



TÜRKİYE VE DÜNYADA MALZEME VE METALURJİ MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Malzeme ve Metalurji Mühendisliği

Editör

Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI

yaz
yayınları

2025

**Türkiye ve Dünyada Malzeme ve
Metalurji Mühendisliği**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi İbrahim PINARCI

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-46-8

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Hegzagonal Bor Nitrürün Termal Eksfoliasyonu	1
<i>Zuhal YILMAZ</i>	
Katı Yağlayıcılar: Yapısal Özellikleri, Tribolojik Mekanizmaları, Modern Kaplama Teknolojileri ve Endüstriyel Uygulamaları	25
<i>Nuri ERGİN, Necati KOÇAK</i>	
Viscosity Measurement and Modelling of Steelmaking Slags	44
<i>Mustafa SEYREK</i>	
Sensörler, Fotovoltaikler ve Tekstil Tabanlı Fonksiyonel Sistemler İçin Metal Oksit İnce Filmler	60
<i>Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL, Enes NAYMAN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

HEGZAGONAL BOR NİTRÜRÜN TERMAL EKSFOLİASYONU

Zuhal YILMAZ¹

1. GİRİŞ

Hegzagonal bor nitrür (hBN), sp^2 hibritleşmesine sahip bor ve azot atomlarının düzenli biçimde petek benzeri altıgen bir kafes yapısına sahip katmanlı bir yapı sergileyen seramik bir malzemedir. Her bir katman kovalent bağlarla güçlü bir şekilde birbirine bağlıyken, katmanlar arası etkileşimler zayıf van der Waals kuvvetleriyle sağlanır (Smith McWilliams ve diğerleri, 2021; Wu ve diğerleri, 2017; Zhang ve diğerleri, 2017). Bu yapı, malzemeye yüksek termal kararlılık, kimyasal inertlik, elektriksel yalıtkanlık ve geniş bir bant aralığı (~ 5.9 eV) kazandırır (Rafiei-Sarmazdeh, Jafari ve Ahmadi, 2020). Mükemmel ısı iletkenliğe (~ 360 W/(m K)) (Smith McWilliams ve diğerleri, 2021) ve kimyasal kararlılığa sahiptir, 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara kadar havada oksidasyona uğramaz termal kararlılığa sahiptir (Kostoglou ve diğerleri, 2020). Bu özellikler hBN'yi çok çeşitli potansiyel uygulamalar için güçlü bir aday haline getirir, bunlar arasında kompozitlerde termal ve mekanik takviyeler, elektronik uygulamalarda için kompozitler ve yağlayıcılar yer alır (Smith McWilliams ve diğerleri, 2021). hBN, aşınma ve sürtünmeyi azaltma kapasitesi nedeniyle yağlayıcı katkı maddesi olarak yoğun ilgi görmüştür. Özellikle ince hBN nanotabakalar (BNNS'ler) tarafından oluşturulan küresel parçacıklar, sınır yağlama koşullarında tribolojik performansı artırarak sürtünme

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, İç Mekan Tasarımı, ORCID: 0000-0002-2280-6326.

ve aşınmayı azaltmaktadır (L. Wang ve diğerleri, 2021). Ayrıca yüksek oksidasyon direnci, hBN'yi hem koruyucu kapsülleme maddesi hem de metal korozyon ve oksidasyona karşı kaplama uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Bu özelliklerinden dolayı seramik matris kompozitlerde pota malzemesi ve fiber kaplamalar olarak kullanılmaktadır (Khan, Li ve Edgar, 2022).

Yakın dönemdeki çalışmalar, yığın halindeki bor nitrüre kıyasla üstün özellikler sergileyen tek katmanlı veya az katmanlı BNNS'ler elde edilmesine odaklanmıştır. Bu iki boyutlu yapılar, yaklaşık 0,33-0,34 nm'lik bir ara katman mesafesine sahiptir, düzlem içi yüksek termal iletkenliği ($\sim 600 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) (Weng, Wang, Wang, Bando ve Golberg, 2016), yüksek ısıl kararlılık, kimyasal direnç ve üstün elektriksel yalıtkanlık gibi özellikleri sayesinde geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir (Wu ve diğerleri, 2017; Zhang ve diğerleri, 2017). Genellikle BNNS'ler nanoelektronik, optoelektronik, nanofotonik, termoelektrik, biyosensörler ve terapötik uygulamalar gibi yeni ortaya çıkan alanlar da dahil olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesi sunan ve nanoteknoloji alanında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Khan ve diğerleri, 2022; Kostoglou ve diğerleri, 2024; Weng ve diğerleri, 2016). İki boyutlu karbon olmayan en çok araştırılan nanomalzemelerden biridir. BNNS'lerin büyük ölçekli üretimini mümkün kılmak ve uygulama alanlarını genişletmek amacıyla, umut verici bir yöntem olan birbirinden ayrılması (eksfoliasyon) süreci üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Eksfoliasyon, malzemenin tabakaları arasında bulunan van der Waals çekim kuvvetlerinin kontrollü biçimde zayıflatılması ve bu katmanların birbirinden ayrılmasını sağlayacak dış bir enerjinin uygulanmasıyla gerçekleştirilir.

Katmanlı yapısı nedeniyle hBN, eksfoliasyon için doğal bir zayıf bağlantı sunar. Eksfoliasyon, malzemenin birkaç tabakalı veya tek tabakalı hBN nanotabakalara dönüştürülmesini sağlar. Grafenin hazırlanmasında kullanılan pek çok sayıda

teknik, h-BNNS'leri sentezlemek için bugüne kadar kullanılmıştır (Gautam ve Chelliah, 2021). Literatürde hBN eksfoliasyon yöntemleri genel olarak üç kategoriye ayrılabilir: mekanik (örneğin öğütme) (Falin ve diğerleri, 2017; Jiang ve diğerleri, 2025), kimyasal sıvı faz (sonikasyon, kimyasal interkalasyon) (Acosta ve diğerleri, 2023; Cao, Emami ve Lafdi, 2014; Ghosh, Shukla, Shrivastava ve Alam, 2024; Gonzalez Ortiz, Pochat-Bohatier, Cambedouzou, Bechelany ve Miele, 2018; Guo, Profile, Zhu ve Li, 2016; X. Li ve diğerleri, 2013) ve termal yöntemler (Gautam ve Chelliah, 2021; Hazarika ve diğerleri, 2024; Sun ve Sun, 2023; Baokang Yu ve diğerleri, 2023; Bin Yu ve diğerleri, 2016). Bunların yanında mekanokimyasal (Posudievsky ve diğerleri, 2016), solvotermal gibi birleştirilmiş yöntemler ile kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi gibi farklı yöntemlerle de birkaç tabaka BNNS üretimi mümkündür (Songfeng, Liu, Zhao, Ning ve Lu, 2023). Kimyasal yöntemlerde BNNS ürünüde üretim sürecinden kaynaklı olarak çeşitli kimyasal safsızlıklar mevcuttur ve saflaştırma amacıyla ürün daha karmaşık bir son işlem gerektirir. Mekanik yöntemlerde ise plakaların zarar görme olasılığı daha yüksek ve verimi çok düşüktür. Bu yöntemler arasında termal eksfoliasyon, çözücü ve yüzey aktif madde kullanımını gerektirmemesi ve kimyasal saflığı koruması açısından dikkat çekici bir alternatiftir.

Termal eksfoliasyon, genellikle oksitleyici atmosferde yüksek sıcaklık uygulaması ile gerçekleştirilir. Süreç boyunca hBN tabakalarının yüzeyinde oksijen içeren fonksiyonel gruplar (B-O, B-OH) oluşur (Garro Mena ve Hohn, 2021). Bu bağların zayıflaması, katmanların ayrılmasını kolaylaştırırken, aynı zamanda yapıya yeni fonksiyonel grupların eklenmesine de olanak tanır. Böylece, kontrollü oksidasyon sayesinde hem yapısal defektler hem de aktif yüzey bölgeleri oluşturularak hBN'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri değiştirilebilir. Eksfoliasyonu kolaylaştıran ikinci faktör, ısıtma-soğutma

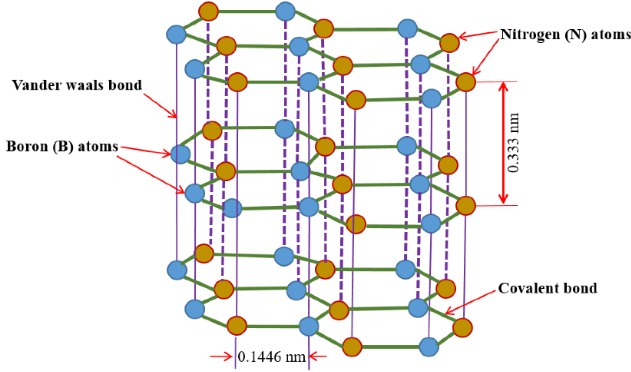
döngüsü sırasında oluşan termal genleşme farklılıklarının neden olduğu kalıcı termal gerilmelerin, hBN'nin katmanları arasındaki van der Waals etkileşimlerini zayıflatarak yapısal bütünlüğü bozmasıdır (Yan ve diğerleri, 2020). Bu durum, BNNS'lerin polimer, seramik veya metal matrisli kompozitlerde daha iyi dağılabilmesini ve arayüz etkileşiminin artmasını sağlar.

Bu bölümün amacı, hBN termal eksfoliasyonuna ilişkin güncel gelişmeleri, temel mekanizmaları ve işlem parametrelerinin malzemenin yapısal, kimyasal ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Termal eksfoliasyon, kimyasal katkı maddesi veya çözücü kullanımını gerektirmeyen, çevre dostu ve yüksek saflıkta ve oranda nanotabaka üretimine olanak tanıyan bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, literatürde bildirilen termal işlem stratejileri, oluşan oksijen fonksiyonel gruplarının rolü, termal gerilmelerin etkisi ve eksfoliasyon mekanizmaları ayrıntılı biçimde tartışılmıştır. Çalışma ile termal olarak eksfoliye edilmiş BNNS'lerin üretimi için çevreci, basit ve ölçeklenebilir bir yöntem geliştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. hBN YAPISI VE TERMAL KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ

hBN ve grafen benzeri bağlanma özelliklerine ve kristal yapıya sahip katmanlı beyaz bir kristaldır, bu nedenle hBN beyaz grafen olarak da bilinir. Grafenin aksine, BN elektronegatif azot atomlarıyla güçlü bir şekilde polarize olup olası anizotropik özelliklere yol açar. Altıgen bor nitrür düzleminde, B atomları ve N atomları sp^2 hibritleşerek kafes sabiti $a = b = 0,2504$ nm, $c = 0,665$ nm olan bir petek altıgen halka yapısı oluşturur (Şekil 1). Bor ve azot atomları arasındaki elektronegatiflik farkı nedeniyle, altıgen kafes düzleminde elektron yoğunluğu azot atomu yönünde

kayar ve bu da güçlü bir polar kovalent bağın oluşmasına neden olur. Katmanlar arasında doğrudan bağ yapmaz. Tabakalar arası etkileşimler elektrostatik ve van der Waals kuvvetleri gibi zayıf etkileşimlerle sağlanır (Smith McWilliams ve diğerleri, 2021; J. Wang, Xu, Mu, Ma ve Sun, 2017; Zhang ve diğerleri, 2017).



Şekil 1. hBN'nin kristal yapısı (Dadvand ve Savadogo, 2022)

Diğer malzemelere göre yoğunluğu çok düşüktür, yüksek sıcaklık kararlılığı (ergime sıcaklığı 2600°C normal ergime davranışı göstermez, 2300°C 'de azot atmosferinde süblime olur), kimyasallara karşı dayanıklı oluşunun yanı sıra kolay işlenebilirlik özelliği bulunmaktadır. hBN çok güçlü düzlemsel bağlar ve zayıf düzlemlerarası bağlardan dolayı yüksek anizotropiye sahiptir. Isıl ve elektriksel özellikleri a ve c yönlerinde farklıdır. hBN'ün ısı iletkenliği a- yönünde c- yönünden daha fazladır. Tabakalar arası bağlar zayıf olduğundan düzensiz tabakalaşma çok kolay olur. Gözenekli yapı, düşük elastik modülü, yüksek ısı iletkenliği ve ısı genleşme özellikleri ile sıcak preslenmiş hBN'ün ısı şok dayanımı çok iyidir. hBN yüksek sıcaklıklarda yarı iletken hale gelir (Ay, Göncü ve Ay, 2020). hBN'e ait a ve c yönüne göre özelliklerinin değişimi Tablo 1'de verilmiştir (Yılmaz, 2017).

Tablo 1. hBN'nin fiziksel özellikleri (a düzlemi (||) ve c düzlemi ($\perp$))

Malzeme	hBN
Yoğunluk(g/cm ³)	2,27
Mohs sertliği	1-2
Bulk modülü (GPa)	36,5
Termal iletkenlik (W/m.K)	600 ;30 $\perp$
Termal genleşme (10 ⁻⁶ /°C)	-2.7 ;38 $\perp$

BN'nin yüksek mekanik dayanımı, üstün termal ve kimyasal kararlılığı, düşük dielektrik sabiti (mükemmel elektriksel yalıtım özelliği) ve oldukça düşük sürtünme katsayısı gibi olağanüstü hacimsel özellikleri, bu malzemenin farklı endüstriyel ve teknolojik alanlarda geniş uygulama potansiyeline sahip olmasını sağlamıştır (Roy ve diğerleri, 2021).

Kostoglou ve arkadaşları (Kostoglou, Polychronopoulou ve Rebholz, 2015), hem yüksek sıcaklık direnci hem de oksidasyon davranışını, hava akışı koşulları altında oda sıcaklığından (25°C) ~1300°C'ye kadar incelemişlerdir. hBN partikülleri ~1000°C'ye kadar yüksek termal kararlılık gösterirken, oksidasyonları 1000 ile 1200°C arasındaki sıcaklık aralığında gerçekleşmiş ve bunu bor oksit (B₂O₃) oluşumu izlemiştir. Ayrıca farklı ortamlarda hBN'nin oksidatif ve hidrolitik kararlılığını araştırılmış ve 700°C'de H₂O/hava atmosferinde B₂O₃ oluşumu nedeniyle ağırlık kaybının meydana geldiğini, kuru hava örneklerinde ise 1000°C'nin altındaki sıcaklıklarda daha yavaş bir ağırlık kaybı oranı sergilediği tespit edilmiştir (Khan ve diğerleri, 2022). Yüksek kaliteli tek tabaka BN'nin termal iletkenliğini, yarı iletkenler ve yalıtkanlar sınıfı arasında ikinci en yüksek (751 W mK⁻¹) olarak bildirilmiştir. Geniş bant aralığı, yüksek termal iletkenliği, üstün mekanik dayanımı, iyi esnekliği ve mükemmel termal ile kimyasal kararlılığı sayesinde, atomik olarak ince BN'nin ısı dağılımı ve yönetimi uygulamaları için son derece güçlü bir aday olduğu belirtilmiştir (Roy ve diğerleri, 2021). Tek katmanlı BNNS'lerin 850 °C'ye kadar güçlü oksidasyon direnci gösterdiği ve BNNS'nin

oksitlenmeye başlama sıcaklığının katman sayısı arttıkça hafif bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun BNNS'nin diğer 2 boyutlu nano tabakalara kıyasla üstün kararlılığını ortaya koyduğu belirlenmiştir (L. H. Li, Cervenka, Watanabe, Taniguchi ve Chen, 2014).

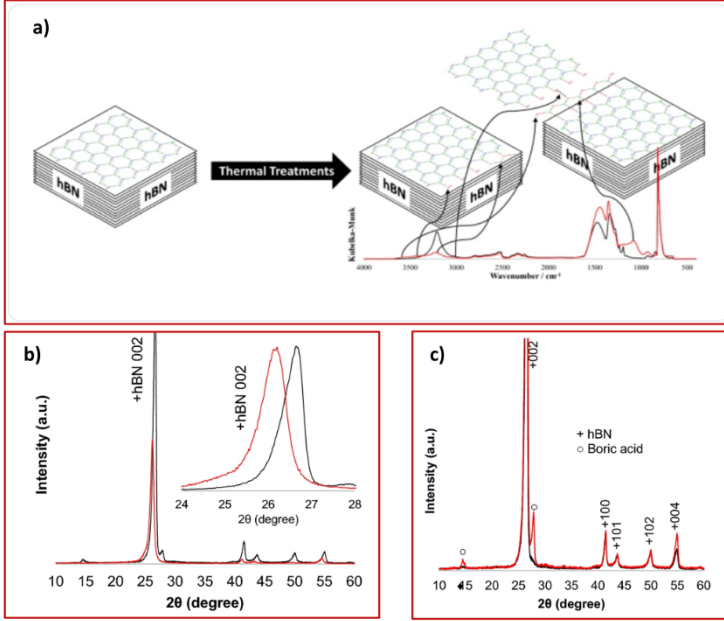
Sonuç olarak hBN, yüksek termal kararlılığı, kimyasal inertliği, düşük yoğunluğu ve anizotropik fiziksel özellikleri ile dikkat çeken ileri teknoloji seramiklerinden biridir. Yapısındaki güçlü düzlemsel kovalent bağlar ve zayıf van der Waals etkileşimleri, ona hem yüksek ısı iletkenlik hem de mükemmel eksfoliasyon potansiyeli kazandırmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, hBN'nin 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dahi oksidatif olarak kararlı olduğunu ve B₂O₃ oluşumunun yüksek sıcaklık aralıklarında başladığını göstermektedir. Ayrıca, tek ve az katmanlı BNNS'lerin üstün termal iletkenliği ve oksidasyon direnci, bu malzemeyi yüksek sıcaklıkta çalışan elektronik, kompozit ve kaplama sistemleri için son derece umut verici hale getirmektedir.

3. hBN'NİN TERMAL EKSFOLİASYON MEKANİZMASI

Bu bölümde farklı termal işlem koşullarında hBN'nin termal eksfoliasyon teknikleri kısaca tartışılmaktadır. Mena ve Hohn (Garro Mena ve Hohn, 2021), hBN'nin katalitik aktivitesinin hBN'nin hidroksillenmiş bölgeleriyle ilişkili olduğunu, bu bölgelerin ve nasıl üretildiklerinin iyi anlaşılması için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada hBN kuru hava ve nemli hava işlemleri için, fırın girişinden önce hava akımını doyurmak üzere difüzyörlü bir su kabarcıklandırıcı kullanarak ısı işlem uygulamışlardır. Sıcaklığın etkisini belirlemek için (650°C, 850°C, 900°C ve 950°C) farklı sıcaklık aralığında termal işlem uygulanmıştır. Daha sonra deiyonize su ile sonikatörde

sonikasyona tabi tutup, 1000 rpm'de 30 dakika santrifüj edilmiştir. Santrifüjlemenin ardından, supernatan sıvı toplanmış, kuru veya nemli olarak 110 °C'de bir gece kurutulmuştur. Şekil 2'de bulunan sonuçlar kısa özet olarak verilmiştir. Şekil 2a'da FTIR spektrumunda 3400 cm⁻¹ hBN'ye bağlı OH gruplarına, 3000 cm⁻¹ B₂O₃ türlerinin OH gruplarıyla hidrojen bağlarına, ve 3200 cm⁻¹ borik asit ve hBN ile uyumlu hidroksil gruplarına atfedilmiştir. 1090 cm⁻¹ tepesi N-B-O titreşimlerine aittir. Bu sonuçlar, hBN'nin borik aside kısmi olarak ayrışması ve ardından borik asidin hBN yüzeyinde dehidrasyonu ve borlu bir hBN türünün oluşmasına atfedilebilir. Şekil 2b'deki XRD paterninde görülen hBN 002 düzlemindeki sola kayma, hBN yüzeyinin oksitlendiğini ve kristal düzlemi aralığında bir artışa neden olduğunu göstermektedir. Saklama yöntemlerinin etkisini test etmek için, hBN numunesi 850 °C'de 6 saat boyunca nemli havada muamele edildikten sonra numune kuru bir ortamda ve nemli bir ortamda saklandığında XRD desenleri ölçülmüştür (Şekil 2c). Kuru ortamda saklanan numunede borik asit fazına ait belirgin bir pik gözlenmemektedir. Öte yandan, ıslak ortamda saklanan numunede borik asit deseni (PDF No: 01-072-3608) hBN deseniyle karışmış halde açıkça görülmektedir.

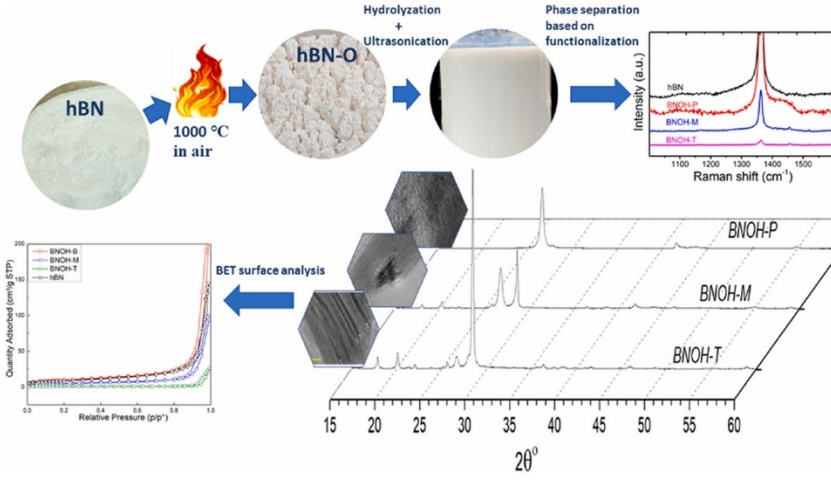
Özetle, çalışma termal işlemlerin hBN'nin yüzey kimyasını ve hidroksilasyon derecesini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. İşlem sıcaklığı, süresi ve atmosfer koşulları değiştirilerek borik asit, B₂O₃ veya hBNO gibi farklı oksitlenmiş ürünler elde edilebilmektedir. Nemli hava ortamında düşük sıcaklıkta yapılan işlemler, yeniden agregasyon olmadan kararlı hBN süspansiyonlarının oluşumunu sağlar. Ancak, yüksek sıcaklıklarda borik asidin B₂O₃'e dönüşmesi yapıda kalıcı kimyasal değişimlere yol açar. Numunelerin saklama koşulları da önemlidir; nemli bir ortamda saklandığında borik asit pikleri görülebilir, ancak numuneler kuru bir yerde saklandığında bu pikler oluşmaz.



Şekil 2. a) Termal etkinin etkisini gösteren görsel, b) hBN oksidasyonu nedeniyle kristal düzlemi aralığındaki artıştan kaynaklanan hBN 002 düzleminde sola kayma (kırmızı renk aynı numune 4 saat sonikasyon ve santrifüj edilmiş) ve c) 850°C’de ısıtılmış hBN için kuru ve nemli olarak XRD desenleri (kırmızı renk nemli kurutma) (Garro Mena ve Hohn, 2021)

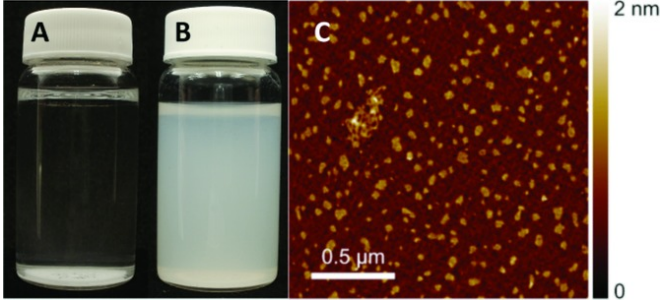
Mazhar ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada (Mazhar, Adamson ve Al-Harhi, 2023); hBN oksitlenmiş hBN (BNO) üretmek için 1 saat boyunca 1000 °C’de hava koşullarında termal oksidasyona tabi tutulmuş ve daha sonra 2 saat boyunca sürekli karıştırma altında hidrolize edilmiştir ve ardından bor nitrür hidroksit (BNOH) elde etmek için 2 saat boyunca sonikasyon uygulanmıştır. İşlem basamakları ve sonuçlara ait grafik özeti Şekil 3’de verilmiştir. Bu çalışma, hekzagonal bor nitrür tabakalarının oksidasyon düzeyine bağlı olarak oluşan farklı fonksiyonelleşmiş hBN fazlarını ortaya koymakta ve dispersiyon ile çökme süresinin, bu fonksiyonelleşmiş fazların ayrışması ve tanımlanması üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

XRD paternlerinde BNO numunesi için 14,79 ve 28,05°'de zirveler gözlemlenmiş ve bunun sırasıyla B_2O_3 , veya $BN(OH)_2$ 28 ve $B(OH)_3$ oluşumuna karşılık geldiği bildirilmiştir. Santirifüj sonrası çökelti BNOH-P fonksiyonel grubunda 26,65°'de merkezlenen ve hafif sola doğru kayma gösteren 002 zirvesini gösterilmiş ve bu da katmanlar arası aralığın artmasına atfedilmiştir. Bununla birlikte, tüm fazlardaki 002 tepeleri, tabaka yapısının artan fonksiyonelleşmeyle korunduğunu gösterilmiştir. Altıgen yapıdaki oksijenin kimyasal adsorpsiyonu, ana kafes yapısında kusur oluşumuna yol açarak katmanlar arası mesafenin artmasına neden olur. Bu durum, BNOH örneklerinde gözlenen ve hafif bir pik kaymasıyla kendini gösteren XRD desenleriyle BNOH piki doğrulanmaktadır. Bu santirifüj sonrası supernatan fazın bekletilmesi sonucu çökmeden kalan BNOH-T fonksiyonel grubunda çok daha belirgindir. Raman spektrumundaki pik şiddet azalması da tabakalara ayrılmayı desteklemektedir. Literatürde de katman sayısını ve katmanlar arası etkileşimleri azaltan oksidasyon ve çeşitli eksfoliasyon süreçlerinin Raman tepe yoğunluğunda bir azalmaya sebep olduğunu bildirmiştir. (Koroglu, Ayas ve Ay, 2024; Zhang ve diğerleri, 2017; Zhu ve diğerleri, 2016). Sonuç olarak çalışmada, oksidasyonun yüzey dokusunu ve morfolojisini etkileyerek yüzey çatlaklarına ve çıkıklıklarına neden olduğu, bununda fonksiyonelleşme ve tabakalara ayrılma sürecini desteklediği bildirilmiştir.



Şekil 3. BNO ve BNOH üretim süreci ve sonuçları (Mazhar ve diğerleri, 2023)

Cui ve arkadaşları (Cui, Oyer, Glover, Schniepp ve Adamson, 2014a), hBN'nin büyük ölçekli termal eksfoliasyonunu termal oksidasyon yaklaşımı kullanarak açıklamışlardır. 1000°C'de oksitleme sonrası sonikasyon işlemi yapılarak fonksiyonelleşme sağlamışlardır. Fonksiyonelleştirilmiş BNNS'nin oluşmu Şekil 4'de verilmiştir. Sonuçlarına göre, oksijen BN'nin kafesine girerek hidroksillenmiş BN (BNO) oluşturduğunu sonikasyon ile karışımın hidrolize olduğu ve bunun eksfoliasyonla sonuçlandığı bildirilmiştir. Şekil 4a'da sonikasyon yapılmadan suda süspanse edilmiş hBN'ü göstermektedir. Saf hBN ile görünür bir suda çözünürlük yoktur, ancak hidroksillenmiş malzeme, şişenin dibinde az miktarda çökelti içeren bulanık bir süspansiyonla sonuçlanmıştır (Şekil 4b). AFM görüntüleme için tabakaları fraksiyonlara ayırmak için santrifüjleme kullanılmadığından, görüntü tüm asılı malzeme popülasyonunu temsil etmektedir. Bu eksfoliasyon yönteminin büyük miktarda malzeme üretebileceği ve önemli ölçüde fonksiyonelleştirilmiş yapısı nedeniyle BNO'nun dolgu malzemesi olarak işlev görebileceği bildirilmiştir.

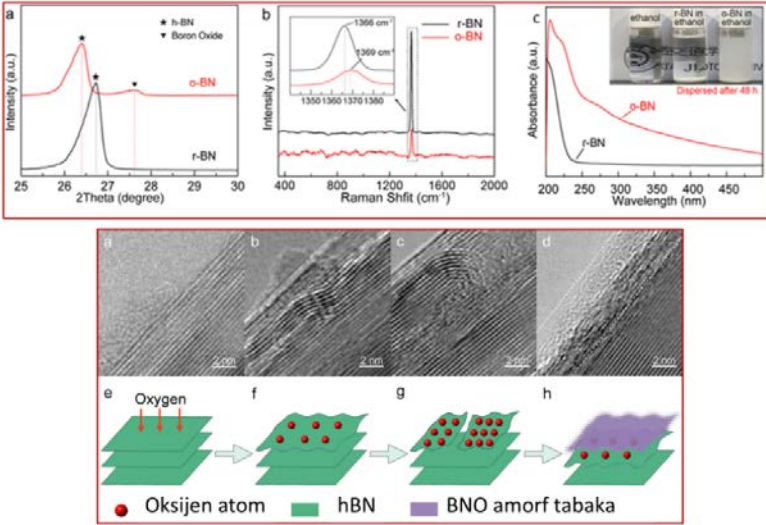


Şekil 4. a) Suda fonksiyonsuz hBN, b) Suda fonksiyonelleştirilmiş ve eksfolide hBN. c) Oksitlenmiş ve eksfolide hBN tabakalarının AFM görüntüsü (Cui ve diğerleri, 2014a).

Jin ve arkadaşları (Jin ve diğerleri, 2016), düşük sıcaklıkta oksitleyerek hBN'nin fonksiyonelleştirilmesini araştırdıkları çalışmada hBN parçacıklarının yüzeyinde oksijen açısından zengin bir amorf tabaka gözlemişlerdir. Oksidasyonun erken evrelerinde oksijen, hBN'nin yüzey kusurlarına girerken, süreç ilerledikçe daha fazla oksijenin kafese yerleşmesi yerel kafes bozulmalarına ve yüzeyde amorf bor oksit tabakasının oluşumuna yol açtığını belirlemişlerdir. Şekil 5.1'de bulunan sonuç grafik ve görselleri yer almaktadır. XRD paternindeki ve raman pik şiddetindeki azalma ile beraber kaymalar yapısal kusurların oluşmasına ve tabakalar arası mesafe artışına atfedilebilir (Cui, Oyer, Glover, Schniepp ve Adamson, 2014b; Mazhar ve diğerleri, 2023; Zhang ve diğerleri, 2017). UV'de daha yüksek absorpsiyon göstermesi, oksidasyonun yapısal kusurlar ve yüzey pürüzlülüğü oluşturması sonucu saçılmaya ve fonksiyonelleşme sonucu hBN dispersiyonuna bağlı soğurmanın arttığını göstermektedir.

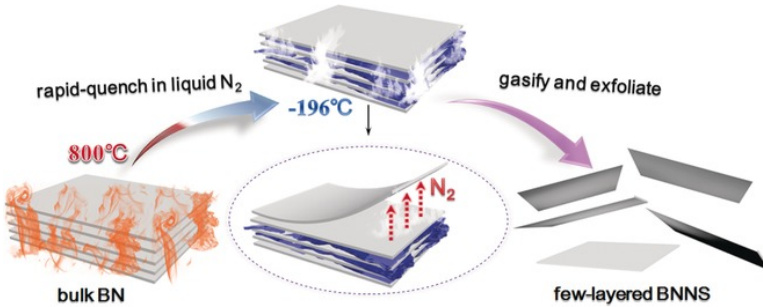
Şekil 5.2'de farklı oksidasyon sürelerine sahip tozlar üzerinde (0 saat, 12 saat, 48 saat, 144 saat) HRTEM sonuçlarına göre; oksidasyonun ilk evrelerinde, oksijen atomları hBN yapısındaki bor ve azot boşluklarına yerleşerek bu kusurlu bölgelerde kimyasal bağlanma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu durumun, tabakalar arasındaki mesafenin artmasına ve kristal

yapı içinde yerel çıkıkların oluşmasına yol açtığı düşünülmektedir (Mazhar ve diğerleri, 2023). Oksidasyon süresi uzadıkça, kafese daha fazla oksijenin girmesiyle yüzey gerilimin artarak katmanlar arası van der Waals bağlarını aşarak tabakaların ayrılmasını sağladığı bildirilmiştir. Çatlak bölgelerdeki yüksek reaktif kenarların oksijenin kolayca nüfuz etmesine ve yoğun B-O bağlarının oluşmasına neden olduğu ve süreç ilerledikçe, bu reaksiyonların hBN'nin düzenli hekzagonal yapısını bozarak yüzeyde amorf bor oksit tabakalarının oluşmasına ve malzemenin üst katmanlarının amorflaşmasına yol açacağı HRTEM görselleri ve ilüstrasyon çizimi ile yapısal değişim gösterilmiştir (Jin ve diğerleri, 2016). Sonuç olarak, bu yöntem hBN malzemelerinin yüzey reaktivitesini artırarak polimerler ve cam eriyikleriyle olan ıslanabilirliğini geliştirme potansiyeli açısından oldukça umut verici bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 5. (1) a) XRD desenleri, b) Raman spektrumları ve c) etanol içindeki r-BN ve o-BN'nin UV-vis spektrumları, ekte etanol, r-BN ve o-BN'nin etanol içindeki fotoğrafı gösterilmektedir. (2) Farklı oksidasyon sürelerine sahip hBN tozlarının HRTEM görüntüleri a) 0 saat b) 12 saat c) 48 saat d) 144 saat ve oksidasyon sürecinin şematik gösterimi (e-h).

Termal yöntem ve gaz eksfoliasyonunun birlikte kullanıldığı çalışmada, ultra ince BNNS'lerin verimli üretimi için termal genleşme temelli bir gaz eksfoliasyon yöntemi geliştirilmiştir (Şekil 6). Yöntem, ticari hBN'nin 800 °C'de ısıtılması ve ardından hızla sıvı azota (L-N₂) daldırılması esasına dayanır. Bu ani sıcaklık farkı, hBN katmanlarında termal gerilim oluşturarak tabakaların birbirinden ayrılmasını sağlar. Elde edilen ürün, alkol ortamında sonikasyon ve santrifüj işlemleriyle saflaştırılmıştır (Zhu ve diğerleri, 2016). Isıtma-soğutma döngüsü sırasında meydana gelen eşit olmayan termal genleşme ve büzülme, hBN katmanları arasında kalıcı termal gerilimlerin oluşmasına yol açar. c ekseninde hesaplanan termal genleşme katsayısı çok daha büyüktür ve düzlem içi yöne göre neredeyse 300 kat daha fazladır. Bu gerilimler, düzlem içi güçlü bağlara kıyasla zayıf van der Waals etkileşimlerinin hakim olduğu ara katmanlarda yoğunlaşarak bağların zayıflamasına neden olur. Dolayısıyla, yapısal bütünlük bozulur ve eksfoliasyon önemli ölçüde kolaylaşır (Yan ve diğerleri, 2020). Sonuç olarak, bu yöntem kimyasal reaktif gerektirmemesi, kısa işlem süresi, yüksek verim, ölçeklenebilirlik ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunmaktadır. Üretilen BNNS'ler, düzenli nanolevha morfolojisine ve geniş özgül yüzey alanına sahip olup, yöntem aynı zamanda diğer katmanlı malzemelerin eksfoliasyonu için de uygulanabilir niteliktedir.



Şekil 6. Termal genleşme ile tetiklenen hBN'nin gaz eksfoliasyonu şematik gösterimi (Zhu ve diğerleri, 2016)

Yan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise (Yan ve diğerleri, 2020), hBN'nin iki boyutlu faza doğru termal eksfoliasyon süreci, gerçek zamanlı X-ışını kırınım (XRD) ölçümleriyle incelenmiştir. Numuneler havada 1263 °K'ye kadar yaklaşık 4 °K/dk hızla ısıtılmış ve daha sonra fırında soğumaya bırakılmıştır. Kırınım verileri, dedektör üzerindeki halkaların entegrasyonu yoluyla toplanmıştır. Eksfoliasyon işlemini tamamlamak amacıyla, termal olarak işlenmiş toz sıcak su ile yıkanmış, ardından 473 °K'de 4 saat kurutulmuş ve son olarak 30 dakika damıtılmış suda sonikasyona tabi tutulmuştur. X-ışını kırınımı sonuçları, ısıtma sürecinde hBN'nin c ekseninde doğrusal genleşme, buna karşılık a ekseninde 750 °K'ye kadar büzülme ve daha yüksek sıcaklıklarda yeniden genleşme gösterdiğini ortaya koymuştur. c ekseninde hesaplanan termal genleşme katsayısı düzlem içi yöne göre çok daha büyüktür. Bu gerilimler ara katmanlarda yoğunlaşarak bağların zayıflamasına neden olur. Sonuç olarak, yapısal bütünlük bozulur ve sonraki yıkama adımı eksfoliasyonu önemli ölçüde kolaylaştırır. İşlem esnasında in-situ olarak alınan XRD profillerinde yeni oksidasyon piklerinin bulunmaması, sürecin oksidasyon katkısı olmadan gerçekleştiğini göstermektedir.

BNNS üretimi için hBN, sodyum klorür (NaCl) ve potasyum klorür (KCl) tuzlarının birlikte karıştırılıp 800 °C'de hava atmosferinde termal işlem uygulanması sonucu ekfoliasyon işleminin yapıldığı bir çalışmada mevcuttur (Sun ve Sun, 2023). Isıl işlem sonrası ürün, deiyonize suyla yıkanarak tuzdan arındırılmış ve ardından etanol/su karışımında 2 saat sonikasyona tabi tutulmuş ve sonrasında santrifüj edilerek supernatan faz alınmış ve kurutularak BNNS tozu elde edilmiştir. BNNS'lerin hekzagonal simetrik yapısının görünür kusurlar olmaksızın bozulmadan kaldığı ve tuz ile kimyasal reaksiyon gerçekleşmediği bulunmuştur. Büyük yanal boyutlara ve düşük

kusur yoğunluğuna sahip ultra ince BNNS'lerin başarıyla üretildiği gösterilmiştir.

Genel olarak, hBN'nin termal eksfoliasyonu çok kademeli bir süreçtir ve aşağıdaki faktörlerle kontrol edilebilir:

- İşlem sıcaklığı ve süresi (kafes bozulması ve oksidasyon derecesi üzerinde etkili)
- Ortam atmosferi (hava, nemli hava, inert gaz, su buharı)
- Isıtma/soğutma hızı (termal gerilim ve tabaka ayrılma verimi)
- Yüzey fonksiyonelleşmesi (OH, B-O, B-OH gibi grupların varlığı)
- Sonikasyon ve mekanik ayrıştırma koşulları

Bu süreç değişkenleri kontrol altında tutularak hBN tabakalarından iki boyutlu BNNS yapıları elde edilebilir.

4. SONUÇLAR

Termal eksfoliasyon süreci, hBN malzemesinin katmanlı yapısına uygun olarak, tabakalar arası van der Waals etkileşimlerinin kontrollü biçimde zayıflatılmasına dayanır. Farklı atmosfer koşulları, sıcaklıklar ve ısıtma işlem süreleri, oksijenin ve su buharının yapıya difüzyonunu değiştirerek oksidasyon derecesini ve yüzey fonksiyonelleşmesini belirler. Bu süreçte, c ekseninde gerçekleşen yüksek orandaki genleşme, düzlem içi bağlara göre çok daha büyüktür ve ara tabakalarda kalıcı termal gerilimlerin birikmesine neden olur. Yüksek sıcaklıkta oksijenin kafese yerleşmesiyle yüzeyde bor oksit ve hidroksil grupları oluşur; bu gruplar tabakalar arası bağları zayıflatarak sonikasyon sonrası kolay eksfoliasyon sağlar. NaCl-KCl tuz ortamı, sıvı azot şoklama veya sıcak su yıkama gibi destekleyici işlemler, verimliliği ve yapısal bütünlüğü artırır. Sonuç olarak, kimyasal reaktif kullanılmadan, çevre dostu,

ölçeklenebilir ve yüksek verimliliğe sahip bu yöntemle, yüksek yüzey alanına sahip, iyi tanımlanmış BNNS'ler elde edilebilmektedir. Termal eksfoliasyonla üretilen ve yüzeyleri fonksiyonelleştirilen h-BNNS'ler; suda artırılmış çözünürlük, iyileştirilmiş termal iletkenlik, yüksek kimyasal kararlılık ve mükemmel biyouyumluluk gibi üstün özellikleri sayesinde, yüksek sıcaklığa dayanıklı kompozitler, elektronik ve ısı yönetim sistemleri, dielektrik katmanlar, biyomedikal uygulamalar ve UV fotodedektörleri gibi ileri teknoloji alanlarında geniş ve kapsamlı kullanım potansiyeli sunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Acosta, S., Pérez-Luna, V., Sánchez-Balderas, G., Hernández-Meza, J. M., Yáñez-Soto, B., Quintana, M., ... Quintana, M. (2023). Wetting properties of thin films of exfoliated hexagonal boron nitride in different solvents. *Revista mexicana de física*, 69(4). doi:10.31349/REVMEXFIS.69.041607
- Ay, N., Göncü, Y. ve Ay, G. M. (2020). Bor Nitrür: Üretimi ve Uygulamalardaki Son Gelişmeler. *BorenYayınları* içinde (ss. 217–234).
- Cao, L., Emami, S. ve Lafdi, K. (2014). Large-scale exfoliation of hexagonal boron nitride nanosheets in liquid phase. *Materials Express*, 4(2), 165–171. doi:10.1166/MEX.2014.1155
- Cui, Z., Oyer, A. J., Glover, A. J., Schniepp, H. C. ve Adamson, D. H. (2014a). Large Scale Thermal Exfoliation and Functionalization of Boron Nitride. *Small*, 10(12), 2352–2355. doi:10.1002/SMLL.201303236
- Cui, Z., Oyer, A. J., Glover, A. J., Schniepp, H. C. ve Adamson, D. H. (2014b). Large scale thermal exfoliation and functionalization of boron nitride. *Small*, 10(12), 2352–2355. doi:10.1002/SMLL.201303236
- Dadvand, M. ve Savadogo, O. (2022). Effect of hBN on Corrosion and Wear Performances of DC Electrodeposited NiW and NiW–SiC on Brass Substrates. *Coatings 2022, Vol. 12, Page 1011*, 12(7), 1011. doi:10.3390/COATINGS12071011
- Falin, A., Cai, Q., Santos, E. J. G., Scullion, D., Qian, D., Zhang, R., ... Li, L. H. (2017). Mechanical properties of atomically thin boron nitride and the role of interlayer

- interactions. *Nature Communications*, 8(1), 1–9. doi:10.1038/NCOMMS15815;TECHMETA
- Garro Mena, L. ve Hohn, K. L. (2021). Modification of hexagonal boron nitride by thermal treatment. *Journal of Materials Science*, 56(12), 7298–7307. doi:10.1007/S10853-020-05719-8/FIGURES/10
- Gautam, C. ve Chelliah, S. (2021). Methods of hexagonal boron nitride exfoliation and its functionalization: covalent and non-covalent approaches. *RSC Advances*, 11(50), 31284–31327. doi:10.1039/D1RA05727H
- Ghosh, A., Shukla, U., Shrivastava, P. ve Alam, S. N. (2024). Liquid Exfoliation of Hexagonal Boron Nitride. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33(11), 5364–5379. doi:10.1007/S11665-023-08876-4/FIGURES/13
- Gonzalez Ortiz, D., Pochat-Bohatier, C., Cambedouzou, J., Bechelany, M. ve Miele, P. (2018). Exfoliation of Hexagonal Boron Nitride (h-BN) in Liquide Phase by Ion Intercalation. *Nanomaterials 2018, Vol. 8, Page 716*, 8(9), 716. doi:10.3390/NANO8090716
- Guo, S., Profile, S., Zhu, J. ve Li, X. (2016). Thin h-BN nanosheets synthesized using probe ultrasonication for dual functional applications. doi:10.22261/ON7EWL
- Hazarika, C., Neog, G., Roy, E., Gogoi, D., Das, M. R., Sarmah, K., ... Wu, K. C. W. (2024). Hydroxyl functionalized hexagonal boron nitride quantum dots as nanozyme for pesticides sensing through dual colorimetric and fluorometric platform: A combined experimental and theoretical study. *Chemical Engineering Journal*, 500, 156365. doi:10.1016/J.CEJ.2024.156365

- Jiang, N., Liu, S., Zheng, R., Tong, Z., Iqbal, J., Bai, Y., ... Peng, T. (2025). Efficient and simple exfoliation and functionalization techniques of h-BN for enhancing thermal management in electronics. *Surfaces and Interfaces*, 58, 105879. doi:10.1016/J.SURFIN.2025.105879
- Jin, H., Li, Y., Li, X., Shi, Z., Xia, H., Xu, Z. ve Qiao, G. (2016). Functionalization of hexagonal boron nitride in large scale by a low-temperature oxidation route. *Materials Letters*, 175, 244–247. doi:10.1016/j.matlet.2016.04.008
- Khan, N., Li, J. ve Edgar, J. H. (2022). The thermal oxidation of hexagonal boron nitride single crystals: Dry and ambient air compared. *MRS Communications*, 12(1), 74–82. doi:10.1557/S43579-021-00143-8
- Koroglu, L., Ayas, E. ve Ay, N. (2024). BNNS formation through surface modification of hBN nanopowders with a silane coupling agent. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 45(8), 1562–1573. doi:10.1080/01932691.2023.2222806
- Kostoglou, N., Polychronopoulou, K. ve Rebholz, C. (2015). Thermal and chemical stability of hexagonal boron nitride (h-BN) nanoplatelets. *Vacuum*, 112, 42–45. doi:10.1016/j.vacuum.2014.11.009
- Kostoglou, N., Stock, S., Solomi, A., Holzapfel, D. M., Hinder, S., Baker, M., ... Mitterer, C. (2024). The Roles of Impurities and Surface Area on Thermal Stability and Oxidation Resistance of BN Nanoplatelets. *Nanomaterials 2024, Vol. 14, Page 601, 14(7)*, 601. doi:10.3390/NANO14070601
- Kostoglou, N., Tampaxis, C., Charalambopoulou, G., Constantinides, G., Ryzhkov, V., Doumanidis, C., ...

- Rebholz, C. (2020). Boron nitride nanotubes versus carbon nanotubes: A thermal stability and oxidation behavior study. *Nanomaterials*, 10(12), 1–9. doi:10.3390/nano10122435
- Li, L. H., Cervenka, J., Watanabe, K., Taniguchi, T. ve Chen, Y. (2014). Strong oxidation resistance of atomically thin boron nitride nanosheets. *ACS Nano*, 8(2), 1457–1462. doi:10.1021/NN500059S/SUPPL_FILE/NN500059S_SI_001.PDF
- Li, X., Hao, X., Zhao, M., Wu, Y., Yang, J., Tian, Y. ve Qian, G. (2013). Exfoliation of Hexagonal Boron Nitride by Molten Hydroxides. *Advanced Materials*, 25(15), 2200–2204. doi:10.1002/ADMA.201204031
- Mazhar, H., Adamson, D. H. ve Al-Harthi, M. A. (2023). Differently oxidized portions of functionalized hexagonal boron nitride. *Materials Chemistry and Physics*, 308(September 2022), 128243. doi:10.1016/j.matchemphys.2023.128243
- Posudievsky, O. Y., Khazieieva, O. A., Cherepanov, V. V., Dovbeshko, G. I., Koshechko, V. G. ve Pokhodenko, V. D. (2016). Efficient dispersant-free liquid exfoliation down to the graphene-like state of solvent-free mechanochemically delaminated bulk hexagonal boron nitride. *RSC Advances*, 6(52), 47112–47119. doi:10.1039/c6ra08312a
- Rafiei-Sarmazdeh, Z., Jafari, S. H. ve Ahmadi, S. J. (2020). A green chemistry approach for facile synthesis of functionalized boron nitride nanosheets. *Journal of Nanostructures*, 10(1), 64–75. doi:10.22052/JNS.2020.01.008

- Roy, S., Zhang, X., Puthirath, A. B., Meiyazhagan, A., Bhattacharyya, S., Rahman, M. M., ... Ajayan, P. M. (2021, 1 Kasım). Structure, Properties and Applications of Two-Dimensional Hexagonal Boron Nitride. *Advanced Materials*. John Wiley and Sons Inc. doi:10.1002/adma.202101589
- Smith McWilliams, A. D., Martínez-Jiménez, C., Matatyaho Ya'Akobi, A., Ginestra, C. J., Talmon, Y., Pasquali, M. ve Martí, A. A. (2021). Understanding the Exfoliation and Dispersion of Hexagonal Boron Nitride Nanosheets by Surfactants: Implications for Antibacterial and Thermally Resistant Coatings. *ACS Applied Nano Materials*, 4(1), 142–151. doi:10.1021/ACSANM.0C02437/SUPPL_FILE/AN0C02437_SI_001.PDF
- Songfeng, E., Liu, J., Zhao, R., Ning, D. ve Lu, Z. (2023). Formation Mechanisms of Hexagonal Boron Nitride Nanosheets in Solvothermal Exfoliation. *Langmuir*, 39(4), 1619–1628. doi:10.1021/ACS.LANGMUIR.2C03049/SUPPL_FILE/LA2C03049_SI_001.PDF
- Sun, G. ve Sun, X. (2023). Scalable exfoliation of h-BN into boron nitride nanosheets by molten salt-assisted thermal treatment in air. *Materials Letters*, 341, 134244. doi:10.1016/J.MATLET.2023.134244
- Wang, J., Xu, X., Mu, X., Ma, F. ve Sun, M. (2017). Magnetism and spintronics on two-dimensional composite materials of graphene/hexagonal boron nitride. *Materials Today Physics*, 3, 93–117. doi:10.1016/J.MTPHYS.2017.10.003
- Wang, L., Bai, Y., Ma, Z., Ge, C., Guan, H. ve Zhang, X. D. (2021). Tribological performances of hexagonal boron nitride nanosheets via surface modification with silane

- coupling agent. *SN Applied Sciences*, 3(3), 1–10. doi:10.1007/S42452-021-04390-1/FIGURES/8
- Weng, Q., Wang, X., Wang, X., Bando, Y. ve Golberg, D. (2016). Functionalized hexagonal boron nitride nanomaterials: emerging properties and applications. *Chemical Society Reviews*, 45(14), 3989–4012. doi:10.1039/C5CS00869G
- Wu, X. feng, Zhao, Z. hua, Sun, Y., Li, H., Zhang, C. xu, Wang, Y. jin, ... Zhang, H. (2017). Few-layer boron nitride nanosheets: Preparation, characterization and application in epoxy resin. *Ceramics International*, 43(2), 2274–2278. doi:10.1016/j.ceramint.2016.10.206
- Yan, Z., Abdelkader, A., Day, S., Tang, C., Casiraghi, C. ve Mirihanage, W. (2020). In situ probing of the thermal treatment of h-BN towards exfoliation. *Nanotechnology*, 32(10), 105704. doi:10.1088/1361-6528/ABCE2E
- Yılmaz, Z. (2017). Bor Nitrür Silisyum Karbür Kompozitlerin Sentezi Ve Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi. *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir*.
- Yu, Baokang, Fan, J., He, J., Liu, Y., Wang, R., Qi, K., ... Luo, Z. (2023). Boron nitride nanosheets: Large-scale exfoliation in NaOH-LiCl solution and their highly thermoconductive insulating nanocomposite paper with PI via electrospinning-electrospraying. *Journal of Alloys and Compounds*, 930, 167303. doi:10.1016/j.jallcom.2022.167303
- Yu, Bin, Xing, W., Guo, W., Qiu, S., Wang, X., Lo, S. ve Hu, Y. (2016). Thermal exfoliation of hexagonal boron nitride for effective enhancements on thermal stability, flame retardancy and smoke suppression of epoxy resin nanocomposites via sol–gel process. *Journal of Materials*

Chemistry A, 4(19), 7330–7340.
doi:10.1039/C6TA01565D

Zhang, B., Wu, Q., Yu, H., Bulin, C., Sun, H., Li, R., ... Xing, R. (2017). High-efficient liquid exfoliation of boron nitride nanosheets using aqueous solution of alkanolamine. *Nanoscale Research Letters*, 12(1), 0–6. doi:10.1186/s11671-017-2366-4

Zhu, W., Gao, X., Li, Q., Li, H., Chao, Y., Li, M., ... Dai, S. (2016). Controlled Gas Exfoliation of Boron Nitride into Few-Layered Nanosheets. *Angewandte Chemie - International Edition*, 55(36), 10766–10770. doi:10.1002/ANIE.201605515

KATI YAĞLAYICILAR: YAPISAL ÖZELLİKLERİ, TRIBOLOJİK MEKANİZMALARI, MODERN KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Nuri ERGİN¹

Necati KOÇAK²

1. GİRİŞ

Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarını inceleyen çok disiplinli bir alan olup, modern endüstride enerji yönetimi, malzeme sürdürülebilirliği ve sistem güvenilirliği açısından stratejik öneme sahip bir bilim dalıdır. Dünya genelinde enerji tüketiminin yaklaşık %23'ünün sürtünme ve aşınma kaynaklı kayıplar olduğu ve günümüzde her miktarının önem arz ettiği enerjinin büyük bir kısmının boşa harcandığı tahmin edilmektedir. Enerjideki bu kayıp taşıtlarda yakıt tüketimini, sanayide verimsizliği, makine bakım maliyetlerini ve dolaylı olarak karbon salımlarını artırmaktadır. Bu nedenle yağlama teknolojilerinin geliştirilmesi küresel ölçekte ekonomik ve çevresel bir öneme sahiptir [1,2].

Sıvı yağlayıcılar geniş bir kullanım alanına sahip olmakla birlikte, bazı servis şartlarında işlevini yitirip yüzeyler arasında

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID: 0000-0001-9025-9419.

² Arş. Gör., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Türkiye, ORCID: 0000-0002-0768-3479.

kayma direncinin artmasına neden olmaktadır. Sıvı yağlayıcılar, buhar basıncı, uzay ve yüksek vakum ortamlarında yağlayıcı filmin hızla buharlaşmasından dolayı uzay araçlarında, uydularda ve uydu güneş paneli mekanizmalarında kullanılamazlar. 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşan oksidatif bozunma, karbonizasyon ve viskozite çökmesi gibi mekanizmalar yağ filmi bütünlüğünü bozacağından sıvı yağlayıcılar özelliğini yitirmektedir. Asidik, bazik, reaktif gaz veya radyasyon ortamları sıvı yağların moleküler yapısını bozmaktadır. Mikrokanallara sıkışma, kapiler kuvvetler ve yüzey gerilimi sıvı yağların kullanılmasını engellemektedir. Tüm bu olumsuzluklar sıvı yağlayıcıların kullanımlarını sınırlandırmakta ve ekstrem çalışma koşullarında yetersiz kılmaktadır. Bu durumlarda katı yağlayıcılar alternatif olarak kullanılmaktadır. Katı yağlayıcılar; yüzeye toz, film, kaplama veya kompozit faz olarak uygulanır. Böylece yüzeyler arası kayma direnci azalmakta ve enerji verimliliği artmaktadır [3].

2. KLASİK KATI YAĞLAYICILAR

2.1. Grafit

Grafit, karbon atomlarının sp^2 hibritleşerek oluşturduğu altıgen katmanlı bir yapıdadır. Katmanlar arasındaki bağlar zayıf van der Waals etkileşimlerinden oluşmakta, bu da grafitte düşük kesme dayanımı kazandırmaktadır. Nem varlığı, grafitin yağlayıcılık performansı için kritik olup yüzeyde su moleküllerinin adsorpsiyonu grafit tabakalarının ayrılmasını kolaylaştırmaktadır. Grafitin “intrinsik” (öz) bir katı yağlayıcıdan çok, yüzeyinde adsorplanmış su buharı veya hidrokarbon türü gaz fazı bileşenlerinin varlığına bağlı olarak iyi yağlama sağlayan bir malzeme olduğu vurgulanmaktadır. Özellikle klasik çalışmalarda, vakum veya inert gaz ortamında grafitin sürtünme katsayısının belirgin şekilde yükseldiği, buna karşın nemli atmosferde hem

sürtünme katsayısının hem de aşınmanın önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Daha güncel çalışmalar ise, grafit yüzeyinde su moleküllerinin hem fiziksel hem de kısmen kimyasal adsorpsiyonla bağlandığını, bu ince moleküler filmin kusurları pasifleştirerek tabakaların kaymasını kolaylaştırdığını ve “adsorpsiyon modeli” olarak bilinen açıklamayı desteklediğini göstermektedir. Grafitin yağlayıcı performansının özellikle bağıl nem ve ortam atmosferine duyarlı olduğu pek çok deneysel çalışmada gösterilmiştir. Neme bağılı sürtünme davranışını inceleyen çalışmalarda, belirli bir kritik sıcaklık veya temas koşulunun üzerinde, ortamda yeterli su buharı bulunmaması durumunda sürtünme ve aşınmada ani artışlar gözlenmektedir. Benzer şekilde, yüksek bağıl nemde grafit parçacıklarının aglomerasyon eğilimi gösterdiği, bunun da aşırı yapışmalı aşınmaya ve katmanlı yapının kısmi kaybına yol açtığı rapor edilmiştir. Sıcaklık etkisine ilişkin çalışmalarda ise, grafitin düşük–orta sıcaklıklarda (yaklaşık oda sıcaklığından 300–400 °C’ye kadar) özellikle atmosferik şartlarda etkin bir yağlayıcı olduğu; daha yüksek sıcaklıklarda ise oksidasyonun devreye girerek grafitin yapısal bütünlüğünü bozduğu ve yağlayıcı performansı düşürdüğü bildirilmiştir. Bununla birlikte, uygun matris malzemeler ve koruyucu fazlarla tasarlanan yüksek sıcaklık kaplamalarında grafit, 600 °C ve üzerine çıkan sıcaklıklarda dahi düşük sürtünme katsayısı ve iyi aşınma direnci sağlayabilmektedir. Grafit, yalnız başına toz veya film formunda kullanılabildiği gibi, polimer reçineler, metal matrisler veya inorganik bağlayıcılarla birlikte kompozit veya kaplama şeklinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapılar, grafitin yağlayıcı özelliğini taşıyıcı fazın mekanik dayanımıyla birleştirerek hem sürtünme katsayısını düşürmekte hem de aşınma direncini artırmaktadır [4,5].

Grafit:

- Sürtünme katsayısı: $\mu \approx 0.05-0.10$
- Yüksek sıcaklık toleransı: $\sim 500^{\circ}\text{C}$ (inert atmosferde 2000°C 'nin üzerine kadar kararlı)
- Elektriksel iletkenlik yüksek
- Nem bağımlılığı uygulamada bazı kısıtlılıklar oluşturmaktadır.

2.2. Molibden Disülfür (MoS_2)

Molibden disülfür (MoS_2), lamelli kristal yapıya sahip bir geçiş metal dikalkojenididir. Her tabaka, altıgen bir dizilim içerisinde molibden atomlarının sülfür atomları arasında sandviçlenmiş yapısıyla karakterizedir. Tabakalar içindeki atomlar güçlü kovalent bağlarla bağlıdır; buna karşın tabakalar arası van der Waals kuvvetleri oldukça zayıftır. Bu yapı, tabakaların birbirleri üzerinde düşük kayma gerilmesi ile hareket etmesine olanak tanır ve MoS_2 'yi verimli bir katı yağlayıcı haline getirir. MoS_2 'nin yağlama mekanizması, temas yüzeylerinde lamellerin kayma yönünde hizalanması ve bu süreçte yüzeyler arasında düşük sürtünmeli bir kayma filminin oluşmasına dayanmaktadır. Bu film, hem sürtünmeyi düşürür hem de yüzey pürüzlülüklerini doldurarak aşınmayı azaltır. Özellikle vakum ve inert gaz atmosferlerinde, MoS_2 tabakaları oksidasyona uğramadan stabil kaldığı için yağlama etkisi oldukça yüksektir. MoS_2 'nin tribolojik davranışı, ortam atmosferine bağlı olarak belirgin değişim gösterir. Vakum, inert gaz veya kuru atmosfer koşullarında MoS_2 , oldukça düşük sürtünme katsayısı ile üstün performans sergiler. Bu nedenle MoS_2 , uzay, havacılık ve vakum teknolojileri gibi yağlama için sıvıların kullanılmadığı uygulamalarda kritik rol oynamaktadır.

Buna karşın nemli atmosferde MoS_2 'nin performansı düşer. Su molekülleri ve oksijen, yüzeyde oksidasyon ürünleri

oluşturarak tabakalı yapının kayganlığını azaltır. Uzun süre yüksek nem altında kalan MoS₂ filmlerinde sürtünme artışı ve aşınma ivmelenmesi gözlemlenmiştir. Bu nedenle ortam kontrolü ve uygun kaplama yöntemleri, MoS₂ tabanlı yağlayıcı sistemlerin tasarımında önemli parametrelerdir [6,7].

MoS₂:

- Vakumda sürtünme katsayısı: $\mu \approx 0.02$
- Oksidasyon başlangıcı: $\sim 350\text{--}450^\circ\text{C}$
- Ekstrem basınç altında bile tabakalar kayabilmektedir.

2.3. Hekzagonal Bor Nitrür (h-BN)

“Beyaz grafit” olarak bilinen bu malzeme kimyasal olarak son derece inerttir. Hekzagonal bor nitrür (h-BN), kristal yapısal olarak grafitte benzer, tabakalı bir seramik malzemedir. Her tabaka, altıgen dizilimde düzenlenmiş bor ve azot atomlarından oluşur; tabakalar arası bağlanma zayıf van der Waals etkileşimleri ile sağlanırken, tabaka içindeki bağlar kuvvetli kovalent karakterdedir. Bu lamelli yapı, tabakaların birbirleri üzerinde kolayca kaymasına olanak tanır ve düşük sürtünmeli bir kayma filmi oluşturarak h-BN’nin katı yağlayıcı özellik göstermesini sağlar. Grafitten farklı olarak, h-BN kimyasal olarak inerttir ve oksidasyona karşı yüksek direnç gösterir. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda ve reaktif ortamlarda yapısal bütünlüğünü koruyabilir. Ayrıca elektriksel olarak yalıtıcıdır ve termal iletkenliği yüksek olup, sürtünmeyle oluşan ısının dağıtılması açısından avantaj sağlar. Literatürde h-BN’nin, grafit ve MoS₂’ye kıyasla atmosfer koşullarına daha az bağımlı olduğu belirtilmektedir. Nem ve oksijen varlığında performans kaybı sınırlıdır; ayrıca vakum ve inert gaz ortamlarında da kayma tabakalarının stabil olduğu ve düşük sürtünme katsayısı sağladığı rapor edilmiştir. Bu özellikler, h-BN’yi hem yüksek sıcaklık hem de kimyasal olarak agresif koşullarda tercih edilen bir katı

yağlayıcı haline getirmektedir. Oda sıcaklığının üzerinde, özellikle 800–1000 °C aralığında, h-BN'nin sürtünme katsayısı birçok metal oksitten daha düşüktür ve yapısal bozulma olmaksızın tribolojik performansını korur. Oksidasyon, izotermal koşullarda sınırlıdır ve yüzeyde oluşan ince bor oksit filmlerinin kayma tabakaları ile sinerji oluşturduğu bildirilmektedir [8,9].

h-BN:

- Sıcaklık dayanımı: 900°C üzeri
- Elektriksel olarak yalıtkandır.
- Korozyon dayanımı yüksektir.

3. POLİMERİK KATI YAĞLAYICILAR

3.1. PTFE

Politetrafloroetilen (PTFE), tetrafloroetilen monomerinin polimerizasyonu ile elde edilen, yüksek kristallilik derecesine sahip florlu bir polimerdir. Karbon iskeletinin tamamen flor atomları ile çevrilmiş olması, C–F bağının yüksek bağ enerjisi ve kimyasal kararlılığından kaynaklanan düşük yüzey enerjisi, PTFE'nin benzersiz kayganlık özelliklerinin temelini oluşturur.

PTFE'in tribolojik davranışı üç temel mekanizma ile açıklanmaktadır:

- yüzeyde düşük adezyon
- karşı yüzeye transfer filmi oluşumu
- sürtünme altında plastik akma ve soğuk akış davranışı

Temas sırasında PTFE'den kopan ince parçacıklar karşı yüzeye yapışarak, karşılıklı transfer film tabakası oluşturur. Bu film, iki yüzey arasında kaymayı kolaylaştırır ve sürtünme katsayısının düşük kalmasını sağlar. Buna karşın PTFE'nin yük altında deformasyona eğilimli olması, aşınma direncini sınırlayan

bir faktör olarak değerlendirilmektedir. PTFE'nin en karakteristik özelliği, oda sıcaklığında ve orta yüklerde son derece düşük sürtünme katsayısı göstermesidir (tipik olarak 0.05–0.1). Ancak saf PTFE:

- aşınma direncinin düşük,
- yük taşıma kapasitesinin sınırlı,
- sürünme (creep) ve soğuk akma davranışının belirgin

olması nedeniyle tek başına katı yağlayıcı olarak çoğu ağır tribolojik uygulamada yeterli değildir. Bu nedenle literatürde PTFE genellikle takviye fazları veya doldurucular ile birlikte değerlendirilir. PTFE'nin sürtünme ve aşınma davranışı, temas koşullarına ve çevresel parametrelere bağlıdır:

- düşük yüklerde yüksek verim,
- artan yük ve sıcaklık ile mekanik stabilite kaybı,
- yağlayıcı ortam varlığında transfer filminin kararlılığının artması

rapor edilmiştir [10,11].

PTFE'nin tribolojik performansını artırmak amacıyla kompozit tasarımlar yapılmaktadır. En yaygın katkılar; cam fiberler, karbon fiberler, MoS₂, grafit ve h-BN gibi lamelli yağlayıcılar, bronz, Al₂O₃, SiC gibi seramik fazlar, nano-dolgu fazları (grafen, CNT, nanokil vb.). Bu katkılar; yük taşıma kapasitesini artırır, aşınma direncini yükseltir, creep ve soğuk akma davranışını sınırlar, transfer filminin bütünlüğünü destekler. Özellikle karbon fiber takviyeli PTFE, yatak malzemelerinde ve sızdırmazlık elemanlarında yaygın olarak kullanılırken, bronz dolgulu PTFE yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir [12].

4. METALİK KATI YAĞLAYICILAR

Metalik katı yağlayıcılar, sürtünme temas yüzeylerinde ince ve sünek bir film oluşturarak kaymayı kolaylaştıran, metaller veya metal alaşımlarından oluşan malzemelerdir. Klasik örnekler arasında gümüş (Ag), kurşun (Pb), bakır (Cu), kalay (Sn) ve bunların bazı alaşımları yer almaktadır. Bu metallerin yağlayıcı etkisi üç temel mekanizmaya dayanır:

- sünek deformasyon sonrası ince film oluşumu
- yüzey pürüzlülüklerinin doldurulması
- metalik transfer filmlerinin temas yüzeyleri arasında kayma sağlaması

Sürtünme sırasında metal atomları karşı yüzeye transfer olur ve temas yüzeyleri arasında düşük makaslama dayanımlı bir ara film oluşur. Bu film, ağır yük koşullarında yüzey hasarını sınırlar ve sürtünmeyi azaltır. Metalik yağlayıcıların en önemli avantajlarından biri, yüksek sıcaklık dayanımıdır. Grafit, MoS₂ veya PTFE gibi yağlayıcılar belirli sıcaklık aralıklarının üzerinde bozulabilirken, metaller; oksidatif ortamlarda, yüksek temas sıcaklıkları altında, ağır yük koşullarında kalıcı yağlama etkisi sağlayabilir. Özellikle gümüş ve bakır, yüksek sıcaklıkta sürtünme yüzeylerinde ince bir film tabakası oluşturarak metal-metal kaynaklanmasını (seizing) engeller. Bu nedenle metalik katı yağlayıcılar; jet motorları, gaz tribünleri, yüksek sıcaklık rulmanları, uzay ve havacılık sistemleri gibi alanlarda kritik rol oynar. Kurşun ve kalay gibi düşük erime noktalı metaller, yüksek sıcaklıklarda kısmi ergime ile kayma sağlar; bu mekanizma “sınır yağlama” olarak tanımlanır. Ancak toksisite ve çevresel kısıtlamalar nedeniyle kurşun bazlı yağlayıcıların endüstriyel kullanımı giderek azalmaktadır [13,14].

5. KATI YAĞLAMA MEKANİZMALARI

5.1. Yapısal Kayma (Structural Shear) Mekanizması

Lamel yağlayıcıların temel avantajı, atomik düzlemler arası kaymanın çok düşük enerji gerektirmesidir. Grafit ve MoS₂ bu mekanizmayla çalışmaktadır.

Kesme Modülü Karşılaştırması:

Malzeme	Katman İçi Bağ	Katmanlar Arası Bağ	Kayma Direnci
Grafit	~5 eV	~0.3 eV	Çok düşük
MoS ₂	~4.5 eV	~0.2 eV	Çok düşük
WS ₂	~4.5 eV	~0.25 eV	Düşük

5.2. Tribofilm Oluşumu ve Tribokimyasal Reaksiyonlar

Katı yağlayıcıların %70'i tribofilm mekanizmasıyla çalışmaktadır. PTFE ve MoS₂ gibi yağlayıcılar sürtünme sırasında karşı yüzeyde kendiliğinden bir tribofilm oluşturmaktadır.

Tribokimyasal Ürünler:

- MoS₂ → MoO₃
- WS₂ → WO₃
- PTFE → karbonize polimer film
- DLC → grafitleşme tabakası

Bu filmler yüzeyin korunmasını ve sürtünmenin düşmesini sağlamaktadır.

Nano-Ölçekli Süperkayganlık

Superlubricity, $\mu < 0.01$ anlamına gelir.

Grafen-h-BN, MoS₂-grafen gibi hetero-yapılarda atomik uyumsuzluk (incommensurability) süperkayganlık oluşturur.

AFM çalışmalarında:

- $\mu \approx 0.0003$ 'e kadar düşüş
- Sürtünme neredeyse sıfır seviyesinde olabilmektedir.

6. MODERN KATI YAĞLAYICI KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ

Katı yağlayıcıların pratik mühendislikte kullanılabilmesi için yalnızca malzeme seçimi değil, bu malzemelerin yüzeylere doğru yöntemle uygulanması da kritik önem taşımaktadır. Kaplama teknolojileri, katı yağlayıcıların performansını doğrudan belirleyen; film kalınlığı, aderans, mikro yapı, saflık, porozite ve iç gerilme gibi parametreleri kontrol eden yüzey mühendisliği yöntemleridir. PVD, CVD, ALD, iyon ışını modifikasyonu, lazer kaplama, termal sprey teknikleri ve hibrit yöntemler katı yağlayıcı kaplama teknolojileri olarak tercih edilmektedir [15].

6.1. Fiziksel Buhar Biriktirme (Pvd) Kaplamaları

PVD, MoS₂, WS₂, DLC ve metalik katı yağlayıcıların üretiminde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, katı bir hedef malzemenin vakum veya inert atmosfer altında atomik ya da moleküler buhar fazına dönüştürülmesi ve bu buharın bir substrat üzerinde yoğunlaştırılması prensibine dayanan ince film kaplama süreçleridir. Sputtering, Magnetron ve Electron Beam yaygın olarak kullanılan üç fiziksel buhar biriktirme yöntemleridir [16,17].

6.2. Sputtering (Saçtırma) Kaplamaları

Sputtering, inert gaz plazması (genellikle Ar⁺) ile hedef yüzeyin bombardımanı sonucu atomların koparılıp altlık üzerine taşınmasıyla gerçekleşmektedir.

Avantajlar:

- Düşük altlık sıcaklığı
- Yüksek homojenlik
- Kaplama bileşiminin hassas kontrolü

MoS₂ Sputtering Kaplamalarının Özellikleri:

- Kolonlu mikro yapı (tribolojik performansı belirler)
- Vakum uygulamalarında $\mu = 0.02$
- Düşük nem koşullarında optimum performans

6.2.1. Magnetron sputtering

Magnetron, iyon yoğunluğunu artırarak kaplama hızını yükseltir. MoS₂-Ti ve MoS₂-TiN hibrit kaplamalar bu yöntemle üretilmiştir. Ti katkısının etkileri incelendiğinde sertlik ve aderans artarken, Sürtünme katsayısı (nemli ortamda) azalmaktadır.

Electron Beam (e-Beam) PVD

Yüksek saflıklı MoS₂ ve grafit kaplamaları için uygun bir tekniktir.

6.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (Cvd) Kaplamaları

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), gaz fazındaki kimyasal bileşiklerin yüksek sıcaklıkta bir yüzey üzerinde kimyasal reaksiyon geçirerek katı bir kaplama oluşturması prensibine dayanan ince film kaplama yöntemidir. Öncelikle alt tabaka (substrat) bir çukur (reaktör) içine yerleştirilir. Daha sonra sisteme uçucu öncül gazlar (prekürsörler) gönderilir. CVD genellikle yüksek sıcaklıkta çalışır. 500–1100 °C arası yaygındır (bazı proseslerde daha düşük olabilir). Bu sıcaklık gaz moleküllerini aktive eder. Gazlar substrat yüzeyine adsorbe olur ve burada reaksiyon başlar. Reaksiyon ürünü; katı formda yüzeye çöker ve film/kaplama oluşturur. Reaksiyon devam ettiği sürece

film katman katman büyür ve kalınlık mikrometre seviyelerine ulaşabilir. Kaplama kalınlığı gaz debisi, sıcaklık ve zaman ile kontrol edilir. Grafen, DLC, h-BN nanosheet, Si-DLC gibi modern yağlayıcı kaplamaların çoğu CVD ile üretilmektedir [18,19].

6.3.1. DLC (Diamond-Like Carbon) Kaplamaları

DLC, düşük sürtünme katsayısı ($\mu = 0.05\text{--}0.10$), yüksek sertlik (>20 GPa) ve kimyasal inertlik sunmaktadır.

Farklı DLC türleri:

- a-C (hidrojensiz amorf karbon)
- a-C:H (hidrojenli DLC)
- ta-C (tetrahedral amorf karbon; en yüksek sertlik)
- doped DLC (Si-DLC, W-DLC, Mo-DLC)

DLC kaplamaların tribolojik mekanizması, yüzey grafitleşmesi ve üst tabakada düşük kesme gerilimli bir karbon filmi oluşması şeklinde iki aşamalıdır.

6.3.2. Grafen CVD kaplamaları

Grafen, yüksek sıcaklıkta metaller üzerinde büyütülür.

Avantajlar:

- $\mu < 0.01$
- Atomik ölçekli film kalınlığı
- Korozyon direnci yüksek
- Chemisorption engeli düşük

Grafenin yağlayıcılık davranışı Raman spektroskopisi ile doğrulanmaktadır.

6.4. Atomik Katman Biriktirme (ALD)

ALD, atomik hassaslıkta ultra ince filmler elde etmek için kullanılmaktadır. Reaksiyonlar adım adım ve kendiliğinden sınırlanan (self-limiting) şekilde gerçekleşir. Bu sayede nanometre ölçeğinde kalınlık kontrolü sağlanır. Triboloji alanında henüz yeni uygulanmakla birlikte özellikle MoS₂, WS₂, NbS₂, TiO₂-süperlubriral filmler gibi malzemelerde çığır açmaktadır [20].

ALD'nin Avantajları

- Atomik kalınlık kontrolü
- Pürüzlülüğü düşük filmler
- Yüksek aderans
- Mikro ve nano ölçekli cihazlara uygunluk (MEMS)

6.5. İyon Işını Yüzey Modifikasyonu (İbad, İad)

İyon ışını yüzey modifikasyonu, yüzeye hızlandırılmış iyonların çarptırılması yoluyla mikro yapının, bileşimin, topografinin ve gerilme durumunun kontrollü şekilde değiştirilmesidir. Çalışma prensibine bakıldığında yüksek gerilim altında bir iyon kaynağında (DC veya RF) iyonlar üretilir, (genellikle 10–200 keV enerji aralığı). İyonlar elektrostatik veya elektromanyetik alanlarla hızlandırılır. Yüksek enerjili iyonlar yüzeye çarptığında yüzey atomları yer değiştirir, dışarı fırlatılabilir (sputtering), yüzeyde yeni bağlar oluşur. Bu, atomik düzeyde değişimler yaratır. Çarpma etkisi sonucunda sertlik artar, artık gerilmeler değişir, pürüzlülük kontrol edilir, difüzyon ve yapışma güçlenir. İyonlar yüzeye gömülerek alaşım benzeri bir tabaka oluşmasına neden olabilmektedir. İyon ışını yöntemleri kaplamanın mikro yapısını kontrol edebilmek açısından önemlidir. DLC altlık modifikasyonu, katı yağlayıcı kompozitlerin yapılandırılması ve tribolojik yüzey sertleştirme uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Özellikle MoS₂

kaplamalarında iyon bombardımanı; S/Mo oranını düzenler, kolon yapısını yoğunlaştırır ve aderansı artırmaktadır [21].

6.6. Lazer Kaplama ve Lazer Yüzey İşleme

Lazer tabanlı yöntemler; metal-polimer kompozitleri, seramik-katı yağlayıcı hibritlerini yüksek dayanımlı yapılar haline getirmektedir. Lazer yüzey eritmeli (LSM) WS₂ katkılı kaplamalar, 600°C üzerindeki oksidasyon koşullarına dirençlidir [22].

6.7. Termal Sprey Yöntemleri

Bu teknikler daha kalın (20–300 µm) yağlayıcı tabakalar elde etmek için kullanılmaktadır. HVOF (High Velocity Oxy-Fuel), APS (Atmospheric Plasma Spray) ve Flame spray en yaygın yöntemlerdir. Örnek verilecek olursa NiCr–hBN kompozit kaplamalar yüksek sıcaklık rulmanlarında kullanılmaktadır. Termal spre, kaplama malzemesinin yüksek sıcaklıkta eritilip gaz akımıyla hızlandırılarak bir yüzeye püskürtülmesiyle ince film veya kalın tabaka kaplama oluşturulan bir yüzey kaplama yöntemidir. Çalışma prensibine bakıldığında malzeme (toz/tel) termal kaynakla ısıtılır. Yarı ergimiş damlacıklar hızla yüzeye taşınır. Yüzeye çarpıp yassılaşır ve soğur. Ardışık damlacıklar tabaka tabaka birikir. Kalınlık mikrometre–milimetre arası kontrol edilir. Yüzey ile bağ yapışma ağırlıklıdır, ancak bazı süreçlerde metalürjik bağlanma da oluşabilir [23].

7. KOMPOZİT VE NANOKOMPOZİT KATI YAĞLAYICI SİSTEMLERİ

Kompozit katı yağlayıcılar, en az iki farklı fazın (genellikle bir matris fazı + yağlayıcı katkı fazı) bir araya getirilmesiyle oluşturulan, tek bir yağlayıcı malzemenin sınırlamalarını aşmak amacıyla geliştirilmiş çok fazlı malzemelerdir. Amaç, matrisin mekanik dayanımı ile yağlayıcı

fazın düşük sürtünme özelliklerini bir arada sunmaktır. Örneğin MoS₂'nin nem duyarlılığı veya PTFE'nin düşük mekanik dayanımı hibrit yapılarla iyileştirilebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan matris malzemelere polimerler için PTFE, PEEK, PA, epoxy; metaller için Al, Cu, Ni; seramikler için Al₂O₃, ZrO₂, Si₃N₄ örnek verilebilir. Yaygın olarak kullanılan katı yağlayıcı katkıları ise MoS₂ (Molibden disülfid), WS₂ (Tungsten disülfid), Grafit, h-BN (hexagonal boron nitride), PTFE mikro partikülleridir. Kompozit katı yağlayıcılar; geliştirilmiş aşınma direnci, geniş sıcaklık aralığında stabilite, metalik veya seramik matrislerde yük taşıma kapasitesi ve kendinden yağlamalı (self-lubricating) özellik gibi avantajlar sağlamaktadır [24].

7.1. Nanokompozit Katı Yağlayıcı Sistemleri

Nanokompozit katı yağlayıcı sistemleri, yağlayıcı fazın nanoölçekli (1–100 nm) parçacıklar, nanotüpler, nanosheets şeklinde matris içerisinde dağıtılmasıyla oluşturulan gelişmiş malzemelerdir. Nanoyapıların yüksek yüzey alanı ve tabakalı yapıları, tribolojik performansı klasik kompozitlere kıyasla belirgin şekilde iyileştirmektedir. Yaygın Nano Yağlayıcı Katkıları; MoS₂, WS₂ nanosheets veya fullerene benzeri nanoyapılar (IF-WS₂), Grafen ve indirgenmiş grafen oksit (rGO), h-BN nanoplateletler, CNT (karbon nanotüpler), Nano-diamant (ND). Nanokompozitler; daha düşük sürtünme katsayısı ($\mu < 0.02$ 'ye kadar düşebilir), film oluşumunun nano boyutta daha homojen olması, aşınma izlerinde daha ince, sürekli ve kararlı transfer film tabakası, düşük yüklerde ve yüksek hızlarda gelişmiş kayma davranışı ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci gibi avantajlar sağlamaktadır [25].

Performans Artış Mekanizmaları

- Tabakalı yapıların kayması (layer sliding): MoS₂, WS₂, grafen gibi 2D malzemelerde atomik katmanlar çok düşük enerjiyle kayabilir.

- Nano-doldurucu etkisi: Nano partiküller yüzey asperitelerini doldurarak daha düzgün bir temas yüzeyi sağlar.
- Koruyucu film oluşumu: Nanopartiküller yüzeyde kendiliğinden oluşan tribofilm tabakasını güçlendirir.
- Rulo/küre etkisi (fullerene-like nanoparticles): IF-WS₂ gibi nanoparçacıklar rulman etkisiyle sürtünmeyi düşürür.

Nanokompozit Katı Yağlayıcıların Uygulama Alanları

1. Ağır endüstri ve makine mühendisliği
 - Kendinden yağlamalı yataklar ve burçlar
 - Pompalar, kompresörlerde yağsız çalışan parçalar
2. Havacılık ve uzay
 - Yüksek sıcaklık (>400 °C) çalışan hareketli parçalar
 - Vakum ortamında yağ kaybı olmayan sistemler
3. Otomotiv
 - Fren sistemlerinde aşınma azaltıcı katkıları
 - Motor parçalarında tribolojik kaplama
4. Elektronik ve mikro-mekanik sistemler (MEMS/NEMS)
 - Mikro ölçekte yağlama gerektiren yüzeyler için nanofilm yapıları
5. Metal şekillendirme prosesleri
 - Sıcak dövme/sıcak ekstrüzyon kalıplarında yüksek sıcaklık yağlayıcılar

KAYNAKLAR

- [1] Martin, J. M., & Donnet, C. (1997). “Superlubricity: A state of ultra-low friction.” *Tribology International*, 30(8), 543–548.
- [2] Holmberg, K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263–284.
- [3] Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Butterworth-Heinemann.
- [4] Graphite-based solid lubricant for high-temperature lubrication — Wenjuan Huai, Chenhui Zhang, Shizhu Wen (2020)
- [5] Humidity-dependent lubrication of highly loaded contacts by graphite — Carina E. Morstein vd. (2022)
- [6] Spalvins, T. (1987). Tribological and mechanical properties of MoS₂ films. *Thin Solid Films*, 154(1–2), 267–283.
- [7] Martin, J. M., et al. (1993). The origin of superlubricity of MoS₂. *Science*, 259(5093), 1302–1305.
- [8] Wang, L., & Xue, Q. (2017). Tribological properties of hexagonal boron nitride and its composites: A review. *Tribology International*, 109, 557–572.
- [9] Murthy, N. S. (2020). Hexagonal boron nitride as a solid lubricant: structure, properties and applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5415–5434.
- [10] Chang, L., Zhang, Z., Ye, L., & Friedrich, K. (2007). Tribological properties of high-temperature-resistant polymer composites. *Wear*, 262(3–4), 327–334.

- [11] Blanchet, T. A. (1995). Surface interactions in PTFE sliding. Tribology Transactions, 38(3), 481–490.
- [12] Bahadur, S. (2000). The development of polymer-based composites for tribological applications. Wear, 240(1–2), 1–14.
- [13] Peterson, M. B., & Winer, W. O. (1980). Wear Control Handbook. ASME.
- [14] Chiu, Y. F., et al. (2011). Silver-based solid lubricants at high temperatures. Tribology International, 44(10), 1222–1230.
- [15] Voevodin, A. A., & Zabinski, J. S. (2000). Supertough wear-resistant coatings. Thin Solid Films, 370(1–2), 223–231.
- [16] Baptista, A. et al., Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands, Coatings, 2018.
- [17] Deng, Y. et al., Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review, Ceramics International, 2020.
- [18] Liskiewicz, T., & J. Celis, A. (2014). Advanced CVD coatings for tribology. Tribology Letters, 54(2), 139–150.
- [19] Bewilogua, K., & Dietz, A. (2000). State of the art in DLC coating. Surface and Coatings Technology, 127(2–3), 115–131.
- [20] A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications — R.W. Johnson, A. Hultqvist, S.F. Bent (2014)
- [21] “A Review of the Ion Beam Assisted Deposition Researches towards Industrialization for the Second Generation High-

Temperature Superconducting Wire Fabrication” — F. Feng vd., 2013.

[22] A Review of the Laser Cladding of Metal-Based Alloys for Surface Modification — P. Zhao vd., 2023.

[23] Applications of Thermal Spray Coatings: A Review” — U.P. Gaur & Emarti Kamari, 2024

[24] Nanocomposite and nanostructured tribological materials (Voevodin & Donnet, 2005).

[25] A Review of Nanomaterials with Different Dimensions as Lubricant Additives (Liu vd., 2022).

VISCOSITY MEASUREMENT AND MODELING OF STEELMAKING SLAGS

Mustafa SEYREK¹

1. INTRODUCTION

In modern steelmaking and continuous casting operations, slags and mold fluxes play a fundamental role in controlling process efficiency, product quality, and operational stability. While primary and secondary metallurgical slags are essential for refining reactions such as desulfurization, deoxidation, and inclusion removal, mold fluxes are specifically designed to operate in the mold region during continuous casting, where solidification, lubrication, and heat transfer occur simultaneously. Among the various physical and chemical properties governing slag and mold flux behavior, viscosity stands out as one of the most critical parameters influencing their performance (Mills & Fox, 2003; Cho et al., 2013).

Mold fluxes, also commonly referred to as casting powders, are granular or powdered materials added to the top surface of molten steel in the mold during continuous casting. Upon contact with the molten steel, the mold flux undergoes a sequence of transformations, including melting, infiltration into the mold-shell gap, and partial solidification, forming a multilayer slag film between the copper mold wall and the solidifying steel shell. This film typically consists of a liquid layer adjacent to the steel shell and a solid or semi-solid layer near the mold wall. The physical properties of this slag film directly

¹ Hitit University, Vocational School of Technical Sciences, ORCID: 0000-0001-5386-4804.

govern lubrication conditions, heat flux, and surface quality of the cast strand (Mills & Fox, 2003; Shin et al., 2006; Shin et al., 2014).

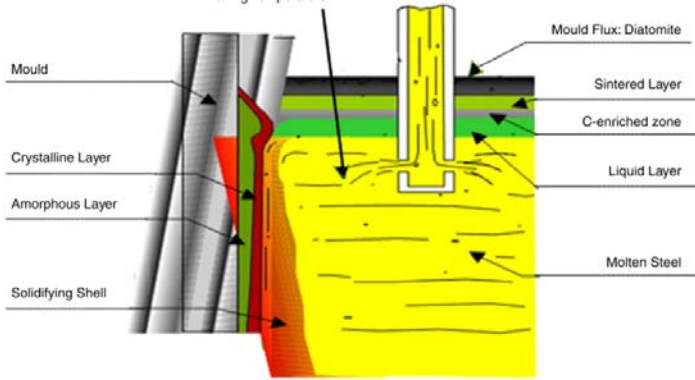


Figure 1. Schematic illustration of the role of mold flux in the continuous casting mold, showing the molten steel, solidifying shell, mold flux powder, and the formation of liquid and solid slag film layers between the copper mold wall and the steel shell (Chafic et al.,2026).

The primary functions of mold fluxes can be summarized as follows: (i) providing effective lubrication to reduce friction between the mold wall and the solidifying shell, (ii) controlling heat transfer to ensure uniform solidification and prevent surface defects, (iii) protecting the molten steel surface from atmospheric oxidation, (iv) absorbing non-metallic inclusions, and (v) stabilizing the meniscus to suppress surface turbulence and powder entrapment (Shin et al. 2006; Bielnicki & Jowsa, 2018; Ende & Jung, 2014). The successful fulfillment of these functions requires a carefully balanced combination of chemical composition and thermo-mechanical properties (Meng & Thomas, 2006; Ende & Jung, 2014; Li et al., 2021).

Typical mold fluxes are complex, multicomponent oxide systems primarily based on $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ compositions, with additional constituents such as MgO , Na_2O , K_2O , Li_2O , and, in

conventional formulations, CaF_2 . The basicity ratio (CaO/SiO_2) is a key design parameter that influences melt structure, crystallization tendency, and viscosity. Alkali oxides are often added to lower melting temperature and viscosity, while Al_2O_3 content may vary depending on steel grade and casting conditions (Gao et al. 2016). In recent years, increasing environmental concerns and refractory compatibility issues have driven the development of low-fluorine and fluorine-free mold fluxes, further increasing the complexity of flux design (Sohn et al., 2012).

The performance of mold fluxes is governed by a range of thermo-mechanical properties, including melting temperature, viscosity, surface tension, thermal conductivity, crystallization behavior, and break temperature (Kim et al. 2010; Lee et al., 2004). These properties are interrelated and strongly dependent on both temperature and composition. For example, crystallization within the slag film can significantly reduce heat transfer, while changes in melt structure directly affect viscosity and lubrication performance. As a result, understanding the structure–property relationships of mold fluxes is essential for optimizing continuous casting operations (Li et al., 2025; Li et al., 2015; Zhang et al., 2025).

Among all thermo-mechanical properties, viscosity is particularly critical, as it directly controls flux melting behavior, infiltration into the mold–shell gap, lubrication efficiency, and the formation of stable slag films. If the viscosity of the mold flux is excessively high, melting and spreading are hindered, leading to inadequate lubrication and increased risk of surface defects such as cracks or oscillation marks. Conversely, overly low viscosity may result in excessive flux consumption, unstable meniscus behavior, and increased slag entrapment in the steel. Moreover, viscosity exhibits strong sensitivity to temperature and slag structure, making its accurate prediction particularly challenging

under industrial casting conditions (Yao et al., 2015; Duan et al., 2016).

Due to the extreme temperatures involved and the complex chemical nature of mold fluxes, direct experimental measurement of viscosity remains difficult and often limited to simplified laboratory conditions (Mills, 2004; Cramb & Jimbo, 1989). Consequently, predictive models for mold flux viscosity have become indispensable tools for both researchers and industry. These models, ranging from empirical correlations to structure-based and computational approaches, provide essential insights into flux behavior and support the rational design of mold flux compositions (Riboud et al., 1981; Urbain, 1987; Iida et al., 2000). Against this background, this chapter focuses on the prediction of viscosity in steelmaking slags and mold fluxes, with particular emphasis on modeling approaches applicable to continuous casting operations.

Steelmaking slags are complex, multi-component oxide melts that play a pivotal role in the efficiency, quality, and environmental impact of metallurgical processes (Mills & Keene, 1990; Zhang & Fruehan, 1995). The viscosity of these slags is a fundamental property that governs their flow behavior, heat and mass transfer, and the separation of metal from slag during steelmaking operations (Turkdogan, 1996). Understanding the fundamentals of slag viscosity, the factors influencing it, and the development of predictive models is essential for optimizing process control, improving resource efficiency, and minimizing operational issues in steelmaking.

The viscosity of steelmaking slags is primarily determined by their chemical composition and temperature, but is also significantly affected by the presence of solid phases, crystallization behavior, and the evolution of the slag structure during processing (Mills, 2004; Iida et al., 2000). The interplay

between these factors results in a complex, non-linear relationship between slag composition, structure, and viscosity, necessitating a detailed investigation of each contributing aspect (Urbain, 1987; Seetharaman et al., 2014).

2. THEORETICAL BACKGROUND OF SLAG VISCOSITY

The viscosity of metallurgical slags is primarily governed by their chemical composition, temperature, and melt structure. Steelmaking slags are complex multicomponent oxide melts, and their flow behavior cannot be described solely by classical liquid theories. Instead, structural models based on the nature of oxide networks provide a more appropriate framework (Mills, 2004).

The silicate network theory is widely used to explain slag viscosity behavior. According to this theory, the degree of polymerization of the silicate network determines the resistance of the melt to flow. Network-forming oxides such as SiO_2 and Al_2O_3 create three-dimensional polymerized structures, which increase viscosity. In contrast, basic oxides such as CaO , MgO , FeO , and MnO act as network modifiers by breaking silicate bonds and forming non-bridging oxygens, thereby reducing viscosity.

Temperature exerts a strong influence on slag viscosity by altering both ionic mobility and melt structure. The temperature dependence of viscosity is commonly described using an Arrhenius-type relationship:

$$\eta = A \exp \left(\frac{E}{RT} \right)$$

where η is the viscosity, A is the pre-exponential factor, E is the activation energy for viscous flow, R is the universal gas constant, and T is the absolute temperature. This relationship

highlights the exponential sensitivity of viscosity to temperature, which is a critical consideration in steelmaking operations where relatively small temperature fluctuations can lead to significant changes in slag behavior (Urbain, 1987).

3. EMPIRICAL AND SEMI-EMPIRICAL VISCOSITY MODELS

Due to the complexity of slag systems, numerous empirical and semi-empirical models have been developed to estimate viscosity as a function of composition and temperature (Riboud et al., 1981; Urbain, 1987; Iida et al., 2000).. These models balance predictive accuracy with computational simplicity, making them suitable for practical applications.

3.1. Urbain Model

The Urbain model was originally developed for silicate melts and later adapted for metallurgical slags. It estimates viscosity based on oxide composition and temperature by incorporating parameters related to melt basicity and structural characteristics. Owing to its relatively simple formulation and reasonable predictive accuracy, the Urbain model has been widely used in studies of steelmaking slags and mold fluxes (Urbain, 1987; Mills, 2004).

3.2. Riboud Model

The Riboud model was specifically designed for steelmaking slags and mold fluxes. It considers the effects of basicity and the concentrations of major oxides such as CaO, SiO₂, Al₂O₃, and MgO. The model has demonstrated good agreement with experimental data for industrial slag compositions, making it a practical and widely adopted tool in steel plants for viscosity estimation and flux design (Riboud et al., 1981).

3.3. Iida Model

The Iida model introduces structural parameters to explicitly account for the degree of polymerization in oxide melts. In particular, it incorporates the fraction of non-bridging oxygens as a key variable influencing viscosity. This structural basis makes the model especially suitable for slags with complex compositions and varying degrees of network breakdown, such as high- Al_2O_3 or low-basicity slags (Iida et al., 2000; Mills, 2004).

3.4. Mills Model

Additional approaches include the Mills model and various correlations derived from experimental data on quenched slags. For mold powders containing fluorides, modified viscosity equations are often required, as fluorine significantly alters melt structure and reduces viscosity. These models are particularly relevant in the development of fluorine-free or low-fluorine mold fluxes for environmentally sustainable steelmaking (Mills, 2004).

3.5. Thermodynamic and Computational Tools for Viscosity Prediction

Beyond empirical models, modern computational tools provide powerful capabilities for predicting slag viscosity over wide composition and temperature ranges (Seetharaman et al., 2014).

Thermodynamic software packages such as FactSage and Thermo-Calc utilize comprehensive databases to calculate phase equilibria and estimate viscosity based on slag composition and temperature. These tools are especially valuable for predicting viscosity near liquidus temperatures and in systems where solid–liquid coexistence affects slag flow behavior (Bale et al., 2016; Andersson et al., 2002).

The MELTS software, originally developed for geoscientific applications, has also been adapted to metallurgical

slags. It offers valuable insights into silicate melt structure and viscosity, particularly for systems dominated by silicate networks (Ghiorso & Sack, 1995).

More recently, machine learning approaches, including artificial neural networks and multivariate regression models, have emerged as promising tools for slag viscosity prediction. Trained on extensive experimental datasets, these models can rapidly estimate viscosity for complex multicomponent slags and are well suited for integration into digital steelmaking and Industry 4.0 frameworks. However, their reliability depends strongly on data quality and coverage (Zhang et al., 2018; Gao et al., 2020).

4. EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF SLAG AND MOLD FLUX VISCOSITY

Although predictive models are widely used for estimating slag and mold flux viscosity, experimental measurement remains essential for understanding slag rheology and for validating and calibrating viscosity models. However, the experimental determination of viscosity in steelmaking slags and mold fluxes is inherently challenging due to the extreme temperatures involved, typically ranging from 1200 to 1700 °C, as well as the chemical reactivity and compositional complexity of these oxide melts (Mills, 2004).

Steelmaking slags and mold fluxes are multicomponent systems that may undergo structural changes, volatilization, oxidation–reduction reactions, and crystallization during measurement. As a result, viscosity measurements are often conducted under controlled laboratory conditions that may not fully replicate industrial environments (Cramb & Jimbo, 1989). Nevertheless, several high-temperature experimental techniques

have been developed and successfully applied to metallurgical slags.

4.1. Rotational Viscometry

Rotational viscometry is the most commonly employed method for measuring the viscosity of molten slags and mold fluxes. In this technique, a spindle or bob is rotated at a constant speed within the molten slag, and the torque required to maintain rotation is measured and related to the viscosity of the melt (Mills, 2004). Rotational viscometers allow continuous measurement over a wide temperature range and are particularly useful for investigating the temperature dependence of viscosity.

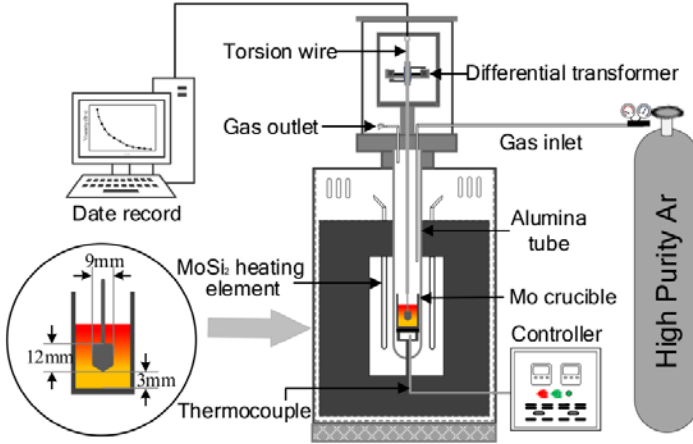


Figure 2. Schematic of an experimental apparatus for slag viscosity measurement using a high-temperature viscometer (Fang et al. 2021)

Despite its advantages, rotational viscometry presents several experimental challenges. Chemical interaction between the slag and crucible or spindle materials can alter slag composition during measurement. Additionally, measurements near the liquidus temperature may be affected by the onset of crystallization or the presence of suspended solid phases, leading to deviations from Newtonian behavior (Mills, 2004). Careful

selection of crucible materials, atmosphere control, and experimental protocols is therefore required to obtain reliable data.

4.2. Oscillating Cup Method

The oscillating cup method determines viscosity by measuring the damping of oscillations of a crucible containing molten slag. The viscosity is calculated from the rate at which oscillations decay, without requiring direct mechanical contact between moving components and the slag (Seetharaman et al., 2014). This method is particularly suitable for very high-temperature measurements and minimizes contamination from rotating parts.

The oscillating cup method provides reliable viscosity data for fully liquid slags but is less suitable for systems exhibiting significant crystallization or solid–liquid coexistence. Moreover, the technique requires precise calibration and sophisticated instrumentation, which limits its widespread industrial application (Mills, 2004).

4.3. Falling Sphere Method

In the falling sphere method, a solid sphere is allowed to descend through molten slag, and the terminal velocity of the sphere is used to calculate viscosity based on Stokes' law (Mills & Keene, 1990). This method is conceptually simple and can be applied to high-viscosity slags. However, its accuracy is strongly influenced by experimental factors such as buoyancy corrections, wall effects, and uncertainties in sphere–slag interactions (Seetharaman et al., 2014).

The falling sphere method is therefore mainly used for fundamental studies and benchmark measurements rather than routine industrial applications.

4.4. Experimental Challenges and Limitations

All high-temperature viscosity measurement techniques face common challenges related to temperature control, slag volatilization, compositional changes, and interaction with crucible materials. In mold flux systems, the presence of fluorides and alkali oxides further complicates measurements due to evaporation and rapid changes in melt composition (Cramb & Jimbo, 1989; Mills, 2004). Additionally, laboratory measurements typically assume homogeneous and fully liquid slags, whereas industrial slags often contain solid phases and experience dynamic thermal and chemical gradients.

Consequently, experimentally measured viscosities should be interpreted with caution and are best used in combination with thermodynamic calculations and predictive models. Experimental data provide indispensable benchmarks for model development, while modeling approaches enable extrapolation to industrial conditions that are difficult or impossible to reproduce experimentally (Seetharaman et al., 2014).

REFERENCES

- Andersson, J. O., et al. (2002). *Thermo-Calc and DICTRA, computational tools for materials science*. Calphad, 26, 273–312.
- Bale, C. W., et al. (2016). *FactSage thermochemical software and databases—2010–2016*. Calphad, 54, 35–53.
- Bielnicki, M. and Jowsa, J. (2018). Physical Modeling of Mold Slag Entrainment in Continuous Steel Casting Mold with Consideration the Impact of Mold Powder Layer. *Steel Research International*, 89(9).
<https://doi.org/10.1002/srin.201800110>
- Chafic-Thomas Salame P, Meradi H, Atoui L, Bahloul L, Labiod K, Ismail F (2016), "Characterization of diatomite from Sig region (West Algeria) for industrial application". *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 27 No. 3 pp. 281–288, doi: <https://doi.org/10.1108/MEQ-04-2015-0057>
- Cho, J., Blazek, K., Frazee, M., Yin, H., Park, J. H., & Moon, S. (2013). Assessment of CaO–Al₂O₃ Based Mold Flux System for High Aluminum TRIP Casting. *ISIJ International*, 53(1), 62–70.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.62>
- Cramb, A. W., & Jimbo, I. (1989). *The role of mold fluxes in continuous casting*. *Ironmaking & Steelmaking*, 16(1), 31–36.
- Duan, W., Yu, Q., Liu, J. X., Wang, K., Xie, H., Qin, Q., ... & Han, Z. (2016). Research on characteristics and modelling estimation of molten BF slag viscosity in the process of slag waste heat recovery. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(10), 730–738.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1234733>

- Ende, M. V. and Jung, I. (2014). Development of a Thermodynamic Database for Mold Flux and Application to the Continuous Casting Process. *ISIJ International*, 54(3), 489-495.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.489>
- Fang, J., Pang, Z., Xing, X., & Xu, R. (2021). Thermodynamic Properties, Viscosity, and Structure of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃–TiO₂–Based Slag. *Materials*, 14(1), 124.
<https://doi.org/10.3390/ma14010124>
- Gao, J., Wen, G., Huang, T., Bai, B., Tang, P., & Liu, Q. (2016). Effect of Al Speciation on the Structure of High-Al Steels Mold Fluxes Containing Fluoride. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(12), 3941-3947.
<https://doi.org/10.1111/jace.14444>
- Gao, Y., Zhang, L., & Seetharaman, S. (2020). *Machine learning modeling of transport properties of metallurgical slags*. *ISIJ International*, 60, 1234–1243.
- Ghiorso, M. S., & Sack, R. O. (1995). *Chemical mass transfer in magmatic processes IV: A revised and internally consistent thermodynamic model for silicate liquids*. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119, 197–212.
- Kim, H., Kim, W. H., Park, J. H., & Min, D. J. (2010). A Study on the Effect of Na₂O on the Viscosity for Ironmaking Slags. *Steel Research International*, 81(1), 17-24.
<https://doi.org/10.1002/srin.200900118>
- Lee, Y. S., Min, D. J., Jung, S. M., & Yi, S. H. (2004). Influence of Basicity and FeO Content on Viscosity of Blast Furnace Type Slags Containing FeO. *ISIJ International*, 44(8), 1283-1290.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1283>

- Li, G., Si, X., Chen, S., Wang, Q., He, S., & Zhang, X. (2025). Study on the Role of MgO in High-Basicity Mold Flux for Ultrawide Slab Peritectic Steel. *Steel Research International*. <https://doi.org/10.1002/srin.202401047>
- Li, J., Lai, F., Leng, M., Chen, Y., & Liu, Q. (2021). Effect of Cooling Rate on the Structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$ -based Glassy Mold Flux. *ISIJ International*, 61(5), 1532-1538. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2020-423>
- Li, J., Shu, Q., & Chou, K. (2015). Effect of Agitation on Crystallization Behavior of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2$ Mold Fluxes with Varying Basicity. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 46(4), 1555-1563. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0357-3>
- Iida, T., Sakai, H., Kita, Y., & Shigeno, Y. (2000). *A model for estimating viscosity of molten slags*. *ISIJ International*, 40(Suppl.), S110–S114.
- Meng, Y. and Thomas, B. G. (2006). Simulation of Microstructure and Behavior of Interfacial Mold Slag Layers in Continuous Casting of Steel. *ISIJ International*, 46(5), 660-669. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.660>
- Mills, K. C., & Keene, B. J. (1990). *Physicochemical properties of slags*. *International Materials Reviews*, 35(4), 185–216.
- Mills, K. C. (2004). *The Influence of Structure on the Physico-Chemical Properties of Slags*. *ISIJ International*, 44(10), 1661–1676.
- Mills, K. C. and Fox, A. B. (2003). The Role of Mould Fluxes in Continuous Casting-So Simple Yet So Complex. *ISIJ*

- International, 43(10), 1479-1486.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1479>
- Riboud, P. V., Roux, Y., Lucas, L. D., & Gaye, H. (1981). *Improvement of continuous casting powders*. Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung, 19, 859–869.
- Seetharaman, S., et al. (2014). *Treatise on Process Metallurgy, Volume 1: Process Fundamentals*. Elsevier.
- Shin, H., Kim, S., Thomas, B. G., Lee, G., Park, J., & Sengupta, J. (2006). Measurement and Prediction of Lubrication, Powder Consumption, and Oscillation Mark Profiles in Ultra-low Carbon Steel Slabs. *ISIJ International*, 46(11), 1635-1644.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1635>
- Shin, S., Cho, J., & Kim, S. (2014). Shear Thinning Behavior of Calcium Silicate-Based Mold Fluxes at 1623 K. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(10), 3263-3269.
<https://doi.org/10.1111/jace.13149>
- Sohn, I., Wang, W., Matsuura, H., Tsukihashi, F., & Min, D. J. (2012). Influence of TiO₂ on the Viscous Behavior of Calcium Silicate Melts Containing 17 mass% Al₂O₃ and 10 mass% MgO. *ISIJ International*, 52(1), 158-160.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.158>
- Turkdogan, E. T. (1996). *Fundamentals of Steelmaking*. The Institute of Materials, London.
- Urbain, G. (1987). *Viscosity estimation of slags*. *Steel Research*, 58, 111–116.
- Yao, L., Ren, S., Wang, X., Liu, Q., Ling-yan, D., Jin-fu, Y., ... & Liu, J. (2015). Effect of Al₂O₃, MgO, and CaO/SiO₂ on Viscosity of High Alumina Blast Furnace Slag. *Steel*

Research International, 87(2), 241-249.
<https://doi.org/10.1002/srin.201500021>

Zhang, L., & Fruehan, R. J. (1995). *Effect of slag properties on inclusion removal*. Metallurgical and Materials Transactions B, 26, 803–812.

Zhang, D., Han, X., Liu, L., Guo, J., Yang, Y., & Wu, L. (2025). Physical Properties of Mold Flux and Mineralogical Characteristics of Flux Film for Low-alloy Peritectic Steel Continuous Casting. Materials, 18(18), 4298.
<https://doi.org/10.3390/ma18184298>

Zhang, L., Wang, Z., & Seetharaman, S. (2018). *Prediction of viscosity of molten slags using artificial neural networks*. Metallurgical and Materials Transactions B, 49, 119–129.

SENSÖRLER, FOTOVOLTAİKLER VE TEKSTİL TABANLI FONKSİYONEL SİSTEMLER İÇİN METAL OKSİT İNCE FİLMLER

Mehmet Fatih GÖZÜKIZIL¹

Enes NAYMAN²

1. GİRİŞ

İnce film malzemeler fiziksel avantajlar sayesinde çok çeşitli kullanın alanına sahiptir. Nanometre–mikrometre ölçeğinde biriktirilen yarı iletken ve metal oksit ince filmler; yüzey etkilerinin baskın hâle gelmesi, ayarlanabilir elektronik bant yapıları nedeniyle sensör teknolojileri, fotovoltaik aygıtlar ve fonksiyonel kaplamalar gibi birçok ileri teknoloji uygulamasında tercih edilmektedir. İnce film yüzey özellikleri; kimyasal bileşimleri, film kalınlığı, kristal yapı, tane boyutu, yüzey morfolojisi ve arayüz gibi fiziksel parametreye bağlı olarak düzenlenebilmektedir (Leturcq et al., 2022; Sakthinathan et al., 2025; Yusuf et al., 2025).

Metal oksit ince filmler, geniş bant aralıkları, yüksek kimyasal ve termal kararlılıkları, çevresel dayanıklılıkları ve üretim süreçlerinin ölçeklenebilir olması nedeniyle sensör ve enerji uygulamalarında kullanılmaktadır. (Gozukizil et al., 2024b, 2024a; Nayman et al., 2024) ZnO, TiO₂, NiO ve SnO₂ gibi oksitler; farklı kristal fazlar, intrinsik ve ekstrinsik defekt yapıları

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı Programı, ORCID: 0000-0003-1719-959X.

² Dr. Öğretim Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Söğüt Meslek Yüksekokulu, Moda Tasarımı Programı, ORCID: 0000-0002-3656-3126.

ile n-tipi veya p-tipi yarı iletken özellikleri göstermektedir (Ceramics TiO et al., 2025; Tekin et al., 2023). Metal oksitlerde iletkenlik mekanizmaları; oksijen boşlukları, yüzey durumları, tane sınırı potansiyel bariyerleri ve arayüzlerde oluşan temaslar ile sağlanabilmektedir. Metal oksit ince filmlerin fonksiyonel performansları, fiziksel mekanizmaları ile bağlantılı olarak gelişerek, değişebilmektedir (Xuan et al., 2020).

İnce film sensörler ve ince film güneş pilleri cihazlarında performans taşıyıcı yoğunluğu, difüzyon uzunluğu, yaşam süresi, yüzey yeniden birleşme hızları ve defekt enerji seviyeleri gibi dolaylı fiziksel parametreler ile belirlenebilir. Bu parametrelerin deneysel olarak ayrıştırılması ve izole edilmesi zordur ve sonuçlar çoğu zaman çoklu etkileşimlerin birleşimiyle değişir. İnce film büyüme süreçleri, altlık özellikleriyle etkileşim halindedir. Düz ve sert altlıklar (cam, silikon, safir vb.) için geliştirilen klasik ince film büyüme modelleri; lifli, gözenekli ve heterojen yapılara sahip tekstil altlıklar için doğrudan uygulanabilir değildir. Tekstil yüzeyleri; iplik büküm açısı, lif çapı dağılımı, gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü ve kapiler davranış gibi kendine özgü geometrik ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu özellikler, ince filmin sürekliliğini, kalınlık dağılımını ve elektriksel iletkenlik yapısının oluşumunu etkilemektedir. (S Liu et al., 2023; Ojstršek et al., 2022a; Zhang et al., 2022)

Tekstil tabanlı fonksiyonel ince filmler, giyilebilir sensörler, esnek enerji toplama sistemleri, çevresel izleme uygulamaları ve akıllı yüzeylerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde gözlenen performans, ince film ile tekstil yüzeylerinin etkileşimi ve deneysel koşullara bağlı olarak değişmektedir. Lif geometrisi ve yüzey özelliklerinin elektriksel, optik ve algılama performansı üzerindeki etkilerinin öngörülmesi kuramsal yaklaşımlarla mümkün olabilmektedir. Metal oksit ve tekstil yüzeyi etkileşiminin fiziksel temellerinin anlaşılması,

sensör hassasiyetinin, enerji dönüşüm veriminin ve uzun dönemli kararlılığın rasyonel biçimde optimize edilmesine olanak sağlamaktadır (Akter et al., 2024; Dejene, 2025; Yin & Sun, 2025). Bu yaklaşım, malzeme seçimi ve yapı tasarımı fiziksel tutarlılığı esas alan bir değerlendirme zemini sunmaktadır.

2. İNCE FİLM FİZİĞİ VE YÜK TAŞIMA MEKANİZMALARI

İnce film sistemlerde elektriksel ve optoelektronik davranış, hacimsel malzemelerden farklı olarak yüzey ve arayüz etkilerinin baskın hâle gelmesiyle belirlenmektedir. Film kalınlığının taşıyıcıların ortalama serbest yoluna veya difüzyon uzunluğuna yakın olduğu durumlarda, klasik hacimsel iletim yaklaşımları yetersiz kalmakta ve taşıyıcı taşınımı büyük ölçüde mikro-yapısal ve yüzey kaynaklı mekanizmalar tarafından kontrol edilmektedir. Bu nedenle ince film fiziğinin anlaşılmasında enerji bant yapısı, yüzey durumları, tane sınırları ve arayüzlerde oluşan yüklenmeler birlikte değerlendirilmelidir (Chawla et al., 2011; Mayadas & Shatzkes, 1970; Seto, 1975).

Yarı iletken ince filmlerde elektronik özellikler, iletkenlik ve valans bantları arasındaki enerji farkı ile bu bantlar arasındaki Fermi seviyesi yerine bağlıdır. Metal oksit ince filmlerde serbest taşıyıcı yoğunluğu ideal kristal yapıdan değil, oksijen boşlukları, metal interstisyelleri ve yüzey durumları gibi noktasal kusurlarıyla belirlenir (Linn et al., 2025; Sun et al., 2023). Bu kusurlar, taşıyıcı yoğunluğunu ve iletkenlik tipini belirleyerek film iletkenliği üzerinde etkilidir. Metal oksitler ince filmlerde iletkenlik, malzeme bileşimine, defekt dağılımına ve yüzey özelliklerine bağlı olarak şekillenmektedir (Gardon & Guilemany, 2013; C Wang et al., 2010a; Y Wang et al., 2021).

İnce filmlerde elektriksel iletim, elektrik alan etkisi altında taşıyıcıların sürüklenmesi ve konsantrasyon

gradyanlarından kaynaklanan difüzyon süreçlerinin birleşimi ile gerçekleşmektedir. Film kalınlığının azalmasıyla, taşıyıcı hareketliliği, kristal kusurlar, tane sınırları ve yüzey saçılması nedeniyle hacimsel malzemelere kıyasla belirgin biçimde düşmektedir. Sensör ve ince film güneş pili uygulamalarında taşıyıcıların etkin biçimde toplanmasını sınırlayan faktörlerden biridir (A Kumar & Ranjan, 2021; Y Wang et al., 2021).

Polikristalin ince filmlerde taşıyıcı taşınımı, büyük ölçüde tane sınırlarında oluşan potansiyel bariyerler tarafından kontrol edilmektedir. Tane sınırlarında biriken tuzak yükler, taşıyıcıların komşu taneler arasında geçişini zorlaştırarak iletkenliği sınırlandırmaktadır. Metal oksit ince film sensörler, sıcaklığa bağlı iletkenlik değişimleri ve aktivasyon enerjisi ile ilişkilendirilen prensiple çalışmaktadır.

Metal oksit ince filmlerde yüzey alanının hacme oranla yüksek olması, yüzey durumlarını taşıyıcı taşınımının belirleyici unsurudur. Yüzeyde gerçekleşen oksijen adsorpsiyonu, serbest taşıyıcıların yakalanmasına ve yüzeyde boşalma bölgelerinin oluşmasına neden olarak etkin iletken kanalın daralmasına yol açmaktadır. Gaz sensörlerinde, indirgen veya yükseltgen gazların yüzey reaksiyonları sonucunda bu adsorplanmış türlerin dönüşümü gerçekleşmekte ve yüzey potansiyelinin değişmesiyle sensör tepkisi oluşmaktadır. Tane boyutunun film kalınlığına yaklaşmasında, yüzey etkileri daha baskınlaşarak hassasiyet artışı oluşur (Ochoa-Muñoz et al., 2023; C Wang et al., 2010a).

İnce film güneş pillerinde taşıyıcı taşınımı; ışık soğurulması sonucu oluşan elektron–delik çiftlerinin ayrışması ve elektrotlara taşınması süreçleridir. Yüksek defekt yoğunluğu, taşıyıcı yaşam süresini kısaltarak yeniden birleşme kayıplarını artırmakta ve açık devre gerilimi ile doluluk faktörünü olumsuz yönde etkilemektedir (Ameen et al., 2019).

Tekstil altlıklar üzerine biriktirilen ince filmlerde taşıyıcı taşınımı, düz ve sert altlıklara kıyasla daha karmaşık bir davranış sergilemektedir. Lifli ve gözenekli yapı, film sürekliliğini ve iletim yollarını doğrudan etkileyerek elektriksel iletkenliğin lifler arası temas noktalarında oluşan bağlantılı ağlar üzerinden gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu tür sistemlerde iletkenlik, etkin ortam yaklaşımları ile açıklanabilmekte ve bağlantılılık eşiğine yakın bölgelerde doğrusal olmayan elektriksel davranışlar gözlenmektedir. Bu özellikler, tekstil tabanlı ince film sistemlerini esnek ve giyilebilir sensör uygulamaları açısından özgün ve işlevsel kılmaktadır (Ojstršek et al., 2022a; Tseghai et al., 2020).

3. METAL OKSİT İNCE FİMLER: ELEKTRONİK YAPI VE KUSUR FİZİĞİ

Metal oksit ince filmler, elektronik yapılarını belirleyen kristal simetri, bağ karakteri ve defekt kimyası nedeniyle yarı iletken malzeme olarak tercih edilmektedir (Borysiewicz, 2019; Morgan & Watson, 2010). ZnO, TiO₂, NiO ve SnO₂ gibi oksitler; geniş bant aralığına sahip, intrinsik ve ekstrinsik defektlerin varlığı sayesinde elektriksel olarak aktif hâle gelebilmektedir. Fonksiyonel performansları, ideal bant yapıları defekt seviyelerinin enerji bantları içerisindeki konumu ve yoğunluğu ile belirlenmektedir. Metal oksitlerde elektronik yapı, metal ve oksijen bağlarının iyonik, kovalent karakteri ve oksijen alt kafesinin düzeni ile doğrudan ilişkilidir. Oksijen boşlukları, metal interstisyelleri ve iyonik yer değiştirmeler, taşıyıcı yoğunluğunu ve Fermi seviyesinin konumunu kontrol eden başlıca faktörlerdir (Applications et al., 2023; Filippatos et al., 2023; Z Wang et al., 2024).

3.1. ZnO İnce Filmler: n-Tipi Davranış ve Oksijen Boşluklarının Rolü

ZnO, hekzagonal wurtzite kristal yapıya sahip, doğrudan bant aralıklı bir yarı iletken olup bant aralığı yaklaşık 3.2–3.4 eV aralığındadır. ZnO ince filmlerde gözlenen baskın iletkenlik tipi çoğunlukla n-tipi karakterdedir ve bu davranış temel olarak oksijen boşlukları ve çinko interstisyelleri gibi intrinsik defektlerle ilişkilendirilmektedir. Söz konusu defektler, iletkenlik bandına yakın sığ donör seviyeleri oluşturarak serbest elektron yoğunluğunu artırmakta ve film iletkenliğini yükseltmektedir (Fatih Gözükızıl et al., 2020; Gözükızıl et al., 2021; Peker et al., 2015).

ZnO ince filmlerde yüzey durumları ve tane sınırı etkileri, özellikle gaz sensör uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır. Yüzeyde gerçekleşen oksijen adsorpsiyonu sonucunda oluşan boşalma bölgeleri, etkin iletken kanalın daralmasına neden olmakta; indirgen veya yükseltgen gazlarla etkileşim sırasında bu bölgelerin modülasyonu sensör yanıtını belirlemektedir. Bu mekanizma, ZnO'nun gaz sensörlerinde yaygın biçimde tercih edilmesinin altında yatan temel fiziksel gerekçeyi oluşturmaktadır (İmer, 2024; C Li et al., 2007).

3.2. TiO₂ İnce Filmler: Faz Bağımlı Elektronik Yapı ve Defekt Merkezleri

TiO₂ ince filmler, başlıca anatase ve rutile kristal fazlarında incelenmektedir ve bu fazlar arasında belirgin elektronik farklılıklar bulunmaktadır. Anatase fazı genellikle daha geniş bant aralığına (yaklaşık 3.2 eV) ve görece daha yüksek elektron hareketliliğine sahipken, rutile fazı daha dar bant aralığı (yaklaşık 3.0 eV) ve daha yüksek dielektrik sabiti ile karakterizedir. Bu faz bağımlı özellikler, taşıyıcı taşınımını, yüzey reaktivitesini ve cihaz performansını doğrudan etkilemektedir (Fatih GÖZÜKIZIL & Birelli, 2024; Salli, 2024).

TiO₂ ince filmlerde oksijen boşlukları ve Ti³⁺ merkezleri, bant aralığı içerisinde hem sığ hem de derin defekt seviyeleri oluşturarak elektron tuzaklanmasına neden olmaktadır. Bu durum fotovoltaiik uygulamalarda yeniden birleşme süreçlerini hızlandırarak açık devre gerilimini sınırlayan başlıca etkenlerden biri hâline gelmektedir. Buna karşılık, sensör uygulamalarında bu yüzey aktif merkezler, adsorpsiyon–desorpsiyon süreçlerini güçlendirerek algılama performansını artırmaktadır. Dolayısıyla TiO₂ ince filmlerde faz seçimi ve defekt kontrolü, hedef uygulamaya bağlı olarak dikkatle ele alınmalıdır.

3.3. NiO İnce Filmler: p-Tipi Oksit Yarı İletken Davranışı

NiO, yaklaşık 3.6–4.0 eV aralığında geniş bant aralığına sahip ve p-tipi iletkenlik sergileyen sınırlı sayıdaki metal oksit yarı iletkenlerden biridir. NiO’nun p-tipi davranışı, temel olarak nikel boşlukları ve Ni³⁺/Ni²⁺ oranındaki değişimlerle ilişkilendirilmektedir. Bu defekt yapıları, valans bandı yakınında akseptör seviyeleri oluşturarak delik taşınımını mümkün kılmaktadır (Diao et al., 2020; Poulain et al., 2022).

NiO ince filmler, özellikle p-tipi katman gerektiren heteroeklem yapılarında ve tersine çalışan sensör mimarilerinde önemli bir rol oynamaktadır. Defekt yoğunluğunun kontrollü biçimde artırılması delik konsantrasyonunu yükselterek iletkenliği artırabilse de aşırı defektleşme durumunda yeniden birleşme merkezlerinin oluşması cihaz performansını sınırlayabilmektedir. Bu nedenle NiO tabanlı ince film uygulamalarında kontrollü defekt mühendisliği kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır (Gawali et al., 2018; Tekin et al., 2023).

3.4. SnO₂ İnce Filmler: Yüksek Taşıyıcı Yoğunluğu ve Yüzey Kontrollü İletkenlik

SnO₂, tetragonal rutil kristal yapıya sahip, geniş bant aralıklı (yaklaşık 3.6 eV) bir n-tipi yarı iletkenidir. Oksijen boşlukları ve kalay interstisyelleri, SnO₂ ince filmlerde yüksek serbest elektron yoğunluğuna yol açarak düşük özgül direnç ve yüksek iletkenlik değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır (Kong et al., 2021).

SnO₂ ince filmlerde elektriksel iletkenlik, tane sınırı potansiyel bariyerleri ve yüzey adsorpsiyon süreçleri tarafından belirlenmektedir. Gaz sensör uygulamalarında SnO₂'nin yüksek hassasiyet sergilemesi, yüzeyde adsorplanan oksijen türlerinin yoğunluğu ve tane boyutunun Debye uzunluğu ile karşılaştırılabilir ölçeklerde olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu özellikler, SnO₂'yi gaz algılama teknolojilerinde en yaygın kullanılan metal oksitlerden biri hâline getirmiştir (M Kumar et al., 2018; Ponte et al., 2023; Shehzad et al., 2018).

3.5. Karşılaştırmalı Elektronik Özellikler

ZnO, TiO₂, NiO ve SnO₂ ince filmler; kristal yapı, bant aralığı, iletkenlik tipi ve baskın defekt mekanizmaları açısından belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, her bir malzemenin sensör, fotovoltaiik ve fonksiyonel kaplama uygulamalarındaki performansını doğrudan belirlemektedir. ZnO, TiO₂, NiO ve SnO₂ ince filmlerin kristal yapı, bant aralığı, iletkenlik tipi ve baskın defekt mekanizmaları açısından karşılaştırmalı değerlendirmesi Tablo 1'de sunulmuştur. Karşılaştırmalı değerlendirme, metal oksit ince filmler için tek tip bir “optimum” yapıdan söz edilemeyeceğini; aksine uygulamaya özgü tasarım stratejilerinin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır (Batzill & Diebold, 2005; Borysiewicz, 2019; Diebold, 2003; Moumen et al., 2022; Poulain et al., 2022)

Tablo 1. ZnO, TiO₂, NiO ve SnO₂ İnce Filmlerin Karşılaştırmalı Elektronik ve Defekt Özellikleri

Malzeme	Kristal Yapı / Faz	Bant Aralığı (eV)	İletkenlik Tipi	Baskın Defekt Mekanizmaları	Öne Çıkan Fiziksel Özellikler	Tipik Uygulamalar
ZnO	Wurtzite (hekzagonal)	3.2–3.4	n-tipi	Oksijen boşlukları, Zn interstisyelleri	Yüzey kontrollü iletkenlik, yüksek elektron yoğunluğu	Gaz sensörleri, şeffaf iletken oksitler (TCO), UV dedektörler
TiO ₂	Anatase / Rutile	3.0–3.2	n-tipi	Oksijen boşlukları, Ti ³⁺ merkezleri	Faz bağımlı taşıyıcı taşınımı, yüksek kimyasal kararlılık	Fotokataliz, gaz sensörleri, elektron taşıyıcı katman (ETL)
NiO	Kübik	3.6–4.0	p-tipi	Nikel boşlukları, Ni ³⁺ /Ni ²⁺ oranı	Delik taşınımı, p-tipi oksit davranışı	p-tipi katmanlar, heteroeklemler, gaz sensörleri
SnO ₂	Rutil (tetragonal)	~3.6	n-tipi	Oksijen boşlukları, Sn interstisyelleri	Yüksek serbest taşıyıcı yoğunluğu, düşük özgül direnç	Gaz sensörleri, iletken kaplamalar, şeffaf elektrotlar

3.6. Defekt Fiziğinin Uygulama Performansına Etkisi

Metal oksit ince filmlerde defekt yoğunluğu, sensör ve fotovoltaiik uygulamalarda çoğu zaman zıt yönlü etkiler ortaya koymaktadır. Sensör uygulamalarında yüksek yüzey defekt yoğunluğu, aktif adsorpsiyon merkezlerinin artmasına ve duyarlılığın yükselmesine katkı sağlarken; fotovoltaiik yapılarda bu defektler taşıyıcı yaşam süresini kısaltarak yeniden birleşme kayıplarını artırmaktadır. Bu durum, metal oksit ince filmler için uygulamaya özgü defekt mühendisliği yaklaşımlarının gerekliliğini açık biçimde göstermektedir.

Tekstil tabanlı ince film sistemlerinde ise defekt dağılımı ve film sürekliliği, lif geometrisi, yüzey pürüzlülüğü ve bağlantılı iletim yolları ile birlikte değerlendirilmelidir. Elektriksel iletkenliğin sağlanabilmesi için defekt yoğunluğu ile film

bağlantılılığı arasında dengeli bir yapı oluşturulması gerekmekte; bu denge, esnek ve giyilebilir sensör sistemlerinin performansını belirleyen temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Ojstršek et al., 2022b; Pattanarat et al., 2022; Ruckdashel et al., 2022).

4. METAL OKSİT İNCE FİMLERİN UYGULAMA TEMELLİ DEĞERLENDİRİLMESİ

Metal oksit ince filmler; sensör teknolojileri, ince film güneş pilleri ve tekstil tabanlı fonksiyonel sistemler gibi farklı uygulama alanlarında benzer fiziksel prensipler üzerinden çalışmakta, ancak her uygulamada performansı belirleyen baskın mekanizmalar farklılaşmaktadır (Barsan & Weimar, 2001).

4.1. İnce Film Sensörlerde Metal Oksitlerin Fiziksel Çalışma Mekanizması

Metal oksit ince film sensörler, çalışma prensibi itibarıyla yüzey kontrollü yarı iletken cihazlar olarak değerlendirilmektedir. Sensör yanıtı, metal oksit yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon-desorpsiyon süreçlerinin, serbest taşıyıcı yoğunluğu üzerindeki etkisiyle ortaya çıkmaktadır. n-tipi metal oksitlerde oksijen moleküllerinin yüzeyde iyonik türler hâlinde adsorbe olması, iletkenlik bandındaki elektronların yakalanmasına ve yüzeyde boşalma bölgelerinin oluşmasına neden olur (Korotcenkov, 2008).

Bu mekanizma, etkin iletken kanalın daralmasıyla film direncinin artmasına yol açar. İndirgen gazlarla etkileşim durumunda ise adsorplanmış oksijen türlerinin desorpsiyonu gerçekleşir ve serbest elektron yoğunluğu artar (Kim & Lee, 2014). Sensör hassasiyeti, bu değişimin büyüklüğüyle ilişkilidir ve temel olarak aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Tane boyutu
- Yüzey defekt yoğunluğu
- Tane sınırı potansiyel bariyer yüksekliği
- Film kalınlığı ve sürekliliği

p-tipi metal oksitlerde ise mekanizma ters yönde çalışmakta; oksijen adsorpsiyonu delik yoğunluğunu artırarak iletkenliği yükseltmektedir. Bu durum, sensör tasarımında malzeme seçiminin hedeflenen gaz türüne göre optimize edilmesini gerekli kılmaktadır (C Wang et al., 2010b; Yamazoe & Shimanoe, 2008).

4.2. İnce Film Güneş Pillerinde Metal Oksit Katmanların Rolü

İnce film güneş pillerinde metal oksitler; aktif soğurucu tabakadan ziyade taşıyıcı seçici ve arayüz düzenleyici katmanlar olarak kritik işlev üstlenmektedir. TiO_2 ve ZnO gibi n-tipi metal oksitler, elektron taşıyıcı katman (ETL) olarak kullanılırken; NiO gibi p-tipi oksitler delik taşıyıcı katman (HTL) olarak görev yapmaktadır.

Bu katmanların temel işlevleri şunlardır:

- Enerji bant hizalamasının sağlanması
- Taşıyıcıların seçici taşınımı
- Arayüz yeniden birleşme kayıplarının azaltılması

Metal oksit katmanlarda bant kenarlarının konumu ve defekt yoğunluğu, açık devre gerilimi ve doluluk faktörü üzerinde doğrudan etkilidir. Arayüzdeki derin tuzak seviyeleri, taşıyıcı yaşam süresini sınırlayarak performans kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle metal oksitlerin fotovoltaiik uygulamalarda düşük defekt yoğunluğuna ve yüksek arayüz kalitesine sahip olması gerekmektedir. Film kalınlığı da kritik bir parametredir; çok ince katmanlar arayüz kusurlarını yeterince

bastıramazken, aşırı kalın katmanlar seri direnç artışına yol açmaktadır (Boyd et al., 2018; You et al., 2015).

4.3. Tekstil Tabanlı İnce Film Sistemlerde Taşıyıcı Taşınımı

Tekstil altlıklar üzerine biriktirilen metal oksit ince filmler, klasik düz altlıklardan köklü biçimde farklı fiziksel davranışlar sergilemektedir. Lifli ve gözenekli yapı, film sürekliliğini ve taşıyıcı taşınım yollarını belirleyen temel faktör hâline gelmektedir. Bu sistemlerde elektriksel iletkenlik, lifler arası temas noktalarında oluşan bağlantılı iletim ağları üzerinden gerçekleşmektedir.

Tekstil tabanlı ince film sistemlerde aşağıdaki fiziksel unsurlar baskındır:

- Lif çapı ve iplik büküm geometrisi
- Kapiler emilim ve film kalınlık dağılımı
- Lokal film süreksizlikleri ve mikro çatlaklar
- Mekanik deformasyon kaynaklı direnç değişimleri

Bu tür sistemler, klasik yarı iletken taşınım modellerinden ziyade etkin ortam ve bağlantılı iletim ile daha doğru biçimde açıklanabilmektedir. Elektriksel iletkenlik, bağlantılı iletim eşiği civarında kuvvetli doğrusal olmayan bir davranış sergiler. Bu durum, tekstil tabanlı sensörlerin esneklik ve gerinim algılama yeteneğini açıklayan temel fiziksel mekanizmayı oluşturmaktadır.

Metal oksitlerin tekstil altlıklarda sensör olarak kullanımı hem yüzey kontrollü adsorpsiyon mekanizmalarını hem de mekanik deformasyonun elektriksel yanıt üzerindeki etkisini bir arada değerlendirmeyi gerektirmektedir. Bu çoklu etkileşim, tekstil tabanlı ince film sistemleri klasik sensör mimarilerinden ayıran en temel özelliktir (Ojstršek et al., 2022a; Ruckdashel et al., 2022; Yin & Sun, 2025).

5. METAL OKSİT İNCE FİLMLER İÇİN KARŞILAŞTIRMALI VE KAVRAMSAL MODELLER

Metal oksit ince filmlerin sensörler, ince film güneş pilleri ve tekstil tabanlı fonksiyonel sistemlerde sergilediği davranışlar, ortak fiziksel ilkelere dayanmakla birlikte, uygulamaya bağlı olarak farklı ölçeklerde ve farklı baskın mekanizmalar üzerinden ortaya çıkmaktadır. Bu durum, tekil fiziksel açıklamaların çoğu zaman yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu bölümde, önceki bölümlerde ele alınan taşıyıcı taşınımı, yüzey ve arayüz etkileri ile defekt fiziğine ilişkin kavramlar; karşılaştırmalı tablolar, parametre–performans eşleştirmeleri ve kavramsal modeller aracılığıyla bütüncül bir çerçeve içerisinde değerlendirilmektedir (Sze & Ng, 2006; Yamazoe & Shimanoe, 2008).

5.1. Yapı–Özellik–Performans Çerçevesi

İnce film sistemlerde cihaz performansı, doğrudan ölçülen bir büyüklük olmaktan ziyade, mikro-yapısal ve elektronik parametrelerin bileşik bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda metal oksit ince filmler için yapı, elektronik özellikler ve cihaz performansı arasında hiyerarşik bir ilişki tanımlanabilir. Kristal faz, tane boyutu, film kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi yapısal parametreler; bant hizalaması, taşıyıcı yoğunluğu ve defekt enerji seviyeleri gibi elektronik özellikleri belirlemekte, bu özellikler de sensör hassasiyeti, fotovoltaiik verim ve elektriksel kararlılık gibi performans metriklerine yansımaktadır (Abegunde et al., 2019; Gould et al., 2017; Janotti & Van De Walle, 2009).

Bu yapı–özellik–performans yaklaşımı, deneysel çalışmalarda sıklıkla gözlenen ancak çoğu zaman açık biçimde modellenmeyen neden–sonuç ilişkilerinin analitik olarak yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. Böylece farklı metal oksit sistemler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için ortak bir

değerlendirme zemini oluşturulmaktadır (Elsheikh et al., 2019; Zhu & Zeng, 2017).

5.2. Karşılaştırmalı Parametre–Uygulama Analizi

Metal oksit ince filmlerde performansı belirleyen fiziksel parametrelerin göreceli önemi, uygulama alanına bağlı olarak belirgin biçimde değişmektedir. Sensör uygulamalarında tane boyutu ve yüzey defektleri kritik rol oynarken, ince film güneş pillerinde bant hizalaması ve arayüz kalitesi ön plana çıkmaktadır. Tekstil tabanlı sistemlerde ise film sürekliliği ve mekanik esneklik, elektriksel performans kadar belirleyici hâle gelmektedir.

Bu karşılaştırmalı değerlendirme, metal oksit ince filmler için evrensel bir “optimum yapı” tanımlamanın mümkün olmadığını; aksine her uygulama alanının kendine özgü fiziksel öncelikler gerektirdiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Dolayısıyla malzeme seçimi ve ince film tasarımı, hedeflenen uygulamaya göre yeniden ele alınmalıdır.

5.3. Kavramsal Taşıyıcı Taşınım Modelleri

Metal oksit ince filmlerde taşıyıcı taşınımı, uygulama türüne bağlı olarak üç temel kavramsal model çerçevesinde değerlendirilebilir. Polikristalin ince filmlerde iletkenlik çoğunlukla tane sınırlarında oluşan potansiyel bariyerler tarafından kontrol edilmekte ve taşıyıcıların bu bariyerleri termal olarak aşması gerekmektedir. Bu model, özellikle gaz sensörlerinde gözlenen sıcaklık bağımlı iletkenlik davranışlarını açıklamada yüksek açıklayıcılığa sahiptir.

İnce film güneş pillerinde ise metal oksit katmanlar, taşıyıcı seçici arayüzler olarak işlev görmektedir; bant hizalaması ve arayüz defektleri, taşıyıcıların etkin biçimde toplanmasını belirleyen temel faktörler hâline gelmektedir. Bu nedenle arayüz

kontrollü taşınım modeli, fotovoltaiik performansın anlaşılmasında merkezi bir rol oynamaktadır (Fan et al., 2009).

Tekstil tabanlı sistemlerde ise elektriksel iletkenlik, lifler arası temas noktalarında oluşan bağlantılı iletim ağları üzerinden gerçekleşmektedir. Bu ağların sürekliliği ve kararlılığı, film kalınlığı, lif geometrisi ve kaplama homojenliği gibi parametrelere bağlıdır. Bu kavramsal model, tekstil tabanlı ince film sistemlerde gözlenen doğrusal olmayan elektriksel davranışların fiziksel temelini oluşturmaktadır (Ojstršek et al., 2022a; Ruckdashel et al., 2022; Tseghai et al., 2020).

5.4. Defekt Yoğunluğu–Performans Optimizasyonu Paradoksu

Metal oksit ince filmlerde defekt yoğunluğu, uygulamaya bağlı olarak zıt yönlü etkiler ortaya koymaktadır. Sensör uygulamalarında yüksek yüzey defekt yoğunluğu, aktif adsorpsiyon merkezlerinin artmasına bağlı olarak hassasiyetin yükselmesine katkı sağlarken; ince film güneş pillerinde aynı defektler taşıyıcı yaşam süresini kısaltarak yeniden birleşme kayıplarını artırmaktadır. Bu durum, metal oksit ince filmlerde defekt yoğunluğunun tek yönlü bir optimizasyon parametresi olarak ele alınamayacağını göstermektedir.

Tekstil tabanlı sistemlerde ise defekt yoğunluğu, elektriksel süreklilik ile mekanik dayanım arasında dengeleyici bir unsur hâline gelmektedir. Yetersiz defekt yoğunluğu bağlantılı iletim ağlarının oluşmasını engellerken, aşırı defektleşme mekanik kararlılığı ve uzun dönemli performansı sınırlayabilmektedir (Y Li et al., 2013; X Liu et al., 2022; Shuvo et al., 2021).

5.5. Çok Ölçekli Kavramsal Yaklaşım

Metal oksit ince filmlerin fonksiyonel davranışı, tek bir uzunluk ölçeği üzerinden açıklanamayacak kadar karmaşıktır.

Atomik ölçekte defekt oluşumu ve bağlanma enerjileri belirleyici olurken, mikro ölçekte tane sınırları ve yüzey morfolojisi taşıyıcı taşınımını şekillendirmektedir. Makro ölçekte ise cihaz geometrisi, mekanik deformasyon ve sistem entegrasyonu performans üzerinde etkili olmaktadır (Jahan et al., 2025).

Bu çok ölçekli kavramsal yaklaşım, özellikle tekstil tabanlı sensörlerde gözlenen karmaşık ve çok parametrelili elektriksel yanıtların anlaşılması için güçlü bir teorik çerçeve sunmaktadır. Aynı zamanda metal oksit ince filmlerin farklı uygulamalarda neden farklı performans karakteristikleri sergilediğini açıklamada bütüncül bir bakış açısı sağlamaktadır (Cao et al., 2022).

6. GELECEK PERSPEKTİFLER VE YÜKSELEN ARAŞTIRMA YÖNELİMLERİ

Metal oksit ince filmler alanında elde edilen kuramsal ve uygulama odaklı kazanımlar, araştırma paradigmasının giderek deney merkezli yaklaşımlardan öngörü, modelleme ve dijitalleşme temelli stratejilere doğru evrildiğini göstermektedir. Sensörler, ince film güneş pilleri ve tekstil tabanlı fonksiyonel sistemlerde artan yapısal ve işlevsel karmaşıklık, çok değişkenli, çok ölçekli ve disiplinlerarası tasarım yaklaşımlarını kaçınılmaz hâle getirmektedir. Bu bağlamda, metal oksit ince film araştırmalarının geleceğini şekillendirecek temel eğilimler aşağıda bütüncül bir çerçeve içerisinde ele alınmaktadır.

6.1. Dijital İkiz Yaklaşımı ile İnce Film Tasarımı

Dijital ikiz yaklaşımı, fiziksel bir sistemin sayısal ortamda modellenmesi yoluyla, sistem davranışlarının önceden tahmin edilmesi yöntemidir. Metal oksit ince filmler bağlamında dijital ikiz modelleri; bant yapısı, defekt yoğunluğu, tane boyutu ve film kalınlığı gibi kritik parametrelerin eş zamanlı olarak

değerlendirilmektedir. Bu sayede deneysel üretim aşamasına geçilmeden önce malzeme davranışı ve cihaz performansı öngörülebilmektedir (Kalidindi et al., 2022).

Sensör ve ince film güneş pili uygulamalarında dijital ikiz tabanlı yaklaşımlar, geniş parametre uzaylarının hızlı biçimde taranmasını sağlayarak film kalınlığı optimizasyonu, defekt yoğunluğu–performans dengelerinin belirlenmesi stratejilerinin rasyonel biçimde değerlendirilebilmesi sağlanmaktadır (Bonyár & Kovács, 2023; Pflug et al., 2022; Santos-Ceballos et al., 2024).

6.2. Yapay Zekâ ve Veri Odaklı İnce Film Mühendisliği

Metal oksit ince filmlere ilişkin veri setleri, elektronik yapı, defekt türleri ve uygulama performansları açısından önemli bir potansiyeldir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi temelli yöntemler, bu çok boyutlu veri kümelerinin analiz edilerek gizli korelasyonların ve eğilimlerin ortaya çıkarılmasına olanak tanımaktadır. Gelecekte yapay zekâ destekli ince film üretiminde; malzeme–uygulama eşleştirmelerinin otomatikleştirilmesi, sensör hassasiyetinin defekt profiline göre optimize edilmesi ve fotovoltaiik yapılarda bant hizalamasının öngörülmesi gibi alanlarda deneysel deneme–yanılma süreçlerini önemli ölçüde azaltması beklenmektedir (Garí-Galíndez et al., 2025; Grau-Luque et al., 2024; Xu & Shin, 2024).

6.3. Akıllı ve Giyilebilir Tekstil Sistemlerinde Metal Oksit İnce Filmler

Tekstil tabanlı metal oksit ince filmler, gelecekte yalnızca sensör veya fonksiyonel kaplama malzemesi olarak değil; çok işlevli sistem bileşenleri olarak değerlendirilecektir. Esnek, nefes alabilir ve mekanik olarak uyumlu tekstil altlıklar üzerine biriktirilen ince filmler, çevresel algılama, biyosinyal izleme ve enerji toplama gibi fonksiyonları tek bir platformda birleştirme potansiyeline sahiptir. Mekanik deformasyon ile elektriksel yanıt

arasındaki ilişkinin, lif geometrisinin bağlantılı iletim yapıları üzerindeki etkisinin ve uzun dönemli kararlılığın kuramsal modellerle açıklanması gelecekteki araştırmalar için kritik önem taşımaktadır (Lam et al., 2019; Nam et al., 2021; Subbiah et al., 2020; Tanveer et al., 2025).

6.4. Sürdürülebilirlik ve Yeşil İnce Film Teknolojileri

Metal oksit ince filmler, toksik olmayan bileşimleri ve düşük enerji gereksinimli üretim potansiyelleri sayesinde sürdürülebilir malzeme sistemleri olarak kullanılmaktadır. Gelecekte ince film teknolojilerinin düşük sıcaklıkta biriktirme yöntemleri, geri dönüştürülebilir altlıklar ve uzun ömürlü, bakım gerektirmeyen sistemler çerçevesinde ele alınması kaçınılmazdır. Sürdürülebilirlik perspektifi, özellikle tekstil tabanlı ve giyilebilir uygulamalarda çevresel etkiyi minimize eden tasarımların geliştirilmesine olanak sağlayacak ve metal oksit ince filmlerin yeşil teknoloji ekosistemindeki rolünü güçlendirecektir (Barreca & Maccato, 2023; Carlos et al., 2020; Loo et al., 2025).

6.5. Gelecek Araştırmalar İçin Kuramsal Yol Haritası

Fizik temelli ve kavramsal çerçeve, gelecekte gerçekleştirilecek deneysel ve sayısal çalışmalar için yönlendirici olacaktır. İleriye dönük araştırmaların çok ölçekli modelleme yaklaşımlarını benim siyerek, uygulamaya özgü defekt sistemleri merkezde olacak şekilde ve sensör, enerji ile tekstil alanlarını bütüncül biçimde ele alınması gerekmektedir. Metal oksit ince filmlerin fonksiyonel malzemeler olarak tasarlanabilir, öngörülebilir ve optimize edilebilir fiziksel sistemler olarak değerlendirilmelidir (Freund & Pacchioni, 2008; Greiner & Lu, 2013; MacManus-Driscoll et al., 2020; Schlom et al., 2008).

7. SONUÇ

Bu çalışmada, metal oksit ince filmlerin sensörler, ince film güneş pilleri ve tekstil tabanlı fonksiyonel sistemlerdeki rolü; deneysel üretim ve ölçüm verilerine dayanmadan, yarı iletken fiziği, ince film bilimi ve taşıyıcı taşınım teorileri temelinde kapsamlı ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. İnce film sistemlerin performansını belirleyen fiziksel mekanizmalar; bant yapısı, defekt fiziği, yüzey ve arayüz etkileri ile tane sınırı kontrollü taşınım modelleri çerçevesinde analitik olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında ZnO, TiO₂, NiO ve SnO₂ gibi yaygın metal oksit ince filmler; elektronik yapı, iletkenlik tipi ve baskın defekt mekanizmaları açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve bu malzemelerin farklı uygulamalarda neden farklı performans karakteristikleri sergilediği fiziksel temelleriyle açıklanmıştır. Sensör uygulamalarında yüzey defektlerinin ve tane boyutunun hassasiyet üzerindeki belirleyici rolü, fotovoltaiik yapılarda ise bant hizalaması ve arayüz kalitesinin taşıyıcı toplama verimini sınırlayan temel faktörler olduğu ortaya konmuştur. Tekstil tabanlı ince film sistemlerde ise elektriksel davranışın klasik düz altlıklardan farklı olarak perkolasyon kontrollü taşınım mekanizmalarıyla belirlendiği gösterilmiştir.

Sensörler, güneş pilleri ve tekstil tabanlı fonksiyonel sistemler için tek tip bir “optimum” ince film yapısından söz edilemeyeceği; aksine, her uygulamanın farklı yapı-özellik-performans dengeleri gerektirdiği açık biçimde ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, deneysel çalışmalarda sıklıkla karşılaşılan çelişkili sonuçların arkasındaki fiziksel nedenlerin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Karşılaştırmalı ve kavramsal modeller; metal oksit ince filmlerin yalnızca mevcut uygulamalarını açıklamakla kalmayıp, gelecekte tasarlanacak yeni sensör, enerji ve tekstil-entegreli sistemler için öngörücü bir çerçeve sunmaktadır. Çok

ölçekli analiz yaklaşımı sayesinde atomik düzeydeki defektlerden makroskopik cihaz performansına kadar uzanan ilişkiler tutarlı bir biçimde ele alınmıştır.

Dijital ikiz, yapay zekâ destekli malzeme tasarımı ve sürdürülebilir ince film teknolojileri gibi güncel araştırma yönelimleri bağlamında sunulan perspektifler, metal oksit ince filmlerin gelecekteki gelişim rotasına ışık tutmaktadır. Bu kitap bölümünde ortaya konan fizik temelli ve disiplinlerarası yaklaşım, deneysel çalışmalara teorik bir zemin oluşturarak, malzeme seçimi, yapı optimizasyonu ve cihaz tasarımı süreçlerinde yol gösterici bir referans niteliği taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Abegunde, O. O. et al. (2019). Overview of thin film deposition techniques. *AIMS Materials Science* 2019 2:174, 6(2), 174–199.
<https://doi.org/10.3934/MATERSCI.2019.2.174>
- Akter, A., Apu, M. M. H., Veeranki, Y. R., Baroud, T. N., & Posada-Quintero, H. F. (2024). Recent Studies on Smart Textile-Based Wearable Sweat Sensors for Medical Monitoring: A Systematic Review. *Journal of Sensor and Actuator Networks* , 13(4), 40.
<https://doi.org/10.3390/JSAN13040040>
- Ameen, B. A. H., Yildiz, A., Farooq, W. A., & Yakuphanoglu, F. (2019). Solar Light Photodetectors Based on Nanocrystalline Zinc Oxide Cadmium Doped/p-Si Heterojunctions. *Silicon*. <https://doi.org/10.1007/s12633-017-9656-4>
- Applications, B., Zhou, W., Gulino, A., & Querebillo, C. J. (2023). A Review on Nano Ti-Based Oxides for Dark and Photocatalysis: From Photoinduced Processes to Bioimplant Applications. *Nanomaterials* , 13(6), 982.
<https://doi.org/10.3390/NANO13060982>
- Barreca, D., & Maccato, C. (2023). Nanoarchitectonics of metal oxide materials for sustainable technologies and environmental applications. *CrystEngComm*, 25(28), 3968–3987. <https://doi.org/10.1039/D3CE00431G>
- Barsan, N., & Weimar, U. (2001). Conduction model of metal oxide gas sensors. *Journal of Electroceramics*, 7(3), 143–167.
<https://doi.org/10.1023/A:1014405811371/METRICS>
- Batzill, M., & Diebold, U. (2005). The surface and materials science of tin oxide. *Progress in Surface Science*, 79(2–4),

47–154.

<https://doi.org/10.1016/J.PROGSURF.2005.09.002>

Bonyár, A., & Kovács, R. (2023). Towards Digital Twins of Plasmonic Sensors: Constructing the Complex Numerical Model of a Plasmonic Sensor Based on Hexagonally Arranged Gold Nanoparticles. *Nanomaterials*, 13(14), 2044. <https://doi.org/10.3390/NANO13142044>

Borysiewicz, M. A. (2019). ZnO as a Functional Material, a Review. *Crystals*, 9(10), 505. <https://doi.org/10.3390/CRYST9100505>

Boyd, C. C., Cheacharoen, R., Leijtens, T., & McGehee, M. D. (2018). Understanding Degradation Mechanisms and Improving Stability of Perovskite Photovoltaics. *Chemical Reviews*, 119(5), 3418–3451. <https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.8B00336>

Cao, C., Wang, G., Stratakis, E., & Wu, S. (2022). An Overview of Hierarchical Design of Textile-Based Sensor in Wearable Electronics. *Crystals*, 12(4), 555. <https://doi.org/10.3390/CRYST12040555>

Carlos, E., Martins, R., Fortunato, E., & Branquinho, R. (2020). Solution Combustion Synthesis: Towards a Sustainable Approach for Metal Oxides. *Chemistry - A European Journal*, 26(42), 9099–9125. <https://doi.org/10.1002/CHEM.202000678>;WGROU:P:STRING:PUBLICATION

Ceramics TiO, O., Suchikova, Y., Nazarovets, S., Konuhova, M., & Popov, A. I. (2025). Binary Oxide Ceramics (TiO₂, ZnO, Al₂O₃, SiO₂, CeO₂, Fe₂O₃, and WO₃) for Solar Cell Applications: A Comparative and Bibliometric Analysis. *Ceramics*, 8(4), 119. <https://doi.org/10.3390/CERAMICS8040119>

- Chawla, J. S., Gstrein, F., O'Brien, K. P., Clarke, J. S., & Gall, D. (2011). Electron scattering at surfaces and grain boundaries in Cu thin films and wires. *Physical Review B*, 84(23), 235423. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.235423>
- Dejene, B. K. (2025). The future of fabric: A comprehensive review of self-powered smart textiles and their emerging applications. *Energy Reports*, 14, 898–943. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2025.07.002>
- Diao, C. C., Huang, C. Y., Yang, C. F., & Wu, C. C. (2020). Morphological, Optical, and Electrical Properties of p-Type Nickel Oxide Thin Films by Nonvacuum Deposition. *Nanomaterials*, 10(4), 636. <https://doi.org/10.3390/NANO10040636>
- Diebold, U. (2003). The surface science of titanium dioxide. *Surface Science Reports*, 48(5–8), 53–229. [https://doi.org/10.1016/S0167-5729\(02\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0167-5729(02)00100-0)
- Elsheikh, A. H. et al. (2019). Thin film technology for solar steam generation: A new dawn. *Solar Energy*, 177, 561–575. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.11.058>
- Fan, Q. H., Deng, M., Liao, X., & Deng, X. (2009). Damage mechanisms in thin film solar cells during sputtering deposition of transparent conductive coatings. *Journal of Applied Physics*, 105(3). <https://doi.org/10.1063/1.3074328/383752>
- Fatih GÖZÜKIZIL, M., & Birelli, A. (2024). Al, Cu Katkılı, Katkısız TiO₂ İnce Film Biriktirme ve Katkılamanın Film Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 27(3), 1081–1087. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNİK.1208648>
- Fatih Gözükızıl, M., Temel, S., Özbay, N., & Fatih Gözükızıl, M. (2020). Production and Characterization of Al-Doped

ZnO Thin Films with Sol-Gel Magnetic Spin Coating Technique. Sakarya University Journal of Science, 24(1), 172–177.

<https://doi.org/10.16984/SAUFENBILDER.618779>

Filippatos, P. P. et al. (2023). Temperature and Ambient Band Structure Changes in SnO₂ for the Optimization of Hydrogen Response. *Inorganics*, 11(3), 96. <https://doi.org/10.3390/INORGANICS11030096>

Freund, H. J., & Pacchioni, G. (2008). Oxide ultra-thin films on metals: new materials for the design of supported metal catalysts. *Chemical Society Reviews*, 37(10), 2224–2242. <https://doi.org/10.1039/B718768H>

Gardon, M., & Guilemany, J. M. (2013). A review on fabrication, sensing mechanisms and performance of metal oxide gas sensors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(5), 1410–1421. <https://doi.org/10.1007/S10854-012-0974-4>

Garí-Galíndez, J. et al. (2025). Explainable Artificial Intelligence Driven Methodology for Accelerated Research of Complex Systems: Case Study of Thin-Film Photovoltaic Kesterite-Based Technology. *Advanced Energy Materials*, 15(35), 2502420. <https://doi.org/10.1002/AENM.202502420;SUBPAGE:STRING:FULL>

Gawali, S. R., Patil, V. L., Deonikar, V. G., Patil, S. S., Patil, D. R., Patil, P. S., & Pant, J. (2018). Ce doped NiO nanoparticles as selective NO₂ gas sensor. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 114, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.11.005>

- Gould, R. D., Kasap, S., & Ray, A. K. (2017). Thin films. Springer Handbooks, 1. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48933-9_28/COVER
- Gozukizil, M. F., Nayman, E., Temel, S., & Gokmen, F. O. (2024a). Comparison of gas sensing performances in various yarn types coated with polyaniline. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 2024 35:7, 35(7), 529-. <https://doi.org/10.1007/S10854-024-12106-5>
- Gozukizil, M. F., Nayman, E., Temel, S., & Gokmen, F. O. (2024b). Photovoltaic performance 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. <https://doi.org/10.1007/S10854-024-13717-8/FIGURES/6>
- Gözükızıl, M. F., Temel, S., & Özbay, N. (2021). SOME PHYSICAL PROPERTIES OF CZO THIN FILMS PRODUCED BY A NOVEL MAGNETIC SPIN COATING TECHNIQUE. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 38(2), 955–960. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/sigma/issue/65153/1004927>
- Grau-Luque, E. et al. (2024). Accelerating the Development of Thin Film Photovoltaic Technologies: An Artificial Intelligence Assisted Methodology Using Spectroscopic and Optoelectronic Techniques. Small Methods, 8(12), 2301573. <https://doi.org/10.1002/SMTD.202301573;JOURNAL:JOURNAL:23669608;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Greiner, M. T., & Lu, Z. H. (2013). Thin-film metal oxides in organic semiconductor devices: their electronic structures,

- work functions and interfaces. *NPG Asia Materials*, 5(7), e55–e55. <https://doi.org/10.1038/am.2013.29>
- İmer, B. (2024). Dynamics in between Structural and Electrical Properties of as Grown ZnO Thin Films by Thermal ALD. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(4), 1164–1165. <https://doi.org/10.29109/GUJSC.1348409>
- Jahan, I., Arellano, J. D., & Shi, Z. (2025). Carrier transport mechanisms in polycrystalline semiconductors: from grain boundary physics to device performance. *Journal of Materials Chemistry C*, 13(48), 23675–23695. <https://doi.org/10.1039/D5TC03750F>
- Janotti, A., & Van De Walle, C. G. (2009). Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. *Reports on Progress in Physics*, 72(12), 126501. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/72/12/126501>
- Kalidindi, S. R., Buzzy, M., Boyce, B. L., & Dingreville, R. (2022). Digital Twins for Materials. *Frontiers in Materials*, 9, 818535. <https://doi.org/10.3389/FMATS.2022.818535/BIBTEX>
- Kim, H. J., & Lee, J. H. (2014). Highly sensitive and selective gas sensors using p-type oxide semiconductors: Overview. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 192, 607–627. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2013.11.005>
- Kong, Y. et al. (2021). SnO₂ nanostructured materials used as gas sensors for the detection of hazardous and flammable gases: A review. *Nano Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/J.NANOMS.2021.05.006>
- Korotcenkov, G. (2008). The role of morphology and crystallographic structure of metal oxides in response of conductometric-type gas sensors. *Materials Science and*

- Engineering: R: Reports, 61(1–6), 1–39.
<https://doi.org/10.1016/J.MSER.2008.02.001>
- Kumar, A., & Ranjan, P. (2021). Defects signature in VOC characterization of thin-film solar cells. *Solar Energy*, 220, 35–42.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.03.017>
- Kumar, M., Bhatt, V., Abhyankar, A. C., Kim, J., Kumar, A., Patil, S. H., & Yun, J. H. (2018). New insights towards strikingly improved room temperature ethanol sensing properties of p-type Ce-doped SnO₂ sensors. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 8079-.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-26504-3>
- Lam, D. Van, Won, S., Shim, H. C., Kim, J. H., & Lee, S. M. (2019). Turning cotton into tough energy textile via metal oxide assisted carbonization. *Carbon*, 153, 257–264.
<https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2019.07.010>
- Leturcq, R., Bhusari, R., & Barborini, E. (2022). Physical mechanisms underpinning conductometric gas sensing properties of metal oxide nanostructures. *Advances in Physics: X*, 7(1).
<https://doi.org/10.1080/23746149.2022.2044904>;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:TAPX20;ISSUE:ISSUE:DOI
- Li, C., Li, X. C., Yan, P. X., Chong, E. M., Liu, Y., Yue, G. H., & Fan, X. Y. (2007). Research on the properties of ZnO thin films deposited by using filtered cathodic arc plasma technique on glass substrate under different flow rate of O₂. *Applied Surface Science*, 253(8), 4000–4005.
<https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2006.08.048>

- Li, Y., Ai, J., & Sun, C. (2013). Online Fabric Defect Inspection Using Smart Visual Sensors. *Sensors*, 13(4), 4659–4673. <https://doi.org/10.3390/S130404659>
- Linn, T., Renner, M., & Jungemann, C. (2025). Thermodynamically consistent stabilization of the drift-diffusion model for arbitrary band structures and carrier statistics. *Journal of Computational Electronics*, 24(6), 171-. <https://doi.org/10.1007/S10825-025-02412-4>
- Liu, S., Zhang, W., He, J., Lu, Y., Wu, Q., & Xing, M. (2023). Fabrication Techniques and Sensing Mechanisms of Textile-Based Strain Sensors: From Spatial 1D and 2D Perspectives. *Advanced Fiber Materials*, 6(1), 36–67. <https://doi.org/10.1007/S42765-023-00338-9>
- Liu, X. et al. (2022). Recent progress on smart fiber and textile based wearable strain sensors: materials, fabrications and applications. *Springer*, 4(3), 361–389. <https://doi.org/10.1007/S42765-021-00126-3>
- Loo, R., Akula, A., Shimura, Y., -, al, Guo, Y.-D., Wang, A.-F., & Huang, Q.-M. (2025). Review—ZnO-based Thin Film Metal Oxide Semiconductors and Structures: Transistors, Optoelectronic Devices and Future Sustainable Electronics. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 14(1), 015001. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ADA3A2>
- MacManus-Driscoll, J. L., Wells, M. P., Yun, C., Lee, J. W., Eom, C. B., & Schlom, D. G. (2020). New approaches for achieving more perfect transition metal oxide thin films. *APL Materials*, 8(4), 40904. <https://doi.org/10.1063/5.0003268/1064505>
- Mayadas, A. F., & Shatzkes, M. (1970). Electrical-Resistivity Model for Polycrystalline Films: the Case of Arbitrary

- Reflection at External Surfaces. *Physical Review B*, 1(4), 1382. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.1.1382>
- Morgan, B. J., & Watson, G. W. (2010). Intrinsic n-type Defect Formation in TiO₂: A Comparison of Rutile and Anatase from GGA+U Calculations. *Journal of Physical Chemistry C*, 114(5), 2321–2328. <https://doi.org/10.1021/JP9088047>
- Moumen, A., Kumarage, G. C. W., & Comini, E. (2022). P-Type Metal Oxide Semiconductor Thin Films: Synthesis and Chemical Sensor Applications. *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 1359, 22(4), 1359. <https://doi.org/10.3390/S22041359>
- Nam, D., Kwon, M., Ko, Y., Huh, J., Lee, S. W., & Cho, J. (2021). Aluminum textile-based binder-free nanostructured battery cathodes using a layer-by-layer assembly of metal/metal oxide nanoparticles. *Applied Physics Reviews*, 8(1). <https://doi.org/10.1063/5.0039990/238729>
- Nayman, E., Gözükızıl, M. F., & Usta, İ. (2024). Deposition of CdO Semiconductors on yarns by Dip Coating Method and Gas Sensor Applications. *Textile and Apparel*, 34(2), 117–126. <https://doi.org/10.32710/TEKSTILVEKONFEKSIYON.1178133>
- Ochoa-Muñoz, Y. H., Mejía de Gutiérrez, R., & Rodríguez-Páez, J. E. (2023). Metal Oxide Gas Sensors to Study Acetone Detection Considering Their Potential in the Diagnosis of Diabetes: A Review. *Molecules*, 28(3), 1150. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28031150>
- Ojstršek, A., Jug, L., & Plohl, O. (2022a). A Review of Electro Conductive Textiles Utilizing the Dip-Coating Technique: Their Functionality, Durability and

- Sustainability. Polymers, 14(21), 4713.
<https://doi.org/10.3390/POLYM14214713>
- Ojstršek, A., Jug, L., & Plohl, O. (2022b). A Review of Electro Conductive Textiles Utilizing the Dip-Coating Technique: Their Functionality, Durability and Sustainability. Polymers , 14(21), 4713.
<https://doi.org/10.3390/POLYM14214713>
- Pattanarat, K., Petchsang, N., Osotchan, T., Tang, I.-M., Kim, Y.-H., & Jaisutti, R. (2022). High Conductivity and Durability Textile Gas Sensor-Based Polyaniline-Decorated-Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/Poly(4-styrenesulfonate) for Ammonia Detection. ACS Applied Polymer Materials.
https://doi.org/10.1021/ACSAPM.2C01374/SUPPL_FILE/AP2C01374_SI_001.PDF
- Peker, D., Temel, S., & Nebi, M. (2015). Mg-doped ZnO Films by Sol-Gel Spin Coating Method. International Journal of Scientific and Technological Research www.iiste.org ISSN (Vol. 1). Retrieved from www.iiste.org
- Pflug, A., Bruns, S., Zickenrott, T., Britze, C., & Vergöhl, M. (2022). A digital twin for PVD deposition of tailored coatings on 3D substrates. Optical Interference Coatings Conference (OIC) , TC.8.
<https://doi.org/10.1364/OIC.2022.TC.8>
- Ponte, R., Rauwel, E., & Rauwel, P. (2023). Tailoring SnO2 Defect States and Structure: Reviewing Bottom-Up Approaches to Control Size, Morphology, Electronic and Electrochemical Properties for Application in Batteries. Materials, 16(12), 4339.
<https://doi.org/10.3390/MA16124339>

- Poulain, R. et al. (2022). Electronic and Chemical Properties of Nickel Oxide Thin Films and the Intrinsic Defects Compensation Mechanism. *ACS Applied Electronic Materials*, 4(6), 2718–2728. <https://doi.org/10.1021/ACSAELM.2C00230>
- Ruckdashel, R. R., Khadse, N., & Park, J. H. (2022). Smart E-Textiles: Overview of Components and Outlook. *Sensors*, 22(16), 6055. <https://doi.org/10.3390/S22166055>
- Sakthinathan, S., Meenakshi, G. A., Vinothini, S., Yu, C. L., Chen, C. L., Chiu, T. W., & Vittayakorn, N. (2025). A Review of Thin-Film Growth, Properties, Applications, and Future Prospects. *Processes*, 13(2), 587. <https://doi.org/10.3390/PR13020587>
- Salli, S. (2024). TiO₂ modifications and their environmental photocatalytic performance: an epr investigation.
- Santos-Ceballos, J. C., Salehnia, F., Romero, A., & Vilanova, X. (2024). Application of digital twins for simulation based tailoring of laser induced graphene. *Scientific Reports*, 14(1), 10363-. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61237-6>
- Schlom, D. G., Chen, L. Q., Pan, X., Schmehl, A., & Zurbuchen, M. A. (2008). A thin film approach to engineering functionality into oxides. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(8), 2429–2454. <https://doi.org/10.1111/J.1551-2916.2008.02556.X>;WEBSITE:WEBSITE:CERAMICS;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Seto, J. Y. W. (1975). The electrical properties of polycrystalline silicon films. *Journal of Applied Physics*, 46(12), 5247–5254. <https://doi.org/10.1063/1.321593>

- Shehzad, K., Shah, N. A., Amin, M., Abbas, M., & Syed, W. A. (2018). Synthesis of SnO₂ nanowires for CO, CH₄ and CH₃OH gases sensing. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(8). <https://doi.org/10.1177/1550147718790750>; WEBSITE: WEBSITE:SAGE; JOURNAL: JOURNAL:DSNA; ISSUE: ISSUE:DOI
- Shuvo, I. I. et al. (2021). Smart Textiles Testing: A Roadmap to Standardized Test Methods for Safety and Quality-Control. In *Textiles for Functional Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.96500>
- Subbiah, D. K., Balasubramanian, S., Kulandaisamy, A. J., Jayanth Babu, K., Das, A., & Rayappan, J. B. B. (2020). Surface Modification of Textiles with Nanomaterials for Flexible Electronics Applications (pp. 1–42). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3669-4_1
- Sun, J. X., Yang, H. C., Li, Y., & Cui, H. J. (2023). Analytic Solutions of Drift-Diffusion Equations and Mobility of Organic Semiconductors. *Physical Review Applied*, 20(3), 034061. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.20.034061>
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*,. *Physics of Semiconductor Devices*, Third Edition. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
- Tanveer, Z. et al. (2025). Advancing conductive cellulosic textiles: Structural, optical and thermoelectric enhancements via innovative metallic oxide deposition. *International Journal of Biological Macromolecules*, 305, 141418. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.141418>

- Tekin, S. B. et al. (2023). Electron affinity of metal oxide thin films of TiO₂, ZnO, and NiO and their applicability in 28.3 THz rectenna devices. *Journal of Applied Physics*, 134(8), 84503. <https://doi.org/10.1063/5.0157726/2908324>
- Tseghai, G. B., Mengistie, D. A., Malengier, B., Fante, K. A., & Van Langenhove, L. (2020). PEDOT:PSS-Based Conductive Textiles and Their Applications. *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 1881, 20(7), 1881. <https://doi.org/10.3390/S20071881>
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010a). Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*, 10(3), 2088. <https://doi.org/10.3390/S100302088>
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010b). Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors* 2010, Vol. 10, Pages 2088-2106, 10(3), 2088–2106. <https://doi.org/10.3390/S100302088>
- Wang, Y. et al. (2021). Metal oxide charge transport layers in perovskite solar cells - Optimising low temperature processing and improving the interfaces towards low temperature processed, efficient and stable devices. *JPhys Energy*, 3(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ABC73F>
- Wang, Z., Gao, H., Wu, D., Meng, J., Deng, J., & Cui, M. (2024). Defects and Defect Passivation in Perovskite Solar Cells. *Molecules*, 29(9), 2104. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES29092104>
- Xu, P., & Shin, I. (2024). Preparation and Performance Analysis of Thin-Film Artificial Intelligence Transistors Based on Integration of Storage and Computing. *IEEE Access*, 12,

30593–30603.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3369171>

Xuan, J. et al. (2020). Low-temperature operating ZnO-based NO₂ sensors: a review. *RSC Advances*, 10(65), 39786–39807. <https://doi.org/10.1039/D0RA07328H>

Yamazoe, N., & Shimanoe, K. (2008). Theory of power laws for semiconductor gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 128(2), 566–573. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2007.07.036>

Yin, L., & Sun, X. (2025). Textile-based sensors for human motion sensing: recent developments and future perspectives. *Nanocomposites*, 11(1), 79–98. <https://doi.org/10.1080/20550324.2025.2477392>;CTYPE:STRING:JOURNAL

You, J. et al. (2015). Improved air stability of perovskite solar cells via solution-processed metal oxide transport layers. *Nature Nanotechnology*, 11(1), 75–81. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.230>

Yusuf, A. S., Markwitz, M., Chen, Z., Ramezani, M., Kennedy, J. V., & Fiedler, H. (2025). Review of progress in inorganic electron transport layers for perovskite solar cell applications. *Applied Physics A*, 131(11), 859-. <https://doi.org/10.1007/S00339-025-08975-0>

Zhang, Y., Zhang, T., Huang, Z., & Yang, J. (2022). A New Class of Electronic Devices Based on Flexible Porous Substrates. *Advanced Science*, 9(7), 2105084. <https://doi.org/10.1002/ADVS.202105084>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Zhu, L., & Zeng, W. (2017, November 1). Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review. *Sensors and*

Actuators, A: Physical. Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.10.021>

TÜRKİYE VE DÜNYADA
MALZEME VE METALURJİ MÜHENDİSLİĞİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com