

Aralık 25'

MALZEME VE METALÜRJİ MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA

Uluslararası Derleme, Araştırma ve Çalışmalar

EDİTÖRLER:

DOÇ. DR. BÜNYAMİN ÇİÇEK
DOÇ. DR. TUNA AYDOĞMUŞ



 SERÜVEN
YAYINEVİ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8559-72-9

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MALZEME VE METALÜRJİ
MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
ULUSLARARASI DERLEME,
ARAŞTIRMA VE ÇALIŞMALAR

- ARALIK 2025 -

EDİTÖRLER

DOÇ. DR. BÜNYAMİN ÇİÇEK
DOÇ. DR. TUNA AYDOĞMUŞ

İçindekiler

Bölüm 1

**BORLU ÇİİNİ SIRLARINDA Nİ-CO KOMPOZİT MALZEMESİNİN
RENKLENDİRİCİ OLARAK KULLANIMI 1**

Hale YILDIZAY

Bölüm 2

**TOZ METALURJİK YÜKSEK HIZ TAKIM ÇELİKLERİNİN MİKROYAPISAL
KARAKTERİZASYONU VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ..... 11**

İdris GÖKALP

Bölüm 3

SÜPER İLETKENLER: TEMEL İLKELER VE TEKNOLOJİK UYGULAMALAR..... 21

İbrahim BOZ

Bölüm 4

**İNCE FİLM ÜRETİMİNDE KATKI MADDELERİNİN KARAKTERİSTİK VE
FONKSİYONEL ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ 31**

Enes Nayman

Bölüm 5

İZNİK ÇİİNİ BULUNTULARININ MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU ..45

Hale YILDIZAY

Alpagut KARA

Bölüm 6

**YAPAY İNSAN DERİSİ ÜRETİMİNDE ELEKTROSPİNNİNG
PARAMETRELERİNİN İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ VE ÇOK AMAÇLI
OPTİMİZASYONU: BİR MALZEME MÜHENDİSLİĞİ PERSPEKTİFİ.....59**

Savaş ÖZTÜRK



BORLU ÇİİNİ SİRLARINDA Nİ-CO KOMPOZİT MALZEMESİNİN RENKLENDİRİCİ OLARAK KULLANIMI

“ ”

Hale YILDIZAY¹

1 Doç. Dr. Hale YILDIZAY, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, 43100 Kütahya, TÜRKİYE, hale.yildizay@dpu.edu.tr, Tel:05055276767, Orcid no: 0000-0002-3896-9912

Çini, hem geleneksel hem de modern mimaride geniş bir kullanım alanına sahip dekoratif bir seramik malzemedir. Tarihi cami, türbe, saray ve medrese gibi yapıların iç ve dış yüzeylerinde kaplama malzemesi olarak kullanılan çini; günümüzde oteller, konutlar ve kamusal alanlarda duvar panosu, dekoratif amaçlı ve özel yüzey tasarımları için tercih edilmektedir. İç mekânda mutfak ve banyo duvarlarında, salon ve ofislerde sanat amaçlı duvar kaplamalarında, avize ve aplik gibi farklı aydınlatma elemanlarında, vazo, tabak ve fincan gibi ürünlerde sıkça kullanılmaktadır. Çini ayrıca restorasyon çalışmalarında özgün mimari öğelerin yeniden yapılmasında, kentsel mekanlarda çeşme, havuz, oturma elemanlarında ve mozaik uygulamalarında da önemli bir rol üstlenir. Hediyeelik eşyadan çağdaş sanat projelerine kadar pek çok alanda değerlendirilebilen çini, dayanıklı, estetik ve kültürel kimlik kazandıran çok yönlü bir malzemedir. Ülkemizde çini üreticiliğine Selçuklu ve Osmanlı Dönemlerinde, bir zanaat dalı olarak seramik karo üreticiliği şeklinde ilk olarak İznik ve Kütahya'da başlanmıştır (Sümer, 1976:39).

Çini malzemelerin üretimi, inorganik esaslı hammaddelerin bünye ve sır kompozisyonlarında doğru şekilde kullanılması üzerine kurulmuş, geleneksel bilgiyle birlikte modern üretim teknolojilerinin birleştiği kapsamlı bir süreçtir.

Bu süreçte; kuvars, kil, kaolin, feldspat gibi hammaddeler karıştırılarak öğütülmeye birlikte çini bünyesi oluşturulur. Daha sonra çini bünyenin şekillendirilmesi, kurutma, dekor (bezeme) uygulama, sır kaplama ve son olarak kontrollü pişirim gibi aşamalarla nihai çini ürünü elde edilmektedir. Pişirim sırasında renk pigmentlerinin davranışı, sıran ergime özellikleri ve bünyenin sinterleme karakteristiği ürünün kalitesini belirleyen faktörlerdir. Tüm bu aşamalar, çininin yüzey parlaklığını, desen keskinliğini, renk stabilitesini ve uzun süreli dayanımını etkileyen kritik üretim adımlarını oluşturmaktadır (Arcasoy, 1983).

.Geleneksel çini üretiminde sırlardaki parlaklığı artırmak ve bunun yanı sıra düşük erime sıcaklığı elde etmek için kurşun oksit içeren sır reçeteleri kullanılmıştır. Yıllar içerisinde sağlık ve çevre açısından tehlike yaratan bu sır reçetelerinin kullanımı azalmış ve reçetelerdeki kurşun oksitten yerini bor, alkali oksitler (Na_2O , K_2O gibi) içeren eriticiler ve çinko oksit gibi hammaddeler almıştır.

Çinide kullanılan kurşunsuz sırlar zehirsiz, çevre dostu olmakla birlikte gıda temasına daha uygun hale gelmiştir. Geliştirilen modern frit teknolojisi sayesinde bu sırların parlaklığı ve dayanıklılığı daha yüksek olmaktadır. Ayrıca bu sırların üretiminde fırın ve atölye ortamındaki kurşun bileşimlerinden kaynaklanan ağır metal riskleri de azalmıştır (Carty & Senapati, 1998; Eppler & Eppler, 2000).

Çini bünyesinin yüzeyini çok ince bir tabaka halinde kaplayan sır, farklı bileşenlerden meydana gelen ve 925 °C civarında düşük sıcaklıklarda eriyerek çini yüzeyinde camsı bir yapı oluşturan bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (Arcasoy, 1983).

Çini diğer seramik malzemelere göre daha düşük sıcaklıklarda pişirilen bir malzeme olup bu özelliğinden dolayı genellikle dekoratif amaçlı kullanılan bir seramik türüdür. Çini desenlerinin renklendirilmesinde, farklı içeriklere sahip hammaddeler ile birçok metal oksiti içerisinde bulunduran pigmentler kullanılmaktadır. Sır bileşimi içerisine dağılan bu pigmentler küçük taneler şeklinde ergimeden kristal yapısını koruyarak homojen biçimde dağılmaktadır.

Kobalt, çini ve seramik sektöründe özellikle mavi renk elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir pigmenttir. Düşük oranlarda bile güçlü mavi tonları verir ve CoO , Co_3O_4 gibi farklı oksit veya tuz formlarıyla açık mavi, koyu mavi veya morumsu tonlar sağlanabilir. Yüksek fırınlama sıcaklıklarına dayanıklılığı sayesinde hem sır hem de bünye içerisinde kullanılabilir ve renk stabilitesini korur. Ayrıca, diğer metal oksitlerle (örneğin Ni, Fe, Mn) karıştırıldığında farklı renk efektleri yaratılabilir; bu nedenle sır reçetelerinde ve dekoratif motiflerde tercih edilen değerli bir renklendirici malzemedir (Rhodes, 2000; Kingery et al., 1976; Eppler & Eppler, 2000; Cooper, 2002).

Nikel, çini ve seramik sektöründe genellikle renk verici ve matlaştırıcı olarak kullanılan bir metal oksit içerikli pigmenttir. Nikel oksit (NiO) veya nikel bileşikleri, sır içerisine eklendiğinde yeşilimsi, gri veya krem tonları elde edilmesini sağlar. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda stabil kalması sayesinde sır ve glazürlerde renk değişimini minimuma indirir. Nikel, çini ve seramikte diğer metal oksitlerle birlikte kullanıldığında renk derinliğini ve ton çeşitliliğini artırabilir, bu yüzden dekoratif ve fonksiyonel tasarımlarda tercih edilen bir katkı maddesi olarak değerlendirilmektedir (Rhodes, 2000; Kingery et al., 1976; Eppler & Eppler, 2000).

Ni-Co kompozit malzemesi, nikel (Ni) ile birlikte kobalt (Co) metallerinin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilen gelişmiş malzemelerdir. Bu kompozitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, içerdiği nikel-kobalt oranına, üretim yöntemiyle işlem koşullarına ve kullanım amacına göre önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Mühendislik, malzeme bilimi ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahip olan Ni-Co kompozitleri, dayanıklılık, korozyon direnci ve termal kararlılık gibi avantajlarıyla tercih edilmektedir. Ayrıca hem nikel hem de kobalt ferromanyetik metaller olduğundan, bu kompozitler manyetik özellikleriyle de dikkat çeker ve mıknatıslanabilme kabiliyetleri sayesinde manyetik cihaz ve sensör teknolojilerinde değerli bir malzeme sınıfı oluşturur.

Ni-Co kompozitlerinin ülkemizdeki üretimi 2007 yılından bu yana sürdürülmektedir. Manisa'nın Gördes ilçesinde Zorlu Holding tarafından kurulan tesis, lateritik nikel yataklarından elde edilen cevheri işleyerek nikel ve kobalt açısından zengin bir kompozit üretmektedir. Üretilen bu malzeme yüksek Ni-Co içeriğiyle değerli bir ara ürün niteliği taşısa da, Türkiye'de henüz bu ürüne yönelik bir pazar oluşmadığından büyük ölçüde yurt dışına ihraç edilmektedir. Kompozitin elde edilmesi hem teknoloji hem de uzmanlık gerektiren oldukça zahmetli ve çok aşamalı bir üretim sürecini içermektedir (Ağaçayak, T., 2008; MTA Nikel,2023; Nikel, 2022; DPT-ÖİK- 640, 2022).

Ülkemizde çini renklendirmesi için pigment üretimi alanında yerli teknolojinin yeterince gelişmemiş olmasından dolayı pigment ihtiyacı büyük ölçüde ithalat yoluyla karşılanmaktadır. Bu durum, çini ürünlerinde son ürün maliyetini etkileyen önemli unsurlardan biri olup, renklendirici olarak kullanılan pigmentlerin fiyatları maliyet üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Ni-Co kompozit malzemesi daha önce farklı sır reçetelerinde kullanılmış ayrıca da bir renklendirici eldesin de başlangıç hammaddesi olarak kullanılmıştır (Yıldızay ve Taşçı, 2021; Yıldızay ve Aydoğdu, 2022).

MALZEME VE YÖNTEM

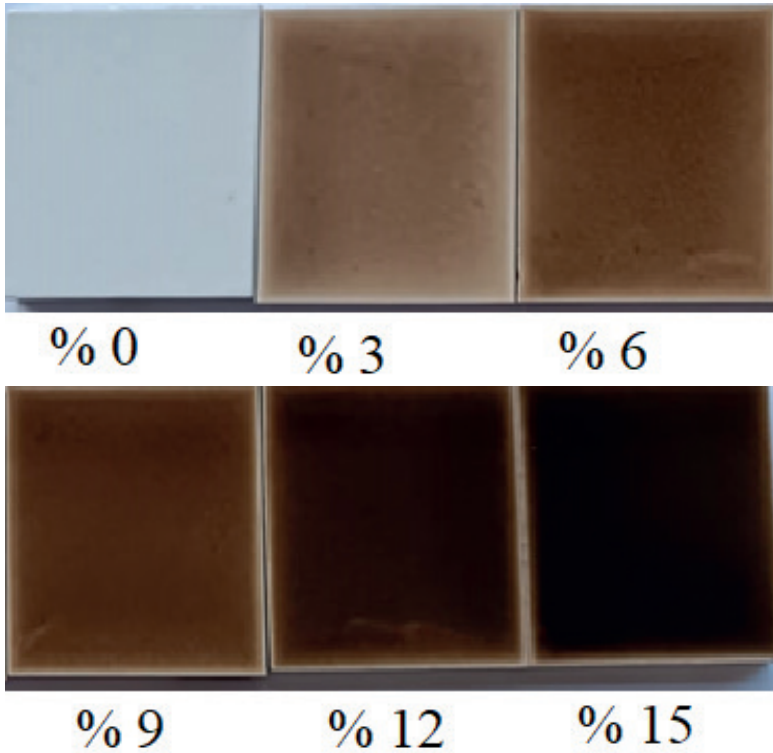
Çalışmada kullanılan Ni-Co kompozit hammaddesi Manisa ilinde yer alan Meta Nikel-Kobalt Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş'den temin edilmiştir. İşletmeden %50 civarında bir nem içeriği ile alınan bu malzeme öncelikle etüvde kurutulmuş ve elenerek kullanıma uygun hale getirildikten sonra analizleri gerçekleştirilmiştir. Ni-Co kompozitin kimyasal içeriği Tablo 1'de belirtilmiş olup, analizler Spectro X marka-Lab 2000 model XRF cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan Ni-Co kompozitinin kimyasal analiz sonuçları.

	Ni-Co kompozit
NiO	54.08
Co ₃ O ₄	4,28
MgO	5,02
Al ₂ O ₃	0.32
SiO ₂	2.01
SO ₃	11.46
MnO	7.06
TiO ₂	0.02
CuO	0.32
K ₂ O	0.01
Cr ₂ O ₃	0.05
ZnO	0.58
Loi	14.07

Çalışmada Ni-Co kompozit malzemesi kullanılarak bor içerikli çini sırları renklendirilmiştir. Nemi etüvde kurutularak uzaklaştırılan malzeme 63 μm 'lık bir elekten geçirilerek borlu çini sıırı içerisinde ilave edilmeye hazır hale getirilmiştir. Malzeme borlu çini sırina % 0, 3, 6, 9,12 ve 15 gibi oranlarda su ilave edilerek jet değirmende 15 dakika karıştırılarak sıırı ile homojenize hale gelmesi sağlanmıştır. Sırın hazırlanması esnasında içerisinde %1 oranında CMC (karboksimetil selüloz) eklenerek borlu sırin çini bünye üzerine daha kolay tutunması sağlanmıştır. Borlu sırların hazırlanması sırasında sırin akmaya karşı dayanımı yani viskozitesi 25 sn, yoğunluğu 1430 g/l'ye ayarlanmıştır. Hazırlanan borlu çini sırları çini bisküvileri üzerine tatbik edildikten sonra kuruması için oda sıcaklığında bekletilmiştir. Sırlanmış bünyeler daha sonra fırın içerisinde konularak sırin gelişme sıcaklığına çıkartılarak, pişirilerek sinterleşmesi sağlanır.

Daha sonra standart borlu çini sıırıyla ve nikel-kobalt kompozit malzemesi eklenen diğer borlu çini sır reçetelerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Çalışmada bisküvi pişirimi yapılmış bünyelere uygulanan % 0, 3, 6, 9, 12 ve 15 oranında nikel-kobalt malzemesi katkılı borlu çini sırlarının pişirme sonrası elde edilen nihai yüzey görüntüleri Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Ni-Co kompozit malzemesinin borlu çini sırlarının yüzeylerdeki etkileri

Çinide uygulanan sırlardaki renklerin referans değerlerine göre konumunun belirlenmesi, sürekliliğinin izlenmesi ve farklı pigmentlerle karıştırılmasıyla ortaya çıkacak yeni renklerin tahmin edilebilmesi için de renk ölçümünün yapılması kritik bir parametredir. Renk, sır yüzeyinin görsel özelliklerini doğrudan etkileyen ana faktörlerden biridir ve üç boyuta sahip bir koordinat sistemiyle tanımlanan renk uzayı üzerinden nicel olarak tanımlanabilir.

Çini sırlarının renk ölçümleri genellikle spektrofotometreler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Spektrofotometreler, numune yüzeyinden yansıyan ışığın dalga boyuna bağlı olarak dağılımını ölçerek renk değerlerinin sayısal olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Sırlarının renk özelliklerini karakterize edebilmek için farklı renk sistemleri bulunmaktadır. Günümüzde en sık kullanılan CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) tarafından tanımlanan CIE renk sistemleridir. Bu sistemlerde renk algısının deneysel gözlemlere dayanmaktadır. Renk ölçüm sürecinde gözlemci, ışık kaynağı ve ölçülen yüzeyin özellikleri temel parametreler olarak dikkate alınmaktadır (CIE, 2004).

Bu sayede elde edilen spektral veriler CIE, $L^*a^*b^*$ renk koordinatlarına dönüştürülmekte ve farklı numuneler arasındaki renk farkları ΔE^* değeri kullanılarak nicel olarak karşılaştırılabilmektedir. Bu yöntem, seramik sırlarının renk stabilitesi, pişirim koşullarının etkisi ve pigment katkılarının renk üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde güvenilir ve objektif bir yaklaşım sunmaktadır (ISO 11664-4).

CIE, $L^*a^*b^*$ renk uzayı, insan gözünün renk algısına yakınlığı nedeniyle seramik araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemde L^* değeri yüzeyin açıklık-koyuluk derecesini ifade etmekte olup, $L^*=0$ siyahı ve $L^*=100$ beyazı temsil etmektedir. a^* eksenini yeşilden ($-a^*$) kırmızıya ($+a^*$) doğru renk değişimini, b^* eksenini ise maviden ($-b^*$) sarıya ($+b^*$) doğru renk değişimini göstermektedir. Bu sayede renkler sayısal olarak tanımlanabilmekte ve farklı numuneler arasındaki renk farkları objektif bir biçimde karşılaştırılabilmektedir (McLaren, 1976; Hunter & Harold, 1987).

Pişirim sonrasında görsel olarak kontrol edilen çini bünyeler üzerine % 0, 3, 6, 9,12 ve 15 oranında uygulanan Ni-Co kompozit malzemesi katılan borlu çini reçetelerinin renk dağılımları, sırların $L^*a^*b^*$ değerleri Konica Minolta CM-700d marka spektrofotometre ile ölçülmüş ve ilgili renk parametreleri belirlenmiştir. Ni-Co kompozit malzemesi katılan borlu çini reçete numunelerinin $L^*a^*b^*$ değerleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. *Ni-Co kompozit malzemesi katılan borlu çini reçetelerinin $L^*a^*b^*$ değerleri*

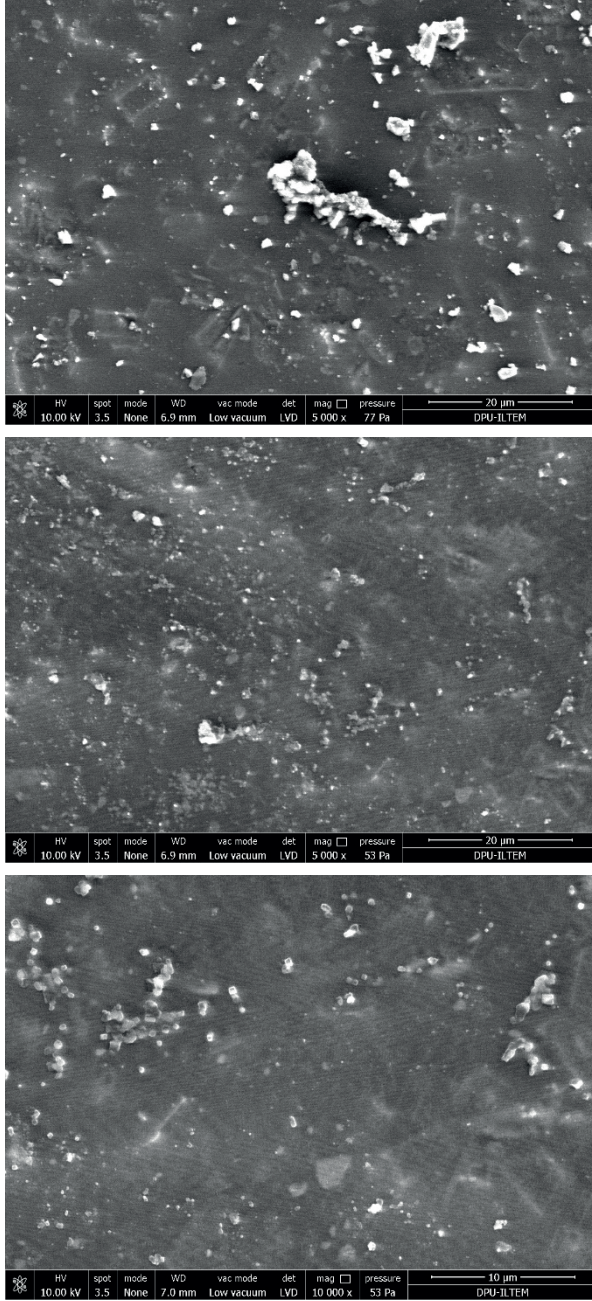
Ni-Co kompozit (%)		L^*	a^*	b^*
(Borlu çini sırası)	Std.	93,18	0,06	5,38
	3	48,95	9,22	22,97
	6	35,03	11,59	26,83
	9	30,93	13,25	27,59
	12	17,98	14,85	19,86
	15	13,57	12,27	15,47

Ni-Co kompozit malzemesinin borlu çini sırası reçetelerine ilavesinden sonra endüstriyel ortamda pişirilen sırlardan elde edilen renk analizleri incelendiğinde genel olarak şunlar söylenebilir;

Ni-Co kompozit malzemesinin artan miktarda borlu çini sırası içerisine ilavesiyle sağlanan $L^*a^*b^*$ renk değişim değerleri incelendiğinde; Ni-Co kompozit malzemesinin borlu çini sırası içerisindeki artan oranlarına bağlı olarak L^* 'de ve b^* 'değerlerinde düşüş, a^* 'değerinde önce bir artış sonra bir düşüş gözlemlenmiştir. Yani L değeri siyaha doğru yaklaşırken b değeri artan bir şekilde sarıya daha çok yaklaşmıştır. a^* 'değeri de önce kırmızıya doğru artmış, daha sonra artan Ni-Co kompozit malzemesiyle birlikte yeşile doğru geçiş yapmıştır.

Genel olarak bu çalışmanın sonucuna bakıldığında çini bünyeler üzerine uygulanan kurşun içermeyen borlu çini sırlarında farklı miktarlarda Ni-Co kompozit malzemesinin renklendirici olarak kullanımıyla devetüyü renginden koyu kahverengiye farklı renk tonlarının oluşabileceği görülmektedir. Bu çalışmada çini bünyeler üzerine uygulanan Ni-Co kompozitin renklendirici olarak borlu çini sırlarına ilavesiyle birlikte sıran parlaklığının bozulmadığı ve herhangi bir çatlak oluşmadığı görülmüştür. Malzemenin değişen oranlarda ilavesiyle borlu çini sırlarında kahverengi renk tonlarında renk eldesi için değerlendirilebileceği görülmektedir.

Çalışmada Ni-Co kompozit malzemesi borlu çini sırası içerisine bir ön işleme tabi tutulmadan seçilen borlu çini sır reçetesi içerisine farklı oranlarda ilave edilip pişirilmiş ve daha sonra sırdaki ve sır yüzeyinde oluşturduğu etkiler gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde en iyi sonuç %15 Ni-Co kompozit malzemesi içeren borlu çini sır reçetesinin olduğu görülmüştür ve hazırlanan bu sırların yüzeyine NANO SEM 650 cihazı ile SEM çalışması yapılarak kristal oluşumları gözlemlenmiştir.



Şekil 2. %15 Ni-Co kompozit malzemesi ilaveli borlu çini sıırı reçetele-
rinden sağlanan SEM analizleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kullanılan Ni-Co kompozit malzemesi %50 civarında nem içeriğine sahip bir şekilde üretilmekte olup içeriğinde kimyasal olarak değişik metal oksitleri bir arada bulundurmaktadır. Ni-Co kompozit malzemesinde bulunan bu metal oksitler yoğun geçiş elementlerini içermektedir. Buda özellikle bu ürünün çinide renklendirme malzemesi olarak sır içerisinde değerlendirilebilir olduğu düşündürmektedir. Bu çalışmada özellikle borlu çini reçetesinde pigment olarak kullanımının etkisi incelenmiştir.

Pigmentler sır kompozisyonu ile uyum göstererek sır reçeteleri içerisinde eşit dağılım göstermeli ve sır içerisindeki camsı yapının içerisinde renk verebilme etkisini muhafaza ederek kaplandığı bünye üzerinde yüzey kalitesini bozmadan, sır hatası oluşturmaktan ve kristal yapısını koruyarak kalabilmelidir.

Yapılan bu çalışmada Ni-Co kompozit hammaddesi herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın seçilen borlu çini sırtına değişen miktarlarda ilave püsim sonrasında sır içerisindeki ve sır yüzeyindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında %15 Ni-Co kompozit malzeme ilavesi de dahil hepsinde olumlu sonuç elde edilmiş olup bu yüzden %15 Ni-Co kompozit malzemesi içeriğine sahip sırlara SEM analizleri uygulanmıştır. SEM analizleri de incelendiğinde Ni-Co kompozit hammaddesinin sır içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür.

Ni-Co kompozit malzemesinin artan miktarda borlu çini sırtı içerisine ilavesiyle sağlanan $L^*a^*b^*$ renk değişim değerleri incelendiğinde; Ni-Co kompozit malzemesinin borlu çini sırtı içerisindeki artan oranlarına bağlı olarak L^* ve b^* değerlerinde düşüş, a^* değerinde önce bir artış sonra bir düşüş gözlemlenmiştir. Yani L değeri siyaha doğru yaklaşırken b değeri artan bir şekilde sarıya daha çok yaklaşmıştır. a^* değeri de önce kırmızıya doğru artmış, daha sonra artan Ni-Co kompozit malzemesiyle birlikte yeşile doğru geçiş yapmıştır.

%15 Ni-Co kompozit malzemesinin borlu çini sırtında yapılan SEM görüntüleri incelendiğinde kristallerin yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ve sır içerisinde oluşan kristal fazın dendritik bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

Çalışmada %15 oranında Ni-Co kompozit malzemesinin borlu çini sırtları içerisinde değerlendirilerek, diğer renklendiricilere alternatif olarak kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Çini sanayinde kullanılan ve özellikle yurt dışından temin edilen bazı pigment hammaddelerine alternatif malzeme çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmalar hem maliyetlerin azaltılması hem de tek bir hammaddeye bağımlılığın önlenmesi açısından önem taşımakta; aynı zamanda farklı bir endüstriyel ürün olan Ni-Co kompozit hammaddesinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Ağacayak, T., (2008). Karacam (Eskişehir) Lateritik nikel cevherinin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle zenginleştirilmesi (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Arcasoy, A. (1983). Seramik Teknolojisi. Marmara Üniversitesi Yayın No:457, Güzel Sanatlar Fakültesi Yayın No:2, Eskişehir.
- Carty, W. M., & Senapati, U. (1998). *Porcelain—Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior*. Journal of the American Ceramic Society, 81(1), 3–20. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02290.x>
- CIE. (2004). *Colorimetry* (3rd ed.). CIE Publication No. 15:2004, Vienna.
- DPT-OİK- 640, (2022, 12 Ağustos). Erişim Adresi: <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Sekizinci-Bes-Yillik-Kalkinma-Plani-Madencilik-Grubu-Raporu.pdf>
- Emmanuel Cooper, (Ceviren Zeliha Mete), 2011. Karakalem Yayınevi, Seramik sır reçeteleri el kitabı, s. 208.
- Eppler, R. A., & Eppler, D. R. (2000). *Glazes and glass coatings*. The American Ceramic Society.
- Hunter, R. S., & Harold, R. W. (1987). *The Measurement of Appearance*. John Wiley & Sons, New York.
- ISO 11664-4. (2019). *Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space*.
- Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (2nd ed.). Wiley.
- McLaren, K. (1976). *The development of the CIE 1976 (L*a*b*) uniform colour space and colour-difference formula*. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 92, 338–341.
- MTA Nikel (2023, Eylül 27). Erişim Adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/nikel>.
- Nikel, (2022, 14. Eylül). Erişim Adresi: <https://www.metanikel.com.tr/>
- OİK-Raporu-MetalMadenlerAltKomisyon-Diger-Metal-Madenler-Calisma-
- Rhodes, D. (2000). *Clay and glazes for the potter* (3rd ed.). Krause Publications.
- Sümer, G. (1976). Seramik Sanayiinde Üretim Teknolojisi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 15(3), 37–43.
- Taçıyıldız, E. (2018). Seramik sırrının sırrı (1. Basım). İstanbul: Hayalperest Yayınevi. 213
- Yıldızay H., F. Aydoğdu, (2022) “Preparation of Black Colorants for Stoneware Glazes with Using Ni-Co Composite, Chromite And Iron Oxide Mixtures”, JSR-A, no. 048, pp. 87–97.
- Yıldızay H., Taşçı E, (2021). Mühendislik alanında araştırmalar, Serüven yayınevi, Aralık, “Ni-Co Kompozitinin Borlu Sırlarda Etkilerinin İncelenmesi”, S.123-136



**TOZ METALURJİK YÜKSEK HIZ TAKIM
ÇELİKLERİNİN MİKROYAPISAL
KARAKTERİZASYONU VE TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

“ ”

İdris GÖKALP¹

¹ Ar. Gör. Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 41001 İzmit/ Kocaeli, ORCID ID: 0000-0001-5270-696X

Giriş

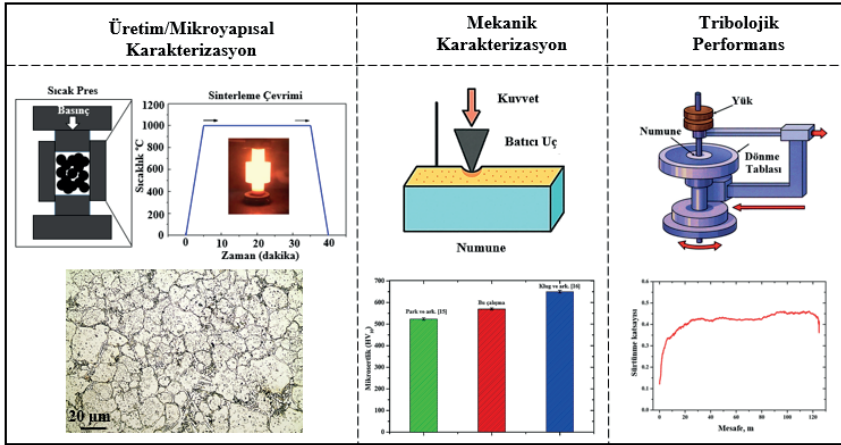
Yüksek hız takım çelikleri (HSS) yüksek sıcaklıklarda sertliklerini koruyabilmeleri, termo-mekanik yükler altında boyutsal kararlılık göstermeleri ve aşınma dirençlerinin üstün olması nedeniyle modern talaşlı imalatda kritik bir konuma sahiptir [1-3]. Bu çeliklerin yüksek performansı, kimyasal kompozisyonda yer alan tungsten, molibden, vanadyum ve krom gibi karbür yapıcı elementlerin matris içerisinde MC, M_2C ve M_6C gibi sert karbürleri oluşturmasıyla doğrudan ilişkilidir [4,5]. Karbürler yüksek sıcaklıkta talaş kaldırma sırasında takımın mekanik bütünlüğünü koruyarak hem kesme performansını hem de takım ömrünü belirgin bir şekilde artırmaktadır [6,7]. Bundan dolayı HSS'ler matkap, freze, broş, testere bıçakları, sıcak şekillendirme kalıpları ve yüksek yük altında çalışan endüstriyel parçaların üretiminde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [8].

HSS çeliklerinde hedeflenen mekanik ve tribolojik özelliklere ulaşılabilmesi karbür fazlarının matris içerisindeki dağılımı, boyutu ve morfolojisi ile yakından ilişkilidir. Konvansiyonel döküm yöntemleri katılaşma sırasında oluşan segregasyon, karbür kümelenmesi ve tane irileşmesi gibi mikroyapısal kusurlar nedeniyle çoğu zaman istenen homojen iç yapıyı sağlayamamaktadır [9,10]. Bu nedenle son yıllarda toz metalurjisi temelli üretim teknikleri alaşım bileşenlerinin homojen karışımını sağlayarak daha kontrollü karbür dağılımı sunmaları sebebiyle HSS üretiminde de giderek daha fazla tercih edilmektedir [11-13]. İnce taneli yapı, yüksek yoğunluk ve düşük porozite elde edilmesi toz metalurjisi ile üretilen HSS çeliklerini konvansiyonel yöntemlere göre daha avantajlı kılmaktadır [14,15]. Basınç destekli sinterleme yöntemleri (sıcak pres, sıcak izostatik pres) HSS üretiminde mikroyapısal homojenliği artıran etkili teknikler arasında yer almaktadır. Bu yöntemlerde sıcaklık ve basıncın eşzamanlı uygulanması difüzyon temelli yoğunlaşmayı hızlandırarak kısa sürede yüksek yoğunluklu ve düşük poroziteli yapılar elde edilmesini sağlamaktadır [16-18]. Böylece karbür fazlarının matris içinde homojen ve ince boyutlarda çökmesi kolaylaşmakta, tane büyümesi baskılanmakta ve sonuç olarak üstün mekanik özellikler elde edilebilmektedir.

Bu çalışma, basınç destekli sinterleme yöntemiyle üretilen HSS çeliklerinin mikroyapısal, mekanik ve tribolojik davranışlarını detaylı bir şekilde inceleyerek yöntemin performans üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Sıcaklık ve basıncın eşzamanlı uygulanmasıyla yoğunlaşma kinetiğinin hızlanması, gözenekliliğin önemli ölçüde azalması ve karbür fazlarının matris içerisinde daha homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Bu mikroyapısal iyileşmeler sayesinde sertlik ve aşınma direncinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Sıcak pres yönteminin HSS çeliklerinde yüksek performans gerektiren uygulamalar için kritik öneme sahip olan üstün mekanik ve tribolojik özelliklerin elde edilmesine doğrudan katkı sağladığı ortaya konulmuştur.

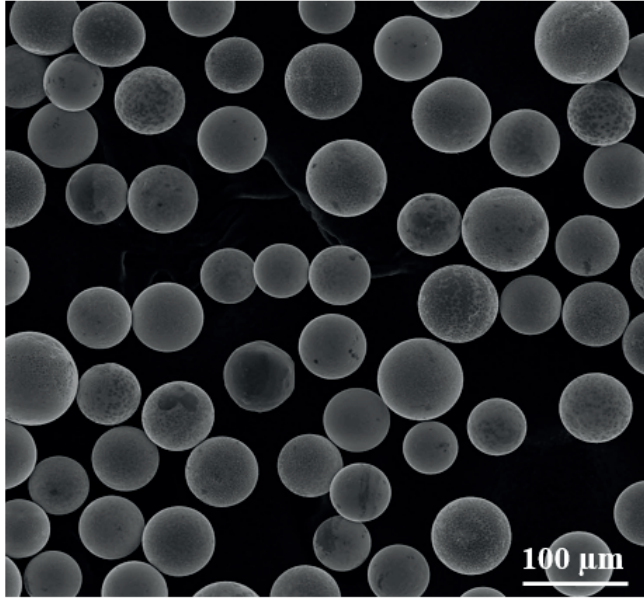
DeneySEL Çalışma

Şekil 1’de HSS çeliğinin üretimi ve karakterizasyon adımları şematik olarak sunulmaktadır. İlk aşamada, HSS tozları basınç destekli sinterleme yöntemiyle kompakt hâle getirilmiş ve numunelerin metalografik işlemleri sonrasında optik mikroskop ile mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir. Mekanik karakterizasyonda mikro-sertlik ölçümleri uygulanmıştır. Son olarak tribolojik performans ise pin-on-disk aşınma cihazı kullanılarak sürtünme katsayısı ve tribolojik davranışının mesafeye bağlı değişimi üzerinden değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Basınç destekli sinterleme ile üretilen HSS çeliğinin üretimi ve karakterizasyon sürecinin şematik gösterimi

HSS tozunun taramalı elektron mikroskobu (JEOL JSM-6060) ile elde edilen SEM görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. HSS toz partiküllerinin ağırlıklı olarak küresel bir morfolojiye sahip olduğu ve partikül boyutlarının yaklaşık olarak 100 µm’nin altında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca partikül yüzeylerinde tespit edilen ince mikro-pürüzlülük sinterleme sırasında partiküller arası mekanik kilitlemeyi artırmakta ve difüzyon kontrollü boyun oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Bu yüzey morfolojisi ve partikül boyut özellikleri birlikte değerlendirildiğinde kullanılan HSS tozunun basınç destekli sinterleme yöntemi için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



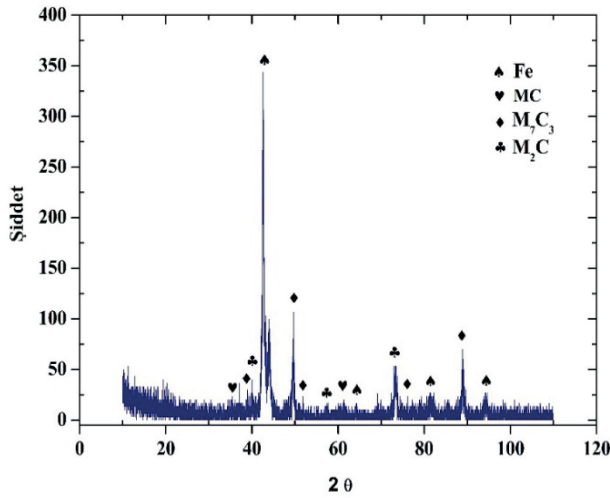
Şekil 2. HSS tozunun SEM görüntüsü

HSS numuneleri 35 mm çapında ve 4 mm yükseklikte olacak şekilde sıcak pres ile üretilmiştir. Üretim parametreleri 1000 °C sıcaklık, 45 MPa basınç ve 30 dakika süre olarak belirlenmiş ve oksidasyonun önlenmesi için 10^{-4} mbar vakum altında üretimler gerçekleştirilmiştir. Ardından numunelere metalografik işlemler uygulanmıştır. Hassas kesme cihazı ile kesilen numunelerin sırasıyla 320-2000 grid SiC zımparalar ile yüzeyleri temizlenmiştir. Daha sonra sırasıyla 3 µm ve 1µm elmas solüsyonlar ile yüzeyleri parlatılan numuneler % 3 Nital (97 mL alkol - 3 mL HNO_3) solüsyonunda daldırma yöntemi ile dağlanmıştır. Mikroyapısal incelemelerde Olympus BX4M-LED marka optik mikroskop kullanılmıştır. RigakuSA-HF3, XRD-RigakuSA cihazında 10° - 110° , 1 derece/dakika ve 40 mA parametrelerinde faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri 10 kgf yük altında ve 10 sn süre ile Zwick/Roell mikro sertlik cihazında yapılmıştır. Tribolojik özelliklerin belirlenmesi için aşınma testleri Turkeyus POD/HT/WT model cihazda ASTM G99-05 standardına göre 300 rpm hız, 125 m mesafe ve 15 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan aşınma testlerinde karşıt malzeme olarak silisyum nitrür (Si_3N_4) bilya kullanılmıştır.

Sonuçlar ve Tartışma

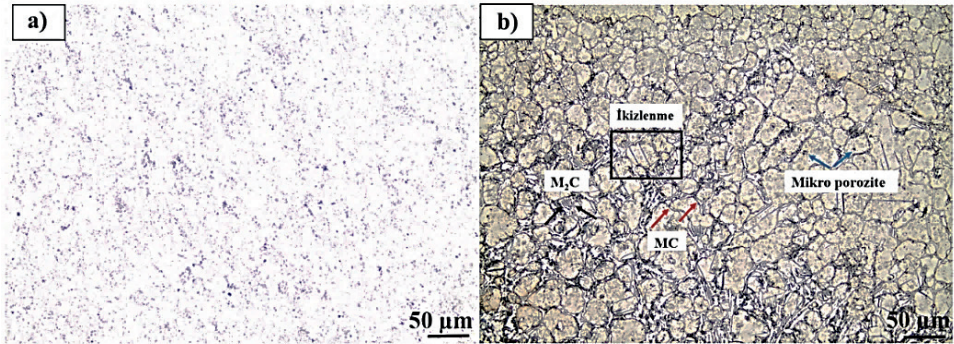
HSS numunesinin XRD grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Grafikte Fe fazına ait piklerin (44 - 45°) en yüksek şiddete sahip olduğu gözlemlenmiştir. Diğer yandan MC , M_2C ve M_7C_3 karbürleri de farklı derecelerde tespit edilmiştir. MC karbürleri yani V-zengin fazların (36 - 38° ve 60°) belirgin pikler oluşturarak

sinterleme sonrası ince ve kararlı çökeltiler hâlinde matris içinde dağıldığını göstermektedir.



Şekil 3. HSS numunesinin XRD analizi grafiği

M_2C karbürleri ise $60-80^\circ$ aralığında görülen piklerle tanımlanmıştır. M_2C fazının belirgin bir şekilde gözlenmesi sinterleme sıcaklığının alaşım elementlerinin difüzyonu için yeterli olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak M_7C_3 karbürleri de $38-40^\circ$, 52° ve 75° ’lerde gözlemlenmiştir. M_7C_3 fazının varlığı ise sinterleme sırasında kromun matristen ayrılarak karbür fazına difüze olduğunu göstermektedir.



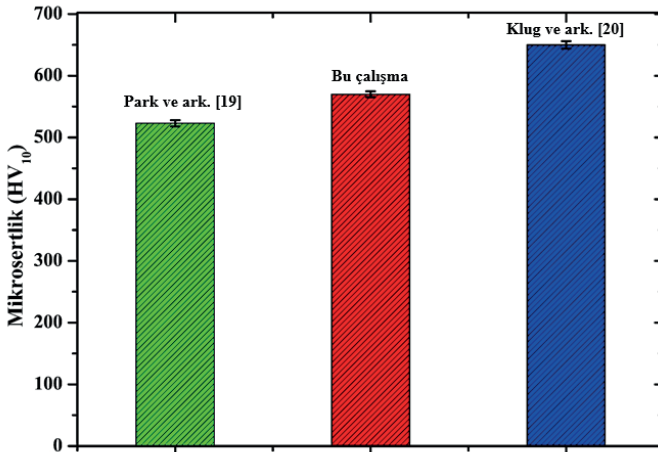
Şekil 4. HSS numunesinin parlatılmış (a) ve dağlanmış (b) mikroyapı görüntüleri

Dağlama sonrası elde edilen mikroyapıda (Şekil 4-b) ise martenzitik yapı ve karbür fazları belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Açık renkli bölgeler östenitten dönüşen martenzitik veya kısmen beynitik fazları temsil etmektedir. Koyu renkli bölgeler ise çökelmiş MC tipi primer karbürleri

göstermektedir. Bu karbürler V, Mo ve W gibi karbür oluşturu elementlerin matriste difüzyonu sonucu oluşarak oluşmaktadır.

Ayrıca mikroyapının bazı bölgelerinde ince iğnemi morfolojiye sahip M_2C tipi sekonder karbürlerin oluştuğu da gözlenmiştir. Bu karbürlerin oluşumu sinterleme sonrasında Mo ve W gibi karbür yapıcı elementlerin östenitten ayrışması ve hızlı soğuma koşullarının matrisi kimyasal olarak dengesiz hale getirerek difüzyon kaynaklı karbür çökmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte mikroyapıda görülen ikizlenme yapıları ise martenzitik dönüşüm sırasında oluşan yüksek iç gerilmelerin bir göstergesi olarak dönüşüm kinetiğinin hızlı gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Tüm bu mikroyapısal incelemeler sıcak pres ile gerçekleştirilen sinterleme koşullarının yüksek yoğunluklu ve karbürce zengin homojen bir HSS yapısı elde etmek için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 5'te sıcak pres yöntemiyle üretilen HSS çeliğinin ölçülen sertlik değeri ($570 \pm 4,1$ HV), literatürde rapor edilen değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen sertlik değerinin literatür ile uyumlu olduğu ve Park ve ark. [19] tarafından konvansiyonel döküm yöntemiyle üretilen HSS çeliği için ölçülen sertlik değerinin ($523 \pm 5,1$ HV) üzerinde olduğu görülmektedir. Sertlik değerinin yüksek olması sıcak pres ile üretim esnasında eşzamanlı sıcaklık-basınç kombinasyonunun yoğunlaşmayı artırması, gözenekleri en aza indirmesi ve karbürlerin (MC , M_2C , M_7C_3) matris içerisinde daha ince, homojen ve sürekli bir dağılım göstermesinden kaynaklanmaktadır.

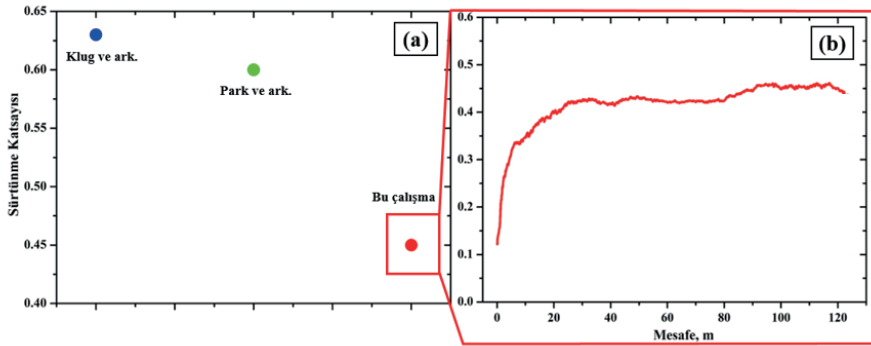


Şekil 5. HSS numunesinin literatür ile karşılaştırılmış sertlik grafiği (19, 20)

Bunun yanı sıra özellikle vanadyumca zengin MC karbürlerinin yoğun ve ince boyutlarda çökmesi sertlik değerinin artışıındaki en önemli bir

etkendir. Ayrıca yoğunlaşmanın artması hem matris sertliğini arttırmakta hem de karbür-matris ara yüzey bağlarını güçlendirerek yük taşıma kapasitesini de geliştirmektedir.

HSS çeliğinin tribolojik performansı elde edilen sürtünme katsayısı değerleri üzerinden literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak Şekil 6'da verilmiştir. Bu çalışmada sürtünme katsayısı yaklaşık 0,45 iken Park ve ark. [19] tarafından 0,58 ve Klug ve ark. [20] tarafından ise 0,63 olarak bildirilmiştir. Sürtünme katsayısındaki bu önemli düşüş mikroyapıdaki homojen ve ince boyutlardaki karbür dağılımı, düşük porozite ve güçlü matris-karbür arayüzeylerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. HSS numunesinin literatür çalışmaları ile karşılaştırmalı sürtünme katsayısı grafiği (a-b) (19, 20)

Literatürde sürtünme katsayısındaki iyileşmenin özellikle vanadyumca zengin ince MC karbürlerinin homojen dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu karbürler hem matrisin mikrosertliğini artırarak plastik deformasyonu sınırlar hem de yüzeydeki temas alanını azaltarak sürtünme davranışını iyileştirmektedir. Ayrıca mikroyapıda M_2C ve M_7C_3 karbürlerinin varlığı yüzeyde aşınma sırasında mikro taşıyıcı oluşturarak sürtünmeyi daha stabil hale getirmekte ve yüzey hasarını sınırlamaktadır.

Şekil 6-b'de sürtünme katsayısının kayma mesafesi boyunca değişimi verilmiştir. Sürtünme katsayısı başlangıçta yaklaşık 0,20 civarında iken ve temas yüzeyinin artmasına bağlı olarak 10-20 m aralığında hızlı bir artış sergilemiştir. Bu bölge ilk temas noktasına yani alıştırma (running) davranışına karşılık gelmektedir. Yaklaşık 30 m sonrasında ise eğri daha stabil bir davranış sergileyerek sürtünme katsayısı 0,40-0,45 aralığında dengeli bir şekilde devam etmiştir. Mesafe ilerledikçe ciddi bir dalgalanmanın veya ani artış-azalışın meydana gelmemesi yüzeyin aşınma sırasında yapısal stabilitesini koruduğunu göstermektedir. Bu kararlı davranış mikroyapı incelemelerinde gözlenen ince martensitik matris yapısı, iyi bağlanmış karbür fazları ve düşük porozite ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle MC ve M_2C karbürlerinin

matris içinde eşit dağılmış olması yüzeyin yük taşıma kapasitesini artırarak sürtünme katsayısının ani yükselmesini engellemiştir. Sonuç olarak sıcak pres ile üretilen HSS numunesi literatürde yapılan çalışmalara göre daha düşük sürtünme katsayısı ve daha kararlı tribolojik davranış sergilemiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada sinterleme yöntemiyle üretilen yüksek hız takım çeliğinin mikroyapısal karakterizasyonu, mekanik dayanımı ve tribolojik davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Konvansiyonel yöntemler ile üretilen HSS'lerde yaygın olarak görülen segregasyon, karbür bantlaşması-kümelenmesi ve homojen olmayan mikroyapı gibi yapısal kusurlar sinterleme yöntemiyle başarılı bir şekilde ortadan kaldırılmıştır. Diğer yandan elde edilen martenzitik matris içerisinde MC, M_2C ve M_7C_3 karbürlerinin ince ve homojen bir şekilde dağılması üretim parametrelerinin de optimal bir şekilde belirlendiğini göstermektedir. Mikroyapıda yer alan karbürler sertlik değerinde önemli bir artışın meydana gelmesini sağlamıştır. Bu sayede literatür ile karşılaştırıldığında $570 \pm 4,1$ HV gibi yüksek bir sertlik değeri elde edilmiştir. Tribolojik testlerde ise sürtünme katsayısının daha düşük (0,45) ve aşınma davranışının tüm süreç boyunca kararlı bir şekilde devam ettiği görülmüştür. Bu stabil davranış matris-karbür arayüzeylerinde güçlü bir metalurjik bağın olduğunu ve düşük porozite oranı ile ince karbürlerin yüzeyde yük taşıma kapasitesini de artırmasıyla ilişkilendirebilmektedir. Elde edilen sonuçlar sinterleme yönteminin yüksek yoğunluk, kontrollü karbür dağılımı ve iyileştirilmiş mekanik-tribolojik performans sağlayarak modern kesici takım uygulamalarına yönelik yüksek kalite HSS üretiminde etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1]. Roberts, G., Cary, R. (1998). *Tool steels*. ASM International.
- [2]. Trent, E. M., Wright, P. K. (2000). *Metal cutting*. Butterworth-Heinemann.
- [3]. Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L., Ryffel, H. H. (2016). *Machinery's handbook*. Industrial Press.
- [4]. Fang, C., Liu, Z., Li, H. (2019). Microstructural evolution of HSS steels under high-temperature service. *Materials Science and Engineering A*, 754, 345–356.
- [5]. Chen, J., Zhao, P., Wang, Y. (2020). Carbide precipitation behavior in high-alloy tool steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 815, 152338.
- [6]. Doluk, Ş., Yıldız, B., Tüfekçi, M. (2018). Wear behaviour of HSS-based tool steels. *Wear*, 414–415, 124–132.
- [7]. Zhang, X., Li, M., Zhou, D. (2021). Surface integrity and wear of PM-HSS. *Surface and Coatings Technology*, 422, 127545.
- [8]. Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. Cambridge International Science Publishing.
- [9]. Lupulescu, A., Henry, S., Marken, K., Lampman, S. (2015). Science of casting and solidification: ASM handbook contributions: *An MPMD Symposium Honoring Doru Michael Stefanescu-Cham*: Springer International Publishing.
- [10]. Liu, Y., Chen, L., Xu, H. (2017). Segregation and carbide clustering in cast HSS. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 4214–4224.
- [11]. German, R. M. (1996). *Sintering Theory and Practice*. Wiley.
- [12]. Danninger, H. (2005). Powder metallurgy tool steels: microstructure and performance. *International Journal of Powder Metallurgy*, 41(5), 35–50.
- [13]. Czeppe, T., Góral, A., Kula, A. (2022). Carbide distribution in PM-HSS and its mechanical response. *Materials Characterization*, 187, 111859.
- [14]. Yamanoglu, R., Bradbury, W., Olevsky, E. A., German, R. M. (2013). Sintering and microstructure characteristics of 42CrMo4 steel processed by spark plasma sintering. *Metals and Materials International*, 19(5), 1029–1034.
- [15]. Munir, Z. A., Anselmi-Tamburini, U. (2010). Densification mechanisms in pressure-assisted sintering. *Journal of Materials Science*, 45, 117–128.
- [16]. Boukhalfa, C., Fellah, M., Baccouche, M., Yamanoglu, R., Gökalp, İ., Zegai, A. A., Gani, A. (2025). High-energy ball milling and pressure-assisted sintering of Ti-6Al-4 V alloy: a powder design approach for controlled microstructure, enhanced mechanical properties, and improved wear resistance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-12.

- [17]. Çelik, S., Korkmaz, M., Demir, A. (2023). Hot-pressed high-speed steels: microstructure–performance relation. *Materials Science and Engineering A*, 871, 144893.
- [18]. Altıparmak, S. C., Lombardi, M., Bondioli, F., Fino, P., Biamino, S., Ugues, D. (2025). Hot isostatic pressing for powder-based additive manufacturing of metals: State-of-the-art review and future perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*.
- [19]. Park, J. W., Lee, H. C., Lee, S. (1999). Composition, microstructure, hardness, and wear properties of high-speed steel rolls. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(2), 399-409.
- [20]. Jovičević-Klug, P., Podgornik, B. (2020). Comparative study of conventional and deep cryogenic treatment of AISI M3: 2 (EN 1.3395) high-speed steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13118-13127.



SÜPER İLETKENLER: TEMEL İLKELER VE TEKNOLOJİK UYGULAMALAR

“ ”

İbrahim BOZ¹

¹ Öğr.Gör.İbrahim BOZ , Mardin Artuklu Üniversitesi, ORCID : 0000-0002-2719-4197

1. GİRİŞ

Günümüzde elektronik ve elektrik teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, kullanılan malzemelerin özelliklerini daha da önemli hâle getirmiştir. Klasik iletken ve yarı iletken temelli elektronik anlayışının ötesine geçilerek, ileri malzeme teknolojilerine dayanan yeni uygulama alanları ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda süper iletkenler, sahip oldukları özgün fiziksel nitelikler sayesinde modern elektronik sistemlerde dikkat çeken bir konuma ulaşmıştır (Kittel, 2005; Tinkham, 2004).

Süper iletkenlik, belirli koşullar altında bazı malzemelerin elektrik akımını herhangi bir enerji kaybı olmaksızın iletebilmesi olgusu olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, yüksek verimlilik gerektiren enerji sistemleri, hassas ölçüm cihazları ve ileri teknoloji uygulamaları açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca süper iletkenlerin manyetik alanlarla olan etkileşimleri, bu malzemelerin bilimsel ve teknolojik değerini artıran temel unsurlardan biridir (Poole vd., 2010).

Bu çalışma, süper iletkenlerin temel özellikleri, çalışma koşulları ve kullanım alanları, akademik çerçevede ve eğitim hedefleri doğrultusunda sunulmuştur. Hazırlanan bu dokümanın, öğrencilerin konuya ilişkin kavramsal bilgi düzeylerini artırması ve ileri elektronik teknolojilerine yönelik altyapı oluşturmada katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

2. SÜPER İLETKENLERE GİRİŞ

2.1. Süper İletkenlik Kavramı

Süper iletkenlik, bazı malzemelerin kritik bir sıcaklığın altına soğutulmaları hâlinde elektriksel dirençlerinin sıfıra düşmesiyle ortaya çıkan fiziksel bir durumdur. Bu durumda elektrik akımı, Joule ısınması olmaksızın iletilebilmekte ve enerji kayıpları tamamen ortadan kalkmaktadır (Tinkham, 2004).

Süper iletkenlik, bazı malzemelerin belirli fiziksel koşullar altında elektrik akımını hiçbir direnç göstermeden iletebilme özelliğidir. Klasik iletkenlerde elektrik akımı iletimi sırasında enerji kayıpları meydana gelirken, süper iletken malzemelerde bu kayıplar tamamen ortadan kalkar. Bu durum, süper iletkenliği geleneksel iletkenlikten ayıran en temel özelliklerden biridir.

Uzun yıllar boyunca süper iletkenlik yalnızca mutlak sıfıra yakın sıcaklıklarda gözlemlenebilmiş, bu durum uygulama alanlarını ciddi biçimde sınırlamıştır. Ancak malzeme bilimi ve deneysel tekniklerdeki gelişmeler sayesinde daha yüksek kritik sıcaklıklara sahip süper iletken malzemeler geliştirilmiştir (Poole vd., 2010).

Elektriksel direncin ortadan kalkması, enerji verimliliği açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Süper iletkenlik durumu yalnızca elektriksel de-

ğil, aynı zamanda manyetik özellikleri de kapsayan bir olgudur. Bu nedenle süper iletkenlik, hem elektrik hem de manyetizma konularını içeren çok disiplinli bir alan olarak değerlendirilmektedir.

Süper iletkenlik olayı, yalnızca belirli sıcaklık, akım ve manyetik alan sınırları içerisinde gerçekleşir. Bu sınırların aşılması durumunda malzeme, süper iletkenlik özelliğini kaybederek normal iletken davranışına geri döner.

Bu olgu yalnızca elektriksel özelliklerle sınırlı olmayıp, aynı zamanda manyetik davranışları da kapsamaktadır. Süper iletkenlik, elektrik ve manyetizma konularını bir arada ele alan disiplinler arası bir araştırma alanı olarak değerlendirilmektedir (Reznik, 2008).

2.2. Süper İletkenliğin Tarihsel Gelişimi

Süper iletkenlik olgusu ilk kez 1911 yılında keşfedilmiştir. Bu keşif, düşük sıcaklıklarda yapılan deneyler sırasında bazı metallerin elektriksel dirençlerinin ani bir şekilde sıfıra düştüğünün gözlemlenmesiyle gerçekleşmiştir. Bu bulgu, o döneme kadar bilinen elektrik iletim kurallarının yeniden değerlendirilmesine neden olmuştur (Kittel, 2005).

Keşfin ardından süper iletkenlik üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış, farklı malzemelerin düşük sıcaklıklardaki davranışları incelenmiştir. Uzun yıllar boyunca süper iletkenlik yalnızca çok düşük sıcaklıklarda elde edilebilmiş, bu durum uygulama alanlarını sınırlamıştır.

Zamanla gelişen malzeme bilimi ve deneysel teknikler sayesinde, daha yüksek sıcaklıklarda süper iletkenlik gösteren yeni malzemeler geliştirilmiştir. Bu gelişmeler, süper iletkenlerin endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda kullanılabilmesinin önünü açmıştır.

2.3. Süper İletkenliğin Önemi

Süper iletkenler, enerji iletiminde kayıpların ortadan kaldırılması açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Elektrik enerjisinin daha verimli taşınabilmesi, hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle süper iletken teknolojileri, modern enerji sistemlerinin geleceği açısından stratejik bir konumda yer almaktadır. Bunun yanı sıra süper iletkenler, güçlü manyetik alanların üretilebilmesi sayesinde tıp, ulaşım ve bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hassas ölçüm cihazları, ileri görüntüleme sistemleri ve yüksek performanslı motorlar, süper iletken teknolojilerinin sağladığı olanaklardan yararlanan başlıca uygulamalardır. Eğitim açısından değerlendirildiğinde, süper iletkenlik konusu öğrencilerin ileri elektronik ve elektrik teknolojilerini daha iyi anlamalarına katkı sağlamaktadır. Bu konu, temel elektronik bilgilerini ileri düzey uygulamalarla ilişkilendirme imkânı sunarak, mesleki ve akademik gelişimi desteklemektedir.

3. SÜPER İLETKENLERİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

3.1. Elektriksel Davranış

Süper iletken malzemeler, belirli koşullar altında elektrik akımını herhangi bir direnç göstermeden iletebilme özelliğine sahiptir. Bu durum, klasik iletkenlerde gözlenen enerji kayıplarının süper iletkenlerde ortadan kalkması anlamına gelmektedir. Elektriksel davranış açısından süper iletkenler, normal iletkenlerden ve yarı iletkenlerden farklı bir karakter sergiler (Boylestad ve Nashelsky, 2013).

Elektrik akımının iletimi sırasında oluşan ısı kayıplarının ortadan kalkması, süper iletkenlerin yüksek verimlilik gerektiren sistemlerde tercih edilmesini sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle enerji iletim hatları ve yüksek akım gerektiren uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Süper iletkenlerin elektriksel davranışı, dış koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

3.2. Sıcaklığın Etkisi

Süper iletkenlik olgusu, sıcaklık ile doğrudan ilişkilidir. Malzemeler, belirli bir sıcaklık değerinin altına soğutulduklarında süper iletkenlik özelliği göstermeye başlarlar. Bu sıcaklık değeri, her malzeme için farklıdır ve süper iletkenliğin ortaya çıkabilmesi için temel bir koşul olarak kabul edilir.

Sıcaklığın artmasıyla birlikte, malzeme içindeki atomların titreşimleri artar ve bu durum süper iletkenlik durumunun bozulmasına neden olur. Bu nedenle süper iletken sistemlerde sıcaklık kontrolü büyük önem taşır. Uygulamalarda genellikle özel soğutma sistemleri kullanılarak gerekli çalışma koşulları sağlanmaktadır.

3.3. Akımın Etkisi

Süper iletken malzemeler, belirli bir sınır değere kadar elektrik akımını kayıpsız olarak iletebilirler. Bu sınır değerinin aşılması durumunda, malzeme süper iletkenlik özelliğini kaybederek normal iletken davranışına geçer. Bu durum, süper iletkenlerin kullanımında dikkat edilmesi gereken önemli bir faktördür.

Yüksek akım değerleri, malzeme içerisinde yerel ısınmalara ve yapısal bozulmalara neden olabilir. Bu nedenle süper iletken sistemler tasarlanırken, akım sınırları göz önünde bulundurulmalı ve güvenli çalışma aralıkları belirlenmelidir.

3.4. Manyetik Alanın Etkisi

Süper iletkenler, manyetik alanlara karşı özel bir davranış sergiler. Belirli bir manyetik alan şiddetinin altında süper iletkenlik korunurken, bu sınırın aşılması durumunda süper iletkenlik ortadan kalkar. Bu özellik, süper ilet-

kenlerin manyetik alanla olan etkileşimini önemli hâle getirmektedir.

Manyetik alanın süper iletken üzerindeki etkisi, uygulama alanlarına göre farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Güçlü manyetik alanların üretildiği sistemlerde süper iletkenlerin kullanılması, yüksek performans ve kararlılık sağlamaktadır. Ancak bu tür uygulamalarda manyetik alan kontrolü büyük bir dikkat gerektirir.

4.SÜPER İLETKENLİK OLAYLARI

4.1. Manyetik Alanın Dışlanması

Süper iletken malzemeler, süper iletkenlik durumuna geçtiklerinde iç bölgelerinde manyetik alan bulunmasına izin vermezler. Bu durum, süper iletkenliğin ayırt edici özelliklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Manyetik alanın malzeme içerisinden dışlanması, süper iletkenin manyetik özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir olgudur.

Manyetik alanın dışlanması olayı, süper iletkenlerin klasik iletkenlerden ve manyetik malzemelerden farklı davranış sergilemesine neden olur. Bu özellik sayesinde süper iletkenler, manyetik alanlara karşı kararlı bir yapı oluşturur. Manyetik alan çizgileri, süper iletken malzemenin dış yüzeyinden dolaşarak iç bölgeye nüfuz etmez.

4.2. Manyetik Yükselme Olayı

Manyetik alanın dışlanması özelliği, süper iletkenlerde manyetik yükselme olayının ortaya çıkmasına neden olur. Bu olayda, bir mıknatıs süper iletken bir malzeme üzerinde askıda kalabilir veya süper iletken, manyetik alan içerisinde dengeli bir şekilde yükselmiş olarak durabilir.

Manyetik yükselme olayı, süper iletkenlerin manyetik alanlarla olan etkileşimini görsel ve deneysel olarak ortaya koyan önemli bir örnektir. Bu özellik, sürtünmenin ortadan kaldırıldığı sistemlerin tasarlanmasına imkân sağlamaktadır. Ulaşım teknolojilerinde kullanılan ileri sistemler, bu prensibe dayalı olarak geliştirilmektedir.

4.3. Süper İletkenliğin Kaybolması

Süper iletkenlik durumu, belirli çalışma koşulları altında korunabilir. Bu koşulların dışına çıkılması durumunda, malzeme süper iletkenlik özelliğini kaybederek normal iletken davranışına geri döner. Bu geçiş süreci, süper iletken sistemlerin güvenli ve kararlı çalışması açısından büyük önem taşır.

Süper iletkenliğin kaybolmasına; sıcaklığın artması, akımın yükselmesi veya manyetik alanın belirli bir seviyenin üzerine çıkması neden olabilir. Bu nedenle süper iletken uygulamalarda çalışma koşulları dikkatle izlenmeli ve kontrol altında tutulmalıdır.

5. SÜPER İLETKEN MALZEME TÜRLERİ

5.1. Saf Metaller

Bazı saf metaller, düşük sıcaklıklara soğutulduklarında süper iletkenlik özelliği gösterebilmektedir. Bu tür malzemeler genellikle basit kristal yapıya sahiptir ve süper iletkenlik davranışları net sınırlar içerisinde gözlemlenir. Saf metallerde süper iletkenlik, çoğunlukla çok düşük sıcaklıklarda ortaya çıktığı için uygulama alanları sınırlı kalmaktadır.

Saf metal süper iletkenler, temel süper iletkenlik çalışmalarında ve laboratuvar ortamlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu malzemeler, süper iletkenliğin temel prensiplerinin anlaşılmasına katkı sağlamış ve süper iletkenlik teorilerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır.

5.2. Alaşımlar

Alaşımlar, iki veya daha fazla elementin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bazı alaşımlar, saf metallere kıyasla daha kararlı süper iletkenlik özellikleri sergileyebilmektedir. Bu durum, alaşımların teknolojik uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır.

Alaşım süper iletkenler, mekanik dayanım ve manyetik alanlara karşı direnç açısından avantajlar sunar. Bu özellikleri sayesinde enerji sistemleri ve endüstriyel uygulamalarda daha geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Alaşımların süper iletkenlik davranışı, bileşim oranlarına ve üretim yöntemlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

5.3. Seramik Tabanlı Malzemeler

Seramik tabanlı süper iletkenler, daha yüksek sıcaklıklarda süper iletkenlik gösterebilen malzemeler arasında yer almaktadır. Bu özellikleri, soğutma gereksinimlerini azaltarak uygulama maliyetlerini düşürmektedir. Seramik yapıları olmaları nedeniyle kırılgan bir yapıya sahip olsalar da, sağladıkları avantajlar nedeniyle büyük ilgi görmektedirler.

Bu tür malzemeler, enerji iletimi, manyetik sistemler ve ileri teknoloji uygulamalarında kullanılmaktadır. Seramik tabanlı süper iletkenlerin geliştirilmesi, süper iletken teknolojisinin yaygınlaşmasında önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

6. ÇALIŞMA KOŞULLARI VE ORTAMLAR

6.1. Düşük Sıcaklık Ortamları

Süper iletkenlik olgusunun ortaya çıkabilmesi için malzemelerin belirli sıcaklık değerlerinin altına soğutulması gerekmektedir. Bu nedenle süper iletken sistemler, düşük sıcaklık ortamlarında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Düşük sıcaklıkların sağlanması, süper iletkenliğin sürekliliği açısından temel bir gerekliliktir.

Bu amaçla uygulamalarda özel soğutma ortamları ve yalıtım sistemleri kullanılmaktadır. Düşük sıcaklık ortamlarının kararlı bir şekilde korunması, süper iletkenin performansını ve güvenliğini doğrudan etkilemektedir.

6.2. Soğutma Yöntemleri

Süper iletken sistemlerde gerekli düşük sıcaklıkların elde edilmesi için çeşitli soğutma yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler, sistemin büyüklüğüne, kullanım amacına ve çalışma süresine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Soğutma sistemleri, süper iletkenliğin sürdürülebilmesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir.

Soğutma yöntemlerinin etkinliği, sistemin enerji tüketimi ve işletme maliyetleri üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle süper iletken uygulamalarda uygun soğutma yönteminin seçilmesi büyük önem taşımaktadır.

6.3. Çevresel Etkiler

Süper iletkenlerin çalışma performansı, yalnızca sıcaklıkla değil, aynı zamanda çevresel etkenlerle de yakından ilişkilidir. Titreşimler, mekanik zorlanmalar ve dış manyetik etkiler, süper iletkenliğin kararlılığını olumsuz yönde etkileyebilir.

Bu nedenle süper iletken sistemler, çevresel etkilere karşı korumalı ortamlarda çalıştırılmalıdır. Uygun yalıtım ve koruma önlemleri, sistemin uzun süreli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

7. KULLANIM ALANLARI

Süper iletkenler; tıbbi görüntüleme sistemleri, enerji iletim hatları, ulaşım teknolojileri ve bilimsel araştırma altyapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Güçlü ve kararlı manyetik alan üretimi ile kayıpsız enerji iletimi, bu uygulamaların temelini oluşturmaktadır (Sedra ve Smith, 2016).

7.1. Tıp Alanındaki Uygulamalar

Süper iletkenler, tıp alanında kullanılan ileri teknoloji cihazlarının temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Özellikle hassas ölçüm ve görüntüleme gerektiren sistemlerde süper iletkenlerin sağladığı yüksek performans büyük avantajlar sunmaktadır. Bu cihazlarda elde edilen güçlü ve kararlı manyetik alanlar, tanı süreçlerinin doğruluğunu artırmaktadır.

Tıbbi uygulamalarda süper iletkenlerin kullanılması, daha net görüntüler elde edilmesini ve ölçüm hassasiyetinin yükseltilmesini sağlamaktadır. Bu durum, erken teşhis ve tedavi süreçlerine önemli katkılar sunmaktadır.

7.2. Ulaşım Sistemleri

Ulaşım teknolojilerinde süper iletkenlerin kullanımı, sürtünmenin en aza indirildiği sistemlerin geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Bu sayede

daha yüksek hızlara ulaşılabilmekte ve enerji verimliliği artırılmaktadır. Süper iletken temelli ulaşım sistemleri, modern taşımacılık anlayışında önemli bir yer edinmektedir.

Bu tür sistemlerde süper iletkenlerin manyetik özelliklerinden yararlanılarak kararlı ve güvenli hareket sağlanmaktadır. Ulaşım alanındaki bu uygulamalar, geleceğin şehir içi ve şehirler arası taşımacılık çözümleri arasında değerlendirilmektedir.

7.3. Enerji Sistemleri

Enerji alanında süper iletkenlerin kullanımı, iletim kayıplarının azaltılması açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır. Elektrik enerjisinin daha verimli bir şekilde taşınabilmesi, enerji kaynaklarının etkin kullanımına katkı sağlamaktadır. Süper iletken teknolojileri, enerji sistemlerinde güvenilirlik ve performans artışı sağlamaktadır. Bu durum, enerji altyapılarının modernizasyonu ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesi açısından önem arz etmektedir.

7.4. Endüstriyel Uygulamalar

Süper iletken teknolojilerinin endüstriyel alanlarda kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle enerji, ulaşım ve savunma sanayii gibi alanlarda süper iletken temelli sistemlerin yaygınlaşması beklenmektedir. Bu durum, teknolojik rekabet gücünü artıran önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda süper iletkenlerin kullanımı, yüksek verimlilik ve performans sağlamaktadır. Üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve sistem güvenilirliğinin artırılması, bu teknolojilerin tercih edilme nedenleri arasında yer almaktadır.

7.5. Bilimsel Araştırmalar

Süper iletkenler, bilimsel araştırmalarda kullanılan yüksek hassasiyetli deney sistemlerinin vazgeçilmez unsurları arasında yer almaktadır. Güçlü manyetik alanlar ve kayıpsız akım iletimi, ileri düzey araştırmaların gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu alandaki uygulamalar, temel bilimlerin gelişimine katkı sağlamakta ve yeni teknolojilerin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Süper iletkenler, bilimsel ilerlemenin önemli araçlarından biri olarak değerlendirilmektedir.

8. Yeni Malzeme Çalışmaları

Süper iletkenlik alanında yapılan güncel araştırmalar, daha yüksek sıcaklıklarda süper iletkenlik gösterebilen yeni malzemelerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmalar, süper iletken teknolojilerinin daha geniş uygulama alanlarına yayılmasını mümkün kılmayı amaçlamaktadır. Yeni mal-

zeme araştırmaları, hem teorik hem de deneysel çalışmalarla desteklenmekte ve malzeme bilimi alanındaki gelişmelerle birlikte ilerlemektedir. Bu sayede süper iletkenlerin üretim süreçleri iyileştirilmekte ve daha kararlı sistemler geliştirilmektedir.

9. SONUÇ

Elektronik ve elektrik teknolojilerinin gelişimiyle birlikte önemi giderek artan süper iletkenler, sahip oldukları fiziksel özellikler ve sundukları teknolojik avantajlar bakımından incelenmiştir. Çalışmada, süper iletkenliğin temel kavramları, fiziksel davranışları ve uygulama alanları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Öncelikle süper iletkenliğin tanımı ve tarihsel gelişimi ele alınarak, bu olgunun bilim dünyasındaki yeri ortaya konulmuştur. Süper iletkenlerin klasik iletken ve yarı iletkenlerden ayrılan yönleri, özellikle enerji kayıplarının ortadan kalkması ve manyetik alanlarla olan özgün etkileşimleri üzerinden açıklanmıştır. Bu özelliklerin, modern elektronik sistemlerin performansını artırmada neden kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır. Çalışmanın devamında, süper iletkenlerin fiziksel özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiş; elektriksel davranış, sıcaklık, akım ve manyetik alanın süper iletkenlik üzerindeki etkileri açıklanmıştır. Bu bölümde ele alınan konular, süper iletkenliğin belirli çalışma koşullarına bağlı olduğunu ve bu koşulların dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Süper iletkenlik olaylarının anlaşılması, bu teknolojilerin güvenli ve verimli şekilde kullanılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca süper iletkenlik olayları başlığı altında, manyetik alanın dışlanması ve manyetik yükselme gibi karakteristik davranışlar ele alınmış, bu olguların pratik uygulamalarındaki yansımaları değerlendirilmiştir. Bu özelliklerin, sürtünmesiz hareket ve güçlü manyetik alan üretimi gibi ileri mühendislik çözümlerine nasıl imkân sağladığı açıklanmıştır. Süper iletkenliğin belirli sınırlar aşıldığında ortadan kalkabilmesi ise sistem tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir unsur olarak ele alınmıştır. Malzeme türleri ve çalışma koşullarına ilişkin bölümlerde, süper iletken teknolojilerinin yalnızca teorik bilgiye değil, aynı zamanda uygun ortam ve altyapıya ihtiyaç duyduğu ortaya konulmuştur. Soğutma yöntemleri ve çevresel etkenlerin kontrolü, süper iletken sistemlerin sürdürülebilirliği açısından temel gereklilikler arasında yer almaktadır. Bu durum, süper iletken uygulamalarının disiplinler arası bir yaklaşım gerektirdiğini göstermektedir. Son olarak, süper iletkenlerin tıp, ulaşım, enerji ve bilimsel araştırmalar gibi farklı alanlardaki kullanım örnekleri incelenmiş; bu teknolojilerin günümüz ve gelecek mühendislik çözümlerindeki yeri değerlendirilmiştir. Geleceğe yönelik bölümde ise yeni malzeme çalışmaları ve teknolojik gelişmelerin, süper iletkenlerin daha yaygın ve erişilebilir hâle gelmesini sağlayacağı öngörülmüştür.

KAYNAKÇA

- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2013). *Electronic Devices and Circuit Theory*. Pearson.
- Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics*. Wiley.
- Poole, C. P., Farach, H. A., & Creswick, R. J. (2010). *Superconductivity*. Academic Press.
- Reznik, A. (2008). *Modern Physics for Scientists and Engineers*. Wiley.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2016). *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press.
- Tinkham, M. (2004). *Introduction to Superconductivity*. McGraw-Hill.



İNCE FİLM ÜRETİMİNDE KATKI MADDELERİNİN KARAKTERİSTİK VE FONKSİYONEL ÖZELLİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

“ ”

Enes Nayman¹

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, OR-
CID: 0000-0002-3656-3126

1. Giriş

Nanometre ile mikrometre aralığındaki kalınlıklara sahip olan ve çeşitli altlık malzemeler üzerine kaplanabilen ince filmler ve üzerlerine kaplandıkları altlıklardan bağımsız fonksiyonel karakteristikler sergileyen malzemelerdir. Elektronik, optik, enerji, sensör ve koruyucu kaplama teknolojileri gibi birçok ileri uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu filmlerin fonksiyonel anlamdaki performanslarını, büyük ölçüde sahip oldukları elektriksel, optik, mekanik ve kimyasal özelliklerle belirlenmektedir. Bu özellikler ise yalnızca temel malzemenin yapısına bağlı olmayıp, filmlerin morfolojik yapısı, kristalografik düzeni, stokiyometrik bileşimi ve en önemlisi kontrollü olarak eklenen katkı maddeleri ile hassas bir şekilde tasarlanabilmekte ve modifiye edilebilmektedir. Dolayısıyla ince film teknolojisi, özellikle nanomalzeme bilimi ve yüzey mühendisliği disiplinlerinde, istenen işlevselliğe göre akıllı yüzeylerin üretilmesine olanak tanıyan dinamik bir geliştirme olanakları sunmaktadır (Amudhavalli, Mariappan, Prasath, & Jayaprakash, 2024; Park et al., 2024; Razykov et al., 2025; Shim et al., 2025).

Katkılama işlemi, bir malzemenin kristal veya amorf yapısına kontrollü ve çoğunlukla eser miktarlarda yabancı atomların ilave edilmesi sürecini ifade eder. Bu işlem, malzemenin doğal halinde bulunmayan veya daha az olan özelliklerini daha etkin olacak bir biçimde değiştirme, geliştirme ve hatta tamamen yeni fonksiyonlar kazandırma potansiyeli taşımaktadır. İnce film üretim süreçlerinde katkılama, malzemenin nihai davranışını ve uygulama alanını belirleyen en stratejik ve güçlü parametrelerden biri haline gelmiştir. Kullanım alanlarına ve ince filmlerden beklenen özelliklere göre katkı maddelerinin seçimi belirlenir ve kullanılacağı fonksiyonel özelliklerde en ideal oran belirlenecek şekilde katkılama gerçekleştirilir (Gozukizil, Nayman, Temel, & Gokmen, 2024; Gu et al., 2025).

İnce film biriktirmedeki asıl olay, üzerine biriktirme işlemi uygulanacak altlıklardan bağımsız ama o yüzeye tutunmayı ve orada istenilen yapıyı sağlayacak ince film koordinasyonun oluşmasıdır. Aynı şekilde fonksiyonel özellikleri geliştirmek istenen ince film malzemelerin yapılacak katkılama işleminde de ince filminden her ne kadar farklı bir malzeme kullanılsa da hem fiziksel hem de kimyasal anlamda bir bütünlük oluşturabilmelidir. Tabi bunlar çok farklı parametrelerden de etkilenmektedir. Bu katkılama amacının genelleştirilmesi malzemelerin spesifik uygulama ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde film özelliklerini mühendislik prensipleri ile iyileştirmek ve tasarlamaktır. Yani örnek olarak katkılama ile elektriksel özelliklerin kontrolü sağlanabilmekte; örneğin yarıiletken teknolojisinde n-tipi veya p-tipi iletkenlik oluşturularak yonga elemanları elde edilebilmekte veya şeffaf iletken oksit filmlerinde indiyum kalay oksit veya alüminyum katkılı çinko oksit gibi malzemelerde optik geçirgenlik korunurken elektriksel direnç önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Optik özellikler açısından bakıldığında ise, katkılar bant aralığını daraltabilir

veya genişletebilir, kırılma indisini modüle edebilir ve soğurma spektrumunu değiştirebilir. Bu durum, fotovoltaiik hücrelerin verimliliğinin artırılmasından, ışık yayan diyotların ve optik filtrelerin performansının iyileştirilmesine kadar geniş bir alanda kritik öneme sahiptir. Mekanik ve yapısal kararlılık bağlamında katkı maddeleri, filmlerin iç gerilimlerini düzenleyebilir, tane sınırlarını güçlendirebilir, sertlik ve aşınma direncini artırabilir, böylece kaplamaların hizmet ömrünü ve güvenilirliğini önemli ölçüde uzatabilir. Ayrıca, kimyasal ve fonksiyonel duyarlılığın geliştirilmesinde, özellikle gaz sensörü uygulamalarında, katkı maddeleri adsorpsiyon kinetiğini hızlandırarak, tepkime aktivasyon enerjisini düşürerek ve seçici reaksiyon siteleri oluşturarak cihazların duyarlılığını, seçiciliğini ve kararlılığını artırmaktadır. Bunun yanı sıra katkı atomları kristal yapıyı, tane boyutunu, yönlenmeyi ve yüzey morfolojisini doğrudan kontrol etme imkânı sağlamaktadır. Bütün bu katkılama işlemlerinde en önemli faktörlerden bir tanesi de katkılama oranlarıdır. Bu oran her zaman arttıkça olumlu sonuç vermemekle beraber optimal oranı bulmakta uygulama verimlilikleri açısından gereklidir (Awasthi et al., 2025; Jayaseelan, Mani, & Eswaran, 2025; Shahriari & Raeisi, 2025; Sultanov et al., 2024).

İnce filmlerde biriktirme ve katkılama işlemleri çok kapsamlı bir araştırma konu olmakla birlikte bu bölümde, katkılamanın yapısal özelliklere etkisi, elektriksel-optik performansa etkisi, fotokatalitik-antbakteriyel performansa etkisi, uygulama alanları ve performans ilişkisi başlıkları altında değerlendirmeler yapılmıştır. Bu katkıların biriktirme süreci üzerindeki etkilerinin yanı sıra, ortaya çıkan filmin mikro-yapısal, morfolojik, kristalografik ve kimyasal bileşimsel karakteristiklerine olan belirleyici etkisinin analizi olacaktır. Daha sonra, bu mikro-yapısal değişimlerin, filmin makro ölçekteki fonksiyonel performansına, yani elektriksel iletkenlik, dielektrik sabiti, optik şeffaflık ve bant aralığı, mekanik sertlik ve adezyon, kimyasal inertlik ve korozyon direnci ile algılama ve katalitik aktivite gibi özellikler üzerindeki sistematik etkileri literatürdeki güncel çalışmalar ışığında ele alınmıştır.

2. Katkılamanın Yapısal ve Mikroyapısal Özelliklere Etkisi

Katkı maddelerinin ince filmlerin fonksiyonel performansı üzerindeki etkileri, doğrudan ve kaçınılmaz olarak, bu maddelerin filmin temel yapısal ve mikroyapısal düzenine yaptığı değişiklikler üzerinden şekillenir. Katkılama işlemi, yalnızca kimyasal bir katkıdan ibaret olmayıp, malzemenin kristalografik mimarisini, tane sınırı ağını, kusur konsantrasyonunu ve morfolojik bütünlüğünü yeniden düzenleyen etkisi yüksek bir müdahaledir.

Kristal yapı üzerindeki etki, öncelikle örgü parametresinde gözlemlenen değişimlerle kendini gösterir. Ana matris atomundan farklı bir atomik yarıçapa sahip olan katkı atomları, yer aldıkları kristal örgüde yerel bir distorsiyona neden olur. Bu distorsiyon, örgü sabitinde ölçülebilir bir genişlemeye veya büzölmeye yol açar. Bir metal oksit matrisine daha küçük yarıçaplı atomların

katılması, örgüde hafif bir büzölmeye sebep olurken, daha büyük yarıçaplı atomların katılması örgüyü genişletebilir. X-ışını kırınımı ile tespit edilen bu pik kaymaları, katkının çözünürlüğünün ve gerilim durumunun dolaylı bir göstergesidir. Belirli katkılar ve konsantrasyonlar, filmlerin termodinamik olarak kararlı kristal fazını değıştirebilir. Titanyum dioksit gibi polimorfik malzemelerde, nitrojen veya karbon katkısının, rutilden anatasa veya brookite fazına geçiş sıcaklıklarını önemli ölçüde değıştirdiğı ve böylece oda sıcaklığında normalde meta-kararlı olan bir fazın hâkim hale gelmesini sağladığı bilinmektedir (Allen, Mahdjoub, Vishnyakov, Kelly, & Kriek, 2018; Eddy et al., 2023).

Katkı maddeleri tane boyutunu ve şeklini doğrudan etkiler. Katkı atomları tane sınırlarında toplanır. Bu toplanma, sınırların hareketini engeller. Bu sayede çok küçük taneli, sıkı bir yapı elde edilir ve mekanik dayanımı artırır. Küçük tane boyutu, daha çok tane sınırı demektir. Gaz sensörlerinde bu bir avantajdır. Çünkü daha fazla yüzey alanı, daha fazla tutunma ve reaksiyon demektir. Ancak bu durum elektriksel iletkenlik için sorun olabilir. Tane sınırları elektronların yolunu keser. Elektronların hareketi yavaşlar. Bu da iletkenliği azaltır (Gong, Hu, Wang, Ong, & Zhu, 2006; Jain, Pant, & Lakshmikumar, 2006).

Katkılamanın film mikroyapısındaki bir diğer kritik etkisi, boşluk (gözenek) ve kusur yapısı üzerinedir. Katkı atomları, biriktirme sırasındaki yüzey difüzyonunu değıştirerek film yoğunluğunu doğrudan etkiler. Bazı katkılar, atomların yüzeydeki hareketliliğini artırarak daha iyi paketlenme ve dolayısıyla daha az boşluklu, yoğun filmlerin oluşumunu teşvik eder. Buna karşılık, hızlı segregе olan veya büyük gerilim alanları oluşturan katkılar, kümelenmeye ve gözenekli bir yapıya yol açabilir. Kusur kimyası açısından bakıldığında ise katkılar, filmlerdeki noktasal kusurların (boşluklar, ara yüzey atomları) türünü ve konsantrasyonunu belirleyici rol oynar. Örneğın, çınko oksite alüminyum katkısı, oksijen boşlukları ve çınko ara yüzeyleri gibi doğal kusurların konsantrasyonunu değıştirir. Bu katkı, serbest elektron kaynağı olarak davranan oksijen boşluklarının sayısını artırarak n-tipi iletkenliği güçlendirebilir. Benzer şekilde, p-tipi iletkenlik için bakır oksite katılan lityum, bakır boşlukları oluşumunu teşvik eder. Katkı maddeleri, ayrıca dislokasyon gibi çizgisel kusurların oluşumunu da etkileyebilir. Örgü parametresi uyumsuzluğu yüksek olan katkılar, ara yüzeyde yüksek dislokasyon yoğunluğuna neden olarak filmin mekanik davranışını ve elektron taşınımını etkiler (Baek, Choi, & Park, 2024; Ratz et al., 2025).

3. Katkılamanın Elektriksel ve Optik Performansa Etkisi

Katkı maddelerinin en belirgin ve teknolojik açıdan en önemli etkileri, ince filmlerin genellikle elektriksel ve optik performans özelliklerinde ortaya çıkar. Bu etkiler, katkı atomlarının malzemenin elektronik yapısına doğrudan

müdahalesinin bir sonucudur ve iletkenlikten optik şeffaflığa kadar uzanan geniş bir özellik yelpazesini kökten dönüştürür.

Elektriksel performanstaki değişim, öncelikle taşıyıcı türü ve konsantrasyonunun modifikasyonu ile başlar. Katkılama, malzemenin Fermi seviyesini kaydırarak, iletim veya değerlik bandı yakınında yeni elektronik durumlar meydana getirir. N-tipi katkılar, genellikle iletim bandının hemen altına donör seviyeleri yerleştirir. Bu seviyelerden termal aktivasyonla kolayca serbest kalan elektronlar, taşıyıcı konsantrasyonunu bazen katkısız haline kıyasla birkaç kat artırabilir. Benzer şekilde, p-tipi katkılar ise değerlik bandının hemen üzerinde akseptör seviyeleri oluşturur, bu seviyeler komşu bağlardan elektron kabul ederek pozitif yük taşıyıcısı (hole) oluşturur ve böylece hole konsantrasyonunu artırır. Elektriksel iletkenlik sadece taşıyıcı sayısına değil, aynı zamanda taşıyıcı hareketliliğine de bağlıdır. Katkı atomları, iyonize olduklarında saçılma merkezleri olarak davranabilir ve hareketliliği düşürebilir. Bu nedenle, optimum elektriksel performans genellikle yüksek taşıyıcı konsantrasyonu ile düşük saçılmayı dengeleyen bir katkı seviyesinde elde edilir. Hall etkisi ölçümleri, bu iki parametrenin ayrı ayrı ve doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayarak katkılamanın etkinliğini nicel olarak değerlendirmenin temel aracıdır (Mukanova et al., 2020; Suja, Bashar, Morshed, & Liu, 2015; Yang et al., 2023).

Optik özellikler üzerindeki etki ise, katkılarının malzemenin bant yapısı ve elektron geçiş olasılıkları üzerindeki etkisiyle şekillenir. En belirgin değişikliklerden biri, optik bant aralığındaki kaymadır. Katkı atomları, örgü distorsiyonu ve artan taşıyıcı-karşılıklı etkileşimler (Burstein-Moss etkisi gibi) yoluyla etkin bant aralığını değiştirebilir. Örneğin, yüksek konsantrasyonda n-tipi katkılanmış yarıiletkenlerde, iletim bandının alt kısmı elektronlarla doldurulur ve daha yüksek enerjili durumlara olan geçişler gözlemlenmeye başlar. Bu durum, soğurma spektrumunun maviye kayması (artış) olarak ölçülen bir bant aralığı genişlemesine neden olur. Tersine, bazı katkılar iletim ve değerlik bantları arasında ara seviyeler oluşturarak, daha düşük enerjili fotonların soğurulmasına izin verir ve bu da bant aralığının görünürde daralmasına yol açar. Bu mekanizma, fotokatalizör veya güneş pili malzemelerinin güneş spektrumundan daha fazla foton yakalamasını sağlamak için bilinçli olarak kullanılır (Esmaili, 2016; Manser & Kamat, 2014; Milot et al., 2018).

Optik geçirgenlik ve soğurma özellikleri de katkılama işlemlerinden fazlasıyla etkilenir. İdeal bir şeffaf iletken oksit, görünür bölgede yüksek geçirgenlik ile birlikte kızılötesi bölgede yansıtıcılık sergilemelidir. Katkı maddeleri, serbest taşıyıcı konsantrasyonunu artırarak, plazma frekansını modüle eder ve malzemenin kızılötesi davranışını belirler. Doğru konsantrasyonda, katkı görünür ışığı etkilemeden elektriksel iletkenliği optimize edebilir. Ancak, aşırı katkılama veya uyumsuzluklar, ışık saçılımına neden olabilir. Örneğin, tane sınırlarında veya matris içinde segregasyon olan katkı fazları, ışığı saçarak filmin şeffaflığını ve netliğini düşürebilir. Ayrıca, katkı iyonlarının kendine özgü

elektron konfigürasyonları, belirli dalga boylarında seçici soğurmaya neden olabilir. Nadir toprak elementleri, karakteristik keskin soğurma ve emisyon çizgileriyle bilinir. Bu özellikleri sayesinde optik filtreler veya dönüştürücü fosfor malzemeleri olarak kullanılırlar. UV-Vis-NIR spektroskopisi ile elde edilen soğurma eğrileri ve Tauc plot analizleri, katkılamanın bu optik parametreler üzerindeki nicel ve nitel etkilerini ortaya koyar.

4. Katkılamanın Fotokatalitik ve Antibakteriyel Performansa Etkisi

Katkı maddelerinin ince filmler üzerindeki etkileri, elektronik ve optik alanları aşarak, malzemelerin kimyasal reaktivite ve biyolojik etkileşim gibi fonksiyonel performanslarını da kökten değiştirebilir. Özellikle fotokatalitik aktivite ve antibakteriyel özellikler, çevre temizliği, sağlık ve hijyen uygulamaları bağlamında büyük önem taşımaktadır. Bu iki alanda yapılan kontrollü katkılamar stratejik olarak yapıldığında güzel neticeler ortaya çıkarmaktadır (Srinivasa, Mahesh, Srinivas, & Angadi, 2024).

Fotokatalitik performans, bir malzemenin ışık enerjisini absorbe ederek, yüzeyinde yüksek enerjili serbest radikaller (hidroksil radikali gibi) üretme ve bu sayede organik kirleticilerin bozunmasını veya bakterilerin inaktivasyonunu katalizleme yeteneğidir. Bu süreç, temelde yarıiletken bir malzemenin bant aralığından daha yüksek enerjili bir fotonu soğurması ve bir elektronun değerlik bandından iletim bandına uyarılmasıyla başlar. Bu uyarım, bir elektron-boşluk çifti oluşturur. Katkı maddeleri, bu temel sürecin verimliliğini birkaç kritik mekanizma üzerinden artırabilir veya yönlendirebilir. İlk olarak, katkılar malzemenin optik bant aralığını daraltarak, daha uzun dalga boylu (örneğin görünür bölge) ve güneş spektrumunda daha bol bulunan ışığı kullanabilmesini sağlar. Örneğin, titanyum dioksit gibi yalnızca UV ışınlarına duyarlı olan bir fotokatalizöre nitrojen, karbon veya kükürt gibi ametallerin katılması, değerlik bandının üst kısmını yukarı kaydırarak etkin bant aralığını daraltır ve görünür ışığa duyarlılık kazandırır. İkinci olarak, katkı atomları, iletim veya değerlik bantları içinde elektron tutucu veya boşluk yakalayıcı ara seviyeler oluşturarak, fotoya uyarılmış elektron-boşluk çiftlerinin yeniden birleşme oranını baskılar. Yeniden birleşmenin azalması, bu yük taşıyıcılarının yüzeye ulaşarak su veya oksijen molekülleri ile reaksiyona girme ve son derece reaktif radikaller oluşturma olasılığını artırır. Metalik katkılar (platin, gümüş, paladyum) genellikle elektron tutucu görevi görürken, bazı metal oksit katkıları boşluk yakalayıcı olarak işlev görebilir. Üçüncü bir etki, yüzey kimyası ve morfolojisi üzerinedir. Katkılar, filmin spesifik yüzey alanını artırarak, gözenekli bir yapı veya daha küçük tane boyutu oluşumunu teşvik edebilir, böylece reaktif yüzey sahasını ve kirletici adsorpsiyon kapasitesini çoğaltır (Haque, Blanchard, Laipply, & Dong, 2024; Sarma & Saikia, 2024; Shaikh, Kumbhar, & Kumbhar, 2025; Zhan et al., 2025).

Antibakteriyel performans ise, katkılanmış ince filmlerin bakteri hücre-

leri üzerinde öldürücü veya büyümeyi inhibe edici bir etki göstermesidir. Bu performans genellikle iki ana mekanizma ile sağlanır. Bunlar temas bazlı (pasif) antibakteriyel aktivite ve fotokatalizle tetiklenen (aktif) antibakteriyel aktivitedir. Katkı maddeleri, her iki mekanizmanın etkinliğini de güçlendirebilir. Temas bazlı aktivitede en bilinen örnek, gümüş katkısıdır. Gümüş iyonları, gümüş katkılı filmlerden kontrollü bir şekilde salınabilir veya yüzeyde bulunan gümüş nanopartikülleri ile doğrudan temas edebilir. Bu gümüş iyonları, bakteri hücre duvarına nüfuz ederek, temel enzim sistemlerini bozar, proteinleri denatüre eder ve DNA replikasyonunu engeller. Fotokatalizle tetiklenen aktif mekanizmada ise, yukarıda açıklanan süreçle üretilen reaktif oksijen türleri (ROS) ana etkindir. Katkılanarak görünür ışığa duyarlı hale getirilmiş bir fotokatalitik film, ortam ışığı altında dahi yüzeyinde sürekli bir ROS üretimi sağlayabilir. Bu yüksek enerjili radikaller, bakteri hücre zarındaki lipitleri peroksideder, hücre duvarının yapısal bütünlüğünü bozar ve içsel bileşenlere geri dönüşü olmayan hasar verir. Bu mekanizma, fiziksel temas gerektirmeden geniş bir yüzey alanında sürekli ve kendini yenileyen bir dezenfeksiyon sağlar. Katkı maddelerinin seçimi, hangi mekanizmanın öne çıkarılacağını belirler. Örneğin, gümüş katkısı hem iyon salınımı hem de fotokatalitik süreçlerde elektron tutucu olarak çift etkili bir rol oynayabilir (Nicolae-Maranciuc & Chicea, 2025; Ponomarev et al., 2023; Rai & Dhar, 2025; Tsendzughul & Ogwu, 2019).

Fotokatalitik ve antibakteriyel performans, katkılanmış ince filmlerin gelişmiş fonksiyonlarına önemli örnekler teşkil eder. Katkı maddeleri, yalnızca bu aktivitelerin varlığını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda aktivasyon spektrumunu genişletir, kuantum verimliliğini artırır ve etki mekanizmasını çeşitlendirir. Burada da yapısal özelliklerle (tane boyutu, yüzey alanı) elektronik özelliklerin (bant yapısı, ara seviyeler) yakın etkileşimi belirleyicidir. Su arıtımı, kendi kendini temizleyen yüzeyler, tıbbi implant kaplamaları veya hijyenik donanımlar gibi uygulamalar için, katkı tipi, konsantrasyonu ve dağılımının bu iki performans metriği üzerindeki sistematik etkisinin anlaşılması, etkin ve uzun ömürlü malzeme çözümlerinin geliştirilmesinin temelini oluşturur.

5. Uygulama Alanları ve Performans İlişkisi

Katkılanmış ince filmlerin yapısal, elektriksel, optik ve kimyasal özelliklerinde gözlemlenen kontrollü değişimleri, bu malzemelerin pratik teknolojilerdeki performansını doğrudan etkilediği yukarıdaki bölümlerde de açıklanmıştır. Katkılama, malzemeyi sadece geliştirmekle kalmaz, onu belirli bir uygulamanın zorlu gereksinimlerine uyacak şekilde tasarlanmış bir bileşene dönüştürür. Güneş pilleri, transistörler ve sensörler, bu tasarım ilişkisini net bir şekilde gösteren önemli uygulama alanlarıdır.

Güneş pili teknolojisinde katkılama, fotovoltaiik dönüşüm verimliliğini artırmak için birkaç kritik katkı sağlar. İlk olarak, şeffaf ön elektrot olarak kullanılan iletken oksit filmlerinde (örneğin, alüminyum katkılı çinko oksit

- AZO veya flor katkılı kalay oksit - FTO), katkı maddeleri görünür bölgedeki yüksek optik geçirgenliği korurken, elektriksel direnci minimize eder. Düşük özdirenç, seri direnç kayıplarını azaltarak dolum faktörünü iyileştirir. Aktif katman olarak kullanılan yarıiletken filmlerde (örneğin, kadmiyum tellür veya bakır indiyum galyum selenit - CIGS) ise katkılama, taşıyıcı konsantrasyonunu ve yaşam süresini optimize eder. Daha spesifik olarak, p-tipi CIGS katmanına sodyum katkısı, tane büyümesini iyileştirir, kristal kaliteyi artırır ve oluşan akseptör seviyeleri ile hole konsantrasyonunu yükselterek, p-n eklemelinin kalitesini ve dolayısıyla açık devre voltajını artırır. Ayrıca, perovskit veya ince film silisyum güneş pillerinde bant aralığını ince ayarlamak için kullanılan elementler, güneş spektrumu ile malzemenin soğurma profilini daha iyi eşleştirerek kısa devre akımını yükseltir (Alfaifi, Alzahrani, Moustafa, & Hameed, 2025; Bancu, Ion, Antohe, & Scarisoreanu, 2025; Sivasankar, Amorim, & Cunha, 2025).

İnce film transistörler (TFT'ler), katkılamanın yarıiletken kanal malzemesinin elektronik özellikleri üzerindeki etkisine son derece bağlıdır. TFT performansı, taşıyıcı hareketliliği, açma/kapama akım oranı ve eşik voltajı kararlılığı gibi parametrelerle ölçülür. Kanal malzemesi olarak kullanılan metal oksit yarıiletkenlerde (örneğin, indiyum galyum çinko oksit - IGZO), katkılama ile bu özellikler hassas bir şekilde kontrol edilebilir. İndiyum, iletkenliği artırırken, galyum bant aralığını genişleterek sızıntı akımlarını azaltır ve açma/kapama oranını iyileştirir. Çinko ise amorf fazın kararlılığını sağlar. Bu kontrollü katkı kombinasyonu, yüksek hareketlilik, düşük sızıntı akımı ve optik şeffaflık sağlayarak, yüksek çözünürlüklü ve düşük güç tüketimli aktif matrisli ekranların temelini oluşturur. Ayrıca, eşik voltajının kayması gibi kararlılık sorunları, kanal malzemesine uygun pasifleştirici katkılar eklenerek hafifletilebilir (Bao et al., 2025; Lee et al., 2025).

Kimyasal sensör uygulamalarında, özellikle gaz sensörlerinde, katkılama performansı belirleyici bir rol oynar. Duyarlılık, seçicilik, yanıt süresi ve çalışma sıcaklığı gibi kritik parametreler, katkı maddeleri ile optimize edilir. Metal oksit gaz sensörlerinde (örneğin, kalay dioksit), katkılar birkaç mekanizma ile etki eder. Katalitik katkılar hedef gaz molekülünün yüzeyde ayrışmasını veya oksidasyonunu kolaylaştırarak duyarlılığı ve yanıt hızını artırır. Yapısal katkılar ise tane boyutunu küçülterek ve film gözenekliliğini kontrol ederek, reaksiyon için daha büyük spesifik yüzey alanı sağlar. Elektronik katkılar ise temel metal oksidin taşıyıcı konsantrasyonunu değiştirerek, gaz adsorpsiyonu sonucu oluşan direnç değişiminin (sinyalin) büyüklüğünü modüle eder. Bu şekilde, belirli bir gaza karşı özelleştirilmiş yüksek performanslı sensörler geliştirilebilir. Ayrıca, daha düşük çalışma sıcaklıklarına izin vererek cihazın güç tüketimi ve uzun vadeli kararlılığı da iyileştirilebilir (Haddad et al., 2025; Kim et al., 2025; S, P, J, & S, 2025).

Katkılamanın sağladığı özellik değişimleri ile spesifik uygulama performansı arasında doğrudan bir nedensellik bağı bulunur. Güneş pillerinde verimlilik, transistörlerde hız ve kararlılık, sensörlerde ise duyarlılık ve seçicilik, katkı maddesinin türü, konsantrasyonu ve dağılımı tarafından yönlendirilen malzeme parametrelerinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, katkılama süreçleri, modern elektronik, enerji ve algılama teknolojilerinin ilerlemesinde, temel malzeme bilimi ile nihai cihaz performansı arasında kritik bir köprü işlevi görür.

6. Sonuç

Katkılama, ince filmlerin özelliklerini atomik seviyeden başlayarak tasarlamayı sağlayan güçlü bir araçtır. Bu işlem, sadece kimyasal bileşimi değil, filmin büyüme sürecini, yapısını ve elektronik davranışını da doğrudan kontrol eder. N-tipi ve p-tipi katkıların stratejik kullanımı ile iletkenlik, optik bant aralığı, mekanik dayanım ve kimyasal reaktivite gibi özellikler hedeflenen uygulamalara göre iyileştirilebilir. Bu durum, şeffaf iletkenlerde, güneş pillerinde, sensörlerde ve fotokatalizörlerde somut performans artışları sağlar.

Ancak, alanda çözülmesi gereken zorluklar vardır. Katkıların filme homojen dağılması ve uzun süre kararlı kalması önemli bir sorundur. Ayrıca her zaman olmasa da bazen katkılama işlemi ile bir spesifik bir özellikte iyileştirme yaşanırken başka bir özellikte bu kazanım olmayıp daha da olumsuz bir sonuç alınabilmektedir. Örneğin, iletkenliği artırmak optik şeffaflığı düşürebilir. Bu sebeple katkılama ile kazandırılacak özellikler belirlenirken bu dağılımlardaki kazanımların iyi paylaşılması gerekmektedir. Endüstriyel ölçekte üretim ve maliyet de pratik engeller oluşturmaktadır.

Gelecek araştırmalar bu zorluklara odaklanmalıdır. İleri karakterizasyon ve bilgisayarlı modelleme birlikte kullanılarak katkı etkileri daha iyi anlaşılabilir. Birden fazla katkının birlikte kullanılması daha dengeli özellikler sağlayabilir. Ayrıca, nadir ve toksik elementlere bağımlılığı azaltan sürdürülebilir katkılama stratejileri geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, katkılanmış ince filmler alanı büyük bir potansiyele sahiptir. Gelecekte, daha kontrollü, öngörülebilir ve çevre dostu tasarımlarla enerji, elektronik ve sağlık teknolojilerinde önemli gelişmelerin önü açılacaktır.

Kaynakça

- Alfaifi, A. H., Alzahrani, H. S., Moustafa, S. H., & Hameed, T. A. (2025). Fabrication of Al-doped CIGS solar cell: The thickness-dependence of compositional, structural, optical, and photovoltaic properties. *Materials Science and Engineering: B*, 322, 118598. doi:10.1016/J.MSEB.2025.118598
- Allen, N. S., Mahdjoub, N., Vishnyakov, V., Kelly, P. J., & Kriek, R. J. (2018). The effect of crystalline phase (anatase, brookite and rutile) and size on the photocatalytic activity of calcined polymorphic titanium dioxide (TiO₂). *Polymer Degradation and Stability*, 150, 31–36. doi:10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2018.02.008
- Amudhavalli, B., Mariappan, R., Prasath, M., & Jayaprakash, R. N. (2024). Fabrication and characterization of thin film CdO nanoparticles for gas sensing applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2024 35:8, 35(8), 547-. doi:10.1007/S10854-024-12240-0
- Awasthi, R. R., Mishra, V. K., Tripathi, P. K., Mishra, L., Verma, T., Nand, P., ... Vikram, K. (2025). Formation of pure and Sn-doped ZnO thin films via sol-gel spin coating technique: a study on structural, topographical, and sensing properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(28), 1832-. doi:10.1007/S10854-025-15786-9/TABLES/2
- Baek, S., Choi, J. G., & Park, S. (2024). Alkali Metal Doping on Sol-Gel-Derived Copper Oxide for Performance Enhancement of Thin-Film Transistors. *IEEE Journal on Flexible Electronics*, 3(6), 228–233. doi:10.1109/JFLEX.2024.3407687
- Bancu, E. I., Ion, V., Antohe, S., & Scarisoreanu, N. D. (2025). Towards AZO Thin Films for Electronic and Optoelectronic Large-Scale Applications. *Crystals* 2025, Vol. 15, Page 670, 15(8), 670. doi:10.3390/CRYST15080670
- Bao, B., Xie, J., Xia, T., Liu, J., He, B., He, G., & Wang, S. (2025). Amorphous IGZO Thin-film Transistors: Materials, Device Structures, Fabrications, and Application Explorations. *Advanced Functional Materials*, 35(41), 2503755. doi:10.1002/ADFM.202503755;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:16163028;WGROUP:STRING:PUBLICATION
- Eddy, D. R., Permana, M. D., Sakti, L. K., Sheha, G. A. N., Solihudin, G. A. N., Hidayat, S., ... Rahayu, I. (2023). Heterophase Polymorph of TiO₂ (Anatase, Rutile, Brookite, TiO₂ (B)) for Efficient Photocatalyst: Fabrication and Activity. *Nanomaterials* 2023, Vol. 13, Page 704, 13(4), 704. doi:10.3390/NANO13040704
- Esmaili, A. (2016). Many-body, Pauli blocking and carrier-impurity interaction effects on the band gap of aluminum doped zinc oxide thin films: A new method to evaluate both hole and electron effective masses of degenerate semiconductors. *Current Applied Physics*, 16(9), 949–955. doi:10.1016/J.CAP.2016.05.008
- Gong, H., Hu, J. Q., Wang, J. H., Ong, C. H., & Zhu, F. R. (2006). Nano-crystalline Cu-doped ZnO thin film gas sensor for CO. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 115(1), 247–251. doi:10.1016/J.SNB.2005.09.008
- Gozukizil, M. F., Nayman, E., Temel, S., & Gokmen, F. O. (2024). Photovoltaic perfor-

- mance in CIGS solar cells: effects of using Mg- and Al-doped ZnO thin-film layers as alternative TCO and front contact layer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35(30), 1–9. doi:10.1007/S10854-024-13717-8/METRICS
- Gu, H., Wu, W., Zhou, X., Zhang, P., Fu, B., Zhai, J., ... Song, Z. (2025). Flexible Memory Application of Nanoscale Ti–Ge–Te Thin Film as Information Storage Medium With Excellent Thermal Stability, Low Resistance Drift and Superior Bending Characteristic. *Advanced Science*, 12(40), e07859. doi:10.1002/ADVS.202507859;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Haddad, N., Mahdhi, H., Ihzaz, N., Ghribi, F., Tălu, & Ben Ayadi, Z. (2025). Structural, optical, and electrical properties of antimony-doped SnO₂ nanoparticles and RF-sputtered thin films. *Ceramics International*, 51(26), 51505–51515. doi:10.1016/J.CERAMINT.2025.08.374
- Haque, F., Blanchard, A., Laipply, B., & Dong, X. (2024). Visible-Light-Activated TiO₂-Based Photocatalysts for the Inactivation of Pathogenic Bacteria. *Catalysts* 2024, Vol. 14, Page 855, 14(12), 855. doi:10.3390/CATAL14120855
- Jain, K., Pant, R. P., & Lakshmikummar, S. T. (2006). Effect of Ni doping on thick film SnO₂ gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(2), 823–829. doi:10.1016/J.SNB.2005.03.104
- Jayaseelan, V., Mani, N., & Eswaran, S. K. (2025). Enhanced Electrical Transport and Thermoelectric Performance of Nanostructured Al-Doped ZnO Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition. *Vacuum*, 115033. doi:10.1016/J.VACUUM.2025.115033
- Kim, Y. W., Yang, B., To, D. T. H., Mendoza, E. R., Lee, K. H., Myung, N. V., & Liu, Y. (2025). Improved selectivity toward methanol detection via Pd-functionalized tungsten trioxide nanofiber gas sensors. *Chemical Engineering Journal*, 523, 168814. doi:10.1016/J.CEJ.2025.168814
- Lee, K. M., Kim, N., Lee, J. K., Lee, H. J., Kim, S. Y., & Kim, T. G. (2025). Mesh-patterned IZO/Hf-doped IGZO thin film transistors with high mobility and mechanical stability for flexible display. *Applied Surface Science*, 686, 162102. doi:10.1016/J.APSUSC.2024.162102
- Manser, J. S., & Kamat, P. V. (2014). Band filling with free charge carriers in organometal halide perovskites. *Nature Photonics* 2014 8:9, 8(9), 737–743. doi:10.1038/nphoton.2014.171
- Milot, R. L., Klug, M. T., Davies, C. L., Wang, Z., Kraus, H., Snaith, H. J., ... Herz, L. M. (2018). The Effects of Doping Density and Temperature on the Optoelectronic Properties of Formamidinium Tin Triiodide Thin Films. *Advanced Materials*, 30(44), 1804506. doi:10.1002/ADMA.201804506;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:15214095;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Mukanova, A., Serikkazyeva, A., Nurpeissova, A., Kim, S. S., Myronov, M., & Bakevov, Z. (2020). Understanding the effect of p-, n-type dopants and vinyl carbonate electrolyte additive on electrochemical performance of Si thin film anodes

- for lithium-ion battery. *Electrochimica Acta*, 330, 135179. doi:10.1016/J.ELECTACTA.2019.135179
- Nicolae-Maranciuc, A., & Chicea, D. (2025). Polymeric Systems as Hydrogels and Membranes Containing Silver Nanoparticles for Biomedical and Food Applications: Recent Approaches and Perspectives. *Gels* 2025, Vol. 11, Page 699, 11(9), 699. doi:10.3390/GELS11090699
- Park, J., Cho, Y. J., Chegal, W., Lee, J., Jang, Y. S., & Jin, J. (2024). A Review of Thin-film Thickness Measurements using Optical Methods. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 25(8), 1725–1737. doi:10.1007/S12541-024-00955-3/TABLES/1
- Ponomarev, V. A., Sheveyko, A. N., Kuptsov, K. A., Sukhanova, E. V., Popov, Z. I., Permyakova, E. S., ... Shtansky, D. V. (2023). X-ray and UV Irradiation-Induced Reactive Oxygen Species Mediated Antibacterial Activity in Fe and Pt Nanoparticle-Decorated Si-Doped TiCaCON Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(44), 50940–50952. doi:10.1021/ACSAMI.3C13242
- Rai, R., & Dhar, P. (2025). Advanced Application of Recycled Textile Generated from Waste in Military Application Using Nanotechnology. *Nanotechnology-Assisted Recycling of Textile Waste: Sustainable Tools for Textiles*, 403–434. doi:10.1002/9781394175017.CH14;CSUBTYPE:STRING:EDITED
- Ratz, T., Fourneau, E., Sliti, N., Malherbe, C., Baret, A., Vertruyen, B., ... Nguyen, N. D. (2025). Correlation between Material Properties, Crystalline Transitions, and Point Defects in RF Sputtered (N,Mg)-Doped Copper Oxide Thin Films. *ACS Applied Electronic Materials*, 7(2), 643–651. doi:10.1021/ACSAELM.4C01396
- Razykov, T. M., Kouchkarov, K. M., Ergashev, B. A., Khurramov, R. R., Isakov, D. Z., & Tivanov, M. S. (2025). Structural, morphological, optical, and electrical properties of Sb_xSe_y films with different compositions grown by Chemical-molecular beam deposition method from Separate Sb and Se precursors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2025 36:35, 36(35), 2254-. doi:10.1007/S10854-025-16307-4
- S, D., P, A., J, J., & S, P. (2025). Room-temperature detection of harmful gases: a comprehensive review of metal oxide nanostructured chemiresistive sensors. *Journal of Nanoparticle Research* 2025 27:9, 27(9), 242-. doi:10.1007/S11051-025-06428-6
- Sarma, N., & Saikia, P. (2024). Thin Film Approach for Scalable Production of Hydrogen through Photocatalysis. *ACS Symposium Series*, 1467, 165–183. doi:10.1021/BK-2024-1467.CH008
- Shahriari, E., & Raeisi, M. (2025). Structural and optical nonlinearity of ZnO:Ni thin films via chemical spray pyrolysis: Role of defects and doping concentration. *Journal of Alloys and Compounds*, 1040, 183513. doi:10.1016/J.JALLCOM.2025.183513
- Shaikh, S., Kumbhar, S., & Kumbhar, D. (2025). SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF DIFFERENT PHOTOCATALYTIC MATERIALS. doi:10.5281/

zenodo.17279703

- Shim, K. Y., Kang, S., Ahn, M. J., Cha, Y., Ham, E. G., Kim, D., & Byun, D. (2025). Crystallographic Engineering of CrN Buffer Layers for GaN Thin Film Epitaxy. *Materials* 2025, Vol. 18, Page 1817, 18(8), 1817. doi:10.3390/MA18081817
- Sivasankar, S. M., Amorim, C. de O., & Cunha, A. F. da. (2025). Progress in Thin-Film Photovoltaics: A Review of Key Strategies to Enhance the Efficiency of CIGS, CdTe, and CZTSSe Solar Cells. *Journal of Composites Science* 2025, Vol. 9, Page 143, 9(3), 143. doi:10.3390/JCS9030143
- Srinivasa, N. V., Mahesh, H. M., Srinivas, C., & Angadi, B. (2024). Effect of Gd doping on structural, morphological, optical, photocatalytic, and antibacterial properties of NiO thin films. *Optical Materials*, 157, 116073. doi:10.1016/J.OPT-MAT.2024.116073
- Suja, M., Bashar, S. B., Morshed, M. M., & Liu, J. (2015). Realization of Cu-Doped p-Type ZnO Thin Films by Molecular Beam Epitaxy. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(16), 8894–8899. doi:10.1021/ACSAMI.5B01564
- Sultanov, A., Zhirkov, I., Nussupov, K., Kusainova, A., Abdyldayeva, N., & Beisenkhanov, N. (2024). Investigation on optical and electrical properties of multilayer ITO/AZO/ITO transparent conductive oxides. *Optical Materials*, 155, 115850. doi:10.1016/J.OPTMAT.2024.115850
- Tsendzughul, N. T., & Ogwu, A. A. (2019). Physicochemical Aspects of the Mechanisms of Rapid Antimicrobial Contact-Killing by Sputtered Silver Oxide Thin Films under Visible Light. *ACS Omega*, 4(16), 16847–16859. doi:10.1021/ACS-OMEGA.9B01856
- Yang, R., Wang, F., Lu, J., Lu, Y., Lu, B., Li, S., & Ye, Z. (2023). ZnO with p-Type Doping: Recent Approaches and Applications. *ACS Applied Electronic Materials*, 5(8), 4014–4034. doi:10.1021/ACSAELM.3C00515
- Zhan, F., Qi, J., Li, R., Zhao, H., Liu, Y., & La, P. (2025). Synthesis, photocatalytic applications and future prospects of noble metal-modified semiconductors fabricated via photodeposition. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 27(26), 13770–13792. doi:10.1039/D5CP01191D



İZNİK ÇİNİ BULUNTULARININ MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

“ ”

Hale YILDIZAY¹

Alpagut KARA²

1 Hale YILDIZAY(GÜNDÜZ), Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Güzel Sanatlar Meslek Yüksek Okulu, Çini sanatı ve Tasarımı Bölümü, Evliya Çelebi Yerleşkesi, 43100 Kütahya, TÜRKİYE

hale.yildizay@dpu.edu.tr, Orcid no: 0000-0002-3896-9912

2 Danışman: Prof. Dr., Alpagut KARA, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, İki Eylül Kampüsü, Eskişehir TÜRKİYE, alpagut.kara@sabanciuniv.edu, Orcid no: 0000-0003-0257-406X

(Yüksek Lisans Tezinden Düzenlenmiştir.) Yer Bilgisi: Anadolu Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Seramik mühendisliği ABD Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 10530240 Referans Nolu Tez.

Eski adıyla “Nicea” olarak bilinen İznik, Osmanlı dönemi Türk çini sanatı ve seramiği ile özdeşleşmiş bir isimdir. M.Ö. IV. yüzyıldan bu yana tarihi gelişimi izlenebilen yerleşim yeri, Marmara denizinin güney kısmında yer alan İznik, aynı isimdeki gölün kıyısında bulunan surlarla çevrili Bursa’nın ilinin bir ilçesidir.

Anadolu’nun ilk Türk başkenti olduktan sonra tekrar Bizans egemenliğine girmiş olan İznik, Orhan Gazi tarafından 1331 yılında tekrar fethedilerek önemli bir Osmanlı şehri konumuna geçmiştir (Akbağıl, vd., 2004). İlk kazı çalışmaları İznik’te 1963-1969 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ara verilen çalışmalar 1981’de tekrar başlatılarak kazılardan elde edilen seramik buluntularda Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı kültürlerinin etkilerine rastlanmıştır. (Aslanapa & Altun, 1998).

İznik çinilerinin üretimine yaklaşık olarak XIII. yüzyılın başlarında başlanmış ve XVII. ortalarında Osmanlı imparatorluğunun siyasal istikrarsızlığına paralel olarak tamamen durmuştur. Türk sanatı ve tarihinde yaklaşık olarak dört yüzyıl süren çini üretiminin Türk sanatında çok önemli bir yeri vardır. Kazı araştırmalarına göre XIV. yüzyılda Ortadoğu pazarını elinde tutan Çin’in etkileriyle, Çin porselenlerine özgü desenler İznik’te 1400’lü yıllar dolaylarında kullanılmaya başlanmıştır (Atasoy, N. & Raby, J. 1994).

14. yüzyılın Anadolu çinileri, “Milet işi” olarak adlandırılan ilk devir Osmanlı seramikleridir. Plastikliği yüksek çömlekçi işi kırmızı bünye ile yapılan bu çiniler hep kalın kenarlı olarak üretilmişlerdir. Kırmızı bünyenin üzeri beyaz astarla kaplanmıştır. Bu çinilerin sadece içinin tamamen, dışının ise yarıya kadar astarla kaplanıp fırınladığı ve daha sonra motiflerinin çizilip boyanarak sırlanmış olduğu görülmektedir (Aslanapa,1984; Aslanapa, 1965).

Bu yüzyılda desenler fırça darbeleriyle, hatları ince bir şekilde çizilerek veya sgraffito (kazıma) tekniğiyle işlenmiştir. Motiflerde bitkisel, radyal hatlı ve geometrik süslemeler görülmektedir. Kase yapımında merkezdeki bir rozetten dağılan, fırça darbeleriyle desenlendirilmiş, yelpaze yapraklı işlemlere rastlanmaktadır. Renkli ve renksiz sır altında yer alan çeşitli tiplerdeki bu işlemlerde bitkisel ve geometrik desenlere ender olarak da kuş motiflerine rastlanmaktadır (Aslanapa, 1965).

Bu yüzyılda 13.yüzyıla göre yaygın olarak polikrom (çok renkli) boya ların uygulandığı görülmektedir. En karakteristik renkler kobalt mavisi, koyu mor ve firuzedir. Ayrıca yeşil ve siyah renge de rastlanmaktadır. Renk açısından zengin olan bu çiniler irili ufaklı, geniş ağızlı, kısa daire ayaklı çanaklar şeklinde üretilmiştir. Ortaya çıkarılan buluntularda nadir olarak vazo ve sürahi tarzındaki formlara da rastlanmıştır (Şahin, 1989).

Yapılan bu çalışmada XIV. yüzyıl sonları ve XV. yüzyılın başına ait olduğu düşünülen çini buluntuları 9 adet İznik çini buluntusunun üretiminde

kullanılan bünye ve sır karakteristikleri hakkında modern karakterizasyon teknikleri kullanarak kapsamlı bilgi edinilmiştir.

MALZEME ve YÖNTEM

Bu çalışmada İznik gölü ve çevresinden toplanan ve XIV. yüzyıl sonları ve XV. yüzyılın başına ait olduğu düşünülen 9 adet İznik çini buluntusunun incelemesi yapılmıştır. Üretiminde kullanılan bünye ve sır karakteristikleri hakkında detaylı bir çalışma yapılmış ve uygun araştırma yöntemleriyle buluntulardan elde edilen temsili numunelerin mikroyapısal analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bununla birlikte çalışan enerji saçılımlı X-Işınları Spektrometresi (EDX) ile mikrokimyasal analizleri yapılmıştır. Ayrıca, X-ışınları difraksiyonu (XRD) yöntemiyle numunelerin faz analizleri yapılmıştır.

Kullanılan malzemeler

Çalışmada kullanılan ve XIV. yüzyıl sonları ve XV. yüzyılın başına ait olduğu düşünülen buluntuların ön ve arka yüz görüntüleri Şekil 1 ve 2'de yer almaktadır.



Şekil 1. Numunelere ait ön yüz görüntüsü



Şekil 2. Numunelere ait arka yüz görüntüsü

Bu çini buluntularının bünyeleri kırmızı renkte olup 5 tanesinde sgraffito tekniği (kazıma tekniği) kullanıldığı görülmektedir. Çalışmadaki çini buluntularının 8 adetinin bünyesi kırmızı renkte sadece 1 adetinin bünye rengi pembemsi bir renktedir.

1 ve 2 numaralı buluntular yanmış bir görünüme sahip, ön yüzleri sarı ve yeşil tonlarında sırlanmış ve Sgraffito (kazıma) tekniğiyle desenlendirilmiştir. Arka yüzleri yarıya kadar sırlanmış olan bu buluntular 4,5 mm kalınlığındadır.

3 numaralı buluntu yüzeyi beyaz bir astarla kaplıdır. Buluntunun ön yüzü mavi ve siyah tonlarının kullanılarak desenlendirildiği görülmektedir. Bu buluntu 5 mm kalınlığındadır.

4 numaralı buluntunun ön ve arka yüzü kremi bir astarla kaplanmıştır. Ön yüzde açık ve koyu kahverengi çizgilerle desenlendirilen bu numunenin yüzeyi sırsız gibidir. İncelemelerde buluntunun azda olsa sıra sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3). Bu buluntu yaklaşık 5 mm kalınlıktadır.

5 numaralı buluntunun ön yüzü gri arka yüzü kırmızı renktedir. Bünyede herhangi bir astar veya sır tabakası yoktur. Bünye bu iki farklı rengi muhtemelen pişirim sıcaklığından dolayı almıştır. Bu buluntunun kalınlığı yaklaşık 4 mm'dir.

6 numaralı buluntunun arka ve ön yüzünde yeşil renkli sır kullanılmıştır. Bu buluntu sgraffito tekniğiyle desenlendirilmiştir. Bu bünyenin rengi pembemsidir. Yaklaşık 3 mm kalınlığındadır.

7 numaralı buluntunun arka ve ön yüzünde yeşil renkli sır kullanılmıştır. Bu buluntu sgraffito (kazıma) tekniği uygulanmış ve kazınan bölge içerisine siyah renk uygulanmıştır. Bu buluntu 2,5 mm kalınlığındadır.

8 numaralı buluntunun ön yüzünde koyu arka yüzünde de daha açık renkli yeşil bir sıran uygulandığı görülmektedir. Açık renkli yüzey üzerine desenin kazılarak işlendiği görülmektedir. Bu buluntu yaklaşık 2 mm kalınlığındadır.

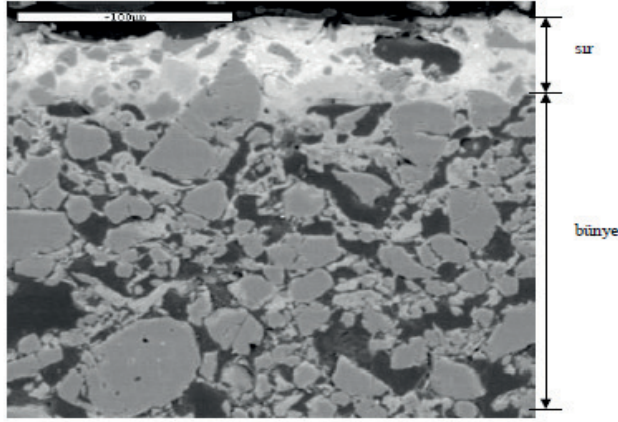
9 numaralı buluntunun ön yüzünde koyu ve açık kahverengi renklerin kullanıldığı bir sır uygulaması görülmektedir. Sgraffito (kazıma) tekniğine bu buluntuda da rastlanmıştır. Buluntu yaklaşık 2 mm kalınlığındadır.

Numune hazırlama

Bu çalışmada XIV. yüzyıl sonları ve XV. yüzyılın başına ait olduğu düşünülen çini buluntuları laboratuvarında elmas diskli kesme cihazıyla sulu olarak kesilerek daha sonra vakum sızdırma yöntemiyle kalıplanmış, uygun aşındırma ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuş ve daha sonra taramalı elektron mikroskobunda incelemeye hazır hale getirilmişlerdir.

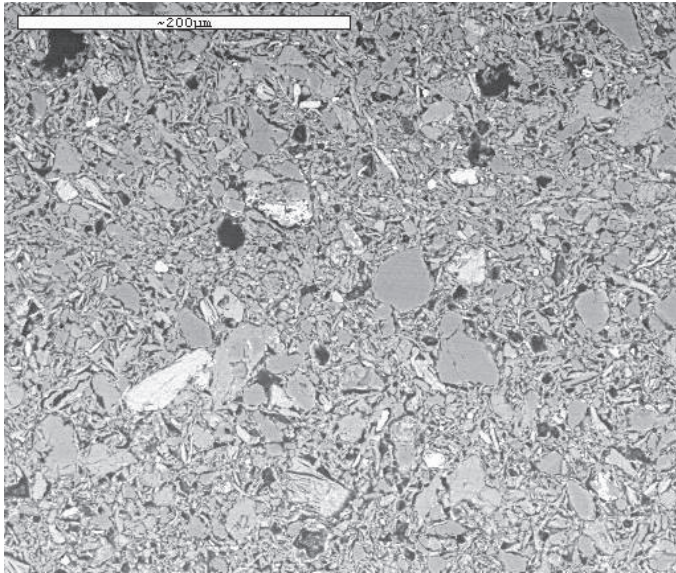
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Hazırlanan numunelere ait sır-bünye ara yüzeylerinin mikroyapısal karakterizasyon Zeiss Evo 50EP serisi bir Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM çalışması öncesi numuneler elektriksel iletkenlik sağlamak amacıyla altın kaplama cihazında (Agar Scientific Ltd., UK) kaplanmışlardır. Bu nedenle sonuçlar bölümünde verilen niteleyici EDX spektrumlarında mevcut altın (Au) ve paladyum (Pd) pikleri kaplamadan kaynaklandığı için ihmal edilmelidir. Sır ve bünye arasındaki farklılıkların daha belirgin görülebilmesi için görüntüler geri saçınımlı elektron modunda alınmıştır. Kantitatif kimyasal analizler SEM'e bağlı "Oxford Instruments" firmasına ait AXS model EDX (Enerji Saçılımlı X-Işınları Spektrometrisi) ile gerçekleştirilmiştir.



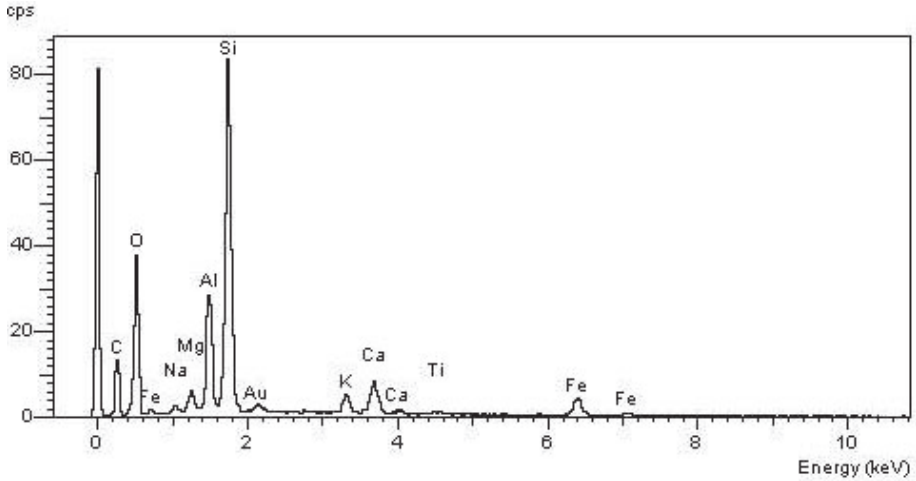
Şekil 3. 4 numaralı buluntunun Sır-astar ara kesitine ait temsili BE görüntüsü (x500)

Bu gruptaki buluntuların genel bünyelerinden SEM ile elde edilen geri saçınımlı elektron görüntülerine bakıldığında mikroyapılarının birbirine çok benzediği ve porozitelerinin yüksek olmadığı tespit edilmiştir. Kuvars tanelerinin birçoğunun çok iyi ergimemiş olduğu ve keskin köşelerinin bulunduğu bu grupta da görülmektedir. Bu gözlem pişirim sıcaklığının düşük olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir (Şekil 4).



Şekil 4. 1 numaralı buluntunun genel bünyesine ait temsili BE görüntüsü (x300)

Plastik olmayan bünye elemanlarını (ağırlıkça kuvars) bağlayan frit bu dönemde kalsiyumludur. Bu yüzden bünye içerisinde yapılan kalitatif EDX (elementel) analizleri değerlendirildiğinde bu gruptaki bünyelerin kimyasal karakterlerinin birbirine çok yakın ve kalsiyum (Ca) açısından zengin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5). Bu buluntuların bünyelerini temsil eden kantitatif analiz Çizelge 1’de verilmektedir.

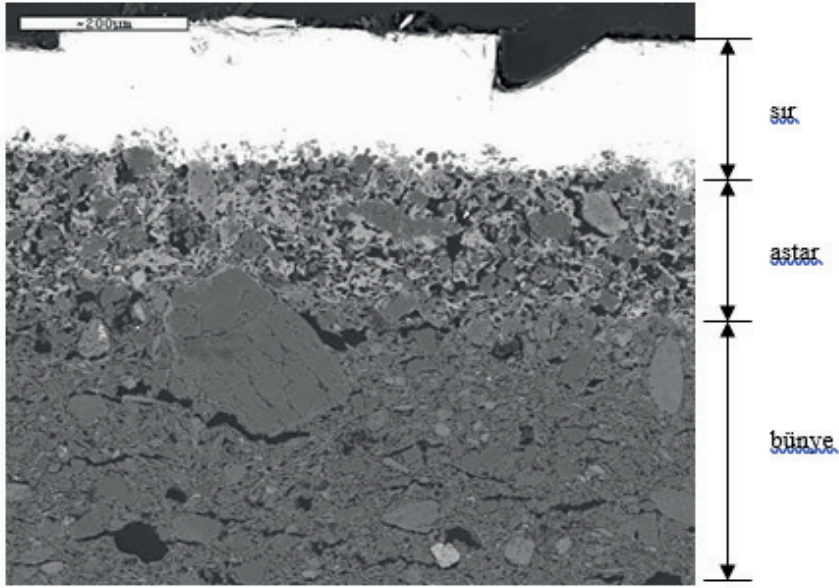


Şekil 5. 1 numaralı buluntunun genel bünyesinden alınan temsili kalitatif EDX analizi

Çizelge 1. 2 numaralı buluntunun genel bünyesine ait kantitatif analiz

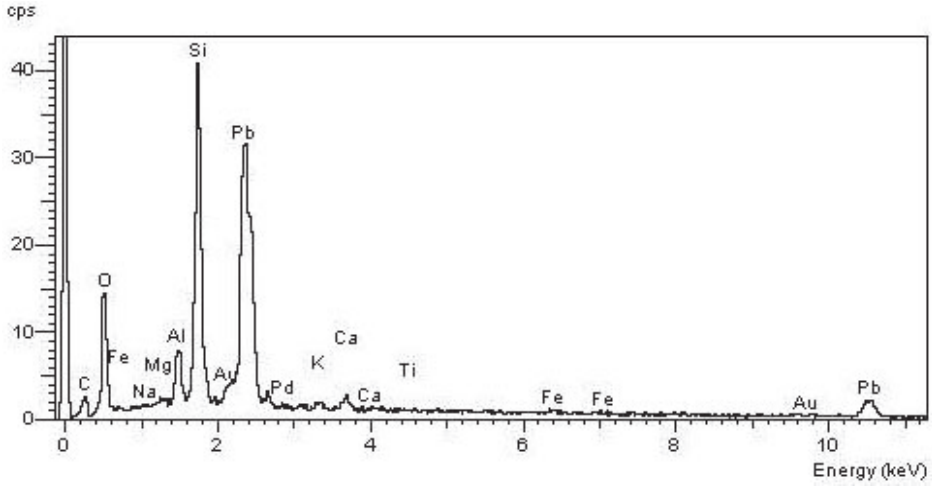
Na ₂ O	1.51
MgO	3.5
Al ₂ O ₃	15,6
SiO ₂	61.51
K ₂ O	2.71
CaO	7.43
TiO ₂	0.80
Fe ₂ O ₃	6.94

Bu gruptaki buluntulardan 5 numaralı buluntunun sırsız olduğu görülmüştür. Sırlı numunelerden alınan sır-bünye ara kesitine bakıldığında genelde bünye ile sır arasına astar tabakasının uygulandığı görülmektedir. Engob (astar) bünyeye göre daha homojen bir yapıya sahip içerdiği kuvars taneleri daha ince ve gözenekliliği de daha azdır (Şekil 6).



Şekil 6. 2 numaralı buluntunun genel bünye-sır-astar ara kesitine ait temsili bir BE görüntüsü (x150)

Sırlı bünyelerdeki sırlardan alınan EDX analizlerine bakıldığında yüksek miktarda kurşun mevcudiyeti görülmektedir (Şekil 7).



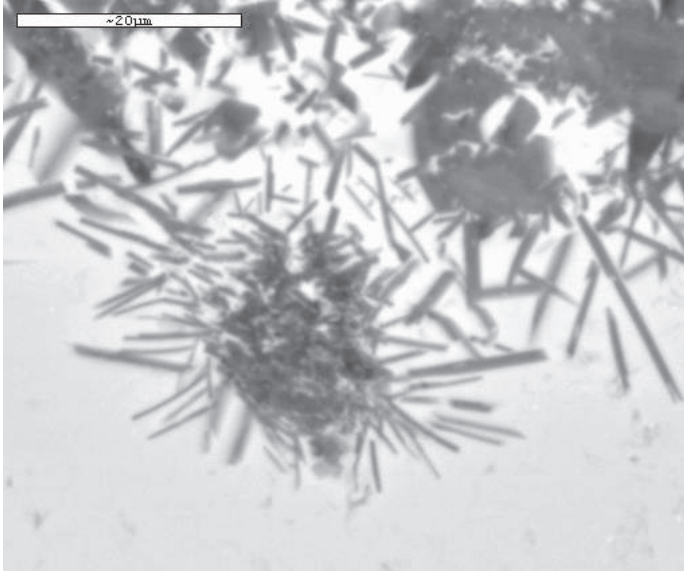
Şekil 7. 2 numaralı buluntunun sırandan alınan temsili kalitatif EDX analizi

Bu buluntuların sırlarını temsil eden kantitatif analiz Çizelge 2’de verilmektedir.

Çizelge 2. 2 numaralı buluntunun sırına ait kantitatif analiz

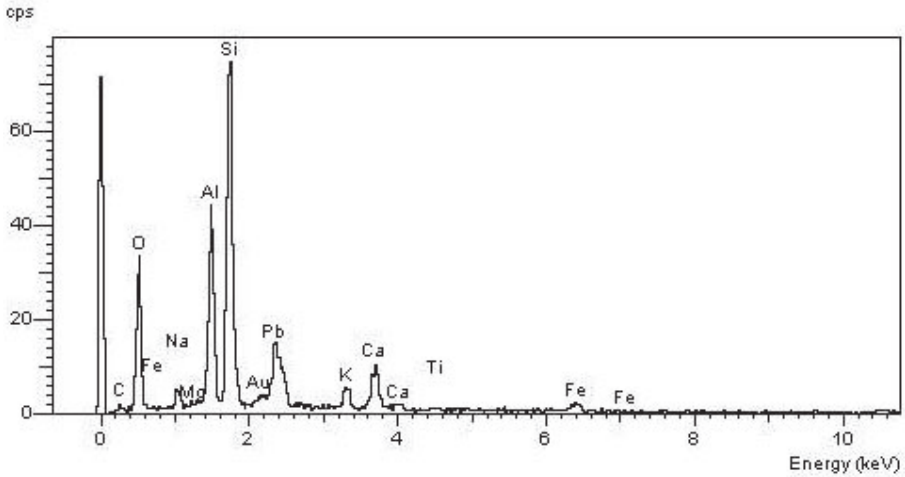
Na ₂ O	0.49
MgO	0.84
Al ₂ O ₃	4.52
SiO ₂	34.77
KO ₂	0.76
CaO	2.00
TiO ₂	0.05
Fe ₂ O ₃	1.05
PbO	55.53

Buluntulardaki (1, 2, 6, 8) numaralı numunelerin sır-astar-bünye ara kesitine bakıldığında sırın içerisinde kristal oluşumu gözlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. 1 numaralı buluntunun sırandan alınan temsili BE görüntüsü (x1250)

Bu kristaller çubuksu bir yapıya sahip olup yapılan nokta EDX analizlerinden kristallerin Ca, Al ve Si elementlerini içerdiği görülmektedir (Şekil 9).

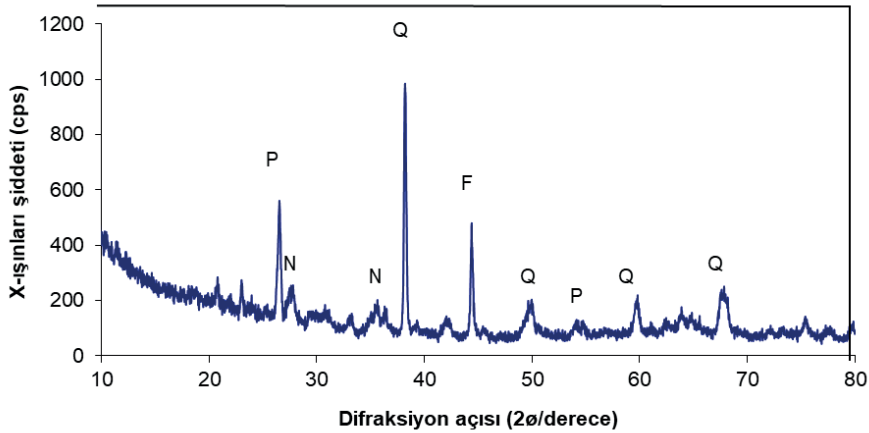


Şekil 9. 1 numaralı buluntunun sırandaki mevcut koyu renkli kristallerden alınan EDX analizi

Şekil 10'da 3 numaralı buluntuya ait temsili XRD analizini vermektedir. Analizden görüldüğü üzere mikroyapıyı oluşturan belli başlı fazların kuvars

(SiO_2), anortoklas ($(\text{Na}, \text{K}) (\text{Si}_3\text{Al})$), potasyum aliminyum silikat (KAlSi_2O_6) ve aliminyum demir silikon ($\text{Al}_{17}\text{FeSi}_{13}$) olduğu tespit edilmiştir.

II.3



Şekil 10 3 numaralı buluntuya ait temsili XRD analizi (Q: Kuvars, N: Anortoklas, ve P: Potasyum aliminyum silikat, F: Aliminyum demir silikon)

Çini buluntularının içerisindeki mevcut fazların homojen olarak dağılmadığı tespit edilmiştir. Bu, malzemelerin hazırlanırken uzun süreli bir karıştırma uygulanmamış olduğunu göstermektedir.

Buluntuların bünyelerinin içerisinde kaba tanelerin bulunduğu tespit edilmiştir. Bazı buluntuların bünyesi (özellikle kırmızı ve kirli beyaz olan) üzerinde bünyeye göre daha ince taneli yapıya sahip olan beyaz renkli astar tabakasının uygulanmış olduğu görülmüştür.

Çini buluntularının karakterizasyonu esnasında numunelerin düşük poroziteye sahip oldukları gözlenmiştir. İncelemeler esnasında elde edilen kalsiyum taneciklerinin Numuneler içerisinde oldukça fazla olması bu dönemlerde üretilmiş olan çinilerin yapımında kalsiyumlu firitin kullanılmış olduğu gözlenmiştir.

Bu grup içerisindeki sırlı buluntularda yapılan analizlerin sonuçlarından bu sırların çok yüksek oranda PbO içerdiği tespit edilmiştir. Özellikle yeşil renkli sırlarda bakır (Cu) elementinin varlığı ortaya çıkartılmıştır. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda da yeşil rengin varlığının Cu 'dan kaynaklandığı görülmektedir. Yaptığımız bu araştırmada bu bulguları destekler niteliktedir.

GENEL SONUÇLAR

Çalışma sonucunda; XIV. yüzyıl sonları ve XV. yüzyılın başına ait olduğu düşünölen buluntularının içerisinde bulunan fazların homojen olarak dağılmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuç malzemelerin hazırlanırken iyi bir karıştırma işlemine maruz kalmadığının bir göstergesi olabilir. Çini buluntularının karakterizasyonu esnasında numunelerin içerisindeki kuvars miktarının bünyede oldukça fazla olmakla beraber bu tanelerinin keskin köşelerinden dolayı birçoğunun çok iyi ergimemiş olduğu görölmektedir. Bu nedenle pişirim sıcaklığının düşük olduğunu tahmin edilmektedir. Çini buluntularında yer alan yeşil renkli sırların üzerinde yapılan EDX analizlerden bu rengin bakır (Cu) elementinden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu sonuç mevcut literatür ile paralellik göstermektedir. Sırlı buluntularda yapılan EDX analiz sonuçlarından bu sırların içerisinde (yaklaşık % 25-40 civarında) PbO'nun kullanılmış olduğu saptanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan İznik çini numunelerini sağlayan İznik Eğitim ve Öğretim Vakfı'na teşekkür ederiz.

Kaynakça

1. Akbaygil, İ. İncelik H. & Aslanapa, O. *Tarih Boyunca İznik*, içinde Heath W. Lowry, “Gezginlerin Gözünden ve İdari Kayıtlardaki Bilgiler Işığında Osmanlı Döneminde İznik, 1331-1923”, Türkiye İş Bankası Yayınları, İstanbul 2004, s. 136.
2. Aslanapa, O. & Altun, A. “İznik Çini Fırınları Kazısı 1996 Yılı Çalışmaları”, XIX. Kazı Sonuçları Toplantısı II, Ankara, (1998), 625-639.
3. Aslanapa, O., *Anadolu’da Türk Çini ve Keramik Sanatı*, İstanbul (1965)
4. Aslanapa, O., *Türk sanatı*, Kervan Yayınları , İstanbul,1984
5. Atasoy, N. & Raby, J., *Iznik: The Pottery of Ottoman Turkey*, London: Alexandria Press, 1994.
6. Şahin, F., *Türk Çini Sanatı Süslemeciliği*, 1989



**YAPAY İNSAN DERİSİ ÜRETİMİNDE
ELEKTROSPİNNİNG PARAMETRELERİNİN
İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ VE ÇOK AMAÇLI
OPTİMİZASYONU: BİR MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
PERSPEKTİFİ**

“ ”

Savaş ÖZTÜRK¹

¹ Doç. Dr. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 45140 Manisa, Türkiye.
<https://orcid.org/0000-0003-2661-4556>

1 Giriş

Malzeme mühendisliğinin temel paradigmalarından biri, "yapı-özellik-işlem-performans" (structure-property-processing-performance) ilişkisini anlamak ve kontrol etmektir. Bu paradigma, biyomalzemelerin tasarımında daha da kritik bir hale gelmektedir; çünkü malzeme sadece mekanik veya fiziksel özellikleriyle değil, biyolojik sistemlerle karmaşık etkileşimleriyle de değerlendirilmelidir (Williams, 2014). Yapay deri ya da doku iskelesi (scaffold) üretimi, bu disiplinler arası yaklaşımın en belirgin örneklerinden birini teşkil eder. İdeal bir yapay deri iskelesi, uygun gözeneklilik, yüksek yüzey alanı/hacim oranı, mekanik dayanım, biyolojik olarak parçalanabilirlik (biodegradability) ve hücrelerin tutunması, çoğalması ve farklılaşmasını destekleyecek biyouyumluluk özelliklerini aynı anda taşımalıdır (Hutmacher, 2001).

Elektrospinning (elektroeğirme), bu tür iskelelerin üretimi için son yirmi yılda kabul görmüş, verimli ve esnek bir nanofabrikasyon yöntemidir. Yöntem, yüksek voltaj altında polimer çözeltisi veya eriyiğinden sürekli nanolifler (genellikle 50-1000 nm çaplı) üretilmesine olanak tanır. Bu nanoliflerin biriktirilmesiyle oluşturulan gözenekli, yüksek yüzey alanlı, üç boyutlu ağ yapılar, doğal hücre dışı matrisin (extracellular matrix - ECM) mimarisini taklit etme potansiyeli taşır (Pham, Sharma, & Mikos, 2006). Ancak, elektrospinning prosesinin sonucu, birbiriyle karmaşık etkileşim içinde olan çok sayıda parametreden derinden etkilenir. Bu parametreler geleneksel "tek faktörü değiştirerek" (one-factor-at-a-time - OFAT) yaklaşımıyla optimize edilmeye çalışıldığında, etkileşimler gözden kaçabilir ve gerçek optimum nokta bulunamayabilir. Ayrıca, prosesin doğası gereği stokastik (rastgele) unsurlar içermesi, tekrarlanabilirliği ve ölçeklenebilirliği zorlaştıran bir faktördür.

Bu bölümün amacı, metalurji ve malzeme mühendisliği araç kutusundan yararlanarak, elektrospinning prosesinin sistematik bir şekilde nasıl modellenebileceğini ve optimize edilebileceğini göstermektir. Özellikle, jelatin/glikozaminoglikan (GAG) nanoliflerinin üretimi özelinde, deneysel

verilerin istatistiksel analizi, matematiksel modelleme ve modern optimizasyon algoritmalarının entegrasyonu ele alınacaktır. Vurgu, sadece en iyi lif çapını bulmak değil, aynı zamanda proses penceresini (process window) tanımlamak, parametrelerin birbirleriyle olan etkileşimlerini anlamak ve malzeme performansını tahmin etmek için güçlü bir çerçeve sunmaktır. Bu yaklaşım, malzeme araştırmalarında ampirik yöntemlerden, tahmine dayalı ve veriye dayalı tasarım yöntemlerine doğru olan küresel geçişle uyumludur.

2 Elektrospinning Prosesi ve Kritik Parametrelerin Malzeme Bilimi Açısından İncelenmesi

Elektrospinning, temelde bir elektrohidrodinamik (EHD) atomizasyon prosesidir. Proses, bir şırınganın metal iğnesinden (kapiler) polimer çözeltisinin pompa ile kontrollü bir hızda ilerletilmesi, iğneye yüksek bir doğru akım (DC) voltajı (genellikle 5-50 kV) uygulanması ve karşıt yüklü veya topraklanmış bir toplayıcı (kolektör) üzerinde liflerin biriktirilmesiyle gerçekleşir. İğne ucundaki polimer damlacığı, uygulanan elektrik alanının neden olduğu elektrostatik kuvvetlerin, yüzey gerilimini aşması sonucu "Taylor konisi" adı verilen karakteristik bir şekil alır. Kritik bir eşik değerinden sonra, koniden stabilize bir polimer jeti fırlatılır. Bu jet, havada ilerlerken çözücünün hızla buharlaşması, jetin incilmesi ve bükülme kararsızlıklarına (bending instability) uğraması sonucu rastgele yönlerde savrulur ve sonunda mikro/nano ölçekli lifler halinde toplayıcı üzerinde katılarak birikir (Reneker & Yarin, 2008).

Malzeme mühendisinin bakış açısından, bu süreçte üretilen liflerin morfolojisi (çap, düzgünlük, yüzey pürüzlülüğü), gözenek yapısı ve mekanik özellikleri, aşağıdaki üç ana parametre grubunun kontrolü ile şekillendirilir (Bhardwaj & Kundu, 2010).

2.1. Çözelti Parametreleri (Malzeme Özellikleri)

Bu grup, üretilecek nanolifin temel "hammaddesini" tanımlar ve malzeme seçimi ile doğrudan ilgilidir.

➤ **Polimer Türü ve Konsantrasyonu:** Polimerin moleküler ağırlığı ve zincir yapısı, çözeltinin reolojik davranışını belirler. Konsantrasyon (veya viskozite), lif oluşumunun en belirleyici faktörlerinden biridir. Çok düşük konsantrasyonlarda, jet parçalanarak nanopartiküller (bubble) veya "boncuklu lif" (beaded fiber) yapısı oluşturur. Çok yüksek konsantrasyonlarda ise viskozite o kadar artar ki, jet oluşumu için gerekli elektrostatik kuvvetler yeterli olmayabilir veya lif çapları kontrolsüz şekilde artar. Genel olarak, bir "elektroegreilebilirlik penceresi" (electrospinnability window) mevcuttur.

➤ **Çözücünün Özellikleri:** Çözücünün buharlaşma hızı, dielektrik sabiti ve polaritesi kritiktir. Hızlı buharlaşan çözücüler, jetin katılaşmasını hızlandırır ve genellikle daha düzgün lifler üretir. Yüksek dielektrik sabitine sahip çözücüler (örneğin, dimetilformamid - DMF), çözeltinin iletkenliğini artırarak jet üzerindeki yük yoğunluğunu yükseltir ve daha ince liflerin oluşmasına yardımcı olmaktadır.

➤ **İletkenlik/Yük Taşıma Kapasitesi:** Çözeltinin iyonik içeriği, jetin taşıdığı yük miktarını etkiler. Yük yoğunluğunun artması, elektrostatik itme kuvvetlerini artırarak jetin daha fazla gerilmesine ve dolayısıyla daha ince lifler oluşmasına neden olmaktadır.

➤ **Yüzey Gerilimi:** Düşük yüzey gerilimi, Taylor konisinin oluşumunu ve jet çıkışını kolaylaştırır. Yüksek yüzey gerilimi genellikle boncuklanmaya yol açar, çünkü jet, yüzey alanını minimize etmeye çalışmaktadır.

2.2. Proses Parametreleri (Üretim Koşulları)

Bu grup, "imalat" koşullarını kontrol eder ve proses mühendisliği ile ilgilidir.

➤ **Uygulanan Voltaj:** Voltajın artması, elektrik alan şiddetini artırarak jet üzerindeki çekme kuvvetini yükseltir. Bu genellikle lif çaplarında bir azalmaya yol açar. Ancak, aşırı yüksek voltajlar jetin kararsız hale gelmesine, birden fazla jet oluşumuna veya "sıçramalara" (discharge) neden olabilir.

➤ **Akış/Besleme Hızı:** İğneden çıkan polimer miktarını kontrol eder. Çok düşük hızlar, jetin sürekliliğini bozabilir. Çok yüksek hızlar ise, çözücünün tamamen buharlaşmasına zaman kalmadan ıslak liflerin toplayıcıya ulaşmasına, liflerin birbirine yapışmasına veya boncuklanmaya neden

olmaktadır. Optimum hız, genellikle jetin sürekliliğini sağlayan minimum değer civarındadır.

➤ İğne-Toplayıcı Mesafesi (TCD): Jetin katılaşmadan önce kat ettiği yolun uzunluğudur. Kısa mesafeler, jetin yeterince gerilmemesine ve ıslak birikime neden olmaktadır. Uzun mesafeler, lifin daha fazla gerilmesine ve incelmesine olanak tanır, ancak aşırı uzun mesafelerde jet kararsızlaşabilir veya lifler toplayıcıya ulaşamayabilir.

7.2.3. Ortam Parametreleri (Çevresel Koşullar)

Ortam parametreleri karmaşık ve çoğu zaman doğrusal olmayan (non-linear) etkileşimleri, prosesin matematiksel modellenmesini zorunlu kılar. Örneğin, voltajın lif çapı üzerindeki etkisi, polimer konsantrasyonuna bağlı olarak değişebilir; yüksek konsantrasyonlarda voltajın etkisi daha az belirgin olabilir.

➤ Sıcaklık ve Nem: Sıcaklığın artması, genellikle çözelti viskozitesini düşürür ve çözücünün buharlaşma hızını artırır. Ortamdaki nem (bağıl nem), çözücü buharlaşma kinetiğini etkiler. Yüksek nem, su moleküllerinin lif üzerinde yoğunlaşmasına ve gözenekli lif yapılarının oluşmasına neden olabilir, bu da bazı doku mühendisliği uygulamaları için faydalı olabilir (Casper, Stephens, Tassi, Chase, & Rabolt, 2003).

➤ Atmosfer Bileşimi ve Basınç: Laboratuvar ölçeğinde genellikle ihmal edilse de, havanın iyonlaşma potansiyeli ve gazların viskozitesi prosesi etkileyebilir.

3 İstatistiksel Tasarım, Regresyon Modellemesi ve Malzeme Biliminde Uygulamaları

Malzeme araştırmalarında, sistemin davranışını açıklayan teorik bir modelin olmaması veya çok karmaşık olması durumunda, deneysel verilerden ampirik modeller türetmek yaygın bir yaklaşımdır. Tepki Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Methodology - RSM), bu amaçla geliştirilmiş güçlü bir istatistiksel ve matematiksel araçlar koleksiyonudur (Myers, Montgomery, & Anderson-Cook, 2016). RSM'nin temel amacı, bir veya daha fazla tepki değişkeni (response variable - örn., lif çapı, porozite) ile bir kontrol edilebilir

faktör (ön., voltaj, konsantrasyon) arasındaki ilişkiyi keşfetmek, modellemek ve optimize etmektir.

3.1. Deneysel Tasarım (Design of Experiments - DoE)

Geleneksel OFAT yaklaşımının aksine, DoE, tüm faktörlerin aynı anda sistematik olarak değiştirildiği ve etkilerinin etkileşimleriyle birlikte değerlendirilebildiği bir matris oluşturur. Elektrospinning gibi çok parametrelili prosesler için en uygun tasarımlardan bazıları şunlardır:

➤ Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design - CCD): İkinci dereceden (kuadratik) modelleri tahmin etmek için etkilidir. Faktör seviyelerini iki seviyeli faktöriyel noktalar, eksenel noktalar ve merkez noktalar olarak birleştirir. Esnek ve yaygın olarak kullanılır.

➤ Box-Behnken Tasarımı (BBD): Üç seviyeli bir tasarımıdır ve CCD'ye kıyasla daha az deney noktası gerektirir. Faktöriyel noktaları içermez, bu nedenle faktörlerin aşırı uç değerlerinden kaçınmak istendiğinde kullanışlıdır.

Bu çalışmada ele alınan örnekte (Pezeshki-Modaress, Zandi, & Mirzadeh, 2015), üç faktörlü (Jelatin/GAG oranı, Voltaj, Akış hızı) bir Box-Behnken veya benzeri bir tasarım kullanıldığı görülmektedir. Bu tasarım, 15 deneyle (12 kenar noktası + 3 merkez noktası) ikinci dereceden etkileri ve ikili etkileşimleri tahmin etmeye olanak tanımıştır.

3.2. Regresyon Modellemesi ve İkinci Dereceden Rasyonel Model

Deneyleler tamamlandıktan ve tepki değişkeni (lif çapı) ölçüldükten sonra, verilere bir regresyon modeli uydurulur (fitting). En yaygın model, aşağıdaki formdaki ikinci dereceden polinom modelidir:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

Burada Y tepki, x_i kodlanmış faktörler, β katsayılar ve ϵ hata terimidir.

Ancak, bazı malzeme sistemlerinde, özellikle tepki değişkeni faktörlere göre doyumluk eğilimi gösterdiğinde veya asimptotik bir davranış sergilediğinde, polinom modeller yetersiz kalabilir. Bu durumda, daha esnek fonksiyonel

formlar gerekebilir. Fiber çapı, elektrospinning parametrelerinin fonksiyonu olarak ikinci dereceden doğrusal olmayan rasyonel bir regresyon modeli ile tanımlanmıştır.

$$f(X_1, X_2, X_3) = \frac{a_1 + a_2X_1 + a_3X_1^2 + a_4X_2 + a_5X_1X_2 + a_6X_2^2 + a_7X_3 + a_8X_1X_3 + a_9X_2X_3 + a_{10}X_3^2}{b_1 + b_2X_1 + b_3X_1^2 + b_4X_2 + b_5X_1X_2 + b_6X_2^2 + b_7X_3 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3 + b_{10}X_3^2}$$

X_1 : Jelatin/GAG kütle oranı (gr:gr), X_2 : Uygulanan voltaj (kV), X_3 : Besleme hızı (ml/saat)

Bu yapı, modelin davranışını daha gerçekçi sınırlamalara (asemptotlar gibi) sahip olacak şekilde esnetir ve genellikle daha iyi bir uyum sağlamaktadır. Katsayılar (α_i ve β_i), genellikle En Küçük Kareler (Least Squares) yöntemi gibi sayısal optimizasyon teknikleri kullanılarak, gözlemlenen deneysel veriler ile model tahminleri arasındaki farkların karelerinin toplamını minimize edecek şekilde tahmin edilmektedir. Bu işlem, Wolfram Mathematica, MATLAB veya özel istatistik yazılımları (Minitab, Design-Expert) ile gerçekleştirilebilir (Ayakdaş, Aydın, Savran, KÜÇÜKDOĞAN ÖZTÜRK, & Öztürk, 2019; Ozturk, Aydin, Kucukdogan, & Celik, 2018; Öztürk, 2022).

Modelin geçerliliği, Belirleme Katsayısı (R^2), Düzeltilmiş R^2 ($R^2_{Adjusted}$) ve Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error - RMSE) gibi metriklerle değerlendirilir. Ayrıca, Artık Analizi (Residual Analysis) yapılarak modelin varsayımlarının (normallik, sabit varyans) karşılanıp karşılanmadığı kontrol edilmelidir.

4 Modern Optimizasyon Algoritmalarının Malzeme Tasarımında Rolü

Matematiksel model geliştirildikten sonra, bir sonraki adım bu modeli kullanarak istenen malzeme özelliklerini sağlayan proses koşullarını bulmaktır. Bu bir optimizasyon problemidir. Geleneksel optimizasyon yöntemleri (gradyan tabanlı yöntemler), çok modlu (birden fazla yerel optimum noktası olan), süreksiz veya türevi alınamayan amaç fonksiyonlarında genellikle başarısız olur. Elektrospinning modeli gibi doğrusal olmayan rasyonel modellerde bu durum söz konusu olabilir. Bu nedenle, meta-sezgisel (metaheuristic) veya stokastik arama algoritmaları

giderek daha popüler hale gelmiştir (Yang, 2010). Bu algoritmalar, doğadaki fiziksel süreçlerden veya evrimsel ilkelerden esinlenir ve global optimuma yakınsama şansı yüksektir. Bu bölümde kullanılan dört algoritma aşağıda detaylandırılmıştır.

4.1. Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution - DE)

DE, (Storn & Price, 1997) tarafından geliştirilmiş, popülasyon tabanlı basit ancak güçlü bir algoritmadır. Çalışma prensibi şu adımlardan oluşmaktadır:

1. Başlatma: Parametre uzayında rastgele bir aday çözüm popülasyonu oluşturulur.
2. Mutasyon: Her bir "hedef" vektör için, popülasyondan seçilen üç farklı vektör kullanılarak bir "mutant" vektör oluşturulur. $V = X_{r1} + F \cdot (X_{r2} - X_{r3})$ Burada F , ölçeklendirme faktörüdür.
3. Çaprazlama (Crossover): Mutant vektör ile hedef vektör arasında, belirli bir çaprazlama olasılığına (Cr) göre bileşenler karıştırılarak bir "deneme" vektörü oluşturulur.
4. Seçim: Deneme vektörünün amaç fonksiyonu değeri, hedef vektörün değeriyle karşılaştırılır. Daha iyi olan bir sonraki nesle aktarılır.

DE'nin gücü, basitliğinden, az sayıda kontrol parametresine sahip olmasından ve geniş bir problem sınıfında iyi performans göstermesinden gelir. Malzeme özelliklerinin optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.2. Nelder-Mead (NM) Simplex Algoritması

(Nelder & Mead, 1965) tarafından önerilen bu algoritma, türev gerektirmeyen bir doğrudan arama yöntemidir. n boyutlu uzayda, $n+1$ köşeye sahip bir "simpleks" (örneğin, 2D'de üçgen, 3D'de dört yüzlü) oluşturularak çalışmaktadır. Her bir köşedeki amaç fonksiyonu değeri hesaplanmaktadır. Algoritma, en kötü köşeyi, simpleksi yansıma (reflection), genişletme (expansion), büzülme (contraction) veya küçültme (shrink) işlemleriyle yönlendirerek sürekli olarak iyileştirmeye çalışmaktadır. Gradient tabanlı olmadığı için düzgün olmayan yüzeylerde çalışabilir, ancak yüksek boyutlu problemlerde yavaşlayabilir ve

yerel optimumda sıkışabilir. Proses penceresinin keşfedilmesi için iyi bir başlangıç noktası sağlayabilir.

4.3. Benzetimli Tavlama (Simulated Annealing - SA)

SA, (Kirkpatrick, Gelatt Jr, & Vecchi, 1983) tarafından, katıların tavlama işleminden esinlenerek geliştirilmiştir. Algoritma, bir "sıcaklık" parametresi ile kontrol edilen, mevcut çözümün komşuluğunda yeni çözümler araştırmaktadır. Yeni çözüm daha iyiye kabul edilmektedir. Daha kötüyse bile, Boltzmann dağılımına dayalı bir olasılıkla $P=\exp(-\Delta E/T)$ kabul edilebilir; burada ΔE kötüleşme miktarı, T ise sıcaklıktır. Zamanla sıcaklık düşürülerek (soğutma programı), kötü çözümlerin kabul olasılığı azaltılır. Bu mekanizma, algoritmanın yerel optimumlardan çıkıp global optimuma ulaşma şansını artırır. Özellikle ayrık ve sürekli karışık optimizasyon problemlerinde etkilidir.

4.4. Rastgele Arama (Random Search - RS)

Temel RS, en basit stokastik optimizasyon yöntemidir. Parametre uzayında rastgele noktalar seçilmekte ve amaç fonksiyonu bu noktalarda değerlendirilmektedir. En iyi bulunan değer kaydedilmektedir. Akıllıca yapılandırılmış RS varyantları (örneğin, Adaptive Random Search), arama uzayını öğrenerek daha etkin hale gelmektedir. Basitliği ve paralelleştirilebilir olması avantajlarıdır. Genellikle diğer algoritmaların performansını karşılaştırmak için bir "taban çizgisi" (baseline) olarak kullanılmaktadır (Ayakdaş et al., 2019; Ozturk et al., 2018; Öztürk, 2022).

Bu dört algoritmanın elektrospinning optimizasyon problemine uygulanmasının güzel yanı, farklı arama stratejilerini temsil etmeleri ve aynı optimum noktaları işaret etmeleri durumunda, bulunan çözümün güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermeleridir.

5 Vaka Çalışması: Jelatin/GAG Nanolif Çapının Optimizasyonu

Bu bölümde sunulan teorik çerçeve, (Pezeshki-Modarress et al., 2015) çalışmasındaki deneysel veriler üzerinde uygulanmıştır. Amaç, lif çapını etkileyen üç faktörü (g: Jelatin/GAG oranı, k: Voltaj, m: Akış hızı) optimize etmektir.

5.1. Model Geliştirme ve Analiz

Deneysel veriler, Wolfram Mathematica yazılımı kullanılarak bir SONR modeline uydurulmuştur. Model katsayıları tahmin edilmiş ve modelin yüksek bir R^2 değeri ile verileri iyi temsil ettiği doğrulanmıştır. Model denklemi şu şekildedir:

Fiber Çapı =

$$\frac{1.734+4.103 g+39.21 g^2+3.303 k+69.862 gk+24.453 k^2+0.633 m+5.42 gm+6.255 km+1.666 m^2}{-102.824+0.146 g+0.173 g^2+2.864 k+0.518 gk+0.120 k^2+155.499 m-2.602 gm-3.727 km-50.66 m^2}$$

Bu model, faktörlerin etkileşimlerini açıkça ortaya koyar. Örneğin, model analizi şunu gösterebilir:

Ana Etkiler: Jelatin/GAG oranı ve Voltaj artışı, lif çapında istatistiksel olarak anlamlı bir azalmaya yol açar. Akış hızının ana etkisi daha zayıf olabilir.

Etkileşim Etkileri: gk (OranVoltaj) etkileşimi anlamlı olabilir; yüksek voltajda, oran değişiminin etkisi daha belirgin hale gelebilir.

5.2. Optimizasyon Sonuçları ve Yorumu

İki farklı senaryo için optimizasyon yapılmıştır:

1. Senaryo I: Maksimum Lif Çapı (~263-264 nm). Bu senaryo, daha büyük gözenekli yapılar istenen durumlar için (örn., damar oluşumu - vaskülarizasyon için) önemli olabilir. Tüm algoritmalar (DE, NM, RS) tutarlı bir şekilde aynı optimum noktayı işaret etmiştir: g : 5 (95:5 oranı), k : 15 kV, m : 0.6 ml/h. SA algoritması ise akış hızını 1.0 ml/h olarak önermiş, ancak çap değeri benzer kalmıştır. Bu sonuç, düşük voltaj ve yüksek jelatin oranının (düşük GAG içeriği), daha kalın lifler oluşturduğunu göstermektedir.

2. Senaryo II: Minimum Lif Çapı (~183.5 nm). Nanofiber iskelelerde hücre tutunma alanını maksimize etmek genellikle istenir. Tüm dört algoritma mükemmel bir uyumla aynı noktada birleşmiştir: g : 15 (85:15 oranı), k : 25 kV, m : 0.6 ml/h. Bu, yüksek voltaj ve yüksek GAG içeriğinin (daha düşük jelatin oranı), liflerin daha fazla gerilmesine ve incelmesine yol açtığını teyit etmektedir. İlginç bir şekilde, minimum çap için de optimum akış hızı 0.6 ml/h olarak bulunmuştur, bu da bu parametre aralığında prosesin bu hızda en kararlı olduğunu düşündürmektedir.

Sonuçların Malzeme Bilimi Perspektifinden Değerlendirilmesi:

Voltaj (k): Artan voltajın lif çapını azaltıcı etkisi, literatürle tamamen uyumludur. Daha yüksek elektrik alan, jet üzerindeki çekme kuvvetini artırmaktadır.

Jelatin/GAG Oranı (g): GAG (muhtemelen kondroitin sülfat veya hyaluronik asit) ilavesi, çözeltinin reolojik ve elektriksel özelliklerini değiştirir. GAG'lar negatif yüklü polianyonlardır. Çözeltiye eklenmeleri, çözeltinin iletkenliğini önemli ölçüde artırarak (Pezeshki-Modaress et al., 2015), jet yük yoğunluğunu yükseltir ve daha ince liflerin üretilmesini sağlar. Ayrıca, jelatin ile GAG arasındaki elektrostatik etkileşimler, çözeltinin viskoelastik davranışını değiştirebilir.

Akış Hızı (m): Her iki senaryoda da optimum hızın 0.6 ml/h olması, bu özel sistem için jet sürekliliğini sağlayan ve çözücünün tamamen buharlaşmasına izin veren kritik bir hız olduğunu göstermektedir. Daha yüksek hızlar (0.8 veya 1.0 ml/h), model tarafından daha düşük performansla ilişkilendirilmiştir.

Bu optimizasyon, orijinal çalışmanın deneysel aralığının ötesine geçerek, deneylerde doğrudan test edilmemiş olan $g=15$, $k=25$, $m=0.6$ kombinasyonunun en iyi minimum çapı vereceğini tahmin etmiştir. Bu, model tabanlı optimizasyonun gücünü göstermektedir.

6 İleriye Dönük Bakış ve Çok Amaçlı Optimizasyon

Bu bölümde sunulan yaklaşım, tek bir performans metriğinin (lif çapı) optimizasyonuna odaklanmıştır. Ancak, gerçek bir malzeme tasarım problemi genellikle çok amaçlı optimizasyon (Multi-Objective Optimization - MOO) gerektirmektedir. Örneğin, bir yapay deri iskelesi için aynı anda şu özellikler istenebilir:

1. Mümkün olan en küçük lif çapı (yüksek yüzey alanı için),
2. Yeterli mekanik dayanım (Young modülü, kopma mukavemeti),
3. Optimum gözenek boyutu ve bağlantısı (porozite ve permeabilite),
4. Kontrollü biyolojik parçalanma hızı.

Bu hedefler çoğu zaman birbiriyle çelişir (trade-off). Örneğin, lif çapını azaltmak mekanik dayanımı düşürebilir. MOO'nun amacı, tüm amaçlar arasında en iyi dengeyi sağlayan bir dizi çözümü bulmaktır; buna Pareto optimal çözümler kümesi denir. Bu kümedeki hiçbir çözüm, bir amacı diğerini kötüleştirmeden iyileştiremez.

Bu tür problemleri çözmek için Çok Amaçlı Diferansiyel Gelişim (MOEA/D, NSGA-II) gibi gelişmiş algoritmalar kullanılmaktadır (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002). Gelecekteki çalışmalar, elektrospinning parametrelerini, lif çapı, mekanik özellikler ve hatta hücre canlılığı gibi biyolojik yanıtları içeren çoklu hedeflere göre optimize etmeyi hedeflemelidir. Ayrıca, Makine Öğrenmesi (Machine Learning - ML) modelleri, özellikle büyük ve karmaşık veri setleri söz konusu olduğunda, regresyon modellemesinin yerini alabilir veya tamamlayabileceği öngörülmektedir.

7 Sonuç

Bu bölüm, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği disiplininin, ileri biyomalzeme üretim süreçlerinin anlaşılması ve geliştirilmesine nasıl katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Jelatin/GAG nanolif üretimi örneği üzerinden, elektrospinning gibi karmaşık bir prosesin, sistematik deneysel tasarım (DoE), ileri istatistiksel modelleme (RSM ve rasyonel modeller) ve modern stokastik optimizasyon algoritmalarının (DE, SA, NM, RS) entegre edilmesiyle nasıl modellenebileceği ve optimize edilebileceği açıklanmıştır.

Anahtar bulgu, tek başına "en iyi" parametre setini bulmanın ötesinde, bu yaklaşımın malzeme bilimcisine veya proses mühendisine aşağıdakileri sağlamasıdır:

Proses Anlayışı: Parametrelerin ana etkilerini ve kritik etkileşimlerini nicel olarak ortaya koymaktadır.

Tahmin Gücü: Deneysel olarak test edilmemiş koşullar altında malzeme özelliklerini tahmin etme yeteneği sunmaktadır.

Robust Tasarım: Üretimdeki kaçınılmaz küçük değişimlere (gürültü) karşı dayanıklı (robust) proses koşullarını belirlemeye yardımcı olmaktadır.

Zaman ve Kaynak Tasarrufu: "Kör" deneme-yanılma yerine hedefe yönelik, verimli bir araştırma yolu sunmaktadır.

Elektrospinning, sadece yapay deri değil, ilaç salım sistemleri, filtreler, sensörler ve koruyucu giysiler gibi çok çeşitli alanlarda kullanılan nanoliflerin üretimi için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Bu nedenle, sunulan modelleme ve optimizasyon çerçevesi, malzeme bilimi ve mühendisliğinin birçok dalında geniş bir uygulama alanı bulacağı düşünülmektedir. Gelecek, çok amaçlı optimizasyon, makine öğrenmesi ve gerçek zamanlı proses kontrolünün bu çerçeveye entegre edildiği, tamamen dijital ikiz destekli akıllı malzeme üretim sistemlerine doğru ilerlemektedir.

Kaynakça

- Ayakdaş, O., Aydın, L., Savran, M., KÜÇÜKDOĞAN ÖZTÜRK, N., & Öztürk, S. (2019). Optimal design of the type III hydrogen storage tank for different carbon/epoxy materials by modified differential evolution method. *Research on Engineering Structures and Materials*, 5(2).
- Bhardwaj, N., & Kundu, S. C. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology advances*, 28(3), 325-347.
- Casper, C. L., Stephens, J. S., Tassi, N. G., Chase, D. B., & Rabolt, J. F. (2003). Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process. *Macromolecules*, 37(2), 573-578.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- Hutmacher, D. W. (2001). Scaffold design and fabrication technologies for engineering tissues—state of the art and future perspectives. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 12(1), 107-124.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*: John Wiley & Sons.
- Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4), 308-313.
- Ozturk, S., Aydın, L., Kucukdogan, N., & Celik, E. (2018). Optimization of lapping processes of silicon wafer for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 164, 1-11.

- Öztürk, S. (2022). OPTIMIZATION of ATMOSPHERIC PLASMA SPRAY PROCESS PARAMETERS for DEPOSITION of THERMAL BARRIER COATINGS. *Journal of Scientific Reports-A*(049), 184-197.
- Pezeshki-Modaress, M., Zandi, M., & Mirzadeh, H. (2015). Fabrication of gelatin/chitosan nanofibrous scaffold: process optimization and empirical modeling. *Polymer International*, 64(4), 571-580.
- Pham, Q. P., Sharma, U., & Mikos, A. G. (2006). Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: a review. *Tissue engineering*, 12(5), 1197-1211.
- Reneker, D. H., & Yarin, A. L. (2008). Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*, 49(10), 2387-2425.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.
- Williams, D. F. (2014). The biomaterials conundrum in tissue engineering. *Tissue Engineering Part A*, 20(7-8), 1129-1131.
- Yang, X.-S. (2010). *Nature-inspired metaheuristic algorithms*: Luniver press.