kuvvetli şekilde karıştırmak gerekmektedir. Ayrıca sistemde var olan elemanlarla sistem kontrol edilip daha iyi bir kaplama sağlanabilir buda daha iyi kütle transferi sağlamaktadır. Bu çalışmada akışkan püskürtme yoluyla kaplama sağlar. Çarpan jet elektrokimyasal

kaplama sistemleri yüksek akım yoğunluğu ve hızlı kaplama oranları elde edebilirsiniz, böylece yüksek hızda kütle transferi sağlanmış olur (Alkire and Chen).

Elektrot yüzeyine metal iyonlarının difüzyon, konveksiyon ve elektrik geçiş yoluyla iletilmektedir. Elektrolitteki toplu bulunan iyonlar elektrik alanının etkisi ile elektrolite geçer bu olay ise iyonik konsantrasyon ile alakalıdır. Sonra kopan iyonlar elektrot üzerinde toplanırlar. Bu koşullarda destekleyici elektrolit ilave edilmek sureti ile iki elektrot arasında oluşan elektromanyetik alan etkisi ile iyonların göçü ihmal edilebilecek seviyeye indirgenir. Konveksiyonel metal kaplamada elektrot yüzeyinde iyonların daha yüksek akımlarda yüksek çökeltme hızlarına ulaşmak mümkündür. Laboratuvar ortamında döner disk elektrotu ile aktarılabilecek elektroda doğru sürekli bir konvektif akış sağlamak için kullanılır. Bu çalışmada sadece difüzyon yoluyla kütle transferini anlatacağız. Bu tez çalışmasında difüzyon kontrollü şartlar sağlanarak jetin özellikleri olan V_j ile (H/d) 'nin ve ayrıca elektrolit sıcaklığının kaplam özellikleri (kristal büyüklüğü, kaplama kalınlığı ve pürüzlülük) üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için çözelti içindeki Cu konsantrasyonu 0,00025 M olarak alınmıştır.

Elektrolitin taşıma işlemi tamamen difüzyonla oluşuyorsa o zaman akı fick'in ilk konumu ile verilir;

$$J = -D \left(\frac{dC}{dz} \right) \quad (2.2)$$

- D : Difüzyon sabiti
 C : Çözelti konsantrasyonu
 z : Düzlemsel yüzeye dik koordinat reaksiyonu.

Yük transferi elektrot yüzeyinden ayrılan bir iyonun nötr bir atom haline gelerek çift katman bölgesinde yani (elektrot ve elektrolit) arasındaki yerdir (Igorovich 2012).

Çarpan jet sistemlerinde hidrodinamik parametrelerin kütle transfer oranını etkileyen önemli bir parametredir. Bunlar akım yoğunluğu, hidrodinamik banyo bileşimi, pH ve parçacık işlem koşullarıdır (Sirajuddin and Talbot 2011).

Bu tez çalışmasında daldırılmamış çarpan jet kullanılarak elde edilen metal kaplama kalınlığının, yüzey üzerindeki dağılımı belirlemeye çalışacağız. Çalışma parametreleri ortalama akım yoğunluğu, nozul mesafesi (çarpma yüzeyinden yüksekliği), jet hızı ve banyodaki aktif maddenin konsantrasyonu. Anot ve katot olarak bakır kullanılmıştır. Yapacağımız çalışmada, jet hidrodinamik parametrelerinin jet hızı, nozul çarpma yüzeyi (H/d) mesafesi ve ayrıca elektrolit sıcaklığının kristal büyüklüğü, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılacaktır. Kaplama kalınlığı (SEM) görüntülerinden, kristal boyutu XRD ($\mu\text{m-nm}$) sonuçlarından, yüzey pürüzlülük (AFM) ve SEM görüntülerinden tespit edilecektir. Çalışmalarımızda elektrolit olarak CuSO_4 kaplama çözeltisi ve H_2SO_4 (pH değerini 2,5'a ayarlamak için) kullanılacaktır. XRD den yola çıkarak kristal büyümesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Numunemizin yüzey pürüzlülüğü, sertliği ve kalınlığı AFM (atomik force mikroskobu) incelenecek.

3. MATERYAL ve YÖNTEMLER

Bu bölümde deneysel çalışmanın yapıldığı deney düzeneği ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Deney sistemi elektrokimyasal olayların gerçekleştiği çarpan jet hücresi, çarpma yüzeyi elektrotu (katot), akış hattı, akış ölçer, sıcaklık ölçer, nozul (anot), kullanılan elektrolitin bileşimi ve konsantrasyon tayini, pompa ve elektrolitik kaplama sistemi için gerekli olan akım için potansiyostat metre kullanılmış bunlar ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, H_2SO_4 , müreksit intikatörü ve bakır miktarının tayini için EDTA çözeltilerinin hazırlanması. Çalışmalarda analitik saflıkta MERCK marka kimyasallar malzemeler kullanılmıştır.

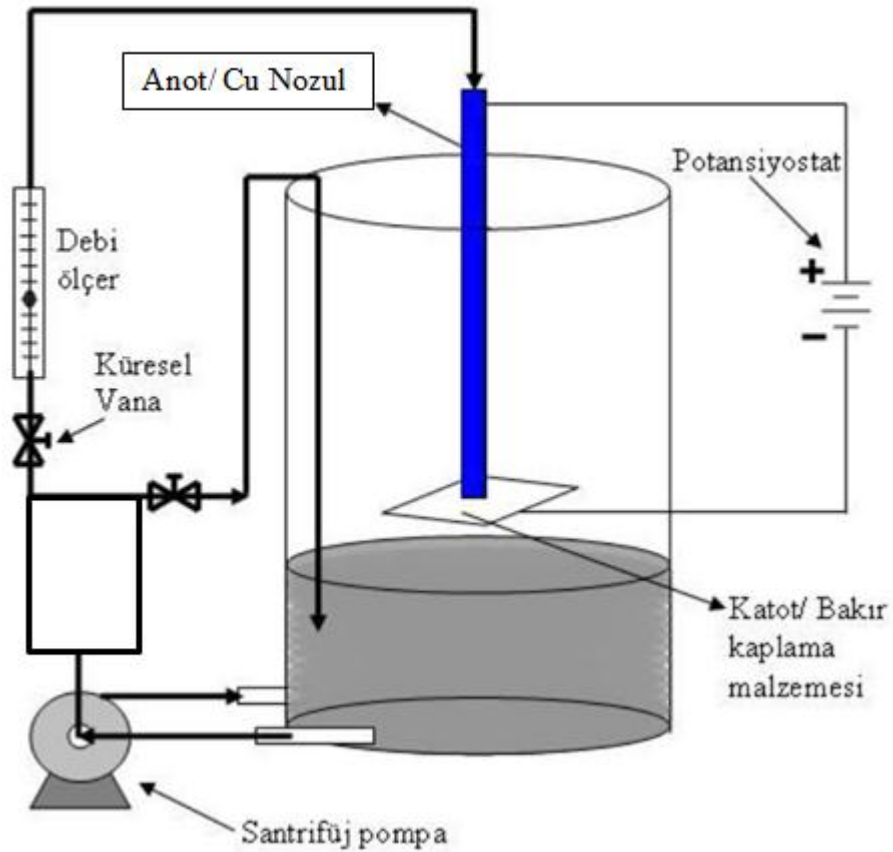
3.2. Deney Düzeneği

Çalışma kapsamında daldırılmamış çarpan akışkan jetle deneyler, Atatürk Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Daldırılmamış çarpan jet hücresi, yaklaşık 12,50 litrelik iç hacme sahip, 40 cm yüksekliğinde, 20 cm çapında ve 3 mm et kalınlığında silindirik PVC boru ile 1 cm kalınlığında plexiglasstan yapılmış 30 cm ebatlarında daire şeklinde üst kapaktan oluşmaktadır. Kapak üzerinde çarpma yüzeyi ile arasındaki mesafe ayarlanabilen bir malzemedir (polioksimetilen) yapılmıştır. Deney düzeneğini oluşturan tüm parçalar delrin, PVC, polietilen ve plexiglass gibi elektrolit ile reaksiyon vermeyen malzemelerden yapılmıştır. Deney sistemi ise ayrıntılı olarak Şekil 3.1’de verilmiştir.

Çarpan jet hücresinin dip kısmından alınan elektrolit çözeltisi, bir pompa kullanılarak tanjant giriş vasıtasıyla reaktöre beslenmiş ve böylece reaktör tabanında oluşturulan güçlü türbülanslı akış sayesinde elektrolitin karıştırılarak hem homojen kalması ve hem de soğutucu serpantin ile hızlı temas ederek çözelti sıcaklığının hızlı bir şekilde kontrol

edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu tür bir karıştırma tekniğinin bir diğer avantajı, elektrolitin içine nano partikül ilave edilmesi durumunda jet hücresinin alt kısmında nanotoz birikiminin engellemesi ve elektrolit içinde süspansiyon halde kalmaları temin edilmesidir.

Çarpan jet hücresi üzerindeki farklı bir çıkıştan alınan elektrolit, başka bir pompa vasıtasıyla sisteme bağlı akış ölçer üzerinden geçirilip jet akımı halinde elde edilerek katoda çarptırılmıştır. İstenen jet akış hızı, bu akış hattına seri olarak bağlanan küresel vana ve yerleştirilen bir by-pass hattı kullanılmak suretiyle ayarlanmıştır. Elektrolitik kaplama sistemi için gerekli olan DC elektrik akımı, GwInstek marka bir mikro işlemci kontrollü DC güç kaynağı kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Çarpan jet elektrokimyasal kaplama sistemi

3.3. Deneyin Yapılışı

Bu deney sisteminde anot katot arasındaki gerilimi belirlemek için bir voltmetre, akım değerini belirlemek için bir ampermetre kullanılmıştır. Bu sistemde jet akışı karşısına yerleştirilen bir numune tutucuya yerleştirilen 10 mm çapında ve 1 mm kalınlıktaki bakır numuneler kullanılmıştır. Numunelerin arka kısımlarında bir bakır telin lehimlenmesi suretiyle elektrik bağlantısı yapılmıştır. Ayrıca numunelerin arka tarafları bir epoksi reçine ile boyanarak elektriksel olarak izole edilmiştir. Polietilen malzemeden yapılan nozul içine yerleştirilen anot malzemesi, 30 mm uzunluğunda 15 mm çapında ve %99,95 saflıktaki Cu borudan yapılmıştır. Anot nozul ucundan 1 mm iç kısma gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Böylece nozul ucunun kaplama işlemi boyunca aşınarak nozul jet hızını değiştirmemesi sağlanmıştır.

Çizelge 3.1. Deneysel parametrelerin seviyeleri

V_{jet} (m/s)	3,47	4,46	5,45	6,45	7,44
T (°C)	20	30	40	-	-
(H/d)	1,0	1,5	2,0	2,5	-



Şekil 3.2. Deney düzeneği (daldırılmamış çarpan jet elektrokimyasal kaplama sistemi)

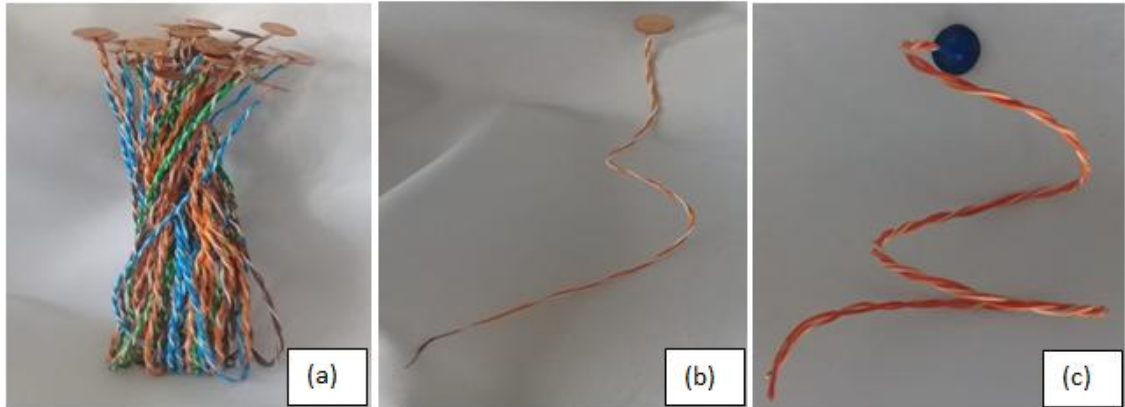
Deney sisteminde tüm kayıplar ve aşırı basınç düşüşü olduğu dikkate alınarak 8 mm çapındaki nozulda yüksek çarpma hızları elde edebilmek için 20 m yüksekliğe dakikada 90 L su basabilen plastik gövdeli bir santrifüj asit pompası kullanılmıştır. Pompanın yüksek derecede türbülanslı akış üretmesi ve sürtünmelerden kaynaklanan ısınma problemi, jet hücresi içine yerleştirilen bir bakır serpantin içinden çeşme suyu geçirilmesi ile sağlanmıştır. Böylece kaplama banyosu çalışma süresi boyunca istenen sıcaklıkta sabit tutulabilmektedir.

Bir DC güç kaynağından sağlanan sabit voltaj şartlarında çalışarak (akım değişken nozul çarpma mesafesi değiştiği için) kaplama deneyleri tamamlanmıştır.

Elektrolitik kaplama deneyleri 0,00025M konsantrasyonda $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ içerecek şekilde analitik saflıkta kimyasallar $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, H_2SO_4 ve ultra saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Tüm deneyler boyunca, destek elektrolit ve tamponlayıcı olarak H_2SO_4 kullanılarak elektrolitin pH değeri 2,5'ta sabit tutulmuştur. Elektrolit sıcaklığı, sabit sıcaklık sirkülatörü ve çeşme suyu kullanılarak 20, 30 ve $40 \pm 1^\circ\text{C}$ de sabit tutulmuştur. Deneylerde taban malzeme olarak kullanılan 1 mm kalınlıkta ve %99,95 saflıktaki bakır numuneler bir bakır levha üzerinden 10 mm çapındaki zımba ile çıkarılmıştır. Bakır numuneler kaplama işlemi öncesinde 1200 numara zımpara ile polisaj yapıldıktan sonra aseton ile yağ giderme işlemi yapılmış, sıcak H_2SO_4 çözeltisi içinde dağlandıktan sonra son olarak yüzeyler saf su ile durulanmıştır. Kaplama öncesi her numune kurutulup 1/10.000 hassasiyetli bir hassas terazide tartılmış ve tartım değerleri kaydedilmiştir. Kaplama deneyleri yapıldıktan sonra da yine saf su ile durulanıp, kurutulup, tartılmak suretiyle kaplama miktarları belirlenmiştir. Böylece her numune için kütle transfer katsayılarının belirlenebilmesi için kaplama miktarları tespit edilmiştir. Her deney öncesi ve sonrası pH ölçülerek H_2SO_4 ile pH 2,5'e ayarlanmıştır. Elektrolit belirli aralıklarla süzülerek safsızlıkların kaplama içine girmesi önlenmiştir.

3.3.1. Numunelerin hazırlanması ve ön işlemler

Bakır katotlar 10 mm lik panj yardımıyla pul haline getirildi toplamda 60 adet katotlar hazırlanmış panjla delme işleminde dolayı eğilmiş olanlar düz zeminde düzeltildi. 1200 zımpara ile zımparalandı. Zımparalama işlemlerinde SiC esaslı zımpara kağıtları kullanılmıştır. Bu işlemde numunenin yüzeye bastırma kuvveti sabit tutulmuştur zımparama işleminden sonra su besleme ve sabit dönme hızında yapılmıştır. 1200 grit zımparalamada ise 1 dakika süre ile zımparalama yapılmıştır. 1 dakikalık zımparalama kademeleri ikişer kez uygulanmıştır. Her kademe sonrası numune yüzeyi gözle kontrol edilmiş ve suyla temizlendikten sonra basınçlı hava ile temizlenmiştir. 30 cm kablo ile arkalarından lehimlendi ve kaplama işlemi esnasında numunelerin kaplanması istenmeyen kısımları ısıya dayanıklı koruyucu boya ile izole edildi. Anot ile katot arasındaki boyutsuz mesafe (H/d) 1-1,5-2-2,5 olacak dört farklı değerde alınmıştır. Şekil 3.3. (a-b-c)'de kaplama yapılacak numunelerin görselleri bulunmaktadır.



Şekil 3.3. Kaplama için hazırlanan katot numunelerin görüntüleri

a) Numune deneti, b) Katot numunesinin önden görünüşü, c) Katot numunesinin arka yüzü

Kaplanacak yüzeylerin metalografik esaslara göre hazırlanmasını takiben ara vermeden kaplamanın uygulanması kaplanacak yüzeyin çevre şartlarından etkilenmemesi açısından önemlidir ve iyi bir yapışma için bu işlemin yapılması gerekir. Metalik yüzeylerin iyi temizlenmesi iyi bir yapışma için şarttır. Bu yüzden kaplanacak yüzey yağ, pas vb olumsuzluklardan temizlenmiş olmalıdır. Bu çalışmada yüzeylerin temizliği için etil alkol

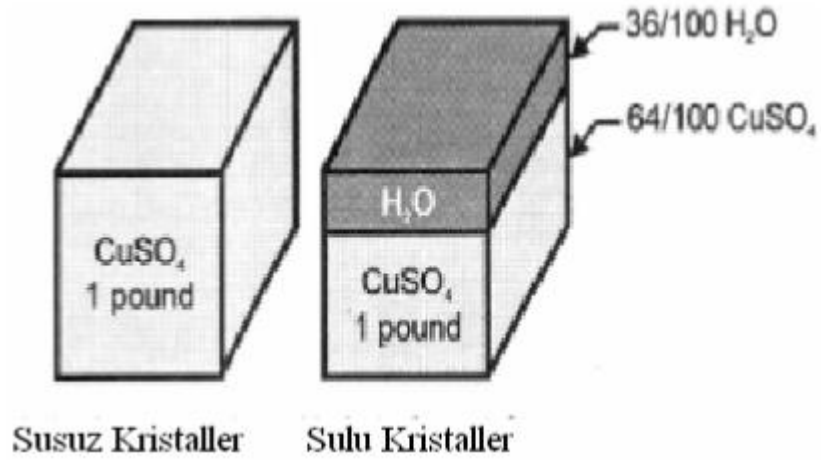
kullanılmıştır (Yeşildağ ve Günay 2007). Deney yapılırken aşağıdaki maddeleri göz önünde bulundurulması gereklidir;

- Asit su karışımı yaparken asit suya yavaş yavaş karıştırılacak,
- Karışım hazırlanırken krom kaplı veya paslanmaz çelik kullanıyoruz,
- Kaplama öncesi iş parçasının pamuk ile etil alkol ile temizlenir
- Kaplama sonrası iş parçasının etrafını sülfat çözeltisinden temiz etil alkol ile siliniz (Electroplating).

3.3.2. Elektrolit çözeltisinin (CuSO_4 çözeltisi) ve Bakır miktarının tayini için EDTA çözeltilerinin hazırlanması

Metal elektrolit ikili seçiminin dikkatli şekilde yapılmalıdır. En çok kullanılan asitli bakır banyosu bakır sülfat banyosu olarak bilinmektedir. Bunun pek çok değişik türleri bulunmakla birlikte, temel içeriği; bakır sülfat ve sülfürik asittir. Kullanılan bakır sülfat kristalleri su içerir (hidratlıdır). $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ formülü ile ifade edilen şey, bakır sülfat çözeltisinin kristalleşme suyu içeriğidir. Bakır sülfat kristalleşme suyu içeren diğer kristaller hidratlı (sulu) kristaller olarak tanımlanır. Bu kristalleşme suyu ısıtılarak veya başka bir yolla uzaklaştırılırsa, bu tip kristallere sudan arındırılmış anlamına gelen anhidrit susuz kristaller denir.

Hidratlı tuzlar, aynı hacimdeki susuz tuzlara göre daha az derişiktir. Başka bir şekilde anlatırsak bir kg susuz tuz yerine, bir kg hidratlı tuz kaplama banyosunda çözülse daha aza miktarda tuz eklemiş oluruz. Aşağıdaki şekil daha açıklayıcı olacaktır.

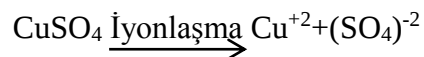


Şekil 3.4. Hidrasyon suyu

Bakır sülfat için, bir kg mavi (hidratlı) kristaller, bir kg'ın sadece 64/100'ü kadar saf CuSO_4 içermektedir. Burada kalan 36/100'lük kısma kristalleşme suyu karşılık gelmektedir. Daha önce verilen formül, 200 gram bakır sülfat kristali gerektirir. Elimizde açık yeşil renkli, toz görünümlü, susuz bakır sülfat varsa ve bundan kullanırsak, yukarıdaki reçeteye göre, her 1 gr için fazladan 0,36 gram ekleme yapmamız gerekeceğinden; 200 gram bakır sülfat eklemiş olmak için, fazladan bakır sülfatın oda sıcaklığında suda çözünmediğini göreceksiniz. Bunu çözeltiden tamamen uzaklaştırmak zorundasınız. Yeni bir kaplama banyosu hazırlanırken, tuzların kristalleşme suyu içerip içermediğinin kontrolü önemlidir.

3.3.2.a. H_2SO_4 hazırlanması

Ortak iyon etkisi, basit bakır sülfat banyosu, 2 temel girdiden oluşur. Bakır sülfat ve sülfürik asit. Bakır sülfat bakır iyonları sağlarken; sülfürik asit hidrojen iyonları sağlayarak elektriksel iletkenliği sağlamlaştıır. Bu, krom kaplama banyoları hariç tüm banyolar için kabul edilir.



Sağ yönü gösteren ok, iyonlaşma işleminin nasıl ilerlediğini işaret etmektedir. Sol yönü gösteren ok ise, bakır ve sülfatın iyonlaşmamış bakır sülfata dönüşme eğilimini işaret etmektedir. Sonuçta, belli orandaki iyonlaşma ile bakır ve sülfat iyonlarının tekrar birleşme tepkimeleri arasında bir eşitlik mevcuttur. Eğer biz banyoya, sülfat iyonları ekleyecek olursak, reaksiyonun, sol tarafa doğru gerçekleşme durumu olacaktır ki, bu da bakır iyonlarının birleşerek iyonlaşmamış bakır sülfat oluşturması anlamına gelmektedir. Bu bakır sülfatın iyonlaşmasının tekrar bastırılmasına denktir. Tepkimenin, geriye doğru (iyonlaşmamış bakır sülfat oluşumu) gitmesinin nedeni, elimizde bakır iyonları ile bağlanma isteği duyan, fazladan sülfat iyonlarının olmasıdır. Kimyanın önemli bir prensibi olarak basitçe söylemek gerekirse, buna kütlenin davranışı kanunu denir.

3.3.2.b. Müreksit indikatörü ile EDTA hazırlanması ve Cu tayini

Müreksit indikatörü hazırlamak için 1 gr müreksit indikatörü alınıp 99 gr tuz (NaCl) ile havanda karıştırılıp öğütülecek tamam karıştırılır.

0.01 M EDTA hazırlama için hassas terazide 3.7224 gr EDTA tartılıp saf suda çözülüp çözelti hacmi 1 L'ye tamamlanır.

Titrasyon ile konsantrasyon tayini için 5 ml çözelti alınıp 100 ml tamamlanıp 5 mL alınıp müreksit intikatörü eklenip rengi sarıya dönüşüp 0.01 M EDTA ile titre edilecektir. 1 ml 0.01 M EDTA 0.6354 mg Cu eşittir.

$$\text{Cu miktarı (mg/ml)} = -V \left(\frac{0,6337 \times 1000}{m} \right) \quad (3.1)$$

V : Harcanan EDTA çözeltisinin hacmi (mL),

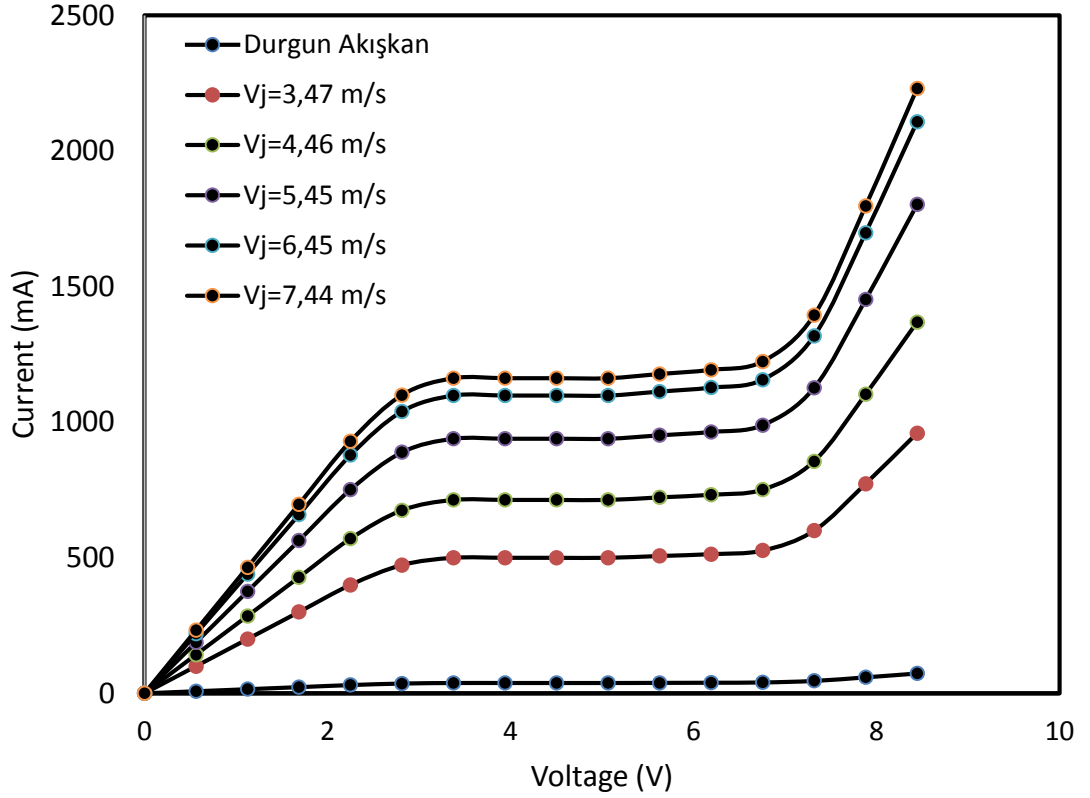
m : Alınan örnek miktarı (g).

3.3.2.c. Elektrolitin hazırlanması

Elektrolit (kaplama banyosu) olarak 0,00025M CuSO_4 çözeltisi hazırlandı. Bunun için $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ kullanıldı. 1 mol $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 249,68 gr içinde 159,68gr CuSO_4 olduğu dikkate alınır, 6 L çözelti için 0,0003125 mol $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ gerekmektedir. 0,00025M CuSO_4 çözeltisinin hazırlanması için 0,0003125 mol $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 'a karşılık gelen miktar olan 0,374438 gr $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ tartılır 4L saf suda çözülüp hacmi saf su ile 6L'ye tamamlanır. Çözelti hacmi 6L'ye tamamlanmadan önce (6 L'nin biraz altında iken) çözeltiye seyreltik H_2SO_4 çözeltisi eklenerek pH değeri 2,5'a ayarlanır.

3.3.2.d. Sınırlayıcı akım

Sınırlayıcı akımı bulmak için durgun çözeltiye farklı voltaj şartları uygulanıp sınırlayıcı akım değeri ve sınırlayıcı akım veren voltaj değeri belirlendi. Kaplama işlemi DC akım kaynağı ile yapılır. Kaplanacak malzeme katot (negatif), elektrokimyasal kaplama yapan malzeme ise anot (pozitif) elektrotudur. Çözelti ise anot olarak kullanılan metalin tuzu (sülfat grubu) ile asit ve saf su kullanılarak hazırlanır.



Şekil 3.5. Sınırlayıcı akım grafiği (Polarizasyon eğrisi)

Çalışmalarda sınırlayıcı akım veren voltajın tespiti için farklı jet hızlarında yapılan akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen grafiğe (polarizasyon eğrisi) göre sınırlayıcı akım veren voltaj değeri 3,5 volt olarak belirlenmiştir. Çünkü plato üzerinde alınacak 5 veya 6 volt değerlerinde yan reaksiyon olan çözücü ayrışmasının hızlandığı görülmüştür. Yan reaksiyon oluşumu, kaplamaların daha pürüzlü elde edilmesi ve ayrıca elektrolitin pH değerinin başlangıç değeri olan 2,5 değerinden 5-6 değerlerine doğru sapması ile açıklanmıştır. Katot yüzeyinde oluşan H_2 gazının elektrolit içindeki H^+ iyonu konsantrasyonunu azaltmasının sonucu olarak $pH = -\log [H^+]$ eşitliğine göre pH'nın yükseldiği deneysel çalışmalarda tespit edilmiştir.

3.3.3. Kimyasal kaplama reaksiyonu

Elektrokimyasal kaplama işlemi bir kimyasal kütle transferi prosesidir. Bu prosesler iki kademedede oluşur;

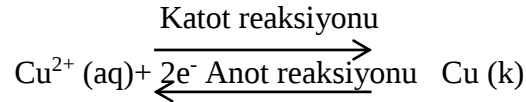
- 1.Elektrolit içinde bakır iyonlarının nerst difüzyon tabakası içerisinde yüzeye difüzyonu,
- 2.Elektrot yüzeyinde bakır iyonlarının reaksiyon vermesi.

Kimyasal kaplama reaksiyonu metal iyonu (M^{+n})'nin, kütle (difüzyon) transferi ile yüzeye transfer edilmesi ile sınırlanır.

Katot yüzeyi üzerinde lokal akım yoğunluğu ile ilişkilidir,

$$\langle i_r \rangle = (8/d^2) \int i(r)r(dr) \quad (3.2)$$

i_r : yarıçapı yönünde lokal akım yoğunluğu katot yüzeyi üzerinde elektrolitik kaplama reaksiyonu;



Bakır sülfat çözeltisi için bakırın belli sıcaklıklarda difüzyon katsayısı $1.01 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2/\text{s}$

Çarpan jet elektrokimyasal kaplama sistemlerinde anot olarak nozul içine silindirik geometrili bakır boru yerleştirilmektedir. Katot görevi yapan dairesel geometrili metal ise nozul karşısına yerleştirilmektedir. Anot ile katot arasına bir potansiyel fark uygulanarak ve nozuldan geçirilen elektrolit katoda çarptırılmak suretiyle elektrokimyasal kaplama yapılmış olur. Nozuldan çıkan elektrolit içindeki pozitif yüklü iyonlar katoda yüksek hızda çarpmakta ve yüzeyde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon sonucu kaplama sağlanmaktadır. Sınırlayıcı akım yoğunluğu üstüne çıkıldığında arzu edilmeyen yan reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu nedenle elektrokimyasal kaplama sisteminde kaplama sınırlayıcı akımın yoğunluğuna karşılık gelen voltaj değerlerinde yapılmaktadır (Li and Walker 1996).

Genel olarak bir elektrokimyasal banyoda gerçekleşen elektrokimyasal tepkimeler ve yan reaksiyonlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Katot;

İstenen tepkime:



İstenmeyen yan tepkime:

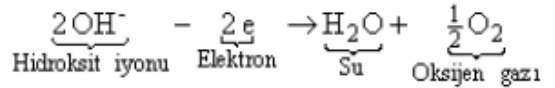


Anot;

İstenen tepkime:



İstenmeyen yan tepkime:



Kaplama kalitesi ve kalınlığı; kaplama öncesi yüzeyde yapılan ön işlemlere, kullanılan banyonun kimyasal bileşimi, anot, banyo donanımı, eletrot hareketi, akım yoğunluğu, banyo sıcaklığı, banyonun pH'ı gibi pek çok faktöre bağlıdır (Hasçalık ve Özek 2002).

3.3.4. Elektrokimyasal kaplama proseslerine etkileyen parametreler

İyi bir elektrolitik kaplama için banyo tertibi, cinsi ve elektrolitte kullanılan maddeler önemlidir. Bu maddelerin kullanımı ve seçimi çok iyi yapılmalıdır. Kullanılan kimyasalların menşei de çok mühimdir. Banyoları, elektrolitleri hazırlarken kullanılacak su da önemlidir. Sertliği yüksek su kullanılmamalıdır.

3.3.4.a. Geçen akım

Galvano teknikte akım şiddetinin yerine elektrotların birim yüzeyine isabet eden akım şiddeti alınır. Buna akım yoğunluğu denilir. Birim yüzeyi (dm^2) dir. Bu çalışmada elektrokimyasal kaplama deneyleri sınırlayıcı akımın altındaki akım değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Yani sınırlayıcı akımın biraz altındaki akım değerlerini veren voltaj (gerilim) uygulanmıştır.

$$d = i \text{ (amper)} / s \text{ (dm}^2\text{)} = \dots [\text{amp/dm}^2] \quad (3.3)$$

Akım yoğunluğunun artışının kaplamanın yapısı bakımından iki karşı etkisi vardır. Akım yoğunluğu artınca kristallerin oluşma hızı artmış olur ve kaplama ince yapılı olur. Fakat akım yoğunluğu daha da artınca katot dolayında deşarj olan metal iyonları çözelti içinden gelenlerle yeterince karşılanamadığından katotta bir fakirleşme meydana gelir, bunun sonucu kaplama homojen olmaz ve kalite bozulur, siyah ve süngerimsi kaplamalara yol açar. Katotta fazla hidrojen çıkışı akım yoğunluğunun artmış olduğuna işarettir.

Akım yoğunluğunun kaplanan yüzey üzerinde etkisi oldukça yüksektir. Büyük oranda katot potansiyelini değiştirir. Çünkü katotik potansiyel büyük oranda değiştirir. Yüksek akım yoğunluğu kaplama yapısı üzerinde oldukça faydalı etkisi vardır. Yapılan bir çalışma sonucunda (Chin and Hsueh 1994) sınırlayıcı akım yoğunlu ($\dot{I}_{lim,0}$) çarpan jet hızı arasındaki ilişki;

$$\dot{I}_{lim,0} = 0,9 \frac{nFC_{\infty}D}{d} Sc^{1/3} Re^{1/2} (H/d)^{-0,09} \quad (3.4)$$

- r : Reaksiyon veren türün yük sayısı
- F : Faraday sabiti, 96.485 Cuo/mol
- C_{∞} : Reaksiyon veren iyonun çözelti yığını içerisindeki konsantrasyonu
- D : Reaksiyon veren iyonun elektrolit içindeki difüzyon katsayısı m^2/sn
- d : Nozul iç çapı
- H : Nozul ve alt kaplama arasındaki uzaklık (anot katot arasındaki uzaklık)
- Re : Reynold sayısı $Re = vd/V$

Akım yoğunluğunun kaplama yüzeyi üzerinde etkisi oldukça yüksektir. Büyük oranda katot potansiyelini değiştirir. Yüksek akım yoğunluğu kaplama yapısı üzerinde oldukça olumlu etkisi vardır. Yüksek akım yoğunluklarında katot üzerinde hidrojen iletilir. Sıcaklık ve pH kontrol kaplama proseslerinde her zaman kontrol edilmesi istenir. Çünkü

bunlar kaplanan çözeltilerin özelliklerini ve kaplama miktarını etkiler (Paunovic *et al.* 2010).

Kaplama ünitesinde kullanılan güç kaplamanın kalitesini etki etmektedir. Güç ünitesinin kaplama özelliklerine olan etkisi, katottan yayılan serbest elektronların hızının, anot ile olan potansiyel farkına bağlılığından dolayıdır (Yeşildağ ve Günay 2007).

Sabit akım yoğunluğu hem kaplamanın zamanını hem de oksitlenme işleminin kontrolü açısından kaplamaya bir avantaj sağlamaktadır. Uygulanan akımın sınırlayıcı akım yoğunluğunun altında olmasının nedeni kaplamaların gözenekli bir yapıya olmasına neden olmaktadır. Bu ise özellikle korozyon dayanımı açısından istenmeyen bir durumdur. Bu gözenekli yapıdan kurtulmak için sınırlayıcı akım değerinin altındaki voltajlarda çalışılması gereklidir (Durak 2014).

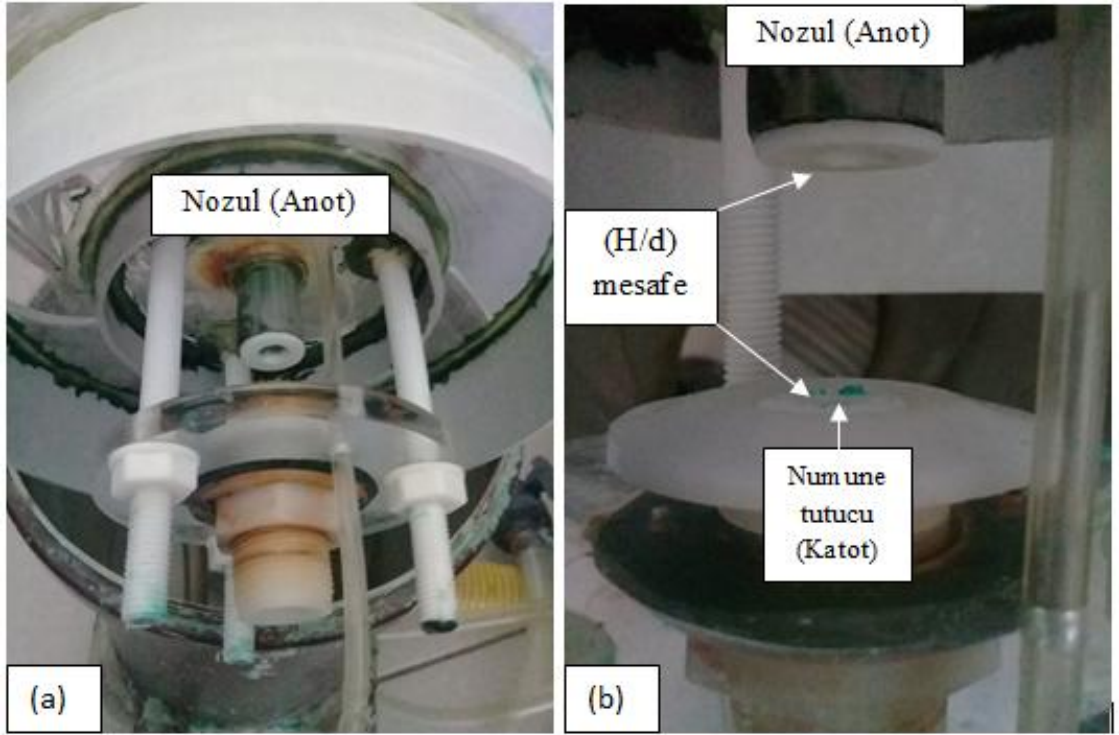
3.3.4.b. Çarpma yüzeyi mesafesi

H/d: 1-1,5-2-2,5 olarak farklı mesafeler kullanılmıştır. Çarpma yüzeyine daha yakın olan anot yüksek akım yoğunluğu üretir. Yani çarpma bölgesinde anot, katoda ne kadar yaklaştırılırsa o kadar daha yüksek akım yoğunluğu oluşur. Mesafe uzaklaştıkça akım yoğunluğu azalır. Buda kaplamanın farklı özelliklere sahip olmasına neden olur.

3.3.4.c. Nozul

Jetlerin akış yapısı nozul çıkış şartlarından ve jet etrafında üretilen vortekslerden oldukça büyük oranda etkiler. Çarpan jetin akış özellikleri vorteksin kontrol edilmesi ile iyi bir şekilde değiştirilebilir. Çarpma yüzeyindeki ısı transfer karakteristiklerinin jet akış yapısının değişiminden etkilenir. Jet akışının emiş akısı büyür, ısı transfer hızları yüksek türbülansa sahip küçük bir boşlukta artar, bunla beraber düşük jet akışı yüzünden büyük boşluklarda ısı transfer hızları oldukça düşüktür. Nozul açılı bir şekilde konumlandırıldığı zaman nispeten yüzeye bitişik olan bölgedeki yüksek elektrokimyasal kaplama hızları yüzey yakınındaki viskoz kesme davranışını göstermektedir. Bunun gibi durumlarda sınır

tabaka dışında ana kısmı akımın dışındaki değişim çarpma noktasının yakınında çok şiddetlidir (Li and Walker 1996). Şekil 3.6 (a-b) nozul anot bölgesi, (H/d) mesafesi, katot çarpma bölgesi görülmektedir.



Şekil 3.6. (a-b)'de nozul (anot) bölgesi, (H/d) mesafesi, katot çarpma bölgesi

Nozullar eğik ve normal püskürtmeli, nozul kısmı şekil yapısı olarak yuvarlak ve eliptik jetler, jet püskürtme noktasını tekli yada çoklu yapıda olabilirler (Yapıcı vd 1998).

3.3.4.d. Jet hızı

Çarpma bölgesindeki yüksek ısı ve kütle transferi miktarları birçok araştırmacının bu bölgeye çalışma yapmasını sağlamıştır. Artan jet hızı ve elektrolit içindeki nanopartikül yükünün artması ile partikül birikim hızının lineer bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Bu çalışmada vorteks ile kontrol edilen bir aritmetik çarpan jetle kütle transfer özellikleri ve akış değişimi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu amaçla iki farklı tür kontrol metodu

uygunlaşmıştır. Birincisinde ikincil kesme akış kontrolü ve ikincisi akustik hareketlendirmedir.

Yüzeye dik çarpan bir jet çarpma noktası etrafındaki bir bölgede uniform bir akım yoğunluğu dağılımı oluşturur. Jetin belli açıda konumlandırılması ile en büyük akım değerleri çarpma bölgesi içerisinde ilk çarpma noktasından daha ileri bir noktaya kayar.

Deney düzeneğimizde 5 farklı hızla çalışma yapılmıştır: 3,47 m/s, 4,46 m/s, 5,45 m/s, 6,45 m/s ve 7,44 m/s'dir. Hız kontrolü bir küresel vana ve bypass ile sağlanmakta olup, güvenlik için 7,44m/s'den daha yüksek hızlar çalışılmamıştır.

3.3.4.e. Anot ve katot

Çalışmamızda anot ve katot olarak bakır kullanılmıştır. Anot, redoks tepkimelerinde yükseltgenmenin meydana geldiği elektrottur. Katot un tersi olarak tanımlanabilecek, artılığı ve eksiliği duruma göre değişen iletken uç. Yapacağımız çalışmada, anot artı uç, katot ise negatif kutup olup katot bir elektrokimyasal hücrede indirgenmenin gerçekleştiği elektrottur.

Metale akım uygulanarak metal elektrotun potansiyeli pozitif doğrultuda arttırılırsa devreden geçen akımın neredeyse tamamı yüzeydeki kaplanan filmin büyümesi için harcanacaktır. Ayrıca paslanmaz çelik gibi kaplanması zor olan yüzeyler bu yöntemle metallerin yüzeylerinin çeşitli işlemlerle modifikasyonu sonucu kaplanması mümkün olmaktadır.

Kaplanan metallerin yüzeylerinde oluşan tabaka filmi genelde mat bir yüzeye sahiptir. Fakat proses sırasında oluşacak olan oksit miktarları ve fazların değişimiyle birlikte elde edilen kaplamaların dekoratif amaçlı olarak renklendirilebilmesi mümkündür (Durak 2014).

Anotlar mümkünse tavllanmış elektrolitik bakır olmalıdır. Ama döküm veya haddelenmiş bakır da kullanılabilir. Çok daha düzgün çözüneceğinden elektrolitik bakır tercih edilmelidir. Anot ne kadar düzgün çözünür ise, kaplama yüzeyi o kadar düzgün olur.

3.3.4.f. Banyo geometrisi

Banyo dikey silindirik geometriye sahiptir, çarpan jet reaktörünün dip kısmından alınan elektrolit, bir pompa kullanılarak tanjantsal giriş vasıtasıyla reaktöre beslenmiş ve böylece oluşturulan swirl akış ile elektrolitin karıştırılması temin edilmiştir. Karıştırma tekniği ile elektrolitin jet hücresinin alt kısmında birikmesi engellemiştir.

3.3.4.g. Kaplama banyosunun konsantrasyonu

Banyo içerisindeki bakır iyonlarının büyük bir kısmı bakır sülfat tarafından sağlanır. Tavsiye edilen değerler içerisinde çalışıldığı takdirde yüksek kalitede ve uygun bir kaplama elde edilir. Düşük konsantreli banyolarda verimli çalışabilmek için; düşük miktarlardaki bakır sülfat oranına karşı yüksek oranlarda anot bulunmalıdır. Düşük bakır sülfat miktarının sonucunda banyo içerisindeki düşük bakır metali yüzünden katot verimi azalacaktır. Bunun sonucunda ise istenilen kaplama kalınlıklarını elde etmek için daha uzun süreler kaplama gerekecektir. Düşük bakır sülfat miktarının diğer sonucu olarak ise; yüksek akım bölgelerinde oluşan çukurlaşmalar, noktacıklanmadır.

3.3.4.h. Elektrolitin hareketi

Çarpan jet sistemlerinin genellikle 3 bölgeye ayrılır.

- 1) Serbest jet bölgesi (nozul alt akım bölgesidir.)
- 2) Çarpma noktası yakınındaki durgunluk bölgesi
- 3) Durgunluk bölgesi dışında kalan duvar jet bölgesi

Hidrodinamik sınır tabaka durgunluk bölgesinden dışa doğru gelişir difüzyon tabakasının gelişimi hidrodinamik sınır tabaka ve viskoz kesme kuvvetlerinin etkisi altındadır. Difüzyon tabakasının çözümü ise jet potansiyel dağılımı ve elektrokimyasal çift katmanlar arasındaki akım laplace ile modellenmiştir (Li and Walker 1996)

Elektrot yüzeyine metal iyonlarının difüzyon, konveksiyon ve elektrik geçiş yoluyla iletilmektedir. Elektrolit deki toplu bulunan iyonlar elektrik alanının etkisi ile elektrolite geçer bu olay ise iyonik konsantrasyon ile alakalıdır. Sonra kopan iyonlar elektrot üzerinde toplanırlar. Bu koşullarda iyonlar genel akım destekleyici elektrot tarafından aktarılır elektrik gücü ihmal edilir (Igorovich 2012).

3.3.4.1. Banyo sıcaklığı

Bu deneysel çalışmada sıcaklık aralığı 20°C, 30°C ve 40°C'dır. Kaplama sıcaklığı farklı çözeltilerde belli bir dereceye kadar arttığı buda kaplamayı arttırdığı artan banyo sıcaklığı ile de kaplamanın tanecik büyüklüğü azalmaktadır.

Asitli bakır sülfat banyosu 20-49°C arası çalışılabileceği gibi ihtiyaç halinde daha yüksek sıcaklıkta da çalışabilir. Banyo sıcaklığı arttıkça, daha fazla bakır sülfat çözünecektir. Özellikle, elektriksel şekil verme işleminde olduğu gibi kaplama yakılmadan daha yüksek akım yoğunluğu kullanılarak, kaplama işleminin daha hızlı yapılması sağlanmış olur. Eğer sıcak çözelti ile çalışmak isterseniz reaktörde ki soğutucu açılmadan pompa sıcaklığı ile istenilen sıcaklığa çıkılır. Soğutucu olarak bakır boru kullanılmış reaktöre montajı yapılmıştır.

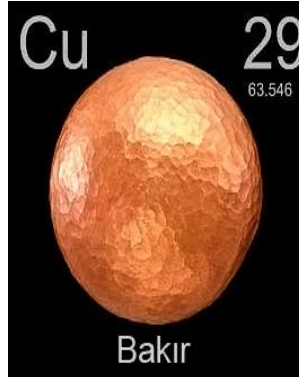
3.3.4.i. Banyo pH değeri

Bu deneysel çalışmada pH aralığı 2,5 olarak ayarlanmıştır. Elektrolitlerin belirlenen pH değerlerinin altında veya üstünde olması kaplama kalitesini olumsuz yapacak ve bozacaktır. Kaplamalarda belirtildiği gibi etkileyecek faktörlere çok dikkat edilmelidir ve

asla pH ayarını yaparken sudkotik ve hidroklorik asit kullanılmamalıdır. Her deney öncesi ve sonrası pH belirlenecek H_2SO_4 ile ayarlanmıştır.

3.3.4.j. Cu kullanılmasının Sebebi

Bakır pembemsi renkte, özgül ağırlığı 8,92 olan bir metaldir. (1 cm^3 suyun ağırlığı 1 gram iken, 1 cm^3 bakırın ağırlığı 8,92 gramdır). Kolayca biçimlendirilebilir ve elektriksel iletkenlik bakımından gümüşten sonra en iyisi bakırdır. 1 veya 2 değerlikle olabilir.



Şekil 3.7. Cu elementi

Bakırın en çok kaplanan metali olarak kullanılır, çünkü yumuşak olup kolay biçimlendirilebilir, kolayca polisaj yapılabilir ve farklı birkaç çözültiden kolaylıkla kaplanabilir. Fakat atmosferin zararlı korozyon etkisi sadece demir için söz konusu değildir, bakır metalinin dış tabakası havadaki oksijenle reaksiyona girerek oksitlendiği için bakırın dış yüzeyi kararır kırmızı ile siyah arasında bir renk oluşur. Asidik atmosferde yeşil renkli bir pas oluşur (bakır pası, bakır yeşili). Bu oksit tabakası koruyucu bir tabaka olarak davranır ve bakırın oksijenle daha fazla reaksiyona girmesini engeller. Renkteki bu bozulma nedeniyle, eğer kaplamanın orijinal pembe rengini muhafaza etmesi isteniyorsa, bakırla kaplanmış bütün ürünler koruyucu bir lak tabakasıyla kaplanmalıdır. Elektrokimyasal kaplanmış bakır özellikle hassas olduğundan dolayı havada renk değiştirir (Anonim 2010).

3.3.4.k. Bakırın elektrokimyasal özelliği

Bakırın diğer elementlerle birleşerek en dış yörüngesindeki bir veya iki elektronunu kaybettiğini ve çeşitli bileşikler oluşturduğunu biliyoruz. Bakırın bir elektronunu kaybettiğini ve çeşitli bileşikler, cuprous veya bir değerlikli bakır bileşikler olarak adlandırılır. Bakırın iki elektronunu kaybederek oluşturduğu bileşiklere ise, cupric veya iki değerlikli bakır bileşikler denir.

Bir değerlikli bakır bileşikler su içinde çözüldüğünde, bakır tuzu iyonize olur ve bir elektron kaybetmiş haldeki bakır iyonlar net olarak bir pozitif (+) yüklüne sahiptir. İki değerlikli bakır bileşikler iyonize olduklarında, bunlar iki elektron kaybederler ve net olarak iki pozitif yüklü hale geçerler. (+)1 değerlikli bakır iyonunu metalik bakıra geri döndürmek için 1 elektron; (+)2 değerlikli bakır iyonunu metalik bakır haline geri döndürmek için 2 elektron gerekliliğinden dolayı, (+)1 değerlikli bakır iyonunun bakıra dönüşmesi için gereken enerji miktarı daha azdır (Anonim 2010).

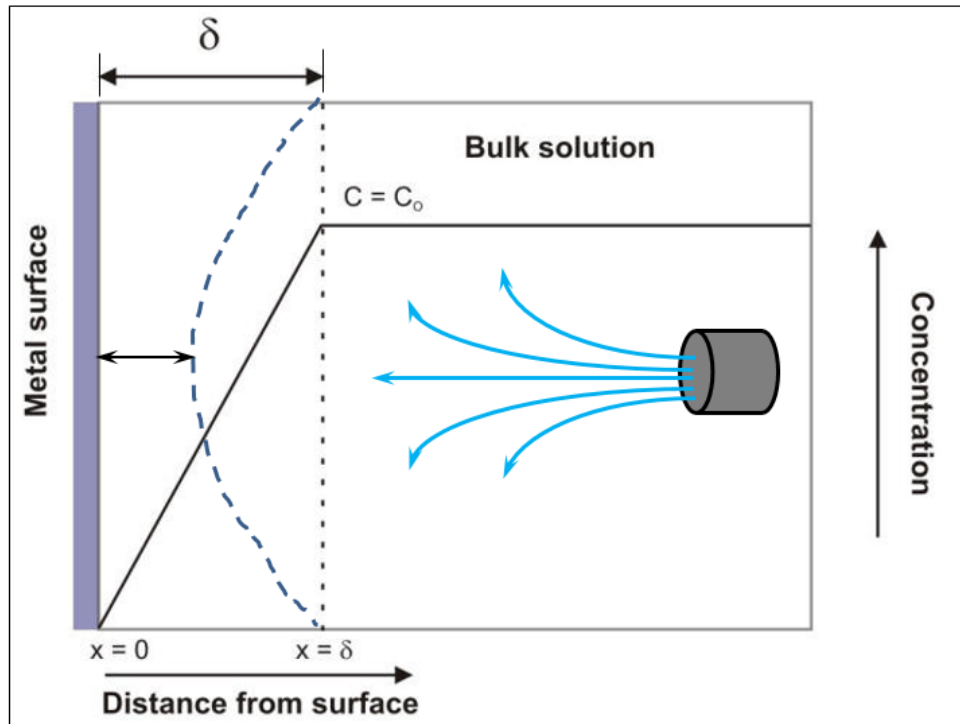
Çizelge 3.2. Bakırın elektrokimyasal özelliği

Özellikler	Cu^+	Cu^{+2}
1 gram kaplamak için gereken amper- saat	0,422	0,844
1 ons kaplamak için gereken amper-saat	11,96	23,92
1 dm ² ye 20 mikron kaplamak için gerekli amper-saat	0,73	1,516

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Çarpan Jetin Elektrokimyasal Kaplama Üzerine Etkisi

Elektrolitik olarak üretilen kompozit kaplamaların konveksiyonel kaplama ile üretilen film kaplamalara göre azalan tanecik gelişimi daha yüksek sertlik, azalan sürtünme ve korozyon direnci, daha yüksek akış gerilimi meydana getirdiği görülmüştür. Çarpan jetlerin konvektif ısı, kütle artırma yöntemlerinden ve yüksek kontrol edilebilen lokal ısı, kütle transferi katsayısı elde edilmesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Düz bir yüzey üzerine çarptırılan iki boyutlu elektrolit jetinden, elektrolitik biriktirme sağlanmış, çarpan jet sisteminde anot ve katot arasına bir potansiyel fark uygulandığı zaman jet çözeltisi içindeki iyonlardan pozitif yüklü olanlar katoda doğru hareket etmiştir. Çarpan jet tekniği kullanılarak yapılan kaplama, konveksiyonel bakır kaplama tekniğinden 10 kat daha hızlı kaplama üretilmiştir.



Şekil 4.1. Artan jet hızı ile difüzyon tabakasının incelmesi sonucunda bakırın birikim hızı artmıştır

Nozul jet hızındaki artış çarpma yüzeyi (katot)daki akım yoğunluğunun artmasına neden olur. Jetin belli açıda konumlandırıldığında nispeten dar bir bölgede elektrolitik kaplama hızları yüzeyin yakınındaki viskoz kesme davranışının var olduğunu gösteriyor.

Eş zamanlı olarak, katı parçacıklar katot yüzeyine doğrudan temas ederler ve kristalize olan bakır ile kuşatılırlar. Artan jet hızı ile kaplama yüzeyine çarpan jetin etkisi ile yüzeyde difüzyon tabakasının incelmesi sonucunda bakırın birikim hızı artmıştır (Şekil 4.1). Kaplama içerisine giren Cu miktarları hıza ve elektrolit içindeki katı yüküne bağlı olarak verilmiştir. Literatür çalışmalarına benzer olarak bu çalışmada da artan jet hızı kaplama neden olmuştur.

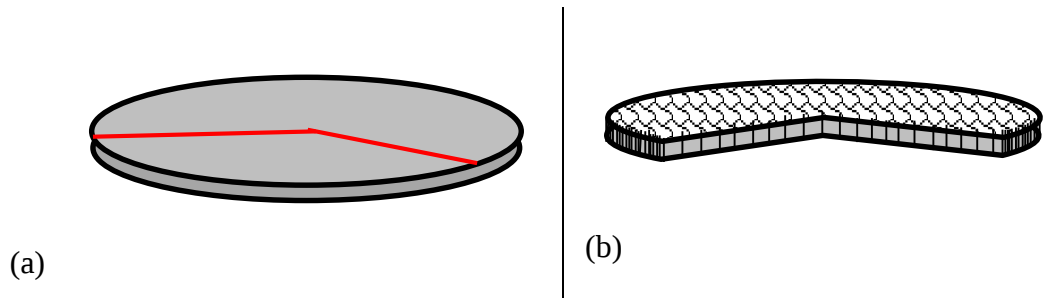
Kaplamada katot yüzeyinde iyonların hızlı reaksiyonlar vermesi ile iyonlar tüketilir. Böylece bir δ kalınlığında difüzyon tabakası meydana gelir bu tabaka nerts difüzyon tabakası denir. Çok hızlı jet akışı hücreden geçen akımı artırır (sabit voltajda) dolayısıyla elektrokimyasal reaksiyon katot yüzeyinde daha çok meydana gelir. İyon atlama mesafesi kısalmır, difüzyon yolunu kısalttığımız için daha hızlı iyon geçmesi sağlanır. Nispeten yüksek voltajlarda istenmeyen yan reaksiyonlar meydana gelebilir bunlar kaplanacak yüzey üzerinde bozucu etkiye sahiptir. Kaplama için uygulanan voltaj sınırlayıcı akım yoğunluğu altındaki üretilen voltaj değerinde tutulur.

Üretilen kaplamaların XRD incelemesi sonucunda, saf bakır kaplamalarda görülen spesifik piklerinin şiddetlerinde bir miktar azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca XRD bakır piklerinde bir miktar genişleme olmuştur. Bu genişleme, kaplamada tane boyutunun küçülmesinin bir göstergesidir. Konvansiyonel kaplamada elde edilen yüzey yapısı, kaplama banyosuna ilave edilen Cu_2SO_4 yapısı ile ciddi bir değişime uğrayarak karnabahar görünümüne sahip kaplamalar elde edilmiştir. Çekilen taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden de rahatça görülebileceği üzere Şekil 4.1’de artan kaplama kalınlığı ile yüzey pürüzlülüğü de artmıştır.

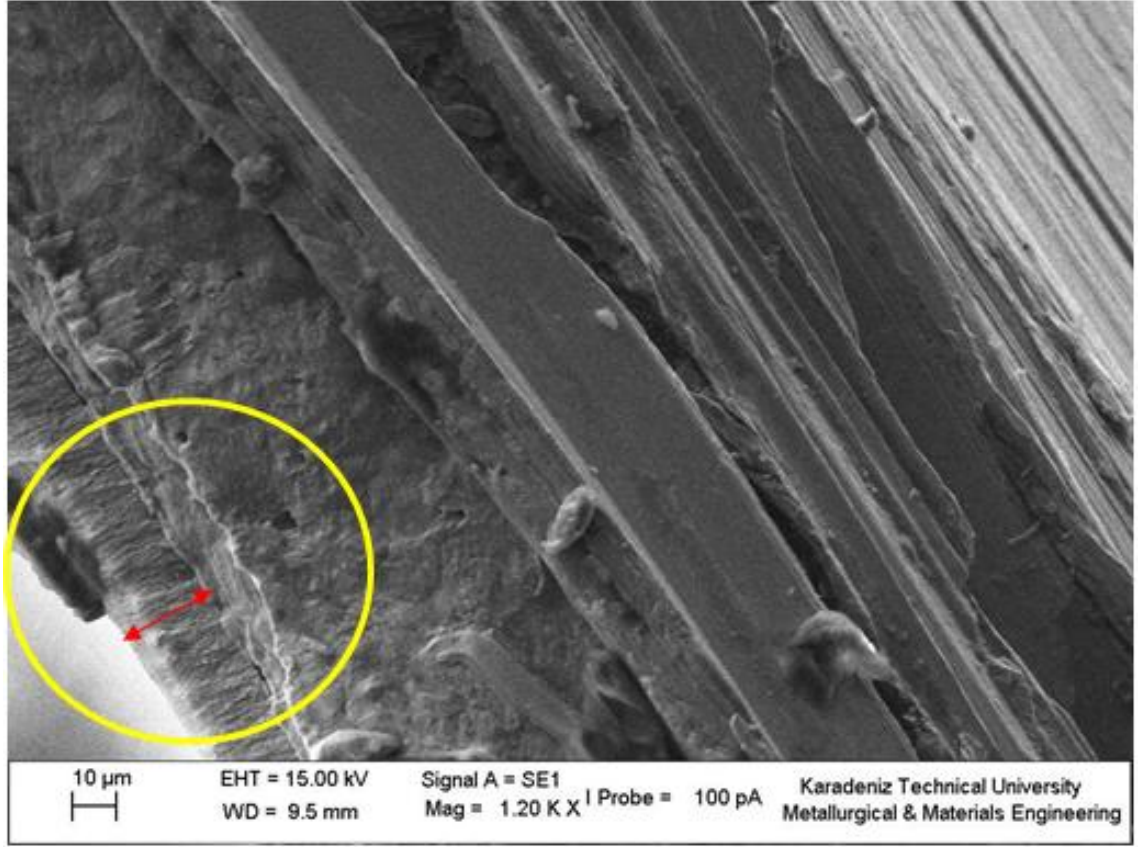
Kütle aktarım hızları Re_j , Re_r artışları ile artış gösterilmiştir, ancak çalışılan çarpan jet aralığı yerel ve ortalama kütle transferi değişimi jet çarpma etkisi hâkimdir (Şara vd 2007).

4.1.1. Kaplama kalınlığının SEM ile tespiti

Üretilen kaplamalara ait yüzey morfolojileri ve filmlerin büyüme morfolojileri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Jeol, JSM-7000F) kullanılarak incelenmiştir. Kaplama kalınlıklarının tespiti amacıyla 10 mm çapındaki alt malzemeler önce çapına denk gelen yerden aşındırılmak suretiyle inceltilerek kaplamadan sonra kolayca kırılabilir hale getirilmişlerdir. Bu numuneler daha sonra çizik olmayan taraftan kaplama yapıldıktan sonra sıvı azot içinde soğutulmuş ve akabinde çizilmiş yerlerinden kırılmıştır. Bu şekilde elde edilen her bir numune elektron mikroskobunda numune tutucu hamur içine en kesit görüntüsü almak üzere dik pozisyonda yerleştirilmek suretiyle en kesit görüntüleri alınmış ve böylece taban malzeme üzerindeki kaplama kalınlıkları ölçülmüştür (Şekil 4.2. a-b).



Şekil 4.2. En kesit SEM görüntülerinin alınması için hazırlanan numuneler
a) kaplama öncesi çizilen numuneler, b) kaplama sonrası çiziklerden kırılan numuneler.

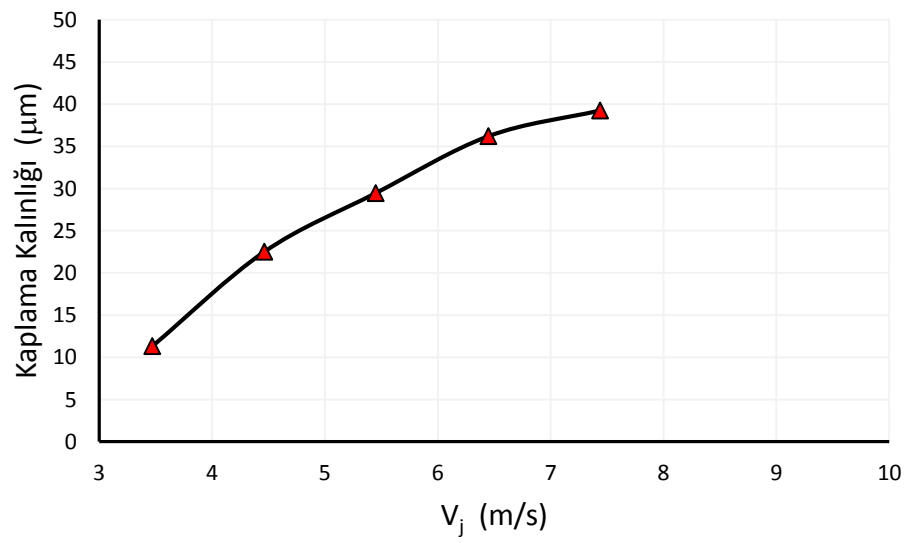


Şekil 4.3. $(H/d)=1$ 'de $V_j=4,46$ (m/s)'de Cu alt malzeme üzerine yapılan kaplamanın SEM görüntüsü (22,5 µm)

Şekil 4.3 ve 4.4'te verilen SEM görüntülerinden de görüldüğü üzere, kırılan numunelerin en kesit SEM analizlerinden elde edilen kalınlık değerlerinin grafik edilmesiyle $(H/d)=1$ 'de jet hızına (V_j) göre kaplama kalınlıklarının değişimi Şekil 4.3'de görülmektedir. Sabit voltaj şartlarında (3,5V) yapılan kaplamalarda, sınırlayıcı akım yoğunluğu değerleri (Şekil 3.5'de sınırlayıcı akım grafiği) jet nozul hızındaki artışa paralel olarak artmıştır. Bunun sonucu olarak numune üzerindeki bakır kaplama kalınlığı V_j 'deki artışa bağlı olarak artmıştır.

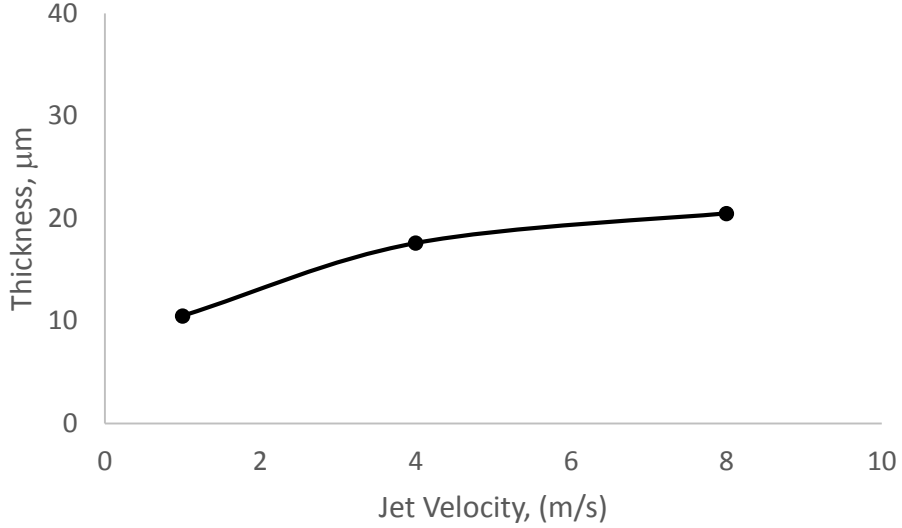


Şekil 4.4. $(H/d)=1$ 'de $V_j=3,47(\text{m/s})$ 'de Cu alt malzeme üzerine yapılan kaplamanın SEM görüntüsü (12,4 μm)



Şekil 4.5. $(H/d)=1$ 'de kaplama kalınlıklarının V_j 'ye göre değişimi

Bu sonuç literatürle uyumludur. Arzutuğ tarafından yapılan çarpan jetlerle Ni kaplama çalışmasında V_j 'ye bağlı olarak kaplama kalınlığının arttığı ve ayrıca en yüksek kaplama kalınlıklarının jet durgunluk noktasında olduğu bildirilmiştir (Arzutuğ ve Ezirmik 2009).



Şekil 4.6. $(H/d)=0,5$ 'te Jet durgunluk noktasındaki Ni kaplamaların V_j göre değişimi (Arzutuğ 2015)

4.1.2. Kristal büyümesinin X-RAY analizi ile belirlenmesi

Jet hızına ve (H/d) 'ye bağlı olarak elde edilen X-Ray grafiklerindeki pik verilerinden V_j 'ye ve (H/d) 'ye bağlı olarak üretilen kaplamaların ortalama partikül büyüklükleri Debye-Scherrer eşitliği ile belirlenmiştir. Cu kaplamaların tane büyüklüğü, Debye- Full Width Half Max yöntemi ile X-Ray sonuçlarından belirlendi. Bu amaçla her bir numune için çekilen X-Ray analizi sonuçlarında 76.23° 'deki tepe noktası dikkate alınarak bakır kaplamaların ortalama tane büyüklüğü tahmin belirlenmiştir.

$$D = \frac{0,94\lambda}{(\beta_D \cos \theta)} \quad (4.1)$$

X-Ray'in dalga boyu (0.1541 nm) olduğunda,

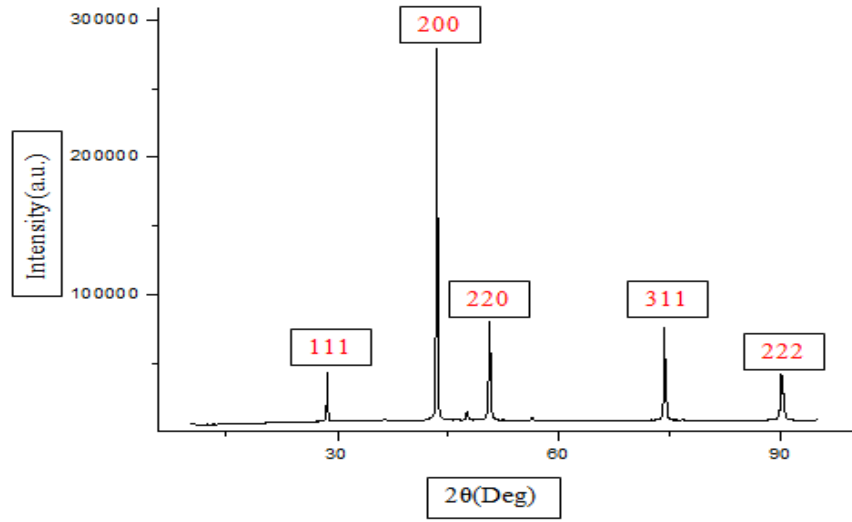
β_D : radyanda yarı maksimum yoğunlukta tepe genişliğidir.

FWHM : yarı maksimumda tam genişlik),

θ : kırınım açısıdır (tepe konumu)

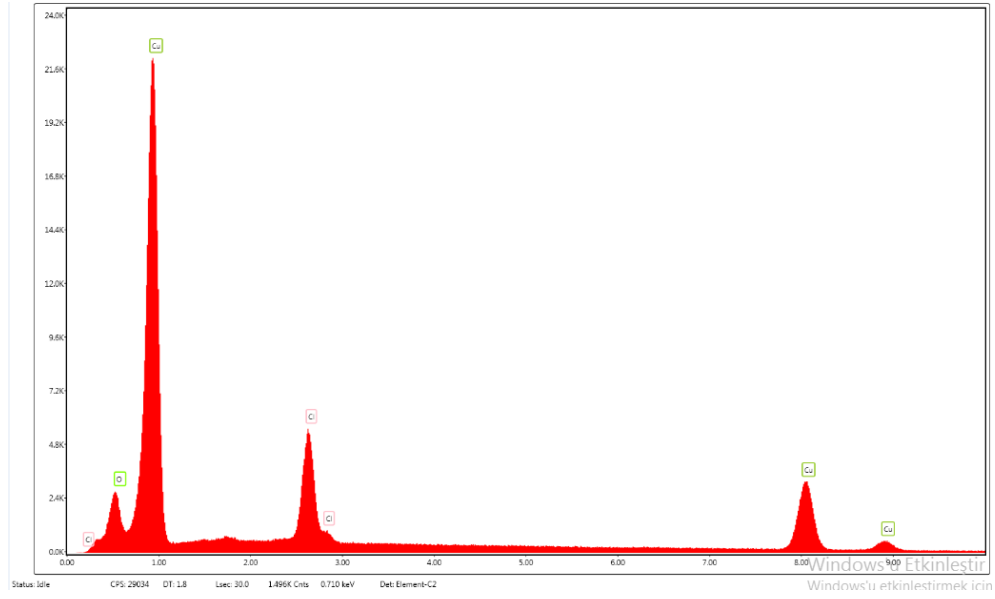
D : parçacıktır nanometre cinsinden ϕ ap büyüklüğü.

Elde edilen ϕ arpan jet kaplamaların X-Ray sonuçlarına göre, tüm kaplamaların 200 yönelmesine göre büyüyen Cu olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.7).



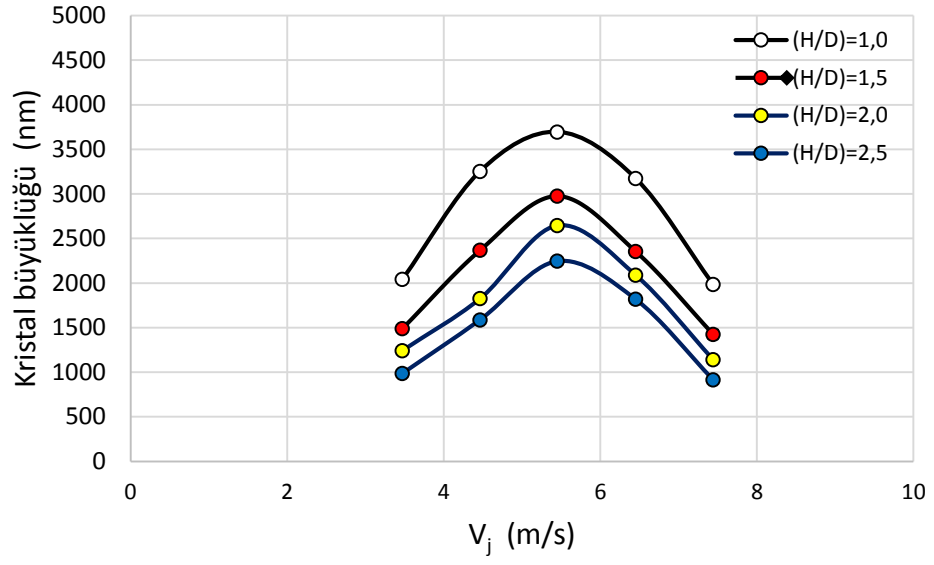
Şekil 4.7. T=20°C’de ki 3,47 (m/s) hıza bağlı (H/d)=1 şartlarında kaplanan numunenin X-Ray grafiği

Şekil 4.8’deki X-ray sonucuna göre, mevcut piklere bakıldığında kaplama malzemesinin Cu olduğunu anlaşılmaktadır. Düşük şiddetli Cl pikleri kaplama üzerinde buharlaşıp çöken elektrolit kalıntısı içindeki HCl artıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. HCl çözeltisi ve H₂SO₄ çözeltisi banyo pH’sını ayarlamakta kullanılmıştır.

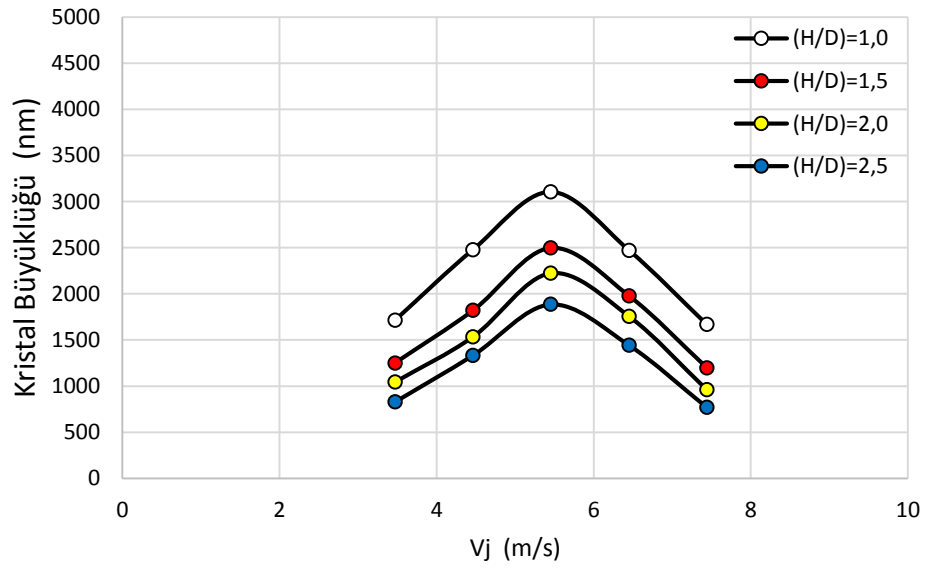


Şekil 4.8. Kaplamaların X-Ray grafiklerinde gözlenen Cu pikleri ve diğer pikler

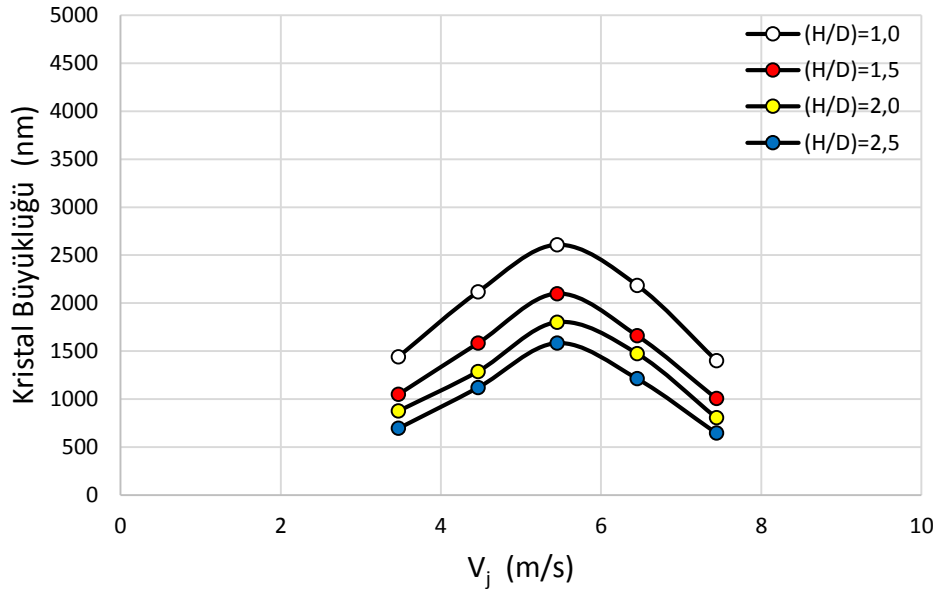
Literatürde tane boyutunun bazı parametrelere bağlı olarak değiştiği bildirilmektedir. Bunlar akım yoğunluğu (i), banyo sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ve kaplama çözeltisine katılan katkı maddelerinin konsantrasyonu (mol/L). Bu çalışmada hiçbir katkı maddesi kullanılmamıştır. Bu tez çalışmasında bakır kaplamaların kristal boyutu katot üzerindeki akım yoğunluğu ve sıcaklığa bağlıdır. V_j 'deki artışa bağlı olarak kristal büyüklüğünün değişimini gösteren Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de jet hızının 5,45 m/s değerine kadar artan jet hızı ile kristal boyutunun arttığı ve bu hız değerinden sonra azaldığı görülmektedir. V_j 'nin 5,45 m/s değerine kadar elektrolit numune yüzeyi ile tam temas etmekte iken 5,45 m/s değerinden sonra katot görevi yapan bakır numune üzerine çarpan sıvı jetin katot yüzeyinden sıçrayarak yüzey ile tam temas etmemesi nedeni ile katottaki akım yoğunluğu azalmıştır. Bu nedenle kristal büyüklüğü de düşmüştür.



Şekil 4.9. $T=20^\circ\text{C}$ 'de ki hıza bağlı kristal büyüklüğü (nm)



Şekil 4.10. $T=30^\circ\text{C}$ 'de ki hıza bağlı kristal büyüklüğü (nm)



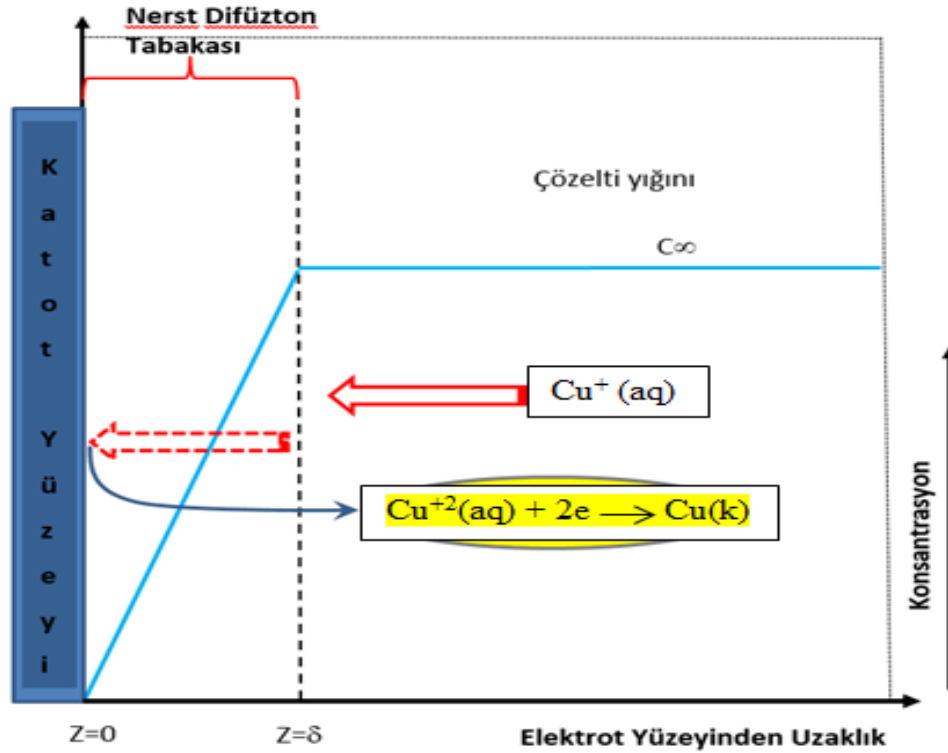
Şekil 4.11. $T=40^{\circ}\text{C}$ 'de ki hıza bağlı kristal büyüklüğü (nm)

Bu tezde difüzyon kontrollü şartların sağlanması ve çarpan jet parametrelerinin elektrolitik kaplama olayındaki etkisinin daha iyi belirlenebilmesi için elektrolit konsantrasyonu $C=0,00025\text{M}$ olarak düşük seçilmiştir.

Elektrolitik kaplama olayı kimyasal reaksiyonlu kütle transferi olayıdır. Çünkü önce katot yüzeyine Nerst Difüzyon tabakası içinden Cu^{+2} iyonları transfer olmakta ve akabinde ise katot yüzeyine ulaşan Cu^{+2} iyonları burada kimyasal reaksiyon vermek suretiyle katot yüzeyine çökmek suretiyle kaplanmaktadır.

Çarpan jetler difüzyon kontrollü sistemlerde kütle transferinin iyileştirilmesini sağlamakta ve konsantrasyon polarizasyonu olayının meydana gelmesini önlemektedir.

Çarpan jetler, çarpma yüzeyi üzerinde meydana gelen Nerst Difüzyon tabakası içinde katot yüzeyinde oluşan Cu çökme reaksiyonunun difüzyon hızından büyük olması nedeni ile oluşacak Cu^{+2} iyonu fakirleşmesinden kaynaklanacak konsantrasyon polarizasyonunu önlemektedir (Şekil 4.12). Bu ise çarpan jetin katot yüzeyinde oluşan sınır tabakayı deforme etmesi veya inceltmesi ile açıklanmıştır.



Şekil 4.12. Katot yüzeyi üzerindeki Cu'ın konsantrasyon polarizasyon grafiği

Fick yasasından yararlanıldığında hem moleküler yayınma, hem de yığın akımı (konveksiyonla) aktarım olduğunda sabit bir noktaya göre A'nın yayınma akısı N_A 'yı veren genel ilişki;

$$N_A = J_A + \frac{CA}{C}(N_A + N_B) \quad (4.2)$$

N_A : A'nın toplam akısı, (kmolA/m²s)

J_A : Difüzyonla yayınma akısı, kmolA/m²s

C_A : A maddesinin molar derişimi, (kmol/m³)

C : Toplam derişim, kmol(A+B)/m³

N_B : B'nin toplam akısı, (kmolB/m²s)

Toplam akıyı veren üstteki eşitlikte ağ taraftaki birinci terim difüzyon etkisini, ikinci terim ise konveksiyon etkisini göstermektedir. Çarpan jetle elektrokimyasal kaplama

yapılan bu sistemde konveksiyon etkisi difüzyon etkisinden büyük çıkmaktadır. Kaplama hızı artırılmak istendiğinde voltaj artırılmakta bu ise konsantrasyon polarizasyonunun oluşmasına ve pürüzlü bir Cu kaplama oluşturmaktadır, yani elektrot yanmaktadır. Bu istenmeyen bir durumdur. Bunun önlenmesi ve konvansiyonel kaplama tekniğinden daha hızlı bir kaplama yapılması ancak konvektif kütle transferi artırma tekniklerinden birisi olan çarpan jetlerin kullanılması ile mümkün olmaktadır.

4.1.3. Kütle transfer katsayılarının belirlenmesi ve parametreler göre değişimi

Konvektif kütle transferi aşağıdaki eşitlikle verilmektedir;

$$N_A = k A \Delta C \quad (4.3)$$

Faraday II.'ye göre, aşağıdaki eşitlik yazılır;

$$\Delta m = \frac{\left(\frac{M_A}{z}\right) I \Delta t}{96500} \quad (4.4)$$

Eşitlik 2 aşağıdaki şekilde düzenlenir,

$$\frac{\Delta m}{M_A} = \frac{I \Delta t}{z \cdot 96500} \quad \text{ve ayrıca}$$

$$\frac{\Delta m}{M_A} = n \quad \text{olduğu dikkate alınır}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\Delta m}{M_A} = \frac{I \Delta t}{z \cdot 96500} \\ \frac{\Delta m}{M_A} = n \end{array} \right\} \quad n = \frac{\Delta m}{M_A} = \frac{I \Delta t}{z \cdot 96500} \quad \text{eşitliği yazılabilir.}$$

Bu eşitlik aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenirse N_A elde edilir;

$$N_A = \frac{n}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t M_A} = \frac{I}{z \cdot 96500} \quad (4.5)$$

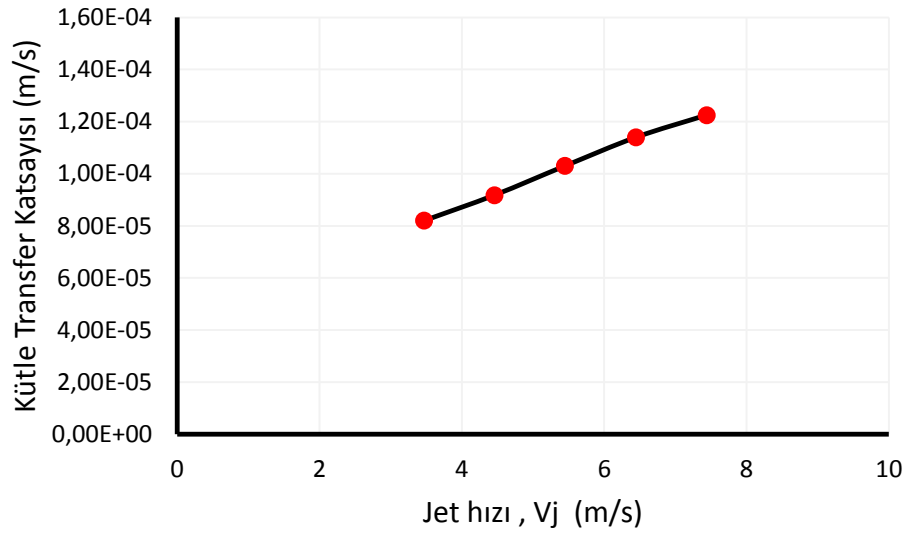
(1) ve (3) eşitlikleri birbirine eşitlenirse, aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$k A \Delta C = \frac{\Delta m}{\Delta t M_A} \quad (4.6)$$

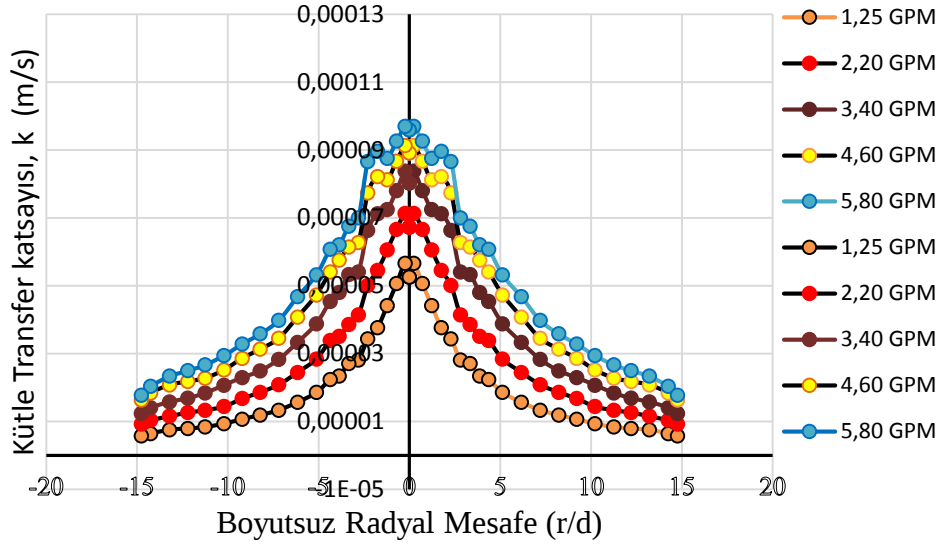
Bu eşitliğe göre Δt sürede yapılan kaplama sonucunda biriken madde (bakır) miktarı ölçülerek kütle transfer katsayısı belirlenebilir;

$$k = \frac{m}{M_A \Delta t A \Delta C} \quad (\text{m/s}) \quad (4.7)$$

Üstte verilen Eşitlik 4.7'e göre kaplanan bakır miktarlarının hassas terazide yapılan ölçümleri dikkate alınarak belirlenen ortalama kütle transfer katsayıları aşağıda şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Mevcut çalışmada hesaplanan ortalama kütle transfer katsayıları



Şekil 4.14. Bir daldırılmış tip çarpan jetin çarpma yüzeyi üzerinde radyal yöndeki ELDCT ile belirlenen kütle transfer katsayısı dağılımı (Arzutug Doktora Tezi)

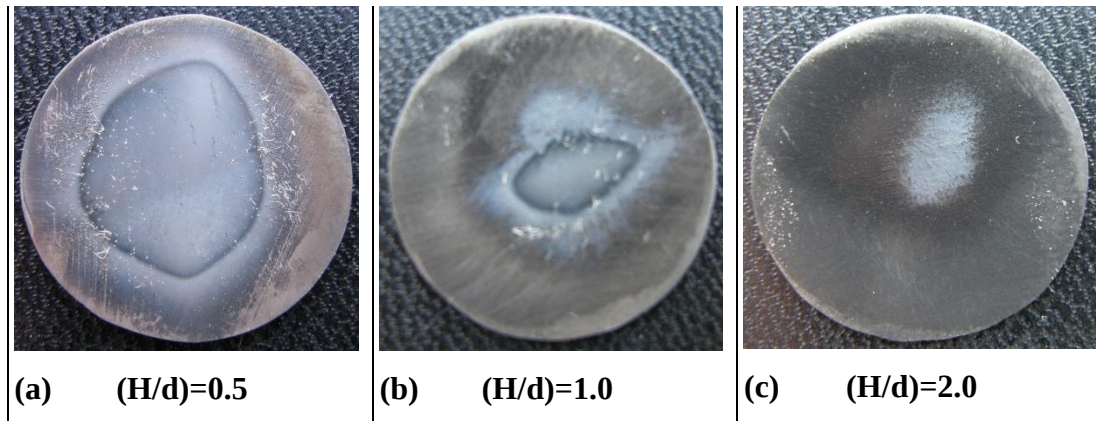
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 dikkate alındığında, çarpan jet tekniği ile üretilen bakır kaplamaların kütle değerleri dikkate alınarak hesaplanan kütle transferi katsayısı değerlerinin, literatürde Arzutug tarafından çarpan jetlerde ELDCT ile belirlenen kütle transferi katsayısı değerleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Mevcut çalışmada 3,5 GPM değerinde ortalama kütle transfer katsayısı $8,2 \cdot 10^{-5}$ m/s değeri bulunmuşken, Arzutug vd. tarafından yapılan çalışmada $(r/D)=0$ 'da 3,40GPM'de okunan lokal kütle transferi katsayısı değeri $8,9 \cdot 10^{-5}$ m/s olarak ölçülmüştür.

Deney sisteminde jet akış sağlamak için kullanılan santrifüj tipi pompanın 10 mm çapında bir nozuldan 3,47 (m/s)'den başlayarak 7,44 (m/s) hıza kadar olan aralıkta çalışması durumunda pompa yüksek sürtünme kuvvetine maruz kalmış ve bu nedenle pompa içinde meydana gelen kavitasyon ile elektrolit sıcaklığı 70 ile 80°C'a kadar tırmanmıştır. Çözelti sıcaklığında istenmeyen bu artışın önüne geçerek istenen sıcaklıklarda çalışması için hücre içindeki serpantinden musluk suyu geçirilmek suretiyle elektrolit sıcaklığı ancak 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklıklarında kararlı halde tutulabilmiş ve bu şartlarda kaplama yapılabilmektedir.

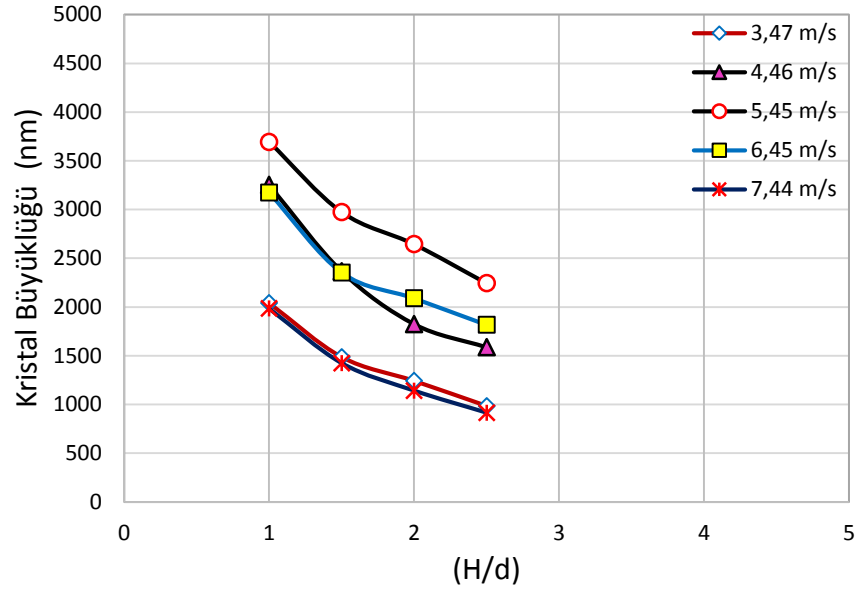
Çarpan jetle kütle aktarımında konvensiyonun katkısı difüzyondan büyük olduğu için kütle transfer katsayıları elde edilmekte böylece elektrokimyasal kaplama hızı artmıştır.

Isı ve kütle transferi bir sistem halinde incelenmiştir. Bu çalışmada ısı transfer için kütle transferi deneyinin uygulanabilirliği araştırılmış, elektrokimyasal kaplama ile elektrik akımının etki sonucu metal yüzey üzerinde bir kaplama üretilmesi için altın, radyum, nikel, kalay, gümüş metal kaplamalarında kullanılır. Elektriksel potansiyel, bir aside edilmiş bakır sülfat çözeltisi içine daldırılmış bakır elektrotlara tatbik edildiği zaman anottan kopan bakır iyonları çözeltiden katoda iletilir. Katotta bir tabaka oluşur ve elektrotlar arasında elektrik akımı ile kütle transferi sağlanmıştır (Ko *et al.* 2005).

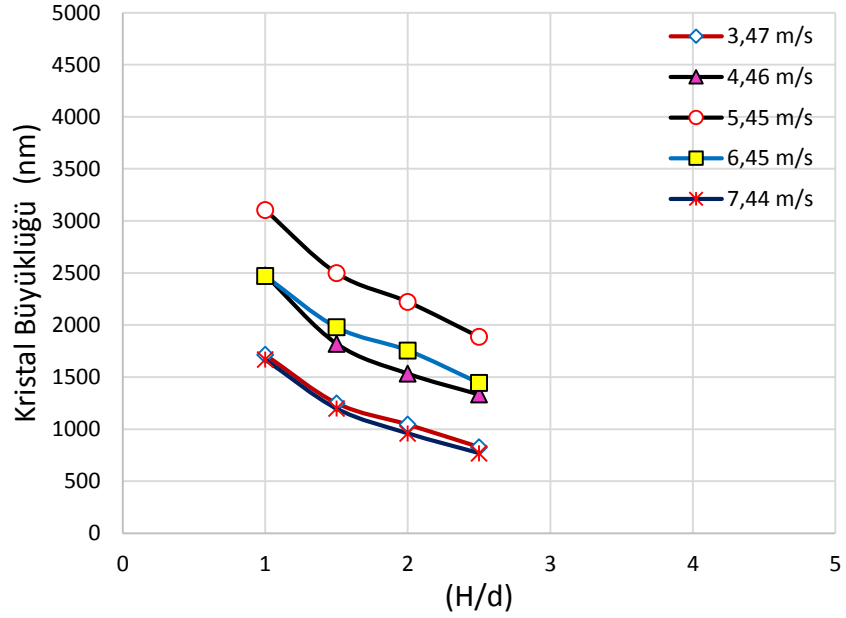
(H/d) parametresine göre kristal büyüklüğünün incelendiği Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16'da (H/d) değerleri 1, 1.5, 2 ve 2.5 değerlerinde seçilmiş olup 1 değerinden 2,5 değerine artırılmasına bağlı olarak kristal büyüklüğünün azaldığı görülmüştür. Bu durum artan (H/d)'ye bağlı olarak katot yüzeyinde akım yoğunluğunun azalmasına atfedilmektedir. Akım yoğunluğundaki azalmaya bağlı olarak ta kristal büyüklüğü azalmıştır. Literatürde (Arzutuğ 2010) çarpan jetle yapılan Ni kaplama çalışmasında (Şekil 4.13) (H/d) arttıkça jetin numune yüzeyindeki çarpma bölgesi azalmıştır ve buna bağlı olarak da geçen akım değerleri azalmaktadır.



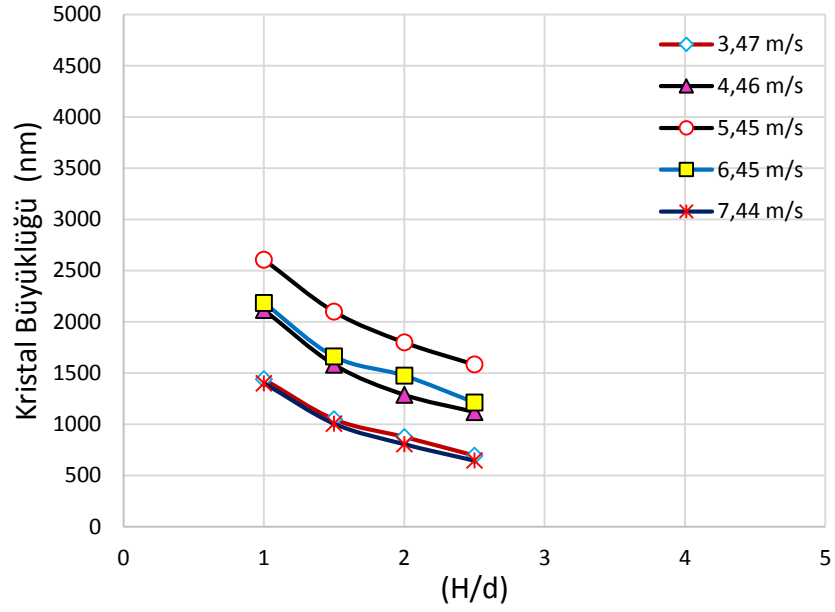
Şekil 4.15. $V_j=4$ m/s'de farklı (H/d) değerlerindeki nikel kaplamaların yüzey fotoğrafları



Şekil 4.16. $T=20^{\circ}\text{C}$ 'de ki (H/d) nozul-jet çarpma yüzeyi mesafesine bağlı kristal büyüklüğü (nm)

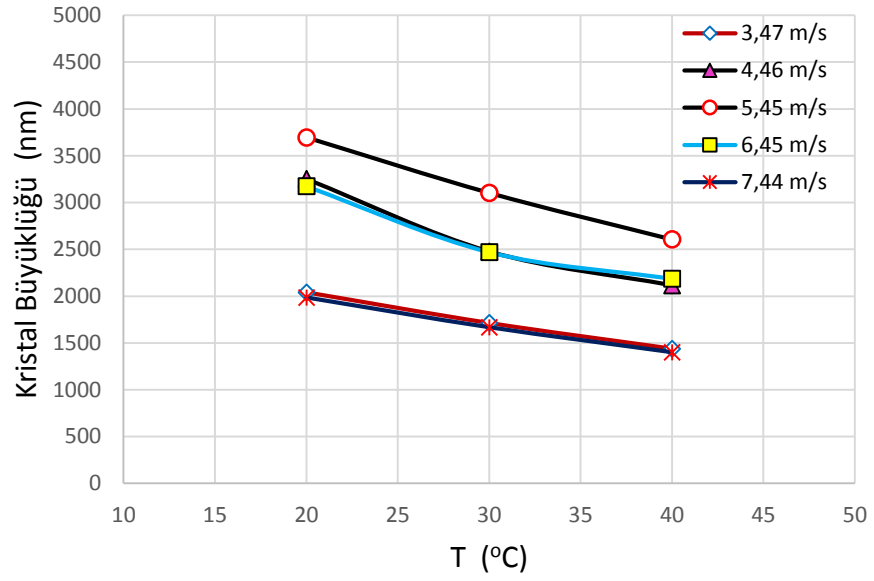


Şekil 4.17. $T=30^{\circ}\text{C}$ 'de ki (H/d) nozul-jet çarpma yüzeyi mesafesine bağlı kristal büyüklüğü (nm)

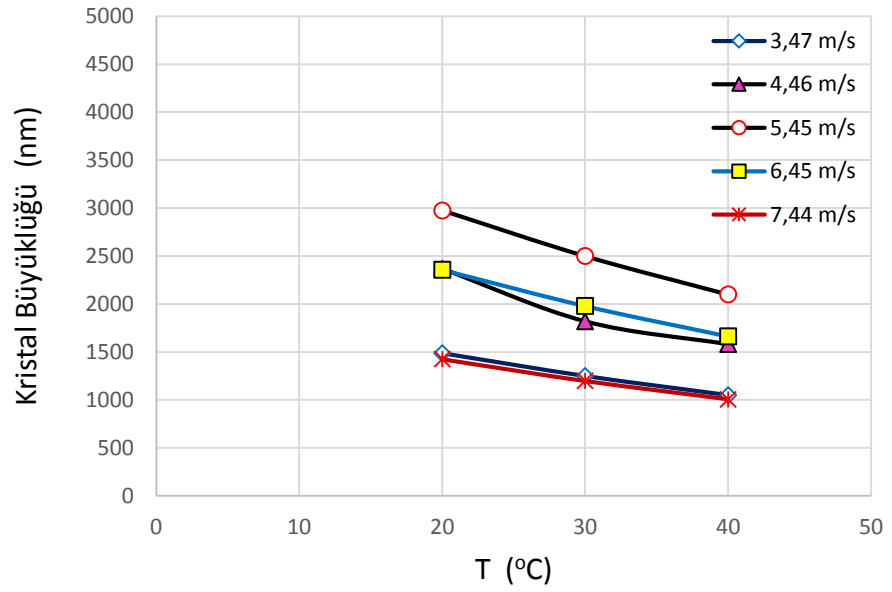


Şekil 4.18. $T=40^{\circ}\text{C}$ 'de ki (H/d) nozul-jet çarpma yüzeyi mesafesine bağlı kristal büyüklüğü (nm)

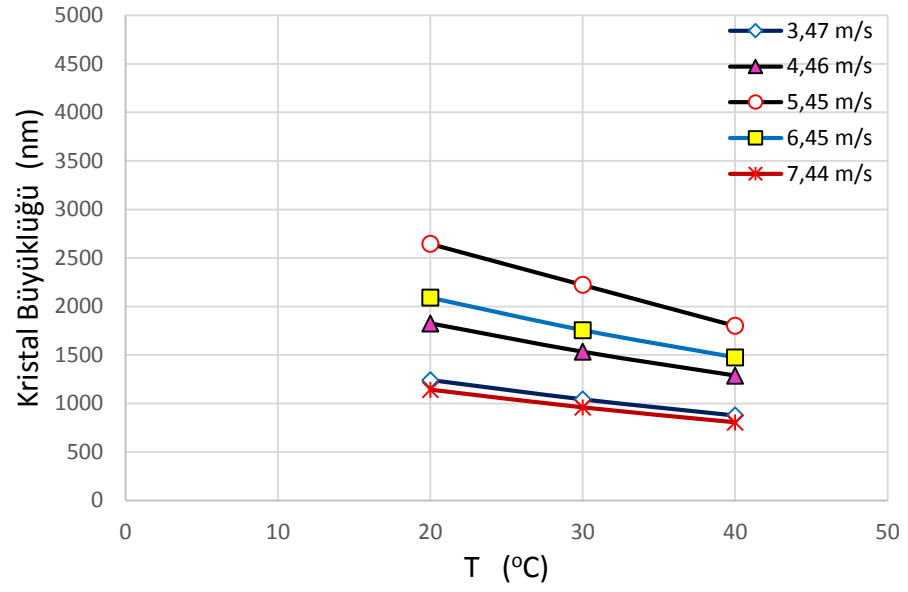
Sıcaklık parametresine göre kristal büyüklüğünün incelendiği Şekil 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20 sıcaklık değerleri 20 , 30 ve 40°C 'de olmak üzere 3 seviye olarak seçilmiş olup 30°C değerinden 40°C değerine artırılmasına bağlı olarak kristal büyüklüğünün azaldığı görülmüştür. Bu durum literatürde (Dini *et al.* 2007) tarafından sıcaklığın artmasıyla kaplamalardaki kristal büyüklüğünün artması şeklinde açıklanmaktadır. Bu tür davranış nanokristal yapısına sahip diğer kaplamalarda da gözlenmiştir.



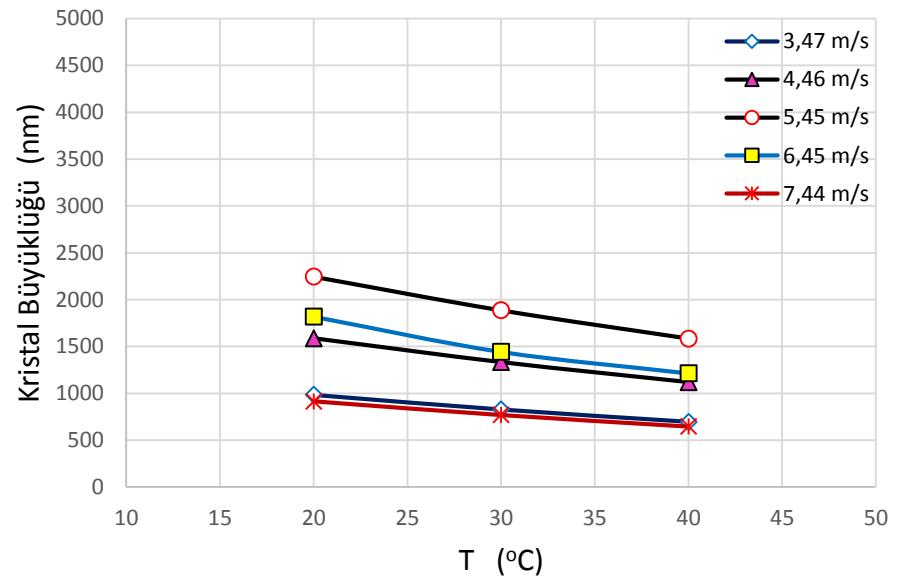
Şekil 4.19. $(H/d)=1$ 'de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü (nm)



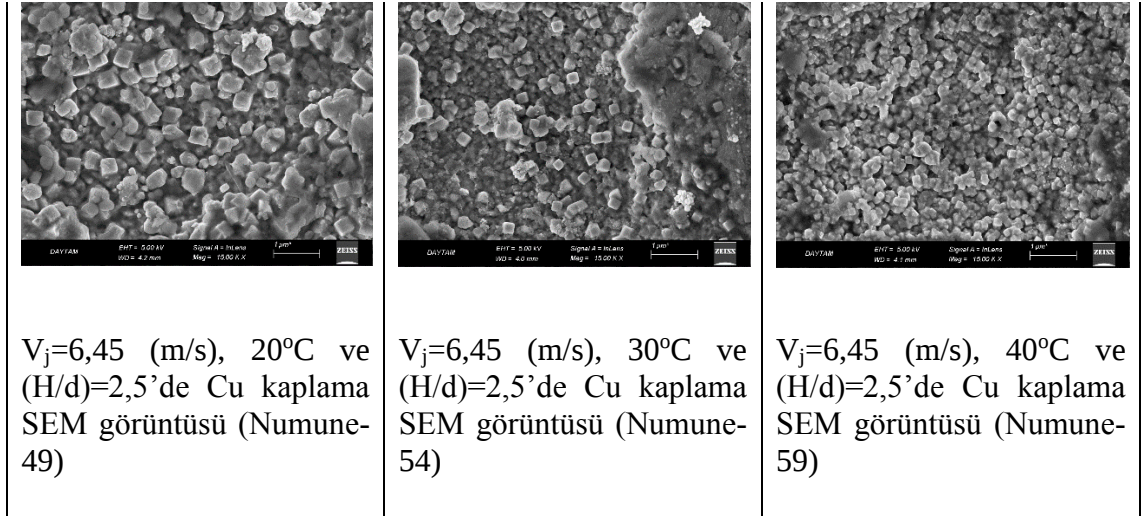
Şekil 4.20. $(H/d)=1,5$ 'de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü (nm)



Şekil 4.21. (H/d)=2’de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü (nm)

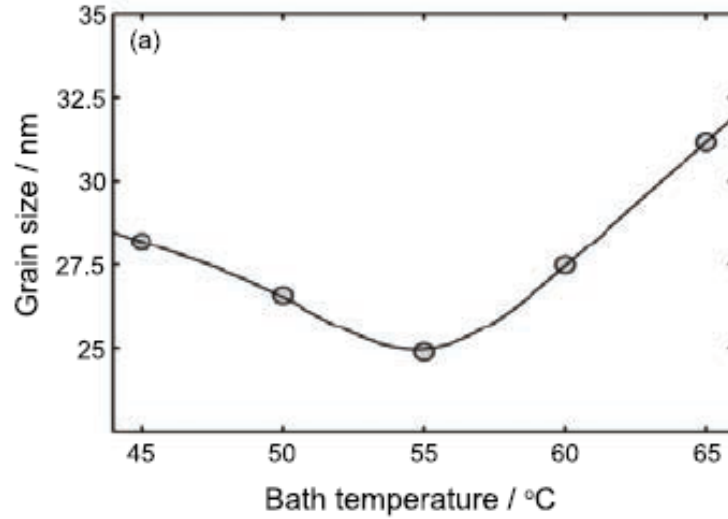


Şekil 4.22. (H/d)=2,5’de sıcaklığa bağlı kristal büyüklüğü (nm)



Şekil 4.23. Bakır kaplamaların farklı sıcaklıklardaki SEM görüntüleri

Rashidi vd tarafından yapılan çalışmada ise 55°C'a kadar artan sıcaklıkla kristal büyüklüğünün azaldığı ve 55°C üzerindeki sıcaklıklarda kristal boyutunun tekrar arttığı gözlenmiştir.



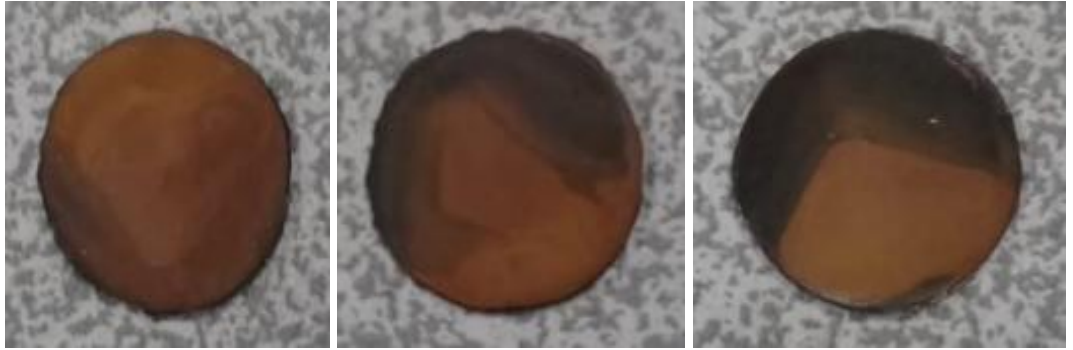
Şekil 4.24. Banyo sıcaklığındaki değişime bağlı olarak kristal büyüklüğünün değişimi (Rashidi *et al.* 2010)

Çekirdek oluşum enerjisinin katodik overpotential'e bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Büyük bir katodik aşırı potansiyel, çekirdek oluşum enerjisini azaltır ve dolayısıyla

çekirdek yoğunluklarını arttırır. Sonuç olarak, katodik aşırı potansiyel artan banyo sıcaklığı ile azaldığı için kaplamaların kristal büyüklüğünün artması beklenir. Bununla birlikte, banyo sıcaklığının arttırılmasının iki çelişkili etkisi olduğu belirtilmelidir: (i) Kristalleşme işleminin termodinamik itici kuvvetindeki bir azalmaya bağlı olarak kritik çekirdek boyutundaki bir artış, bu daha düşük çekirdek yoğunluğuna neden olur ve (ii) daha yüksek çekirdeklenme oranına yol açabilecek kinetik itici kuvvette bir artışa neden olur (Rashidi and Amadeh 2010).

4.1.4. Numune görüntüleri

0.00025M $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi hazırlanıp elde edilen örneklerin kaplama sonrası durumları Şekil 4.23’da ve SEM görüntüleri Ek-1’de görülmektedir;

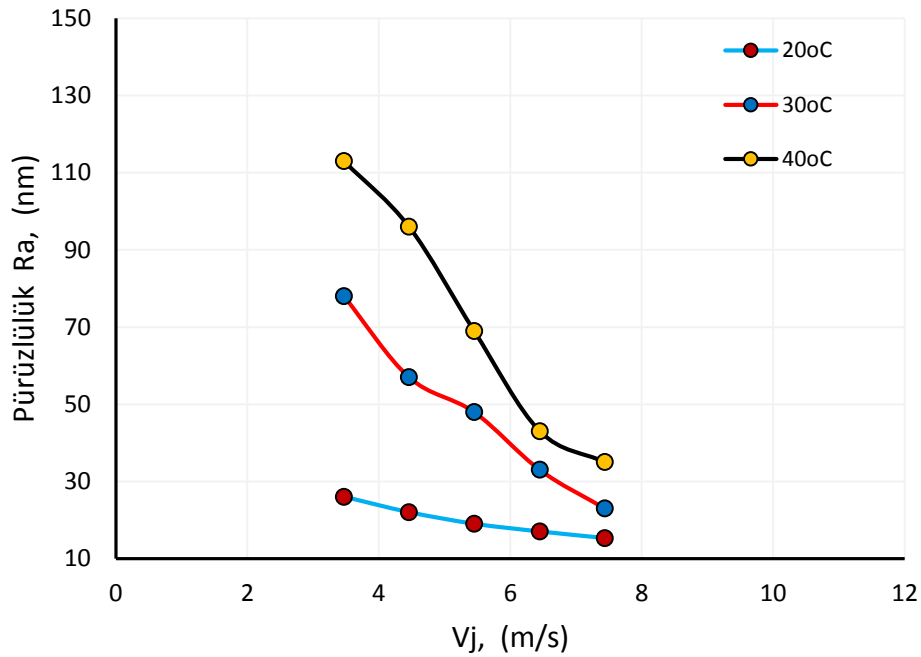


Şekil 4.25. Kaplama sonrası numunelerin görüntüsü

4.1.5. Pürüzlülük

Elektrolitik olarak üretilen bakır kaplamaların, AFM ile elde edilen alan ortalamalı pürüzlülük değerleri aşağıdaki AFM görüntüleri ve analiz sonuçlarında verilmiştir. Tüm kaplama alanını tarayan AFM sonuçları dikkate alınarak V_j , (H/d) ve T parametrelerine göre pürüzlülüklerdeki değişim belirlenmiştir. AFM görüntüleri ve pürüzlülük analizi sonuçları Ek-2’de görülmektedir;

Şekil 4.24'e göre V_j 'deki artışa bağlı olarak çok etkin bir şekilde kaplamaların pürüzlülükleri azalmıştır. Bu durum V_j ve (H/d) 'nin akım yoğunluğu değerlerini etkilemesine atfedilmektedir. Çünkü akım yoğunluğunun gittikçe artması elektrolitik kaplama aşırı potansiyelini artırmaktadır. Bu durum ise küçük taneli kristal yapıların oluşumunu tetiklemektedir. Bu nedenle V_j 'nin artmasına bağlı olarak akım yoğunluğunun artması ile bakır kaplamaların yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Diğer taraftan akım yoğunluğunun sürekli artırılması sınırlayıcı akım değerinin aşılmasına neden olur. Bu durumda konsantrasyon polarizasyonu olayı meydana gelerek katot yüzeyinden H_2 gazı çıkışı olur. Bu durumda katot yüzeyinde daha siyah renkte, aşırı pürüzlü CuO birikimi meydana gelir (Wei *et al.* 2007).



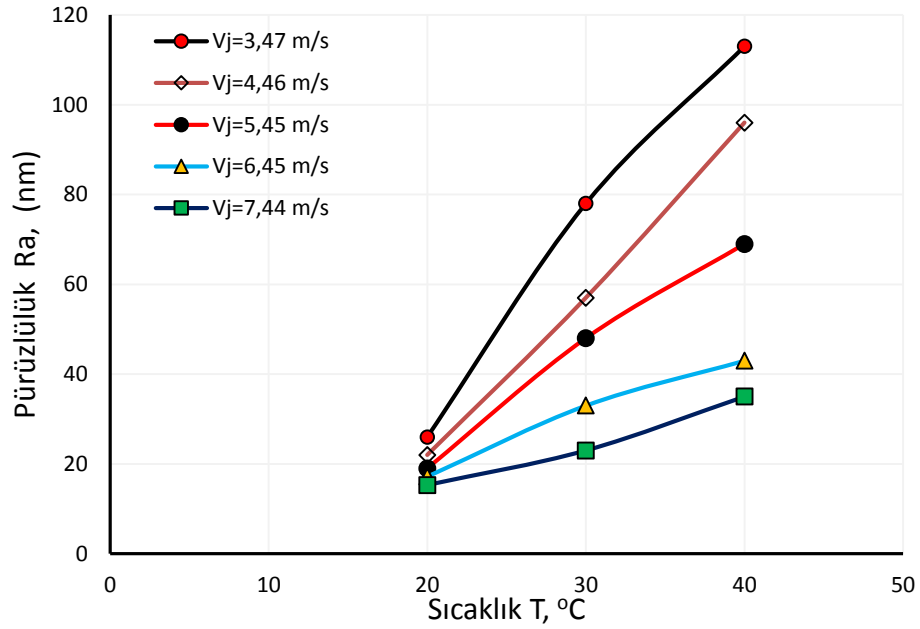
Şekil 4.26. $(H/d)=1,0$ 'de farklı sıcaklıklarda jet hızına (V_j) göre pürüzlülüğün değişimi.

Sıcaklığın iki zıt etkisi vardır. Bir taraftan difüzyonu artırdığından küçük taneli yapıların hızı artar. Yani sıcaklığın artması elektrolit içinde Cu^{+2} iyonlarının difüzyon hızını artırmakta ve buna bağlı olarak katot yüzeyinde Cu^{+2} iyonları daha hızlı birikimine sebep olmaktadır. Fakat öte yandan katot polarizasyonunu azaltması nedeni ile büyük taneli

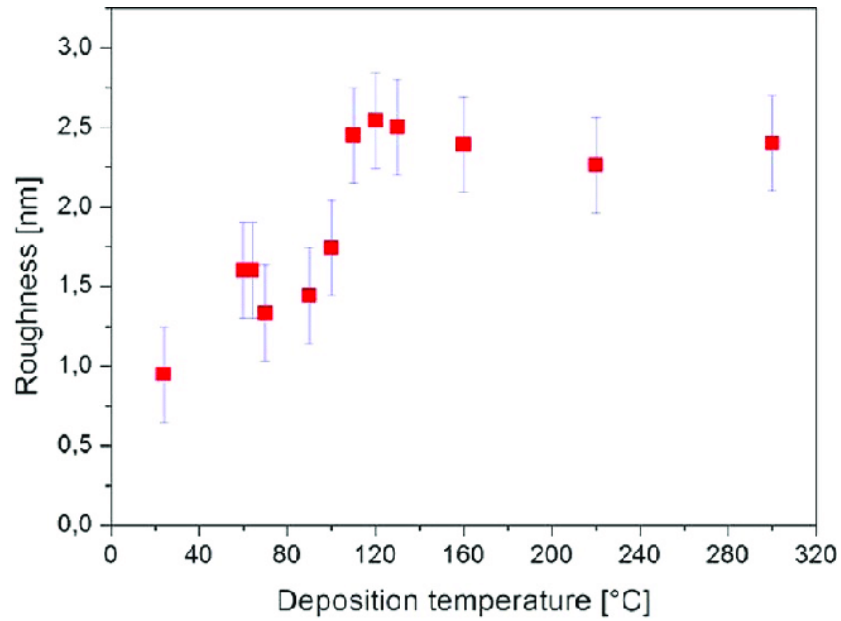
yapıların oluşmasına neden olur. Böylece kaplama süngerimsi yapıda olur. Orta sıcaklıklarda birinci etki, yüksek sıcaklıklarda ikinci etki kendini gösterir.

Sıcaklık parametresine göre pürüzlülüğün verildiği Şekil 4.25’de en yüksek pürüzlülük değerlerinin her jet hızında 40°C’de olduğu görülmektedir.

Şekil 4.26’de Siniscalco vd. tarafından yapılan altın kaplamalarda da artan sıcaklığa bağlı olarak pürüzlülükte de artış gözlenmiştir.



Şekil 4.27. (H/d)=1,0’de farklı V_j değerlerinde sıcaklığa bağlı olarak (R_a değerlerine göre) pürüzlülüğün değişimi



Şekil 4.28. Farklı kaplama sıcaklıklarında $2 \times 2 \mu\text{m}$ AFM görüntülerinde hesaplanan Ra değerlerine göre pürüzlülükler (Siniscalco *et al.* 2013)

4.2. (H/d)'nin Kaplama Üzerindeki Etkisi

Yüzeye daha yakın olan anot daha yüksek akım yoğunluğu üretir. Yani çarpma bölgesinde anot yüzeye (katot) a ne kadar yaklaştırılırsa o kadar daha yüksek akım yoğunluğu oluşur. Benzer olarak anot yüzeyden uzaklaştıkça akım yoğunluğu azalır.

Uygulanan boyutsuz akım yoğununun etkisi jet kaplamada lokal katot akım yoğunluğu durgunluk noktasında maksimumdur ve kaplamanın merkezinden radyal yönde artan mesafe ile azalır. Boyutsuz akım yoğunluğunun, (H/d)'nin farklı değerleri dikkate alındığında çarpma yüzeyinde merkezden aynı, H/d mesafede de kaplama kalınlığı artan akım yoğunluğuna bağlı olarak azalmıştır.

Kütle transfer hızları, artan (H/d)'ye bağlı olarak belli bir değere kadar artar ve maksimuma ulaşır. Daha sonra artan püskürtme hızına bağlı olarak (H/d) arttıkça azalır (Şara vd 2007) ki buna bağlı olarak kaplama kalınlığında azalma olmaktadır.

4.3. Sıcaklığın Kaplama Üzerine Etkisi

Sıcaklığın kaplama proseslerinde her zaman kontrol edilmesi istenir. Çünkü bunlar kaplama çözeltisinin özelliklerini ve kaplama miktarını değiştirir. Yüksek sıcaklıkta genellikle akım yoğunluğundaki artışa neden olur. Buda her zaman katodik polarizasyonu azaltmaz, çözeltinin karışmasında katot üzerinde biriken maddenin büyük yapıda olmasına neden olur ve ayrı zamanda yüksek akım geçmesine neden olur. Banyo sıcaklığının kaplama üzerinde iki şekilde etkisi vardır. İlk etki olan sıcaklığın düşük olması durumunda, kaplama sert ve kırılgan bir özellik göstermekteyken ikinci etki durumunda ise yüksek sıcaklıklar metal tuzu konsantrasyonunu artırır ki bu durum ilk durumun aksine istenilen bir olaydır. Çünkü metal tuzu konsantrasyonu arttıkça kaplamanın kırılganlığı azalır ve kaplama açısından daha iyi sonuçlar elde edilir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada çizilen çerçevede elde edilen deneysel bulgularda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- 1- Çarpan jet kullanılan durumlarda düşük akım yoğunluğunda bile yüksek kaplama hızları elde edilmektedir.
- 2- Çarpan jet tekniği kullanılarak yapılan kaplama, konvansiyonel bakır kaplama tekniğinden 10 kat daha hızlı kaplama üretilmiştir.
- 3- Çarpan jetler konvektif kütle ve ısı artırma tekniklerinden birisi olup, elektrokimyasal kaplama prosesinde, çarpma bölgesinde konsantrasyon sınır tabakasını deforme ederek (Nerst Difüzyon Tabakasının inceltmek) iyon geçiş yolu kısaltması ve böylece kütle transferi direncini düşürmesi nedeni ile kaplama prosesinin hızı artmış olur. Bu nedenle kaplama hızının yüksek olması, biriktirilecek malzemenin yüksek hızda elde edilmesi istenen proseslerde çarpan jet tekniği ile elektrokimyasal kaplama yapılması oldukça avantajlıdır.
- 4- Sıvı azot içinde soğutularak kırılan numunelerin en kesit SEM analizlerinden elde edilen kalınlık değerlerinin jet hızındaki (V_j) artışa paralel olarak arttığı belirlenmiştir. Bu artış, sabit voltaj şartlarında (3,5V) yapılan deneylerde jet nozul hızındaki artışa paralel olarak sınırlayıcı akım yoğunluğu değerlerindeki artışla açıklanmaktadır.
- 5- (X-Ray) sonuçlarına göre bakır kaplamaların kristal büyümesinin katot üzerindeki akım yoğunluğu ve sıcaklığa bağlı olduğu görülmüş. V_j 'deki artışa bağlı olarak kristal büyüklüğünün jet hızının 5,45 m/s değerine kadar artan jet hızı ile arttığı ve bu hız değerinden sonra azaldığı görülmektedir. V_j 'nin 5,45 m/s değerine kadar elektrolit numune yüzeyi ile tam temas etmekte iken 5,45 m/s değerinden sonra katot görevi yapan bakır numune üzerine çarpan sıvı jetin katot yüzeyinden sıçrayarak yüzey ile tam temas etmemesi nedeni ile katottaki akım yoğunluğu azalmıştır. Bu nedenle kristal büyüklüğü de azalmıştır.
- 6- (H/d)'nin 1 değerinden 2,5 değerine artırılmasına bağlı olarak kristal büyüklüğünün azaldığı görülmüştür. Bu durum artan (H/d)'ye bağlı olarak katot yüzeyinde akım yoğunluğunun azalmasına atfedilmektedir.

7- 20°C, 30°C ve 40°C olarak seçilen sıcaklık parametresine göre kristal büyüklüğünü incelendiğinde, sıcaklık değerleri 30°C değerinden 40°C değerine artırılmasına bağlı olarak kristal büyüklüğünün azaldığı görülmüştür. Bu durum sıcaklığın artmasıyla kaplamalardaki kristal büyüklüğünün artması şeklinde açıklanmaktadır.

8- V_j 'deki artışa bağlı olarak çok etkin bir şekilde kaplamaların pürüzlülükleri azalmıştır. Bu durum V_j ve (H/d) 'nin akım yoğunluğu değerlerini etkilemesine atfedilmektedir. Çünkü akım yoğunluğunun gittikçe artması elektrolitik kaplama aşırı potansiyelini artırmaktadır. Bu durum ise küçük taneli kristal yapıların oluşumunu tetiklemektedir. Bu nedenle V_j 'nin artmasına bağlı olarak akım yoğunluğunun artması ile bakır kaplamaların yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Diğer taraftan akım yoğunluğunun sürekli artırılması sınırlayıcı akım değerinin aşılmasına neden olur. Bu durumda konsantrasyon polarizasyonu olayı meydana gelerek katot yüzeyinden H_2 gazı çıkışı olur. Sınırlayıcı akım aşıldıktan sonra ise kaplama yüzeyinde oluşan gözenekli CuO nedeni ile kaplamalar oldukça pürüzlü hale gelmektedir.

9- Kütle transfer katsayılarının artan V_j 'ye bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Bu durumun V_j 'deki artışa bağlı olarak sınırlayıcı akım yoğunluğundaki artıştan kaynaklandığı belirlenmiştir.

10- Çarpan jet kullanılmasının jet kalınlığı ve pürüzlülüğünü değiştirmesi nedeni ile jet hidrodinamiği ve sıcaklık parametrelerinin optimizasyonu ile istenen yüzey özelliklerine sahip kaplamalar elde edilebilir.

11- Çarpan jet elektrokimyasal kaplama prosesi ile kaplamak istediğimiz alt malzemeyi hem korozyona karşı korumuş olmamızın yanısıra jet kullanarak yapılan bir kaplama tek noktada etkili olduğunda noktasal veya lokal kaplama arzu edilen proseslerde bu tekniğin kullanımı konvansiyonel kaplamaya kıyasla çok daha etkili ve zaman açısından daha avantajlıdır.

12- Çarpan jet içinde nanotoz kullanılması durumunda elektrokimyasal olarak üretilen kompozit kaplamaların, konvansiyonel kaplama ile üretilen film kaplamalara göre azalan tanecik gelişimi, sürtünmeyi azalttığı ve daha yüksek akış gerilimi meydana getirdiği bilinmektedir. Nano tozla, yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısısal kararlılık ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri yanında düşük maliyetlerle üretilmektedir. Bu çalışmaya paralel olarak aynı sistemle kompozit malzeme üretilmesi mümkündür. Literatürde çarpan jet tekniği ile üretilen nanotoz içeren kompozitlerin içindeki nanotoz

bileşiminin Vj'nin artırılması ile sağlandığı bildirilmektedir. Bu nedenle istenen farklı özelliklerde kompozit üretilmesi için mevcut kaplama sisteminin daha fazla araştırılmaya açık olması, konunun araştırmacılar arasında cazip kalacağını göstermektedir.

ÇJS prosesi, artan Ar-Ge yatırım ve geliştirme faaliyetleriyle birlikte özellikle havacılık ve savunma sanayine yönelik olarak birçok parçanın kaplama ve tamir teknolojilerinde kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi parça hasarına sebebiyet veren ana faktörlerin çözümünde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu sebeplerden dolayı ÇJS tekniği ile üretilen kaplamalar, araştırmacı ve endüstriyel kullanıcılar için günden güne ilgi odağı oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdolahı, A., 2010. High Speed Electroplating of Nickel Over Stainles Steel. (Y.Lisans Tezi), Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.
- Alkire, R.C. and Chen, T.J., 1982. High-Speed Selective Electroplating with Single Circular Jets. *Journal of the Electrochemical Society*, 129 (11), 2424-2432.
- Altuncu, E. ve Üstel, F., 2010. Soğuk Sprey (Cold Spray) Teknolojisi ve Uygulama Alanları, <https://www.metalurji.org.tr> (06.08.2019).
- Anonim, 2010. Malzeme Bilgisi, <https://www.malzemebilgisi.blogspot.com> (02.02.2017).
- Anonim, 2007. Elektrolitik Kaplama, <https://www.1bilgi.com/kimya/6885/elektrolitik-kaplama.html> (06.11.2015).
- Arzutuğ, M.E. ve Ezirmik K.V., 2009. Çarpan Jet Tekniği Kullanılarak Kompozit Filmlerin Elektrolitik Olarak Kaplanması. Atatürk Üniversitesi, Kimya Müh. Böl., Erzurum.
- Berk, V., 2010. Yüzey İşlem Teknolojileri, <https://www.doczz.biz.tr> (26.05.2015).
- George, R.L., 1980. Impinging Jets. *Thermopedia*, 20, Denver Colorado, United States Of America.
- Hasçalık, A. ve Özek, C., 2002. Elektroliz Yöntemiyle Çinko Kaplama Parametrelerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, Elazığ.
- Igorevich, Y.Y., 2012. Electrodeposition. How Additives Affect Cu Electrodeposition: an Electrochemical STM Study. Leiden University, <http://hdl.handle.net/1887/20221> (04.12.2012).
- Ko, S.H., Moon, D.W. and Chung, B.J., 2005. Applications Of Electroplating Method For Heat Transfer Studies Using Analogy Concept. *International Atomic Energy Agency*, 38 (3), 251-258.
- Karakus, C. and Chin, D.T., 1994. Metal Distribution in Jet Plating. *Journal of the Electrochemical Society*, 141 (3), 691-697.
- Karaoğlanlı, A.C., Türk, A. ve Ustel, F., 2013. Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Teknolojisi ve Uygulamaları. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 20-27.
- Katti, K. and Prabhu, S.V., 2006. Experimental study and theoretical analysis of local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet from a circular straight pipe nozzle. *Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, Powai, Mumbai 400 076, India* 51 (1), 4480-4495.
- Kim, M.S. and Kim, C.K., 2005. Nickel Electroplating on Copper Substrate in Plating Solution Containing High-Density CO₂. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 11 (6), 876-882.
- Li, Q. and Walker J. D. A., 1996. Prediction of Electrodeposition Rates from an Impinging Jet. *American Institute of Chemical Engineers*, 42 (2), 391-404.
- Mallory, G.O., 1985. The Electroless Nickel Plating Bath: Effect of Variables on the Process. 72 (8), 58-99.

- Malyshev, E., Landau, U. and Chivilikhin, S., 2003. Modeling The Deposit Thickness Distribution in Copper Electroplating of Semiconductor Wafer Interconnects. Prepared for Presentation at the Metallization Symposium, AIChE Annual Meeting, (17.11.2003).
- Osborne, K. and Packer, J., 2015. Electroplating. New Zealand Institute of Chemistry, <http://fliphtml5.com/xgnp/leng/basic> (21.04.2015).
- Osborne, S.J., Sweet, W.S., Vecchio, K.S. and Talbot J.B., 2007. Electroplating of Copper–Alumina Nanocomposite Films with an Impinging Jet Electrode. *Journal of the Electrochemical Society*, 154 (8), 394-399.
- Panikkar, S.K. and Char T.L.R., 1959. Electroplating of Nickel from the Pyrophosphate Bath. *Journal of the Electrochemical Society*, 106 (6), 494-499.
- Paunovic, M., Schlesinger, M. and Snyder, D.D. 2010. Fundamental Considerations. Cranbrook Institute Of Science, Modern Electroplating, Fifth Edition, pp.1 – 32.
- Rashidi, A.M. and Amadeh A., 2009. Effect of Electroplating Parameters on Microstructure of Nanocrystalline Nickel Coatings. *Journal of Materials Science & Technology*, 26 (1), 82-86.
- Sirajuddin, S. and Talbot, J.B., 2011. The Effect of Nanoparticles on Mass Transfer for an Impinging Jet Electrode. *Journal of The Electrochemical Society*, 158 (9), 557-560.
- Şara, O.N., Erkmén, J., Yapıcı, S. and Çopur, M., 2007. Electrochemical Mass Transfer Between an Impinging Jet and a Rotating Disk in a Confined System. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35 (2008), 289-298.
- Şimşek, M., 2014. Mikro Ark Oksidasyon İle Al₂O₃ Kaplanmış AA7075 Alaşımının Kuru ve Yağlı Şartlarda Sürtünme ve Aşınma Davranışının İncelenmesi (Doktora Tezi), T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Tekin, K.C. ve Çakmak, E., 2008. Plazma elektrolitik Oksitlenme Yöntemiyle Hafif Metallerin Kaplanması, <https://www.mmo.org.tr/sites> (30.06.2018).
- Yapıcı, S., Kuşlu, S., Ozmetin, C., Ersahan, H. and Pekdemir T., 1998. Surface Shear Stress for a Submerged Jet Impingement Using Electrochemical Technique. *Journal Of Applied Electrochemistry*, 29, 185-190.
- Yeşildal, R. ve Günay, Y.Z., 2007. Plazma Sprey Yöntemi ile Kaplama ve Sprey Karakteristiklerinin İncelenmesi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (1), 59-76.
- Zahran, R.R. and Sedahmed, G.H., 2006. Mass-Transfer-Controlled Impingement Corrosion at the Jet Inlet Zone of an Annulus under Turbulent Flow. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 1160-1166.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Erzincan’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimimi Erzincan’da tamamladı. 2006 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi’nden 2010 yılında Kimya Mühendisi unvanıyla mezun oldu. 2011 yılında Ankara’da askerlik görevimi yaptı. 2011 de aynı yıl Atatürk Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Temel İşlemler ve Termodinamik ana bilim dalında yüksek lisans eğitime başladı. 2016 yılında girdiği Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi’nden 2019 yılında İnşaat Mühendisi unvanıyla mezun oldu. Evli ve Erzincan’da özel bir şirkette iş güvenliği uzmanı olarak hayatına devam etmektedir.