İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BAKIR ALAŞIMLARI ESASLI ANTİ-BAKTERİYEL YÜZEY KAPLAMALARININ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Sami Arda KOCAMAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

MART 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BAKIR ALAŞIMLARI ESASLI ANTİ-BAKTERİYEL YÜZEY KAPLAMALARININ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

DOKTORA TEZİ

Sami Arda KOCAMAN
(506102415)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özgül KELEŞ

MART 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 506102415 numaralı Doktora Öğrencisi Sami Arda KOCAMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "BAKIR ALAŞIMLARI ESASLI ANTİ-BAKTERİYEL YÜZEY KAPLAMALARININ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Özgül KELEŞ ……
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hatem AKBULUT ……
Sakarya Üniversitesi

Prof. Dr. Metin USTA ……
Gebze Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muhammet Kürşat KAZMANLI ……
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sabahattin GÜRMEN ……
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 09 Şubat 2022
Savunma Tarihi : 11 Mart 2022

imkansızlıklar içinde kendi imkanlarını yaratan herkese ithaf edilmiştir

ÖNSÖZ

Yıllar önce, Kanada'da birlikte çalıştığım araştırma grubunun, saf bakır üzerinde genel geçer bakteriler ile yaptığı çalışmalardan ilham alarak, daha geniş alaşım yelpazesinde, daha fazla bakteri çeşidi ile ilerlediğim bu çalışmam boyunca, hastane enfeksiyonlarının ne kadar sinsi bir problem olduğunu çevreme sürekli aktardım. 2000-2010 yılları arasında, kaba tabir ile "kirlilik" ile "hijyen" ideal dengede idi. Hayatın içinde zararlı bakteri ile virüsler muhatap olmamız gerektiği oranda vardı ve kritik olanlar için de aşıları mevcuttu. Sürekli vakit geçirdiğimiz alanlarda temizleme ajanları ile kontrol altında tutabildiğimiz bir hijyen elde edilebiliyordu. 2010'lu yılların sonuna doğru fark edilir seviyede, antibiyotik ve temizleme ajanlarına karşı direnç kazanan bakteriler ağırlık göstermeye başlamış, daha fazla hijyen beklentisi sonucu da daha zayıf bünyelere sahip nesiller yetişmeye başlamıştır. Bu tezin sunulduğu an itibari ile içinde bulunulan yüzyılın en yaygın pandemisini, Covid-19'u yaşamaktayız. Pandemi ile, hijyenin hayatımızdaki önemi artmış ve bu bazı insanlarda takıntı seviyesinde hastalık haline dahi gelmiştir. Özellikle vurgulanmalıdır ki insanlar korkutularak da hijyen ekonomisi sentetik olarak büyütülmüştür. Belirli önlemlerin kati şekilde alınması gerekir iken insanlar, korku ile farklı istikamette de yönlendirilmiştir. Eğer hijyen gereksinimini kontrol etmez isek, diğer bir deyişle antibiyotikleri, öldürücü ajanları ve benzeri araçlarımızı olması gerektiği ölçüde sadece olması gereken yerlerde ve anlarda kullanmaz isek yaşanılmaz bir dünyayı kendi elimiz ile yaratıyor olacağız. Bu sebeple, bu çalışmada kullanılan alaşımlar ve çıktılar özellikle sadece enfeksiyon ile mücadele edilen hastane ve türevi alanları hedeflemektedir. Ek olarak, tezin kapsamında, zaman içerisinde direnç kazanmış bakteriler olan süper-bakteriler de ele alınmıştır ve bakırın kalıcı, etkin bir çözüm olduğu pekiştirilmektedir.

Çalışmam boyunca desteğini eksik etmeyen sevgili aileme ve değerli danışman hocam Prof. Dr. Özgül KELEŞ'e minnetlerimi sunarım. Tezin laboratuvar çalışmalarında eşlik eden arkadaşım Dr. Can AKYIL'a sevgilerimi aktarırım. Bu çalışma; İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimince (Proje numarası: 38367) desteklenmiştir.

Şubat 2022

Sami Arda KOCAMAN

(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Termal Sprey Kaplama Teknolojisi 3
1.2 Antibakteriyel Bakır 13
1.3 Toksisite 18
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE YÖNTEMLER **19**
2.1 Modelleme Çalışmaları 20
2.1.1 Akış alanı simülasyonu ve taşıyıcı denklemler 21
2.1.2 Parçacık yörüngesi üzerinde sıcaklık ve hız hesaplamaları 24
2.1.3 Damlacık sıvanma ve soğuma hesaplamaları 26
2.2 Kaplama Çalışmaları 33
2.2.1 Parçacık ortalama sıcaklık ve hız ölçümü 34
2.2.2 Kaplama parametreleri 36
2.3 Antibakteriyel Etkinlik Testleri 37
2.3.1 Antibakteriyel test prosedürü 37
3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME **39**
3.1 Hesaplamalı Model Sonuçları 40
3.2 Kaplama özellikleri 48
3.3 Anti-bakteriyel Etkinlik 59
3.3.1 Yüzey pürüzlülüğü ve anti-bakteriyel etkinlik 59
3.3.2 Alaşımların antibakteriyel etkinliği 61
3.4 Teknolojik hazırlık seviyesinin THS7 seviyesine çıkarılması 63
4. SONUÇLAR **69**
KAYNAKÇA **71**
EKLER **83**
ÖZGEÇMİŞ **95**

KISALTMALAR

CFU	: Koloni Oluşturan Birim
CVD	**:** Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition)
Cu	: Bakır
Cu-Al	: Alümiyum Bronzu
Cu-Sn	: Bronz
Cu-Zn	: Pirinç
C-D	**:** Yakınsak – Iraksak (Convergent – Divergent)
DC	**:** Doğru Akım (Direct Current)
E. Coli	: Koli Basili (Eşerihiya koli)
HVOF	**:** Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme (High velocity oxy-fuel)
LTE	**:** Yerel Termodinamik Denge (Local Thermodynamical Equilibrium)
MRSA	: Metisilin Dirençli Stafilokok Aureus
NiCuZn	: Nikel-Gümüş
PsA	: Pseudomonas Aeruginosa
PVD	**:** Plazma Buhar Biriktirme (Plasma Vapor Deposition)
RF	**:** Radyo Frekansı
S. Aureus	: Stafilokok Aureus
VRE	: Vankomisine Dirençli Enterokok

SEMBOLLER

A manyetik vektör potansiyeli
A_p parçacık yüzey alanı
α_m karışım kütle fraksiyonu
C_D sürüklenme katsayısı
C_L gizli ısı dağılımı
C_{ap} görünen ısı kapasitesi
$C_{p,n}$ n'inci faz için ısı kapasitesi
C_p akışkan için özgül ısı kapasitesi
C_{par} parçacık için özgül ısı kapasitesi
C_{pp} faz dönüşümü dahil eşlenik ısı kapasitesi
d_p parçacık çapı
e temel elektrik şarjı
E elektrik alan
ε faz ara yüz kalınlığına ölçekli kapiler genişlik
F_d sürüklenme kuvveti
F_s yüzey gerilimi kaynaklı kuvvet
g yerçekimi ivmesi
γ faz arayüzü için mobilite katsayısı
γ_r özgül ısıların oranı
γ_n n'inci faz için özgül ısı oranı
H_p parçacık faz indikatörü
h_s parçacık konvektif ısı taşınımı katsayısı
J akım yoğunluğu
$J_{elektron}$ elektron akımı
J_{iyon} iyon akımı
k akışkan için ısıl iletkenlik katsayısı
k_n n'inci faz için ısıl iletkenlik katsayısı
k_t faz ortalama ısıl iletkenlik katsayısı
k_B boltzmann sabiti
L ergime gizli ısısı
l_m parçacık için ergime enerjisi
λ karışım enerji yoğunluğu
m_p parçacık kütlesi
Nunusselt sayısı
μ akışkan için viskozite değeri
μ_{dr} damlacık için viskozite değeri
μ_t faz ara yüzü için viskozite değeri
μ_0 geçirgenlik
p basınç
φ hacimsel faz fraksiyonu
φ_a anot iş fonksiyonu
φ_c katot iş fonksiyonu
Pr prandtl sayısı
ψ serbest enerji
Q_{rad} toplam hacimsel emisyon katsayısı
R_0 İnoküle kontrol taşıyıcıda hayatta kalan organizmaların geometrik ortalaması
R_r Test taşıyıcıda hayatta kalan organizmaların geometrik ortalaması

Re_r göreceli reynolds sayısı
ρ akışkan için yoğunluk
ρ_n n'inci faz yoğunluğu
ρ_p parçacık yoğunluğu
ρ_{dr} damlacık yoğunluğu
ρ_t faz ara yüzü için yoğunluk
ρ_{tp} fazların ortalama yoğunluğu
σ yüzey gerilimi
t zaman
T sıcaklık
T_p parçacık sıcaklığı
τ_p parçacık hız tepki süresi
θ faz indikatörü
v akışkan için hız
V elektrik potansiyeli
V_i hava için iyonizasyon potansiyeli
v_p parçacık hızı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Isıl püskürtme yöntemlerinin kıyaslanması. **8**
Çizelge 2.1 : Bakır için malzeme özellikleri.....**30**
Çizelge 2.2 : Kaplama alaşımları ve altlık malzemesinin %ağ. kompozisyon analizi. Kalan element yüzdesi “kl” ile gösterilmektedir.....**33**
Çizelge 2.3 : Kaplama alaşımları için seçilen parametreler. **36**
Çizelge 3.1 : Ölçülen ve hesaplanan parçacık sıcaklığı ile hızının kıyaslaması. **41**
Çizelge 3.2 : Kaplamaların ölçülen özellikleri. **48**
Çizelge 3.3 : Pikler için eşleşen veri tabanı kart numaraları. **53**
Çizelge 3.4 : Alaşımların ilgili zaman aralıklarında, seçilen bakterilere karşı antibakteriyel etkinlik test sonuçları. **62**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Yüzey işlem yöntemlerinin sınıflandırılması. **4**
Şekil 1.2 : Püskürtme süreci. (a) Toz parçacıklarının yeterli hız ve sıcaklıkta bir yüzey üzerine gönderilmesi (b)Tam/yarım ergiğik parçacığın yüzeye çarpıp deforme olması sonucu kaplama oluşumu. **5**
Şekil 1.3 : Termal sprey kaplama ünitesi düzeni..... **6**
Şekil 1.4 : Isıl püskürtme yöntemleri (a) Çubuk Ark Besleme, (b) Tel Ark Besleme, (c) Plazma Püskürtme, (d) Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme, (e) Patlatma Silahı. **7**
Şekil 1.5 : Milisaniye–Voltaj ekseninde ark bacağı modlarının grafiksel gösterimi. .**10**
Şekil 1.6 : Mono-atomik ve di-atomik gazların karışım olarak birlikte bulunduğu durumda modların karışık görünmesi.....**10**
Şekil 1.7 : Tel püskürtme sistemi yüksek hızlı kamera kesiti.....**11**
Şekil 1.8 : Tel püskürtme süreci için etkili parametreler ve etkileşimlerinin gösterimi **12**
Şekil 1.9 : Bakırın reaktif oksijen bileşenlerinin (ROB) saldırılarına dayalı biyosidal etki mekanizmaları.....**15**
Şekil 1.10 : Bakteri ile bakır iyonlarının etkileşimi (A) Bakır iyonları hücre duvarına bağlanır (B) Hücre duvarı bakır iyonları etkisinde yırtılır (C) Reaktif oksijen bileşenlerinin reaksiyonunu bakır iyonları tetikler (D) Genomik ve plazmid DNA degradyasyona uğrar. **16**
Şekil 2.1 : Hesaplama geometrisi, (a) çeyrek simetri gövde ve (b) örülmüş ağ. **20**
Şekil 2.2 : Hava için termofiziksel özellikler, (a) yoğunluk, (b) entalpi, (c) özgül ısı, (d) viskozite, (e) ısıl iletkenlik ve (f) elektriksel iletkenlik. **23**
Şekil 2.3 : Parçacık için yüzey ve merkez sıcaklıklarının seyahat süresi boyunca geçmişi. **26**
Şekil 2.4 : Damlacık simülasyonu için eksenel simetride model geometrisi. **28**
Şekil 2.5 : Damlacık simülasyonu için ağ-örgü. **28**
Şekil 2.6 : Sıvı bakır fazı için sıcaklığa bağlı viskozite eğrisi. **31**
Şekil 2.7 : Bakırın katı hali için (a) ısıl iletim katsayısı, (b) ısı sığası, (c) yoğunluk ve sıvı hali için (d) ısıl iletim katsayısı, (e) ısı sığası ile (f) yoğunluk özellikleri.....**32**
Şekil 2.8 : Ortalama parçacık hızı ve sıcaklığı ölçüm sistemi, (a) kontrol ünitesi ve (b) sensör ünitesi. **34**
Şekil 2.9 : Sensör kafasını püskürtme yönüne göre konumu. **35**
Şekil 3.1 : Akış alanı hız şiddeti dağılımı. **40**
Şekil 3.2 : Yörünge boyunca parçacık sıcaklıkları, (a) tam seyahat süresi, (b) yarım seyahat süresi.....**42**
Şekil 3.3 : Parçacık hızları, (a) yarım seyahat süresi, (b) tam seyahat süresi. **43**
Şekil 3.4 : Hedef yüzeye damlacığın sıvanması. **46**
Şekil 3.5 : Damlacığın sıvanırken sıcaklık profili değerleri. **47**
Şekil 3.6 : Kuponlar üzerine yapılan kaplamalar, (a) bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) pirinç, (d) bronz ve (e) nikel-gümüş olmak üzere. **49**
Şekil 3.7 : Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü analizleri, (a) saf bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) bronz, (d) pirinç, (e) bakır nikel ve (f) kaplama öncesi kumlanmış altlık olmak üzere.....**51**

Şekil 3.8 : Kaplamaların EDS analizleri, (a) saf bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) bronz, (d) pirinç ve (e) bakır nikel alaşımı olmak üzere. **52**
Şekil 3.9 : Kaplamaların XRD faz analizi. **53**
Şekil 3.10 : Bakır (Cu) kaplamanın taramalı elektron mikroskobu ile, (a) kaplama yüzey görünümüne ait damlacık tipi yakın çekimi ve (b) kaplama kesit görüntüsü. **54**
Şekil 3.11 : Kaplama kesit görüntüsü, (a) alüminyum bronzu ve (b) pirinç. **56**
Şekil 3.12 : Kaplama kesit görüntüsü, (a) bronz ve (b) nikel-gümüş. **58**
Şekil 3.13 : Bakır kaplama yüzeyleri, (a) parlatılmış ve (b) püskürtülmüş olarak. ... **59**
Şekil 3.14 : Pürüzlü ve parlatılmış yüzeylerin kontrol numunesine karşı, 2 saat süre sonunda bakteri testi sonuçları, üst resim PsA ve alt resim E. Coli. **60**
Şekil 3.15 : Bakteri test sonuçları, (a) E. Coli, (b) S. Aerus, (c) PsA, (d) VRE ve (e) MRSA için 15 dakika sonrasındaki görüntüler olmak üzere, (f) ve (g) 1 saat sonra, (h) ve (i) ise 2 saat sonraki bakteri koloni görüntüleri. **61**
Şekil 3.16 : Ahşap üzeri, düz uygulamalar, (a) bakır, (b) pirinç, (c) alüminyum bronzu, (d) bronz ve desen uygulamaları (e) pirinç, (f) alüminyum bronzu, (g-i) bakır olmak üzere. **64**
Şekil 3.17 : Ahşap üzeri uygulamalarda (a) kısmi parlatma uygulanmış bakır, (b) ham kaplama hali ile bakır ve (c) kısmi parlatma uygulanmış pirinç. **64**
Şekil 3.18 : Seramik üzeri kaplamalarda çeşitli fırçalama yöntemleri ile (a) alüminyum bronzu, (b) bronz ve (c) nikel-gümüş olmak üzere. **65**
Şekil 3.19 : Seramik üzerine yapılmış kaplamaların parlatılmış görüntüleri, (a) desen üzerine bakır ve (b) düz yüzey üzerine nikel-gümüş. **66**
Şekil 3.20 : Vitrifiye üzerine (a) bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) nikel-gümüş ve (d) bakır olmak üzere. **66**
Şekil 3.21 : Elektrik anahtarları üzerine alüminyum bronzu, (a) kaplama ham hali ve (b) parlatılmış hali olmak üzere. **67**

BAKIR ALAŞIMLARI ESASLI ANTİ-BAKTERİYEL YÜZEY KAPLAMALARININ ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Günümüz dünyasında artan nüfus ve etkileşim sebebi ile patojenlerin bulaşma riskine karşı mücadelede, antibakteriyel malzemelere daha çok ihtiyaç duyulmaktadır. Medeniyet tarihi boyunca insanlığın yakından aşina olduğu bir metal olan bakırın, antibakteriyel etkisinin bilinirliği de eskidir. Bakırın antibakteriyel özelliği bilinir olmasına rağmen, özgül ağırlığının yüksekliği nedeni ile üretilen parçaların ağır olmaları, sertliğinin düşük ve karakterinin sünek olması sebebi ile işlenme esnasında zorluklar yaşanması ve deforme olmaya yatkınlığı dolayısı ile yapısal bütünlüğünün korunmasında problem olması, bakırın, gündelik objeler içerisinde kullanımını yok denecek seviyede kısıtlamaktadır.

Bu çalışmanın hipotezi, bakır alaşımlarının, farklı yüzeylere uygulanabilir bir kaplama yöntemi olarak seçilen ısıl püskürtme kullanılarak kaplandığında anti-bakteriyel özelliklerinin kütlesel forma göre korunduğu ve bu sayede uygulanabilirliğinin arttırıldığıdır. Diğer bir deyişle, modern dünyada uygulanabilirliği geçerli bakır alaşımlarının kaplama olarak tatbik edildiğinde karakteristik antibakteriyel özelliklerinin korunarak ve hatta kitlesel formda taşıdığı tüm dezavantajlardan sıyrılarak iyileştirdiği, çalışmanın çıkış noktasını oluşturmaktadır.

Çalışmanın, literatürde gerçekleştirilmiş az sayıda mevcut olan benzer çalışmalara göre önemli farklarını oluşturan özgün yönleri ise, geniş alaşım ve bakteri yelpazesinde inceleme yapılmış olmasıdır. Önemle vurgulanması gereken bir diğer unsur da literatürde, bakteriyel testlerdeki indirgenme süreleri uzun zaman aralıklarında incelenir iken, mevcut çalışmada kısa zaman adımları alınarak indirgenme gözlenmiştir. Ayrıca, literatürdeki çalışmalarda, taze kolonilerin statik şartlarda indirgenmesini incelenmiş, bu çalışmada ise, her kontrol sayımı esnasında sürekli taze koloni ekimi ile dinamik şartları temsil eden, sürekli indirgenme etkisini gözlem altına almıştır.

Bakır ve alaşımlarının (Cu-Al, Cu-Sn, Cu-Zn, NiCuZn) kaplanması, termal sprey yöntemi olan ark püskürtme ile sağlanmıştır. Kaplama parametrelerinin iyileştirilmesi için sonlu elemanlar analizi yöntemine dayalı benzetim yapılmış ve doğrulanması da püskürtme ölçüm sistemi ile sağlanmıştır. Parametrelerin kontrollü ele alınması sayesinde, gündelik hayattaki tüm yüzeyler istenilen alaşımlar ile, kaplama sürekliliğine ve altlık ile arasında mukavim bağa sahip olarak kaplanabilmiştir. Kaplamaların karakterizasyonunda yüzey pürüzlülüğü için optik profilometre, yapısal analizi için XRD, morfolojik analiz için SEM kullanılmıştır. Antibakteriyel etkinlik testleri için standart kültür bakterileri ile klinik izole bakteriler, 15 dakika, 1 saat ve 2 saat zaman adımlarında tekrarlı ekimler sonrasında koloni indirgenme sayıları ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün etkisi saf bakır için incelenmiştir. Alaşımlara karşı bakteri dirençleri tek yüzey tipi için, paslanmaz çeliğe karşı kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

Bakırın antibakteriyel etkinliği, E. Coli, S. Aureus, PsA başta olmak üzere VRE, MRSA süper bakterilerine karşı da yüksek verimlilik ile (>%99,9) elde edilmiştir. Yüksek yüzey pürüzlülüğüne paralel olarak özellikle tel püskürtme sürecinin doğası gereği

yüksek soğuma gradyanları ve yüksek kinetik enerji ile yığma sayesinde, kaplamaların yüksek iç gerilmelere sahip olması, bakterilerin hücre duvarlarının delinmesinde etkili bakır iyonlarının deşarjını olumlu yönde arttırmaktadır. Söz konusu etki mekanizması sayesinde, kısa sürelerde dahi agresif indirgenme davranışı elde edilmiş ve etkinliğin sürekliliğe sahip olduğu da gözlenmiştir.

Elde edilen kaplamalar, gerçek hayatta ihtiyaç duyulan ahşap, polimer, seramik yüzeylere başarı ile tatbik edilerek, diğer doktora çalışmalarından farklı şekilde teknolojik hazırlık seviyesi açısından incelendiğinde, THS7 seviyesinde ürün üretimi de gerçekleştirilmiştir.

ANTI-BACTERIAL EFFICACY OF WIRE ARC SPRAYED COPPER ALLOY COATINGS AGAINST VARIOUS PATHOGENS

SUMMARY

Copper is a well-known antimicrobial metal in human civilization that among its various properties such as high thermal, electrical conductivity, and ductility, recently, it has been catching interest due to its biocidal effect. Although exact mechanisms on how copper exerts its biocidal effect are not fully understood but theories assert that copper ions bind to thiol groups near cell walls resulting in respiratory enzyme inhibition which would result in cell membrane wall tearing off, causing depletion of cytoplasm in cell and oxidation of its nuclei. Therefore, copper-based alloys that do not require any supportive agent for activation and that are continuously active independently of external conditions are taken into consideration for anti-microbial applications on touch surfaces.

Pilot installations have been made in medical facilities around the world to investigate biocidal effectivity of copper. Many different types of touch surface applications were realized on these installations including door handles, operating plates, air ventilation ducts, reception tables, etc. When pathogen reduction is concerned, gathered results were overwhelming. However, the feasibility of these applications was an issue due to bulk form of copper which is expensive, heavy, and not competitive by means of structural integrity. Therefore, applying copper as a coating would make it feasible and would unlock its potential in antimicrobial properties to be carried into real-life applications.

Various technologies are available for coating copper alloys such as electroless coating, electroplating, physical or chemical vapor deposition, cold spray, and thermal spray. Due to its low cost, flexibility and most importantly having no requirement in pre or post processing prior to use, a thermal spraying process known as wire arc spraying is chosen in this study. All thermal spray processes run on same principles that heat load and kinetic energy are transferred to the particles generated from coating material in consideration, but they differ in applicability by the level of output particle speed and velocity. In High Velocity Oxy-Fuel coating process, high speed of the particles damage soft substrate materials. In Plasma Spray coating process, high thermal and radiative load to target surface does affect heat sensitive materials such as thermoplastics, wood, and similar. Cold Spray deposition has good compatibility for wide range of substrate materials but due to its high operation cost related to type and quantity of process gases involved limits its applicability. Therefore, due to its low operation costs while providing a high adhesion with low oxygen and low porosity levels, wire arc spraying stands out sharp among other thermal spray methods. Since wire arc transfers low amount of heat on target, it enables copper alloys to be deposited virtually on any material such as ceramics, polymers and even on wood with no damage. Since many different types of material surfaces are available in hospital environment such as stainless steel, aluminum, wood, ceramics, plastics, etc., it is inevitable to seek for the compatibility of the coating process on these materials which is satisfied by occupying wire arc.

In developing the application for this study, first, a series of coating simulations are made utilizing a finite element method (FEM) package (Comsol Multiphysics) to evaluate the effect of process parameters on particle temperature and speed upon

arrival on targets to manage accumulation of heat load that might damage the target while at the same time to optimize splat formation that would directly influence final coating properties. Process is monitored using Accura Spray G3C measurement system to validate particle simulation results. Parallel to particle simulations, results are plugged into droplet simulations and spreading of a droplet while solidifying has been investigated. Regarding optimum parameters gathered via simulations, coatings are realized that are carried to a series of antibacterial activity tests against standard pathogens (E. Coli, Staph. Aureus, PsA) as well as against hard to kill super-bugs such as VRE, MRSA which have not yet been investigated for wire arc thermal sprayed copper alloy coatings. This study differs from available literature in a sense of having tests over a wide range portfolio of bacterium, having fresh colony insertion at measurement intervals to reflect dynamic conditions and by having small time intervals such as 15 minutes, 1 hour and 2 hours.

Computational flow field simulations are based on high Mach number flow approach by occupying quarter symmetry of 3D geometry that includes all barrel, nozzle, and free discharge domains. Non-transient k-ε turbulence model is built on air properties which are obtained by an interpolation of the data from the literature and one-way coupled particle tracing is studied based on acquired flow field results including phase transfer within particles. Only primary breakup is assumed to be available, and particles are considered as perfect spheres with homogeneous temperature profile along their radius which is also proved to be valid. Measured data do fit on calculations for particle temperature and velocity by an error margin of %10. Regarding achieved results, FEM based particle trajectory and particle temperature simulations during travel until the target helped optimizing spraying distance which is set so to get the highest number of liquid fractions maximizing deposition rate with the lowest temperature of particles minimizing damage to substrate. Having a balance in process parameters are uttermost importance to droplet spreading phenomena when droplets reach target and start accumulating on top of each other. Therefore, droplet simulations based on phase-field method including phase change helped study the optimum parameter range of particles to achieve ideal coating formation scenarios. Sensitive surfaces such as wood and thermoplastics therefore are made possible to be coated with proposed coating parameters as well thanks to insight gained by the aid simulation results.

Coatings are applied to coupons with a diameter of 25.4 mm, made from 316L sheets of 2 mm thickness. Twin wire-arc system Sparc 400 from GTV is used with a converging diverging nozzle which is fed by 1.6 mm diameter wire stocks. Coupons are positioned on a specially designed sample holder which is held on 4 axis robotic platform. Prior to coating, substrates are cleaned with alcohol and sand blasted with 36 grit aluminum oxide particles. For comparison of surface roughness on antimicrobial efficiency, group of samples are blasted with 16 grit aluminum oxide particles resulting in three times higher roughness on as sprayed profiles. The plain stainless-steel substrate that is in comparison in antibacterial tests was also sand blasted to overcome any error in the bacterial efficacy investigation.

After completion of coating production, all specimens have been analyzed for thickness, porosity, roughness, and oxygen content. Coating thickness and coating morphology is determined via coating surface and cross-section by scanning electron microscopy (SEM) from JEOL 5410. Surface roughness of as sprayed coatings are measured by 3D Optical Profilometer from Veeco. Oxygen content analysis for the coating are determined by XRD from Philips (PW3710 System) with a 2θ range of 30–140° steps of 0.02^o (with CuK_α at 40 kV and 30 mA).

Antibacterial tests are done with respect to a modified procedure based on Environmental Protection Agency Test Method for the Continuous Reduction of Bacterial Contamination on Copper Alloy Surfaces (EPA-800R09004). All tests were

carried to reflect dynamic conditions by adding fresh colonies at observation intervals onto previous ones to see reduction effect in continuous pattern. Carrier samples were cleaned with alcohol, rinsed with deionized water and air dried. Five tests were carried per sample per organism per time. S. Aureus and E. Coli are taken from standard stock cultures while PsA, VRE and MRSA were clinically isolated. To produce fresh cultures from root cultures, bacteria were held at 37°C for 24 hours. The fresh cultures were then put into a suspension of 0.85% saline (0.5 Mc Farland) and later were diluted by 1/10,000 ratio followed by inoculation to Mueller Hinton agar plates using sterile calibrated pipettes by 100µl of each. Following inoculation, each specimen was held at 37°C for separate set of time intervals (15 min, 1 h, 2 h). Inoculums were taken and harvested on Mueller Hinton agars and incubated for 48 hours at 37°C after exposure. Colony counting was done for after the incubation where number of colony forming units (CFU) was gathered from the growth of viable bacteria 37°C after 24h. Tests were repeated five times for each sample for statistical reliability.

Tests results show that control sample of 316L stainless-steel, has a very weak antibacterial rate comparatively to copper alloys. Copper alloy coatings continuously reduced bacterial count, even re-inoculation was done at set time intervals. One may have expected that re-inoculation on top of dead colonies would promote bacterial growth positively, since dead colonies would act as a feeding site for fresh colonies. However, the high effectivity of copper did continuously kill any upcoming fresh colonies and was faster in killing bacteria then it could have multiplied as well. E. Coli, S. Aureus and PsA completely vanished from the surface within 15 minutes. Superbugs such as VRE and MRSA were also completely removed from the surface successfully in 2 hours. VRE had shown a resistance at initial 15 minutes but was effectively eliminated at further intervals and MRSA survived until 1 hour but as well was eliminated successfully in 2 hours.

Copper has a reduction mechanism based on ion discharge which is complex and involves many external parameters including environmental temperature, relative humidity, surrounding medium which were kept constant during the tests. Therefore, reduction rate is related to copper ion availability on the surface which is the dominant mechanism in killing bacteria. When copper surfaces get in contact with water, or even with organism's fluid, ion discharge rises. The copper ions attack the bacteria by rupturing their cell membrane and by binding with their enzymes. This phenomenon is universal to all bacterium types and by being non-selective it works on any living organism. It is proposed that unique semi-porous, rough texture of wire-arc sprayed the coating would have a profound influence in the reduction of bacterial count however pure copper did kill every bacterium in test as good as it did with its polished surface in comparison, showing that surface roughness has no measurable influence on effectivity. However, it should be stated that the porous structure of wire-arc coatings with micro-cracks and micro-holes does host sites for oxygen release and copper solute transport. Additionally, high energy grain boundaries and internal stresses formed due to rapid cooling upon impact in the wire-arc spray process, help ions to discharge more. Therefore, wire arc sprayed copper coating showed tremendous reduction ability. An important aspect for copper itself to note is that the killing rate of copper is high enough to overcome horizontal gene transmission.

Gram positive bacteria such as S. Aureus has a thick but a loose cell that makes diffusion easier. However, gram negative bacteria such as E. Coli has a thinner but multi layered outer membrane over its cell that makes diffusion slightly slower which enables this type of bacterium resist to chemical agents more. However, no difference was observed in biocidal performance when the coating is exposed to both gram negative or positive bacteria. The antibacterial efficacy slowed down for superbugs which are known to have thicker cell membranes, possibly causing a harder ion diffusion through the cell membrane. Characteristics of the wire arc copper alloy

coatings, that are rough surfaces, having pores and internal stress in its structure have made possible to effectively eliminate all bacterium types in short time.

After achieving desired results, real-life examples have been created by acquiring real-life objects and coating related alloys on their surfaces. Having post surface treatments over coated active copper alloys on ceramic, thermoplastic, wood surfaces proved that this technology is ready for field use and installations, which sets the technology readiness level (TRL) to 7 for this project.

1. GİRİŞ

Bakır alaşımlarının üstün anti-bakteriyel özellikleri ilk çağlardan beri bilinmekte olmasına rağmen fiyat, işlenebilirlik, yapısal bütünlük ile fiziksel kütlesi ve estetik kaygılar sebebi ile günümüzde yaygın olarak uygulanamamaktadır. Bakırın kitlesel formda uygulanmasına engel olan tüm dezavantajlarının, etrafımızda kullanılan ve bulunan tüm objelerin yüzeylerine kaplama olarak uygulanması sayesinde üstesinden gelinmesi ve üstün biyosidal özelliklerinin korunması çalışmanın hedefi olmuştur. Literatürde yaygın olarak antibakteriyel testlerde kullanılan bakteri tipleri için çok az sayıda kaplama çalışması mevcuttur ve bu çalışmalarda süper-bakterilerin bakır yüzeyler ile etkileşimleri incelenmemiştir. Bu çalışmanın diğer çalışmalardan farkları ve özgün yönlerini beş ana başlık altında toplayabiliriz. Birincisi, kaplamaları gerçekleştirmeden önce sonlu elemanlar analizine dayalı akış alanı, parçacık yörüngesi ve damlacık sıvanma simülasyonları yapılarak kaplamalara ait kavramların sayısal olarak benzetimi ile süreçte etkin parametrelerin deneylerden önce validasyonu (THS1-3). İkincisi, bakır ve alaşımlarının tel beslemeli ark püskürtme tekniği ile kaplama olarak uygulanmasıdır. Üçüncüsü, kaplamaların antibakteriyel performanslarının test edilmesi aşamasında yaygın olarak kullanılan bakterilerin yanı sıra süper bakterilerin de kaplama yüzeylerinde etkileşiminin incelenmiş olmasıdır. Dördüncü özgün yönü ise, özellikle antibakteriyel çalışmalarda dinamik şartları değerlendirmek için test süreleri kısa zaman aralıklarına çekilmesi ve sürekli indirgenmeyi temsil etmesi üzere taze kolonilerin her ölçüm adımında tekrar diğerlerinin üzerine ekilerek, gerçek hayatı simüle eden ortamlarda kaplamaların performanslarının ölçülmesidir (THS4-5). Son olarak geliştirilen bu teknolojinin THS7 seviyesine çıkarılmasına yönelik olarak kaplamaların günlük hayatımızda kullanabileceğimiz ve dokunulan tüm yüzeylere kaplanabilirliğini göstermek amacıyla polimer, seramik ve ahşap yüzeyler de kaplanmış, ardıl yüzey işlemlerine tabi tutulmuştur.

Bu tez içeriğinde, termal spreyin prensipleri, tel-püskürtme yönteminin ve anti-bakteriyel özellik gösteren bakır alaşımlarının öne çıkan detaylarının aktarılması üzere, mevcut literatür, giriş başlığı altında özetlenmektedir. Literatür özeti aktarılırken, tezin çıkış noktası ve motivasyonu ile tez içeriğinin dış hatları da çizilmektedir. Literatür taramasının ‘Termal Sprey Kaplama Teknolojisi’ kısmında

bakır alaşımlarının yüzeylere kaplanması için kullanılacak yöntem seçimi kıyaslamalı olarak tartışılmaktadır. Takip eden ‘Antibakteriyel Bakır’ kısmında, bakırın anti bakteriyel özelliklerinin diğer kabul gören elementler/alaşımlar ve uygulamalar ile kıyaslaması ele alınmıştır, anti-bakteriyel etki mekanizmasının teorilerine yer verilmiştir. Sağlık uygulaması olmasının yanında, sağlık konusunda olası sakıncaları ‘Toksisite’ başlığı altında irdelenmektedir.

Deneysel çalışmaların tamamı ‘DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE YÖNTEMLER’ kısmında detayları ile verilmektedir. Çalışmaların sonuçları ‘SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME’ başlığı ile karşılaştırmalı olarak tartışılmaktadır.

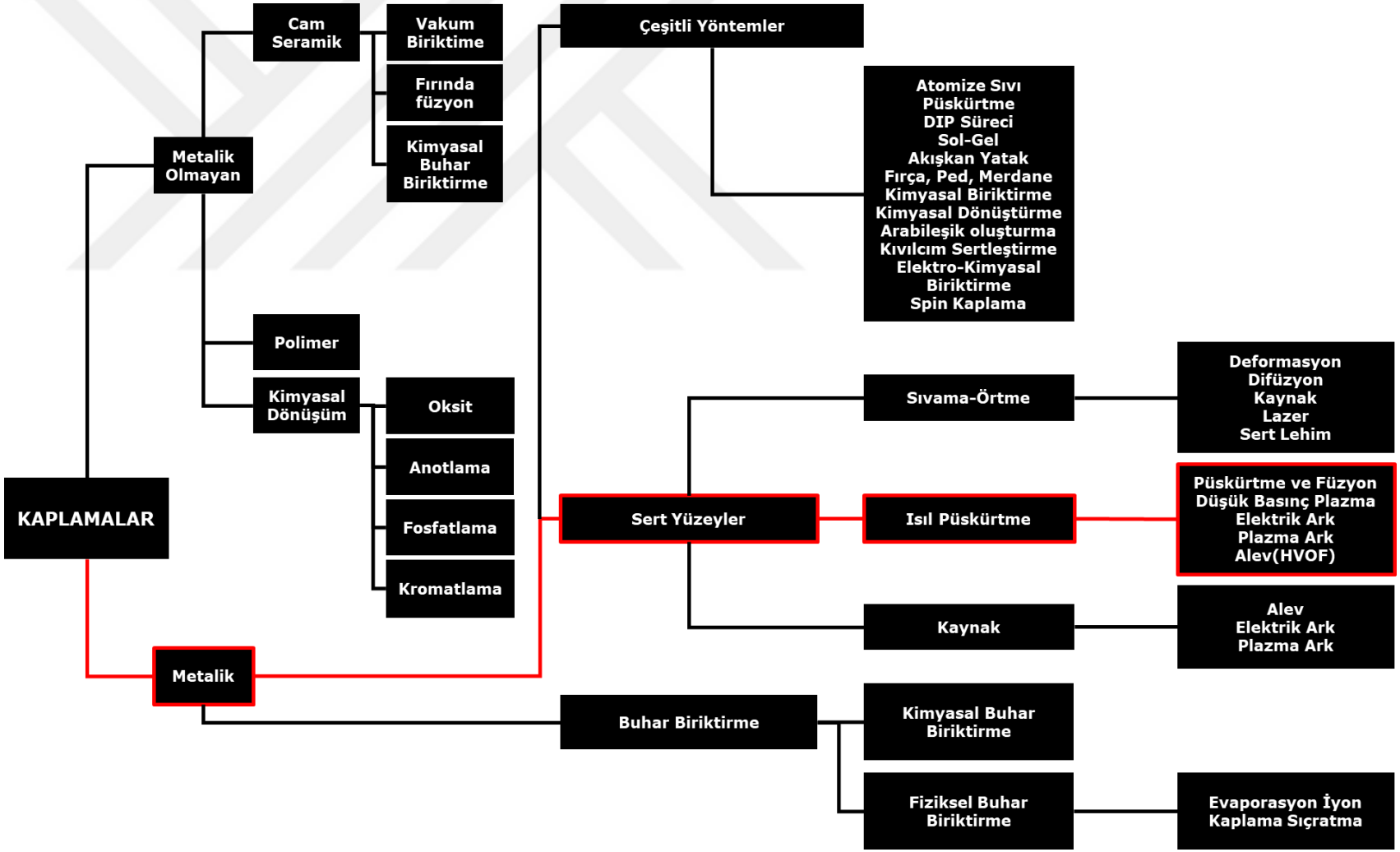
1.1 Termal Sprey Kaplama Teknolojisi

Yüksek sıcaklıklarda, yüksek hızlarda malzemenin hedefe ergiyik/yarı-ergiyik olarak gönderilerek yığılması prensibinde çalışan kaplama sistemleri termal sprey veya bir diğer ismi ile ısıl püskürtme yöntemleri olarak gruplandırılmaktadır. Termal sprey kaplamalar için kullanılan malzemelerin farklı ergime noktaları, termal sprey süreçleri arasında farklı enerji çeşitlerini gerektirmektedir. Termal sprey süreçleri birbirlerinden enerji kaynaklarına göre ayrıştırılmaktadır. Malzemeler, enerji kaynakları ile elde edilen sıcak alana farklı tip ve formlarda beslenmektedir [1]. Kullanılan malzemeler, metal alaşımlarından, kompozit metal-seramik alaşımlarına ve saf seramik bileşenlere kadar geniş bir çeşitliliğe sahiptir.

Elde edilen nihai kaplama özellikleri, kaplama süreci parametrelerine göre değişmekle birlikte her zaman poroz yapıdadır [2]. Diğer kaplama yöntemlerinin aksine termal sprey kaplama yöntemleri, milimetre mertebelerine kadar çıkabilen yüksek yığma kalınlıklarına imkan vermektedir [1]. Kullanılan malzemenin karakteristiğine göre iletkenlik, yalıtkanlık, aşınma direnci, korozyon dayanımı, biyouyumluluk vb... özelliklere sahip yüzeyler elde edilmektedir. Farklı beklentilere cevap veren özellikleri sunan termal sprey kaplamaların uygulamaları otomotiv, havacılık, elektronik, uzay ve medikal gibi birçok farklı endüstride gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [3].

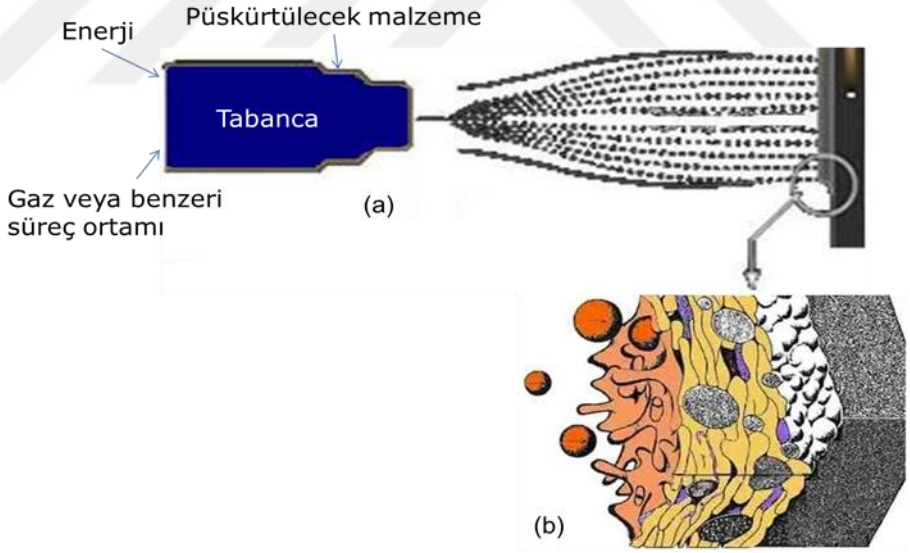
Kaplama yöntemleri arasında yer alan termal sprey kaplama yöntemleri Şekil 1.1'de verilmiştir. Bu yöntemlerin kaynak ve sıvama yöntemleri arasında değerlendirilmesinin sebebi, kalın kaplamalara imkan vermeleri ve kaynak/sıvama yöntemleri ile aynı fiziksel temellere dayalı mekanizmaları kapsamalarından ötürüdür. Diğer bir deyişle, kaynak yönteminin temelini oluşturan enerji kaynaklı ergitme/ergiyik faz eldesi ile sıvama sürecindeki enerji aktarımı ile malzemenin şekil alması prensipleri termal sprey kaplama yöntemleri içerisinde etkin iki mekanizmayı özetlemektedir [4]. Termal sprey kaplama süreci malzemelerin enerji ile ergitilerek, taşıyıcı gaz altında hızlandırılmış şekilde hedef yüzeye sıvanması prensibi ile çalışır.

Farklı kaplama teknolojileri ve yöntemleri ile kıyaslandığında termal sprey milimetrelere ulaşan kaplama kalınlıklarına imkan vermekle birlikte atmosferik şartlarda çalışma, doğrudan parça üzerine uygulama gibi avantajlar sunarak PVD, CVD veya herhangi bir elektrokimyasal kaplama sürecinden tamamen ayrışmaktadır [3]. Kaplanacak hedef altlık malzeme ve deşarj edilen kaplama malzemesi çeşitliliğinde sunduğu esneklik ile uyumluluğu sayesinde adaptasyonu kolaydır. Kaplama malzemesinin hedefe yüksek miktarlarda deşarj edilebilir olması ile birlikte sürekli üretim imkanı sunmaktadır [5].



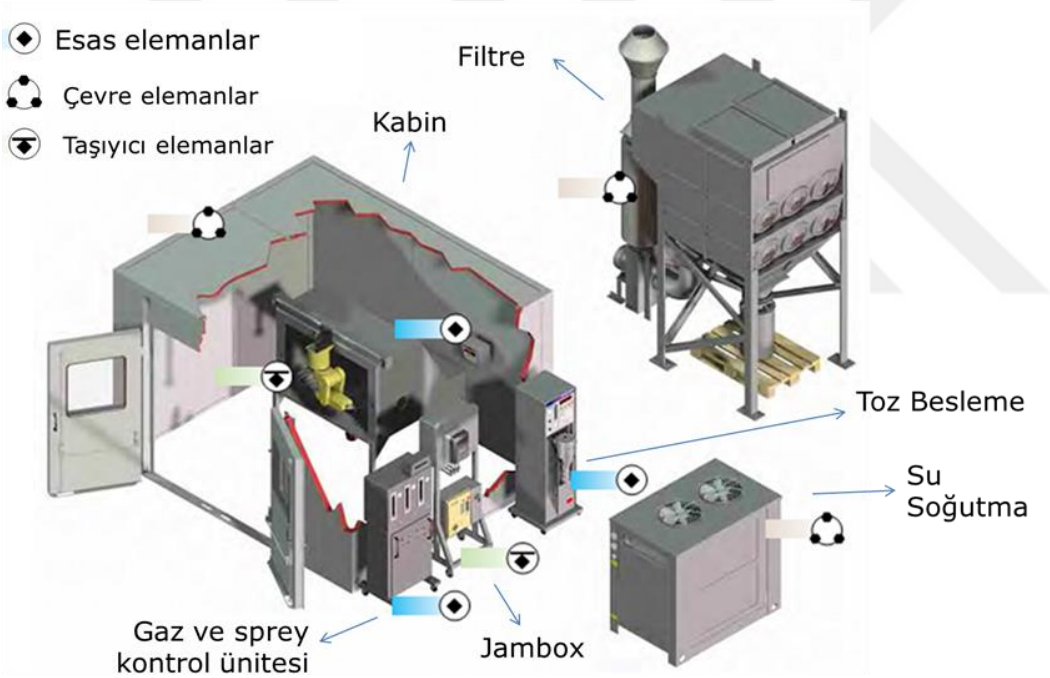
Şekil 1.1 : Yüzey işlem yöntemlerinin sınıflandırılması [4].

Şekil 1.2'de termal sprey kaplama sürecinin fiziksel prensibi gösterilmektedir. Sürecin ana girdisi olan enerji kaynağı, toz/çubuk/tel formundaki malzemeyi ısıtmakta, sürecin taşıyıcı gazı ise oluşan sıcak parçacıkları hızlandırmaktadır. Şekil 1.2.b'de görüldüğü üzere ergiyik/yarı-ergiyik malzemeler kazandıkları kinetik enerji ile hedefe ulaşarak sıvanmaktadırlar. Püskürtülen parçacıklar, ulaştıkları yüzeyde çok yüksek soğuma gradyanlarına (~1e6 K) maruz kalarak hızlı bir şekilde soğumaktadırlar [6]. Kaplama, soğuma ile birlikte büzülerek çeken parçacıkların hedef yüzey üzerine tamamen mekanik kilitlenme esasına dayalı tutunmaları ile oluşmaktadır [7]. Yüzeyin, mekanik tutunmayı desteklemesi için pürüzlendirilmesi termal sprey kaplamalar için şarttır. Hedef ile kaplama arasındaki bağlanmayı etkilememesi adına yüzeylerin yağ, kir ve özellikle nemden arındırılarak işleme alınması gerekir [2]. Kaplamada porozite oluşması, parçacıkların farklı hızlarda ve sıcaklıklarda yüzeye ulaşması sonucudur. Düşük sıcaklıkta gelen parçacıklar sıvanamadan soğumakta, yüksek hız ve sıcaklıkta gelenler ise sıvanırken damlalar halinde saçılarak tepeler (uydu damlacıklar) oluşturmaktadır [8]. Porozite, birçok yalıtım ve medikal uygulamada özellikle arandığı için bazı süreçlerde, daha yüksek porozite sağlanacak parametreler tayin edilmektedir.



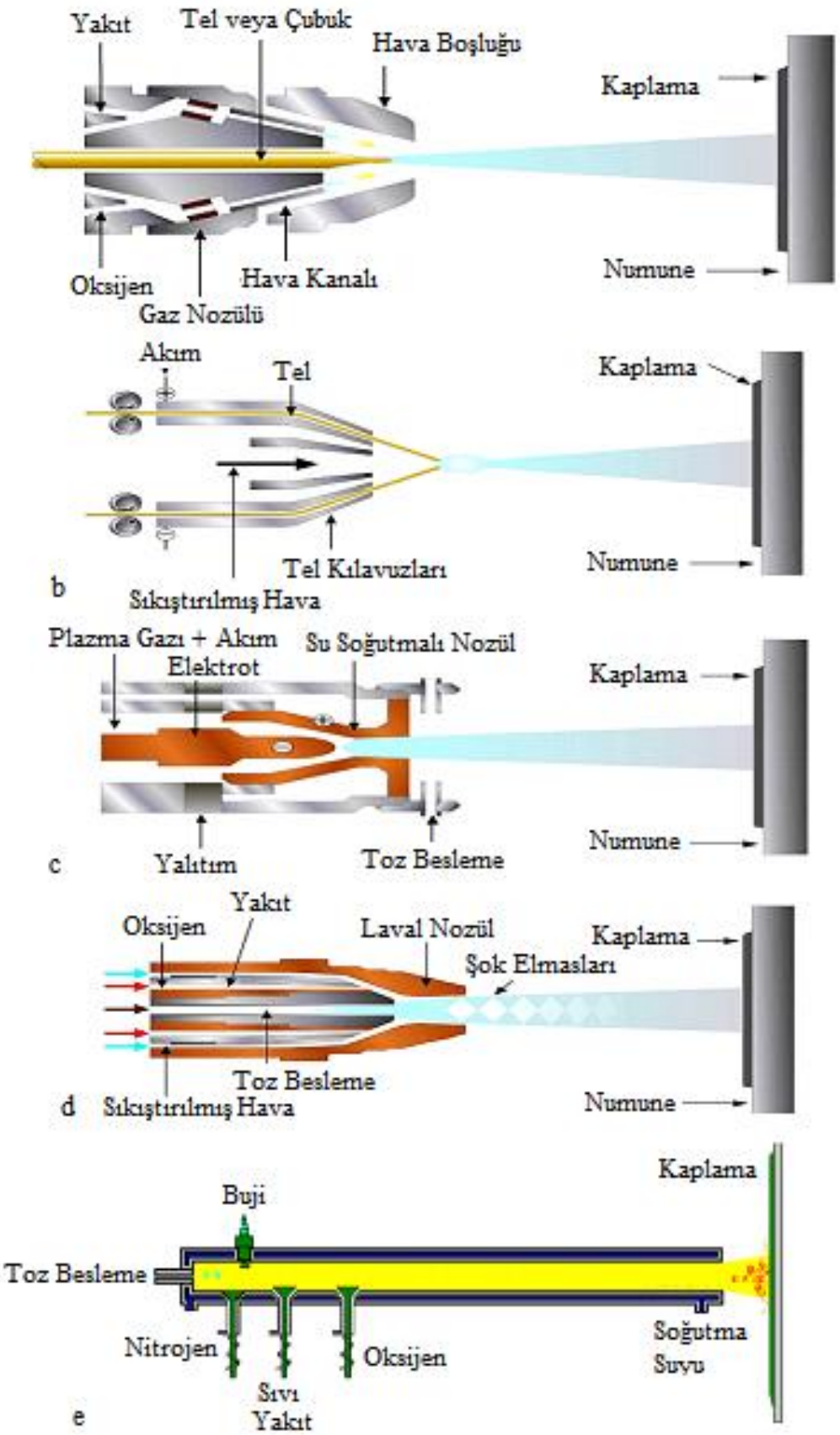
Şekil 1.2 : Püskürtme süreci. (a) Toz parçacıklarının yeterli hız ve sıcaklıkta bir yüzey üzerine gönderilmesi (b)Tam/yarım ergiğik parçacığın yüzeye çarpıp deforme olması sonucu kaplama oluşumu [9].

Şekil 1.4'te termal sprey kaplama yöntemlerinin birbirleri kıyaslaması verilmiştir. Enerji, malzeme ve taşıyıcı gaz prensibinde çalışan tüm sistemler, enerji kaynağı ve buna bağlı olarak kullanılan kaplama malzemesi bakımından ayrışmaktadır. Yüksek sıcaklığa sahip seramik malzemeler plazma sistemlerinde 10.000-30.000 K sıcaklıklara ulaşan plazma bulutu sayesinde kaplanmaktadır [10]. Nispeten düşük ergime sıcaklığına sahip seramik malzemeler ve metal alaşım sert kaplamalar ise yoğun kaplama elde etmek üzere kinetik enerjisi en yüksek olan HVOF sistemlerde Mach 5 seviyelerine kadar hızlanarak kaplanmaktadır [11]. Sadece metal alaşımları ile çalışan tel püskürtme tam ergime sağlayan yegane yöntem olmakla birlikte en yüksek deşarj veya püskürtme verimi değerlerini de sağlamaktadır [12]. Alev ile sprey kaplama ise polimerlere kadar inebilen düşük sıcaklık uygulamaları için idealdir [6]. Patlatma sistemi ticari olarak kullanılmamasına rağmen HVOF'e alternatif olarak literatüre geçmiş eski bir sistemdir.



Şekil 1.3 : Termal sprey kaplama ünitesi düzeni [13].

Termal sprey kaplamalar atmosferik şartlarda uygulanabildikleri gibi, malzemenin cinsi eğer oksidasyon/karbonizasyon veya yanma riski taşıyor ise şartlandırılmış atmosfer ya da vakum ortam çemberlerinin kullanılması zorunlu olabilmektedir ve mümkündür [14]. Şekil 1.3'te alışılagelmiş bir termal sprey kaplama kabini, destekleyici unsurları ile görselleştirilmiştir. Tüm termal sprey kaplama çalışmalarında en kritik güvenlik unsuru havalandırma ve buna bağlı filtre elemanı olmakla birlikte ışın radyasyonu ile yüksek ses, önlem alınması gereken diğer unsurlardır [15].



Şekil 1.4 : Isıl püskürtme yöntemleri (a) Çubuk Ark Besleme, (b) Tel Ark Besleme, (c) Plazma Püskürtme, (d) Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme, (e) Patlatma Silahı [3].

Çizelge 1.1'de termal sprey kaplama yöntemleri etkili süreç parametrelerine göre listelenmiştir. Çizelgede verildiği üzere yöntemler sıcaklık ve parçacık bakımından net ayrımlara sahiptir ve bu sayede kullanılacak malzemeye göre sistem seçimi yapılmaktadır. Nitekim, sıcaklık ve hız bakımından kesişim kümelerine giren malzemeler için ise, hedeflenen nihai porozite, bağ mukavemeti ve deşarj miktarlarına göre uygun süreç seçilmektedir.

Çizelge 1.1 : Isıl püskürtme yöntemlerinin kıyaslanması [1].

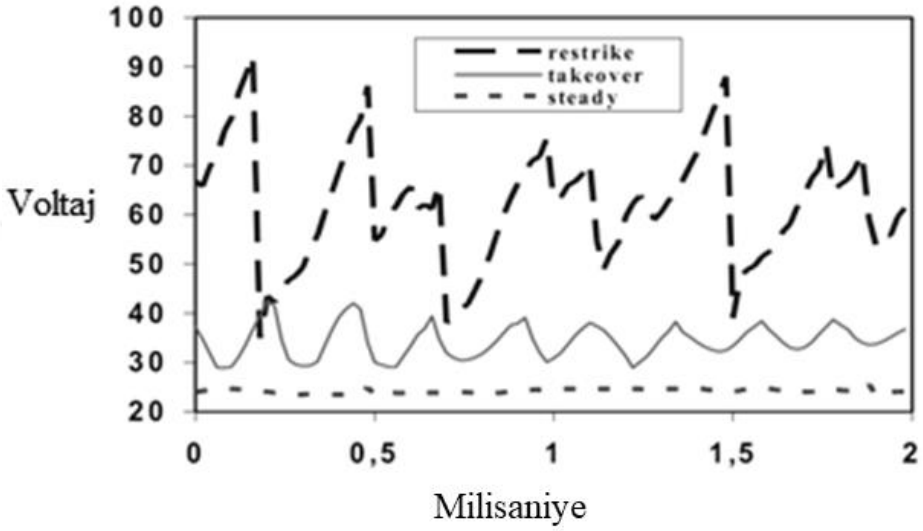
Özellik	Tel Bes. Alev	Toz. Bes. Alev	Tel Bes. Ark	HVOF	Plazma
Gaz Sıcaklığı (ºC)	3100-3500	3100-3500	3800-4200	2200-3200	12000-20000
Parçacık Hızı (m/s)	~200	~50	~200	~1000	~450
Kaplanma oranı (kg/saat)	3-10	1-6	6-25	2,2-13,2	1-12
Bağ Kuvveti (MPa)	14-28	14-21	28-48	55+	21-34
Ham malzemeye göre yoğunluk (%)	85-92	85-92	85-97	95-98+	90-97
Üst Kaplama Limiti (mm)	0,5-2,5	0,5-2,0	0,5-2,5	0,6-2,5	0,4-2,5

Bakır alaşımları Çizelge 1.1'de verilen tüm yöntemler ile kaplanabilmektedir. Plazma sprey kaplama yöntemi işletme maliyeti ve diğerlerine kıyasla düşük deşarj miktarı sebebiyle bakır alaşımları için tercih edilmemektedir [2]. Plazma sprey yöntemi özellikle hedef yüzeye yüksek ısı yükü yansıttığı için ahşap, seramik, plastik gibi yüzeylerin kaplanmasında sınırlamaya tabidir [16]. Tel ve toz beslemeli alev püskürtme, düşük sıcaklığı sayesinde yaygın yüzeylere uygulama bulmaktadır fakat nispeten düşük parçacık hızı ve tüm parçacıkların tam ergiyik olmamasından ötürü porozitede sınırlı limitlerde durmaktadır [11]. Alev püskürtme sistemlerinin deşarj miktarı da yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü belirli ve sınırlıdır [17]. HVOF metodu bakır alaşımlarının tamamını ergitecek enerjiye sahip olup çok yüksek hızlarda parçacık gönderdiği için ideal bir adaydır fakat işletme maliyetlerinin yüksek olması ve hassas yüzeylere hasar vermesi sebebi ile yerini tel beslemeli ark püskürtmeye bırakmaktadır [4]. Tel beslemeli ark yöntemi, düşük enerji tüketimine sahip olması sebebi ile en ucuz maliyetlere sahip iken en yüksek deşarj oranlarına çıkabilmekte ve tam ergime sağlayarak metal alaşımlarını yüksek hızlarda hedefe ulaştırabilmektedir. Ark ergitme teknolojisi sayesinde parçacıkları ergiten enerji yükü hedef parçaya diğer

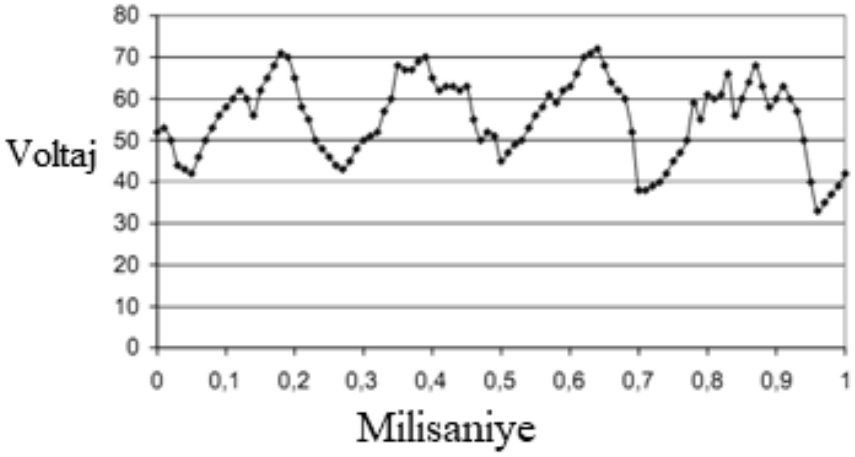
yöntemlere nazaran daha az yansıtılmaktadır [18]. Bu sayede de hedefte hasar, deformasyon/distorsiyon veya metalürjik herhangi bir değişim daha etkin kontrol altında tutulur ve bakır alaşımları, ahşap, seramik, cam, plastik vb. tüm yüzeylere geniş parametre esnekliği ile kaplama yapılabilir. Çizelge 1.1'de yer verilmeyen soğuk püskürtme yöntemi ise hassas yüzeylerin yoğun dolulukta kaplanması için gerçekte en uygun adaydır. Fakat maalesef deşarj oranlarının kıyaslamada düşük kalması ve işletme maliyetlerinin söz konusu uygulamalar için kabul edilecek aralıklarda seyretmemesinden ötürü kıyaslamaya dahil edilmemiştir [11]. Çizelge 1.1'ye dahil edilmeyen bir diğer yöntem olan RF plazma ise termal sprey kaplamalarda enerji verimliliği ve kaplama kalitesi bakımından avantaj taşıdığı kadar uygulamada parçanın hareket ettirilmesi gerekliliğinden ötürü sanayide geri planda kalmaktadır. RF plazma, bakır alaşımları için yüksek işletme maliyetine sahip olmakla birlikte malzeme deşarj oranı olarak, ark ergitme/tel besleme yöntemlerine kıyasla düşük kalmaktadır [19]. RF plazma, az sayıdaki termal sprey uygulamalarından ziyade, günümüz itibari ile toz atomizasyonu ve toz küreselleştirme uygulamalarında üstünlük sağlamış ve yer bulmuştur [20].

Termal sprey kaplamalarda enerji kaynağı belirli kimyasal reaksiyonlar veya elektrik ark deşarjı esaslı plazma reaksiyonları ile oluşur. RF plazma ile üretilen termal sprey kaplama yöntemlerinde ark söz konusu değildir. Ark esaslı olan plazma sprey ve tel beslemeli ark püskürtme sistemlerinde, doğası gereği, ark sürekli değildir [21]. Söz konusu ark, anot katot arasında kısa devre oluşturarak taşıyıcı gazın iyonlaştığı, serbest elektronların oluştuğu bir plazma bulutu yaratır [20]. Plazma sisteminde anot ve katot tüketilmez, süreklidir. Plazma sistemlerinde anot ve katot arasında oluşan ark basınçlı gaz sebebi ile ötelenmektedir ve ötelendikçe zayıflayarak kopmakta, daha sonra tekrar en yakın noktadan tekrar periyodik olarak oluşmaktadır [19]. Süreksizlikler 150 mikro saniyelik aralıklarla oluşmaktadır [2]. Her kopma anı, geriye doğru bir gaz emişi yaratmaktadır ve dış ortam gazının deşarj bulutuna karışmasına katkı sağlanmaktadır [1]. Taşıyıcı gaz mono-atomik ise baskın mekanizma "devir alma" (take-over) olarak adlandırılır [19]. Devir-alma modunda ark bağlantısı koparken yeni bağlantı kurulur ve süreksizlik daha yumuşaktır. Eğer taşıyıcı gaz di-atomik ise "tekrar vurgu" (restrike) mekanizması baskın olur ve ark bağlantısı koptuğunda yeni bağlantı kurulur, süreksizlik daha keskin olmaktadır [19]. İki durumun karışık olduğu gaz karışımlarında da "karışık" (mixed) mekanizma söz konusudur. Şekil 1.5, tüm mekanizmaların birbirine göre kıyaslamasını temsili olarak göstermektedir. Arkın ilk başlangıç anında, mono-atomik gazlar vurgu salınımından "denge" (steady) konumuna geçmektedirler. Di-atomik gazlar ise vurgu salınımından

sonra “devir” alma modunda devam ederler. Şekil 1.6, iki tip gazın da bulunduğu karışımlarda “karışık” modun davranışını göstermektedir. Karışık modda benzer aralıklarda daha dar voltaj düşüş bandında seyir gözlenmektedir. Her mekanizma için 300 mikro saniyeden uzun süre ark bağlantısının korunması durumunda, sıvı soğutmanın yetmeyeceği bir ısıl yük oluşması sebebiyle, anot ve katotta ergime ile aşınma gerçekleşir ve ergiyen anot/katot parçaları kaplamaya inklüzyon olarak karışır [21].



Şekil 1.5 : Milisaniye – Voltaj ekseninde ark bacağı modlarının grafiksel gösterimi [19].



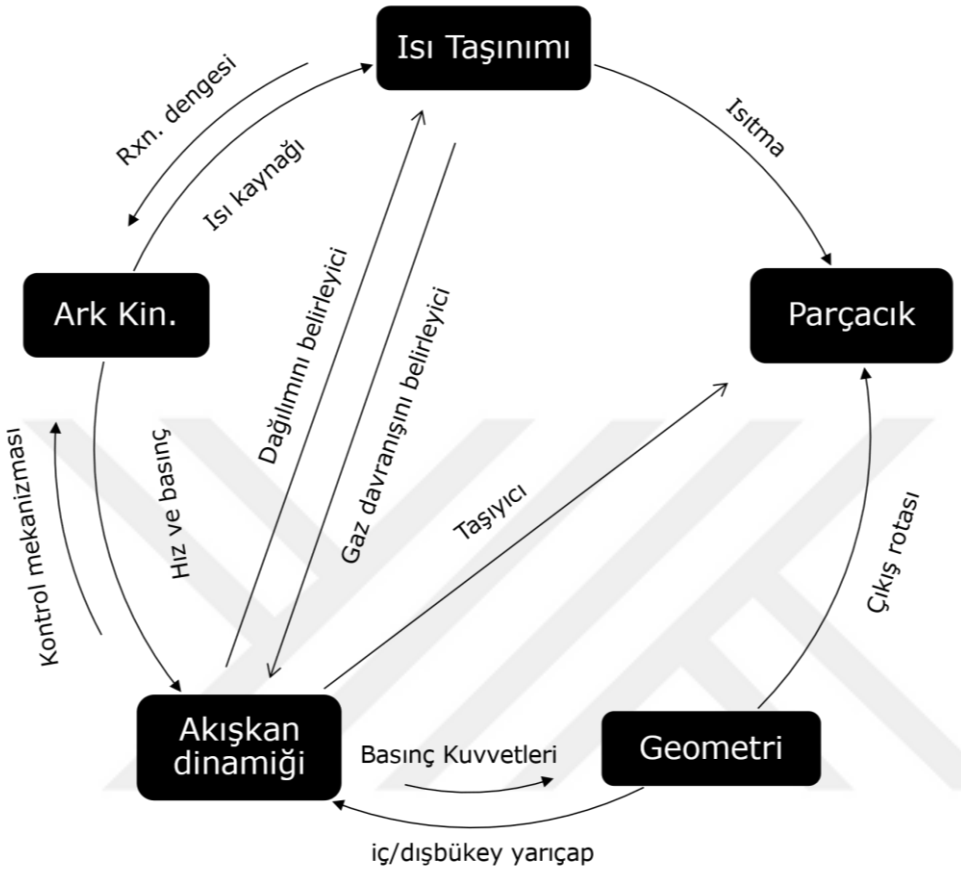
Şekil 1.6 : Mono-atomik ve di-atomik gazların karışım olarak birlikte bulunduğu durumda modların karışık görünmesi [19].

Plazma sistemlerinde anot katot ergimesi istenmemesine rağmen, tel beslemeli ark sistemleri tamamen anodun ve katodun ergitilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Anot ve katot olarak, 15-30° açılarla birbirlerinden milimetrenin birkaç onda biri mesafede konumlandırılan iki telin karşılıklı olarak ark edilmesi ile ergitme gerçekleşir. Teller, kaplama yapılacak metal alaşımın kendisidir ve oluşan ark ile ergitildikten sonra taşıyıcı gaz ile hedefe yönlendirilmektedir. Şekil 1.7, yüksek hızlı kamera çekimi sayesinde ergiyen ve atomize olan metal parçacıkları görüntülemektedir. Ergiyen metal alaşım, nozülden gelen basınçlı gaz ile atomize olmakta ve hedefe doğru sürüklenmektedir. Bazı parametre gruplarında birincil atomizasyona ek olarak ikincil ve üçüncül atomizasyona uğrayan parçacık dağılımı gözlenebilir [22]. Anot olan tel daha büyük damlacık oluşturmaya meyilli iken katot olan tel daha ufak parçalara bölünmektedir [23]. Ergiyen uçların yerine, sürekli beslenen yeni tel gelmektedir ve ark tekrar bağlantı kurarak püskürtme süregelmektedir. Plazma sistemi için geçerli ark mekanizmaları tel püskürtme için, anodun ve katodun eriyerek sürekli kopması sebebi ile sadece “tekrar vurma” olarak gerçekleşmektedir ve voltaj çok daha keskin şekilde “0” a yakın değere inmektedir [18]. Arkın sürekli kesilmesi ile emme kuvveti deşarj bulutuna yansımakta ve ortam gazının ark bulutuna daha erken karışmasına sebep olmaktadır [11]. Nitekim, bakır alaşımlarının tamamı atmosferik gaz kullanılarak püskürtüldüğü için ortam gazının (atmosferik hava), taşıyıcı veya ark gazı (atmosferik hava) ile karışması dikkate alınmamaktadır.

Şekil 1.7 : Tel püskürtme sistemi yüksek hızlı kamera kesiti [24].

Tel püskürtme sistemleri sade ekipmanlardan oluşur. Fakat ekipmanların sadeliği sürecin basitliği anlamına gelmemektedir. Tellerin ark alma dinamiği ve basınçlı gaz ile metal alaşımının atomizasyonu birbirine kapalı devre (recursive) olarak bağlı birçok

parametre etkisinde vuku bulmaktadır. Şekil 1.8'de verildiği üzere, kaplamanın tüm karakterini belirleyen parçacık dinamiği, en etkin parametre olan ark reaksiyon kinetiği ile doğrudan ve dolaylı olarak diğer tüm fiziksel olayların etkileşimi ile bağlıdır.



Şekil 1.8 : Tel püskürtme süreci için etkili parametreler ve etkileşimlerinin gösterimi.

Tüm parametrelerin açık olarak modellendiği bir sistem çözülebilir olmaktan uzaktır. Ark sıcaklığı ve alev derinliği ampirik veya 1 boyutlu modeller ile çözülerek ark için yerel termodinamik denge (LTE) kabulü yapılmaktadır [25]. Süreçte geçerli olan gazın (akışkan) yüksek sıcaklık termo-fiziksel özellikleri hesaplanarak manyeto-hidro-dinamik modellere yüklenmektedir. Belirli sıcaklıkta ark bölgesinden çıkan gaz için hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözülerek, elde edilen akış alanı üzerinde parçacık dinamiği analiz edilmektedir. Atomizasyon mertebesinin modellenmesi, tellerin ucunda akışkanın yarattığı yüzey yükü üzerinden ayrı modellerde hesaplanabilmektedir. Nitekim, belirli nozül geometrilerinin akışkanın hızını nasıl değiştirdiği, akım-voltaj girdilerinin ark sıcaklığını nasıl değiştirdiği ve tüm bu değişiklikler sonucu elde edilen akış alanı içerisinde parçacığın seyahati boyunca sıcaklık ile hız geçmişinin elde edilmesi ilgi duyulan ana unsurlardır. Modelleme, sürecin anlaşılmasında, özellikle süreç parametreleri ile kaplama özelliklerinin tahmin edilmesinde kolaylık sağlamaktadır ve deneysel çalışmalara ışık tutmaktadır.

1.2 Antibakteriyel Bakır

Bakteriler, Dünya'nın biokütlesinin %75'ini oluşturan mikroorganizma ailesidir [26]. Yararlı ise simbiyotik, zararlı ise patojen olarak isimlendirilen yaşayan organizmalardır. Bakteriler her 20 dakikada bir büyüyebilir ve bölünebilir. Tek bir bakteri 24 saatten az sürede 8 milyondan fazla hücreye çoğalabilir [27].

Bakteriler ile mücadelede iç kontrol yöntemleri ana olarak antibiyotiklerdir. Antibiyotiklerin etkileri yüksek olmakla birlikte, bakterilerin mutasyona uğrayıp direnç kazanmalarına paralel olarak antibiyotiklerin etkileri gün geçtikçe azaltmaktadır. Dış kontrolde ise yaygın olarak dezenfeksiyon (sıhhileştirme) ve fiziksel izolasyon öne çıkmaktadır. Dezenfeksiyon sürekli tekrar gerekliliği, işçilik ihtiyacı ve kimyasal tüketimi gerektirir. Dezenfeksiyon kimyasallarının bazılarına karşı bakteriler mutasyon geçirerek zırh oluşturmakta ve dayanım kazanmakta olduklarından ötürü, anti-bakteriyel yüzeyler, bakteri ile mücadelede sürekliliğin sağlanması için ihtiyaç duyulan eksikleri tamamlamaktadır [28].

Anti-bakteriyel etki, genel bir tabirdir. Aşağıdaki 3 temel sınıf anti-bakteriyel etki tiplerini özetlemektedir:

- Bakterilerin tutunmasını engelleyen yöntemler: Yüzey pürüzlülüğünün oldukça düşük tutulması, yüzeyin kaygan olmasını sağlamak veya yüzeyin belirli geometrik paterni ile bakterilerin, söz konusu yüzeylerde tutunamaması veya çoğalamaması prensibine dayalı uygulamalar [29]
- Dezenfeksiyon ve sterilizasyon yöntemleri: Aktif kimyasallar ile bakterilerin öldürülmesi veya pasifize edilmesini kapsayan uygulamalar [30]
- Bakterilerin zehirlenmesi ve/veya üremelerini engelleyen malzemeleri esas alan yöntemler: Bakterilerin zehirlenerek veya hücre bütünlüklerinin bozundurularak öldürülmesine olanak veren biyosidal uygulamalar [31]

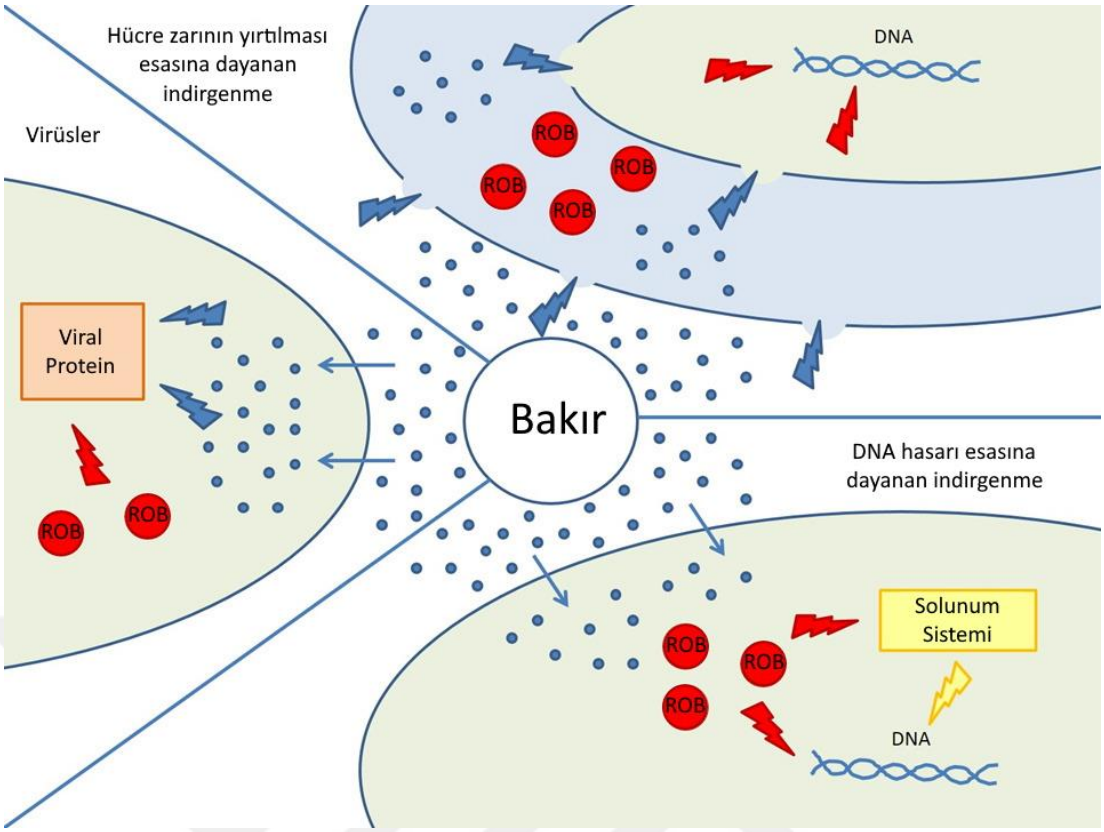
Dezenfeksiyon yöntemleri, belirli bakterilerin öldürülmesine olanak verir ve bakterilerin direnç kazanması ile etkinliği azalmaktadır. Sterilizasyon metotları, yaşayan tüm mikro-organizmaların öldürülmesini sağladığı için etkinliğini korumaktadır. Fakat sterilizasyon metotlarında kullanılan süreçler, belirli parçalara ve uyumlu malzemelere karşı sınırlıdır. Bakır, gümüş ve titanyum gibi elementler, sürekli temas edilen yüzeyler için en etkili 3'üncü grubu oluşturmakta fakat ihtiva ettikleri üretim zorlukları sebebi ile gerçek hayat içinde yerlerini dezenfeksiyon ve sterilizasyon yöntemlerine bırakmak durumunda olmaktadırlar. Üçüncü grup biyosidal uygulamalar, üretim teknikleri ve malzeme teknolojisi geliştikçe daha uygulanabilir olmakta ve buna paralel olarak gittikçe daha yaygın şekilde tercih edilmektedirler.

Biyosidal malzemeler arasında yaygın uygulanan gümüş ve titanyum dioksit, bakır karşısında belirli limitlere tabidir. Gümüş, bakır kadar etkin olmasa da [32], bakteri bünyesinde yüksek iyon birikimi sonucu bakterilerin sinir sistemi iletimini ve DNA replikasyonunu bozarak bakteriyi zehirlediği bilinmektedir [33]. Gümüşün anti-bakteriyel yüzey olarak uygulanmasında en büyük engel değerli maden olmasıdır. Gümüşün fiyatı, konvansiyonel uygulamalar için çok yüksek kalmaktadır. Ayrıca gümüşün anti-bakteriyel etkisinden ziyade anti-fungal etkisinden bahsetmek mümkündür [34]. Gümüş, daha ziyade, kötü kokuya sebep olan çok sınırlı sayıdaki bakteri türleri karşısında ve/veya yüzeylerde küf ve mantarın oluşmasına karşın etkin bir malzemedir [35].

Titanyum dioksit ise, ortamda bir UV kaynağının bulunması durumunda fotokatalitik etki ile hücre membranına zarar vermektedir [36]. Gümüşe kıyasla daha geniş bir bakteri çeşidine karşı etkin olsa da [37] sürekli bir UV kaynağına ihtiyaç duyması, titanyum dioksit uygulamalarını, kalıcı antibakteriyel temas yüzeyleri olarak gruplandırmaktan ziyade dezenfeksiyon uygulamalarına yakın tutmaktadır [38]. Klasik dezenfeksiyondan farkı, işlem için kimyasallardan değil UV ışın kaynaklarından faydalanmasıdır.

Gümüş ve titanyum dioksit ile karşılaştırıldığında bakırın etkin olarak bertaraf ettiği bakteri türleri geniş yelpazeye yayılmaktadır. Ek olarak, gümüş ile kıyaslandığında bakır alaşımları, maliyet avantajına sahip oldukları gibi daha erişilebilir malzemelerdir. Titanyum dioksit ile kıyaslandığında ise, bakır alaşımları, biyosidal etkilerini göstermek için herhangi bir dış enerjiye, kimyasala vb. ajana ihtiyaç duymamaktadır.

Şekil 1.9, bakırın, biyosidal etkisini açıklayan üç farklı teoriyi göstermektedir. Bakteri hücrelerinin beslenme/çözünme yolu ile bakırı bünyelerine almaları ve bakırın birikerek toksik etki göstermesi yaygın kabul edilen teoridir ve görselde virüslerin protein zincirine saldırı olarak gösterilmektedir. Bakır iyonlarının hücre yapısındaki hidrokarbonların bağlarına zarar vererek hücre membranının zayıflayıp yırtılmasına sebep olması diğer bir yaygın kabuldür. Bir diğer teori ise bakırın yüksek iletkenliği sayesinde sinir iletim sisteminde kısa devreye sebep olarak organizmanın yaşamsal fonksiyonlarını yitirmesine dayanmaktadır. Diğer bir deyişle, bakteri içerisine giren bakır eğer sinirsel elektriksel iletim sistemine doğru yerleşirse, reseptörlerin bulunduğu bölgelerde, bakır, elektrik sinyallerinin doğru tarafa iletimini engelleyerek veya iletiyi başka bir tarafa yönlendirerek hücrenin üreme, beslenme ve/veya solunum gibi yaşamsal fonksiyonlarından biri veya hepsini sekteye uğratabilir [39].



Şekil 1.9 : Bakırın reaktif oksijen bileşenlerinin (ROB) saldırılarına dayalı biyosidal etki mekanizmaları [39].

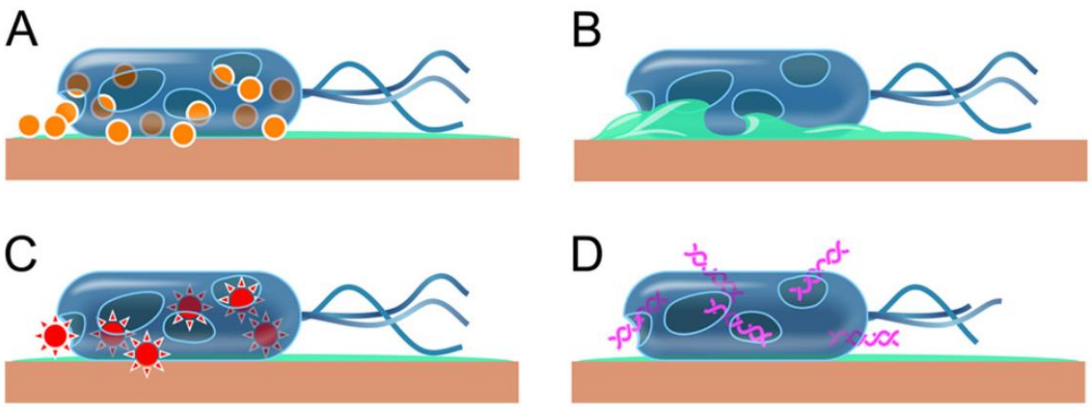
Bakırın toksisitesi büyük oranda, aerobik durumlarda bakırın Cu(I) ve Cu(II) oksidasyon durumları arasında redoks çevrimi yapması sonucu ortaya çıkan yüksek reaktiviteye sahip, DNA, protein ve lipit gibi biyomoleküllere doğrudan hasar veren hidroksil radikallerin, reaktif oksijen bileşenlerinin (ROB), oluşumundan ötürüdür [40].

$$H_2O_2 + O_2^- \rightarrow O_2 + OH^- + OH^* \tag{1.1}$$

$$Cu(II) + O_2^- \rightarrow Cu(I) + O_2 \tag{1.2}$$

$$Cu(I) + H_2O_2 \rightarrow Cu(II) + O_2 + OH^- + OH^* \tag{1.3}$$

Bakır iyonunun varlığı, dihidrojen peroksitin süper oksit ile (1.1)'de verilen, normalde ihmal edilecek kadar yavaş olan reaksiyon hızını yüksek derecede arttırmaktadır. Hidroksil radikalleri, Cu(II)'nin süper oksit ile indirgendiği (1.2) reaksiyonunu takip eden dihidrojen peroksit ile yükseltgendiği ardıl (1.3) reaksiyonu ürünüdür ve bakır iyonlarının bu iki reaksiyonu katalize ettiğine inanılmaktadır [41].



Şekil 1.10 : Bakteri ile bakır iyonlarının etkileşimi (A) Bakır iyonları hücre duvarına bağlanır (B) Hücre duvarı bakır iyonları etkisinde yırtılır (C) Reaktif oksijen bileşenlerinin reaksiyonunu bakır iyonları tetikler (D) Genomik ve plazmid DNA degradyasyona uğrar [42].

Hücre zarı yırtılması hasarı gözlemlenen bir olay olduğu için, bakırın hücre zarının bütünlüğünü bozarak bakterileri öldürdüğüne dair üretilmiş varsayım en yaygın kabulü görmektedir. Şekil 1.10'da bakırın hücre zarına verdiği hasarın çeşitli fazları görselleştirilmektedir. Hücre zarı; bakterilerin iç organ ve hücre sıvılarını dış ortamdan ayıran, birbirleri ile iletişimlerini sağlayan ve beslenmeleri için gerekli dış salgıları üreten en temel yaşamsal yapıdır. Hücre zarı temel olarak hidrokarbonlardan oluşan yarı geçirgen bir yapıdadır. Ortamda bakır iyonlarının bulunması durumunda, pozitif yüklü bakır iyonları yük dengesine gelmek isterler [43]. Bu nedenle bakır iyonları, hücre zarında bulunan hidrojen ve oksijenle bağ yapmak üzere hücre duvarı yakınlarındaki tiyol gruplarına bağlanarak nefes alma enzimlerini inhibe eder, hücre zarına saldırıda bulunurlar [42]. Hücre zarı bozunur ve bakteri organizma bütünlüğünü kaybetmesi sonucu hücre sitoplazması çevreye yayılarak çekirdeğin oksidasyonu gerçekleşir. Bu etkinin görünmesi için ortamda bakırın iyonik halde bulunması şarttır [44]. Bakırın iyonik hale geçmesi kuru ortam koşullarında beklenmemekle birlikte, bakterilerin beslenmek için kullandıkları hücresel sıvılar [45], ortamda bulunan nem veya vücut sıvısı, ter, kan benzeri çözelti ortamları bakırın iyonik olarak çözünmesine uygunluk sağlayabilmektedirler [46]. Bakır iyonlarının etkisi bakteri tipinden bağımsızdır ve DNA bozunumunu da sağlayarak çapraz gen taşınımına izin vermeyerek direnç oluşumunu engellemektedir [47]. Bakır, oksit formlarında iyon salınımı sağlayabilmektedir [48] ve tam oksitli bileşenlerinde dahi öldürme etkinliğini korumaktadır [49]. Bakır, termal sprey kaplama olarak yüzeylere uygulandığında, iç gerilimin yüksek olması sebebi ile iyonlar daha rahat deşarj olabilmektedir [50]. Buna ilave olarak poroz yapıdaki kaplamada bulunan mikro delikler oksijen salınımında ve bakırın çözelti taşınımında aktif pozitif rol oynarlar [51].

Hastaneler başta olmak üzere yaygın olarak insanların bir arada bulunduğu, ortak temas ettiği yüzeylerin olduğu ve havanın birlikte solunduğu alanlarda istenmeyen zararlı patojenlerin listesi, Amerika Sağlık Bakanlığına bağlı Hastalık ve Enfeksiyondan Korunma Merkezi tarafından aşağıda verildiği gibidir [52]:

- Acinetobacter baumannii
- Adenovirus
- Aspergillus niger
- Candida albicans
- Campylobacter jejuni
- Clostridium difficile (sporlar dahil)
- Enterobacter aerogenes
- Escherichia coli O157:H7
- Helicobacter pylori
- Influenza A (H1N1)
- Legionella pneumophila
- Listeria monocytogenes
- Meticillin-dayanımı Staphylococcus aureus (MRSA ve E-MRSA dahil)
- Poliovirus
- Pseudomonas aeruginosa
- Salmonella enteritidis
- Staphylococcus aureus
- Tubercle bacillus
- Vancomycin-dayanımlı enterococcus (VRE)

Listedeki tüm bakteri ve virüs tiplerinin, %65'in üzerinde bakır ihtiva eden alaşımlar tarafından kısa sürede etkin şekilde öldürüldüğü Uluslararası Bakır Birliği tarafından derlenmiş bilimsel makaleler ile beyan edilmektedir [53]. Tüm etkileşimin yüzeyde gerçekleşmesinden ötürü, bakırın kütlesel (bulk) formda olmasının performansını etkilememesi beklenir [54]. Ayrıca, bakteriler ile etkileşimi esnasında tüketilen bir reaksiyon söz konusu olmadığı için kütlesel formun kaplama gibi ince formlara nazaran bir avantajı olmadığı beklenmektedir [55].

1.3 Toksisite

Bakır canlı organizmalar için toksiktir. Amino asitler, vitaminler ve yağlar gibi metabolizmanın sağlıklı çalışmasını sağlayan temel de bir bileşendir. Mitokondri içerisinde bulunan sitokrom c oksidazı, bağ dokusundaki lisil oksidazı, beyindeki dopamin monooksijenazı ve seruloplasmin gibi aerobik metabolizmada etkin enzimlerin üretimi için katalizör etki sağlayan zorunlu bir girdidir [56]. Nitekim, metalik bir element olduğu için vücut tarafından sentezlenemez ve dışarıdan beslenme yolu ile alınması veya absorblanması gerekir [57]. Bir yetişkin için ortalama günlük bakır ihtiyacı 30 μg/kg/gün seviyesindedir [58]. Bakır, besinler ile vücuda girdiğinde büyük çoğunluğu mideden ve üst ince bağırsaktan vücuda geçmektedir [59]. Sağlıklı bir insanda, vücuda giren bakır miktarı ile ter ve üre yolu ile atılan miktar birbirine eşit olmakta, vücut içerisindeki bakır dengesi net denklikte seyretmektedir[60].

Bakır eksikliğinin nörolojik ve kalp hastalıklarını tetiklediği düşünülmektedir. Bakır fazlasının ise bakırın en çok birikim yaptığı karaciğerin iflasına ve sindirime dair mide problemlerine sebep olduğu bilinmektedir [61]. Vücutta bakırın fazla birikimi sonucu gözlenen ‘bakır zehirlenmesi’ne, bakır bağlantı elemanları ve boruları olan su hatlarında durağan halde beklemiş suyun içilmesi, bakır madenleri veya bakır madenlerinin veya alaşımlarının işlendiği üretim alanlarında bakır ve alaşımlarının toz formunda solunması durumlarında karşılaşılmaktadır [62]. Bakır kapların içine uygulanan kalayın, pişirme esnasında kullanılan sert karıştırıcılar ile sürtünmesi sonucu çizilerek yüzeyden kalkması nedeniyle asitli yiyeceklerin bakıra temas ederek bakırı çözdüğü ve çözünen bakırın insanların bünyelerine bu kaplardaki yiyecekler vasıtası ile geçtiği bilinmektedir.

Artan bakır kullanımına rağmen raporlanan duyarlılık vakalarının aynı oranda büyümemesinden ötürü, bakır, alerjik hassasiyet yaratmayan ve temas ile vücutta birikim yapmayan bir metal olarak bilinmektedir [57]. Raporlanan vakalarda, alerjen reaksiyonların kaynakları alaşım halinde bulunduğu diğer elementler nedeniyle [63], özellikle nikel için bildirilmektedir [64]. Nikele duyarlı kişiler için, ter ile temas anında oluşan iyonlara karşı sürekli salınımın 0.5 $\mu g/cm^2$/hafta oranını geçmemesi, REACH Regülasyonu XVII numaralı eki ile belirtilmiştir [65]. Bozuk paralarda, sürekli yapay ter ortamında test edildiğinde izin verilen değerden daha yüksek salınım yapan kupronikel alaşımları kullanılmasına rağmen, paraların, gerçek hayatta kişilerle temas sürelerinin kısa olması sayesinde, eşik birikime ulaşılmamaktadır [66].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE YÖNTEMLER

Deneysel çalışmaların ve kullanılan metotların anlatıldığı bu başlıkta, kaplama sürecinin bilgisayarda modellenmesi, kaplama sürecine ait parametrelerin model çıktılarına göre tayin edilmesi, kaplamaların yapılması, kaplamalar yapılırken yerinde (in-situ) parçacık karakterizasyonu, kaplamaların testleri ile karakterizasyonları ve üretim sürecine ait THS7 seviyesi pilot çalışmalar anlatılmaktadır. Bakteri testleri, karakterizasyonun ayrı bir bütünü olarak ele alınmaktadır.

Termal sprey kaplama deneyleri, yakınsak nozül başlığı takılan tel beslemeli ark sisteminde (GTV SParc 400) 1.6 mm çaplarında teller ile 4-eksen robotik tezgahta yapılmıştır. 4 eksen robotik tezgah, tez çalışması için, hareket hassasiyeti <1mm olacak şekilde tasarlanmış ve kalibre edilmiştir. Tezgah, 3 lineer eksende ve 1 adet de döner A ekseninde bilgisayar desteği ile kontrol edilmiştir. Çalışmaların tamamı Amerikan Termal Sprey Güvenlik Komitesinin belirlediği standartlara göre inşa edilmiş (Yönetmelik SG003-03) akustik izolasyon ve havalandırma hattına sahip, ıslak filtreli kabinde yürütülmüştür.

Proses ölçümünde, parçacık sıcaklığı ve hızı için infrared sensör düzeneği (Accuraspray G3C) kullanılmıştır. Hedef yüzey sıcaklığı takibi için PT100 sensöre sahip, 1°C hassasiyete kalibre edilmiş veri işlemci tasarlanmış ve üretilmiştir.

Hesaplama ve modelleme çalışmaları sonlu elemanlar yöntemine dayalı yazılım paketi ile (COMSOL Multiphysics) yürütülmüştür. Akışkan ve malzeme özellikleri literatürden faydalanılarak interpole edilmiştir. Geometrik çizimler sprey sisteminin demonte edilmesi ve sonrasında tersine ölçü alınması ile yapılmıştır. Süreç simülasyonunu takiben damlacık sıvanma ve katılaşma modeli de oluşturulmuştur.

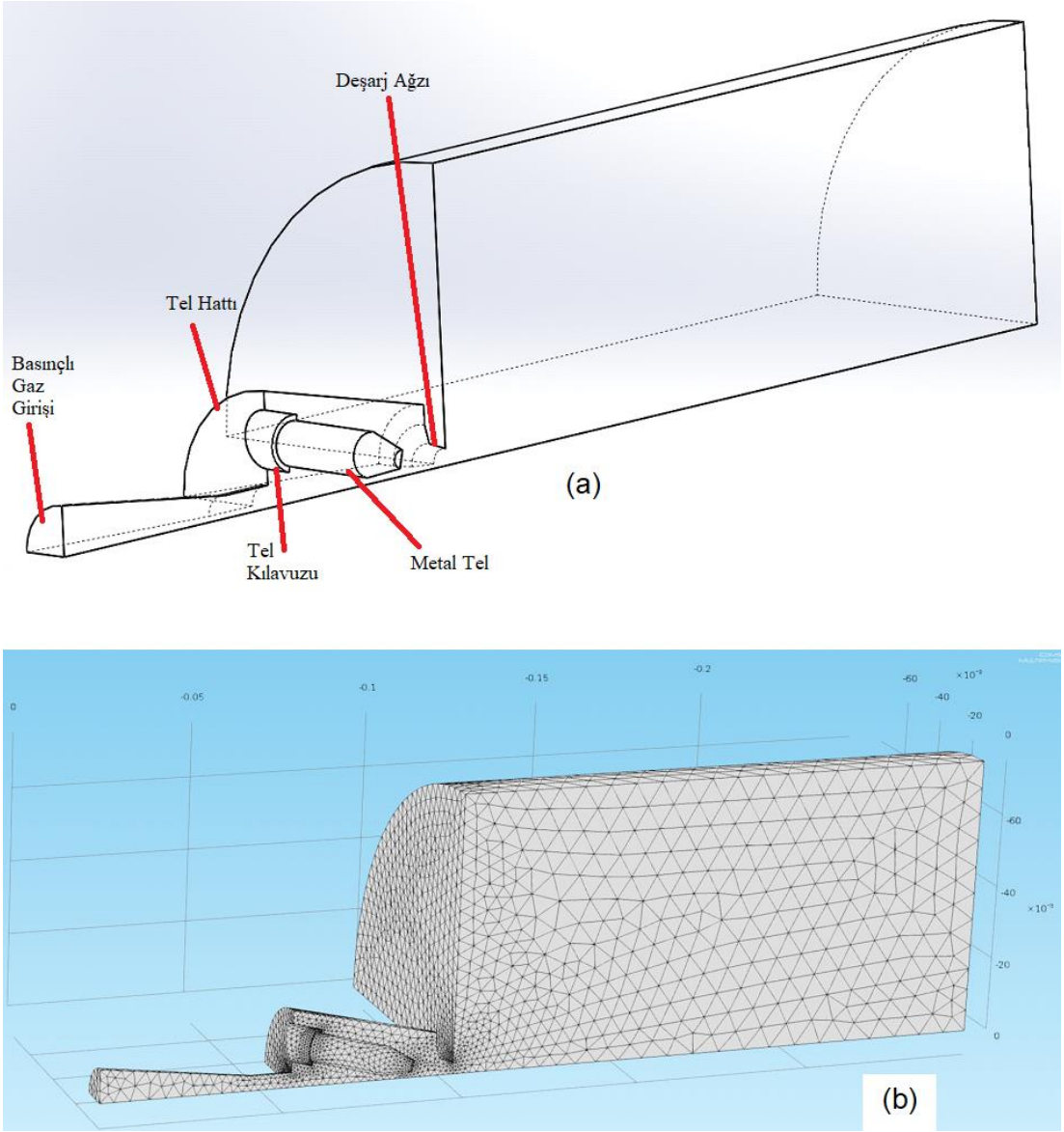
Kaplama karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu (JEOL 5410 ve JSM 700F FEG-SEM) kullanılmıştır. Yüzey profili 3-boyutlu optik profilometre (Veeco) ile alınmıştır. Kristolografik faz analizi XRD (Philips PW3710) cihazı ile yapılmıştır.

Bakteri deneylerinde klinik izole ve kayıtlı referans bakteri kolonileri kullanılmıştır. Çapraz kontaminasyon olmaması için bakteri deneyleri yapılan laboratuvar çalışmalar boyunca ayrılmış ve kapalı olarak muhafaza edilmiştir.

Tüm deneylerde referans yüzey olarak 316L paslanmaz çelik alınmıştır. Test kuponlarının tamamı 25,4 mm çapında ve 2 mm kalınlığında kesilerek kullanılmıştır.

2.1 Modelleme Çalışmaları

Sistemin geometrisinde, silindirik nozülden çıkan gaz hattına daldırılmış iki telin bulunması sebebi ile eksenel simetri mevcut değildir. Problem 3 boyutlu geometri ile çözülmelidir. Dikey ve yatay düzlemlerde mevcut olan simetri düzlemleri dikkate alınarak tasarım çeyrek simetride modellenmiştir. Hesaplama alanına nozül içi ile nozül dışında kalan deşarj hattı da eklenmiştir. Yüksek Mach sayısına sahip akış modelleri ile yaklaşılmıştır.



Şekil 2.1 : Hesaplama geometrisi, (a) çeyrek simetri gövde ve (b) örülmüş ağ.

Şekil 2.1, geometriyi ve kullanılan ağ örgüyü göstermektedir. Şekil 2.1.a'da hesaplama alanı görünmektedir. Şekil 2.1.b'de ise hesaplama alanına örülmüş birinci derece düzgün dörtyüzlü ağ elemanları gösterilmektedir.

2.1.1 Akış alanı simülasyonu ve taşıyıcı denklemler

Akış için girdi basınç değerlerine göre akışın tamamen türbülanslı olacağı öngörülmüştür. Yaygın olarak kullanılan k-ε türbülans modeli akış alanı için tercih edilmiştir. k-ε modeli, süreklilik denklemlerinin, kinetik enerji "k" ve onun dağılım oranı "ε" olmak üzere iki denkleme bölerek çözen bir yaklaşımdır ve duvarlara yakın alanlarda belirli tayin edilen katsayılar ile çözüm kararlılığını sağlamaktadır [67]. İzotermal olmayan rejimde çalışıldığı için akışkan yoğunluğu sıcaklığın fonksiyonu olarak enerji denklemlerinde bağlıdır ve sıkıştırılabilir akış yaklaşımı geçerlidir [68].

Akış simülasyonlarında ark sütununun yerel termodinamik dengede olduğu (LTE) kabul edilmiştir [69]. Ark'ın zaman ortalaması alındığında sabit ortalama değerde enerji girdisi verdiği kabulü ile ark gücü, sisteme toplam beslenen güce eşit alınarak tel uçlarından enerji yükü olarak tanımlanmıştır [70]. Manyeto-hidro-dinamik gövde denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{2.1}$$

$$\rho(\boldsymbol{v} \cdot \nabla \boldsymbol{v}) = \nabla \cdot \left[-p\boldsymbol{I} + \mu(\nabla \boldsymbol{v} + (\nabla \boldsymbol{v})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \boldsymbol{v})\boldsymbol{I}\right] + \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B} \tag{2.2}$$

$$\rho C_p(\boldsymbol{v} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k\nabla T) + \boldsymbol{J} \cdot \boldsymbol{E} + \frac{5k_B}{2e}\boldsymbol{J} \cdot \nabla T - Q_{rad} \tag{2.3}$$

$$\boldsymbol{E} = -\nabla \boldsymbol{V} \tag{2.4}$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma(\boldsymbol{E}) - \sigma \nabla V \tag{2.5}$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0}\nabla \times \boldsymbol{A}\right) + \sigma \nabla \boldsymbol{V} = 0 \tag{2.6}$$

Denge hali çözümü yapıldığı için denklem (2.1) kütle korunumu denkleminde zamana bağlı yoğunluk diferansiyeli kullanılmamaktadır [71]. Momentum korunumu için Navier-Stokes denklemine ek olarak Lorentz Kuvveti, denklem (2.2)'de görüldüğü üzere eklenmektedir [72]. Denklem (2.3)'te verilen enerji korunumu denklemine $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ terimi ile akım kaynaklı ısınma, $\frac{\mathbf{5k_B}}{\mathbf{2e}}\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\nabla}\mathbf{T}$ terimi ile entalpi taşınımı ve $-\boldsymbol{Q_{rad}}$ terimi ile net hacimsel radyasyon kaybı tanımlanmıştır [73]. Elektrik alan sadece voltaj

gradyanına ve ortamın iletkenliğine bağlı olarak denklem (2.4)'de verilmiştir. Elektrik alana göre Ohm kanunu denklem (2.5)'te verildiği haline indirgenmiştir. Manyetik alan denklemi Ohm kanununa, denklem (2.6)'da verildiği gibi $\boldsymbol{\sigma\nabla V}$ terimi ile bağlanmıştır [74].

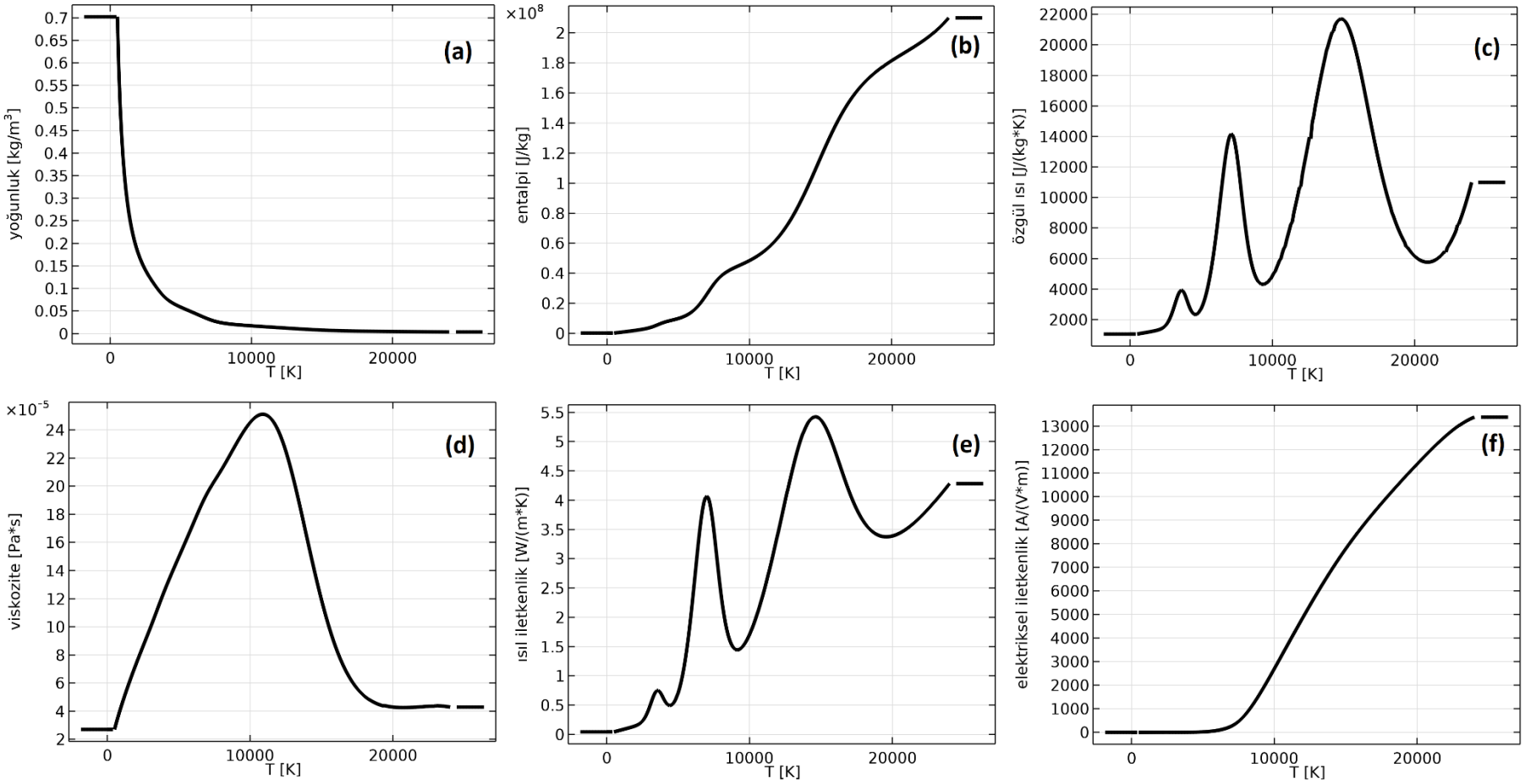
Şekil 2.1.a'da gösterilen basınçlı gaz girişi yüzeyine toplam manometre basıncı cihaza beslendiği değer ile girilmiştir. Deşarj hattının karşı duvarı olan hedef yüzey ve nozülün çıkışında bulunan bitişik duvarlarda termal yalıtım tanımlanmıştır. Deşarj alanının silindirik dış yüzeyi açık yüzey olarak atanarak atmosferik basınçta oda sıcaklığında hava girişi veya çıkışına izin verilmiştir. Anot ve katot uçlarında akışkan için momentum korunumu, denklem (2.7)'da verildiği üzere sıfıra eşitlenerek duvar tanımı olarak kullanılmıştır. Denklem (2.8), $|\mathbf{J_{iyon}}|\mathbf{V_i}$ terimi ile iyon bombardımanı kaynaklı ısınma, $|\boldsymbol{J_{elektron}}|\emptyset_c$ terimi ile saçılan elektronlar ile soğuma ve $\boldsymbol{\varepsilon\sigma_B T^4}$ terimi ile radyasyon kayıpları dikkate alınarak katot ucunda enerji korunumunu vermektedir [75]. Denklem (2.9), anot ucu için $|\mathbf{J}\cdot\mathbf{n}|\emptyset_\mathbf{n}$ terimi ile elektrik akısı kaynaklı ısınma (elektronlardan anoda transfer olan enerji) dahil edilerek enerji korunumunu vermektedir [76].

$$\boldsymbol{u} = 0 \tag{2.7}$$

$$-\boldsymbol{n}\cdot(-k\nabla T) = |\boldsymbol{J_{iyon}}|V_i - |\boldsymbol{J_{elektron}}|\emptyset_c - \varepsilon\sigma_B T^4 \tag{2.8}$$

$$-\boldsymbol{n}\cdot(-k\nabla T) = |\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{n}|\emptyset_n - \varepsilon\sigma_B T^4 \tag{2.9}$$

Şekil 2.2, hava için yüksek sıcaklık özelliklerinin simülasyonda kullanılan interpolasyon eğrilerini göstermektedir. Oda sıcaklığından 24.000K sıcaklığa kadar standart hava için teorik hesaplanan özelliklerden derlenmiştir ve **EK A** içerisinde yoğunluk, entalpi, özgül ısı [77], viskozite, termal iletkenlik [78] ve elektriksel iletkenlik değerleri [79] tablo haline sunulmuştur. Havanın, oksijen ve azottan oluştuğu göz önünde bulundurulur ise, di-atomik gazlarda olduğu gibi özgül ısı eğrisinde iki tepe yaratmaktadır [80]. Hava ideal gaz kanunlara uygun kabul edilmiştir [81]. Düşük sıcaklıklarda sayısal çözümleme yöntemlerinin kararlı olması üzere elektrik iletkenliği için sıfıra yakın değerler verilmiştir [82].



Şekil 2.2 : Hava için termofiziksel özellikler, (a) yoğunluk, (b) entalpi, (c) özgül ısı, (d) viskozite, (e) ısıl iletkenlik ve (f) elektriksel iletkenlik.

2.1.2 Parçacık yörüngesi üzerinde sıcaklık ve hız hesaplamaları

Malzemeye verilen akım ve voltaj değerlerinin malzemeyi kaç dereceye ısıttığı denklem (2.10) ile hesaplanarak parçacık simülasyonunda başlangıç sıcaklığı olarak kullanılmıştır.

$$Q_{buhar} = m \times Cp_{katı} \times \left(T_{ergime} - T_{başlangıç}\right) + (H_f + m \times Cp_{sıvı} \times \left(T_{kaynama} - T_{ergime}\right)) \quad (2.10)$$

Örnek olarak, denklem (2.10) kullanılarak, 1 kg bakırı kaynama noktasına kadar ısıtma için gerekli enerji 1.13277 MJ/kg olarak hesaplanmıştır. Bakır kaplama için 30V ve 100A beslenen bir sistemde ise toplam 1.2496MJ/kg enerji girdisi sağlanmaktadır. Gerekli olan enerjinin üzerinde verilen fazla enerji, deşarj esnasında malzemenin bir kısmının buharlaşmasına sebep olacaktır. Buharlaşan fraksiyon denklem (2.11) ile hesaplanır ve söz konusu şartlar için %2,47 kadar bir girdi malzemenin kaybı söz konusu olmaktadır.

$$Q_{in} = Q_{gereken} + f \times H_v \quad (2.11)$$

Tekrar denklem (2.10)'a dönülerek hesaplanan sıcaklık değeri 2805,39 ^{o}C olarak bulunmaktadır. Parçacık boyutundan bağımsız olarak teli terk eden tüm parçacıkların hesaplanan sıcaklık değerinde akış alanına giriş yaptığı kabul edilmektedir [83]. Elde edilen akış alanı üzerinde parçacıkların yörüngeleri ve geçmişleri, parçacık denklemleri ile hesaplanmıştır. Sırası ile, denklem (2.12) parçacık kuvvet dengesini, (2.13) parçacık ısı dengesini, (2.14) parçacık sürüklenme kuvvetini, (2.15) parçacık hız tepki süresini, (2.16) parçacık sürüklenme katsayısını, (2.17) parçacık için göreceli Reynolds sayısını, (2.18) parçacık konvektif ısı transfer katsayısını, (2.19) parçacık için Nusselt sayısını ve (2.20) parçacık faz dönüşümü için eşdeğer ısı kapasitesi değerini tanımlamaktadır [84]. Her parçacık üzerinde sürüklenme kuvveti ve ısı dengesi, faz dönüşümü dahil olarak hesaplanmaktadır. Parçacıklar tek yönlü olarak akış alanına bağlıdır. Parçacık-parçacık etkileşimi ihmal edilmektedir. Parçacıklar için sadece birincil atomizasyon geçerlidir. Diğer bir deyişle, seyahat yörüngeleri içerisinde ardıl atomizasyon dahil edilmemektedir [85].

$$m_P \frac{dv_P}{dt} = F_d \tag{2.12}$$

$$m_P c_{pp} \frac{dT_p}{dt} = h_s A_p (T - T_p) \tag{2.13}$$

$$F_d = \frac{1}{\tau_p} m_p (v - v_p) \tag{2.14}$$

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D Re_r} \tag{2.15}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + 0.15 Re_r^{0.687}) \tag{2.16}$$

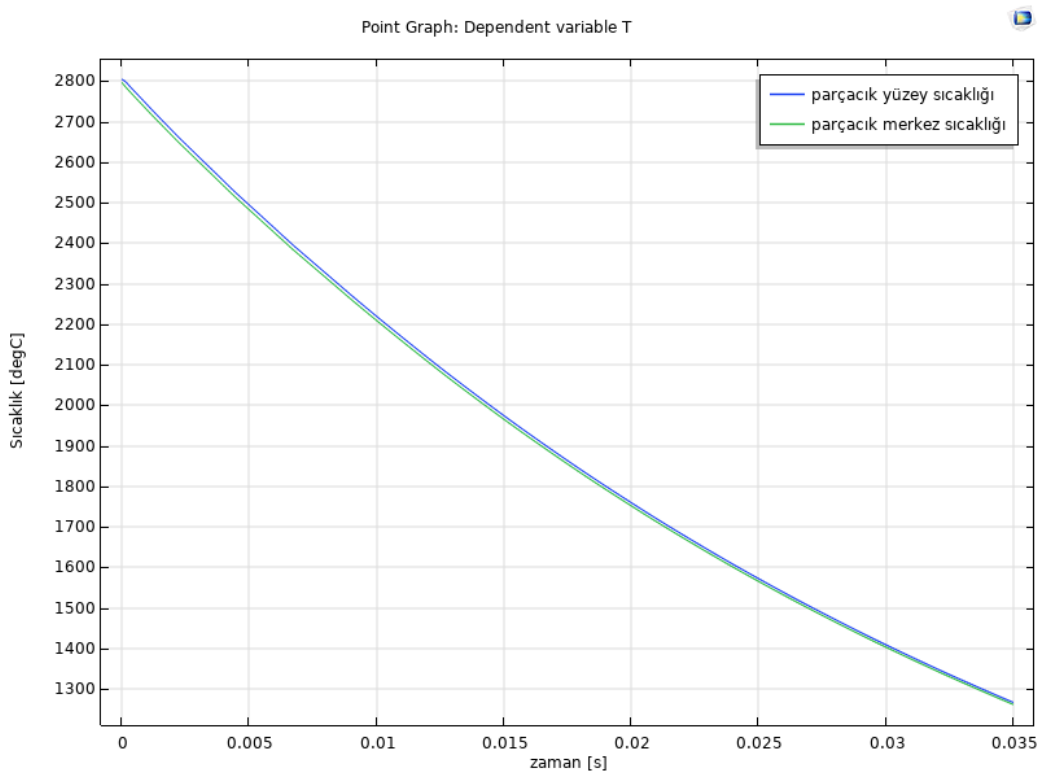
$$Re_r = \frac{\rho |v - v_p| d_p}{\mu} \tag{2.17}$$

$$h_s = \frac{kNu}{d_p} \tag{2.18}$$

$$Nu = 2 \left(1 + 0.3 Re_r^{1/2} Pr^{1/3}\right) \tag{2.19}$$

$$C_{pp} = C_{par} + \frac{dH_p}{dT_p} l_m \tag{2.20}$$

Parçacıklar mükemmel küre olarak kabul edilmiştir. Hacim boyunca homojen sıcaklığa sahip oldukları bir diğer kabuldür [86]. Parçacıklar için hesaplanan Biot sayısı, yüzey sıcaklığı ile merkez sıcaklığının eşit olduğunu, yüksek ısıl iletkenliğe sahip bir metal damlacıktan beklenildiği üzere teyit etmektedir [87]. Biot sayısı, örnek olarak, 150μm boyutundaki bir parçacık için 8.36×10^{-4} olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2.3, seyahat süresine bağlı olarak parçacığın yüzey ve merkez sıcaklıklarının geçmişini vermektedir ve Biot sayısı hesabının tutarlılığı ile yeterliliğini teyit etmektedir.



Şekil 2.3 : Parçacık için yüzey ve merkez sıcaklıklarının seyahat süresi boyunca geçmişi.

2.1.3 Damlacık sıvanma ve soğuma hesaplamaları

Literatürde benzer damlacık problemleri çeşitli ölçeklerde ele alınmıştır. Atomizasyon esnasında damlacık oluşumunun detaylı ele alındığı modellerde, sıvı yüzeyinden kopma simülasyonları mevcuttur fakat tez kapsamı içerisinde bulunmadığı için ele alınmamıştır ve birincil atomizasyon kabulü ile ortalama parçacık çapı tüm modelleme çalışmalarında esas alınmıştır. Bazı araştırmacılar yörünge esnasında çekirdeklenme ve katılaşma modelleri çalışmışlardır [88], nitekim, önceki başlıklarda verildiği üzere, metal malzemeler ile tel püskürtme süreci prensiplerinde çalışıldığında, parçacık merkez sıcaklığı ile dış çeper sıcaklığı birbirlerine eşit seyretmektedir ve yörünge boyunca çekirdeklenme söz konusu olmamaktadır. Parçacık davranışları, faz dönüşümleri, yayılma ve saçılma kinetiklerine dair literatürde mevcut çalışmalarda oldukça kontrollü deneyler ile hem ampirik modeller elde edilmiş hem de kabul görmüş sayısal yöntemler doğrulanmıştır [89]. Tekil parçacık davranışı, çarpışma açısı, yarı ergiyik fazda sıvanma [90] gibi varyasyonlar için de irdelenmiştir. Çoklu parçacık yığılması ve katılaşmış damlacık üzerine ergiyik damlacık konumlanması, tekil parçacık için model geliştiren birçok araştırmacı tarafından da ele alınmıştır ve tekil parçacık sonuçlarına paralel, olumlu sonuçlar elde edilmiştir [86]. Yığılma sonucu parçaya geçen ısı ve ısının birikimi simülasyonları, damlacık kinetiği dışarıda

bırakılarak ısı taşınımı problemi kapsamında çözülmektedir ve altıktaki sıcaklık gradyanları elde edilerek kaplama katmanı ile altlık arasındaki çekme gerilmeleri hesaplanmaktadır [91]. Elde edilen gerilme sonuçları sayesinde olası kalıntı gerilme öngörüleri elde edilmektedir [92]. Kaplama boyunca parçacık yığılması, bütün çalışmalarda altlık yüzey hızı, parçacığa göre çok düşük kaldığı gerekçesi ile ihmal edilmiştir.

Akışkan alanına dayalı parçacık yörünge geçmişi hesaplamalarından elde edilen sıcaklık ve hız değerleri, hedefe varan damlacığın başlangıç değerleri olarak kullanılarak, damlacığın şekil değişimi, sıvı-katı faz dönüşümü de dahil şekilde hesaplanmıştır. Faz-alanı yaklaşımı (phase-field method), faz ara yüzü takibi için kullanılmıştır. Eksenel simetride mükemmel küre olarak kabul eden damlacığın temas ettiği hedef altlık için çelik malzeme atanmıştır ve pürüzsüz kabul edilen temsili yüzeyde ısıl direnç terimi ihmal edilmiştir. Model geometrisi Şekil 2.4 ile verilmektedir ve çizilen geometri için kullanılan ağ-örgü Şekil 2.5'te sunulmaktadır.

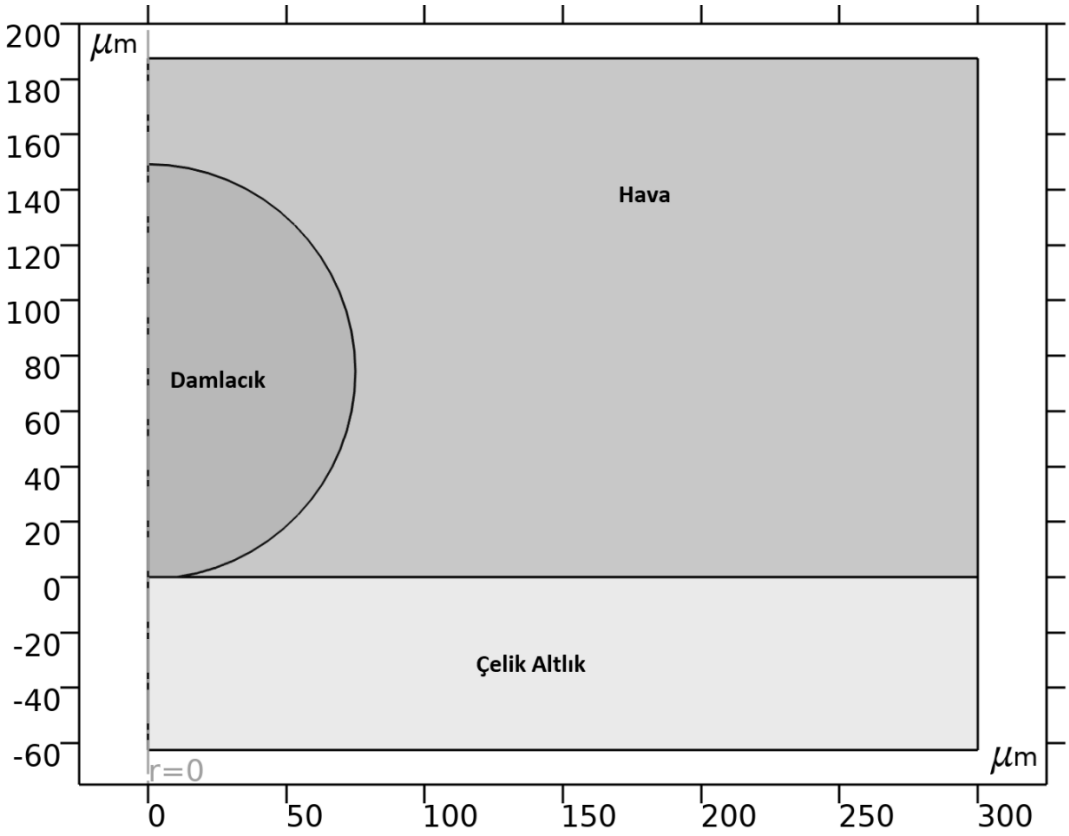
$$\nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{2.21}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} \rho(\boldsymbol{v} \cdot \nabla \boldsymbol{v}) = \nabla \cdot [-p\boldsymbol{I} + \mu(\nabla \boldsymbol{v} + (\nabla \boldsymbol{v})^T)] + F_s + \rho g \tag{2.22}$$

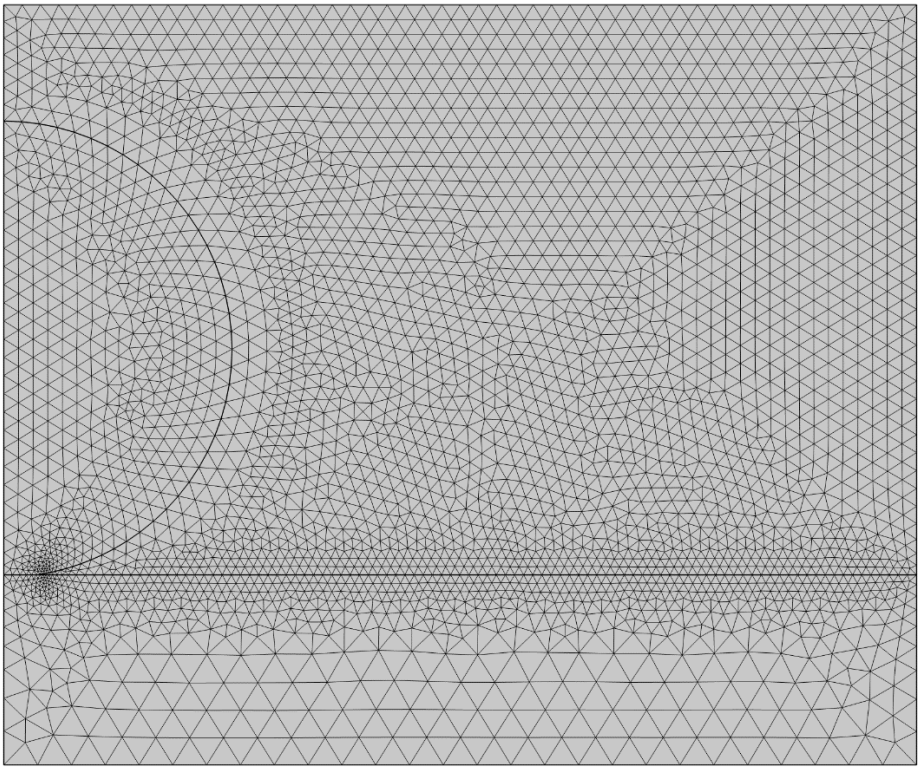
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p v \nabla T - \nabla(k \nabla T) = 0 \tag{2.23}$$

Damlacık ve etrafındaki hava, kütle korunumuna tabi (2.21) laminar akışa ait Navier-Stokes denklemleri ile zamana bağlı olarak sadece akışkan gövdeler için tanımlanmıştır (2.22). Enerji denkliği de (2.23) keza, zamana bağlı olarak fakat tüm katı ve sıvı fazlar için tanımlanmıştır.

Faz ara yüzü takibi faz-alanı yöntemi ile ele alındığı üzere tek bir Navier-Stokes denklemi yeterli olmaktadır ve elde edilen akış alanı üzerinde, faz değişkeni ϕ ile faz takibi yapılarak malzeme özellikleri ayrıştırılmış şekilde verilmektedir. Faz ara yüzü değişkeni dördüncü derece kısmi diferansiyel denklem olan Cahn-Hilliard denklemi ile çözümlenmektedir ve bu denklem iki adet ikinci derece denkleme, (2.24) ve (2.25), bölünerek ele alınmaktadır [93]. Level-Set yöntemlerinde ara yüz, akış alanı ile sürüklenir iken faz-alanı yönteminde ise akış alanı ile sürüklenmeye dahil olarak, (2.24), ara yüz üzerinde toplam sistem enerji kaybı da (2.25), hesaplanmaktadır [94].



Şekil 2.4 : Damlacık simülasyonu için eksenel simetride model geometrisi.



Şekil 2.5 : Damlacık simülasyonu için ağ-örgü.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \upsilon \nabla \varphi = \nabla \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \tag{2.24}$$

$$\psi = -\nabla \varepsilon^2 \nabla \varphi + (\varphi^2 - 1)\varphi \tag{2.25}$$

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{\lambda}{\varepsilon} \tag{2.26}$$

$$G = \frac{\lambda \psi}{\varepsilon^2} \tag{2.27}$$

$$F_s = G \nabla \varphi \tag{2.28}$$

Yüzey geriliminin, karışım enerji yoğunluğu ve ağ-örgüye ölçekli ara yüz kalınlığı ile ilişkisi denklem (2.26) ile tanımlanmıştır. Denklem (2.27)'de verilen, sistemin kimyasal potansiyelinin, faz değişkeni gradyanı ile çarpılması sonucu yüzey gerilim kuvveti, denklem (2.28)'de verildiği şekilde elde edilir ve Navier-Stokes denklemine, (2.22), kuvvet olarak eklenir. Yoğunluk ve viskozite için hacimsel ortalama (2.29) ve (2.30) denklemlerinde verildiği şekli ile kullanılmıştır.

$$\rho_t = \rho \varphi + \rho_{dr}(1 - \varphi) \tag{2.29}$$

$$\mu_t = \mu \varphi + \mu_{dr}(1 - \varphi) \tag{2.30}$$

Damlacık içerisindeki faz dönüşümü, görünür ısı kapasitesi formülasyonu ile, tek bir ısı taşınımı denkleminde farklı malzeme özellikleri kullanılarak tanımlanmıştır [95]. Isı kapasitesi dağılımı faz fraksiyonu cinsinden denklem (2.31) ile verilmektedir. Görünür ısı kapasitesi denklem (2.32) ile hesaplanmakta ve özgül ısıların oranı denklem (2.33) ile verilmektedir.

$$C_L(T) = L \frac{d\alpha_m}{dT} \tag{2.31}$$

$$C_{pp} = \frac{1}{\rho_{tp}} \left(\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2} \right) + C_L \tag{2.32}$$

$$\gamma_r = \frac{\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2}}{\theta_1 \rho_1 \frac{C_{p,1}}{\gamma_1} + \theta_2 \rho_2 \frac{C_{p,2}}{\gamma_2}} \tag{2.33}$$

$$k_t = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \tag{2.34}$$

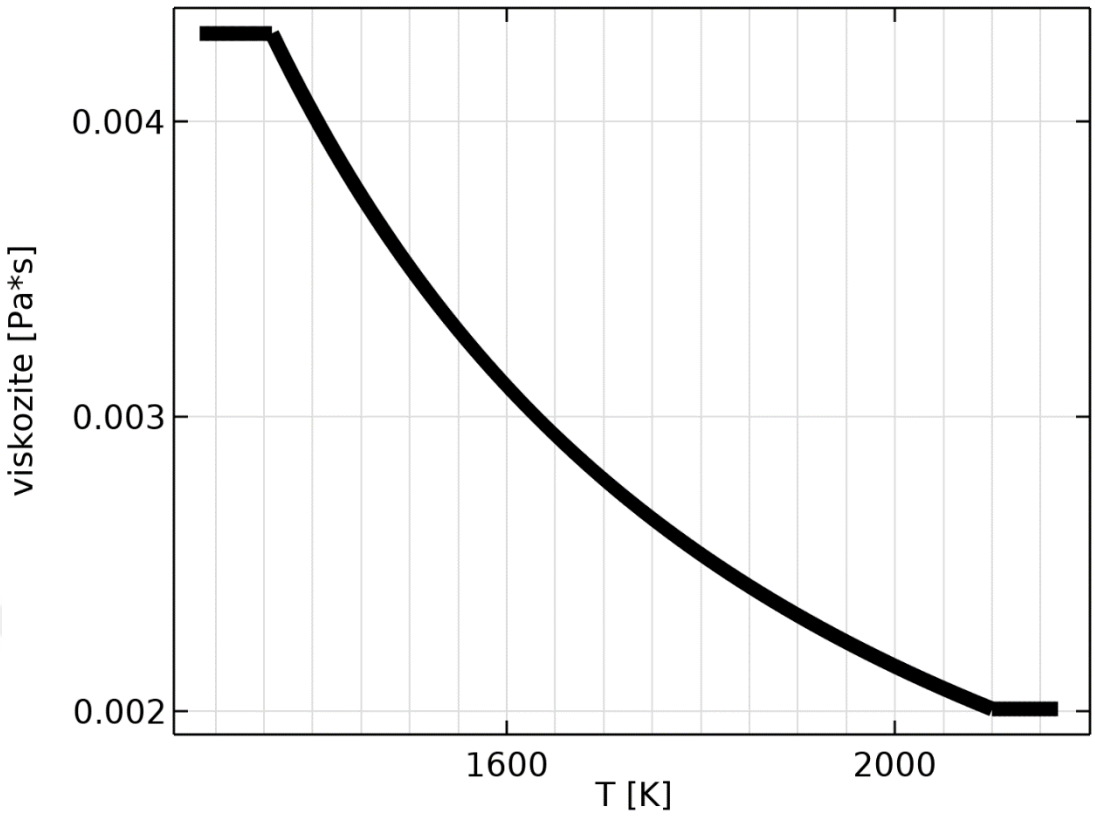
$$\rho_{tp} = \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 \tag{2.35}$$

Damlacığın faz dönüşümüne ait efektif malzeme özellikleri, faz indikatörü olan θ fraksiyonları ile çarpılarak denklem (2.34) ve (2.35) ile elde edilmektedir.

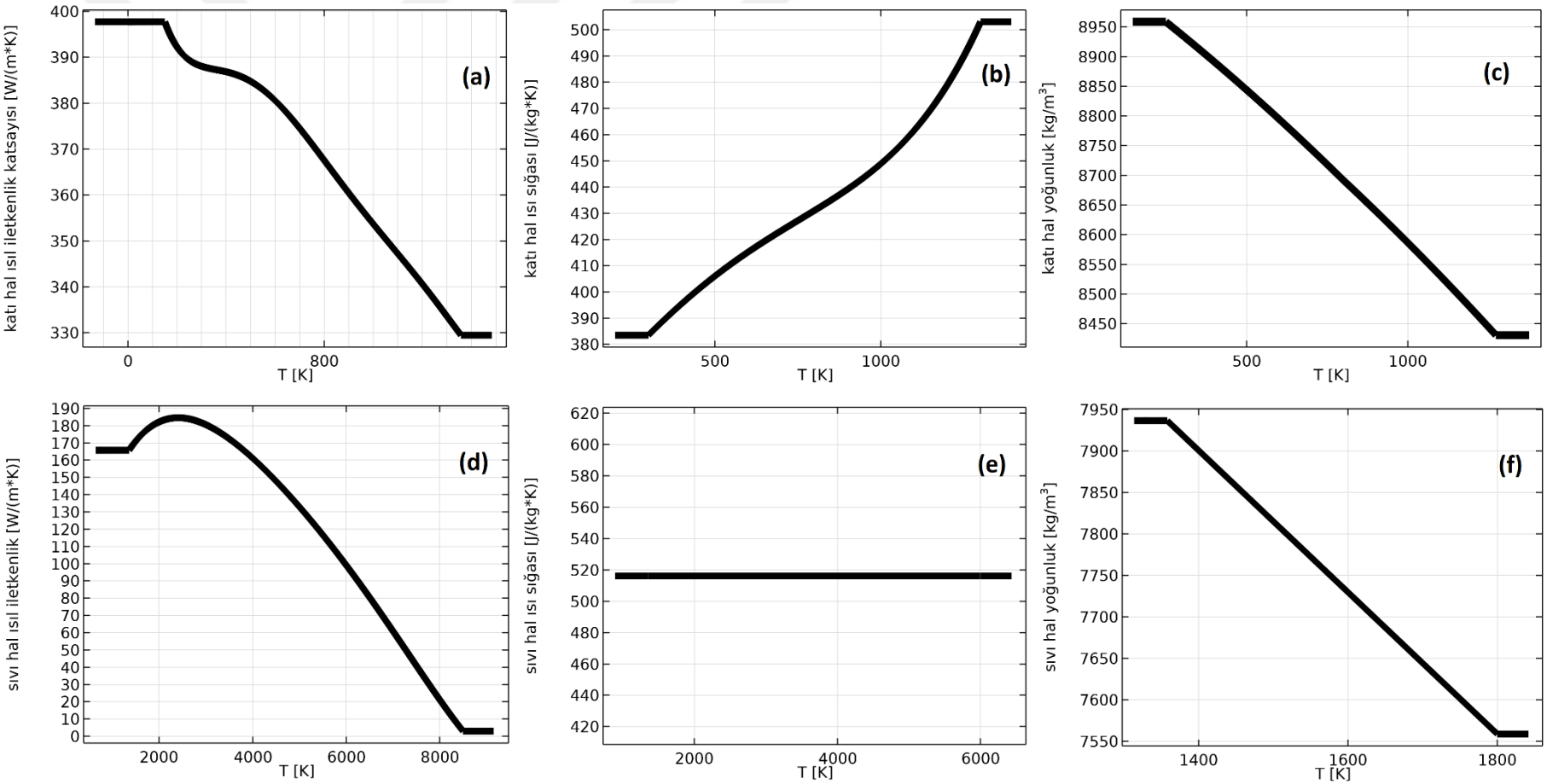
Literatürde incelenen tüm çalışmalarda damlacık malzeme özellikleri sabit fonksiyonlar ile tanımlanmış olmasına nazaran mevcut çalışma kapsamında malzeme özellikleri, hassasiyete olumlu katkı sağlaması hedeflenerek sıcaklığın fonksiyonu olarak bulunarak kullanılması tercih edilmiştir. Malzemelerin kullanılan özellikleri katı ve sıvı faz için ayrı olarak tanımlanmıştır. Sıvı faz için kullanılan viskozite [96], ısıl iletkenlik katsayısı [97], ısı kapasitesi [98] ve yoğunluk [99] ile katı faz için kullanılan ısıl iletkenlik katsayısı [100], ısı kapasitesi [101] ve yoğunluk [102] fonksiyonları EK B içerisinde verilmektedir. Viskozite için elde edilen sıcaklığa bağlı eğri Şekil 2.6 ile verildiği üzeredir. Söz konusu diğer malzeme fonksiyonlarına göre elde edilen eğrilerin tamamı Şekil 2.7 ile katı ve sıvı faz için sunulmaktadır. Termodinamik faz dengesi için kullanılan ergime noktası [103] ve ergime ısısı [104] verileri ile sıvı faza ait yüzey gerilimi [105] Çizelge 2.1 ile sunulmaktadır.

Çizelge 2.1 : Bakır için malzeme özellikleri.

Özellik	Değer
Ergime noktası	1083,85 °C
Ergime ısısı	206 kJ/kg
Yüzey gerilimi	1.35 N/m



Şekil 2.6 : Sıvı bakır fazı için sıcaklığa bağlı viskozite eğrisi.



Şekil 2.7 : Bakırın katı hali için (a) ısıl iletim katsayısı, (b) ısı sığası, (c) yoğunluk ve sıvı hali için (d) ısıl iletim katsayısı, (e) ısı sığası ile (f) yoğunluk özellikleri.

2.2 Kaplama Çalışmaları

Anti-bakteriyel etkinin araştırılması ve ispatlanması için saf bakıra ek olarak alüminyum bronzu, pirinç, bronz ve nikel-gümüş alaşımları seçilmiştir. Çizelge 2.2 ile seçilen alaşım tellerin ve altlık numunenin kaplama öncesinde optik emisyon spektrometresi ile tayin edilmiş kompozisyonları ağırlık yüzdeleri ile verilmektedir. Kompozisyonlar, üreticilerin beyan ettiği ve literatürde kabul görmüş standart alaşımlar ile paraleldir.

Çizelge 2.2 : Kaplama alaşımları ve altlık malzemesinin %ağ. kompozisyon analizi. Kalan element yüzdesi "kl" ile gösterilmektedir.

Alaşım	Ni	Fe	Cr	Mo	Al	Si	Mn	Sn	Cu	Zn	P	S	C
Cu									99,8				
Cu-Al					7,7		0,2		kl				
Cu-Zn									kl	37			
Cu-Sn								6,7	kl				
NiCuZn	18								kl	12			
316L	9,9	kl	17,8	1,46		0,8	1,9		0,13		0,02	0,8	0,03

Kaplamaya hazırlanacak yüzeyler 36 grit Al_2O_3 kum ile 4 bar basınç altında standart konverjent (yakınsak) nozüle sahip tabanca ile kumlanmıştır. Kumlama sonrasında yüzeyler, kuru ve yağsız basınçlı hava ile temizlenmiştir. Kumlama sonrası numuneler tezgaha bağlanmış ve tezgah üzerinde kaplama öncesinde elektrikli ısıtıcı ile 90 ^{o}C sıcaklığa ısıtılarak yüzeydeki nem giderilmiştir. Kumlama sonrası kaplama işlemine kadar 1 saatten az sürede kaplama süreci uygulanmıştır.

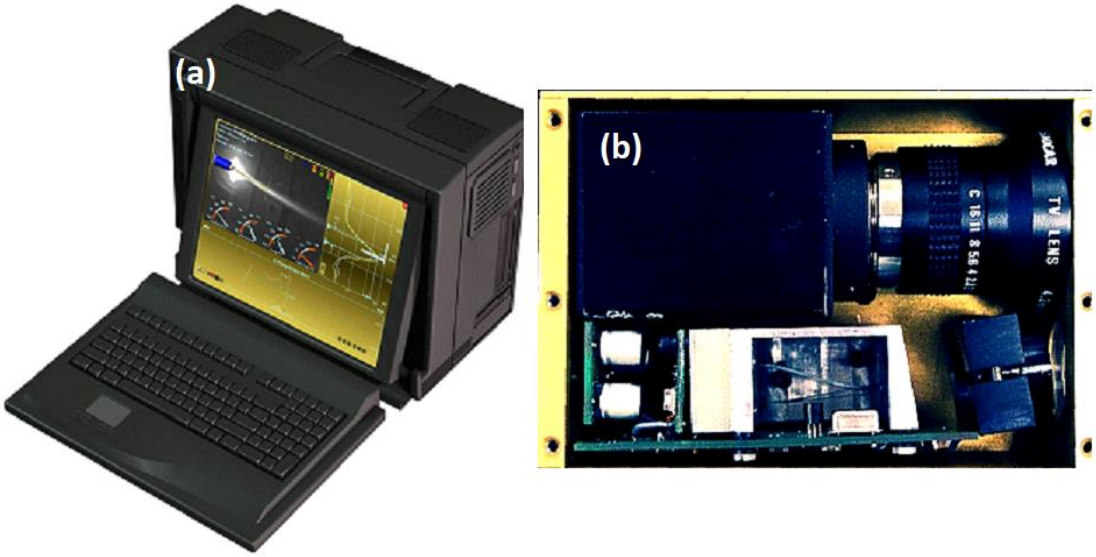
Kaplama sürecinde etkili parametreler içerisinde bulunan tezgah hızı ve adım aralığı tüm kaplama çalışmalarında sabitlenmiştir. Tezgah hızı, kaplama cihazı üreticisi firmanın tavsiye ettiği yüzey hızı için, numunelerin bağlandığı silindir çapına göre

hesaplanmıştır ve 137 m/dk olarak ayarlanmıştır [106]. Üretici firma tarafından, kullanılan nozül tipine bağlı püskürtme açısına göre 3 mm verilen adım aralığı değeri yerine, püskürtme deneylerinde elde edilen çizgi kalınlığı ölçümleri esas alınarak tayin edilen adım aralığı, tüm çalışmalarda 3.2 mm olarak kullanılmıştır.

2.2.1 Parçacık ortalama sıcaklık ve hız ölçümü

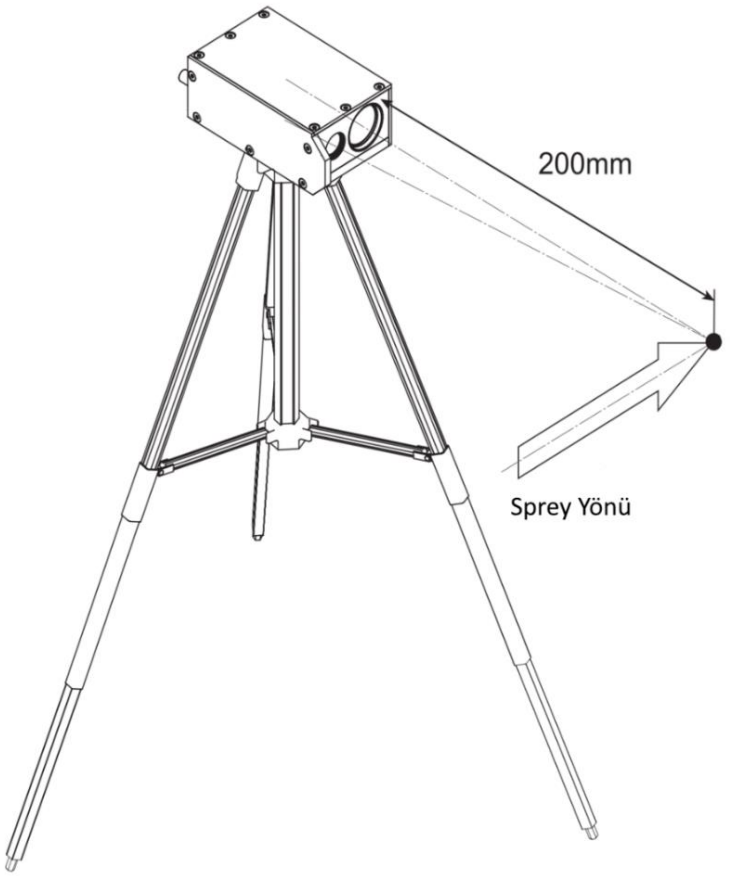
Simülasyon çalışmaları sayesinde süreç ve parametre ilişkileri detaylı anlaşılmıştır. Alaşımlar için tayin edilecek voltaj-akım parametreleri simülasyon ile daraltılmıştır. Simülasyon sayesinde artan voltaj ile parçacık sıcaklığının, artan akım ile deşarj olan malzeme miktarının yükseldiği bilinmektedir. Kaplanan altlık malzemesi tüm deneylerde standart 316L olarak sabitlense dahi, diğer altlık malzemelerin kaplanması için hedef mesafesi simülasyon ile tayin edilebilmektedir. Çalışmalarda simülasyon validasyonu için tüm parametrelerde, parçacık ortalama hız ve sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

Tüm ölçümler Tecnar AccurasprayG3 sistemi ile yapılmıştır. Şekil 2.8'de gösterildiği üzere sistem, diz üstü bilgisayar ve veri işleyiciden oluşan bir kontrol ünitesi ile sensör ünitesinden oluşmaktadır. Sensör ünitesi, (üstte) filtre gömülü kamera ve (altta) infrared sensörden oluşmaktadır. CCD kamera plazma bulutunun konumunu, kalınlığını ve uzunluğunu ölçerken sensör ise parçacıkların radyasyon ile saçtığı şiddeti gerçek zamanlı olarak kaydetmektedir. Sistemde, H (yüksek emisyon algılayıcı) sensör kiti kullanılmıştır.



Şekil 2.8 : Ortalama parçacık hızı ve sıcaklığı ölçüm sistemi, (a) kontrol ünitesi ve (b) sensör ünitesi [107].

Sensör sistemi, ölçüm alanı olarak adlandırılan, püskürtme alanına dik düzlemde 20mmx25mm'lik bir alan içerisinden ölçüm almaktadır. Radyasyon ile oluşan kaybın ihmal edilebileceği kadar küçük aralıklarda, ölçüm alanı içinde takip yapan sensörler, aynı radyasyon değerini veren parçacığın mikro saniye sonraki konumunu kaydederek hızını hesaplamaktadır [108]. Aynı zamanda, okunan radyasyon değerinden de parçacık sıcaklığı hesaplanmaktadır [109]. Ölçümlerin yapıldığı alanda farklı hızlarda ve boyutlarda partiküller bulunduğu göz önünde bulundurulursa, büyük parçacıkların daha çok yayınım yaparak daha görünür olduğundan daha çok ölçüldüğünü veya soğuk parçacıkların da ufak görünerek ölçümde gürültü yayılabileceği beklenebilir [110]. Literatürde yapılan testlerde ve üreticinin açıklamasında tam olarak bu sapmanın ortalama çap için bir değer vereceğini ve sorunsuz okunabildiği beyan edilmiştir [111].



Şekil 2.9 : Sensör kafasını püskürtme yönüne göre konumu [10].

Şekil 2.9, sensör kutusu ile püskürtme alanında alınan ölçüm noktası konumunu göstermektedir. Sensör kutusu, odağı gereğince, ölçüm alınması üzere ilgi duyulan noktaya 200mm mesafede konumlandırılmaktadır. Kaplama deneylerinde ölçüm noktası, yansıyan ve seken parçacıkların ölçümü etkilememesi üzere hedeften en az 25,4 mm ötesinde konumlandırılmaktadır [112].

2.2.2 Kaplama parametreleri

Kaplama parametreleri, kaplama malzemelerine göre belirlenmektedir. Kaplama malzemesinin elektrik direnci, ark bacağının oluşması için gerekli eşik potansiyel değerini tayin etmektedir. Artan potansiyel farkı ile oluşan ark sıcaklığı da doğru orantılı artmaktadır. Ark ile ergitilen malzeme basınçlı gaz ile püskürtüldükten sonra ark bağlantısı kopmaktadır. Sürekli beslenen tel formundaki malzeme sayesinde ark bağlantısı tekrar kurulmaktadır ve süreç kendini tekrarlamaktadır. Telin beslenme hızı, ergiyen malzeme arkasından yeni malzemenin ne kadar kısa zaman aralığı ile yerine konulduğunu belirlemektedir. Yeniden konumlanan malzeme ile oluşan arkın kendini tekrar etme frekansı, tel besleme hızı ile artmaktadır. Her ark oluşumu, elektron taşınımının olduğu bir penceredir ve birim zamanda birim kesitten geçen elektron miktarı, tanımı gereği amperi vermektedir. Dolayısı ile, ark frekansının artışı amper artışı olarak sonuçlanmaktadır. Diğer bir deyişle, tel besleme hızı ile amper doğru orantılıdır. Akım ve beslenen telin arasındaki prensibe göre, artan akım ile, ergiyik malzeme deşarjı lineere yakın ilişki ile artmaktadır [113]. Tekrar belirtmek gerekir ki, artan akıma paralel olarak, malzemenin öz direncinin yüksek olması, akım kaynaklı ısınmaya olumlu katkı sağlamaktadır ve malzemenin, direnci düşük malzemelere kıyasla daha fazla ısınmasına sebep olmaktadır.

Çizelge 2.3 : Kaplama alaşımları için seçilen parametreler.

Alaşım	Potansiyel, V	Akım, A	Gaz Basıncı, bar	Mesafe, mm
Cu	30	100	4	150
Cu-Al	31	100	5	120
Cu-Zn	31	150	4	150
Cu-Sn	31	200	5	180
NiCuZn	32	200	4	180

Tez çalışması sırasında yapılan deneylere ait parametre setleri, ölçümleri ile birlikte EK C içerisinde sunulmaktadır. Çizelge 2.3'te, yapılan ön deneylerin optimizasyonu sonrasında elde edilen optimum kaplama parametreleri ile seviyeleri verilmiş ve sıralama, artan elektrik direncine göre yukarıdan aşağıya yapılmıştır. Uygulanan potansiyel farkı değerleri, beklenildiği üzere artan dirence paralel şekilde yükselmektedir. Nihai kaplamanın %10'dan az poroziteye sahip olması üzere gaz basıncı tayin edilmiştir. Tüm kaplamaların 50-120 μm kaplama kalınlıkta olması için

gerekli malzeme deşarjını sağlayacak akım değerleri ile çalışılmıştır. Oksit miktarının düşük olduğu en uzak konumlar kaplama hedef mesafesi olarak seçilmiştir. Uzak hedef mesafe tercihi, farklı altlık malzemeleri kullanılması durumunda düşük ısıl yük aktarımı için tercih edilmektedir.

2.3 Antibakteriyel Etkinlik Testleri

Anti-bakteriyel testlerinin tamamı İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi Tıbbi Mikrobiyoloji Anabilim Dalı bünyesindeki laboratuvarlarında, Environmental Protection Agency (EPA-800R09004) - Test Method for the Continuous Reduction of Bacterial Contamination on Copper Alloy Surfaces (Bakır alaşımı yüzeylerde bakteri birikiminin sürekli olarak indirgenmesi) test prosedürünü modifiye edilerek yürütülmüştür. Tüm testler dinamik olmayan şartları yansıtmaktadır. Ek olarak, yeni taze koloniler, önceki koloniler temizlenmeden eklenmiştir ve bu sayede yüzeylerin etkinliğinin sürekliliği kontrol edilmiştir. Tüm test numuneleri, kaplama sonrası alkole daldırılmış, deiyonize su ile durulandıktan sonra yüzey kurutma işlemi yapılarak laboratuvar sevkiyatı için kilitli poşetlerle konulmuştur. Laboratuvarda, poşetler açıldıktan sonra koloni ekimi yapılacak tüm numunelerin ve kontrol plakalarının yüzeyleri üç kez saf alkol ile temizlendikten sonra deiyonize su ile durulanmıştır ve akabinde havada kurumaya bırakılmıştır.

Standart ATCC 25922 Escherichia coli ve standart ATCC 29213 Stafilococcus aureus kayıtlı referans stok kolonilerden kullanılmıştır. Pseudomonas aeruginosa, Vankomisine Dirençli Enterokok (VRE) ve Metisilin Dirençli Stafilokok Aureus (MRSA) ise klinik olarak izole edilerek deneylerde kullanılmıştır.

2.3.1 Antibakteriyel test prosedürü

Kök kültürden çoğaltmak üzere Mueller-Hinton agara taze pasaj alınan bakteriler, adi jelozda 37 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca üremeye bırakılmıştır. Üreme sonrasında oluşan taze kültürler, steril %0,85'lik salin içerisinde 0,5 McFarland ($1,5X10^8$ CFU/ml) bulanıklık standardına uygun şekilde süspansiyon olarak hazırlanmıştır. Her bir bakteri için hazırlanan süspansiyonlardan, 1/10.000 oranında seyreltilerek çalışma süspansiyonları elde edilmiştir. Çalışma süspansiyonları, Mueller-Hinton agar besiyerlerine, test numunelerine ve kontrol plakalarına steril pipet ile 100 µl miktarında inoküle edilmiştir. Süspansiyonların tekrar Mueller-Hinton agar besiyerine inoküle edilmesinin sebebi, normal büyüme seyrini incelemek ve bakterilerin sağlıklı bir koloni olduklarının kontrolünü sağlamaktır. Kaplama numunesine karşı kontrol plakası olarak kullanılan 316L alaşım plakalar, hastane ortamlarındaki standart yüzeyleri

temsil etmektedir ve anti-bakteriyel etkinliğin seviyesini belirlemek üzere referans olarak kullanılmaktadır. Doğru kıyaslama yapılabilmesi için, kontrol plakalarının yüzeyleri de kumlanarak, kaplamalar ile eşlenik yüzey pürüzlülüğü kontrol plakalarının yüzeylerinde de sağlanmıştır.

İnokülasyon sonrasında tüm numuneler 37 °C sıcaklıkta 15 dakika, 1 saat ve 2 saat zaman aralıklarında bekletilmiştir. Her zaman aralığı sonunda plakaların yüzeyinden eküvyon ile örnek alınarak Mueller-Hinton agara ekim yapılarak 37 ^{o}C sıcaklıkta 48 saat inkübe edilmiştir. Her örnek alımı esnasında, mevcut numune yüzeyi temizlenmeden, üzerine taze kültür ekimi yapılmıştır ve bu sayede yüzeyin üzerinde kalan ölü bakterilerin, yeni gelen koloniler için besiyeri gibi davranması istenmiştir. Bakterilerin beslenebildiği şartlar yaratıldığında dahi koloninin indirgenebileceği gözlemlenmek istenmiştir. Özellikle, her ölçüm anında yeni ekim yapılması, gerçek kullanım senaryosunda aranabilecek sürekli indirgenme davranışını inceleme fırsatı yaratmaktadır.

$$\text{İ}ndirgeme\ Oranı\ \% = \frac{(R_0 - R_r)}{R_0} \times 100 \tag{2.36}$$

Yüzeyden alınmış örnekler, inkübasyon sonunda koloni sayımına gönderilmiştir. İstatistiki tutarlılık için her numune testi 5 kere tekrarlanmıştır. Koloni oluşturan birim, koloni sayımı sonrasında her bakteri ve numune yüzeyi için elde edildikten sonra, denklem (2.36)'de verildiği üzere indirgeme oranı (inhibisyon), yüzdesel olarak hesaplanmıştır.

3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Sonuçlar bölümü, modelleme çalışmaları, kaplamaların gerçekleştirilmesi ve özelliklerinin karakterizasyonu ile bakteri testleri olmak üzere 3 başlıkta irdelenmektedir.

Modelleme çalışmalarında, akış alanı ve içerisinde seyahat eden parçacıkların yörünge geçmişi boyunca sıcaklık ile hız değerleri irdelenmektedir. Ek olarak, damlacık sıvanması ve soğuması esnasındaki faz dönüşümü sonuçları değerlendirilmektedir.

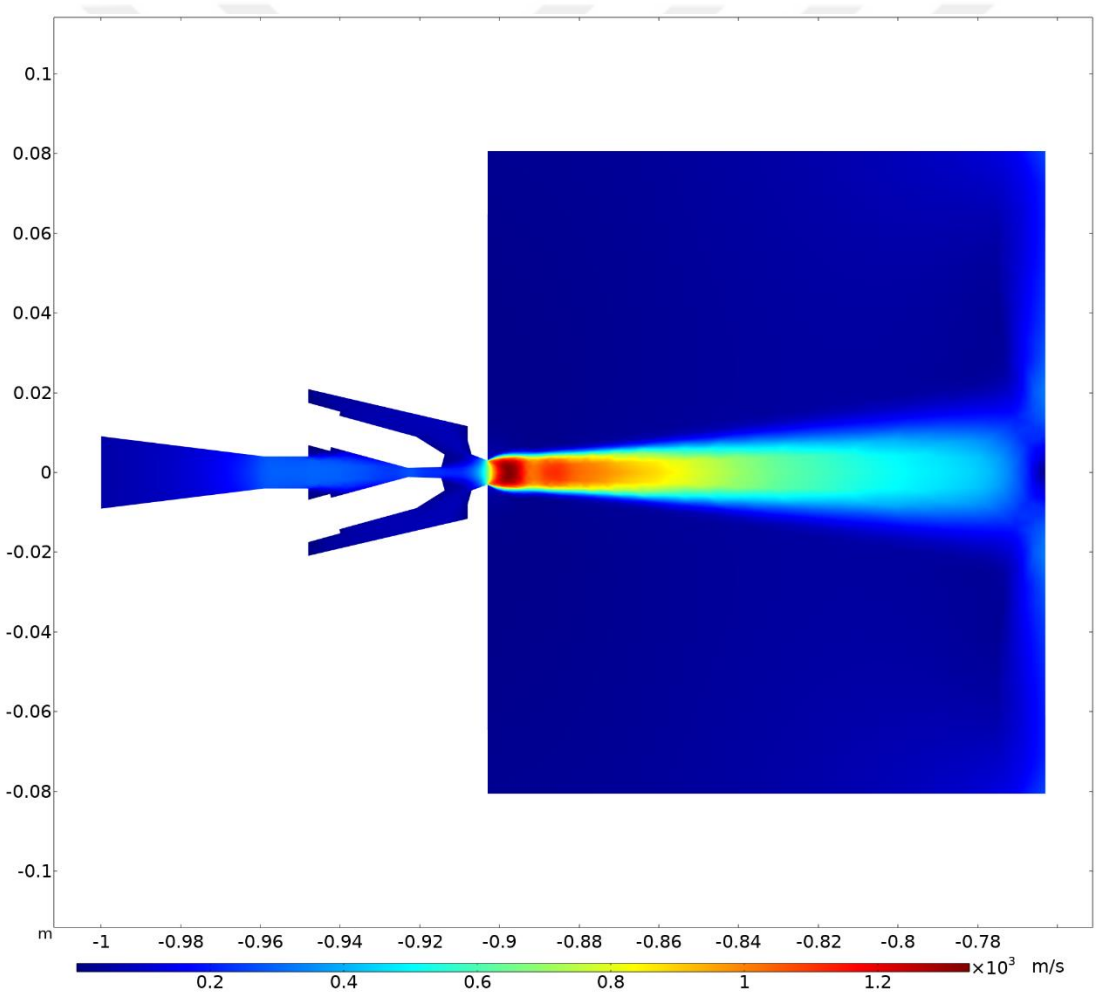
Kaplama sonuçları kesit morfolojik görüntüleri (SEM), kimyasal özellikleri (EDS) ve yüzey topografyası (profilometre analizleri) ile sunulmaktadır ve kıyaslamalı olarak değerlendirilmektedir.

Bakteri testleri ilk olarak yüzey tipi karşılaştırmasını tartışmakta ve daha sonra alaşımlara karşı bakteri gruplarının etkinlik testleri ile detaylandırılmaktadır.

Sonuçları ve irdelemelerini takip eden teknoloji hazırlık seviyesi başlığı altında gerçek hayat uygulama örnekleri sunulmaktadır.

3.1 Hesaplamalı Model Sonuçları

Şekil 3.1, nozül içi dahil olmak üzere deşarj alanında, hedef yüzeye karşı akış alanını, Çizelge 2.3'te verilen bakır çalışma parametreleri için göstermektedir. Akış girişi yakınsak boğaza geldiğinde hız Mach 1 seviyesine ulaşmaktadır. Taşıyıcı gaz, teller arasından geçerken hızını korumakta ve daha sonra ark bölgesinde ısınmaktadır. Isınan gaz, yakınsak nozül ağzından geçerken tekrar sıkıştırılmakta ve çıkışta genleşerek Mach 1 seviyesinin üzerine çıkmaktadır [114]. Şok dalgasının oluşurken kırıldığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 3.1'de, verilen parametreler için gaz hızı Mach 2 seviyesinin üzerine çıkmaktadır. Akışkan hızının yüksek olması parçacıkların daha ufak boyutlara atomize olmasını sağlarken daha hızlı hedefe ulaşmalarına olanak vermektedir [115].



Şekil 3.1 : Akış alanı hız şiddeti dağılımı.

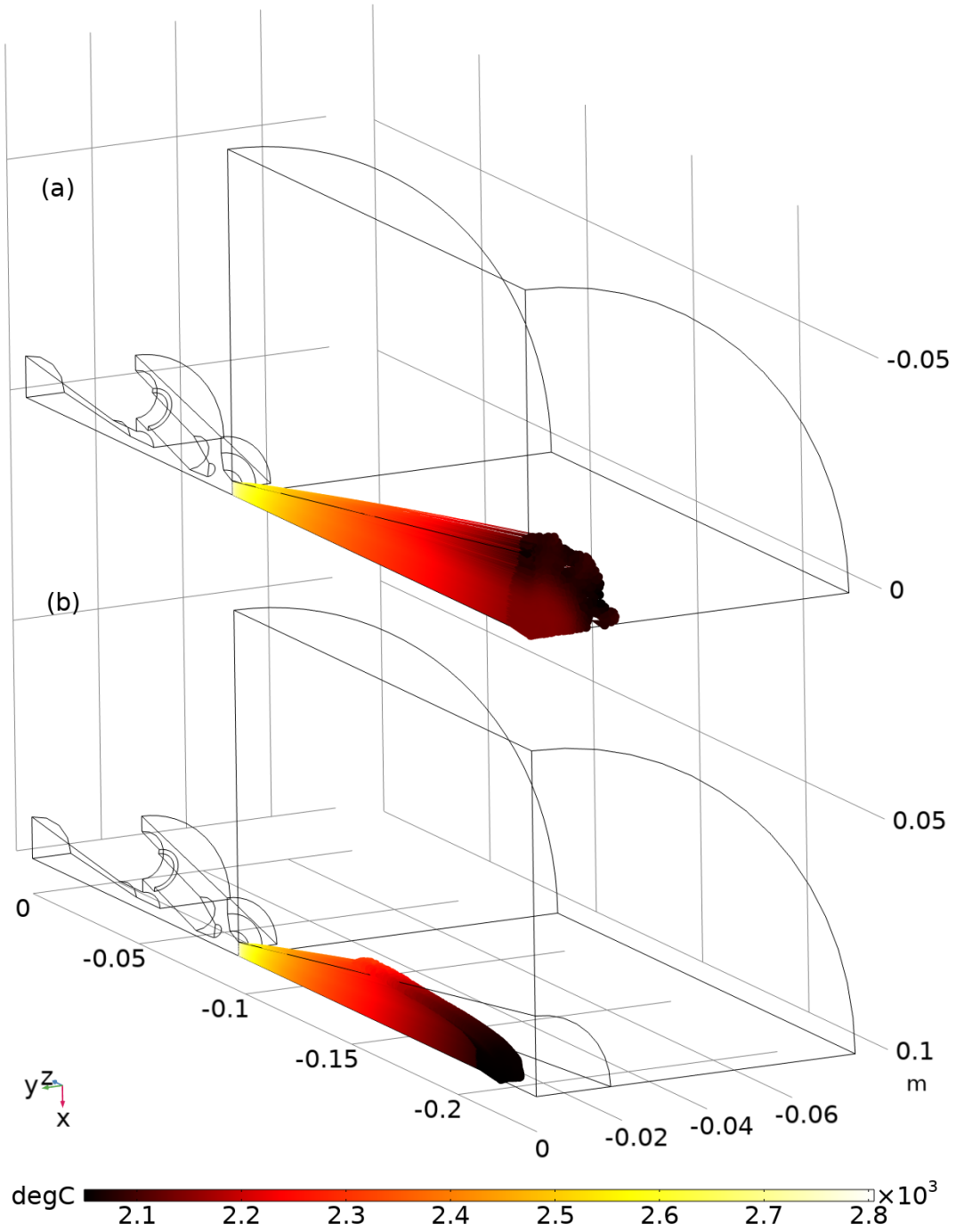
Şekil 3.2, parçacıkların seyahatleri boyunca sıcaklıklarını vermektedir. Seyahat sürelerini tamamlayıp hedefe ulaştıkları an ile seyahatlerinin yarısında sıcaklıkları gösterilmektedir. Tellerin birbirine göre yerleştirildikleri açı sebebi ile püskürtme alanı 15° açıya paralel dağılmaktadır. Merkez eksende kalan parçacıklar sıcak gaz bulutu içerisinde konumlandıkları için daha yavaş soğumaktadır [116]. Püskürtme konisi dışına yaklaştıkça ortam sıcaklığındaki hava ile karışımın daha yüksek olması sebebi ile, koni dışarısına doğru parçacıkların daha düşük sıcaklıklara eriştiği beklenildiği üzere gözlemlenmektedir [117].

Şekil 3.3, parçacıkların seyahatleri boyunca hızlarını vermektedir. Hedefe ulaştıkları an seyahat sürelerini tamamladıkları zaman olmakla birlikte, seyahat sürelerinin yarısı anında hız dağılımları verilmektedir. Gaz hızının en yüksek olduğu bölgeler en kuvvetli sürükleme kuvvetinin etki ettiği alanlardır ve gaz akışının en hızlı olduğu bölgelerde bulunan parçacıklar, koninin dışında kalan parçacıklara göre yüksek hızlara çıkabilmektedir [118]. Püskürtme ekseninde bulunan parçacıklar yüksek hızlara çıkabildikleri gibi, Şekil 3.2'te verildiği üzere en yüksek sıcaklıklara da sahip olmaktadırlar. Parçacık hızının artması daha yüksek konvektif kayba sebep olmasına rağmen, parçacığın serbest atmosferde geçirdiği sürenin, hızından ötürü azalması ile, parçacık, soğumaya vakit bulamadan hedefe ulaşmaktadır [119]. Hızlı parçacıklar, sıcak kalmalarının yanında, sahip oldukları momentum sayesinde daha yüksek sıvanma sağlayarak düşük porozite elde edilmesini de sağlamaktadır [120].

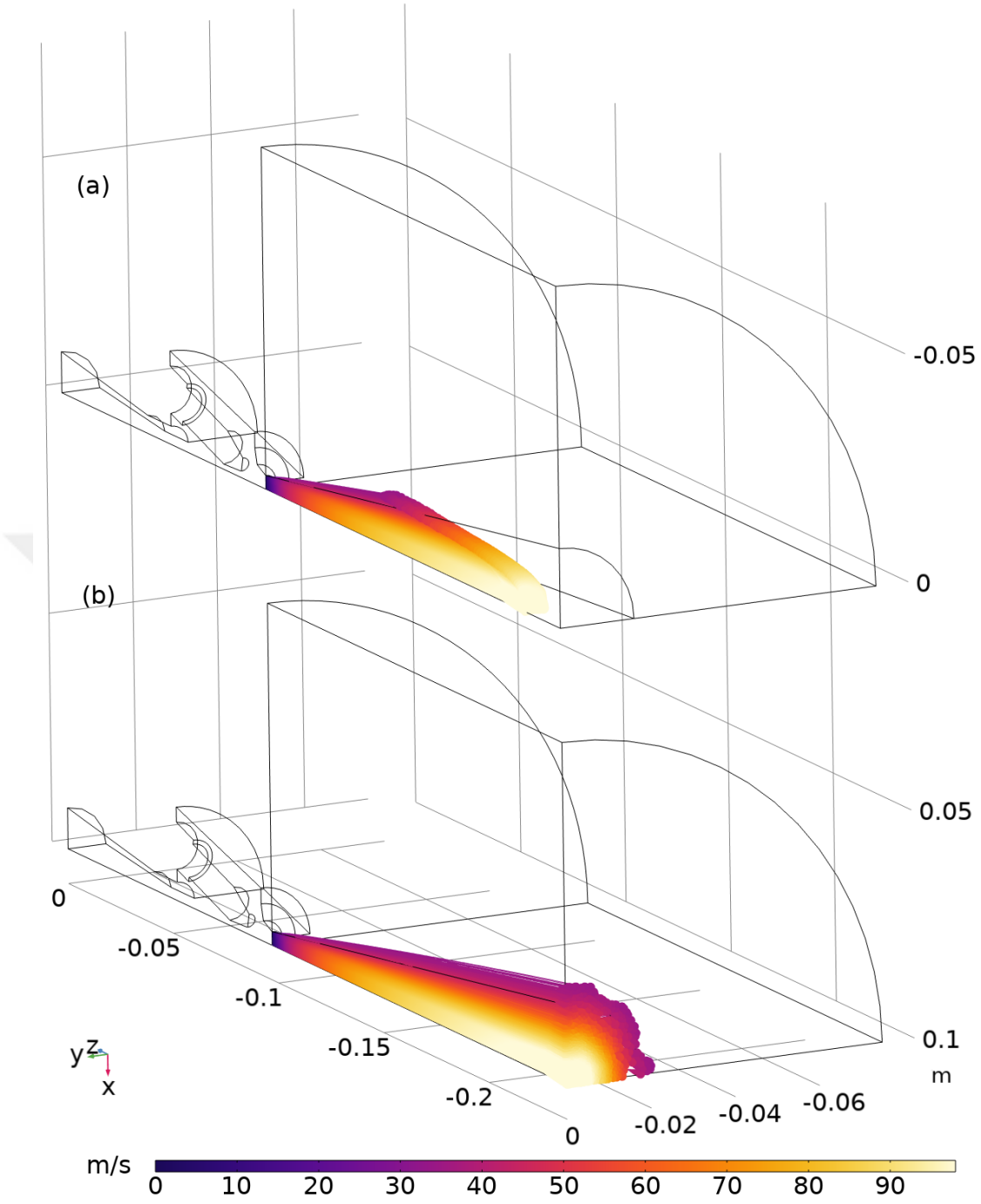
Çizelge 3.1 : Ölçülen ve hesaplanan parçacık sıcaklığı ile hızının kıyaslaması.

	Ölçülen	Hesaplanan	Görece Hata, %
Yüzey Sıcaklığı, K	1.925,81	2.090,00	9
Hız, m/s	91,82	98,00	7

Saf bakır için simülasyon validasyon çalışmaları sonucu alınan ölçüm ile hesaplama sonuçlarının kıyaslaması Çizelge 3.1'de verilmektedir. Hesaplanan parçacık sıcaklığı 2090 ^{o}C ve parçacık hızı 98 m/s, ölçülen değerler ile kıyaslanmaktadır. Hedeflenen hata oranı olan %10'un altında kalınmıştır.



Şekil 3.2 : Yörünge boyunca parçacık sıcaklıkları, (a) tam seyahat süresi, (b) yarım seyahat süresi.



Şekil 3.3 : Parçacık hızları, (a) yarım seyahat süresi, (b) tam seyahat süresi.

Şekil 3.4 ile temas anından 20 μs'ye kadar damlacığın sıvanmasını faz ara yüzü takibi ile gösterilmektedir. 4 μs'ye yaklaşırken artan yüzey alanı sebebi ile ısı kaybı, baskınlığını arttırmakta ve katılaşmayı tetiklemektedir [121]. Artan katılaşma ile damlacık yayılımı azalmakta ve damlacığın şekli sabitleşmektedir. 6 μs'den sonra katılaşan tabanın üzerinde bulunan yarı-ergiyik/tam ergiyik fazdaki üst bölge, sahip olduğu momentum ile uç noktada yığılarak dış çeperde burun oluşturmaktadır [122]. Damlacığın tabi olduğu yüzey gerilimi ve katılaşan taban sebebi ile, üst kısımda bulunan ergiyik fazın, orta eksene doğru geri toparlanmasını takiben, ilk yayılım aşamasında oluşan burun kaybolmakta ve nitekim 8 μs'ye ulaşmadan damlacık tamamen donarak sabit şekline ulaşmaktadır.

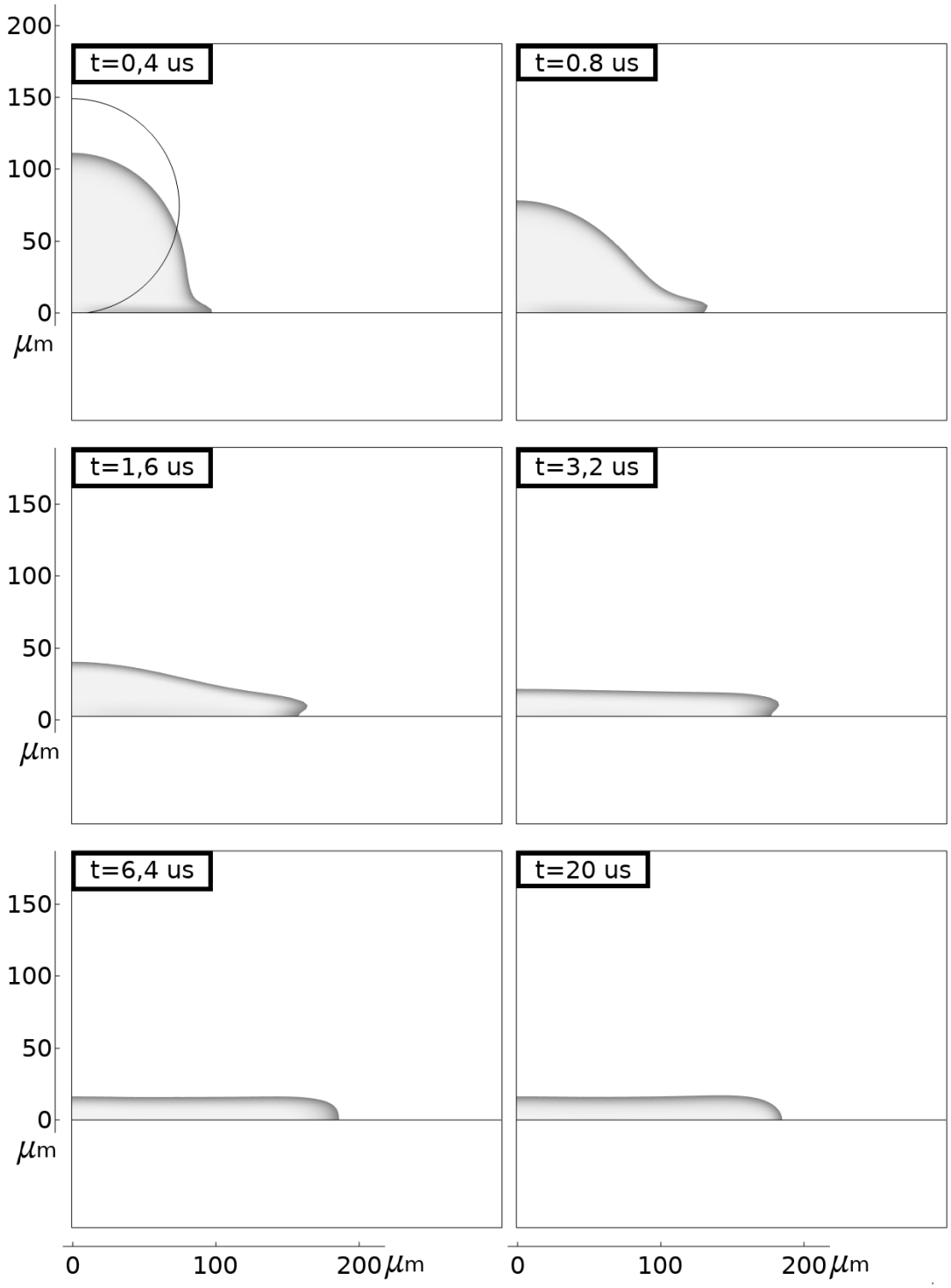
Şekil 3.5 damlacığın sıvanma esnasında sıcaklık geçmişini °C cinsinden eş eğriler ile zamana karşı göstermektedir. Damlacığın, ilk temas anında hava ile temas eden yüzey alanının, altlık ile temas eden yüzeyden ufak olması sebebi ile damlacık sıcaklığını daha çok koruyabilmektedir [123]. Artan zaman ile damlacığın altlık üzerinde yayılarak kazandığı altlık ile temas halindeki yüzey alanı, sıcaklığının hızlanarak düşmesine sebep olmaktadır [124]. 6 μs'ye gelindiğinde dış çeperi oluşturan ön burun ve alt temas yüzeyi tamamen ergime noktası altına düşmüştür. 20 μs'ye gelindiğinde ise tüm gövde ergime noktası altına düşmüş fakat halen ortam sıcaklığının çok üzerinde seyretmekte olup, arkasından gelecek damlalar için daha sıcak bir temas yüzeyi sunarak kaplama oluşumuna olumlu katkı yapacağı beklenmektedir [125].

Beklenildiği üzere altlık sıcaklığının artması ile damlacığın daha geç soğuyarak daha çok yayıldığı gözlenmektedir [126]. Temas anındaki damlacık sıcaklığının, malzemenin ergime noktasının ne kadar üzerinde olursa, soğuma için o kadar geniş bir sıcaklık farkı penceresi yaratmasından ötürü, sıvı fazda daha uzun süre kalarak daha geniş yayılma alanı ve sıvanma eldesi mümkün olmaktadır [127]. Parçacık hızının artması ile, sıcaklığın düşük olduğu durumlarda dahi, yüksek sıcaklıktaki sıvanma profilleri ile örtüşen profiller elde edilebilmektedir [128]. Damlacıkların temasının, temas düzlemine tam dik eksende gerçekleştiği kabul edilmektedir ve 3 boyutlu uzayda eğik atım şartlarında geçerli olmayan dairesel simetri sayesinde dağılım, hatasız olarak iki boyutlu eksenel simetri ile temsil edilebilmektedir [129]. Kaplama yüzeyinin, özellikle cam gibi mükemmele yakın parlak olduğu durumlarda, damlacık ile temas yüzeyi arasında hava keseleri kalarak damlacıktan temas yüzeyine ısı taşınımında bariyer oluşmaktadır ve söz konusu termal direnç etkisi, belirli bağıntılar ile tanımlanarak ele alınmaktadır [130]. Gerçek hayat termal sprey kaplama uygulamalarında, mekanik kilitlenmeyi sağlamak üzere pürüzlü yüzeyler

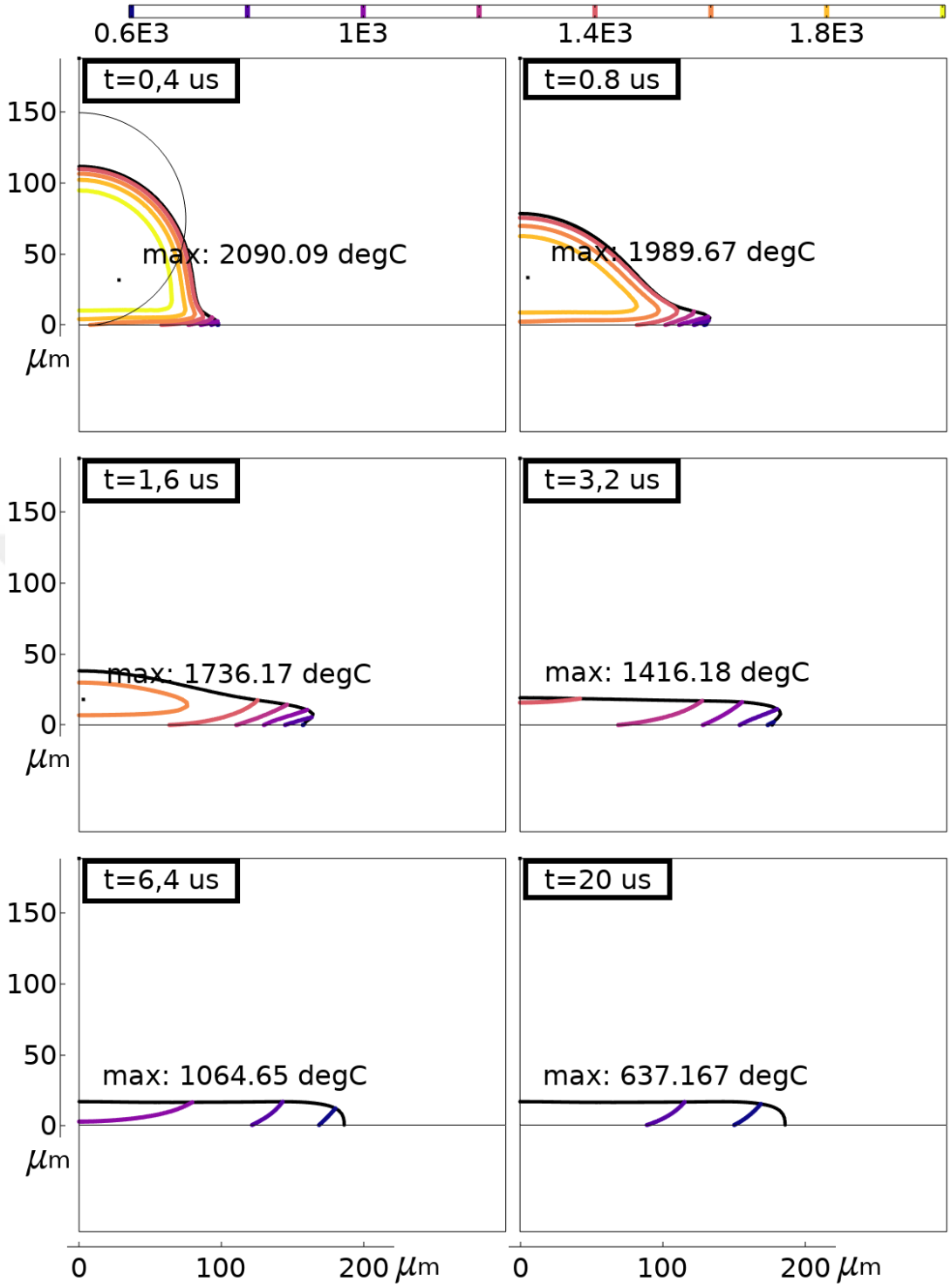
kullanıldığı için hava keselerinin öne çıkacağı bir zemin mevcut olmamaktadır [131] ve termal direnç etkisi, simülasyon sonuçlarına, kullanılan parametrelerde kayda değer bir etki de yaratmamıştır. Pürüzlü yüzeylerde damlacıklar katılaşıp kilitlenirken dahi pürüzsüz yüzeylerde yaşanılan profil uçlarının soğuma ile çekmesi kendini tekrar etmektedir [132].

Damlacık profili, başlangıç çapının tamamen katılaşmış profil çapına oranı ile elde edilen yayılma faktörü ile kıyaslanmaktadır ve idealde, yırtılmanın, kopmanın olmadığı, damlacık boyunca dengeli kalınlığın elde edildiği değerler kabul edilmekte olup metal malzemelerde, 2,5 değeri civarında ölçülmektedir [133]. Tam adyabatik şartlar sağlandığında damlacıklar ideal yayılma faktörü değerin çok üstüne çıkmakta, oldukça ince kalınlıklara ulaşmakta ve birçok durumda yırtılarak damlacık olmaktan uzaklaşmaktadır [134]. Adyabatik olmayan, taban sıcaklığı ile damlacığı saran gaz ortamının sıcaklığına karşı iletim ve taşınım ile ısı kayıplarının göz önünde bulundurulduğu gerçekçi durumlarda, damlacığın hızı, çapı ve sıcaklığı katılaşmanın tamamlandığı zamanı belirleyici olmaktadır [135]. Simülasyonlarda ideal yayılma faktörünü veren parametre grupları hedeflenmiş olup, seçilen parametre seti için yayılma faktörü 2,64 olarak elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinin katılaşma fenomenini belirleyici rol oynadığı, gerçek deneysel ergime ısısı değerlerinin yerine 10^3 mertebelerinde daha düşük değerlerin alındığı çalışmalarda yayılma faktörünün beklenenden yüksek çıkması ile ispatlanmaktadır [136]. Yüzey geriliminin simülasyonun gerçekçiliğine katkısının önemi, yüzey geriliminin tamamen ihmal edildiği çalışmalarda [137], yayılma esnasında direnç görmeyen damlacık burnunun, katılaşma sonrası oluşturduğu profilin gerçekten sapması ile pekiştirilmektedir. Simülasyonda gözlenen, katılaşma sonrası sıcaklık gradyanlarının dikey yönde değiştiği bir profil, eksenel yönde çekme yaparak damlacığın altlığa daha sağlıklı kilitlenmesine sebep olmakta ve profil uçlarının daha az ayrılmasını sağlamaktadır [138].

Simülasyon sayesinde, damlacığın yırtılmadan homojen dağılım göstermesini sağlayan damlacık hızı ve sıcaklığı tespit edilmiştir. Seçilen parametre setini sağlayacak tabanca parametreleri de bir önceki kısımda anlatıldığı üzere akış alanı simülasyonu ile tayin edilmiştir. Simülasyonların çalıştırılma sırası ilk olarak damlacık ile başlayıp sonrasında akış alanı simülasyonu ile devam etmektedir. Simülasyon-süreç bütünlüğünün aktarılması esnasında karışıklığa mahal vermemek üzere, sürecin oluşum sırası ile simülasyon adımlarının anlatımı tercih edilmiştir.



Şekil 3.4 : Hedef yüzeye damlacığın sıvanması.



Şekil 3.5 : Damlacığın sıvanırken sıcaklık profili değerleri.

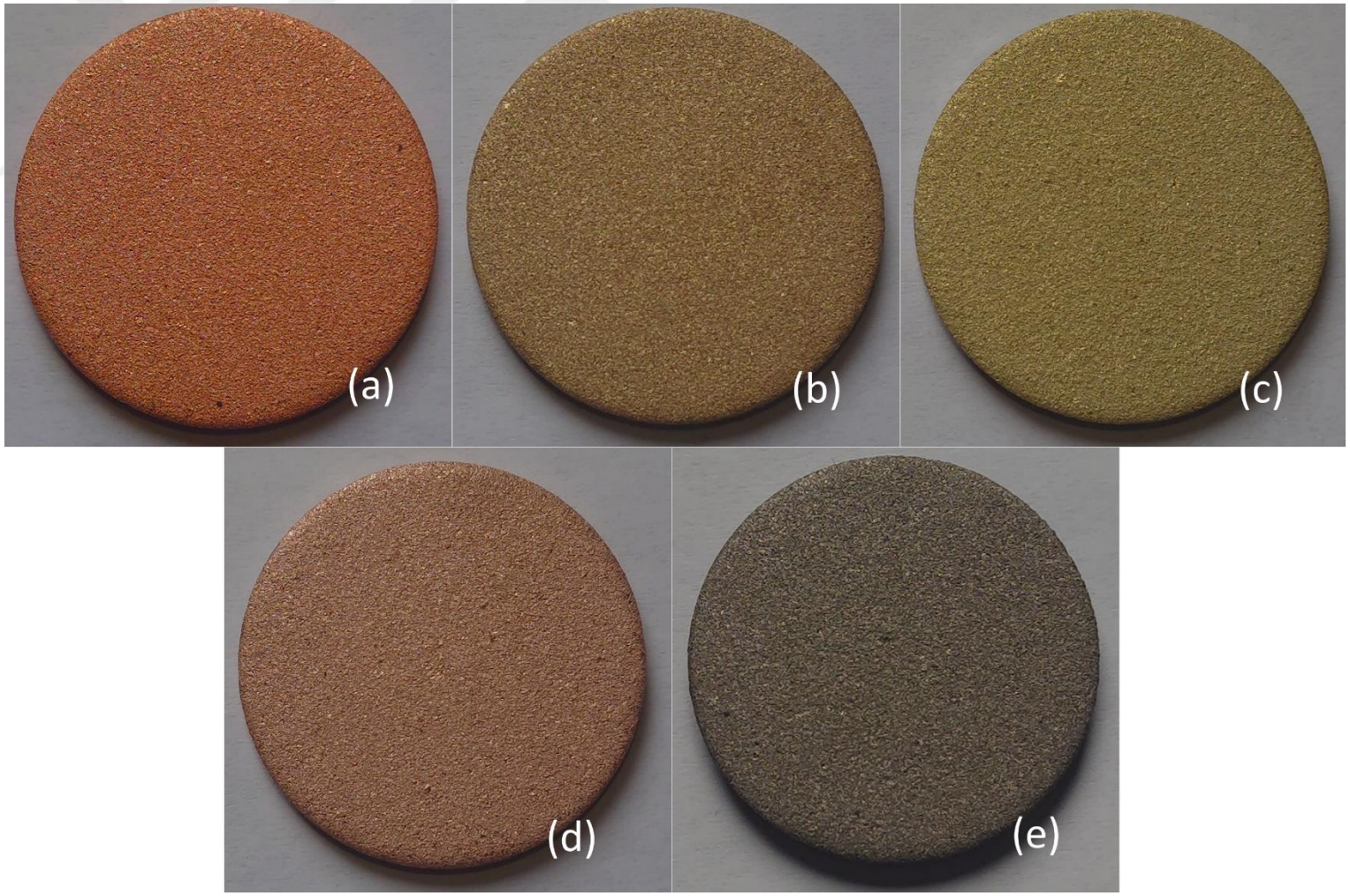
3.2 Kaplama özellikleri

Çizelge 2.3'te verilen parametreler kullanılarak, sürekliliğe ve dengeli kalınlık dağılımına sahip olarak üretilmiş kaplamaların özellikleri Çizelge 3.2'de ve görüntüleri Şekil 3.6'da verilmektedir. Kaplamalarda %2-%8 aralığında porozite elde edilmiştir. Pürüzlülük değerleri, ön hazırlık aşamasında aynı kumlama işlemi kullanılmasından ötürü tümünde aynı mertebededir. Tüm deneylerin ölçümleri EK C ile verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Kaplamaların ölçülen özellikleri.

Alaşım	Ort. Kalınlık, µm	Porozite, %	Pürüzlülük, Ra	O_2 kons., kütlece %
Cu	118,5	~4	9,14	1,41
Cu-Al	77,15	~6	8,63	0,56
Cu-Zn	128,31	~8	11,58	0,8
Cu-Sn	132,42	~3	8,57	0,22
NiCuZn	105,84	~2	9,54	1,26

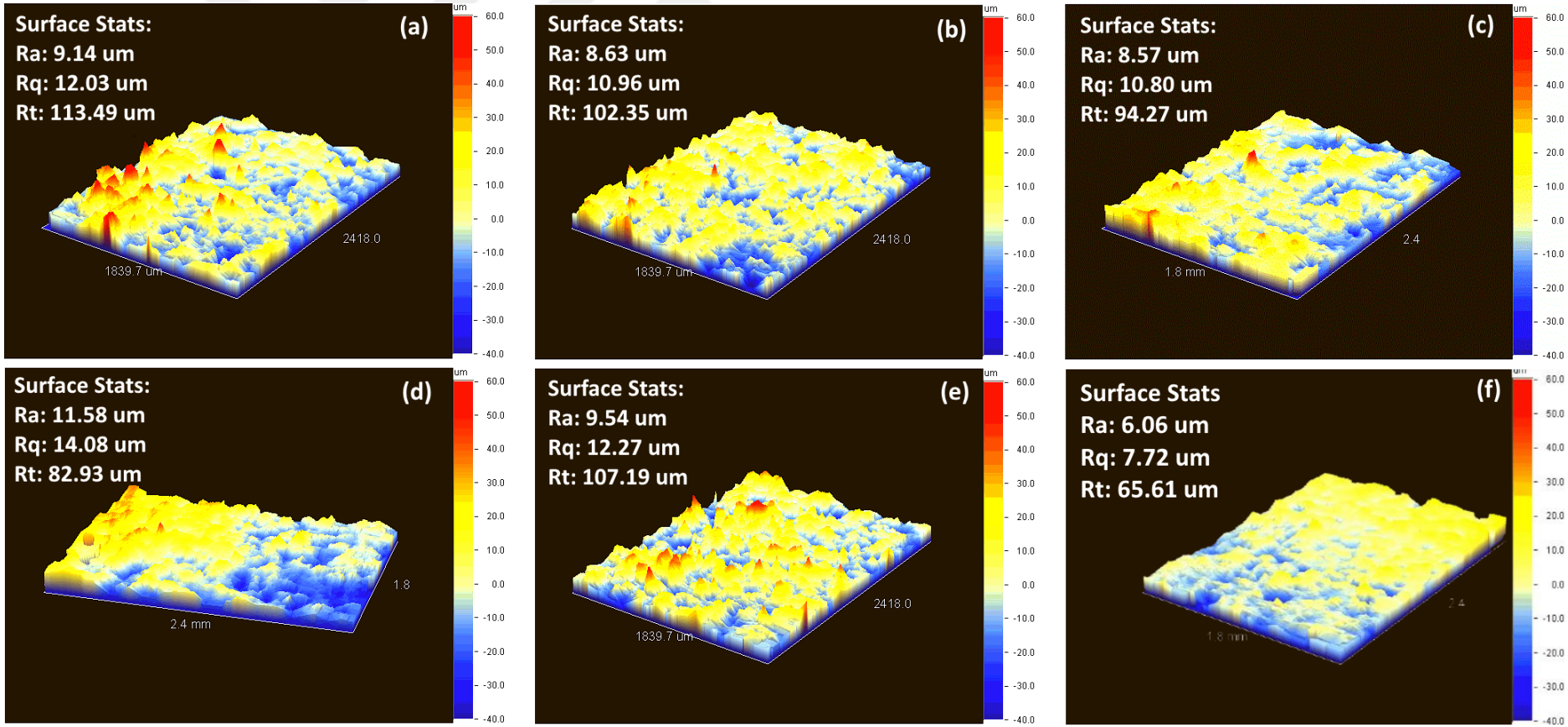
Metallerin, metallere kaplandığı bazı durumlarda, metalürjik bağ oluşumu katmanlar arasında geçişler halinde görülebilmektedir [139]. Elde edilen kaplamalar, geçişsiz halde, sadece mekanik kitlenme esasına dayalı olarak elde edilmiştir. Alaşım kaplamalarda, hedef yüzeye yığılan damlacıkların, sıvanma esnasında intermetalik oluşturma eğilimine rağmen [140], yapılan kaplamaların hiçbirinde intermetalik faz gözlenmemiştir. Kaplama oluşumunda söz konusu olan yüksek soğuma gradyanları, kontrollü parametreler sağlanmadığı durumlarda dikey çatlaklara zemin oluşturarak kaplamanın pul formunda ayrılması ile sonuçlanmaktadır [141]. Elde edilen kaplamalarda dikey çatlaklar bulunmamakla birlikte yatay çatlakların kısmi ve süreksiz olduğu gözlenmektedir. Görece düşük hız veren açık tip püskürtme ağzına veya yakınsak nozüle sahip sistemlerde kaplama tabancasının anot veya katot yönünde ilerlemesine dair kaplama yapısında gözlenen morfolojik farklar, kapalı tip kafaya sahip olunması ve yakınsak ıraksak nozül kullanılması sonucu elde edilen yüksek atomizasyon sayesinde, beklenildiği üzere görülmemektedir [142]. Tellerin nozül ağzında aldığı konum itibari ile konik oluşan püskürtme alanı, dikey yönde püskürtme veriminin daha yüksek olmasına sebep olmakta ve düzlemsel kaplamalarda dikey ile yatay yön arasında fark oluşturmaktadır [143]. Nitekim, numune kuponlarının silindirik düzende dizilerek kaplanması sebebi ile söz konusu yön etkisi gözlenmemiştir.



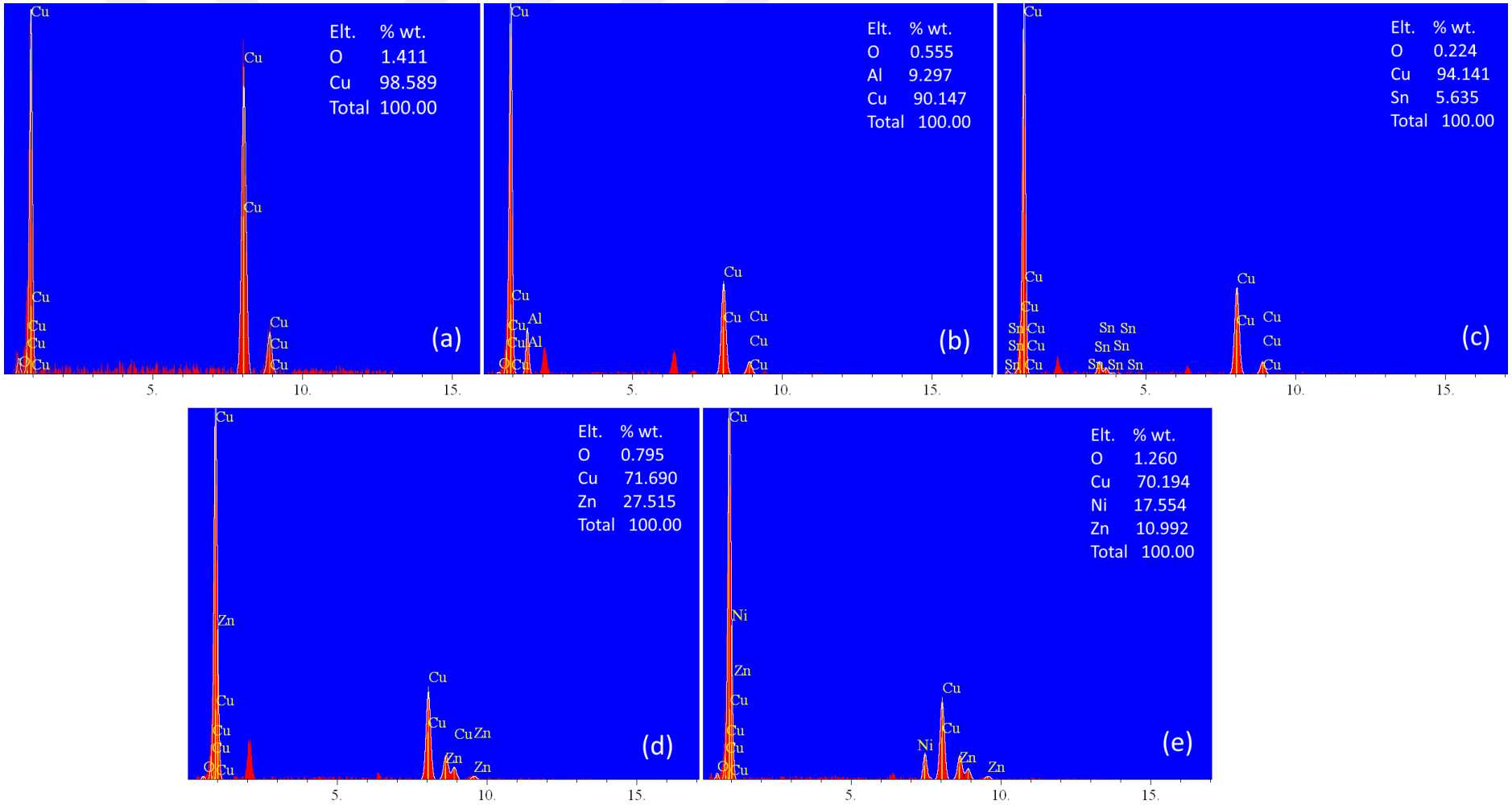
Şekil 3.6 : Kuponlar üzerine yapılan kaplamalar, (a) bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) pirinç, (d) bronz ve (e) nikel-gümüş olmak üzere.

Şekil 3.7, 5.12 büyütme seviyesinde, VSI ölçüm modunda, 1,65 μm birim ölçüm aralığına sahip 736x400 ölçüm alanında yapılmış yüzey pürüzlülük değerlerini sunmaktadır. Kaplama kalınlıklarının ortalama değerlerde (50μm-400μm) olması sebebi ile altlıkta elde edilen kumlanmış yüzeyin pürüzlülük profili, kaplama yüzeyine yansımış ve aslında pürüzlülüğün mertebesini belirleyici olmuştur [144]. Yüzey pürüzlülüğü değerini belirleyici faktörler ise, sıvanma verimini belirleyen damlacığın hızı ve katılaşma profilini belirleyen damlacığın sıcaklığı olmaktadır [145]. Basınç artışı sayesinde artan parçacık hızının sonucu olan sıvanma veriminin iyileşmesi ile pürüzlülüğün düşmesi [146], alüminyum bronzu ve bronz ile gerçekleştirilen kaplamalarda görülmektedir. Voltaj ve akım değerlerindeki artışın parçacık sıcaklığını yükseltmesi sonucu katılaşma profilinin düzgünleşmesi ile, yüzey pürüzlülüğünün dolaylı şekilde ve benzer artış eğiliminde olması [147] pirinç kaplamada gözlenmektedir.

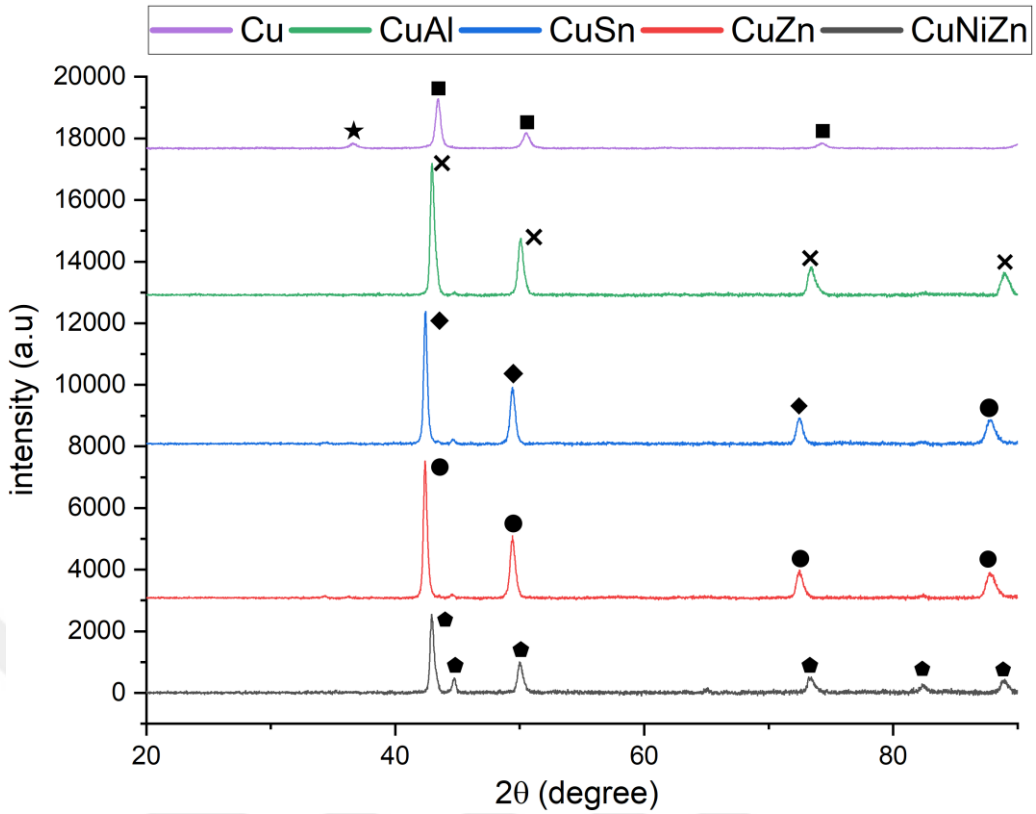
Şekil 3.8'de kaplamalara ait EDS analizleri ile alaşım elementleri ve oksijen konsantrasyonları verilmektedir. Kaplama yönteminin işleyişi içerisinde, atmosfer ile sürekli temas halinde olan damlacıkların oksidasyonu, kaplama oluşumuna ait üç farklı mekanizmaya bölünmektedir. Tabanca çıkış ağzında basınçlı hava ile püskürtme anında, açık atmosfer içerisinde parçacık seyahati esnasında ve sıvanma boyunca katılaşana kadar olmak üzere atmosfer ile sürekli etkileşim içinde bulunan parçacıkların yüzeylerinde gerçekleşen oksidasyon, kaçınılmaz olarak kaplama bünyesine karışmaktadır [148]. Kaplama içerisinde oluşan oksit miktarı arttıkça gerek altlık ile gerek ise lameller arası bağ mukavemeti olumsuz etkilendiğinden [149], hedeflenen kaplama kalınlıklarında düşük oksit konsantrasyonları hedeflenmiştir ve sağlanmıştır. Düşük oksit seviyelerine ulaşılmasında etkili faktörün, ufak boyutlara sahip kuponlarda ortalama kaplama kalınlıklarında çalışılması sebebi ile hedef yüzeylerde düşük ısı birikimi elde edilmiş olması ve bu sayede damlacıkların sıvanması esnasında kaplamanın üst katmanlarında geçerli olacak oksidasyon mekanizmasının etkisiz kalması olarak öngörülmektedir [150]. Artan gaz basıncı daha ufak parçacıklar yaratmaktadır ve ufalan parçacıklar daha da yüksek sürüklenme kuvveti etkisinde hızlanıp serbest atmosfer içerisinde daha kısa süre geçirerek hedefe ulaşmaktadır [151]. Dolayısı ile makul seviyelerde tutulan gaz basıncı ve hedef mesafenin istenilen özellikleri sağlayacak en kısa mesafede tayin edilmesi sayesinde düşük oksit seviyelerinde kalınabilmiştir. Bronz ve Nikel-gümüş kaplamalarda, artan mesafeye rağmen oldukça düşük oksit miktarında kalınabilmesinin sebebi, seyahat halinde gerçekleşen oksidasyonun, bir kabuk oluşturduktan sonra eşik davranışı göstermesi ve oksidasyonu durağanlaştırması ile açıklanabilmektedir [152].



Şekil 3.7 : Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü analizleri, (a) saf bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) bronz, (d) pirinç, (e) bakır nikel ve (f) kaplama öncesi kumlanmış altlık olmak üzere.



Şekil 3.8 : Kaplamaların EDS analizleri, (a) saf bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) bronz, (d) pirinç ve (e) bakır nikel alaşımı olmak üzere.

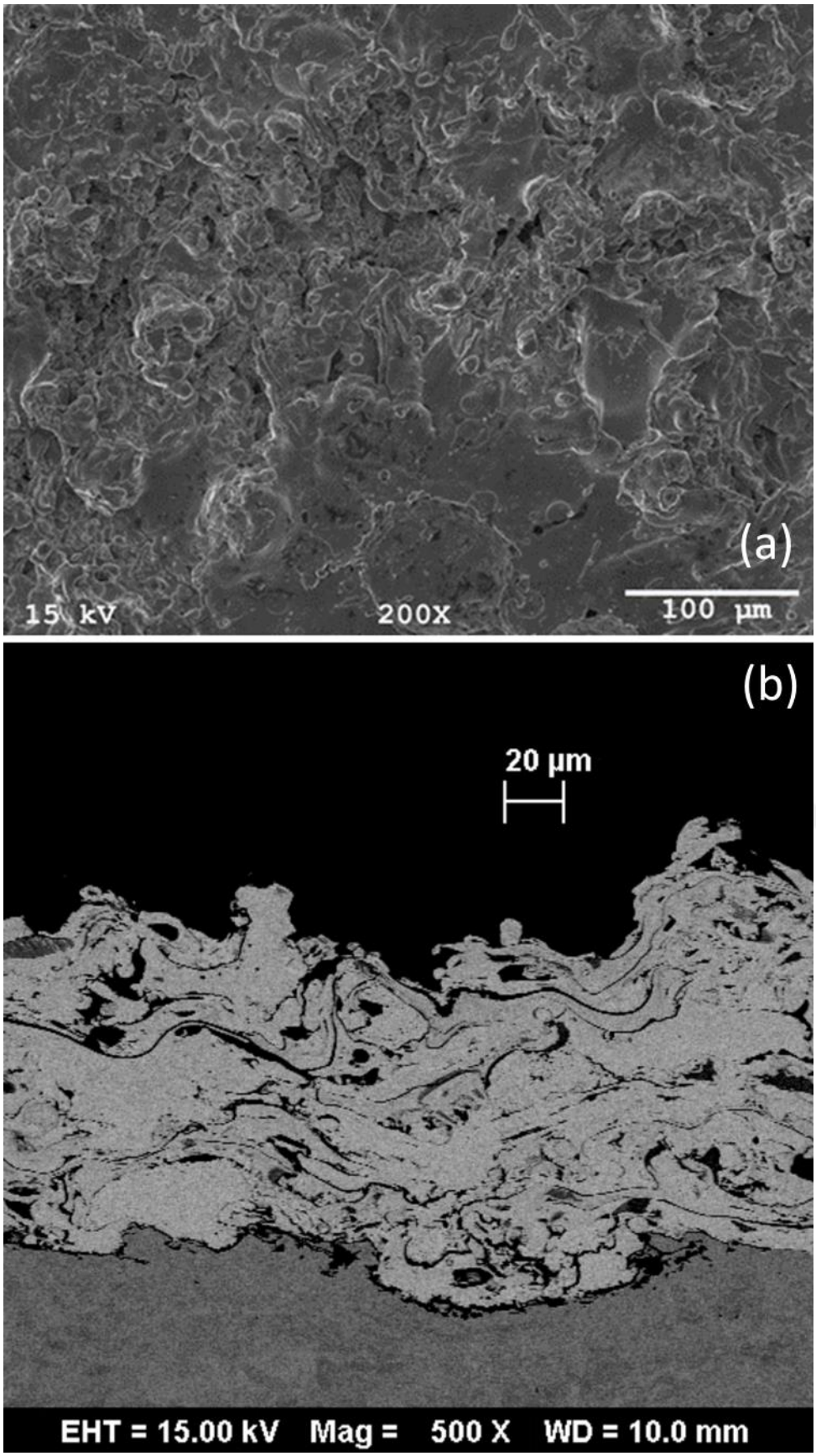


Şekil 3.9 : Kaplamaların XRD faz analizi.

Şekil 3.9, kaplamaların faz analizini, 20°-90° aralığında vermektedir. Saf bakır için dioksit piki görünür olmuştur. Alaşımlarda, bakıra ait piklerin şiddeti korunurken, birbirine yakın yüzdede bulunan alüminyum ve kalay, bakırın pik konumlarını ötelemişlerdir. Pirinçte, çinko piki belirginleşmiş, özellikle nikel-gümüş alaşımında da nikel ve çinko ufak pikler ile görünür olmuşlardır. Fazlara ait veri tabanı kart numaraları Çizelge 3.3'te verildiği gibidir. Eşlenmelerde inter-metalik bileşikler tespit edilmemiştir.

Çizelge 3.3 : Pikler için eşleşen veri tabanı kart numaraları.

Sembol	Kart İsmi	Kart Numarası
■	Cu	JCPDS 00-001-1242
★	Cu2O	JCPDS 00-001-1142
✖	Cu0.9417Al0.0583	ICSD 98-008-6392
◆	Cu94Sn6	ICSD 98-007-3109
●	Cu64Zn36	ICSD 00-050-1333
⬟	CuNiZn	ICSD 98-008-7010

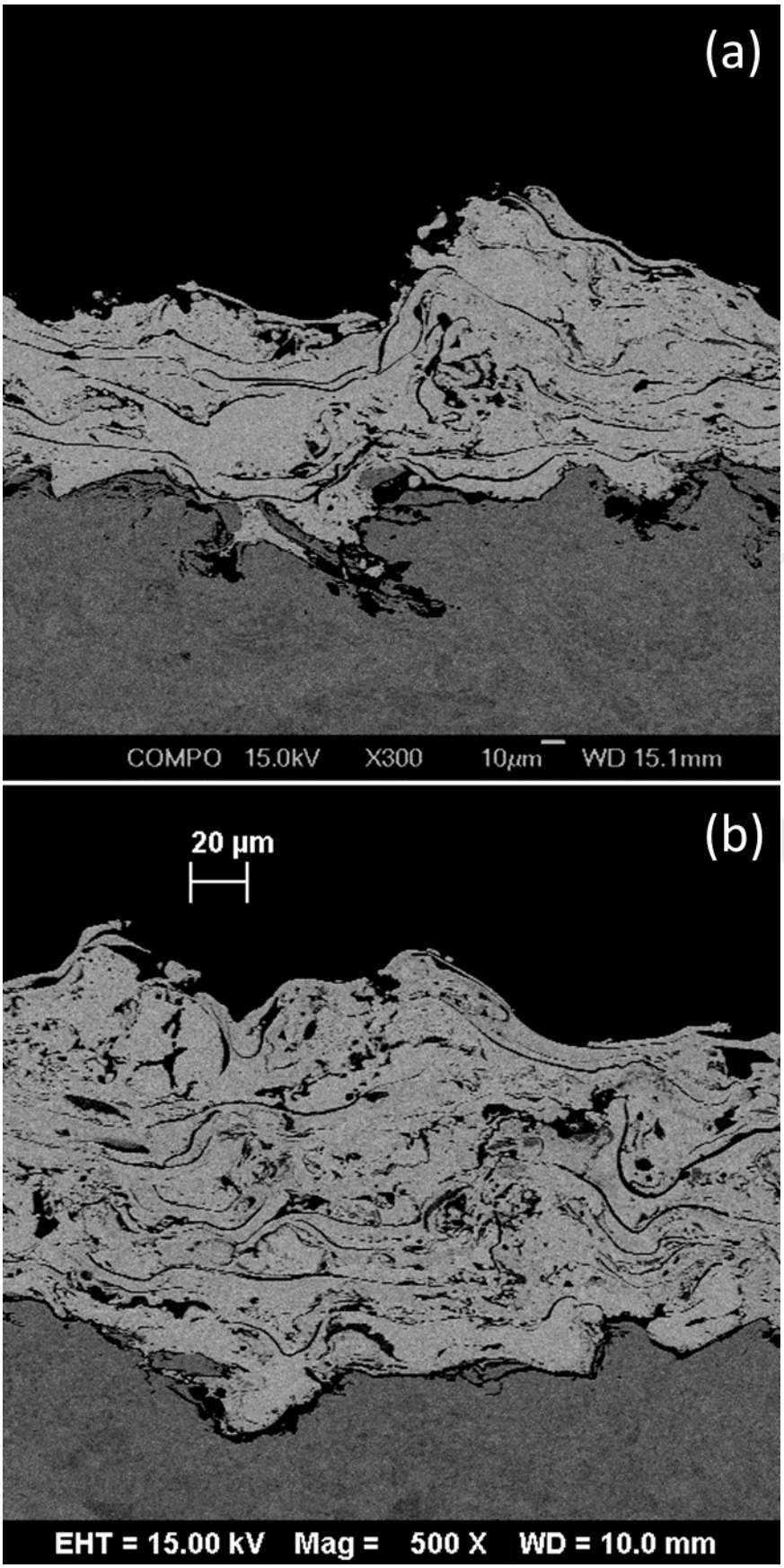


Şekil 3.10 : Bakır (Cu) kaplamanın taramalı elektron mikroskobu ile, (a) kaplama yüzey görünümüne ait damlacık tipi yakın çekimi ve (b) kaplama kesit görüntüsü.

Şekil 3.10, saf bakır kaplamanın SEM görüntülerini vermektedir. Kaplama yüzey görünümü ile, damlacıkların uydu damlacık yapmadığı ve damlacıkların boyut dağılımının birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Kesitin verildiği görüntü ise kaplamanın sürekliliği teyit etmektedir. Kaplama kesit görüntüsünde damlacıklar birbirlerini tam kapatarak kapalı por oluşumu elde edilmiştir. Numune ara yüzü ve lamine ara yüzeylerinde mekanik olarak tam kitlenme gözlenmektedir. Alaşımların tamamı bakır kaplama değerleri referans alınarak kıyaslanmaktadır. Kaplama sürecinin doğası gereği, pürüzlülük ve porozite değerleri, kaplamalar içerisinde aynı mertebelerde seyretmiştir [153].

Şekil 3.11 alüminyum bronzu ve pirinç kaplamanın kesit görüntüsünü vermektedir. Seçilen parametreler sayesinde iki alaşımda da tam yığılma ve kesintisiz kitlenme sağlanmakla birlikte segregasyon bulunmamaktadır. Alüminyum bronzu, ihtiva ettiği alüminyum sebebi ile oksidasyona duyarlı olması nedeniyle [154], parçacıkların seyahat esnasında oksitlenmesini önlemek için yakın kaplama mesafesi tercih edilmiştir. Fakat, hedefin tabancaya yaklaşması ile altlık malzemede yüksek sıcaklık birikimi tecrübe edilmiştir. Daha ufak parçacıkların daha hızlı soğuyarak sıcaklık birikiminin önleneceği öngörülmüş [155] ve daha ufak parçacıkların eldesini sağlayan etkili parametre olan basınç arttırılarak [156] hedeflenen özellikler elde edilmiştir. Artan basınç sayesinde artan atomizasyona paralel olarak elde edilen yüksek hıza sahip ince parçacıklar daha iyi sıvanma sağlayarak pürüzlülüğü düşürmüştür [157]. Nitekim, damlacık çapının düşük kalması istendiği üzere, büyümesine sebep olacak akım [158], basınca paralel şekilde arttırılmadığı için deşarj miktarı görece düşük kalmış [159] ve porozite, pürüzlülükte elde edilen oranda indirgenmemiştir. Deşarj miktarının düşüklüğü, kaplama veriminin azalması şeklinde yansıyarak birikim sağlanan kaplama miktarının diğer alaşımlara kıyasla alçak kalmasına ve dolayısı ile kaplama kalınlığının da diğer alaşımlara nazaran kısmen düşük mertebede olmasına sonuç vermiştir.

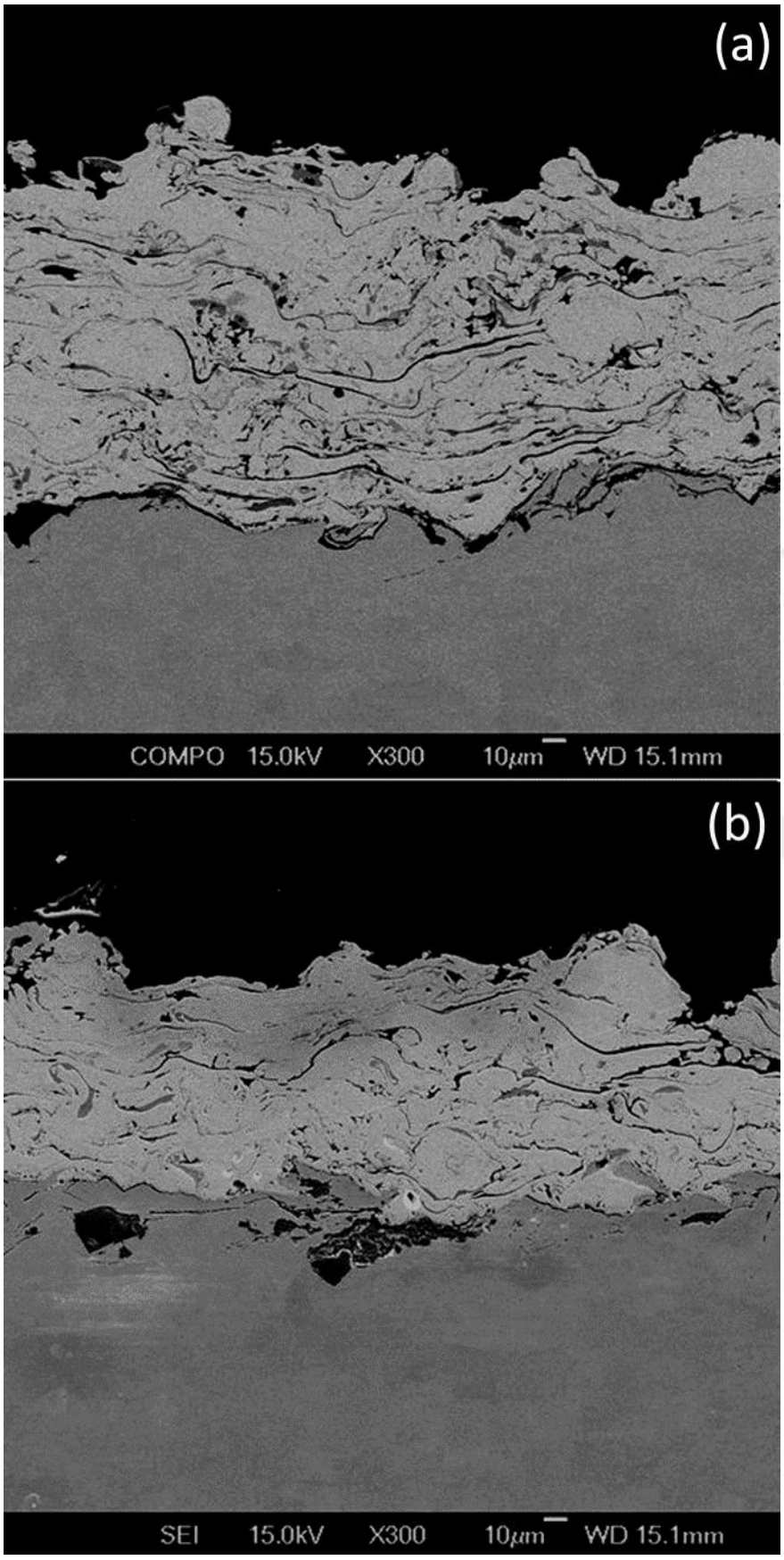
Pirinç, iletkenliğinin düşük olmasından ötürü daha yüksek voltaj ve akım değerlerinin kullanılmasını gerektirmiştir. Diğer alaşımlara kıyasla sisteme beslenen enerjinin, ergime için ihtiyaç duyulandan daha yüksek olması sonucu parçacık sıcaklıkları görece yüksek elde edilmiş ve kaplama oluşumu esnasında hedefe sıcak ulaşan damlacıklar daha çok deformasyona tabi olarak yüksek pürüzlülük oluşturmuşlardır [160]. Sıcak parçacıkların yığılarak oluşturduğu kaplamada artan sıcaklık birikimi, oluşan kaplama katmanlarının sıcak kalmasına sebep olmakta ve üst üste binen hızlı parçacıkların kinetik enerjileri ile deforme olmaya devam ederek daha poroz bir yapıya zemin vermişlerdir [161].



Şekil 3.11 : Kaplama kesit görüntüsü, (a) alüminyum bronzu (Cu-Al) ve (b) pirinç (Cu-Zn).

Şekil 3.12 ile bronz ve nikel-gümüş alaşımı verilmektedir. Bronz malzemesinin görece düşük elektrik iletkenliği sebebi ile beslenen yüksek voltaj sonucu daha sıcak [162] ve beslenen yüksek akım sebebi ile daha büyük damlacıklar elde edilmiştir [163]. Voltaj ve akımın birlikte arttırıldığı durumlarda ark frekansı artmakta, daha sık kurulan ark bağlantısı sayesinde daha çok ergimeyi atomizasyon gazı ortamında daha çok kopma izlemektedir [164]. Diğer bir deyişle artan frekans dolayısı ile malzeme deşarjı artmakta ve bu sayede damlacıklar arası boyut dağılımı daha yakın olmaktadır [165]. Damlacıkların yakın boyutlarda olması sayesinde dengeli birikim sağlanmış ve basıncın da yüksek olması sayesinde porozitenin düşük olması yapılan kaplamalarda gözlenmiştir. Damlacıkların yeterli sıcaklığa sahip olması sıvanmayı olumlu etkilemiş ve basıncın yüksek olması da sıvanma verimini pekiştirmesi sayesinde pürüzlülüğün de indirgendiği tecrübe edilmiştir. Bronz için, pirinçte olduğu gibi, sisteme beslenen enerjinin, ergime için ihtiyaç duyulandan daha yüksek olması söz konusudur. Nitekim, bronzda daha da yüksek verilmesi gereken enerji sebebi ile hedefte sıcaklık birikimi pirinçte tecrübe edildiğinden de fazla olmuştur. Sıcaklığın birikmesini önlemek için, hedef, uzak mesafeye konumlandırılmıştır. Uzak mesafeye konumlandırılan hedefe, parçacıklar, kıyasla daha düşük hızlarda ulaşmakta ve dolayısı ile pirince yakın ergime noktasına sahip olmasına rağmen verilen yüksek enerjinin pirinç için geçerli olumsuz deformasyon etkileri bronz için gözlenmemiş, pirincin aksine daha düşük porozite ve pürüzlülük sağlanmıştır. Kaplama oluşumu esnasında geçerli mekanizmaları düşünerek pirincin de bronz gibi uzak mesafeye çekilmesi durumunda daha yoğun kaplama eldesi edilmesi yönünde yapılacak bir çıkarım doğru olmakla birlikte, artan mesafe ile kaplamaya tutunamayan ufak parçacıklar artmakta ve kaplama yığma veriminin düşmesi [166] söz konusu olmaktadır. Dolayısı ile, pirinç, bronzdan daha yüksek kaplama verimine sahip fakat kıyasla daha az yoğunluk veren bir kaplama parametresini temsil etmektedir.

Nikel-gümüş kaplama, en düşük iletkenliğe sahip olduğu üzere en yüksek enerji ile deşarj edilmiştir ve kaplamalar içerisinde en düşük poroziteye ulaşılmıştır. Uzak mesafeye konumlandırılan hedefe ulaştığında ergime noktasının kıyasla yüksek olması sayesinde damlacıklar sıvı kalabilmektedir ve böylece bronzun kıyasla düşük ergime noktasından ötürü donan parçacıklar aksine sıvanabilen sıcak damlacıklar nispeten daha yoğun bir kaplama oluşturmaktadır [167]. Yüksek akım ile elde edilen büyük damlacıklar sayesinde lamine bölgeler uzun oluşmuştur ve yatay yarıklar da kıyasla daha uzun boya sahip görünmektedir [168]. Nikel-gümüş alaşımı, nikelin kontrolsüz olarak ayrışabildiği veya çökebildiği bir davranışa meyilli olmasına rağmen [169], seçilen parametreler ile, iki alaşımda da segregasyon olmadığı gözlenmektedir.



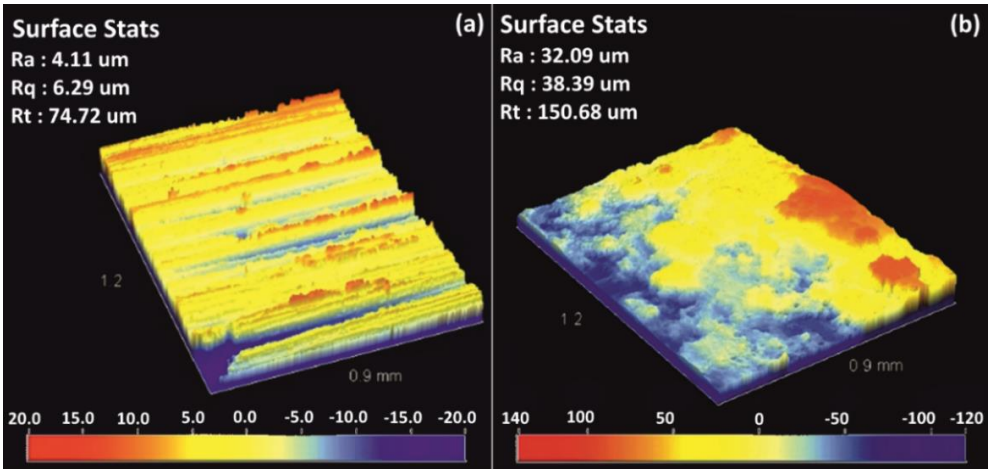
Şekil 3.12 : Kaplama kesit görüntüsü, (a) bronz (Cu-Sn) ve (b) nikel-gümüş (NiCuZn).

3.3 Anti-bakteriyel Etkinlik

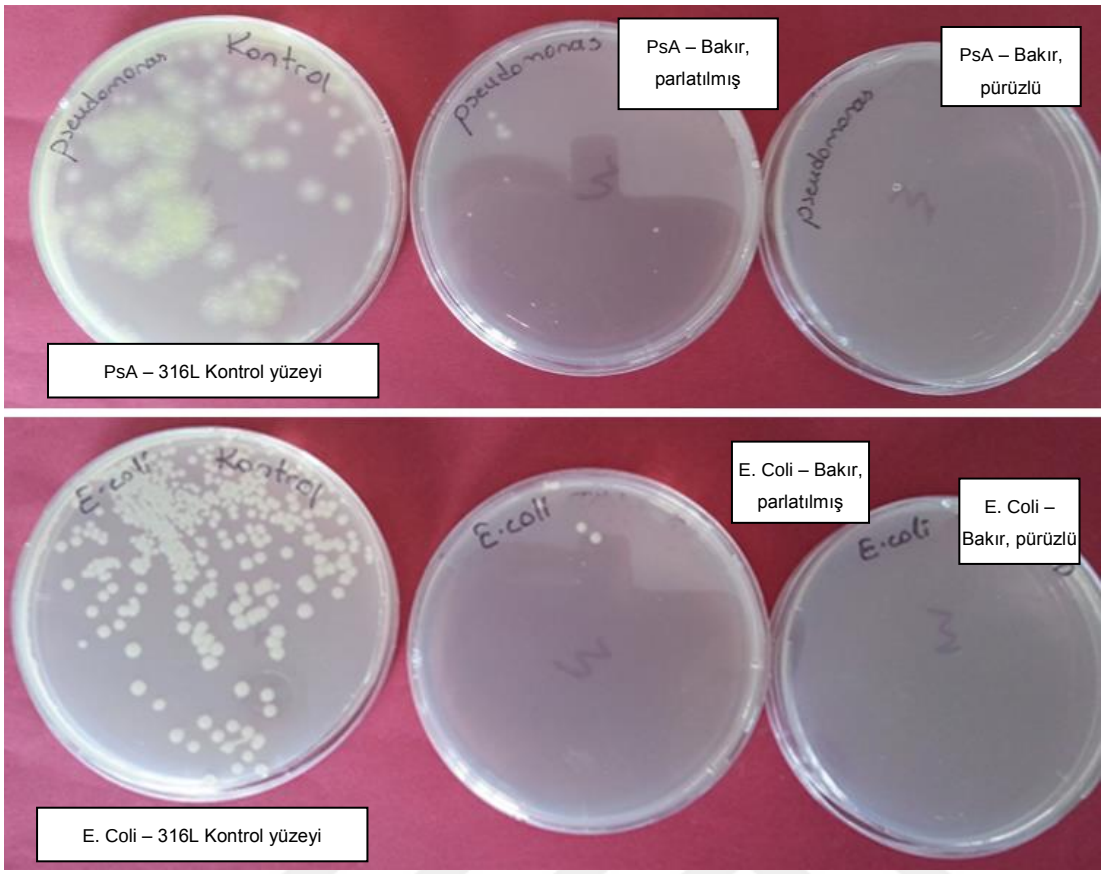
Antibakteriyel etkinliğin incelendiği çalışmalarda, kaplamaların pürüzlü doğasının, çukur ve vadilerde organizmaları hapsederek anti-bakteriyel etkinliğe olumlu katkı sağladığı raporlanmıştır [170]. Kullanıcı beklentilerinin dikkate alındığı geleneksel yaklaşımda ise, bakterinin tutunamadığı kadar pürüzsüz yüzeyler, koloni büyümesine engel teşkil etmesinin yanında özellikle kolay temizlenebilir olması sebebi ile tercih edilmektedir [171]. Pürüzsüz yüzeylerde kir, atık ve bakteriler için besi olarak sınıflandırılacak unsurlar da pürüzlü yüzeylere kıyasla daha zor birikmektedir [172]. Saf bakır kaplamalar esas alınarak, püskürtülmüş ve parlatılmış olarak iki farklı yüzey tipi tez kapsamında incelenmiştir.

3.3.1 Yüzey pürüzlülüğü ve anti-bakteriyel etkinlik

Yüzeylerde belirgin pürüzlülük farklarını yaratmak için 16 grit alümina ile 4 bar basınçta yakınsak nozül kullanılarak kumlama yapılmıştır ve hazırlanan yüzey, benzer şartlarda yapılan çalışmalara paralel olarak [173], ~32μm değerinde pürüzlülük vermiştir. Parlak yüzey elde etmek için, aynı kaplamaya ait bir diğer yüzey fırçalanarak ve parlatılarak Ra ~4μm seviyesine indirilmiştir. Şekil 3.13 ile fırçalanmış yüzey ve pürüzlü yüzey profilometre ölçümleri verilmektedir. Standart E. Coli suşları ile PsA klinik izolatı test prodesürüne uygun şekilde hazırlanan süspansiyon ile pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylere ekilmiştir. 2 saat bekleme süresi sonunda, koloni sayımı için yüzeyden sıvı çekilerek Mueller Hinton agara aktarılmıştır ve 24 saat boyunca 37 °C sıcaklıkta tutularak inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonrasında koloni sayıları kontrol plağı ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.13 : Bakır kaplama yüzeyleri, (a) parlatılmış ve (b) püskürtülmüş olarak.

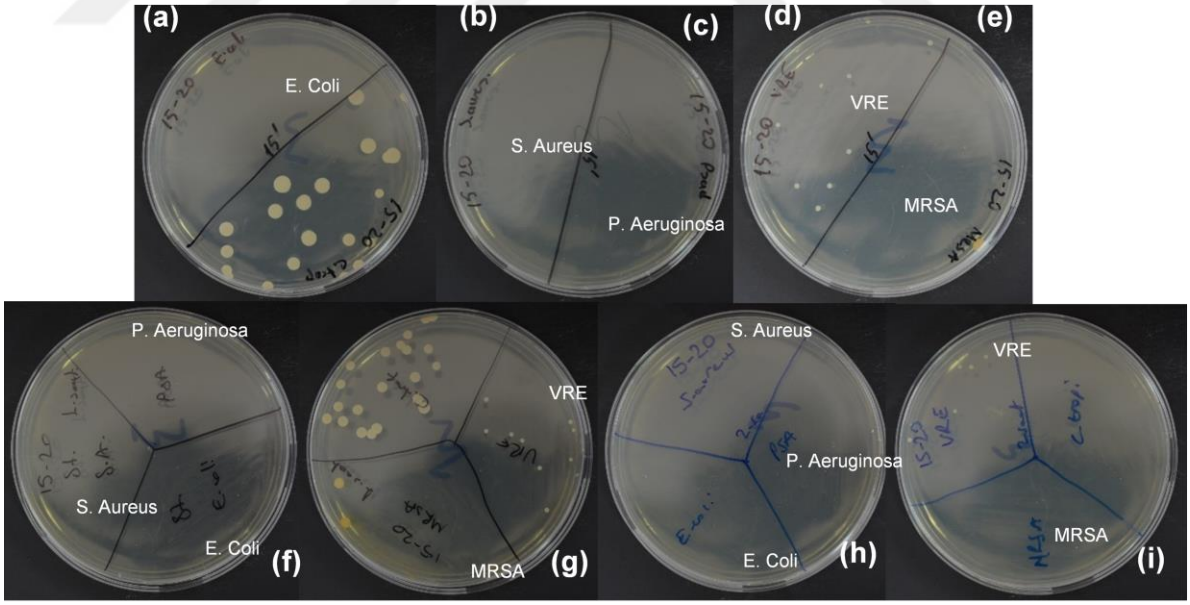


Şekil 3.14 : Pürüzlü ve parlatılmış yüzeylerin kontrol numunesine karşı, 2 saat süre sonunda bakteri testi sonuçları, üst resim PsA ve alt resim E. Coli.

Şekil 3.14, pürüzlü ve pürüzsüz yüzeylerin ilgili bakterilere göre kontrol plağına karşı koloni sayılarını göstermektedir. PsA için, üst resimde pürüzlü ve parlatılmış yüzeyler ile teması sonucunda pürüzlü yüzeyde sıfır üreme varken parlatılmış yüzeyde 4 koloni üremiştir. Kontrol plağı ile kıyaslandığında PsA bakterisinin indirgendiği açıklıkla gözlemlenmektedir. E. Coli için, alt resimde pürüzlü ve parlatılmış yüzeyler ile teması sonucunda pürüzlü yüzeyde sıfır üreme varken parlatılmış yüzeyde 3 koloni üremiştir. Kontrol plağı ile kıyaslandığında E. Coli bakterisinin de indirgendiği açıklıkla görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, bakteri cinsinden bağımsız olarak indirgeme her iki yüzey tipi için de sağlanmaktadır. Pürüzlü yüzeylerde sıfır koloni elde edilirken parlatılmış yüzeylerde koloni gözlenmesi, pürüzlü yüzey morfolojisinin üstünlüğünü işaret etse de [174], kontrol yüzeyine karşı % indirgenme hesabı yapıldığında iki yüzey de >%99 etkinlik göstermektedir. Dolayısı ile, bakırın anti-bakteriyel etkinliğinin, yüzey morfolojisinden çok daha baskın özellik gösterdiği sonucu dışında daha genel bir çıkarım yapılması gerçek dışı olmaktadır. Diğer bir deyişle, bakır, yüzey morfolojisinden bağımsız şekilde anti-bakteriyel etkinliğini baskın şekilde korumaktadır.

3.3.2 Alaşımların antibakteriyel etkinliği

Yüzey morfolojisinin etkisinin ihmal edilir mertebede olmasından ötürü tüm bakteri testleri, kaplamaların püskürtüldüğü hali ile, herhangi bir işlem görmeyen pürüzlü kaplama yüzeylerinde yapılmıştır. Tüm kaplamalar için bütün numuneler ile tekrarlı test plakları teker teker hazırlanmış ve sayımlar ayrı ayrı yapılmıştır. Tez yazımı içerisine tüm verilen sığdırılması mümkün olmadığı için saf bakır, kaplama örneği olarak tayin edilmiştir ve Şekil 3.15'te, farklı zaman aralıklarında, saf bakır kaplama üzerinde seçilen bakterilere karşı test sonuçlarını gösterilmektedir. (a), (b) ve (c) plakları sırası ile E. Coli, S. Aerus ve PsA bakterilerinin 15 dakika sonrasında elde edilen sonuçları vermektedir ve ilgili kolonilerin tamamı yok edilmiştir. Takip eden zaman aralıkları olan 1 saat (f) ve 2 saat (h) süre sonunda ise sürekli tüm kolonilerin indirgenmesi sürekli olarak sağlanmıştır. Bir süper bakteri türü olan VRE için, (d) şıkkında gösterilen, 15 dakika sonundaki gözlemde, bir miktar koloni hayatta kalmış olmasına rağmen 1 saat (g) ve 2 saat (i)sonraki gözlemlerde koloniler başarılı bir şekilde indirgenmiştir. Diğer bir süper bakteri türü olan MRSA için, (e) şıkkında sunulan 15 dakika sonrası gözlemde indirgenmesine rağmen 1 saat (g) sonraki gözlemde koloniler az da olsa hayatta kalabilmişlerdir. Nitekim, takip eden 2 saat (i) süre sonundaki gözlemde tekrar başarılı olarak indirgendiği görülmektedir.



Şekil 3.15 : Bakteri test sonuçları, (a) E. Coli, (b) S. Aerus, (c) PsA, (d) VRE ve (e) MRSA için 15 dakika sonrasındaki görüntüler olmak üzere, (f) ve (g) 1 saat sonra, (h) ve (i) ise 2 saat sonraki bakteri koloni görüntüleri.

Çizelge 3.4 : Alaşımların ilgili zaman aralıklarında, seçilen bakterilere karşı antibakteriyel etkinlik test sonuçları.

Alaşım	Zaman aralıkları, h	E. coli	S. aureus	PsA	VRE	MRSA
Saf Bakır	0,25	>99.9	>99.9	>99.9	96,11	>99.9
	1	>99.9	>99.9	>99.9	98	98,3
	2	>99.9	>99.9	>99.9	99,7	>99.9
Cu-Al	0,25	>99.9	>99.9	>99.9	86	98
	1	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9
	2	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9
Cu-Zn	0,25	>99.9	99	>99.9	95	>99.9
	1	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9
	2	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9
Cu-Sn	0,25	>99.9	>99.9	>99.9	95,55	98,33
	1	>99.9	>99.9	>99.9	96	99,39
	2	>99.9	>99.9	>99.9	98,33	>99.9
NiCuZn	0,25	>99.9	>99.9	>99.9	96,11	>99.9
	1	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9
	2	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9	>99.9

Çizelge 3.4, alaşımların, seçilen bakterilere karşı etkinliğini, indirgenme yüzdeleri ile, belirlenen kontrol zaman aralıklarında listelemektedir. Çizelgeyi oluşturan tüm bakteri koloni sayıları başlangıç inokulumu, kontrol yüzeyleri ve kaplama yüzeyleri ile kıyaslamalı olarak EK C'de verilmektedir. Süper bakteri olan VRE ve MRSA, nikel-gümüş hariç tüm alaşımlarda 15 dakikada direnç göstermiştir. Takip eden 1 saat ve 2 saat aralıklarında sadece bronzda direnebilen süper bakteriler, tüm alaşımlarda 1 saat sonunda tamamen indirgenmiştir. Süper bakteriler, bronzda da tüm zaman aralıklarında artan oranda indirgenmeye devam etmiştir. Her ölçüm sonrası tekrar taze koloni ekilmesine rağmen sürekli indirgenme tüm alaşımlarda sağlanmıştır.

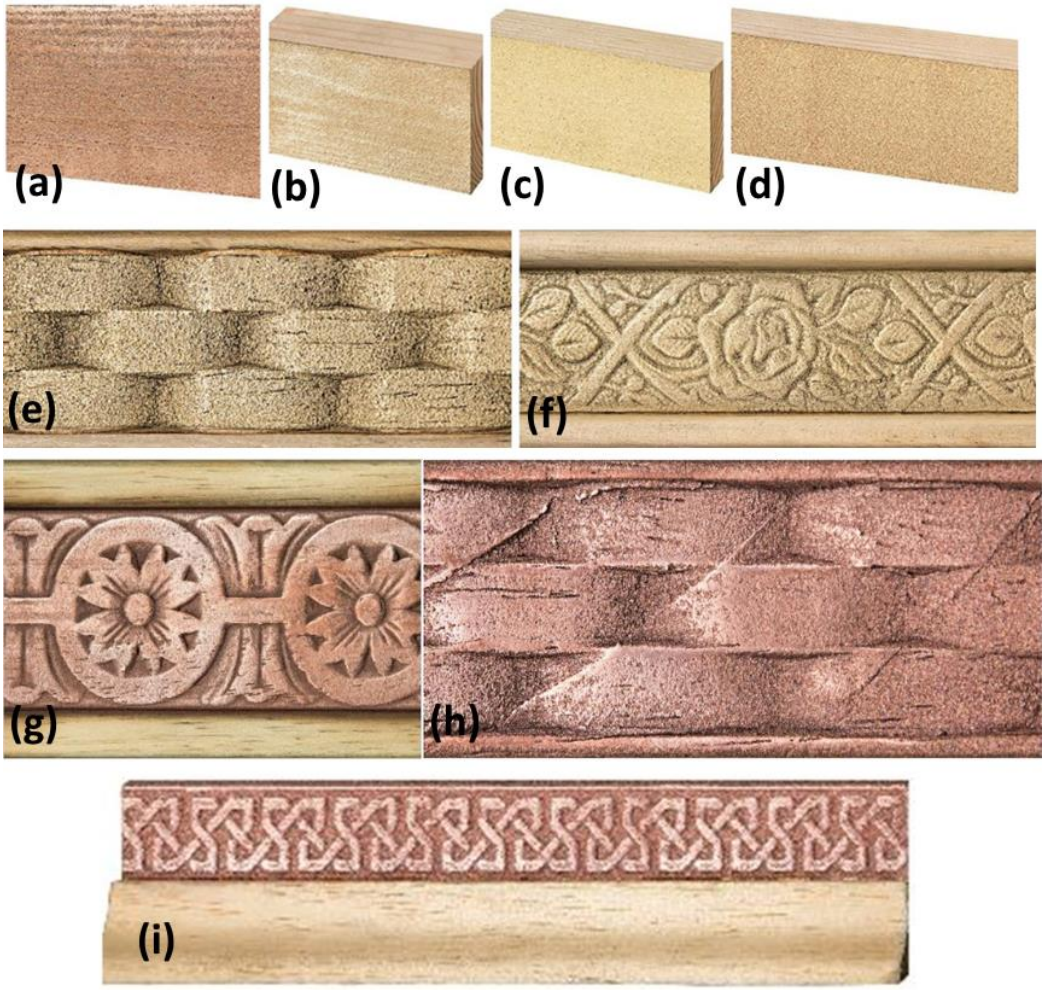
S. Aerus gibi gram pozitif bakterilerin hücre duvarlarının kalın fakat çoğunlukla tek kat ve geçirgenliğinin yüksek olmasından ötürü, söz konusu kapsamda bakır iyonları için difüzyonun kolay olması sebebi ile anti-bakteriyel etkinliğin yüksek olması beklenilen bir sonuçtur [175]. Öte yandan, E. Coli gibi gram negatif bakterilerde daha ince olan hücre duvarı birkaç katmandan oluşmakta ve geçirgenliği görece daha düşük olmasından ötürü, uygulanan kimyasallara direnç gösterebilmesine rağmen, yapılan kaplama testlerinde, gram pozitif gruba nazaran herhangi bir artı direnç göstermemiştir [176]. Süper bakterilerin diğer bakterilere göre daha çok direnç göstermesinin sebebi ise, hücre dış duvarlarının tümüne kıyasla daha kalın olması ile açıklanabilmektedir [177].

Bu tez çalışmasında bu aşamaya kadar bakır ve alaşımlarının, ısıl püskürtme yüzey kaplama tekniklerinden biri olan tel beslemeli ark püskürtme yöntemi kullanılarak 316L alaşımlı test kuponları üzerlerine kaplanmış ve kapsamlı testleri yürütülmüştür. Kavramsal tasarım ve validasyonu, simülasyon ve validasyonu, laboratuvar ortamında gerçekleştirme ve validasyonu tamamlanmış olan kaplamaların kıyaslamalı değerlendirmesi ile THS5 seviyesinde validasyon bütünlüğü sağlanmıştır.

3.4 Teknolojik hazırlık seviyesinin THS7 seviyesine çıkarılması

Bu aşamada hipotez testinin daha yüksek teknolojik seviyelerde validasyonu için ve çalışmanın THS7 seviyesine yükseltilmesine yönelik pilot ölçeğinde gerçekleştirme ve validasyon da gerçekleştirilmiş olup, tüm alaşımlar, gerçek hayatta kullanımı olan farklı tipte metal ve metal dışı yüzeylere uygulanmıştır. Kaplamalar gerçekleştirildikten sonra estetik beklentileri karşılayabileceklerini de göstermek amacı ile çeşitli parlatma ve fırçalama gibi ardıl yüzey işlemlerine de tabi tutulmuşlardır.

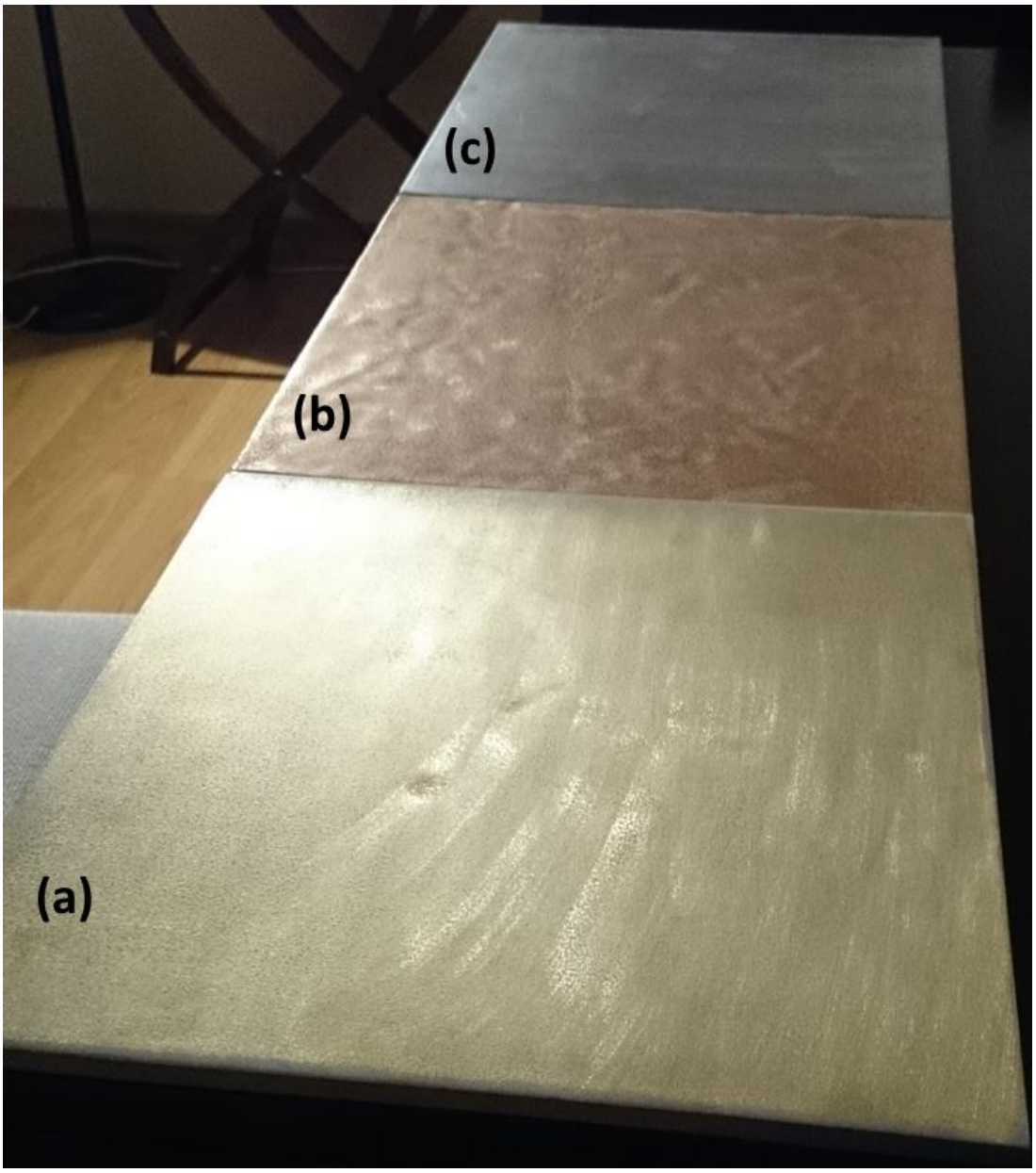
Şekil 3.16, düz ve desenli ahşap yüzeylere alaşım kaplama örneklerini göstermektedir. Özellikle desenli kaplamalarda tüm detaylar, ince unsurlara kadar kaplanabilmektedir. Şekil 3.17’da ahşap uygulamalarda gerçekleştirilen parlatma işlemleri sonrası görünümler verilmektedir. Ahşap altlık malzeme bu uygulamalar esnasında yanma vb. bir hasar almadığı gibi kaplamanın ahşaba kuvvetli yapışma sağlaması sayesinde, parlatma işlemleri esnasında veya sonrasında kaplanan yüzeyde kalkma veya sıyrılma gibi herhangi bir hasar söz konusu olmamıştır.



Şekil 3.16 : Ahşap üzeri, düz uygulamalar, (a) bakır, (b) pirinç, (c) alüminyum bronzu, (d) bronz ve desen uygulamaları (e) pirinç, (f) alüminyum bronzu, (g-i) bakır olmak üzere.

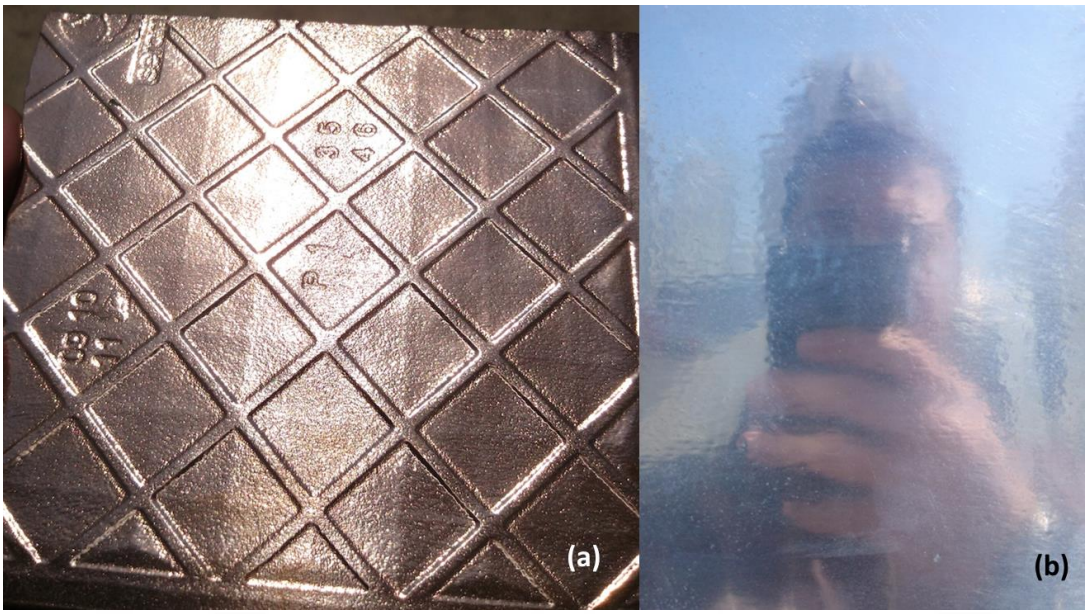
Şekil 3.17 : Ahşap üzeri uygulamalarda (a) kısmi parlatma uygulanmış bakır, (b) ham kaplama hali ile bakır ve (c) kısmi parlatma uygulanmış pirinç.

Şekil 3.18'de, düzlemsel seramik plakalara yapılmış kaplamaların fırçalanmış görüntüleri verilmektedir. Seramik gibi genleşmeye uyumsuz, düz ve görece geniş plaka yüzeylerine, düzlemsel yapıda olmasına nazaran, alaşımlar, eksiksiz olarak kaplanabilmişlerdir ve elde edilen yapışma mukavemetleri, fırçalama gibi ardıl yüzey işlemleri esnasında sıyrılma veya kalkmaya izin vermemiştir.



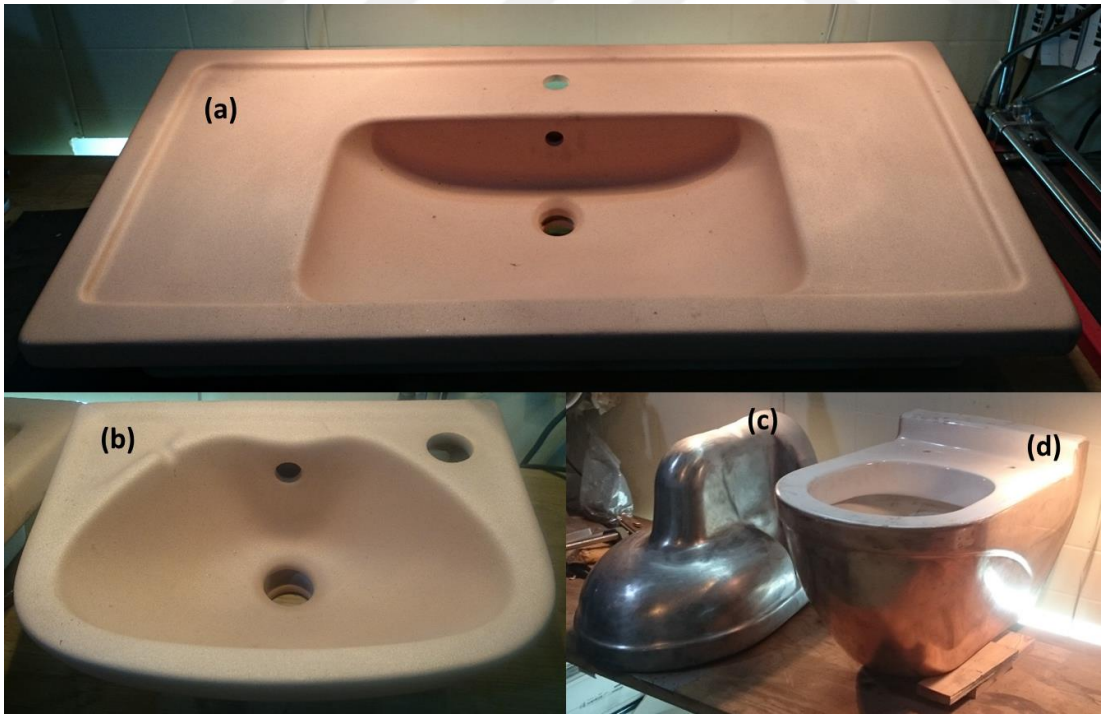
Şekil 3.18 : Seramik üzeri kaplamalarda çeşitli fırçalama yöntemleri ile (a) alüminyum bronzu, (b) bronz ve (c) nikel-gümüş olmak üzere.

Şekil 3.19'de, seramik plaka üzeri kaplamalara uygulanan parlatma işlemlerinin desenli ve plaka formlarında ne kadar ileri götürülebileceği gösterilmektedir. Bu yüzeylere polisaj uygulamaları herhangi bir özel şart gerektirmeden, metal yüzeye uygulandığı reçete ile doğrudan tatbik edilerek hatasız sonuçlar elde edilmiştir.

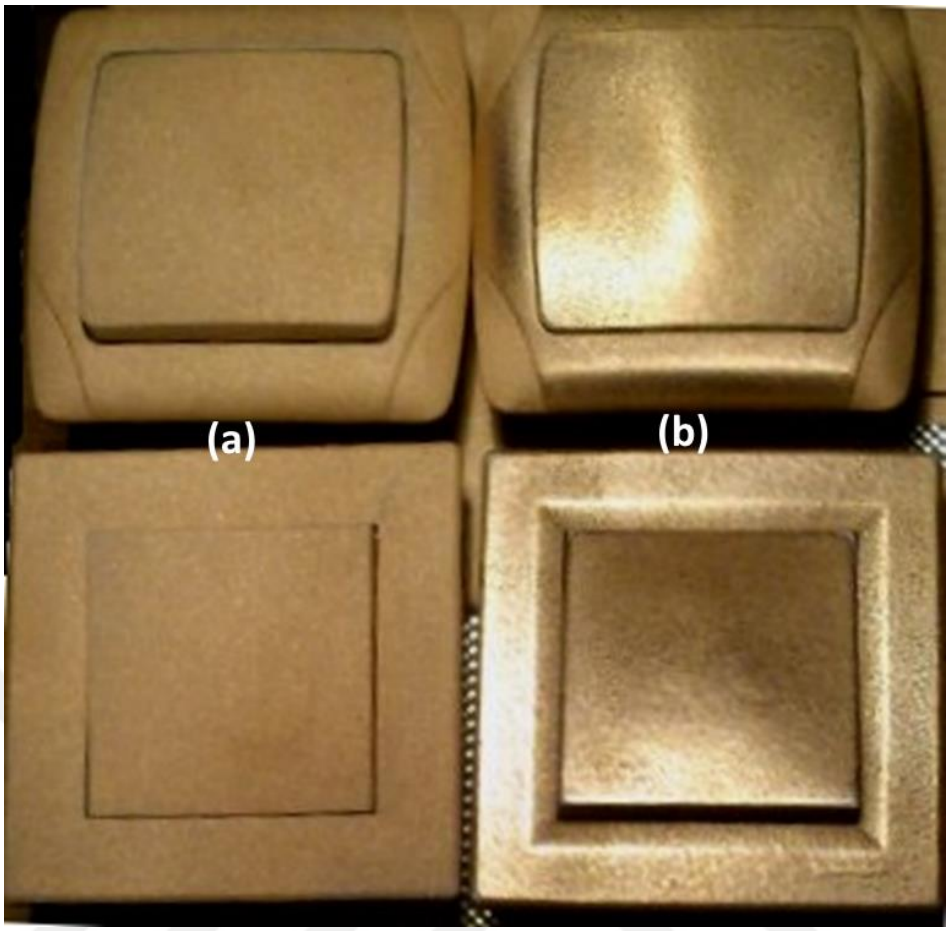


Şekil 3.19 : Seramik üzerine yapılmış kaplamaların parlatılmış görüntüleri, (a) desen üzerine bakır ve (b) düz yüzey üzerine nikel-gümüş.

Şekil 3.20 ile vitrifiye seramikler üzerine kaplanan alaşımların ham ve parlatılmış halleri verilmektedir. Vitrifiye uygulamalarda kaplamanın polimer bileşenler ile kapatılması sonucu suyun nüfuz etmediği yapı da kolaylıkla elde edilebilmektedir.



Şekil 3.20 : Vitrifiye üzerine (a) bakır, (b) alüminyum bronzu, (c) nikel-gümüş ve (d) bakır olmak üzere.



Şekil 3.21 : Elektrik anahtarları üzerine alüminyum bronzu, (a) kaplama ham hali ve (b) parlatılmış hali olmak üzere.

Şekil 3.21'de ise polimer, elektrik kontak anahtarları üzerine yapılan kaplamanın ham ve parlatılmış hallerini içermektedir. Montajlı parçalar ve mekanik hareket esnasında birbirlerine karşı çalışan yüzeyler kusursuz olarak işlevlerini sağlamaktadırlar.

Böylece çalışma kapsamında test ettiğimiz hipotez seri üretime aktarılabilir aşamaya kadar test edilip valide edilmiş olup, elde edilen bilgi ve tecrübe seri üretime aktarılabilir düzeye getirilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada bakırın, kitlesel formda sahip olduğu bilinen anti-bakteriyel özelliklerinin, kaplama halinde de korunacağı beklentisi ile, çeşitli yüzeylerde gerçekçi maliyetlerle uygulanabilir olması üzere tel beslemeli ark püskürtme yöntemi kullanılarak alaşım (Cu-Al, Cu-Zn, Cu-Sn, NiCuZn) kaplamalar elde edilmiştir.

Kaplama sürecinin anlaşılabilmesi ve parametre özellik ilişkisinin çözümlenebilmesi için matematik modeli oluşturulmuştur ve parçacık sıcaklığı ile hızında %10'un altında hata payı ile yakınsama elde edilmiştir. Söz konusu model kaplama parametrelerine göre mesafe tayininde kullanılarak, sıcaklığa duyarlı yüzeylerin kaplanması için başlangıç noktası olabilmektedir.

Alaşım kaplamaların kesit görüntüleri, faz ve spektrometre analizleri sayesinde etkili çalışma parametreleri tayin edilmiştir. Sürekliliğe sahip, ara yüzey ve katmanlar arası mekanik kitlenmesi sağlıklı, düşük por yüzdesine ve özellikle kapalı por yapısına sahip üretilmiş kaplamalar, 100 μm ortalama kaplama kalınlığında asgari oksit miktarı ihtiva etmektedirler.

Kaplamaların tamamı, standart anti-bakteriyel testinin sürekli indirgenme şartlarını simüle edecek şekilde modifiye edilmiş hali ile incelemeye tabi tutulmuşlardır. E. Coli, S. Aerus, PsA ile süper bakteri sınıfından VRE ve MRSA bakterileri ile dar ve kısa zaman aralıklarında dinamik antibakteriyel testler gerçekleştirilmiş ve etkinlikleri araştırılmıştır. Tel beslemeli ark püskürtme ile uygulanan alaşımlar için elde edilen önemli çıkarımlar aşağıdaki gibidir;

1) Bakır kaplama, yüzey morfolojisinden bağımsız olarak etkin şekilde bakterileri öldürmeye sürekli halde devam edebilmektedir.
2) Bakır ve ilgili alaşım kaplamalardan, 15 dakika, 1 saat ve 2 saat sürelerinde alınan ölçümlere göre, her zaman aralığında taze koloni ekilmesine rağmen, E. Coli, S. Aerus, PsA, VRE ve MSRA bakteri kolonilerinin tamamını sürekli olarak indirgemektedir.
3) Bakır ve ilgili alaşım kaplamalar, porozite, kalınlık, kalıntı gerilim gibi özellikleri destekleyecek kaplama parametreleri ile uygulandığında ölçülebilir bir performans farkı göstermeden, etkin ve hızlı bir şekilde bakterilerin tamamını öldürmektedir.

Çalışma kapsamında test edilen hipotez valide olduktan sonra uyarlanabilirliğini test etmek üzere gerçek hayatın içinde bulunan objelerin yüzeyleri aktif bakır alaşımları ile kaplanmış ve ardıl yüzey işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Uygulama örneklerinin hatasız olarak elde edilmesi sayesinde, çalışma kapsamında geliştirilen teknoloji THS7 seviyesini sağlamaktadır ve sahada uygulamaya hazır olgunluktadır.

KAYNAKÇA

[1] **Suryanarayanan, R.** *Plasma Spraying Theory and Applications*. Singapore: World Scientific, 1993.

[2] **Fauchais, P.** Understanding plasma spraying. Laboratoire Sciendes des Procedes Ceramiques et Traitements de Surface, University of Limoges.

[3] **Flame Spray Hungary KFT.** [Sunum notları]. A1 – Introduction to thermal spray. Flame Spray Hungary KFT, 2004.

[4] **Stokes, J.** The Theory and Application of HVOF Thermal Spray Process, Dublin City University, 2008, p. 53.

[5] **Bolot, R.**, **Klein, D.**, and **Coddet, C.** [Uluslararası Termal Spray Konferansı Bildiri Kitapçığı]. Influence of the Nozzle Design on the Structure of a Plasma Jet Under Vacuum Conditions, 2002.

[6] **Delluc, G.**, **Ageorges, H.**, **Pateyron, B.**, and **Fauchais, P.** [Özel Eğitim İçeriği Ders Notu]. Fast modelling of plasma jet and particle behaviours in spray conditions. University of Limoges, Cedex.

[7] **Chang, C. W.** and **Szekely, J.** (1982), Plasma Applications in Metals Processing, *Journal of Metals*, vol. *34*, pp. 57–64.

[8] **Li, H. P.** and **Chen, X.** (2002), Three-Dimensional Modeling of the Turbulent Plasma Jet Impinging upon a Flat Plate and with Transverse Particle and Carrier-Gas Injection, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. *22*, pp. 27–58.

[9] **England, G.** Surface Engineering Forum: Thermal Spray Coatings, 2010. www.gordonengland.co.uk/xtsc.htm (accessed Apr. 08, 2022).

[10] **Petterson, T.** [Staj Eğitimi Ders Notları]. Diagnostics Correlation Study of 8%-YSZ Deposited by F4-MB APS Torch. Siemens Power Generation, Central Florida.

[11] **Qunbo, F.**, **Lu, W.**, and **Fuchi, W.** (2008), Modeling influence of basic operation parameters on plasma jet, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. *198*, no. 1–3, pp. 207–212.

[12] **Krauss, M.**, **Bergmann, D.**, **Fritsching, U.**, and **Bauckhage, K.** In-situ particle temperature, velocity and size measurements in the spray forming process, 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/msea

[13] **Metco, S.** Process Layout, *Product Data Sheet*. Sulzer Metco.

[14] **Wigren, J.** and **Johansson, J.** Modern industrial approach to qualification of spray booths and laboratory personnel, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Jun. 2010, vol. *19*, no. 4, pp. 828–834. doi: 10.1007/s11666-009-9465-4.

[15] **Gifford, D. J.**, **Pollard, L.**, **Wuest, G.**, and **Fletcher, R. C.** Thermal Spray Booth Design Guidelines, *SG003-03*. ASM-TSS Safety Committee.

[16] **Ettouil, F. B.**, **Pateyron, B.**, **Ageorges, H.**, **Ganaoui, M. E.**, **Fauchais, P.**, and **Mazhorova, O.** Fast modeling of Phase Changes in a Particle Injected Within a d.c. Plasma Jet. Limoges Üniversitesi, Limoges.

[17] **Hall, A.**, **Urrea, D.**, **Mccloskey, J.**, **Beatty, D.**, **Roemer, T.**, and **Hirschfeld, D.** The effect of torch hardware on particle temperature and particle velocity distributions in the powder flame spray process, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Jun. 2010, vol. *19*, no. 4, pp. 824–827. doi: 10.1007/s11666-010-9487-y.

[18] **Zhang, T.**, **Gawne, D. T.**, and **Liu, B.** (2000), Computational analysis of the influence of process parameters on the flow field of a plasma jet, *Surface and Coatings Technology*, vol. *132*, no. 2–3, pp. 202–216.

[19] **Schwenk, A.** Development and testing of new jets for the atmospheric plasma spraying, TU Chemnitz, Chemnitz, 2005.

[20] **Siegert, R.** A Novel Process for the Liquid Feedstock Plasma Spray of Ceramic Coatings with Nanostructural Features, Bochum, 2005.

[21] **Selvan, B.**, **Ramakadran, K.**, **Sreekumar, K. P.**, **Thiyagarajan, T. K.**, and **Ananthapadmanabhan, P. v** (2010), Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch, *Journal of Vacuum*, vol. *84*, no. 4, pp. 444–452.

[22] **Kelkar M**, **Hussary N**, **Schein J**, and **Heberlein J** (1998), OPTICAL DIAGNOSTICS AND MODELING OF GAS AND DROPLET FLOW IN WIRE ARC SPRAYING, pp. 25–29, doi: 10.1361/cp1998its.

[23] **Tillmann, W.** and **Abdulgader, M.** Wire composition: Its effect on metal disintegration and particle formation in twin-wire arc-spraying process, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Mar. 2013, vol. *22*, no. 2–3, pp. 352–362. doi: 10.1007/s11666-012-9870-y.

[24] **Photron** FASTCAM Product Manual. 1985.

[25] **Wang, H. X.**, **Chen, X.**, **Cheng, K.**, and **Pan, W.** (2007), Modeling study on the characteristics of laminar and turbulent argon plasma jets impinging normally upon a flat plate in ambient air, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. *50*, no. 3–4, pp. 734–745.

[26] **Bar-On, Y. M.**, **Phillips, R.**, and **Milo, R.** (2018), The biomass distribution on Earth, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. *115*, no. 25, p. 6506, doi: 10.1073/pnas.1711842115.

[27] **Bassler, B.** Bacteria, TED, Longbeach California USA, Feb. 2009.

[28] **Simchi, A.**, **Tamjid, E.**, **Pishbin, F.**, and **Boccaccini, A. R.** Recent progress in inorganic and composite coatings with bactericidal capability for orthopaedic applications, *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, vol. *7*, no. 1. pp. 22–39, Feb. 2011. doi: 10.1016/j.nano.2010.10.005.

[29] **Hasan, J.**, **Crawford, R. J.**, and **Ivanova, E. P.** Antibacterial surfaces: The quest for a new generation of biomaterials, *Trends in Biotechnology*, vol. *31*, no. 5. pp. 295–304, May 2013. doi: 10.1016/j.tibtech.2013.01.017.

[30] **Weber, D. J.** and **Rutala, W. A.** (2013), Self-disinfecting surfaces: Review of current methodologies and future prospects, *American Journal of Infection Control*, vol. *41*, no. 5 SUPPL., doi: 10.1016/j.ajic.2012.12.005.

[31] **O'Gorman, J.** and **Humphreys, H.** Application of copper to prevent and control infection. Where are we now?, *Journal of Hospital Infection*, vol. *81*, no. 4. pp. 217–223, Aug. 2012. doi: 10.1016/j.jhin.2012.05.009.

[32] **Jing, H.**, **Yu, Z.**, and **Li, L.** (2008), Antibacterial properties and corrosion resistance of Cu and Ag/Cu porous materials, *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, vol. *87*, no. 1, pp. 33–37, doi: 10.1002/jbm.a.31688.

[33] **Kim, J.**, **Kwon, S.**, and **Ostler, E.** (2009), Antimicrobial effect of silver-impregnated cellulose: Potential for antimicrobial therapy, *Journal of Biological Engineering*, vol. *3*, doi: 10.1186/1754-1611-3-20.

[34] **Mukherji, S.**, **Ruparelia, J.**, and **Agnihotri, S.** Antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles: Variation in sensitivity across various strains of bacteria and fungi, in *Nano-Antimicrobials: Progress and Prospects*, vol. *9783642244285*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, pp. 225–251. doi: 10.1007/978-3-642-24428-5_8.

[35] **Ruparelia, J. P.**, **Chatterjee, A. K.**, **Duttagupta, S. P.**, and **Mukherji, S.** (2008), Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles, *Acta Biomaterialia*, vol. *4*, no. 3, pp. 707–716, doi: 10.1016/j.actbio.2007.11.006.

[36] **Zhao, L.**, **Chu, P. K.**, **Zhang, Y.**, and **Wu, Z.** Antibacterial coatings on titanium implants, *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, vol. *91*, no. 1. pp. 470–480, Oct. 2009. doi: 10.1002/jbm.b.31463.

[37] **Ewald, A.**, **Glückermann, S. K.**, **Thull, R.**, and **Gbureck, U.** (2006), Antimicrobial titanium/silver PVD coatings on titanium, *BioMedical Engineering Online*, vol. *5*, doi: 10.1186/1475-925X-5-22.

[38] **Whitehead, K. A.** and **Verran, J.** (2007), The effect of surface properties and application method on the retention of Pseudomonas aeruginosa on uncoated and titanium-coated stainless steel, *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. *60*, no. 2, pp. 74–80, doi: 10.1016/j.ibiod.2006.11.009.

[39] **Vincent, M.**, **Duval, R. E.**, **Hartemann, P.**, and **Engels-Deutsch, M.** (2018), Contact killing and antimicrobial properties of copper, *Journal of Applied Microbiology*, vol. *124*, no. 5, pp. 1032–1046, doi: 10.1111/jam.13681.

[40] **Stohs, S. J.** and **Bagchi, D.** MECHANISMS IN THE TOXICITY OF METAL IONS, 1995.

[41] **Santo, C. E.**, **Taudte, N.**, **Nies, D. H.**, and **Grass, G.** (2008), Contribution of copper ion resistance to survival of Escherichia coli on metallic copper surfaces, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. *74*, no. 4, pp. 977–986, doi: 10.1128/AEM.01938-07.

[42] **Grass, G.**, **Rensing, C.**, and **Solioz, M.** Metallic copper as an antimicrobial surface, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. *77*, no. 5. pp. 1541–1547, Mar. 2011. doi: 10.1128/AEM.02766-10.

[43] **Nan, L.** and **Yang, K.** (2010), Cu Ions Dissolution from Cu-bearing Antibacterial Stainless Steel, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. *26*, no. 10, pp. 941–944, doi: 10.1016/S1005-0302(10)60152-1.

[44] **Dan, Z. G.**, **Ni, H. W.**, **Xu, B. F.**, **Xiong, J.**, and **Xiong, P. Y.** (2005), Microstructure and antibacterial properties of AISI 420 stainless steel implanted by copper ions, *Thin Solid Films*, vol. *492*, no. 1–2, pp. 93–100, doi: 10.1016/j.tsf.2005.06.100.

[45] **Nie, Y.**, **Kalapos, C.**, **Nie, X.**, **Murphy, M.**, **Hussein, R.**, and **Zhang, J.** Superhydrophilicity and antibacterial property of a Cu-dotted oxide coating surface, 2010. [Online]. Available: http://www.ann-clinmicrob.com/content/9/1/25

[46] **Ren, L.**, **Yang, K.**, **Guo, L.**, and **Chai, H. W.** (2012), Preliminary study of anti-infective function of a copper-bearing stainless steel, *Materials Science and Engineering C*, vol. *32*, no. 5, pp. 1204–1209, doi: 10.1016/j.msec.2012.03.009.

[47] **Warnes, S. L.**, **Green, S. M.**, **Michels, H. T.**, and **Keevil, C. W.** (2010), Biocidal efficacy of copper alloys against pathogenic enterococci involves degradation of genomic and plasmid DNAs, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. *76*, no. 16, pp. 5390–5401, doi: 10.1128/AEM.03050-09.

[48] **Ren, G.**, **Hu, D.**, **Cheng, E. W. C.**, **Vargas-Reus, M. A.**, **Reip, P.**, and **Allaker, R. P.** (2009), Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications, *International Journal of Antimicrobial Agents*, vol. *33*, no. 6, pp. 587–590, doi: 10.1016/j.ijantimicag.2008.12.004.

[49] **Lee, Y. J.**, **Kim, S.**, **Park, S. H.**, **Park, H.**, and **Huh, Y. D.** (2011), Morphology-dependent antibacterial activities of Cu2O, *Materials Letters*, vol. *65*, no. 5, pp. 818–820, doi: 10.1016/j.matlet.2010.12.023.

[50] **M. H. Pombo Rodriguez, R.**, **Paredes, R. S. C.**, **Wido, S. H.**, and **Calixto, A.** (2007), Comparison of aluminum coatings deposited by flame spray and by electric arc spray, *Surface and Coatings Technology*, vol. *202*, no. 1, pp. 172–179, doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.05.067.

[51] **Champagne, V. K.** and **Helfritch, D. J.** (2013), A demonstration of the antimicrobial effectiveness of various copper surfaces, *Journal of Biological Engineering*, vol. *7*, no. 1, doi: 10.1186/1754-1611-7-8.

[52] **Centers for Disease Control and Prevention**, **National Center for Emerging and Zoonotic Infectious Diseases (NCEZID)**, and **Division of Healthcare Quality Promotion (DHQP)** Diseases and Organisms in Healthcare Settings, *Healthcare-Associated Infections (HAIs)*, Jul. 2019. https://www.cdc.gov/hai/organisms/organisms.html (accessed Jan. 09, 2022).

[53] **Copper Development Association Inc.** Scientific Proof Evidence and Studies, *Antimicrobial Copper*. https://www.antimicrobialcopper.org/evidence-and-studies (accessed Jan. 09, 2022).

[54] **Gutierrez, H.**, **Portman, T.**, **Pershin, V.**, and **Ringuette, M.** (2013), Evaluation of biocidal efficacy of copper alloy coatings in comparison with solid metal surfaces: Generation of organic copper phosphate nanoflowers, *Journal of Applied Microbiology*, vol. *114*, no. 3, pp. 680–687, doi: 10.1111/jam.12094.

[55] **Chan, Y. H.**, **Huang, C. F.**, **Ou, K. L.**, and **Peng, P. W.** (2011), Mechanical properties and antibacterial activity of copper doped diamond-like carbon films, *Surface and Coatings Technology*, vol. *206*, no. 6, pp. 1037–1040, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.034.

[56] **Agency for Toxic Substances and Disease Registry** Copper CAS#: 7440-50-8, Department of Health and Human Services, 2004. [Online]. Available: www.atsdr.cdc.gov/

[57] **Karim, N.** (2018), Copper and human health - A Review, *Journal of Bahria University Medical and Dental College*, vol. *8*, no. 2, pp. 117–122.

[58] **Salmon, J.** (1991), Dietary reference values for food energy and nutrients for the United Kingdom. Report of the Panel on Dietary Reference Values of the Committee on Medical Aspects of Food Policy., *Rep Health Soc Subj (Lond)*, vol. *41*, pp. 1–210.

[59] **National Academies of Sciences, E. and M.** Physiological Role of Copper, in *Copper in Drinking Water*, Washington, DC: The National Academies Press, 2000. doi: https://doi.org/10.17226/9782.

[60] **National Institutes of Health** Copper, *Fact Sheet for Health Professionals*, Mar. 29, 2021. https://ods.od.nih.gov/factsheets/Copper-HealthProfessional/ (accessed Jan. 10, 2022).

[61] **Wang, Z. Y.**, **He, N.**, **Wang, Y. J.**, and **Zhang, J.** Effects of copper on organisms: A review, in *Advanced Materials Research*, 2013, vol. *726–731*, pp. 340–343. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.726-731.340.

[62] **Dorsey, A.** and **Ingerman, L.** TOXICOLOGICAL PROFILE FOR COPPER, 2004.

[63] **Roney, N.** and **Colman, J.** INTERACTION PROFILE FOR: LEAD, MANGANESE, ZINC, AND COPPER, 2004.

[64] **Fage, S. W.**, **Faurschou, A.**, and **Thyssen, J. P.** Copper hypersensitivity, *Contact Dermatitis*, vol. *71*, no. 4. pp. 191–201, Oct. 01, 2014. doi: 10.1111/cod.12273.

[65] **Genchi, G.**, **Carocci, A.**, **Lauria, G.**, **Sinicropi, M. S.**, and **Catalano, A.** Nickel: Human health and environmental toxicology, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. *17*, no. 3. MDPI AG, Feb. 01, 2020. doi: 10.3390/ijerph17030679.

[66] **Torres, F.**, **das Graças, M.**, **Melo, M.**, and **Tosti, A.** Management of contact dermatitis due to nickel allergy: an update, 2009.

[67] COMSOL Mulitphysics User's Manual. COMSOL AB, Stockholm, 2014.

[68] **Helvacı, Ş. Ş.** *Akışkanlar Mekaniği*. İstanbul: Literatür Yayınevi, 2013.

[69] **Peng, H.** and **Xi, C.** (2001), Modeling of the Subsonic–Supersonic Flow and Heat Transfer in a DC ArcPlasma Torch, *lasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. *21*, no. 2.

[70] **Fauchais, P.**, **Boulos, M.**, and **Pfender, E.** *Thermal plasma, fundamentals and applications*. 1994.

[71] **Institut de Recherche sur les Céramiques** Jets&Poudres. Limoges Üniversitesi, May 19, 2009.

[72] **Lowke, J. J.** Simple theory of free-burning arcs, 1979. [Online]. Available: http://iopscience.iop.org/0022-3727/12/11/016

[73] **Schnick, M.**, **Wilhelm, G.**, **Lohse, M.**, **Füssel, I.**, and **Murphy, A. B.** (2011), Three-dimensional modelling of arc behaviour and gas shield quality in tandem gas–metal arc welding using anti-phase pulse synchronization, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. *44*, no. 18.

[74] **Tanaka, M.** and **Lowke, J. J.** (2007), Predictions of weld pool profiles using plasma physics : topical review, *Journal of Applied Physics D: Applied Physics*, vol. *40*, no. 1, pp. R1–R23.

[75] **Traidia, A.** and **Roger, F.** (2011), Effect of Helium-Argon Mixtures on the Heat Transfer and Fluid Flow in Gas Tungsten Arc Welding, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. *49*.

[76] **Kelkar, M.** and **Heberlein, J.** Wire-Arc Spray Modeling, 2002.

[77] **Capitelli, M.**, **Colonna, G.**, **Gorse, C.**, and **D'angola, A.** THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D Transport properties of high temperature air in local thermodynamic equilibrium, 2000.

[78] **Lemmon, E. W.** and **Jacobsen, R. T.** Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon, and Air, 2004.

[79] **Murphy, A. B.** A comparison of treatments of diffusion in thermal plasmas, 1922. [Online]. Available: http://iopscience.iop.org/0022-3727/29/7/029

[80] **Muphy, A. B.** (1995), Transport coefficients of air, argon-air, nitrogen-air, and oxygen-air plasmas, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. *15*, pp. 279–307.

[81] **Institut de Recherche sur les Céramiques** T&TWinner. Limoges Üniversitesi, 2009.

[82] **Traidia, A.** and **Roger, F.** (2010), A Transient Unified Model of Arc-Weld Pool Couplings during Pulsed Spot Gas Tungsten Arc Welding, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. *49*, pp. 1197–1208.

[83] **Gedzevicius, I.** and **Valiulis, A. v.** (2006), Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. *175*, no. 1–3, pp. 206–211, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.019.

[84] **Perry, R. H.** and **Tilton, J. N.** Chapter 6 Fluid and Particle Dynamics, in *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th Edition., Mc Graw Hill, 1997.

[85] **Xiong, H. B.**, **Zheng, L. L.**, **Sampath, S.**, **Williamson, R. L.**, and **Fincke, J. R.** (2004), Three-dimensional simulation of plasma spray: effects of carrier gas flow and particle injection on plasma jet and entrained particle behavior, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. *47*, no. 24, pp. 5189–5200.

[86] **Mi, J.**, **Grant, P. S.**, **Fritsching, U.**, **Belkessam, O.**, **Garmendia, I.**, and **Landaberea, A.** (2008), Multiphysics modelling of the spray forming process, *Materials Science and Engineering A*, vol. *477*, no. 1–2, pp. 2–8, doi: 10.1016/j.msea.2007.08.083.

[87] **Pryds, N. H.**, **Hattel, J. H.**, **Pedersen, T. B.**, and **Thorborg, J.** An integrated numerical model of the spray forming process, 2002. [Online]. Available: www.actamat-journals.com

[88] **Liu, D.**, **Zhao, J.**, and **Ye, H.** (2004), Modeling of the solidification of gas-atomized alloy droplets during spray forming, *Materials Science and Engineering A*, vol. *372*, no. 1–2, pp. 229–234, doi: 10.1016/j.msea.2003.12.041.

[89] **Aziz, S. D.** and **Chandra, S.** Impact, recoil and splashing of molten metal droplets. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/ijhmt

[90] **Zirari, M.**, **Abdellah El-Hadj, A.**, and **Bacha, N.** (2010), Numerical analysis of partially molten splat during thermal spray process using the finite element method, *Applied Surface Science*, vol. *256*, no. 11, pp. 3581–3585, doi: 10.1016/j.apsusc.2009.12.158.

[91] **Chen, Y.**, **Liang, X.**, **Liu, Y.**, **Bai, J.**, and **Xu, B.** (2010), Finite element modeling of coating formation and transient heat transfer in the electric arc spray process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. *53*, no. 9–10, pp. 2012–2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.055.

[92] **Zhu, Y.**, **Liao, H.**, and **Coddet, C.** (2006), Transient thermal analysis and coating formation simulation of thermal spray process by finite difference method, *Surface and Coatings Technology*, vol. *200*, no. 16–17, pp. 4665–4673, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.10.100.

[93] **P. Yue**, **C. Zhou**, **J.J. Feng**, **C.F. Ollivier-Gooch**, and **H.H. Hu** (2006), Phase-field Simulations of Interfacial Dynamics in Viscoelastic Fluids Using Finite Elements with Adaptive Meshing, *J. Comp. Phys.*, vol. *219*, pp. 47–67.

[94] **Ye, Q.** and **Chen, S.** (2017), Numerical Modeling of Metal-Based Additive Manufacturing Using Level Set Methods, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. *139*, no. 7, doi: 10.1115/1.4036290.

[95] **Zeoli, N.**, **Gu, S.**, and **Kamnis, S.** Numerical modelling of metal droplet cooling and solidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. *51*, no. 15–16. Elsevier Ltd, pp. 4121–4131, Jul. 15, 2008. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.044.

[96] **R.F. Brooks**, **I. Egry**, **S. Seetharaman**, and **D. Grant** (2001), Viscosity of liquid copper, *High Temperatures-High Pressures*, vol. *33*, no. 6, p. 631.

[97] **C.Y. Ho**, **R.W. Powell**, and **P.E. Liley** (1972), Thermal Conductivity of Liquid Copper, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. *1*, no. 2, p. 279.

[98] **B.J. McBride**, **S. Gordon**, and **M.A. Reno** Thermodynamic Data for Fifty Reference Elements, *NASA Technical Paper 3287*. 1993.

[99] **M.T. Hepworth** and **C.O. Rund** Viscosity and Density of Liquid Copper and Copper Alloys, *INCRA Project No. 176A, Final Report*. 1974.

[100] **N.J. Simon**, **E.S. Drexler**, and **R.P. Reed** Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures, *IST Monograph 177*, 1992.

[101] **J. Brous** A Manual Of Materials For Microwave Tubes, 1961.

[102] **T. A. Hahn** (1970), Density of solid copper, *Journal of Applied Physics*, vol. *41*, no. 13, p. 5096.

[103] **Jian, Z.**, **Kuribayashi, K.**, and **Jie, W.** Solid-liquid Interface Energy of Metals at Melting Point and Undercooled State, 2002.

[104] **R. Hultgren**, **R. L. Orr**, **P. D. Anderson**, and **K. K. Kelly** *Selected Values of Thermodynamic Properties of Metals and Alloys*. New York: John Wiley, 1963.

[105] **Yu. V. Naiditch** and **v. N. Eremenko** (1961), Fizika lrIetallovi Metallovedenie, *Physics Metals Metallography*, vol. *11*, no. 6, p. 62.

[106] Operation manual Arc Inverter SPARC 400. GTV Impex GmbH, Luckenbach, 2011.

[107] Spray Plume Monitoring with Accuraspray G3, *Product Data Sheet*. Sulzer Metco.

[108] **Zimmermann, S. *et al.*** Supervision and measuring of particle parameters during the wire-arc spraying process with the diagnostic systems accuraspray-g3 and LDA (laser-doppler-anemometry), in *Journal of Thermal Spray Technology*, Jun. 2010, vol. *19*, no. 4, pp. 745–755. doi: 10.1007/s11666-009-9466-3.

[109] **Fincke, J. R.**, **Swank, W. D.**, **Bewley, R. L.**, **Haggard, D. C.**, **Gevelber, M.**, and **Wroblewski, D.** Diagnostics and control in the thermal spray process, 2001.

[110] **Fauchais, P.** and **Vardelle, M.** Sensors in spray processes, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Jun. 2010, vol. *19*, no. 4, pp. 668–694. doi: 10.1007/s11666-010-9485-0.

[111] **Mauer, G.**, **Vaßen, R.**, and **Stöver, D.** Comparison and applications of DPV-2000 and accuraspray-g3 diagnostic systems, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *16*, no. 3. pp. 414–424, Sep. 2007. doi: 10.1007/s11666-007-9047-2.

[112] **Biancaniello, F.** and **Ridder, S.** ThermalSprayCoatingsWorkshop: Sensors,ModelingandControlStrategies SummaryofaWorkshopHeldat NationalInstituteofStandardsandTechnology NISTIR6460.

[113] **Pourmousa, A.**, **Mostaghimi, J.**, **Abedini, A.**, and **Chandra, S.** Particle size distribution in a wire-arc spraying system, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *14*, no. 4. pp. 502–510, Dec. 2005. doi: 10.1361/105996305X76522.

[114] **Pourmousa, A.**, **Mostaghimi, J.**, and **Chandra, S.** MODELING ARC HEATING IN TWIN-WIRE-ARC SPRAY SYSTEMS.

[115] **Bolot, R.**, **Bonnet, R.**, **Jandin, G.**, and **Coddet, C.** (2001), Application of CAD to CFD for the Wire Arc Spray Process, doi: 10.1361/cp2001itsc0889.

[116] **Chen, Y.**, **Liang, X.**, **Wei, S.**, **Chen, X.**, and **Xu, B.** Numerical simulation of the twin-wire arc spraying process: Modeling the high velocity gas flow field distribution and droplets transport, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *21*, no. 2. pp. 263–274, Mar. 2012. doi: 10.1007/s11666-011-9723-0.

[117] **Bolot, R.**, **Planche, M. P.**, **Liao, H.**, and **Coddet, C.** (2008), A three-dimensional model of the wire-arc spray process and its experimental validation, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. *200*, no. 1–3, pp. 94–105, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.032.

[118] Fluid dynamics investigations of wire arc spraying process.

[119] **Guillen, D. P.** and **Williams, B. G.** In-flight oxidation of aluminum in the twin-wire electric arc process, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *15*, no. 1. pp. 63–71, Mar. 2006. doi: 10.1361/105996306X92604.

[120] **Bolot, R.**, **Liao, H.**, **Mateus, C.**, **Coddet, C.**, and **Bordes, J. M.** Optimization of a rotating twin wire-arc spray gun, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Dec. 2007, vol. *16*, no. 5–6, pp. 783–790. doi: 10.1007/s11666-007-9077-9.

[121] **Cedelle, J.**, **Vardelle, M.**, **Pateyron, B.**, **Fauchais, P.**, **Fukumoto, M.**, and **Ohgitani, I.** Plasma-sprayed particles : Impact imaging and flattening particle thermal history.

[122] **Abedini, A.** SPLAT AND COATING FORMATION OF WIRE ARC SPRAYED ALUMINUm, Toronto, 2004.

[123] **Pasandideh-Fard, M.**, **Bhola, R.**, **Chandra, S.**, and **Mostaghimi, J.** Deposition of tin droplets on a steel experiments plate : simulations and, 1998.

[124] **Mostaghimi, J.**, **Pasandideh-Fard, M.**, and **Chandra, S.** Dynamics of Splat Formation in Plasma Spray Coating Process, 2002.

[125] **Fauchais, P.**, **Fukumoto, M.**, **Vardelle, A.**, and **Vardelle, M.** (2004), Knowledge concerning splat formation: An invited review, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *13*, no. 3, pp. 337–360, doi: 10.1361/10599630419670.

[126] **Abedini, A.**, **Pourmousa, A.**, **Chandra, S.**, and **Mostaghimi, J.** (2006), Effect of substrate temperature on the properties of coatings and splats deposited by wire arc spraying, *Surface and Coatings Technology*, vol. *201*, no. 6, pp. 3350–3358, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.07.184.

[127] **Pasandideh-Fard, M.**, **Pershin, V.**, **Chandra, S.**, and **Mostaghimi, J.** Splat Shapes in a Thermal Spray Coating Process: Simulations and Experiments.

[128] **Mehdizadeh, N. Z.**, **Chandra, S.**, and **Mostaghimi, J.** (2004), Formation of fingers around the edges of a drop hitting a metal plate with high velocity, *Journal of Fluid Mechanics*, no. 510, pp. 353–373, doi: 10.1017/S0022112004009310.

[129] **Montavon, G.**, **Sampath, S.**, **Berndt, C. C.**, **Herman, H.**, and **Coddet, C.** Effects of the spray angle on splat morphology during thermal spraying, 1997.

[130] **McDonald, A.**, **Lamontagne, M.**, **Moreau, C.**, and **Chandra, S.** (2006), Impact of plasma-sprayed metal particles on hot and cold glass surfaces, *Thin Solid Films*, vol. *514*, no. 1–2, pp. 212–222, doi: 10.1016/j.tsf.2006.03.010.

[131] **Amada, S.**, **Imagawa, K.**, and **Aoki, S.** Splat profile of impinging droplets on rough substrates: influence of surface roughness, 2002.

[132] **Fang, J. C.**, **Xu, W. J.**, and **Zhao, Z. Y.** (2005), Arc spray forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. *164–165*, pp. 1032–1037, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.165.

[133] **Mehdizadeh, N. Z.**, **Raessi, M.**, **Chandra, S.**, and **Mostaghimi, J.** (2004), Effect of substrate temperature on splashing molten tin droplets, *Journal of Heat Transfer*, vol. *126*, no. 3, pp. 445–452, doi: 10.1115/1.1737778.

[134] **Ghafouri-Azar, R.**, **Shakeri, S.**, **Chandra, S.**, and **Mostaghimi, J.** Interactions between molten metal droplets impinging on a solid surface. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/ijhmt

[135] **Jiang, X.**, **Wan, Y.**, **Herman, H.**, and **Sampath, S.** Role of condensates and adsorbates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray, 2001.

[136] **El-Hadj, A. A.**, **Zirari, M.**, and **Bacha, N.** (2010), Numerical analysis of the effect of the gas temperature on splat formation during thermal spray process, *Applied Surface Science*, vol. *257*, no. 5, pp. 1643–1648, doi: 10.1016/j.apsusc.2010.08.115.

[137] **Zhang, H.**, **Wang, X. Y.**, **Zheng, L. L.**, and **Jiang, X. Y.** Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/ijhmt

[138] **Ghafouri-Azar, R.**, **Mostaghimi, J.**, **Chandra, S.**, and **Charmchi, M.** A Stochastic Model to Simulate the Formation of a Thermal Spray Coating.

[139] **Wang, X.**, **Heberlein, J.**, **Pfender, E.**, and **Gerberich, W.** (1996), Effect of Gas Velocity and Particle Velocity on Coating Adhesion in Wire Arc Spraying, doi: 10.1361/cp1996itsc807.

[140] **Watanabe, T.**, **Sato, T.**, and **Nezu, A.** Electrode phenomena investigation of wire arc spraying for preparation of Ti-Al intermetallic compounds, 2002.

[141] **Gedzevičius, I.** and **Valiulis, A. v** Influence of the Particles Velocity on the Arc Spraying Coating Adhesion, 2003.

[142] **Zhu, Y. L.**, **Liao, H. L.**, **Coddet, C.**, and **Xu, B. S.** Characterization via image analysis of cross-over trajectories and inhomogeneity in twin wire arc spraying, 2003.

[143] **Tillmann, W.**, **Vogli, E.**, and **Abdulgader, M.** The correlation between the coating quality and the moving direction of the twin wire arc spraying gun, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Jan. 2010, vol. *19*, no. 1–2, pp. 409–421. doi: 10.1007/s11666-009-9452-9.

[144] **Liu, G.**, **Roz, K.**, and **Kurzydlowski, K. J.** Quantitative characteristics of FeCrAl films deposited by arc and high-velocity arc spraying.

[145] **Sacriste, D.**, **Goubot, N.**, **Dhers, J.**, **Ducos, M.**, and **Vardelle, A.** (2001), An Evaluation of the Electric Arc Spray and (HPPS) processes for the manufacturing of high, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *10*, no. 2, p. 358.

[146] **Hui, I. K.**, **Hua, M.**, and **Lau, H. C. W.** (2003), A parametric investigation of arc spraying process for rapid mould making, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. *22*, no. 11–12, pp. 786–795, doi: 10.1007/s00170-002-1532-7.

[147] **Wilden, J.**, **Bergmann, J. P.**, **Jahn, S.**, **Knapp, S.**, **Rodijnen, F.**, and **Fischer, G.** Investigation about the chrome steel wire arc spray process and the resulting coating properties, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Dec. 2007, vol. *16*, no. 5–6, pp. 759–767. doi: 10.1007/s11666-007-9114-8.

[148] **Deshpande, S.**, **Sampath, S.**, and **Zhang, H.** (2006), Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings - Case study for Ni-Al, *Surface and Coatings Technology*, vol. *200*, no. 18–19, pp. 5395–5406, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.07.072.

[149] **Jandin, G.**, **Liao, H.**, **Feng, Z. Q.**, and **Coddet, C.** Correlations between operating conditions, microstructure and mechanical properties of twin wire arc sprayed steel coatings. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/msea

[150] **Newbery, A. P.** and **Grant, P. S.** (2006), Oxidation during electric arc spray forming of steel, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. *178*, no. 1–3, pp. 259–269, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.176.

[151] **Hussary, N. A.** and **Heberlein, J. V. R.** (2007), Effect of system parameters on metal breakup and particle formation in the wire arc spray process, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *16*, no. 1, pp. 140–152, doi: 10.1007/s11666-006-9006-3.

[152] **Madaeni, S. S.**, **Aalami-Aleagha, M. E.**, and **Daraei, P.** (2008), Preparation and characterization of metallic membrane using wire arc spraying, *Journal of Membrane Science*, vol. *320*, no. 1–2, pp. 541–548, doi: 10.1016/j.memsci.2008.04.051.

[153] **Fadragas, C. R.**, **Morales, E. v.**, **Muñoz, J. A.**, **Bott, I. S.**, and **Lariot Sánchez, C. A.** An alternative Cu-based bond layer for electric arc coating process, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *20*, no. 6. pp. 1183–1191, Dec. 2011. doi: 10.1007/s11666-011-9664-7.

[154] **Sampath, S.**, **Jiang, X. Y.**, **Matejicek, J.**, **Prchlik, L.**, **Kulkarni, A.**, and **Vaidya, A.** (2004), Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings: An integrated study of Ni-5 wt. % Al bond coats, *Materials Science and Engineering A*, vol. *364*, no. 1–2, pp. 216–231, doi: 10.1016/j.msea.2003.08.023.

[155] **Planche, M. P.**, **Liao, H.**, and **Coddet, C.** (2004), Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions, *Surface and Coatings Technology*, vol. *182*, no. 2–3, pp. 215–226, doi: 10.1016/j.surfcoat.2003.08.052.

[156] **Wang, X.**, **Heberlein, J.**, **Pfender, E.**, and **Gerberich, W.** Effect of Nozzle Configuration, Gas Pressure, and Gas Type on Coating Properties in Wire Arc Spray.

[157] **Tiwari, N.**, **Sahasrabudhe, S. N.**, **Tak, A. K.**, **Barve, D. N.**, and **Das, A. K.** (2012), Investigations of some aspects of the spray process in a single wire arc plasma spray system using high speed camera, *Review of Scientific Instruments*, vol. *83*, no. 2, doi: 10.1063/1.3675887.

[158] **Newbery, A. P.** and **Grant, P. S.** (2003), Large arc voltage fluctuations and droplet formation in electric arc wire spraying, *Powder Metallurgy*, vol. *46*, no. 3, pp. 229–235, doi: 10.1179/003258902225000000.

[159] **Sampson, E. R.** and **Zwetsloot, M. P.** Arc Spray Process for the Aircraft and Stationary Gas Turbine Industry.

[160] **Steffens, H.-D.** and **Nassenstein, K.** Influence of the Spray Velocity on Arc-Sprayed Coating Structures.

[161] **Hedges, M. K.**, **Newbery, A. P.**, and **Grant, P. S.** Characterisation of electric arc spray formed Ni superalloy IN718, 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/msea

[162] **Tillmann, W.**, **Vogli, E.**, and **Abdulgader, M.** Asymmetric melting behavior in twin wire arc spraying with cored wires, in *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, vol. *17*, no. 5–6, pp. 974–982. doi: 10.1007/s11666-008-9269-y.

[163] **Hussary, N. A.** and **Heberlein, J.** (2000), Investigations of Arc Behavior and Particle Formation in the Wire Arc Spray Process Using High Speed Photography, doi: 10.1361/cp2000itsc0737.

[164] **Watanabe, T.**, **Wang, X.**, **Pfender, E.**, and **Heberlein, J.** Correlations between electrode phenomena and coating properties in wire arc spraying, 1998.

[165] **Hussary, N. A.** and **Heberlein, J. V. R.** (2001), Atomization and Particle-Jet Interactions in the wire arc spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *10*, no. 4, p. 604.

[166] **Pourmousa Abkenar, AmirHossein.** *Wire-arc spraying system: Particle production, transport, and deposition.*

[167] **Hale, D. L.**, **Swank, W. D.**, and **Haggard, D. C.** In-Flight Particle Measurements of Twin Wire Electric Arc Sprayed Aluminum.

[168] **Liao, H. L.**, **Zhu, Y. L.**, **Bolot, R.**, **Coddet, C.**, and **Ma, S. N.** (2005), Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying, *Surface and Coatings Technology*, vol. *200*, no. 7, pp. 2123–2130, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.12.025.

[169] **Hussary, N.** Investigations into the Wire Arc Spraying Process, 2003.

[170] **Mostaghimi, J.**, **Pershin, L.**, **Salimijazi, H.**, **Nejad, M.**, and **Ringuette, M.** (2021), Thermal Spray Copper Alloy Coatings as Potent Biocidal and Virucidal Surfaces, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. *30*, no. 1–2, pp. 25–39, doi: 10.1007/s11666-021-01161-7.

[171] **Jahani, B.** and **Brooks, A.** (2018), DEVELOPMENT OF ANTIBACTERIAL SURFACES VIA THERMALSPRAY COATING TECHNIQUES, *Biomedical Sciences Instrumentation*, vol. *54*, no. 1.

[172] **Ahmadian, O. S.**, **Jazi, H. S.**, **Fathi, M. H.**, **Mostaghimi, J.**, and **Pershin, L.** Wire Arc Spray Copper Coatings in Medical Applications, 2012. [Online]. Available: www.asminternational.org

[173] **Flanagan, J.**, **Schütze, P.**, **Dunne, C.**, **Twomey, B.**, and **Stanton, K. T.** (2020), Use of a blast coating process to promote adhesion between aluminium surfaces for the automotive industry, *Journal of Adhesion*, vol. *96*, no. 6, pp. 580–601, doi: 10.1080/00218464.2018.1486713.

[174] **Sharifahmadian, O.**, **Salimijazi, H. R.**, **Fathi, M. H.**, **Mostaghimi, J.**, and **Pershin, L.** (2013), Relationship between surface properties and antibacterial behavior of wire arc spray copper coatings, *Surface and Coatings Technology*, vol. *233*, pp. 74–79, doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.01.060.

[175] **Kenawy, E. R.**, **Worley, S. D.**, and **Broughton, R.** The chemistry and applications of antimicrobial polymers: A state-of-the-art review, *Biomacromolecules*, vol. *8*, no. 5. pp. 1359–1384, May 2007. doi: 10.1021/bm061150q.

[176] **Sharifahmadian, O.**, **Salimijazi, H. R.**, **Fathi, M. H.**, **Mostaghimi, J.**, and **Pershin, L.** Study of the antibacterial behavior of wire Arc sprayed copper coatings, in *Journal of Thermal Spray Technology*, Mar. 2013, vol. *22*, no. 2–3, pp. 371–379. doi: 10.1007/s11666-012-9842-2.

[177] **Lewis, K.** and **Klibanov, A. M.** (2005), Surpassing nature: Rational design of sterile-surface materials, *Trends in Biotechnology*, vol. *23*, no. 7, pp. 343–348, doi: 10.1016/j.tibtech.2005.05.004.

EKLER

EK A : Hava için termo-fiziksel özellikler

EK B : Bakıra ait termo-fiziksel özellikler

EK C : Bakır ve alaşımları için kaplama deneyleri

EK D : Alaşımlar için Anti-Bakteriyel Etkinlik Test Sonuçlar

EK A : Hava için termo-fiziksel özellikler

Çizelge A.1 : Hava için sıcaklığa bağlı termo-fiziksel taşınım özellikleri.

Sıcaklık [K]	Yoğunluk [kg/m^3]	Entalpi [J/kg]	Özgül Isı [J/kg.K]	Viskozite [kg/m.s]	Isıl İletkenlik [W/m.K]	Elektriksel İletkenlik [A/V.m]
500	7,0208E-01	2,0865E+05	1,0473E+03	2,7055E-05	4,1378E-02	0,0000E+00
600	5,8505E-01	3,1559E+05	1,0694E+03	3,0849E-05	4,8243E-02	0,0000E+00
700	5,0147E-01	4,2422E+05	1,0863E+03	3,4448E-05	5,4971E-02	0,0000E+00
800	4,3879E-01	5,3450E+05	1,1028E+03	3,7897E-05	6,1596E-02	0,0000E+00
900	3,9004E-01	6,4640E+05	1,1190E+03	4,1227E-05	6,8137E-02	0,0000E+00
1000	3,5104E-01	7,5990E+05	1,1350E+03	4,4457E-05	7,4598E-02	0,0000E+00
1100	3,1913E-01	8,7499E+05	1,1509E+03	4,7602E-05	8,1161E-02	1,6068E-23
1200	2,9254E-01	9,9170E+05	1,1670E+03	5,0673E-05	8,7635E-02	8,6758E-21
1300	2,7004E-01	1,1101E+06	1,1836E+03	5,3678E-05	9,4153E-02	1,8055E-18
1400	2,5076E-01	1,2301E+06	1,2007E+03	5,6624E-05	1,0073E-01	1,7744E-16
1500	2,3404E-01	1,3520E+06	1,2185E+03	5,9515E-05	1,0739E-01	9,5610E-15
1600	2,1942E-01	1,4757E+06	1,2372E+03	6,2358E-05	1,1419E-01	3,1591E-13
1700	2,0651E-01	1,6014E+06	1,2569E+03	6,5154E-05	1,2118E-01	6,9742E-12
1800	1,9504E-01	1,7292E+06	1,2780E+03	6,7908E-05	1,2849E-01	1,0997E-10
1900	1,8477E-01	1,8593E+06	1,3014E+03	7,0623E-05	1,3633E-01	1,3056E-09
2000	1,7552E-01	1,9922E+06	1,3284E+03	7,3301E-05	1,4507E-01	1,2172E-08
2100	1,6713E-01	2,1283E+06	1,3611E+03	7,5947E-05	1,5522E-01	9,2195E-08
2200	1,5949E-01	2,2685E+06	1,4025E+03	7,8562E-05	1,6752E-01	5,8284E-07
2300	1,5248E-01	2,4141E+06	1,4563E+03	8,1152E-05	1,8293E-01	3,1406E-06
2400	1,4601E-01	2,5669E+06	1,5272E+03	8,3721E-05	2,0263E-01	1,4640E-05
2500	1,4000E-01	2,7289E+06	1,6204E+03	8,6274E-05	2,2793E-01	5,9528E-05
2600	1,3437E-01	2,9030E+06	1,7412E+03	8,8819E-05	2,6016E-01	2,1158E-04
2700	1,2906E-01	3,0925E+06	1,8944E+03	9,1363E-05	3,0050E-01	6,5681E-04
2800	1,2400E-01	3,3008E+06	2,0835E+03	9,3914E-05	3,4962E-01	1,7864E-03
2900	1,1915E-01	3,5318E+06	2,3095E+03	9,6481E-05	4,0738E-01	4,3101E-03
3000	1,1446E-01	3,7887E+06	2,5694E+03	9,9071E-05	4,7237E-01	9,4093E-03
3100	1,0991E-01	4,0742E+06	2,8548E+03	1,0169E-04	5,4154E-01	1,8966E-02
3200	1,0548E-01	4,3893E+06	3,1508E+03	1,0434E-04	6,1008E-01	3,5870E-02
3300	1,0118E-01	4,7328E+06	3,4351E+03	1,0703E-04	6,7162E-01	6,4378E-02
3400	9,7021E-02	5,1007E+06	3,6790E+03	1,0973E-04	7,1911E-01	1,1046E-01
3500	9,3032E-02	5,4859E+06	3,8519E+03	1,1245E-04	7,4638E-01	1,8212E-01
3600	8,9250E-02	5,8786E+06	3,9273E+03	1,1516E-04	7,4998E-01	2,8954E-01
3700	8,5709E-02	6,2677E+06	3,8913E+03	1,1785E-04	7,3068E-01	4,4434E-01
3800	8,2435E-02	6,6427E+06	3,7497E+03	1,2051E-04	6,9347E-01	6,6178E-01
3900	7,9435E-02	6,9955E+06	3,5278E+03	1,2313E-04	6,4634E-01	9,5778E-01
4000	7,6704E-02	7,3218E+06	3,2636E+03	1,2570E-04	5,9775E-01	1,3506E+00
4100	7,4219E-02	7,6215E+06	2,9966E+03	1,2822E-04	5,5467E-01	1,8605E+00
4200	7,1951E-02	7,8973E+06	2,7579E+03	1,3070E-04	5,2156E-01	2,5101E+00
4300	6,9868E-02	8,1540E+06	2,5668E+03	1,3314E-04	5,0064E-01	3,3247E+00
4400	6,7941E-02	8,3971E+06	2,4315E+03	1,3555E-04	4,9261E-01	4,3320E+00
4500	6,6142E-02	8,6324E+06	2,3532E+03	1,3794E-04	4,9737E-01	5,5628E+00
4600	6,4448E-02	8,8654E+06	2,3295E+03	1,4030E-04	5,1468E-01	7,0505E+00
4700	6,2841E-02	9,1011E+06	2,3571E+03	1,4264E-04	5,4441E-01	8,8308E+00
4800	6,1303E-02	9,3444E+06	2,4331E+03	1,4498E-04	5,8666E-01	1,0942E+01

Çizelge A.1 (devam): Hava için sıcaklığa bağlı termo-fiziksel taşınım özellikleri.

Sıcaklık [K]	Yoğunluk [kg/m^3]	Entalpi [J/kg]	Özgül Isı [J/kg.K]	Viskozite [kg/m.s]	Isıl İletkenlik [W/m.K]	Elektriksel İletkenlik [A/V.m]
5000	5,8385E-02	9,8724E+06	2,7245E+03	1,4962E-04	7,1051E-01	1,6325E+01
5100	5,6983E-02	1,0166E+07	2,9398E+03	1,5194E-04	7,9351E-01	1,9684E+01
5200	5,5607E-02	1,0487E+07	3,2024E+03	1,5425E-04	8,9169E-01	2,3551E+01
5300	5,4249E-02	1,0838E+07	3,5145E+03	1,5657E-04	1,0059E+00	2,7976E+01
5400	5,2903E-02	1,1226E+07	3,8780E+03	1,5890E-04	1,1370E+00	3,3011E+01
5500	5,1562E-02	1,1655E+07	4,2948E+03	1,6124E-04	1,2856E+00	3,8712E+01
5600	5,0222E-02	1,2132E+07	4,7667E+03	1,6359E-04	1,4519E+00	4,5108E+01
5700	4,8879E-02	1,2662E+07	5,2948E+03	1,6595E-04	1,6359E+00	5,2304E+01
5800	4,7528E-02	1,3249E+07	5,8795E+03	1,6832E-04	1,8367E+00	6,0352E+01
5900	4,6170E-02	1,3901E+07	6,5196E+03	1,7069E-04	2,0531E+00	6,9280E+01
6000	4,4803E-02	1,4623E+07	7,2121E+03	1,7308E-04	2,2826E+00	7,9181E+01
6100	4,3428E-02	1,5418E+07	7,9516E+03	1,7546E-04	2,5219E+00	9,0194E+01
6200	4,2047E-02	1,6291E+07	8,7297E+03	1,7783E-04	2,7666E+00	1,0239E+02
6300	4,0664E-02	1,7244E+07	9,5342E+03	1,8019E-04	3,0111E+00	1,1590E+02
6400	3,9285E-02	1,8279E+07	1,0349E+04	1,8252E-04	3,2484E+00	1,3086E+02
6500	3,7916E-02	1,9394E+07	1,1153E+04	1,8480E-04	3,4708E+00	1,4746E+02
6600	3,6564E-02	2,0586E+07	1,1921E+04	1,8703E-04	3,6698E+00	1,6591E+02
6700	3,5239E-02	2,1849E+07	1,2624E+04	1,8919E-04	3,8367E+00	1,8649E+02
6800	3,3949E-02	2,3172E+07	1,3230E+04	1,9127E-04	3,9632E+00	2,0948E+02
6900	3,2704E-02	2,4542E+07	1,3707E+04	1,9327E-04	4,0425E+00	2,3523E+02
7000	3,1512E-02	2,5945E+07	1,4026E+04	1,9518E-04	4,0697E+00	2,6410E+02
7100	3,0381E-02	2,7361E+07	1,4164E+04	1,9701E-04	4,0430E+00	2,9647E+02
7200	2,9316E-02	2,8772E+07	1,4108E+04	1,9876E-04	3,9638E+00	3,3269E+02
7300	2,8321E-02	3,0158E+07	1,3859E+04	2,0046E-04	3,8368E+00	3,7305E+02
7400	2,7399E-02	3,1501E+07	1,3428E+04	2,0211E-04	3,6698E+00	4,1777E+02
7500	2,6550E-02	3,2785E+07	1,2842E+04	2,0372E-04	3,4726E+00	4,6700E+02
7600	2,5771E-02	3,3999E+07	1,2134E+04	2,0533E-04	3,2561E+00	5,2076E+02
7700	2,5058E-02	3,5133E+07	1,1344E+04	2,0694E-04	3,0307E+00	5,7903E+02
7800	2,4409E-02	3,6184E+07	1,0513E+04	2,0856E-04	2,8062E+00	6,4167E+02
7900	2,3816E-02	3,7152E+07	9,6783E+03	2,1021E-04	2,5906E+00	7,0853E+02
8000	2,3274E-02	3,8039E+07	8,8706E+03	2,1188E-04	2,3897E+00	7,7937E+02
8100	2,2778E-02	3,8850E+07	8,1133E+03	2,1358E-04	2,2075E+00	8,5399E+02
8200	2,2322E-02	3,9593E+07	7,4255E+03	2,1531E-04	2,0464E+00	9,3212E+02
8300	2,1901E-02	4,0274E+07	6,8063E+03	2,1707E-04	1,9067E+00	1,0135E+03
8400	2,1509E-02	4,0900E+07	6,2682E+03	2,1885E-04	1,7883E+00	1,0980E+03
8500	2,1144E-02	4,1481E+07	5,8073E+03	2,2065E-04	1,6902E+00	1,1852E+03
8600	2,0802E-02	4,2024E+07	5,4275E+03	2,2246E-04	1,6114E+00	1,2750E+03
8700	2,0478E-02	4,2534E+07	5,1025E+03	2,2428E-04	1,5495E+00	1,3673E+03
8800	2,0171E-02	4,3020E+07	4,8566E+03	2,2609E-04	1,5037E+00	1,4617E+03
8900	1,9879E-02	4,3485E+07	4,6474E+03	2,2790E-04	1,4712E+00	1,5582E+03
9000	1,9599E-02	4,3934E+07	4,4973E+03	2,2969E-04	1,4510E+00	1,6565E+03
9100	1,9329E-02	4,4375E+07	4,4080E+03	2,3147E-04	1,4428E+00	1,7564E+03
9200	1,9069E-02	4,4808E+07	4,3273E+03	2,3321E-04	1,4434E+00	1,8578E+03
9300	1,8816E-02	4,5240E+07	4,3184E+03	2,3492E-04	1,4540E+00	1,9605E+03

Çizelge A.1 (devam): Hava için sıcaklığa bağlı termo-fiziksel taşınım özellikleri.

Sıcaklık [K]	Yoğunluk [kg/m^3]	Entalpi [J/kg]	Özgül Isı [J/kg.K]	Viskozite [kg/m.s]	Isıl İletkenlik [W/m.K]	Elektriksel İletkenlik [A/V.m]
9400	1,8570E-02	4,5670E+07	4,3023E+03	2,3659E-04	1,4713E+00	2,0644E+03
9500	1,8331E-02	4,6105E+07	4,3527E+03	2,3821E-04	1,4968E+00	2,1693E+03
9600	1,8097E-02	4,6547E+07	4,4180E+03	2,3978E-04	1,5291E+00	2,2752E+03
9700	1,7867E-02	4,6993E+07	4,4631E+03	2,4128E-04	1,5652E+00	2,3818E+03
9800	1,7641E-02	4,7454E+07	4,6054E+03	2,4271E-04	1,6090E+00	2,4891E+03
9900	1,7419E-02	4,7923E+07	4,6886E+03	2,4406E-04	1,6555E+00	2,5971E+03
10000	1,7200E-02	4,8409E+07	4,8672E+03	2,4532E-04	1,7086E+00	2,7055E+03
10100	1,6984E-02	4,8913E+07	5,0401E+03	2,4648E-04	1,7667E+00	2,8142E+03
10200	1,6770E-02	4,9429E+07	5,1583E+03	2,4753E-04	1,8258E+00	2,9233E+03
10300	1,6558E-02	4,9970E+07	5,4050E+03	2,4847E-04	1,8915E+00	3,0326E+03
10400	1,6348E-02	5,0533E+07	5,6319E+03	2,4928E-04	1,9616E+00	3,1421E+03
10500	1,6139E-02	5,1120E+07	5,8662E+03	2,4996E-04	2,0356E+00	3,2517E+03
10600	1,5932E-02	5,1719E+07	5,9956E+03	2,5049E-04	2,1076E+00	3,3614E+03
10700	1,5725E-02	5,2356E+07	6,3662E+03	2,5088E-04	2,1881E+00	3,4710E+03
10800	1,5520E-02	5,3020E+07	6,6471E+03	2,5110E-04	2,2721E+00	3,5806E+03
10900	1,5315E-02	5,3701E+07	6,8016E+03	2,5115E-04	2,3532E+00	3,6901E+03
11000	1,5111E-02	5,4422E+07	7,2153E+03	2,5102E-04	2,4420E+00	3,7995E+03
11100	1,4908E-02	5,5178E+07	7,5604E+03	2,5071E-04	2,5347E+00	3,9087E+03
11200	1,4705E-02	5,5968E+07	7,9015E+03	2,5021E-04	2,6302E+00	4,0177E+03
11300	1,4503E-02	5,6794E+07	8,2576E+03	2,4951E-04	2,7284E+00	4,1264E+03
11400	1,4300E-02	5,7634E+07	8,3977E+03	2,4860E-04	2,8204E+00	4,2351E+03
11500	1,4098E-02	5,8529E+07	8,9527E+03	2,4749E-04	2,9213E+00	4,3433E+03
11600	1,3896E-02	5,9467E+07	9,3811E+03	2,4616E-04	3,0258E+00	4,4513E+03
11700	1,3695E-02	6,0446E+07	9,7923E+03	2,4463E-04	3,1321E+00	4,5589E+03
11800	1,3493E-02	6,1468E+07	1,0217E+04	2,4288E-04	3,2403E+00	4,6661E+03
11900	1,3292E-02	6,2534E+07	1,0654E+04	2,4091E-04	3,3498E+00	4,7730E+03
12000	1,3091E-02	6,3606E+07	1,0725E+04	2,3872E-04	3,4487E+00	4,8798E+03
12100	1,2890E-02	6,4753E+07	1,1471E+04	2,3633E-04	3,5575E+00	4,9859E+03
12200	1,2690E-02	6,5952E+07	1,1991E+04	2,3373E-04	3,6690E+00	5,0916E+03
12300	1,2490E-02	6,7199E+07	1,2469E+04	2,3093E-04	3,7807E+00	5,1968E+03
12400	1,2291E-02	6,8495E+07	1,2955E+04	2,2794E-04	3,8924E+00	5,3016E+03
12500	1,2092E-02	6,9839E+07	1,3448E+04	2,2476E-04	4,0036E+00	5,4058E+03
12600	1,1894E-02	7,1234E+07	1,3946E+04	2,2141E-04	4,1140E+00	5,5095E+03
12700	1,1696E-02	7,2620E+07	1,3855E+04	2,1784E-04	4,2089E+00	5,6132E+03
12800	1,1500E-02	7,4110E+07	1,4910E+04	2,1415E-04	4,3159E+00	5,7159E+03
12900	1,1304E-02	7,5642E+07	1,5317E+04	2,1031E-04	4,4176E+00	5,8180E+03
13000	1,1110E-02	7,7233E+07	1,5907E+04	2,0634E-04	4,5197E+00	5,9195E+03
13100	1,0918E-02	7,8873E+07	1,6405E+04	2,0225E-04	4,6188E+00	6,0204E+03
13200	1,0727E-02	8,0563E+07	1,6895E+04	1,9805E-04	4,7142E+00	6,1206E+03
13300	1,0538E-02	8,2301E+07	1,7377E+04	1,9376E-04	4,8057E+00	6,2201E+03
13400	1,0351E-02	8,4085E+07	1,7847E+04	1,8939E-04	4,8926E+00	6,3190E+03
13500	1,0166E-02	8,5916E+07	1,8303E+04	1,8495E-04	4,9744E+00	6,4171E+03
13600	9,9834E-03	8,7790E+07	1,8742E+04	1,8046E-04	5,0508E+00	6,5145E+03
13700	9,8032E-03	8,9706E+07	1,9160E+04	1,7593E-04	5,1213E+00	6,6112E+03

Çizelge A.1 (devam): Hava için sıcaklığa bağlı termo-fiziksel taşınım özellikleri.

Sıcaklık [K]	Yoğunluk [kg/m^3]	Entalpi [J/kg]	Özgül Isı [J/kg.K]	Viskozite [kg/m.s]	Isıl İletkenlik [W/m.K]	Elektriksel İletkenlik [A/V.m]
13800	9,6233E-03	9,1569E+07	1,9631E+04	1,7125E-04	5,1737E+00	6,7082E+03
13900	9,4484E-03	9,3559E+07	1,9897E+04	1,6668E-04	5,2316E+00	6,8035E+03
14000	9,2765E-03	9,5583E+07	2,0241E+04	1,6211E-04	5,2825E+00	6,8979E+03
14100	9,1077E-03	9,7638E+07	2,0555E+04	1,5755E-04	5,3262E+00	6,9915E+03
14200	8,9421E-03	9,9722E+07	2,0835E+04	1,5302E-04	5,3623E+00	7,0843E+03
14300	8,7796E-03	1,0181E+08	2,0908E+04	1,4850E-04	5,3864E+00	7,1763E+03
14400	8,6210E-03	1,0394E+08	2,1281E+04	1,4405E-04	5,4070E+00	7,2675E+03
14500	8,4660E-03	1,0609E+08	2,1448E+04	1,3965E-04	5,4198E+00	7,3577E+03
14600	8,3140E-03	1,0824E+08	2,1575E+04	1,3533E-04	5,4246E+00	7,4471E+03
14700	8,1673E-03	1,1041E+08	2,1659E+04	1,3108E-04	5,4217E+00	7,5357E+03
14800	8,0238E-03	1,1258E+08	2,1700E+04	1,2691E-04	5,4113E+00	7,6234E+03
14900	7,8842E-03	1,1475E+08	2,1698E+04	1,2283E-04	5,3934E+00	7,7103E+03
15000	7,7485E-03	1,1691E+08	2,1652E+04	1,1885E-04	5,3685E+00	7,7964E+03
15100	7,6169E-03	1,1907E+08	2,1563E+04	1,1497E-04	5,3369E+00	7,8811E+03
15200	7,4892E-03	1,2121E+08	2,1432E+04	1,1120E-04	5,2989E+00	7,9659E+03
15300	7,3656E-03	1,2334E+08	2,1260E+04	1,0754E-04	5,2551E+00	8,0495E+03
15400	7,2459E-03	1,2544E+08	2,1049E+04	1,0399E-04	5,2059E+00	8,1322E+03
15500	7,1302E-03	1,2752E+08	2,0801E+04	1,0056E-04	5,1518E+00	8,2142E+03
15600	7,0184E-03	1,2958E+08	2,0518E+04	9,7246E-05	5,0935E+00	8,2954E+03
15700	6,9104E-03	1,3160E+08	2,0202E+04	9,4052E-05	5,0315E+00	8,3758E+03
15800	6,8061E-03	1,3358E+08	1,9857E+04	9,0979E-05	4,9660E+00	8,4555E+03
15900	6,7056E-03	1,3553E+08	1,9485E+04	8,8027E-05	4,8982E+00	8,5344E+03
16000	6,6086E-03	1,3744E+08	1,9089E+04	8,5196E-05	4,8285E+00	8,6127E+03
16100	6,5152E-03	1,3931E+08	1,8672E+04	8,2485E-05	4,7572E+00	8,6903E+03
16200	6,4251E-03	1,4113E+08	1,8238E+04	7,9893E-05	4,6850E+00	8,7672E+03
16300	6,3384E-03	1,4291E+08	1,7790E+04	7,7419E-05	4,6124E+00	8,8435E+03
16400	6,2548E-03	1,4464E+08	1,7331E+04	7,5060E-05	4,5399E+00	8,9192E+03
16500	6,1743E-03	1,4633E+08	1,6863E+04	7,2815E-05	4,4678E+00	8,9944E+03
16600	6,0968E-03	1,4797E+08	1,6391E+04	7,0681E-05	4,3966E+00	9,0689E+03
16700	6,0222E-03	1,4956E+08	1,5915E+04	6,8655E-05	4,3266E+00	9,1430E+03
16800	5,9502E-03	1,5110E+08	1,5439E+04	6,6735E-05	4,2582E+00	9,2165E+03
16900	5,8809E-03	1,5260E+08	1,4966E+04	6,4917E-05	4,1916E+00	9,2896E+03
17000	5,8142E-03	1,5405E+08	1,4496E+04	6,3199E-05	4,1271E+00	9,3621E+03
17100	5,7498E-03	1,5545E+08	1,4033E+04	6,1576E-05	4,0649E+00	9,4343E+03
17200	5,6877E-03	1,5681E+08	1,3578E+04	6,0047E-05	4,0052E+00	9,5060E+03
17300	5,6278E-03	1,5812E+08	1,3132E+04	5,8606E-05	3,9482E+00	9,5772E+03
17400	5,5700E-03	1,5939E+08	1,2696E+04	5,7252E-05	3,8938E+00	9,6481E+03
17500	5,5142E-03	1,6062E+08	1,2272E+04	5,5980E-05	3,8423E+00	9,7187E+03
17600	5,4602E-03	1,6181E+08	1,1861E+04	5,4788E-05	3,7936E+00	9,7889E+03
17700	5,4081E-03	1,6295E+08	1,1464E+04	5,3671E-05	3,7478E+00	9,8588E+03
17800	5,3577E-03	1,6406E+08	1,1080E+04	5,2627E-05	3,7049E+00	9,9284E+03
17900	5,3088E-03	1,6513E+08	1,0710E+04	5,1652E-05	3,6650E+00	9,9976E+03
18000	5,2616E-03	1,6617E+08	1,0355E+04	5,0743E-05	3,6279E+00	1,0067E+04
18100	5,2157E-03	1,6717E+08	1,0015E+04	4,9897E-05	3,5936E+00	1,0135E+04

Çizelge A.1 (devam): Hava için sıcaklığa bağlı termo-fiziksel taşınım özellikleri.

Sıcaklık [K]	Yoğunluk [kg/m^3]	Entalpi [J/kg]	Özgül Isı [J/kg.K]	Viskozite [kg/m.s]	Isıl İletkenlik [W/m.K]	Elektriksel İletkenlik [A/V.m]
18200	5,1713E-03	1,6814E+08	9,6901E+03	4,9111E-05	3,5622E+00	1,0204E+04
18300	5,1282E-03	1,6908E+08	9,3797E+03	4,8382E-05	3,5334E+00	1,0272E+04
18400	5,0875E-03	1,6998E+08	9,0167E+03	4,7863E-05	3,5077E+00	1,0340E+04
18500	5,0468E-03	1,7086E+08	8,7976E+03	4,7240E-05	3,4842E+00	1,0407E+04
18600	5,0072E-03	1,7171E+08	8,5316E+03	4,6666E-05	3,4632E+00	1,0475E+04
18700	4,9687E-03	1,7254E+08	8,2799E+03	4,6138E-05	3,4447E+00	1,0542E+04
18800	4,9311E-03	1,7334E+08	8,0422E+03	4,5654E-05	3,4285E+00	1,0609E+04
18900	4,8946E-03	1,7412E+08	7,8182E+03	4,5211E-05	3,4146E+00	1,0676E+04
19000	4,8589E-03	1,7489E+08	7,6075E+03	4,4807E-05	3,4028E+00	1,0743E+04
19100	4,8241E-03	1,7563E+08	7,4098E+03	4,4440E-05	3,3929E+00	1,0809E+04
19200	4,7901E-03	1,7635E+08	7,2249E+03	4,4109E-05	3,3851E+00	1,0876E+04
19300	4,7569E-03	1,7705E+08	7,0523E+03	4,3810E-05	3,3794E+00	1,0942E+04
19400	4,7308E-03	1,7758E+08	6,7670E+03	4,3988E-05	3,3763E+00	1,1003E+04
19500	4,6989E-03	1,7835E+08	6,7312E+03	4,3748E-05	3,3743E+00	1,1069E+04
19600	4,6677E-03	1,7901E+08	6,5949E+03	4,3534E-05	3,3739E+00	1,1134E+04
19700	4,6371E-03	1,7966E+08	6,4699E+03	4,3346E-05	3,3752E+00	1,1198E+04
19800	4,6071E-03	1,8030E+08	6,3554E+03	4,3183E-05	3,3781E+00	1,1263E+04
19900	4,5777E-03	1,8092E+08	6,2517E+03	4,3042E-05	3,3824E+00	1,1327E+04
20000	4,5488E-03	1,8154E+08	6,1585E+03	4,2922E-05	3,3881E+00	1,1391E+04
20100	4,5204E-03	1,8214E+08	6,0754E+03	4,2823E-05	3,3952E+00	1,1455E+04
20200	4,4925E-03	1,8274E+08	6,0024E+03	4,2742E-05	3,4037E+00	1,1518E+04
20300	4,4651E-03	1,8334E+08	5,9392E+03	4,2678E-05	3,4133E+00	1,1581E+04
20400	4,4381E-03	1,8393E+08	5,8859E+03	4,2630E-05	3,4242E+00	1,1644E+04
20500	4,4116E-03	1,8451E+08	5,8422E+03	4,2597E-05	3,4362E+00	1,1707E+04
20600	4,3854E-03	1,8509E+08	5,8081E+03	4,2577E-05	3,4492E+00	1,1769E+04
20700	4,3596E-03	1,8567E+08	5,7836E+03	4,2570E-05	3,4633E+00	1,1830E+04
20800	4,3341E-03	1,8625E+08	5,7685E+03	4,2574E-05	3,4784E+00	1,1892E+04
20900	4,3090E-03	1,8682E+08	5,7630E+03	4,2588E-05	3,4944E+00	1,1952E+04
21000	4,2842E-03	1,8740E+08	5,7670E+03	4,2611E-05	3,5114E+00	1,2013E+04
21100	4,2597E-03	1,8798E+08	5,7800E+03	4,2642E-05	3,5292E+00	1,2073E+04
21200	4,2355E-03	1,8856E+08	5,8038E+03	4,2679E-05	3,5478E+00	1,2132E+04
21300	4,2115E-03	1,8914E+08	5,8367E+03	4,2723E-05	3,5672E+00	1,2191E+04
21400	4,1878E-03	1,8973E+08	5,8794E+03	4,2771E-05	3,5874E+00	1,2249E+04
21500	4,1644E-03	1,9032E+08	5,9321E+03	4,2822E-05	3,6082E+00	1,2306E+04
21600	4,1411E-03	1,9092E+08	5,9948E+03	4,2876E-05	3,6298E+00	1,2363E+04
21700	4,1181E-03	1,9153E+08	6,0678E+03	4,2932E-05	3,6520E+00	1,2419E+04
21800	4,0952E-03	1,9215E+08	6,1511E+03	4,2989E-05	3,6748E+00	1,2474E+04
21900	4,0725E-03	1,9277E+08	6,2451E+03	4,3045E-05	3,6983E+00	1,2528E+04
22000	4,0500E-03	1,9340E+08	6,3498E+03	4,3099E-05	3,7223E+00	1,2582E+04
22100	4,0277E-03	1,9405E+08	6,4654E+03	4,3151E-05	3,7468E+00	1,2634E+04
22200	4,0062E-03	1,9470E+08	6,4374E+03	4,3350E-05	3,7720E+00	1,2686E+04
22300	3,9841E-03	1,9537E+08	6,7311E+03	4,3393E-05	3,7976E+00	1,2736E+04
22400	3,9621E-03	1,9606E+08	6,8810E+03	4,3431E-05	3,8237E+00	1,2786E+04
22500	3,9402E-03	1,9676E+08	7,0426E+03	4,3462E-05	3,8501E+00	1,2834E+04

Çizelge A.1 (devam): Hava için sıcaklığa bağlı termo-fiziksel taşınım özellikleri.

Sıcaklık [K]	Yoğunluk [kg/m^3]	Entalpi [J/kg]	Özgül Isı [J/kg.K]	Viskozite [kg/m.s]	Isıl İletkenlik [W/m.K]	Elektriksel İletkenlik [A/V.m]
22600	3,9184E-03	1,9746E+08	7,2163E+03	4,3485E-05	3,8771E+00	1,2881E+04
22700	3,8966E-03	1,9822E+08	7,4021E+03	4,3501E-05	3,9044E+00	1,2927E+04
22800	3,8749E-03	1,9898E+08	7,6004E+03	4,3507E-05	3,9321E+00	1,2972E+04
22900	3,8533E-03	1,9976E+08	7,8113E+03	4,3503E-05	3,9601E+00	1,3015E+04
23000	3,8358E-03	2,0048E+08	8,1682E+03	4,3881E-05	3,9860E+00	1,3048E+04
23100	3,8142E-03	2,0131E+08	8,2694E+03	4,3850E-05	4,0145E+00	1,3088E+04
23200	3,7926E-03	2,0216E+08	8,5189E+03	4,3807E-05	4,0433E+00	1,3127E+04
23300	3,7710E-03	2,0304E+08	8,7815E+03	4,3750E-05	4,0725E+00	1,3164E+04
23400	3,7493E-03	2,0394E+08	9,0573E+03	4,3679E-05	4,1019E+00	1,3200E+04
23500	3,7277E-03	2,0488E+08	9,3464E+03	4,3593E-05	4,1315E+00	1,3234E+04
23600	3,7061E-03	2,0584E+08	9,6487E+03	4,3491E-05	4,1614E+00	1,3266E+04
23700	3,6844E-03	2,0684E+08	9,9643E+03	4,3374E-05	4,1915E+00	1,3297E+04
23800	3,6627E-03	2,0787E+08	1,0293E+04	4,3240E-05	4,2218E+00	1,3326E+04
23900	3,6409E-03	2,0893E+08	1,0635E+04	4,3089E-05	4,2524E+00	1,3353E+04
24000	3,6191E-03	2,1003E+08	1,0990E+04	4,2921E-05	4,2831E+00	1,3379E+04

EK B : Bakıra ait termo-fiziksel özellikler

Çizelge B.1 : Bakır için sıvı ve katı faza ait sıcaklığa bağımlı malzeme özellikleri.

Özellik	Sıcaklık aralığı [K]	Fonksiyon
katı hal ısıl iletkenlik katsayısı [W/(m*K)]	150-1358	447,149765-0,585028862*T^1+0,00226209205*T^2-4,29753756E-6*T^3 +4,11305732E-9*T^4-1,95164008E-12*T^5+3,65615258E-16*T^6
sıvı hal ısıl iletkenlik katsayısı [W/(m*K)]	1358-1800	9098,46794-0,855497567*T^1
katı hal ısı sığası [J/(kg*K)]	300-1300	342,764033+0,133834821*T^1+5,53525209E-5*T^2-1,97122089E-7*T^3 +1,1407471E-10*T^4
sıvı hal ısı sığası [J/(kg*K)]	1356-6000	516,16
katı hal yoğunluğu [kg/m^3]	250-800	9062,242-0,3913962*T^1-8,947644E-5*T^2
	800-1273	9038,962-0,3593546*T^1-9,31574E-5*T^2
sıvı hal yoğunluğu [kg/m^3]	1359-1800	9098,46794-0,855497567*T^1
viskozite [Pa*s]	1358-2100	exp(2.92522554E+03/T - 7.60358028E+00)

EK C : Bakır ve alaşımları için kaplama deneyleri

Çizelge C.1 : Bakır ve alaşımları için kaplama deneylerine ait parametreler ve ölçümleri.

Std. Order	Run Order	Malzeme	Voltaj [V]	Akım [A]	Basınç [Bar]	Mesafe [mm]	Parçacık v [m/s]	Parçacık T [degC]	Pürüzlülük (Ra) [um]	Kaplama Kalınlığı Ort [um]	EDS Konsantrasyon wt. % Cu	EDS Konsantrasyon wt. % alaşım el.	EDS Konsantrasyon wt. % O2	Porozite %
46	50	Cu	30	150	4	150	96,64	2057,91	9,53	110,97	98,06	-	0,47	10,95
-	4	Cu	30	100	4	150	91,82	1925,81	9,14	118,50	98,59	-	1,41	4,11
-	5	Cu	34	100	4	150	98,70	2526,96	10,53	76,71	97,87	-	2,13	2,51
-	6	Cu	30	100	2,2	150	66,07	2041,10	9,10	127,83	99,68	-	0,32	3,94
-	7	Cu	30	100	2,2	100	68,61	2150,00	6,55	125,26	98,99	-	1,01	7,06
-	8	Cu	30	100	2,2	200	54,08	1746,70	8,21	132,77	98,42	-	1,58	3,23
-	9	Cu	30	100	6	200	164,34	2814,50	9,48	95,48	99,32	-	0,68	6,59
-	10	Cu	30	100	6	100	112,92	2168,00	13,78	76,81	97,96	-	2,04	5,05
-	11	Cu	30	100	6	150	111,14	2189,30	9,55	120,20	98,88	-	1,12	2,93
-	12	Cu	34	100	6	150	102,11	2458,84	9,45	125,21	98,03	-	1,97	3,64
1	4	CuAl	29	100	3	120	118,93	2293,00	8,36	87,51	92,44	7,38	0,19	-
25	10	CuAl	29	100	5	180	118,95	2294,00	8,43	84,06	91,03	7,96	1,01	1,19
2	21	CuAl	31	100	3	120	117,40	2279,00	11,93	119,13	93,04	6,64	0,33	3,60
26	25	CuAl	31	100	5	180	107,70	2210,00	6,47	138,66	91,25	8,11	0,65	6,04
10	28	CuAl	31	100	3	180	119,08	2277,00	10,37	95,61	94,59	5,00	0,40	3,27
18	32	CuAl	31	100	5	120	119,74	2272,00	8,63	77,15	89,61	9,83	0,56	6,07
17	39	CuAl	29	100	5	120	119,16	2255,00	7,84	101,82	90,15	9,30	0,56	6,96
9	40	CuAl	29	100	3	180	92,16	2266,00	14,28	95,61	91,11	8,26	0,63	4,05
19	2	CuAl	29	200	5	120	70,33	2308,50	13,45	143,94	90,70	8,58	0,72	8,70
4	6	CuAl	31	200	3	120	75,05	2337,00	7,19	120,75	92,82	6,82	0,36	-
12	7	CuAl	31	200	3	180	75,02	2333,00	7,73	233,76	93,25	6,41	0,34	6,95
11	13	CuAl	29	200	3	180	80,43	2267,00	7,14	88,35	93,21	6,54	0,25	2,62

Çizelge C.1 (devam): Bakır ve alaşımları için kaplama deneylerine ait parametreler ve ölçümleri.

Std. Order	Run Order	Malzeme	Voltaj [V]	Akım [A]	Basınç [Bar]	Mesafe [mm]	Parçacık v [m/s]	Parçacık T [degC]	Pürüzlülük (Ra) [um]	Kaplama Kalınlığı Ort [um]	EDS Konsantrasyon wt. % Cu	EDS Konsantrasyon wt. % alaşım el.	EDS Konsantrasyon wt. % O2	Porozite %
20	15	CuAl	31	200	5	120	88,47	2293,00	11,12	191,28	89,55	10,08	0,38	3,32
27	16	CuAl	29	200	5	180	82,84	2265,80	9,76	115,17	86,82	11,90	0,92	3,51
28	19	CuAl	31	200	5	180	75,29	2418,40	8,24	158,91	90,87	8,96	0,17	2,22
3	26	CuAl	29	200	3	120	97,37	2291,25	10,50	121,95	92,16	6,91	0,94	4,14
43	44	CuZn	30	50	4	150	115,20	2108,03	11,52	124,02	70,24	28,99	0,77	4,08
35	5	CuZn	30	150	4	150	98,32	2497,44	10,31	129,24	66,94	32,37	0,70	-
34	14	CuZn	30	100	4	150	114,04	2772,00	9,26	122,19	66,89	32,37	0,74	3,51
36	24	CuZn	31	100	4	150	140,43	3173,10	6,33	116,85	67,92	31,03	1,05	0,64
40	30	CuZn	32	100	4	150	135,82	3028,50	7,29	94,98	69,98	29,28	0,74	3,35
39	33	CuZn	29	100	4	150	95,40	2105,10	11,97	86,16	68,29	30,70	1,02	7,19
37	34	CuZn	28	100	4	150	96,67	2195,00	8,97	129,66	67,69	31,38	0,93	6,84
33	35	CuZn	30	150	4	180	159,00	2287,50	12,06	96,15	66,26	33,01	0,73	9,51
38	36	CuZn	29	150	4	150	161,56	2354,00	8,46	125,85	68,92	30,47	0,61	-
47	41	CuZn	30	150	4	80	154,47	2403,00	7,38	105,03	70,66	28,39	0,95	3,54
53	42	CuZn	31	150	4	150	141,84	2249,40	11,58	128,31	73,49	25,71	0,80	7,95
54	43	CuZn	30	150	3	150	161,06	2543,20	10,01	94,98	69,77	29,72	0,51	8,88
50	45	CuZn	30	150	6	150	262,53	2523,00	7,20	129,00	71,69	27,52	0,80	0,79
51	47	CuZn	30	150	5	150	262,88	2496,80	9,03	153,81	67,94	31,30	0,76	2,61
52	48	CuZn	30	150	4	120	266,65	2325,64	10,43	129,84	72,40	27,02	0,58	11,61
41	49	CuZn	28	150	4	150	153,64	2263,24	15,16	101,34	68,82	29,68	1,51	3,99
48	51	CuZn	30	150	4	220	167,70	2552,01	10,50	150,78	72,97	25,43	0,60	5,23
49	52	CuZn	30	150	2	150	154,00	2566,38	10,39	142,02	71,77	27,30	0,92	19,61
42	53	CuZn	32	150	4	150	150,80	2536,32	10,38	91,11	86,25	13,75	-	11,09
44	54	CuZn	30	250	4	150	168,82	2584,00	10,74	108,84	69,69	29,28	1,03	12,56
22	8	CuSn	31	100	5	120	100,10	2122,90	12,50	92,82	95,32	4,21	0,47	2,51
21	9	CuSn	29	100	5	120	107,00	2097,00	9,48	154,68	94,85	5,08	0,07	3,94

Çizelge C.1 (devam): Bakır ve alaşımları için kaplama deneylerine ait parametreler ve ölçümleri.

Std. Order	Run Order	Malzeme	Voltaj [V]	Akım [A]	Basınç [Bar]	Mesafe [mm]	Parçacık v [m/s]	Parçacık T [degC]	Pürüzlülük (Ra) [um]	Kaplama Kalınlığı Ort [um]	EDS Konsantrasyon wt. % Cu	EDS Konsantrasyon wt. % alaşım el.	EDS Konsantrasyon wt. % O2	Porozite %
30	18	CuSn	31	100	5	180	99,92	2187,60	10,64	151,56	94,14	5,64	0,22	7,06
6	22	CuSn	31	100	3	120	80,14	2143,00	7,61	160,65	94,90	4,75	0,35	3,23
5	27	CuSn	29	100	3	120	83,11	2095,30	13,43	115,53	94,73	5,12	0,15	6,59
29	29	CuSn	29	100	5	180	100,22	2137,80	6,06	92,94	94,13	5,42	0,45	5,05
13	31	CuSn	29	100	3	180	77,39	2112,70	6,71	145,44	95,13	4,62	0,25	2,93
14	37	CuSn	31	100	3	180	80,58	2067,90	8,14	151,50	93,93	5,64	0,44	3,64
24	1	CuSn	31	200	5	120	84,92	2219,90	7,90	140,28	95,08	4,77	0,15	2,20
8	3	CuSn	31	200	3	120	70,62	2278,30	7,89	188,46	94,97	4,96	0,07	4,29
16	11	CuSn	31	200	3	180	67,44	2208,50	9,72	136,62	95,05	4,82	0,14	3,00
7	12	CuSn	29	200	3	120	68,86	2480,50	8,89	138,45	94,78	5,03	0,20	4,03
31	17	CuSn	29	200	5	180	84,42	2195,96	7,12	118,14	94,67	5,25	0,08	8,99
15	20	CuSn	29	200	3	180	68,51	2147,60	13,57	151,50	96,34	3,52	0,14	3,94
23	23	CuSn	29	200	5	120	93,00	2444,40	6,31	154,98	95,69	4,13	0,18	7,53
32	38	CuSn	31	200	5	180	94,94	2395,95	8,57	132,42	95,26	4,54	0,22	2,91
-	15	NiCuZn	30	150	4	150	141,41	2557,09	9,60	84,38	69,26	30,74	0,74	1,26
-	16	NiCuZn	30	150	4	180	145,18	2576,74	8,59	140,62	64,96	35,04	4,04	1,97
-	17	NiCuZn	30	150	4	200	161,88	2535,26	7,72	137,78	68,69	31,31	1,31	3,53
-	18	NiCuZn	30	200	4	200	145,21	2586,39	5,28	146,05	64,41	35,59	2,59	1,62
-	19	NiCuZn	31	200	6	200	126,87	2607,32	6,08	105,03	64,40	35,60	1,60	3,29
-	20	NiCuZn	31	100	3	120	102,26	2587,92	9,98	84,49	67,41	32,59	1,59	2,52
-	21	NiCuZn	31	150	4	150	106,52	2644,06	7,48	132,22	69,78	30,22	2,22	1,47
-	22	NiCuZn	31	200	4	180	107,18	2579,69	10,05	137,73	68,48	31,52	2,52	1,82
-	23	NiCuZn	32	200	4	180	120,29	2614,47	7,05	127,53	71,11	28,89	2,89	1,10
-	24	NiCuZn	32	150	4	180	112,53	2431,99	6,15	171,33	70,57	29,43	1,43	2,14
-	25	NiCuZn	32	150	4	200	127,05	2496,41	4,77	124,20	67,64	32,36	1,36	1,50
-	26	NiCuZn	32	200	4	180	122,09	2435,97	9,54	105,84	64,74	35,26	1,26	2,01
45	46	NiCuZn	32	200	5	200	126,54	2554,44	6,00	107,40	64,50	35,50	1,50	4,49

EK D : Alaşımlar için Anti-Bakteriyel Etkinlik Test Sonuçlar

Çizelge D.1 : Alaşımlar için, zamana karşı başlangıç inokulumu, kontrol yüzeyi ve kaplanmış yüzeyde bakteri koloni oluşturan birim sayıları ile yüzde inhibisyon.

		Cu-Al				*Cu-Zn*				*Cu-Sn*				NiCuZn			
Bakteri	**Zaman Aralıkları [h]**	**Başlangıç inokulum [CFU]**	**Kontrol Yüzeyi [CFU]**	**Kaplanmış Yüzey [CFU]**	**İnhibisyon [%]**	**Başlangıç inokulum [CFU]**	**Kontrol Yüzeyi [CFU]**	**Kaplanmış Yüzey [CFU]**	**İnhibisyon [%]**	**Başlangıç inokulum [CFU]**	**Kontrol Yüzeyi [CFU]**	**Kaplanmış Yüzey [CFU]**	**İnhibisyon [%]**	**Başlangıç inokulum [CFU]**	**Kontrol Yüzeyi [CFU]**	**Kaplanmış Yüzey [CFU]**	**İnhibisyon [%]**
E. coli	**0.25**	50·E+6	35·E+6	0	100	50·E+6	35·E+6	0	100	50·E+6	35·E+6	0	100	50·E+6	35·E+6	0	100
	1	50·E+6	22·E+6	0	100	50·E+6	22·E+6	0	100	50·E+6	22·E+6	0	100	50·E+6	22·E+6	0	100
	2	50·E+6	10·E+6	0	100	50·E+6	10·E+6	0	100	50·E+6	10·E+6	0	100	50·E+6	10·E+6	0	100
S. aureus	**0.25**	50·E+6	13,5·E+6	0	100	50·E+6	13,5·E+6	0,1·E+6	99	50·E+6	13,5·E+6	0	100	50·E+6	13,5·E+6	0	100
	1	50·E+6	2,5·E+6	0	100	50·E+6	2,5·E+6	0	100	50·E+6	2,5·E+6	0	100	50·E+6	2,5·E+6	0	100
	2	50·E+6	1,4·E+6	0	100	50·E+6	1,4·E+6	0	100	50·E+6	1,4·E+6	0	100	50·E+6	1,4·E+6	0	100
PsA	**0.25**	50·E+6	8·E+6	0	100	50·E+6	8·E+6	0	100	50·E+6	8·E+6	0	100	50·E+6	8·E+6	0	100
	1	50·E+6	6·E+6	0	100	50·E+6	6·E+6	0	100	50·E+6	6·E+6	0	100	50·E+6	6·E+6	0	100
	2	50·E+6	15·E+6	0	100	50·E+6	15·E+6	0	100	50·E+6	15·E+6	0	100	50·E+6	15·E+6	0	100
VRE	**0.25**	50·E+6	18·E+6	2,6·E+6	86	50·E+6	18·E+6	0,9·E+6	95	50·E+6	18·E+6	0,8·E+6	95,55	50·E+6	18·E+6	0,7·E+6	96,11
	1	50·E+6	20·E+6	0	100	50·E+6	20·E+6	0	100	50·E+6	20·E+6	0,8·E+6	96	50·E+6	20·E+6	0	100
	2	50·E+6	30·E+6	0	100	50·E+6	30·E+6	0	100	50·E+6	30·E+6	0,5·E+6	98,33	50·E+6	30·E+6	0	100
MRSA	**0.25**	50·E+6	16,5·E+6	0,4·E+6	98	50·E+6	16,5·E+6	0	100	50·E+6	16,5·E+6	0,2·E+6	98,33	50·E+6	16,5·E+6	0	100
	1	50·E+6	12·E+6	0	100	50·E+6	12·E+6	0	100	50·E+6	12·E+6	0,1·E+6	99,39	50·E+6	12·E+6	0	100
	2	50·E+6	9,6·E+6	0	100	50·E+6	9,6·E+6	0	100	50·E+6	9,6·E+6	0	100	50·E+6	9,6·E+6	0	100

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Sami Arda KOCAMAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknoloji Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2022, Koç Üniversitesi, Finans

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011-Halen METCOM (Metallurgical Computations) firmasının kurucusu ve yöneticisidir.
- 2014-Halen OOKUMA Inc. çok uluslu firmasının kurucusu ve yönetim kurulu başkanıdır.
- Güney Afrika (2011), İtalya (2012), Avustralya (2013) ve Fas (2014) ülkelerinde katıldığı kongre ve konferanslarda ticari faaliyetlerine ait araştırma çalışmalarını sunmuştur.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR

- **Kocaman A.,** Keles O. 2019. Antibacterial Efficacy of Wire Arc Sprayed Copper Coatings Against Various Pathogens, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 28, no:3, p. 504-513, 2019, doi: 10.1007/s11666-018-0824-x
- **Kocaman A.,** Keles O. 2014. Antibacterial Efficacy of Thermally Sprayed Copper-Based Alloys and Their Relation with Spraying Parameters, 4th International Round Table on Thermal Plasmas for Industrial Applications, Poster presentation, Marrakesh
- **Kocaman A.,** Keles O. 2013. Simplified Model of Wire-Arc Spraying for Defined Working Conditions, 21st International Symposium on Plasma Chemistry, Poster presentation, Cairns