

BİLİMİN IŞIĞINDA BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİNDE YENİ GELİŞMELER

Editör
HİKMET YETER ÇOĞUN



BİDGE Yayınları

**BİLİMİN IŞIĞINDA BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİNDE
YENİ GELİŞMELER**

Editör: HİKMET YETER ÇOĞUN

ISBN: -

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-06-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltpe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

YAPAY ZEKÂNIN KLİNİK KARAR SÜREÇLERİNDEKİ ROLÜ ETİK RİSKLER, HUKUKİ SORUMLULUKLAR VE UYUM SORUNLARI	1
---	---

SİBEL BİRTANE AKAR, EMRE ÇANAYAZ

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE 3D YAZICILARIN GELİŞİMİ VE ADLİ BİLİMLERDEKİ ÖNEMİ	28
--	----

MUAZZEZ ELÇİN ÖZKAN, ORHAN MERAL

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN YENİ SÜPER MALZEME OLARAK BOROFEN	52
---	----

SEDA AYÇİÇEK, ŞULE COŞKUN CEVHER

CHAPTER 0

YAPAY ZEKÂNIN KLİNİK KARAR SÜREÇLERİNDEKİ ROLÜ ETİK RİSKLER, HUKUKİ SORUMLULUKLAR VE UYUM SORUNLARI

EMRE ÇANAYAZ¹
SİBEL BİRTANE AKAR²

Giriş

Yapay zekâ (YZ), çağdaş sağlık hizmetlerinde dönüştürücü bir rol üstlenmeye başlamış; tanı, hastalığın seyri hakkında öngöründe bulunma, tedavi planlaması ve sağlık sistemlerinin genel yönetimi gibi birçok alanda önemli ilerlemelere olanak sağlamıştır. Makine öğrenmesi (ML), derin öğrenme (DL), doğal dil işleme (NLP) ve bilgisayarla görme gibi teknolojilerden faydalanan bu sistemler, büyük ölçekli tıbbî verileri analiz edebilmekte ve karmaşık örüntüler üzerinden çıkarım yaparak klinik karar desteklerinde insan uzmanlığını tamamlayıcı hatta bazı durumlarda aşan sonuçlar sunabilmektedir (Shang, 2024; Thakur, 2024). Özellikle radyoloji,

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Orcid: 0000-0002-3695-3642

² Dr.Öğr.Üyesi, İstanbul Arel Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-4921-1381

patoloji, genom analizi, elektronik sağlık kayıtları (EHR) ve hasta takibi gibi alanlarda YZ'nin yüksek doğrulukla çalışan uygulamalar geliştirdiği gösterilmiştir (Alsulimani, 2024; Gao, 2025; Haring, 2021).

Ancak YZ sistemlerinin klinik karar süreçlerine artan düzeyde dahil edilmesi, yalnızca teknik başarılarla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda hasta hakları, etik sorumluluklar ve hukuki ereve açısından yeni ve çok katmanlı sorunları da beraberinde getirmektedir. **Teknik açıdan** bakıldığında, veri yanlılığı, sınırlı genellenebilirlik ve karar alma süreçlerindeki şeffaflık eksiklikleri ön plana çıkmaktadır (Hildt, 2025; Maccaro, 2024; Shang, 2024). **Etik açıdan** ise, kararların YZ sistemlerine bırakılması özerklik, hesap verebilirlik, adalet ve bilgilendirilmiş onam gibi temel ilkeleri sorgulanabilir hâle getirmektedir. **Hukuki açıdan** ise, mevcut mevzuatların teknolojik gelişmeleri yakalayamaması; sorumluluğun kimde olduğu, veri güvenliği ve yasal uyum konularında belirsizlikler yaratmaktadır (Maccaro, 2024; Mennella, 2024; Pressman, 2024).

Bu bölümde söz konusu teknik, etik ve hukuki zorluklar eleştirel bir literatür incelemesi yaklaşımıyla ele alınmakta; bu alanlar arasındaki etkileşimler irdelenmekte ve çözüm için disiplinler arası stratejik öneriler sunulmaktadır. Amaç, YZ'nin sağlık sistemine entegrasyonunda yalnızca bilimsel doğruluğu değil, aynı zamanda tıbbın temel insani değerlerini de koruyacak etik temelli ve iş birliğine dayalı bir yaklaşımın önemine dikkat çekmektir.

Tıpta Yapay Zekâ Uygulamalarında Teknik Zorluklar

YZ sistemlerinin sağlık alanındaki başarısı, büyük ölçüde eğitildikleri veri kümelerinin niteliğine bağlıdır. Ancak gerçek dünya verileri, çoğunlukla dağınık, eksik veya tutarsız etiketlenmiş olduğundan; bu durum modellerin doğruluğunu, genellenebilirliğini

ve adil sonuç üretme kapasitesini ciddi şekilde sınırlamaktadır (Arora, 2023; Schwalbe, 2020; Sutton, 2020). Farklı sağlık kurumlarından gelen veriler; biçim, ölçüm birimi ve tanı kriterleri açısından çeşitlilik gösterdiğinden, modellerin tutarlılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Bu bağlamda karşılaşılan temel sorunlardan biri, eğitim veri setlerinin temsil ediciliğidir. Geliştirilen pek çok YZ modeli, genellikle büyük ve yüksek gelirli kentsel akademik merkezlerden toplanan verilerle oluşturulmaktadır. Bu durum, az temsil edilen gruplar (örneğin etnik azınlıklar, kırsal bölgelerde yaşayan bireyler veya nadir hastalık taşıyanlar kişiler) söz konusu olduğunda modelin performansında belirgin düşüşlere neden olabilmektedir (Dankwa-Mullan, 2022; Finlayson, 2021).

Örneğin, çoğunlukla beyaz ve orta yaşlı bireylerden elde edilen verilerle eğitilen bir tahmin modeli, siyahi veya Latin kökenli bireylerde kardiyovasküler hastalık riskini doğru biçimde öngöremeyebilir. Bu tür durumlar, yalnızca teknik sınırlamalar değil; aynı zamanda sağlık hizmetlerindeki yapısal eşitsizlikleri pekiştiren ve klinik kararların güvenilirliğini zedeleyen ciddi sonuçlar doğurabilir (Ward et al., 2020).

Bununla birlikte, etiketleme sürecindeki öznellik ve tutarsızlık da önemli bir sorun alanıdır. Etiketleme hataları, değerlendiriciler arası farklılıklar ve klinik yorumlardaki öznel değişkenlik, özellikle psikiyatri veya dermatoloji gibi disiplinlerde modellerin doğruluğunu olumsuz etkileyen sistematik gürültüye neden olabilir (Sylolypavan, 2023).

Veri yanlılığını azaltmak amacıyla sentetik çoğullama (oversampling), veri artırma (data augmentation) ve adil öğrenmeye yönelik modelleme teknikleri gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu stratejiler, veri çeşitliliği ve kalitesi konusundaki temel eksiklikleri tamamen ortadan kaldıramaz. Bu

nedenle, gerçek dünya nüfusunun heterojenliğini yansıtan **kapsayıcı ve dengeli** veri setlerinin oluşturulması, tıbbi YZ geliştirme süreçlerinin öncelikli hedeflerinden biri olmalıdır (Arora, 2023).

Etiketleme Sorunları ve Veri Güvenilirliği

Denetimli ğrenme modellerinin başarısı, büyük lde eğitim sürecinde kullanılan etiketlerin doğruluğuna ve tutarlılığına bağlıdır. Ancak klinik ortamlarda kullanılan etiketler; elektronik sağlık kayıtları (EHR), görüntüleme raporları, laboratuvar sonuçları veya manuel dosya incelemeleri gibi çeşitli kaynaklardan elde edilmekte ve bu kaynaklar sıklıkla hata ve belirsizlik içermektedir.

İlk olarak, klinik tanıları hekimin bireysel yorumu, kurum içi uygulamalar ya da kodlama standartlarına göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, bir zatürre tanısı; radyolojik bulgulara, semptomlara veya faturalama gerekçelerine dayanarak farklı şekillerde kodlanabilir. Bu durum, “altın standart” olarak kabul edilen tanı verisinin aslında güvenilirliğini yitirmesine yol açabilir (Park, 2021).

İkinci olarak, birçok veri kümesinde etiketleme süreci için standartlaştırılmış protokoller bulunmamaktadır. Araştırmalar, deneyimli uzmanlar arasında dahi aynı tıbbi görüntüleri yorumlarken anlamlı görüş ayrılıkları yaşandığını göstermektedir (Brady, 2020). Üstelik büyük lekli YZ projelerinde etiketleme süreçlerinin dış kaynaklara devredilmesi veya kıdemsiz personele bırakılması, veri kalitesini daha da düşürmektedir.

nc olarak, tıbbi bilgi zamanla geliştiğinden, tanı kategorileri evrim geçirebilir. Bu da geçmiş verilerle eğitilmiş sistemlerin, artık geçerliliğini yitirmiş veya güncel sınıflandırmalara uymayan etiketlere dayanmasına neden olabilir. Özellikle onkoloji ve enfeksiyon hastalıkları gibi hızla değişen alanlarda bu sorun daha belirgindir (Giuste, 2022).

Bu tür zorluklar, çoklu değerlendirici uzlaşısına dayalı etiketleme, değerlendiriciler arası uyum ölçümleri ve periyodik etiket gözden geçirmeleri gibi kapsamlı kalite kontrol uygulamalarını gerekli kılmaktadır. Ayrıca, denetimsiz ve yarı denetimli öğrenme gibi alternatif yöntemler, etiket hatalarının etkisini azaltmak açısından umut vadeder; ancak bu yaklaşımlar da belirli teknik karmaşıklıklar içerir (Sylolypavan, 2023).

Algoritmik Şeffaflık ve Açıklanabilirlik

Derin öğrenmeye dayalı gelişmiş YZ modelleri çoğu zaman “kara kutu” sistemler olarak tanımlanır; çünkü bu sistemler belirli çıktılar üretse de; bu çıktılara nasıl ulaştıklarını açık ve anlaşılır biçimde ifade edemezler. Tıp gibi yaşam ve ölüm kararlarının söz konusu olduğu bir alanda, bu açıklanabilirlik eksikliği, klinik güvenin ve etik hesap verebilirliğin önünde ciddi bir engel oluşturmaktadır (El-Sappagh, 2021).

Açıklanabilirlik yalnızca teknik bir tercih değil; aynı zamanda etik, klinik ve hukuki bir gerekliliktir. Klinik uzmanlar, kararlarının gerekçesini hastalara, meslektaşlarına ve düzenleyici kurumlara karşı açıklamakla yükümlüdür. Bu nedenle, bir YZ modelinin tedavi önerisinde bulunduğu durumlarda, hekimin bu önerinin mantığını anlayabilmesi ve sorgulayabilmesi gerekir (Arora, 2023).

Bu gereksinimler doğrultusunda, açıklanabilir yapay zekâ (XAI) yöntemleri, model kararlarının arkasındaki nedenleri anlaşılır kılmayı amaçlamaktadır. Örneğin SHAP (Shapley Additive Explanations), her özelliğin karar sürecine katkısını hesaplamaya çalışırken; LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations), modelin lokal karar bölgeleri için sadeleştirilmiş açıklamalar üretir (Ghassemi, 2021). Bu teknikler, modelin hangi giriş özelliklerinden nasıl etkilendiğini görselleştirerek karar mantığını daha anlaşılır kılmayı amaçlamaktadır.

Bununla birlikte, bu tekniklerin de bazı sınırlılıkları vardır. Genellikle yaklaşık sonuçlar sunarlar, giriş verisindeki küçük değişikliklere duyarlıdırlar ve modelin genel davranışını aşırı basitleştirme riski taşırlar. Ayrıca, bu tekniklerin sunduğu görselleştirme ve istatistiksel açıklamaların, klinisyenler tarafından doğru ve etkin biçimde yorumlanabilmesi için özel eğitim gerekebilir. Aksi takdirde, açıklanabilirlik sağlama amacı yeni yanlış anlamalar doğurabilir.

Model güvenilirliğini ve klinik kabul edilebilirliğini artırmak için geliştiriciler, tasarım sürecinin en başından itibaren şeffaflık ilkesini gözetmeli, gerektiğinde daha açıklanabilir basit modelleri tercih etmeli veya kullanıcı arayüzlerine açıklayıcı modüller entegre etmelidir (Xu, 2024). Öte yandan, klinik eğitim süreçlerine YZ okuryazarlığı da dâhil edilerek bu sistemlerin daha bilinçli ve güvenli biçimde kullanımı teşvik edilmelidir.

Model Genellenebilirliği ve Harici Doğrulama

Tıpta YZ uygulamalarının en yaygın başarısızlık nedenlerinden biri, modellerin eğitildikleri veriler dışında yeterince başarılı olamamasıdır. Bir hastanede yüksek doğrulukla çalışan bir sistem, farklı hasta demografileri, klinik uygulamalar, cihaz altyapısı ve dokümantasyon biçimleri nedeniyle başka bir hastanede aynı başarıyı gösteremeyebilir.

Bu sınırlılık, araştırma raporlamalarındaki eksikliklerle daha da derinleşmektedir. Birçok akademik çalışma yalnızca iç doğrulama sonuçlarını sunmakta, bağımsız dış veri kümeleriyle modelin geçerliliğini sınamamaktadır. Harici doğrulamanın yapılmaması, modelin sağlamlığına dair gerçekçi olmayan beklentiler doğurmakta ve bu sistemlerin klinik ortamlara yanlış güvenle entegre edilmesine neden olabilmektedir (Olawade, 2023).

Genellenebilirlik sorunu özellikle düşük ve orta gelirli ülkeler için kritik önem taşımaktadır. Bu bölgelerdeki sağlık

altyapısı, hasta profilleri ve tedavi yaklaşımları; genellikle yüksek gelirli ülkelerden elde edilen verilerle eğitilen modellerden önemli ölçüde farklıdır. Harici doğrulama yapılmadan bu tür sistemlerin bu ortamlarda kullanılması, etkisiz sonuçlar üretmenin ötesinde, hasta güvenliğini de tehlikeye atabilir (Ning, 2023).

Bu nedenle, YZ geliştiricileri titiz model doğrulama stratejilerini benimsemelidir. Eğitim, doğrulama ve test setlerinin net biçimde ayrılması; çok merkezli ve farklı coğrafyalardan elde edilen verilerle model performansının değerlendirilmesi; ayrıca model kodlarının, ağırlıklarının ve eğitim süreçlerinin açık erişimle paylaşılması gereklidir. PhysioNet ve MIMIC gibi veri paylaşım platformları, bu tür şeffaf ve tekrarlanabilir çalışmalar için değerli kaynaklar sunmaktadır.

Sistem Entegrasyonu ve İş Akışına Uyum

YZ modellerinin klinik başarıya ulaşması, yalnızca teknik doğruluklarına değil, aynı zamanda gerçek dünya klinik iş akışlarına etkin biçimde entegre edilebilmelerine bağlıdır. Entegrasyon sürecinde karşılaşılan başlıca zorluklar arasında, elektronik sağlık kayıtları (EHR) ile teknik uyumsuzluk, klinik rutinlerin bozulması ve sağlık çalışanlarının sistemlere yönelik düşük desteği yer almaktadır (Silcox, 2024).

Kullanıcıların farklı arayüzlerde işlem yapmak zorunda kaldığı, tekrarlayan verileri manuel olarak girdiği ya da alışıktı olmadıkları çıktı formlarıyla karşılaştığı sistemler, kullanıcı deneyimini zayıflatır. Bu durum uyarı yorgunluğu, memnuniyetsizlik ve sistemin benimsenmesinde direnç gibi sonuçlar doğurabilir.

Etkili entegrasyon, geliştirici ekiplerle son kullanıcılar arasında tasarım ve uygulama sürecinin her aşamasında sürekli iletişim ve iş birliğini gerektirir. İnsan merkezli tasarım yaklaşımları, kullanılabilirlik testleri ve gerçek klinik ortamlarda yürütülen pilot

uygulamalar, YZ araçlarının mevcut uygulamaları kesintiye uğratmadan desteklemesini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir (Li, 2024). Ayrıca, bu sistemlerin HL7 FHIR gibi birlikte çalışabilirlik standartlarına uygun şekilde geliştirilmesi ve doğrudan EHR sistemlerine entegre edilmesi gerekmektedir (Juluru, 2021).

Sistemin başarısı, yalnızca teknik entegrasyona değil, aynı zamanda kullanıcı eğitimi ve destek yapılarının gücüne de bağlıdır. Klinisyenler, YZ araçlarının işlevselliğini, sınırlılıklarını ve potansiyel hatalarını anlayabilecek bilgiye sahip olmalı; gerektiğinde sistem çıktılarının dışına çıkma yetkisini de kullanabilmelidir. Tıbbî cihaz ve ilaçlarda olduğu gibi, YZ sistemleri de açık kullanım yönergeleri, risk bildirimleri ve güncelleme protokolleriyle birlikte sunulmalıdır.

Ölçeklenebilirlik ve Hesaplama Maliyeti

Sağlık alanında YZ sistemlerinin geniş çaplı benimsenmesinin önündeki temel engellerden biri, bu sistemlerin farklı ölçekteki sağlık kurumlarına etkin biçimde uyarlanabilmesidir. Yüksek doğrulukla çalışan birçok model, güçlü grafik işlemciler (GPU), yüksek bellek kapasitesi ve sık güncelleme gereksinimleri gibi önemli hesaplama kaynaklarına ihtiyaç duyar. Bu tür altyapı talepleri, özellikle küçük ölçekli klinikler, kırsal bölgelerdeki hastaneler ve gelişmekte olan ülkelerdeki sağlık sistemleri için önemli bir engel oluşturmaktadır (Shamszare, 2023).

Bununla birlikte, bulut tabanlı YZ çözümleri ölçeklenebilirliği artırma potansiyeline sahip olsa da gecikme süresi, sistem güvenilirliği ve veri güvenliği gibi yeni riskleri de beraberinde getirir. Sağlık kurumları bu teknolojileri benimserken; veri ihlali riski, olası sistem kesintileri ve yasal uyum problemleri gibi olumsuzlukları da göz önünde bulundurmak zorundadır. Öte yandan, yerel sistem çözümleri daha fazla kontrol ve güvenlik

sağlayabilir; ancak genellikle daha az esnektir ve bakım açısından daha fazla kaynak gerektirir (Shang, 2024).

Hesaplama yükünü azaltmak amacıyla geliştirilen model sıkıştırma, budama (pruning), nicemleme (quantization) ve federatif öğrenme gibi teknikler; modellerin daha hafif hâle getirilerek uç birimlere(edge devices) dağıtımını mümkün kılmayı hedeflemektedir. Ancak bu teknikler, kimi zaman doğruluk veya açıklanabilirlikten ödün verilmesini gerektirebilir ve güvenli biçimde uygulanmaları ileri düzey teknik bilgi gerektirebilir.

Ayrıca ölçeklenebilirlik yalnızca donanım kaynaklarıyla sınırlı bir sorun değildir; aynı zamanda organizasyonel düzeyde yönetim, politika geliştirme ve sürdürülebilirlik planlaması gerektiren çok boyutlu bir meseledir. Kurumların YZ sistemlerinin güvenli, etkili ve sorumlu biçimde dağıtımı için satın alma süreçleri, bakım protokolleri, performans izleme sistemleri ve sürekli eğitim programları gibi kurumsal yapılarını güçlendirmeleri gerekmektedir (Bengio, 2024).

Tıpta Yapay Zekâya İlişkin Etik Zorluklar

YZ sistemleri, teknik araçlar olmanın ötesinde, beslendikleri verilerden aldıkları varsayımlara ve sunuldukları bağlama kadar her yönüyle etik kararları etkileyen sosyo-teknik yapılar olarak değerlendirilmelidir. Sağlık hizmetlerine entegre edilen YZ sistemleri, hasta hakları, mesleki sorumluluklar ve toplumsal eşitlik gibi temel değerleri doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle etik sorunlar, rastlantısal değil, sistemin tasarımından uygulanmasına kadar tüm yaşam döngüsünde dikkate alınması gereken temel meselelerdir. Tablo 1.'de sağlıkta kullanılan YZ uygulamalarında yaygın olarak karşılaşılan başlıca etik risk türleri, açıklamaları ve klinik bağlamdaki örnekleri sunulmuştur.

Tablo 1. Öne Çıkan Etik Riskler ve Uygulama Örnekleri

Etik Risk Türü	Açıklama	Klinik Uygulamaya Örnek
Şeffaflık Eksikliği	Modelin karar verme sürecinin anlaşılabilir olması.	YZ sisteminin neden belirli bir tedavi önerdiğinin izah edilememesi.
Veri Önyargısı	Eğitim verisindeki eşitsizliklerin model kararlarına yansımaları.	Kadın hastaların daha az agresif tedavi almasına neden olan model önyargısı.
Mahremiyet İhlali	Hasta verilerinin yetkisiz erişime veya sızıntıya maruz kalması.	Genetik veri kullanan bir sistemin yeterince anonimleştirilmemesi.
Adalet ve Erişim Eşitsizliği	Modelin bazı gruplara (ör. kırsal, yaşlı) karşı düşük performans göstermesi.	Kırsal bölgelerde yaşayan hastalara dair yeterli veri olmadığı için düşük doğruluk.
Otonomi İhlali	Hastaların kendi kararlarını verme hakkının ihlali.	Sistem önerisiyle hekimin hastayı farklı bir karar için yönlendirmesi.

Bu bölüm, sağlıkta YZ'nin etik çerçevesini şekillendiren beş temel başlığa odaklanmaktadır.

a) Özerklik ve Bilgilendirilmiş Onam

Tıbbî etiğin temel ilkelerinden biri hasta özerkliğidir. Bu ilke, bireylerin kendi sağlıkları ve tedavi seçenekleri hakkında bilinçli kararlar verme hakkını içerir. Ancak YZ tabanlı karar destek sistemleri, karar alma sürecini klinik uzmanlığın dışına taşıyarak özerkliği zayıflatabilir (Farhud, 2021). YZ önerileri "en uygun seçenek" olarak sunulduğunda, hasta ve klinisyenler bu kararları sorgulamadan kabul etme eğiliminde olabilir. Karmaşık risk skorları ve algoritmik çıktılar hastalar için anlaşılması güç veriler içerebilir (Bjerring, 2020). Hasta özerkliğini korumak için sağlık kurumları, YZ'nin karar sürecindeki rolü, sınırları ve alternatif yaklaşımlar konusunda açık bilgilendirme yapmalı; ortak karar verme modellerini teşvik etmelidir (Goldberg, 2024).

b) Adalet, Yanlılık ve Temsiliyet

Makine öğrenmesi modelleri, eğitildikleri verilerin yapısından doğrudan etkilenir. Tarihsel yanlılıklar, eksik temsiliyet veya veri önyargıları, modellerin belirli gruplara karşı ayrımcı sonuçlar üretmesine yol açabilir (López, 2022). Bu durum sadece etik açıdan değil, klinik açıdan da zararlıdır.

Bu tür yapısal yanlılıklar yalnızca etik adalet ilkesine zarar vermekle kalmaz; aynı zamanda hatalı ve eşitsiz tedavi kararlarına yol açar. Adalet ilkesini korumak için geliştiricilerin modelleri farklı alt gruplarda test etmesi, adalet denetimleri yapması ve performans farklılıklarını gidermeye yönelik düzenlemeler yapması gerekmektedir (Elendu, 2023). Yaş, toplumsal cinsiyet kimliği, engellilik ve dil gibi eksenler de adalet değerlendirmesine dahil edilmelidir (García-Gómez, 2023).

c) Hesap Verebilirlik ve Sorumluluk Dağılımı

Klinik kararlarda YZ sistemlerinin kullanımı, sorumluluğun kime ait olduğu sorusunu gündeme getirir. Geleneksel etik yapılarda karar verici insandır. Ancak YZ destekli sistemlerde hata durumunda sorumluluğun geliştiricide mi, klinisyende mi, yoksa kurumsal altyapıyı sağlayan sağlık kuruluşunda mı olduğu belirsizleşir (Markus, 2020; Sun, 2025). Bu henüz çözümlenmemiş sorular, paylaşılan sorumluluğa dayalı yeni modellerin önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle paylaşılan sorumluluk modelleri ve açık hesap verebilirlik mekanizmaları geliştirilmelidir.

d) Veri Egemenliği ve Mahremiyet

YZ sistemleri genellikle büyük hacimli hasta verileriyle beslenir. Hastalar, verilerinin hangi amaçlarla, kimler tarafından ve nasıl kullanıldığı konusunda yeterli bilgiye sahip olmayabilir. Bilgi asimetrisi, veri sömürüsü ve rızanın ihlali gibi sorunlar ortaya çıkabilir (Goldberg, 2024; Hildt, 2025). "Veri egemenliği" kavramı, bireylerin ve toplulukların kendi verileri üzerinde denetim hakkını

savunur. Bu ilke özellikle genomik veri ve kamu sağlığı uygulamalarında büyük önem taşır.

Etik veri yönetimi, yalnızca anonimleştirme ile sınırlı olmamalı; ikincil kullanım, veri paylaşımı ve kimlikten arındırma gibi konularda şeffaf politikalar geliştirilmelidir (Martin, 2022).

e) Paydaş Katılımı ve Etik Yönetişim

Tıbbi YZ sistemleri genellikle mühendisler ve veri bilimciler tarafından geliştirilirken, hasta, klinisyen, etik uzmanı ve toplum temsili sürece yeterince dahil edilmemektedir (Shuaib, 2024). Oysa sorumlu YZ geliştirme, disiplinlerarası ve katılımcı yönetişimi zorunlu kılar.

Etik açıdan kapsayıcı bir sistem inşa etmek için tasarım sürecine paydaşların katılımı sağlanmalı; geri bildirim mekanizmaları oluşturulmalı ve etik denetim yapıları kurumsallaştırılmalıdır. Bu katılım, geliştirme aşamasıyla sınırlı kalmamalı; uygulama süreçlerinde de sürekli­lik arz etmelidir (Abujaber, 2024; Shang, 2024).

Etik yönetişim, sadece teknik bir zorunluluk değil; ortak değerlere, toplumsal güvene ve şeffaflığa dayalı dinamik bir taahhüttür.

Tıpta Yapay Zekânın Uygulanmasına İlişkin Hukuki Zorluklar

Sağlık alanında YZ teknolojilerinin hızla gelişmesi, mevcut tıbbi mevzuat ve veri koruma düzenlemelerinin bu yenilikleri karşılamakta yetersiz kaldığı karmaşık hukuki sorunları beraberinde getirmiştir. Geleneksel tıbbi araç ve cihazlardan farklı olarak, YZ algoritmaları çoğunlukla dinamik, veri odaklı ve karar süreçleri bakımından sınırlı şeffaflığa sahip sistemlerdir. Bu özellikler, güvenlik, sorumluluk ve bilgilendirilmiş onam gibi temel hukuki kavramların yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Sağlık kuruluşlarının YZ tabanlı sistemleri giderek daha fazla benimsemesiyle birlikte, bu teknolojilerin yasal olarak güvenli, etik ve hesap verebilir biçimde kullanımı için açık, uygulanabilir ve güncel düzenleyici çerçevelerin oluşturulması kritik önem taşımaktadır.

Bu bölümde, YZ'nin tıpta uygulanmasına ilişkin üç temel hukuki alan ele alınmaktadır:

a) Düzenleyici Belirsizlik ve Algoritmik Uyarlanabilirlik

Klinik bakımda kullanılan YZ sistemleri çoğunlukla “Tıbbî Cihaz Olarak Yazılım” (SaMD) kategorisine alınmakta ve bu nedenle ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) ile Avrupa İlaç Ajansı (EMA) gibi düzenleyici kurumların denetimine tabi tutulmaktadır (Gerke, Minssen ve Cohen, 2020; Topol, 2019). Ancak bu düzenlemeler esasen sabit işleyişe sahip teknolojiler için geliştirilmiştir. Makine öğrenmesine dayalı algoritmaların dinamik ve evrimsel doğası, özellikle dağıtımdan sonra güncellenen modeller bağlamında, yaşam döngüsü yönetimi, doğrulama ve güvenlik değerlendirmelerini hukukten tartışmalı hâle getirmektedir (U.S. FDA, 2021).

“Kilitleme” (locked) ve “uyarlanabilir” (adaptive) algoritmalar arasındaki fark bu noktada kritiktir. Kilitli algoritmalar sabit kaldıkları için düzenleyici onay süreçlerine daha kolay uyarlanabilirken; uyarlanabilir algoritmaların gerçek zamanlı değişkenliği, performans sapmaları ve güvenlik risklerini beraberinde getirir. Avrupa Komisyonu’nun Yapay Zekâ Yasası ve FDA’nın “Toplam Ürün Yaşam Döngüsü” (TPLC) yaklaşımı gibi erken düzenleyici girişimler bu sorunlara çözüm sunmayı hedeflemektedir (Morley, 2020).

Bununla birlikte, küresel ölçekte bir standartlaşma henüz oluşmamıştır. Düzenleyici kurumların çoğu teknik kapasite eksikliği nedeniyle algoritmik sistemleri sürekli izleme ve güncelleme süreçlerini etkin şekilde yönetememektedir. Bu durum, YZ

sistemlerinin ya aşırı temkinle benimsenmesine ya da yeterince denetlenmeden erken uygulamaya sokulmasına neden olabilmektedir.

b) Hukuki Sorumluluk ve Dağıtılmış Karar Alma Süreçleri

YZ destekli klinik karar süreçlerinde hukuki sorumluluğun nasıl paylaşılacağı güncel ve çözümlenmemiş bir sorundur. Geleneksel sağlık hukukunda tıbbî hatalardan doğan sorumluluk hekime veya sağlık kuruluşuna aittir. Ancak YZ sistemleriyle alınan kararlarda, yazılım geliştiricilerinden satıcılara, klinisyenlerden yöneticilere kadar çok sayıda aktör sürece dahil olmaktadır (Ahmed, 2023).

Örneğin, bir YZ sistemi hatalı bir tanı veya bir tedavi planı önerdiğinde ve bu öneri klinisyen tarafından uygulanarak hasta zarara uğradığında sorumluluğun kime ait olacağı belirsizdir. Klinisyen, algoritmaya güvenerek mi hata yapmıştır? Yoksa yazılım geliştiricisi yetersiz performansla mı sistem üretmiştir? Alternatif olarak, kurum sistemin uygulanması için gerekli eğitimi sağlamamış mıdır? Bu gri alanları çözmek amacıyla hukukçular Tablo 2’de yer alan sorumluluk modellerini önermişlerdir.

Tablo 2. Tıbbî Hatalarda Sorumluluk Paylaşım Örnekleri

Senaryo	Hata Kaynağı	Sorumlu Taraf
Yanlış tahmin yapan YZ	Model eğitimi	Yazılım geliştiricisi
Hatalı veri girişi	Kullanıcı hatası	Hekim
Bilgilendirme eksikliği	Klinik uygulama	Sağlık kurumu

Kimi uzmanlar, özerkliğe yaklaşan YZ sistemlerinin sınırlı da olsa hukuki statüye sahip olabileceğini öne sürmektedir. Her ne kadar bu fikir henüz spekülatif düzeyde olsa da mevcut hukuki çerçevelerin yetersizliğini gözler önüne sermektedir. Bu nedenle, yeni yargı kararları, YZ’ye özgü mevzuat ve risk paylaşım

protokolleri birlikte geliştirilmeli; sağlık hizmetlerinde adil ve uygulanabilir sorumluluk çerçeveleri oluşturulmalıdır.

c) Veri Koruma, Egemenlik ve Mahremiyet Hakları

YZ sistemleri, klinik kararlarını oluşturabilmek için büyük ölçekli kişisel sağlık verilerine ihtiyaç duyar. Bu da veri toplama, kullanım, paylaşım ve şeffaflık konularında çok sayıda etik ve hukuki meseleyi beraberinde getirir. Birçok ülkede HIPAA (Sağlık Sigortası Taşınabilirlik ve Sorumluluk Yasası) ve GDPR (Genel Veri Koruma Tüzüğü) gibi yasalar veri kullanımını düzenlemektedir. Ancak bu düzenlemeler algoritmik sistemleri göz önünde bulundurarak hazırlanmış değildir (Hildt, 2025).

Örneğin GDPR'nin bireylere sağladığı “otomatik karar alma süreçlerine karşı açıklama talep etme hakkı”, YZ'nin karmaşık ve genellikle açıklanamayan karar yapılarıyla doğrudan çelişmektedir. Bunun yanı sıra, hastaların verilerinin eğitim, sınır ötesi paylaşım ya da ikincil analizler için kullanıldığı durumlarda bilgilendirme çoğu zaman yetersizdir (Ahmed, 2023; Hildt, 2025).

Veri egemenliği kavramı ise bireysel hakların ötesinde, özellikle yerli ve hassas toplulukların kültürel değerleri doğrultusunda kolektif veri kontrolü talebini içermektedir. Bu durum özellikle genomik araştırmalar ve halk sağlığı izleme sistemleri açısından önemlidir.

Bu doğrultuda, sağlık kurumları aşağıdaki unsurları içeren güçlü veri yönetişimi stratejileri benimsemelidir:

- Şeffaf veri kullanım sözleşmeleri,
- Topluluk düzeyinde veri gözden geçirme kurulları,
- Güvenli depolama ve şifreleme protokolleri,
- Algoritmik kararların denetlenebilir kayıtları.

Yasal yaptırımlar yalnızca bireysel mahremiyet haklarını değil, aynı zamanda topluluk temelli veri adaleti ilkelerini de güvence altına alacak şekilde evrilmelidir.

Etik Ve Etkili Yapay Zekâ Entegrasyonu İçin Stratejik Öneriler

YZ'nın klinik ortamlarda güvenli ve adil biçimde uygulanabilmesi için tüm paydaşların benimsemesi gereken bir dizi stratejik ilke bulunmaktadır. Bu rehber ilkeler, teknik yenilikle gerçek dünya etkisi arasındaki boşluğu kapatmayı; YZ'nın yalnızca işlevsel değil, aynı zamanda etik ilkelere ve hukuki düzenlemelere de uyumlu olmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

YZ geliştirme süreçleri, yalnızca veri bilimcilerin sorumluluğunda olmamalıdır. Bunun yerine; hekimler, hemşireler, etik uzmanları, hukukçular ve hasta temsilcilerinden oluşan kapsayıcı ekiplerin geliştirme sürecinin her aşamasına etkin biçimde katılması gerekmektedir. Bu tür iş birlikleri, modelin klinik bağlamla uyumunu artırmakta ve risklerin veya kör noktaların erken aşamada tespit edilmesini sağlamaktadır (Goldberg, 2024; Markus, 2020).

Bu ekipler, kullanıcı geri bildirimlerinin sistem iyileştirmesine sürekli yön verdiği yinelemeli ortak tasarım (co-design) yaklaşımını benimsemelidir. Özellikle akademik tıp merkezleri, yüksek riskli uygulamaları değerlendirmek ve paydaş temsilini garanti altına almak üzere “YZ etik kurulları” oluşturmalıdır.

Sağlıkta kullanılan YZ araçları, düzenli olarak harici doğrulamadan geçirilmeli ve dağıtım sonrası denetimlere tabi tutulmalıdır. Kurumlar, performans metriklerinin, hata modlarının ve güncelleme kayıtlarının şeffaf biçimde tutulduğu “YZ kayıtları” oluşturmalıdır. Bu uygulama; hesap verebilirliği destekler, kullanıcı güvenini artırır ve önyargı ya da sapmaların erken fark edilmesini sağlar (Li, 2024).

Bu denetim süreçleri hem nicel (örneğin tahmin doğruluğu, alt grup duyarlılığı) hem de nitel (örneğin klinisyen yorumları, hasta sonuçları) ölçütleri içermelidir. Düzenleyici otoriteler, bu izleme ve değerlendirme süreçlerini ruhsatlandırma ve yeniden sertifikalandırma prosedürlerinin ayrılmaz bir parçası hâline getirmelidir.

Kullanılabilir, etkin bir YZ modeli yalnızca teknik açıdan doğru değil; aynı zamanda yorumlanabilir, uygulanabilir ve klinik iş akışına sorunsuz biçimde entegre edilebilir olmalıdır. Geliştiriciler, kullanıcıların YZ çıktılarının mantığını anlayabilmeleri ve sorgulayabilmeleri için SHAP ya da karşı olgusal (counterfactual) açıklama gibi Açıklanabilir YZ (XAI) tekniklerini uygulamalıdır (Marey, 2024).

Aynı derecede önemli olan bir diğer husus da insan merkezli arayüz tasarımıdır. YZ araçları mevcut klinik panellere entegre edilmeli, minimum düzeyde kesinti yaratmalı ve eyleme dönük açık sinyaller sağlamalıdır. Klinisyenler, algoritmik çıktıları sorumlu biçimde yorumlamak ve gerektiğinde insan yargısının önceliğini tanımak üzere özel eğitim almalıdır.

Önyargı azaltımı, veri kümesi oluşturma aşamasında başlamalı ve model doğrulama ile dağıtımına kadar devam etmelidir. Geliştiriciler, temsili örnekleme, alt popülasyonlar üzerinde katmanlı testler ve potansiyel eşitsizliklerin belgelenmesine öncelik vermelidir (Chin, 2023).

YZ araçlarının dağıtımı öncesinde sağlık eşitliği denetimleri yapılmalı ve kabul edilebilir eşitsizlikler için net eşikler belirlenmelidir. Ayrıca, kurumlar; dil, engellilik ya da dijital erişim eksikliği nedeniyle savunmasız grupların bu araçlar tarafından orantısız şekilde dışlanmadığından emin olmalıdır.

Ulusal mevzuatlar, YZ'ye özgü riskleri dikkate alacak biçimde güncellenmelidir. Bu kapsamda, tıbbî sorumluluk, veri

koruma ve yazılım güvenliği gibi alanlar yeniden ele alınmalı; geliştiriciler, sağlık profesyonelleri ve kurumlar arasında sorumluluğu açık biçimde tanımlayan hukuki modeller oluşturulmalıdır (Gerke, 2020).

Ayrıca, uluslararası düzeyde uyum da önem taşımaktadır. FDA, EMA ve DSÖ'nün YZ araçlarına farklı yaklaşımı, küresel uygulama açısından kafa karışıklığı ve engeller yaratmaktadır. OECD'nin *Yapay Zekâ İlkeleri* ve UNESCO'nun *Yapay Zekâ Etik Kılavuzları* gibi çok taraflı girişimler, ulusal mevzuatları şekillendirmede yol gösterici olmalıdır.

Güvenilir YZ, etik veri yönetimine dayanmalıdır. Kurumlar; onam, yeniden kullanım ve veri erişimiyle ilgili açık politikalar oluşturmalıdır. Hastalar, verilerinin kimler tarafından, hangi amaçlarla ve hangi kapsamda kullanılacağını konusunda da şeffaf biçimde bilgilendirilmelidir.

Özellikle tarihsel olarak dışlanmış gruplarla çalışırken topluluk katılımı özellikle hayati önemdedir. Veri yönetimi modelleri, topluluk temelli veri gözden geçirme kurullarını içermeli ve özellikle genomik ve halk sağlığı alanlarında kolektif veri egemenliğine saygı göstermelidir (Emmons, 2023; Haring, 2021; Sabatello, 2020).

Sonuç Ve Genel Değerlendirme

YZ'nin sağlık alanına entegrasyonu, yalnızca teknolojik bir ilerleme değil; aynı zamanda sağlık hizmetlerinin doğasını dönüştüren köklü bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Tanı süreçlerinin hızlanması, tedavilerin kişiselleştirilmesi ve sağlık hizmetlerine erişimin iyileştirilmesi gibi potansiyelleriyle YZ, modern tıbbın verimliliğini ve doğruluğunu artırma vadinde bulunmaktadır. Ancak bu vaatlerin ardında, veri önyargılarından

hukuki belirsizliklere, etik kaygılardan altyapı yetersizliklerine kadar çok sayıda yapısal zorluk da yer almaktadır.

Bu çalışma, YZ'nin klinik uygulamalara entegrasyon sürecinde karşılaşılan teknik, etik ve hukuki engelleri çok boyutlu bir yaklaşımla ele almış; bu sorunların etkili biçimde yönetilebilmesi için çözüm odaklı stratejiler önermiştir. Bu stratejiler arasında disiplinler arası iş birliğinin güçlendirilmesi, XAI modellerinin geliştirilmesi, veri kalitesinin standardizasyonu, eşitlik temelli tasarım ilkelerinin benimsenmesi ve güçlü bir yönetim yapısının oluşturulması öne çıkmaktadır. Tablo 3'te, YZ'nin klinik ortamlarda kullanımına ilişkin başlıca zorluklar ve bunlara yönelik çözüm önerileri özetlenmiştir.

Tablo 3. Klinik Entegrasyon Sürecinde YZ Sistemlerine İlişkin Zorluklar ve Çözüm Önerileri

Zorluk	Açıklama	Çözüm Önerisi
Klinik Kabul Eksikliği	Sağlık profesyonelleri, model kararlarına güven duymayabilir.	Açıklanabilirlik (ör. SHAP, LIME) ve klinisyen odaklı eğitim programları uygulanmalıdır.
Veri Kalitesi Sorunları	Eksik, hatalı ya da standart dışı kayıtlar model başarısını düşürür.	Veritabanı standardizasyonu (HL7, FHIR) ve ön işleme protokollerinin kurulması önerilir.
Mevzuat ve Hukuki Belirsizlik	YZ sistemlerinin sorumluluğu yasal olarak net değildir.	Ulusal mevzuatla uyumlu sorumluluk paylaşım modelleri ve etik kurulların yönlendirmesi gereklidir.
Klinik Altyapı Uyumsuzluğu	Donanım, yazılım veya entegrasyon eksikliği nedeniyle sistemler işleyemez hâle gelir.	Kurumlara özel API tabanlı entegrasyon çözümleri ve BT altyapısı güncellemeleri yapılmalıdır.
Zamanla Performans Bozulması (Concept Drift)	Model zamanla değişen hasta profiline uyum sağlayamayabilir.	Düzenli performans izleme, periyodik yeniden eğitim (retraining) ve geri bildirim döngüleri kurulmalıdır.

Ortaya çıkan temel gerçek şudur: YZ'nın sağlık alanındaki varlığı, yalnızca algoritmaların doğruluk oranlarıyla değil; bu teknolojilerin toplumsal adalet, eşit erişim ve insan onuruna katkı düzeyiyle de değerlendirilmelidir. YZ tabanlı çözümle ne kadar yenilikçi olursa olsun, bu sistemlerin meşruiyeti ve başarısı, etik ilkelere bağlılık ve hukuki sorumluluk bilinciyle şekillenmelidir.

Bu nedenle, gelecekte YZ sistemlerinin gelişimi ve uygulanmasında “önce dağıt, sonra düzelt” yaklaşımından uzak durulmalı; bunun yerine, yansıtıcı düşünceye, paydaş katılıma ve uzun vadeli hesap verebilirliğe dayalı proaktif bir anlayış benimsenmelidir. Ayrıca tasarım aşamasından itibaren etik ilke ve hukuki çerçevelerin merkezde tutulması, yalnızca klinik verimliliği değil; aynı zamanda kamusal güveni ve toplumsal faydayı da artıracaktır.

Sonuç olarak, sağlıkta YZ'nın geleceğini yalnızca makineler değil; bu makinelerin nasıl, kim için ve hangi değerle doğrultusunda kullanılacağına ilişkin alacağımız kararlar belirleyecektir.

Kaynakça

- Abujaber, A. A. (2024). Ethical framework for artificial intelligence in healthcare research: A path to integrity. *In World Journal of Methodology*, 14(3). doi:<https://doi.org/10.5662/wjm.v14.i3.94071>
- Ahmed, M. I. (2023). A systematic review of the barriers to the implementation of artificial intelligence in healthcare. *Cureus*, 15(10).
- Alsulimani, A. A. (2024). The Impact of Artificial Intelligence on Microbial Diagnosis. *Microorganisms*, 12(6), 1051. doi:<https://doi.org/10.3390/microorganisms12061051>
- Arora, A. A. (2023). The value of standards for health datasets in artificial intelligence-based applications. *Nature Medicine* . 29(1), 2929.
- Bengio, Y. H.-C.-Q.-S. (2024). Managing extreme AI risks amid rapid progress <https://doi.org/10.1126/science.adn0117>. *Science*, 384(6698), 842. doi:<https://doi.org/10.1126/science.adn0117>
- Bjerring, J. C. (2020). Artificial Intelligence and Patient-Centered Decision-Making. *Philosophy & Technology*, 34(2), 349. doi: <https://doi.org/10.1007/s13347-019-00391-6>
- Brady, A. P. (2020). Artificial Intelligence in Radiology—Ethical Considerations. *Diagnostics*, 10(4), 231. doi: <https://doi.org/10.3390/diagnostics10040231>
- Chin, M. H.-R.-B. (2023). Guiding Principles to Address the Impact of Algorithm Bias on Racial and Ethnic Disparities in Health and Healthcare. *JAMA Network Open*, 16(2). doi:<https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2023.45050>

- Dankwa-Mullan, I. &. (2022). Artificial Intelligence and Machine Learning Technologies in Cancer Care: Addressing Disparities, Bias, and Data Diversity . *Cancer Discovery*, 12(6), 1423. doi:<https://doi.org/10.1158/2159-8290.cd-22-0373>
- Elendu, C. A. (2023). Ethical implications of AI and robotics in healthcare. *Medicine*, 102(50). doi:<https://doi.org/10.1097/md.00000000000036671>
- El-Sappagh, S. A. (2021). A multilayer multimodal detection and prediction model based on explainable artificial intelligence for Alzheimer's disease. *cientific Reports*, 11(1).
- Emmons, K. M. (2023). Data sharing in the context of community-engaged research partnerships. *Social Science & Medicine*, 325.
- Farhud, D. D. (2021). Ethical Issues of Artificial Intelligence in Medicine and Healthcare. *Iranian Journal of Public Health*, 50(11). doi:<https://doi.org/10.18502/ijph.v50i11.7600>
- Finlayson, S. G. (2021). The Clinician and Dataset Shift in Artificial Intelligence. *In New England Journal of Medicine*, 385(3).
- Gao, Y. W.-S. (2025). Application of artificial intelligence in the diagnosis of malignant digestive tract tumors. *Journal of Translational Medicine*, 23(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s12967-025-06428-z>
- García-Gómez, J. M.-S.-C.-M. (2023). Functional requirements to mitigate the Risk of Harm to Patients from Artificial Intelligence in Healthcare. *arXiv (Cornell University)*, 2309(10424).

- Gerke, S. M. (2020). *Ethical and legal challenges of artificial intelligence-driven healthcare*. Elsevier BV: Elsevier BV. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818438-7.00012-5>
- Ghassemi, M. O.-R. (2021). The false hope of current approaches to explainable artificial intelligence in health care . *The Lancet Digital Health*, 3(11). doi: [https://doi.org/10.1016/s2589-7500\(21\)00208-9](https://doi.org/10.1016/s2589-7500(21)00208-9)
- Giuste, F. S. (2022). Explainable Artificial Intelligence Methods in Combating Pandemics. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 16(5). doi:<https://doi.org/10.1109/rbme.2022.3185953>
- Goldberg, C. B. (2024). To do no harm — and the most good — with AI in health care. *Nature Medicine*, 30(3), 623.
- Haring, R. C. (2021). Empowering Equitable Data Use Partnerships and Indigenous Data Sovereignities Amid Pandemic Genomics. *Frontiers in Public Health*. doi:<https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.742467>
- Hildt, E. (2025). What Is the Role of Explainability in Medical Artificial Intelligence? A Case-Based Approach. *Bioengineering*, 12(4), 375. doi:<https://doi.org/10.3390/bioengineering12040375>
- Juluru, K. S.-H.-R. (2021). Juluru, K., Shih, H.-H., Murthy, K. N. K., Elnajjar, P., El-Rowmeim, A., Roth, C. J., Genereaux, B., Fox, J. J., Siegel, E. L., & Rubin, D. L. (2021). Integrating AI Algorithms into the Clinical Workflow. *Radiology Artificial Intelligence*.
- Li, Y.-H. L.-Y. (2024). Innovation and challenges of artificial intelligence technology in personalized healthcare. *Scientific*

Reports, 14(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-024-70073-7>

López, D. M.-O. (2022). Challenges and solutions for transforming health ecosystems in low- and middle-income countries through artificial intelligence . *Frontiers in Medicine*. doi:<https://doi.org/10.3389/fmed.2022.958097>

Maccaro, A. S. (2024). Clearing the Fog: A Scoping Literature Review on the Ethical Issues Surrounding Artificial Intelligence-Based Medical Devices. *Journal of Personalized Medicine*, 14(5), 443. doi:<https://doi.org/10.3390/jpm14050443>

Marey, A. A. (2024). Explainability, transparency and black box challenges of AI in radiology: impact on patient care in cardiovascular radiology. *The Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 55(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s43055-024-01356-2>

Markus, A. F. (2020). The role of explainability in creating trustworthy artificial intelligence for health care: A comprehensive survey of the terminology, design choices, and evaluation strategies. *Journal of Biomedical Informatic*, 103665, 113. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbi.2020.103655>

Martin, L. T. (2022). The Issues of Interoperability and Data Connectedness for Public Health. *Big Data*, 10. doi:<https://doi.org/10.1089/big.2022.0207>

Mennella, C. M. (2024). Ethical and regulatory challenges of AI technologies in healthcare: A narrative review. *Heliyon*, 10(4). doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26297>

- Morley, J. M. (2020). The ethics of AI in health care: A mapping review . *Social Science & Medicine*, 260 , 113172. doi:<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113172>
- Ning, Y. V. (2023). A roadmap to fair and trustworthy prediction model validation in healthcare. *arXiv (Cornell University)*. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.03779>
- Olawade, D. B.-O. (2023). Using artificial intelligence to improve public health: a narrative review . *Frontiers in Public Health*. doi:<https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1196397>
- Park, D. J.-J. (2021). Development of machine learning model for diagnostic disease prediction based on laboratory tests. *Scientific Reports*, 11(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-021-87171-5>
- Pressman, S. M.-C. (2024). AI and Ethics: A Systematic Review of the Ethical Considerations of Large Language Model Use in Surgery. *Healthcare*, 12(8), 825.
- Sabatello, M. M. (2020). Data sharing and community-engaged research. *Science*, 378(6616), 141. doi:<https://doi.org/10.1126/science.abq6851>
- Schwalbe, N. W. (2020). Data Sharing and Global Public Health: Defining What We Mean by Data. *Frontiers in Digital Health*, 2. doi: <https://doi.org/10.3389/fdgth.2020.612339>
- Shamszare, H. &. (2023). Clinicians' Perceptions of Artificial Intelligence: Focus on Workload, Risk, Trust, Clinical Decision Making, and Clinical Integration . *Healthcare*, 11(6), 2308. doi:<https://doi.org/10.3390/healthcare11162308>
- Shang, Z. C. (2024). Artificial Intelligence, the Digital Surgeon: Unravelling Its Emerging Footprint in Healthcare. *J. Journal*

- of *Multidisciplinary Healthcare*, 4011. doi:
<https://doi.org/10.2147/jmdh.s482757>
- Shuaib, A. (2024). Transforming Healthcare with AI: Promises, Pitfalls, and Pathways Forward. *International Journal of General Medicine*, 1765-1771. doi:<https://doi.org/10.2147/ijgm.s449598>
- Silcox, C. Z. (2024). The potential for artificial intelligence to transform healthcare: perspectives from international health leaders. *Npj Digital Medicine*, 7(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41746-024-01097-6>
- Sun, Q. A. (2025). Explainable artificial intelligence for medical applications: A review. *ACM Transactions on Computing for Healthcare*, 6(2), 1-31.
- Sutton, R. T. (2020). An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success . *Npj Digital Medicine*, 3(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41746-020>
- Syloypavan, A. S. (2023). The impact of inconsistent human annotations on AI driven clinical decision making. *Npj Digital Medicine*, 6(1). doi:<https://doi.org/10.1038/s41746-023-00773-3>
- Thakur, G. K. (2024). *Deep Learning Approaches for Medical Image Analysis and Diagnosis*. Cureus. doi:
<https://doi.org/10.7759/cureus.59507>
- U.S. Food and Drug Administration. (2021). *Artificial Intelligence/Machine Learning (AI/ML)-Based Software as a Medical Device (SaMD) Action Plan [Policy report]*. U.S. Department of Health and Human Services, Center for Devices and Radiological Health.

Xu, Y. G. (2024). Enhancing user experience and trust in advanced LLM-based conversational agents . *Computing and Artificial Intelligence.*, 2(2), 1467.
doi:<https://doi.org/10.59400/cai.v2i2.1467>

CHAPTER 0

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE 3D YAZICILARIN GELİŞİMİ VE ADLİ BİLİMLERDEKİ ÖNEMİ

ORHAN MERAL¹
MUAZZEZ ELÇİN ÖZKAN²

Giriş

Üç boyutlu (3D) baskı veya katmanlı üretim (AM) olarak da bilinen teknoloji, malzemenin katman katman birleştirilmesiyle fiziksel, üç boyutlu bir nesne oluşturma sürecidir (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Brachet & ark., 2023). Bu, geleneksel işlemenin aksine, istenen şekli elde etmek için bir bloktan malzeme çıkarılması yerine, malzemenin ardışık olarak eklenmesiyle gerçekleşir (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Brachet & ark., 2023; Azlin & ark., 2022). 3D baskı, üç boyutlu modellerin hızlı prototiplemesi için kullanılır (Gross & ark., 2014).

3D baskı teknolojisi 1980'lerden beri mevcuttur (Cheng & ark., 2016). Son birkaç on yılda daha erişilebilir ve popüler hale gelmiş, mühendislik, sağlık hizmetleri ve diş hekimliği gibi alanlarda hızlı bir gelişim ve kullanım göstermiştir (Carew & Errickson, 2020; Li & ark., 2021). Günümüzde, ilk kurulduğundan yaklaşık 30 yıl sonra ana endüstri oyuncuları tarafından

¹ Doç. Dr., Bakırçay Üniversitesi Tıp Fakültesi, Adli Tıp Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-7159-1595 , e-mail: orhan.meral@bakircay.edu.tr

² Uzm. Dr., Bakırçay Üniversitesi Çiğli Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Adli Tıp Bölümü, Orcid: 0000-0003-0946-3653 , e-mail: elcinkiyemet@gmail.com

benimsenmiştir (Azlin & ark., 2022). Bu teknoloji, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan ürünlerin üretilmesini sağlayarak, imalat ve araştırmayı kökten değiştirebilecek, ezber bozan ve çığır açan bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Li & ark., 2021; Gross & ark., 2014). 3D baskılı nesneler birçok sektörde kullanılmaktadır (Brachet & ark., 2023).

Adli bilimlerde, 3D baskı uygulamalarının potansiyeli giderek daha fazla tanınmaktadır. Bu teknoloji, bir nesnenin veya olayın kalıcı bir kaydını oluşturmak için kullanılabilir ve bu kayıt, gerçek nesnenin veya olayın bütünlüğünü koruyarak tanıtıcı delil olarak hizmet edebilir. Benzer şekilde, 3D baskı, bir olay yerindeki kanıtsal mekânsal ilişkilerin görselleştirilmesine yardımcı olabilir. Ayrıca, mahkeme salonunda karmaşık terminolojinin anlaşılmasını artırmaya yardımcı olabilir. Adli bilimlerde 3D baskının kullanımına ilişkin çeşitli vaka çalışmaları mevcuttur (Carew & Errickson, 2020; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Osteolojik travmanın mahkeme salonu için 3D görselleştirilmesi ve silah tanımlamasında kullanımı gösterilmiştir (Ebert & ark., 2021; Carew, Morgan & Rando, 2019).

3D Yazıcı Teknolojisinin Tarihçesi

3D baskı, katmanlı üretim (AM), hızlı prototipleme (RP) veya solid-freeform teknolojisi (SFF) olarak da anılır ve konsepti Charles Hull tarafından geliştirilmiştir. Hull, 1980'lerin başında fotopolimerlerden plastik cihazlar üretme üzerine çalışmalara başlamıştır. 1986 yılında stereolitografi patentini almıştır. Hull, 3D Systems şirketini kurmuş ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımından 3D yazıcıya dosya aktarımı için STL (Standard Tessellation Language veya STereo-Lithography) dosya formatını geliştirmiştir. 3D Systems, "Stereolithography Apparatus" adlı ilk 3D yazıcıyı ve genel kullanıma sunulan ilk ticari 3D yazıcı olan SLA-250'yi geliştirmiştir (Gross & ark., 2014; Azlin & ark., 2022).

3D baskı teknolojisinde önemli ilerlemeler 1980'ler ve 2010'lar arasında kaydedilmiştir. Bu dönemde, Stereolithography, Fused Deposition Modeling (FDM), inkjet 3D baskı, yapıştırıcı

damlacık ve toz tabanlı AM, Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting, Continuous Liquid Interface Production, Digital Laser Processing gibi bir dizi 3D baskı tekniği geliştirilmiştir (Brachet & ark., 2023). Scott Crump da 1990 yılında Stratasys'te fused deposition modeling (FDM) için patent almıştır. Hans Langer tarafından 1989'da Almanya'da kurulan Electro-Optical Systems (EOS), bilgisayar modelinden metal lazer sinterleme kullanarak 3D parçalar üretmektedir (Gross & ark., 2014; Azlin & ark., 2022).

Endüstriyel, tıbbi ve bireysel kullanım alanlarında yaygınlaşma, teknolojinin gelişimine paralel olarak hızlanmıştır (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Brachet & ark., 2023; Carew & Errickson, 2020; Li & ark., 2021; Azlin & ark., 2022). 3D baskılı nesneler, karmaşık geometrilerin imalatı, implantlar, protezler, tıbbi cihazlar, doku mühendisliği ve hatta inşaat gibi birçok sektörde kullanılmaktadır (Brachet & ark., 2023; Carew & Errickson, 2020; Gross & ark., 2014). Özellikle tıp alanında, 3D baskı hızla artan uygulamalar bulmuştur (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Li & ark., 2021; Sheth & ark., 2016; Spencer & Watts, 2020). Bunlar arasında hastaya özel implantlar, cerrahi planlama, anatomik modeller, doku iskeleleri ve ilaç dağıtım sistemleri yer almaktadır (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Brachet & ark., 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019; Carew & Errickson, 2020; Gross & ark., 2014; Azlin & ark., 2022). 3D baskı aynı zamanda otomotiv, savunma ve mimari gibi çeşitli diğer endüstrilerde de kullanılmaktadır (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Li & ark., 2021).

2000'lerin başlarında, açık kaynaklı 3D yazıcılar alanında önemli bir gelişme yaşanmıştır (Azlin & ark., 2022). Adrian Bowyer, Bath Üniversitesi'nde RepRap projesini başlatmış ve bu proje aracılığıyla kendini kopyalayabilen bir 3D yazıcı oluşturmayı amaçlamıştır (Azlin & ark., 2022). RepRap gibi açık kaynak seçenekleri, 2008'den itibaren masaüstü 3D yazıcılar olarak mevcut hale gelmiştir (Gross & ark., 2014). Bu gelişmeler, 3D baskı teknolojisinin daha geniş kitleler tarafından erişilebilir ve benimsenebilir hale gelmesinde etkili olmuştur (Li & ark., 2021; Azlin & ark., 2022).

3D Yazıcı Türleri ve Çalışma Prensipleri

Piyasada birçok farklı 3D baskı teknolojisi bulunmaktadır. Bu teknolojiler, malzemeyi katmanlar halinde işleme şekillerine ve kullanılan malzemelere göre farklılık gösterir (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Azlin & ark., 2022). Başlıca 3D baskı yöntemleri şunlardır:

•**Fused Deposition Modeling (FDM):** Malzeme ekstrüzyonu olarak da bilinir (Carew & Errickson, 2020). FDM, en popüler 3D baskı teknolojilerinden biridir (Azlin & ark., 2022). Bu yöntemde, bir makaradan alınan malzeme, ısıtılan bir ekstrüzyon başlığı aracılığıyla bir nozuldan boşaltılır ve katmanlar halinde bir baskı tablasına bırakılır (Brinsko-Beckert & Palenik, 2020; Brachet & ark., 2023; Carew & Errickson, 2020). Sistem; besleme mekanizması, baskı kafası, portal (gantry), baskı yüzeyi ve sıvılaştırıcı gibi ana bileşenleri içerir (Azlin & ark., 2022). FDM, metal, plastik ve polimerler gibi çeşitli malzemeleri farklı renklerde kullanabilir (Carew & Errickson, 2020). Akrilnitril Butadien Stiren (ABS) ve Polilaktik Asit (PLA), FDM yazıcılarda en yaygın kullanılan filament polimerlerindendir (Brinsko-Beckert & Palenik, 2020).

•**Stereolithography (SLA):** İlk 3D baskı işlemidir (Brachet & ark., 2023). Vat polimerizasyonu yöntemini kullanır (Carew & Errickson, 2020). SLA, hareketli aynalarla yönlendirilen bir UV lazer ışını ile katılaştırılan fotokürlenebilir polimerleri kullanır. Bu yöntem yüksek detay seviyesi sağlar ancak genellikle yavaştır (Brachet & ark., 2023). SLA yazıcılar, sıvı reçine içinde lazerler kullanarak nesneleri üretir (Brinsko-Beckert & Palenik, 2020).

•**Selective Laser Sintering (SLS):** Polimer tozlarını bağlamak için ısıyı kullanır. Bir lazer, toz yatağına ısı ileterek malzemenin sinterlenmesini sağlar (Brachet & ark., 2023). Metal

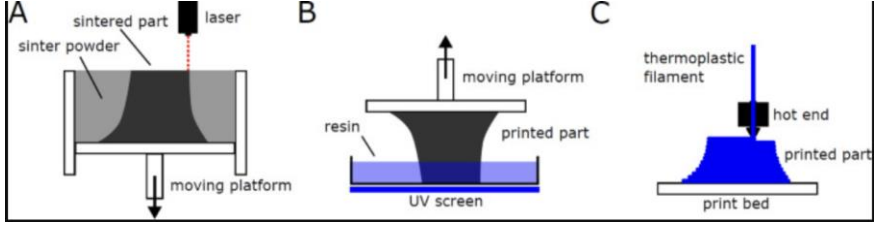
lazer sinterleme (SLM) ise bilgisayar modeline dayalı metal parçalar üretmek için lazer kullanır (Li & ark., 2021; Azlin & ark., 2022).

•**Digital Light Processing (DLP):** Reçineyi kürlemek için ışık kullandığı için Stereolithography'ye benzer (Brachet & ark., 2023). Ancak, ışık tüm katmanı tek seferde üretebilen bir likit kristal ekran (LCD) veya dijital mikromirror cihazı aracılığıyla geçer. Bu, DLP'yi SLA'ya göre önemli ölçüde daha hızlı hale getirir (Brachet & ark., 2023; Azlin & ark., 2022). DLP, daha yüksek çözünürlükte nesneler üretebilir ve katman kalınlığı 30 mikronun altında olabilir (Azlin & ark., 2022).

Malzeme türleri açısından 3D baskı oldukça esnek. Polimerler, seramikler, metaller ve kompozitler gibi çeşitli malzemeler kullanılabilir (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Brachet & ark., 2023). Hammaddede yelpazesi plastikleri, metalleri, biyouyumlu polimerleri ve hatta yaşayan hücreleri içerebilir (Sheth & ark., 2016). Malzemeler genellikle katı (filament, toz), sıvı (reçine) veya macun (pasta) formunda kullanılır. Metaller, lazer absorpsiyonu ve daha yüksek sıcaklıklarda stabilite gibi avantajlar sunar (Pavan Kalyan & Kumar, 2022).

3D baskılı bileşenlerin hassasiyeti, çözünürlüğü ve dayanıklılığı kullanılan teknolojiye ve baskı parametrelerine bağlıdır (Gross & ark., 2014; Azlin & ark., 2022). .STL dosya formatında bir yüzeyi tanımlamak için kullanılan üçgen sayısını artırmak, basılan cihazın çözünürlüğünü artırabilir (Gross & ark., 2014). DLP, SLA'dan daha yüksek çözünürlük sunabilir (Azlin & ark., 2022). Baskı ayarlarının doğru seçimi, yüksek kaliteli bileşenler elde etmek için kritiktir. Malzemenin infil yoğunluğu ve katman düzenlemesi gibi faktörler, basılan parçaların mekanik özelliklerini ve dayanımını etkiler (Azlin & ark., 2022). Farklı malzemeler ve teknikler, elde edilen ürünlerin hassasiyetinde ve dayanıklılığında önemli farklılıklar yaratır (Brinsko-Beckert & Palenik, 2020; Azlin & ark., 2022; Spencer & Watts, 2020).

Şekil 1: 3D Yazıcı Türleri Çalışma Prensipleri



A. Selective Laser Sintering (SLS), B. Digital Light Processing (DLP), C. Fused Deposition Modeling (FDM).

Kaynak: Cook, 2024

3D Teknolojilerinin Adli Bilimlerde Kullanım Alanları

Üç boyutlu (3D) teknolojiler, adli bilimlerde olay yerinden kanıtların sunumuna kadar geniş bir yelpazede giderek artan uygulamalar bulmaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel yöntemlerle elde edilmesi zor veya imkansız olan detaylı ve mekânsal bilgiler sağlayarak adli soruşturmaları ve mahkeme süreçlerini desteklemektedir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, French & Morgan, 2021). Üç boyutlu adli bilimler (3DFS), suç rekonstrüksiyonu amacıyla 3D görüntüleme ve 3D baskı dahil olmak üzere çeşitli 3D tekniklerinin uygulandığı yeni bir alan olarak değerlendirilmektedir. 3DFS'nin amacı, mahkemenin kanıtları daha iyi anlamasına yardımcı olabilecek görsel yardımcılar sağlamaktır (Carew, French & Morgan, 2021).

• **Olay Yeri Rekonstrüksiyonu:** Olay yerlerinin 3D olarak belgelenmesi ve modellenmesi, adli soruşturmalar için önemli avantajlar sunar. Yüzey tarayıcılar ve fotogrametri gibi teknikler kullanılarak, olay yerinin kalıcı ve dijital bir kopyası oluşturulabilir. Bu 3D modeller, arşivleme ve delil amaçlarının yanı sıra, olay yeri rekonstrüksiyonları ve analizleri için de kullanılabilir. Üç boyutlu modellerden elde edilen ölçümler ve açılar, kan sıçrama paternleri ve mermi yörüngeleri gibi analizlere yardımcı olabilir (Garvin & Stock, 2016; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Ayrıca, 3D tarama cihazları, geleneksel yöntemlerle olay yerinden toplanan bilgilerin çoğunu sanal olarak

toplama imkanı sunarak olay yeri inceleme süresini kısaltabilir (Garvin & Stock, 2016). Olay yeri rekonstrüksiyonu için modern 3D görüntüleme teknolojilerinin kullanımı, adli soruşturmayı geliştirebilir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Özellikle trafik kazası analizlerinde 3D belgeleme ve geometrik rekonstrüksiyon yöntemlerinin uygulamaları gösterilmiştir (Ebert & ark., 2021; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Bilgisayarlı tomografi (CT) verileri, adli görevlilerin ve teknisyenlerin suç mahalli rekonstrüksiyonlarına dahil edilebilir (Ebert & ark., 2021) Mahkeme ortamında, 3D olay yeri modelleri açıklayıcı amaçlarla kullanılabilir ve karmaşık bilgilerin jüri üyeleri ve tıp dışı kişiler tarafından anlaşılmasını artırabilir (Garvin & Stock, 2016; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew & Errickson, 2020). Genişletilmiş gerçeklik teknolojileri (sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) dahil), adli bilimlerde analitik ve değerlendirme yaklaşımları için kullanılmaya başlanmıştır ve 3D rekonstrüksiyonlar 3D gösterim aracı olarak kullanıldığında 3DFS kapsamında değerlendirilebilir (Carew, French & Morgan, 2021).

Resim 1: Olay Yerinde 3D Model Koleksiyonu



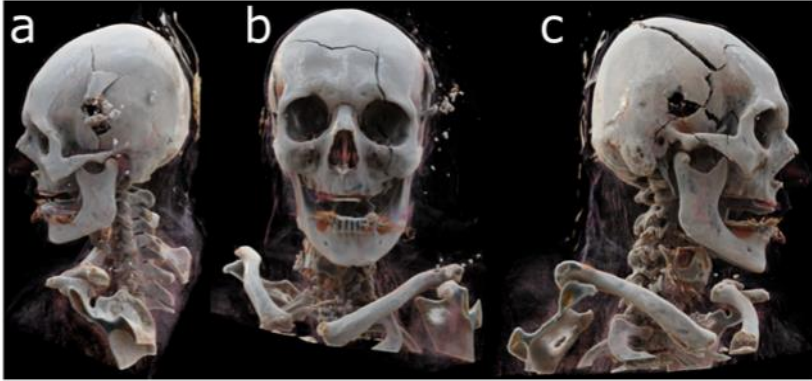
(a) Çeşitli şekillerde mobilya modelleri. (b) Çeşitli postürlere sahip insan modelleri.

Kaynak: Ren & ark., 2018

• **Adli Antropoloji ve Adli Patoloji:** 3D teknolojileri, adli antropoloji ve adli patoloji alanlarında da önemli uygulamalar

bulmuştur (Ebert & ark., 2021; Carew, French & Morgan, 2021). CT ve 3D yüzey taramaları gibi gelişmiş görüntüleme yöntemleri, iskelet kalıntılarını ve travmaları belgelemek için kullanılabilir (Garvin & Stock, 2016). Bu taramalardan elde edilen 3D sanal modeller, arşivleme ve açıklayıcı amaçlarla 3D yazıcılarla fiziksel replikalar olarak basılabilir (Garvin & Stock, 2016; Ebert & ark., 2021; Errickson & ark., 2022; Carew & Errickson, 2020). Özellikle osteolojik travmanın 3D görselleştirilmesi mahkeme için faydalı olabilir (Carew, Morgan & Rando, 2019). Travma analizi, iskelet yaralanmalarının fiziksel modellerini oluşturmak için 3D baskının kullanımını içerir; bu modeller, yaralanmanın etiyojisi, mekanizması ve modu hakkında açıklamalar sunmaya yardımcı olabilir (Carew, Morgan & Rando, 2019). Kafa travmaları ve kurşun yaralanmaları gibi spesifik travma türlerinin 3D rekonstrüksiyonları gerçekleştirilebilir (Errickson & ark., 2022; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew & Errickson, 2020).

Resim 2: Ateşli silah yaralanması ile meydana gelen ölümün travma analizi



(a) Mermi çıkışı yarası soldan görünüm. (b) Kafatası kırığı önden görünüm. (c) Mermi giriş yarası sağdan görünüm.

Kaynak: Ebert & ark., 2021

3D modeller, adli antropolojide biyolojik profillemeye için de kullanılmaktadır (Carew & Errickson, 2020). Örneğin, CT taramalarından elde edilen 3D modeller kullanılarak yetişkin pelvisten metrik ve metrik olmayan özelliklere dayalı sanal cinsiyet belirlemesi yapılabilir (Garvin & Stock, 2016; Ebert & ark., 2021; Carew, Morgan & Rando, 2019). Yüz rekonstrüksiyonlarında, CT taramalarından elde edilen kafatası 3D modelleri kullanılabilir ve bu modellerden 3D baskılar alınarak gerçek kafatasının adli emanette tutulmasına gerek kalmadan rekonstrüksiyon yapılabilir (Garvin & Stock, 2016; Ebert & ark., 2021).

Adli patolojide, post-mortem CT (PMCT) verileri, otopsi öncesi bir sınıflandırma aracı olarak, sonraki otopsinin kapsamlı bir şekilde planlanmasına yardımcı olmak için ve ölüm nedenini ve şeklini belirlemede destekleyici olarak kullanılabilir. PMCT verileri, cesedin iç durumu, altta yatan tıbbi durumlar veya kurşun yörüngeleri gibi bilgileri 3D yüzey taramalarına eklemek için de kullanılabilir. Adli radyologlar görüntüleri ilk teşhis için analiz ederken, adli patoloğlar bu bulgulara dayanarak otopsileri planlayabilir. Savcılar, avukatlar ve hakimler gibi tıp dışı kişiler, bulguların 2D dilimlere yerine 3D renderlar veya özel 3D baskılar gibi daha anlaşılır görselleştirmelerine güvenirler (Ebert & ark., 2021). 3D baskılı modellerin, karmaşık veya rahatsız edici tıbbi bilgilerin jüri üyelerine ve tıp dışı kişilere açıklanmasında fotoğraflara kıyasla daha kolay anlaşılır olduğu düşünülmektedir (Carew, Morgan & Rando, 2019). İngiltere ve Galler'deki vaka çalışmaları, 3D baskılı modellerin adli vakalarda giderek daha fazla kullanıldığını göstermektedir (Errickson & ark., 2022; Henningsen & ark., 2023). Bununla birlikte, 3D baskılı replikaların doğruluğuna dair açık ve somut bir kanıt tabanının henüz eksik olduğu belirtilmiştir (Carew, Morgan & Rando, 2019). 3D iskelet rekonstrüksiyonlarından yapılan yorumlar her zaman kanıt tabanları tarafından desteklenmemektedir ve uzmanlara analiz için orijinal materyalleri veya yerleşik teknikleri kullanmaları tavsiye edilmektedir (Carew, French & Morgan, 2021).

• **Balistik ve Silah İncelemeleri:** 3D teknolojileri, balistik ve silah incelemelerinde çeşitli uygulamalara sahiptir (Carew, French & Morgan, 2021). Üç boyutlu modeller, kurşun yörüngesi

analizlerinde ek bilgiler ve nicel veriler sağlayabilir (Ebert & ark., 2021; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Ayrıca, kafatası kurşun yaralanmalarının post-mortem 3D rekonstrüksiyonu gerçekleştirilebilir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). CT ile sanal 3D ve hızlı prototip modelleme kullanılarak silah tanımlaması mümkündür (Ebert & ark., 2021). Yaralanmaya neden olan silahın, yara morfolojisinden adli 3D/CAD destekli fotogrametri kullanılarak belirlenmesi de açıklanmıştır (Golomingi & ark., 2023).

3D baskının kendisi, suç soruşturmasında yeni araçlar ve zorluklar ortaya çıkarabilir (Carew, Morgan & Rando, 2019). Kaynaklar, 3D yazıcı ile üretilen ateşli silahların tespit ve takibi ile ilgili spesifik teknik sorunlara ayrıntılı olarak girmemekle birlikte, 3D baskılı silahların potansiyel kullanımının adli bilimler için yeni zorluklar getirebileceğini ima etmektedir (Carew, Morgan & Rando, 2019; Carew, French & Morgan, 2021). Alet izi analizi de 3D tekniklerinden faydalanabilir (Baier & ark., 2018).

Resim 3: 3D Yazıcılar ile Yazdırılan ve Karşılaştırma İşlemlerinde Kullanılan Ateşlenmemiş, Ateşlenmiş ve Deforme Olmuş Mermiler



Kaynak: Jani & ark., 2021

• **Adli Diş Hekimliği:** Adli diş hekimliği alanı da 3D teknolojilerinden yararlanmaktadır (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Kitle olaylarından sonra diş kimliklendirmesinde 3D baskılı dişlerin kullanıldığı örnekler mevcuttur (Carew & Errickson, 2020). Ayrıca, diş profillemesi için bir tarama aracı olarak diş CT

görsütölemesi kullanılabilir (Ebert & ark., 2021) Yapay zeka teknikleri, adli odontoloji uygulamaları için de araştırılmaktadır (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Geleneksel kil modellemenin yerini, adli yüz rekonstrüksiyonlarında 3D baskı alabilir. Adli antropoloji koleksiyonlarında 3D baskının kullanımı da vurgulanmıştır (Carew & Errickson, 2020).

Resim 4: 3D Yazıcılar ile Hazırlanan Karşılaştırmalı Diş Anatomisi



(A): insan dişleri, (B): insana ait olmayan dişler.

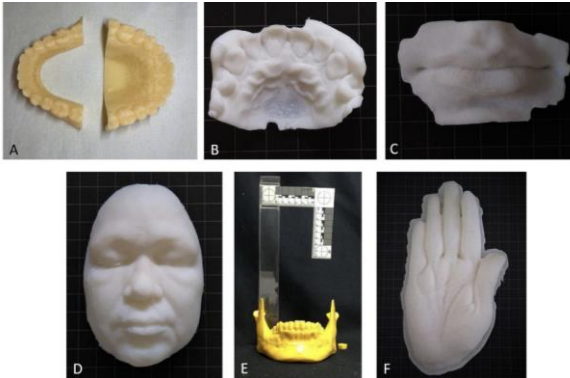
Kaynak: Jani & ark., 2021

• **Adli Belge ve İz İncelemeleri:** Üç boyutlu modelleme, parmak izleri, ayakkabı izleri veya lastik izleri gibi çeşitli iz kanıtlarının analizinde faydalı olabilir (Carew, French & Morgan, 2021). Örneğin, zeminlerdeki 3D ayakkabı izi kanıtlarının korunması ve analizi için optik lazer tarama uygulaması gösterilmiştir. Adli uygulamalar için 3D iz toplama sistemleri de mevcuttur (Carew & Errickson, 2020). Adli fotogrametri kullanılarak lastik izlerinin eşleştirilmesi mümkündür (Golomingi & ark., 2023). Kaynaklar, taklit imza analizlerinde yüzey yapısının 3D değerlendirilmesi veya parmak izlerinin 3D modellenmesi hakkında spesifik bilgi içermemekle birlikte, genel olarak "izler ve izlenimler"in 3DFS kapsamında değerlendirildiğini belirtmektedir

(Carew, French & Morgan, 2021). Alet izi analizi de 3D tekniklerini kullanabilir (Baier & ark., 2018).

• **Adli Eğitim ve Simülasyon:** Üç boyutlu (3D) baskı teknolojileri, adli bilimlerde eğitim ve simülasyon alanlarında önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle anatomik yapıların modellenmesi ve çoğaltılması için hızlı prototipleme tekniklerinin kullanılabileceği belirtilmiştir (Brachet & ark., 2023). 3D baskılı eğitim materyalleri, tıp eğitiminde anatomik yapıların anlaşılmasına yardımcı olmak amacıyla kullanılmaktadır (Carew & Errickson, 2020). Örneğin, anatomik yapıların 3D baskılı modelleri, kaburga kafesi modelleri ve el modelleri eğitim materyali olarak üretilebilmektedir (Brachet & ark., 2023; Carew & Errickson, 2020). Kranial sinüsler veya iç kranial boşluk gibi iç yapıların 3D baskıları, öğretim veya eğitim amaçları için faydalı olabilir. Ayrıca, geleneksel alçı modellerin yerini alabilecek, modern popülasyon verilerine dayalı yeni standart illüstratif modeller oluşturmak için de 3D baskılı modeller kullanılabilir (Carew, Morgan & Rando, 2019). Yapılan bir çalışmada, anatomi eğitiminde 3D baskılar ile kadavra materyallerinin karşılaştırılması yapılmıştır (Henningsen & ark., 2023). 3D baskının anatomi eğitimindeki potansiyel etik boyutları da tartışılmaktadır (Carew & Errickson, 2020).

Resim 5: Morfometrik analiz için 3D hazırlanan Modeller



(A): üst ve alt çeneler, (B): rugae, (C): dudaklar, (D): yüz, (E): alt çene, (F): avuç içi.

Kaynak: Jani & ark., 2021

Sanal otopsi ve sanal eğitim uygulamaları da 3D teknolojisinden faydalanmaktadır. Postmortem BT (PMCT) verilerinin 3D görselleştirmesi adli tıp araştırmalarında kullanılmaktadır. PMCT verilerinden elde edilen 3D sanal modeller, adli antropolojide cinsiyet belirleme veya kraniyofasiyal rekonstrüksiyon (Ebert & ark., 2021). gibi eğitim konularında potansiyel uygulamalara sahiptir. Sanal gerçeklik (VR) kullanılarak sanal olay yeri yürüyüşleri gerçekleştirilebilir (Carew, French & Morgan, 2021). Bu tür sanal ortamlar, öğrencilere veya uygulayıcılara gerçekçi senaryolarda eğitim imkanı sunabilir.

3D teknolojisinin bir diğer önemli eğitimsel uygulaması, mahkeme ortamında jüriye ve hakimlere karmaşık bilgileri aktarmaktır (Carew & Errickson, 2020). 3D görsel yardımcıların, özellikle osteolojik travma gibi karmaşık veya rahatsız edici tıbbi bilgileri, sıradan insanlara veya tıbbi olmayan kişilere (jüri üyeleri gibi) açıklamada fotoğraflara kıyasla daha kolay anlaşıldığı düşünülmektedir- (Ebert & ark., 2021; Henningsen & ark., 2023; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019). Bu yardımcılar, mahkeme salonunda karmaşık terminolojinin anlaşılmasını artırmaya yardımcı olabilir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew & Errickson, 2020). 3D baskılı modeller, uzman tanıklığını desteklemek için görsel yardımcılar olarak kullanılmıştır (Errickson & ark., 2022; Henningsen & ark., 2023; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019). Fiziksel baskılar, jüri üyelerinin parçayı ve yaralanmalar arasındaki üç boyutlu ilişkiyi incelemesine olanak tanıyan somut bir yardımcı sağlar (Baier & ark., 2018; Carew, French & Morgan, 2021). Sanal 3D modellerin ise baskılarla aynı faydaları sağlayabileceği, ancak otopsi fotoğraflarına kıyasla daha az duygusal olarak zorlayıcı olabileceği belirtilmiştir (Henningsen & ark., 2023). Bununla birlikte, sanal ve basılı modellerin sıradan insanlar üzerindeki etkileri ve uzman tanıklığının anlaşılmasına ne kadar yardımcı olduklarına dair yayınlanmış araştırma sayısı

sınırlıdır (Baier & ark., 2018; Carew, French & Morgan, 2021). Jüri anlama ve karar verme üzerindeki potansiyel etkisi, özellikle duygusal tepki veya önyargı riski açısından ek araştırmalar gerektirmektedir (Henningsen & ark., 2023; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew & Errickson, 2020; Carew, French & Morgan, 2021).

3D Yazıcıların Mahkeme Ortamında Kullanımı ve Hukuki Değerlendirme

Üç boyutlu (3D) modellerin mahkemelerde kullanımı giderek artan bir trenddir ve delil sunumunda yeni yöntemler sunmaktadır (Henningsen & ark., 2023; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Baier & ark., 2018). Adli bilimlerde 3D baskının potansiyeli tanınmaktadır; bir nesnenin veya olayın kalıcı bir kaydını oluşturmak için kullanılabilir ve bu kayıt tanıtıcı delil olarak hizmet edebilir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew & Errickson, 2020). Bununla birlikte, kaynaklar "tanıtıcı delil" (demonstrative evidence) ve "görsel yardımcı" (demonstrative aid) arasında önemli bir ayrım yapmaktadır (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019; Baier & ark., 2018; Carew, French & Morgan, 2021). Tanıtıcı delil, mahkemeye kabul edilen ve bu nedenle ilgili delil kabul kurallarına tabi olan delildir (örneğin, Birleşik Krallık'ta Ceza Muhakemesi Kuralları Kısım 19, ABD'de Daubert/Frye kriterleri ve Federal Delil Kuralları 611 ve 1006). Görsel yardımcıları ise, kabul edilmiş delilleri (örn. uzman tanıklığı) açıklamaya yardımcı olmak ve jüri üyelerinin olgusal konuları anlamasına destek olmak için kullanılan görsel araçlardır; bunlar delil olarak kabul edilmez ve kanıt değeri yoktur. Görsel yardımcıları, tanıtıcı delillere göre daha az katı kabul kurallarına tabidir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019).

3D baskılı modellerin mahkemelerde kullanıldığına dair vaka çalışmaları mevcuttur (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew & Errickson, 2020). Birleşik Krallık, Almanya ve ABD gibi çeşitli ülkelerde mahkemelerde destekleyici delil olarak kullanılmışlardır (Errickson & ark., 2022; Henningsen & ark.,

2023; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019; Baier & ark., 2018). İngiltere ve Galler'deki yasalar, uzman görüşüne dayanarak mahkemede yeni teknolojilerin kullanılmasına izin vermektedir. Ancak, 2016'da Birleşik Krallık'ta görülen bir davada, savunma tarafı 3D baskılı bir kafatasının güvenilirliği konusunda şüphe uyandırmıştır. Üretim sürecinin adli bir bağlamda doğrulanmadığı belirtilerek, delilin ağırlığı zayıflatılmıştır (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Bu, 3D baskılı modellerin delil olarak kullanılması durumunda doğruluk, güvenilirlik ve bütünlüğün tesis edilmesinin hayati önem taşıdığını göstermektedir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Baier & ark., 2018; Carew, French & Morgan, 2021).

Resim 6: Mahkemede kullanılmak üzere 3D hazırlanan olay yeri canlandırma modeli



Kaynak: Ren & ark., 2018

Olay yeri canlandırmaları ve jüri üzerindeki etkisi açısından, 3D baskılı veya sanal modeller, bir olay yerindeki kanıtsal mekânsal ilişkilerin veya travma gibi yaralanmaların görselleştirilmesine yardımcı olabilir (Henningsen & ark., 2023; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019; Baier & ark., 2018; Carew & Errickson, 2020; Carew,

French & Morgan, 2021). Fiziksel 3D baskılar, jüri üyelerinin dokunabileceği, tutabileceği ve hatta potansiyel olarak yaralanmaları taklit etmek için kullanabileceği somut bir görsel yardımcı sağlar (Baier & ark., 2018; Carew, French & Morgan, 2021). Bunun, jüri üyelerinin anlamasını artırdığına inanılsa da, bu modellerin duygusal veya önyargılı etkilere yol açma potansiyeli konusunda endişeler vardır (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Yapılan çalışmalar, basılı modellerin karmaşık otopsi bulgularını ayrıntılı olarak gösterdiğini ancak malzemenin insan dokusundan farklı olması nedeniyle dokunma hissinin sınırlı fayda sağladığını ortaya koymuştur. Sanal 3D modellerin ise daha az duygusal olarak zorlayıcı olduğu düşünülmektedir (Henningsen & ark., 2023). Jüri anlama üzerindeki etkilerine dair daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı kaynaklar, basılı delil kullanmanın kanıt değerinin potansiyel önyargıdan daha ağır basması gerektiğini ve kabul kılavuzlarına uyulması gerektiğini savunmaktadır (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew & Errickson, 2020).

Delil bütünlüğü ve manipölasyon riski, 3D baskılı modellerin adli bağlamda kabul edilebilirliği için kritik konulardır. Doğruluk ve güvenilirlik, baskı işlemi ve kullanılan yazılımların doğrulanmasını gerektirir (Baier & ark., 2018; Carew, French & Morgan, 2021). Basılan nesnelerin çözünürlüğü, STL dosyasını tanımlamak için kullanılan üçgen sayısının artırılmasıyla artırılabilir. Tıbbi bağlamda model doğruluğunu sağlamak için FDA onaylı yazılım kullanılması önerisi, adli bağlamda da dikkate alınabilir (Carew, Morgan & Rando, 2019). Baskı ayarlarının (örn. dolgu yoğunluğu, katman düzenlemesi) basılan parçaların mekanik özelliklerini ve dayanımını etkilediği gösterilmiştir (Azlin & ark., 2022). Bu da, modelin orijinal nesneyi doğru şekilde temsil etmesi gerektiği durumlar için önemlidir. Gerçekçilik ve "sanitizasyon" (aşırı detay veya rahatsız edici özelliklerin gizlenmesi) arasındaki denge, modellerin kabul edilebilirliği ve jüri üzerindeki etkisi açısından önemlidir (Baier & ark., 2018; Carew, French & Morgan, 2021).

Yargı sistemlerinde ulusal ve uluslararası farklılıklar, 3D baskılı delillerin kabulü ve kullanımında belirgindir. Birleşik Krallık, ABD ve Almanya gibi ülkelerde 3D baskılı delillerin

kullanıldığı rapor edilmiştir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023; Carew, Morgan & Rando, 2019). ABD'deki adalet personelinin, dava avukatlarının potansiyeli daha erken fark etmesi nedeniyle 3D baskılı delilleri mahkemede görmeye daha alışkın olduğu belirtilmiştir (Baier & ark., 2018). Tanıtıcı delilin kabulünü yöneten yasal kurallar (CrimPR, Daubert/Frye, Federal Kurallar) ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Bu farklılıklar, 3D baskılı modellerin adli süreçlerde ne ölçüde ve hangi şartlarda kullanılabileceğini belirlemektedir.

3D Baskı İle İlgili Teknik ve Etik Sorunlar

Üç boyutlu (3D) baskı teknolojileri, adli bilimlerde somut üçüncü boyut olarak potansiyelini göstermiş olsa da, bu teknolojinin uygulanması çeşitli teknik ve etik zorlukları da beraberinde getirmektedir. Özellikle adli vakalarda kullanılacak 3D baskılı modellerin doğruluğu, güvenilirliği ve mahkemede kabul edilebilirliği konularında sınırlı araştırma bulunmaktadır (Carew & Errickson, 2020). 3D baskılı replikaların doğruluğuna dair net ve somut bir kanıt tabanının henüz eksik olduğu belirtilmiştir. Adli antropolojide 3D baskının doğruluğu üzerine yapılan bir çalışmada, sanal ve 3D baskılı modellere yönelik doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, standart sapma, varyans, metrik fark ve yüzde fark gibi ölçütleri içermiştir (Carew, Morgan & Rando, 2019). Ayrıca, bilgisayarlı tomografi (CT) taramalarından elde edilen 3D kraniyal landmark ölçümlerinde ölçüm hatası değerlendirilmiştir (Garvin & Stock, 2016). Canlı deneklerden alınan CT verileri kullanılarak adli yüz rekonstrüksiyon tekniklerinin doğruluğu da değerlendirilmiştir (Pavan Kalyan & Kumar, 2022). Bu çalışmalar, replikasyon doğruluğu ve olası hata paylarına dikkat çekmektedir.

Üç boyutlu modellerin mahkeme ortamında kullanılmasının, kanıtların sunumunu ve anlaşılabilirliğini artırma gibi faydaları olsa da, gerçeklik algısını yanıltma riski de mevcuttur (Carew & Errickson, 2020). Özellikle karmaşık veya rahatsız edici tıbbi bilgilerin tıp dışı kişilere açıklanmasında 3D baskılı modellerin fotoğraflara kıyasla

daha kolay anlaşılır olduğu düşünülmektedir (Ebert & ark., 2021). Ancak, sunulan teknik, doğruluk ve olası önyargıların mahkemede ele alınması gereklidir (Carew & Errickson, 2020). Etik ilkeler arasında şeffaflık ve bağlam gibi unsurlar, 3D kanıtların doğru ve yanıltıcı olmayan bir şekilde sunulmasını destekler (Carew, French & Morgan, 2023).

3D baskının kendisi, suç soruşturmaları için yeni araçlar ve potansiyel zorluklar da yaratabilir. Özellikle 3D yazıcılarla üretilebilen ateşli silahların suçta kullanılması, bu tür ürünlerin tespiti, takibi ve bu suçlarla ilgili teknik sorunlar konusunda kaynaklarda spesifik bilgiler bulunmamaktadır. Ancak, 3D baskı teknolojisinin savunma sanayi gibi çeşitli sektörlerde kullanılabileceği belirtilmiştir (Pavan Kalyan & Kumar, 2022; Azlin & ark., 2022).

Veri güvenliği konusu sağlanan kaynaklarda doğrudan detaylandırılmamıştır. Ancak, 3D baskı ve adli bilimler alanında etik sınırlar önemli bir yer tutar. Özellikle adli ve sanal antropolojide insan kalıntılarına ilişkin etik düşünceler mevcuttur. Adli amaçlarla 3D baskılı insan kalıntılarının oluşturulması ve kullanılmasıyla ilgili etik hususlar incelenmiş ve anonimlik, özerklik, fayda sağlama, rıza, bağlam, adalet, zarar vermeme, orantılılık ve şeffaflık gibi dokuz etik ilke belirlenmiştir. Bu ilkeler, etik uygulamalara rehberlik etmek için uyarlanabilir yönergelere dahil edilebilir (Carew, French & Morgan, 2023). Ayrıca, adli bilim süreci boyunca 3D baskı için iyi uygulama kılavuzlarının oluşturulması ve etik karar verme süreçlerini desteklemek amacıyla bütünsel etik biliş eğitimi verilmesi önerilmiştir (Carew, French & Morgan, 2023; Carew & Errickson, 2020). Uzmanlara, analiz için orijinal materyalleri veya yerleşik teknikleri kullanmaları tavsiye edilmektedir, zira 3D iskelet rekonstrüksiyonlarından yapılan yorumlar her zaman kanıt tabanları tarafından desteklenmemektedir (Carew, French & Morgan, 2023).

Gelecek Perspektifler ve Yeni Yaklaşımlar

Adli bilimler alanı, teknolojik gelişmelerle birlikte sürekli evrim geçirmektedir ve 3D teknolojileriyle entegre olabilecek yeni

yaklaşımlar potansiyel taşımaktadır. Yapay zeka (YZ) teknolojisi, adli tıp için yeni fırsatlar ve zorluklar sunmaktadır. Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden elde edilen parametreler kullanılarak YZ algoritmaları ile cinsiyet tahmini üzerine çalışmalar yapılmıştır. Adli Odontoloji uygulamaları için de YZ teknikleri araştırılmaktadır. YZ, anatomi eğitimi, öğrenimi ve değerlendirmesi için de kullanılabilir. Radyoloji alanında YZ tabanlı radyomik teknikler incelenmektedir. Bu, YZ'nin adli bilimlerdeki 3D görüntüleme ve analiz süreçlerine entegrasyon potansiyelini göstermektedir (Azlin & ark., 2022).

Dijital ikiz veya metaverse gibi kavramlar sağlanan kaynaklarda açıkça tanımlanmamış olsa da, adli soruşturmalarda 3D rekonstrüksiyonlar için sürükleyici teknolojilerin kullanımı üzerine çalışmalar mevcuttur (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). Sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) dahil olmak üzere genişletilmiş gerçeklik teknolojileri, adli bilimlerde analitik ve değerlendirme yaklaşımları için kullanılmaya başlanmıştır (Carew, French & Morgan, 2023; Golomingi & ark., 2023). VR ve AR, post-mortem CT (PMCT) gibi 3D verilerden türetilen poligonal verilerin görselleştirilmesi için seçenekler sunmaktadır (Ebert & ark., 2021). VR teknolojisi, dijital slaytların incelenmesi için de araştırılmaktadır (Prajapati, Madrigal & Friedman, 2016). Sürükleyici teknolojiler, 3D adli suç mahalli rekonstrüksiyonlarında faydalı olabilir (Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023).

Dört boyutlu (4D) baskı teknolojileri de kaynaklarda bahsedilmektedir, özellikle doku mühendisliği için 4D iskelelerin geliştirilmesi ve ekstrüzyon tabanlı teknolojiler kullanılarak 4D bileşenlerin oluşturulması bağlamında. Ancak, sağlanan kaynaklarda 4D baskının adli bilimlerdeki potansiyel uygulamalarına dair spesifik bilgiler bulunmamaktadır (Brachet & ark., 2023; Stabile & ark., 2023; Azlin & ark., 2022).

Adli görselleştirmede artırılmış ve sanal gerçeklik (AR/VR) kullanımı, gelecek için önemli bir perspektiftir (Golomingi & ark., 2023). Bu teknolojiler, adli görevlilerin ve tıp dışı kişilerin karmaşık 3D verileri ve olay yeri rekonstrüksiyonlarını daha iyi

anlamasına yardımcı olabilir (Carew, French & Morgan, 2023; Villa, Lynnerup & Jacobsen, 2023). PMCT verilerinin 3D yüzey taramalarına eklenmesiyle cesedin iç durumu gibi bilgilerin daha iyi görselleştirilmesi sağlanabilir (Ebert & ark., 2021).

Sonuç ve Öneriler

Üç boyutlu (3D) teknolojiler, adli bilimler alanına olay yeri rekonstrüksiyonundan adli antropolojiye, balistikten adli diş hekimliğine kadar uzanan çeşitli alanlarda önemli katkılar sunmaktadır. Bu teknolojiler, olay yerlerinin ve kanıtların kalıcı dijital kayıtlarını oluşturma, mekânsal ilişkileri görselleştirme ve mahkeme ortamında karmaşık bilgilerin anlaşılmasını artırma potansiyeli taşımaktadır (Ebert & ark., 2021; Carew & Errickson, 2020). Özellikle CT ve 3D tarama verileri, iskelet parçalarının dijitalleştirilmesi, yüz rekonstrüksiyonu ve travma analizi gibi adli antropoloji ve patoloji görevlerinde kullanılmaktadır (Carew, French & Morgan, 2023).

Ancak, 3D teknolojilerinin adli bilimlerdeki uygulamaları bazı sınırlılıklara ve geliştirilmesi gereken alanlara sahiptir. Bu sınırlılıklar arasında, 3D baskılı modellerin doğruluğuna dair sınırlı araştırma ve kanıt tabanının eksikliği, farklı tekniklerin karşılaştırılmasına yönelik raporlama eksikliği ve adli vakalarda 3D baskılı modellerin kabul edilebilirliği ile ilgili potansiyel sorunlar yer almaktadır (Carew & Errickson, 2020). Ayrıca, adli uygulamalar için uygun ve fonksiyonel basılabilir materyal yelpazesinin sınırlı olması da bir zorluktur (Stabile & ark., 2023; Azlin & ark., 2022). 3D rekonstrüksiyonlardan elde edilen yorumların her zaman güçlü kanıt tabanları tarafından desteklenmediği ve analizler için orijinal materyallerin önemine dikkat çekilmiştir (Carew, French & Morgan, 2023).

Uygulayıcılar için pratik öneriler arasında, adli bilim süreci boyunca 3D baskı için iyi uygulama kılavuzlarının geliştirilmesi ve bu kılavuzların benimsenmesi, etik ilkelerin (anonimlik, şeffaflık vb.) adli uygulamalara dahil edilmesi, etik biliş eğitiminin teşvik edilmesi, ve 3D rekonstrüksiyonları kullanırken analizler için mümkün olduğunca orijinal materyallere veya yerleşik tekniklere

başvurulması yer almaktadır (Carew, French & Morgan, 2023). Gelecekteki araştırmaların ve gündemlerin, 3D teknolojilerinin doğruluğu, güvenilirliği ve adli süreçlerdeki rolü gibi kritik alanlara odaklanması gerektiği vurgulanmıştır (Carew & Errickson, 2020).

Politika yapıcılar ve yasa koyucular için, adli bilimlerde 3D teknolojilerinin kullanımına yönelik düzenlemelerin ve standartların oluşturulması önemlidir. Bu düzenlemeler, 3D baskılı adli kanıtların doğruluğunu, güvenilirliğini ve mahkemede kabul edilebilirliğini sağlamayı hedeflemelidir (Carew & Errickson, 2020). Tıbbi cihazlar için zaten FDA gibi kurumlar tarafından rehberlikler ve değerlendirmeler bulunmaktadır, bu da adli uygulamalar için benzer çerçevelerin geliştirilebileceğini düşündürmektedir. Etik prensiplerin (anonimlik, rıza, şeffaflık vb.) yasal ve profesyonel yönergelere entegre edilmesi, insan kalıntıları gibi hassas materyallerin 3D teknolojileriyle işlenmesinde etik sınırların korunmasına yardımcı olacaktır (Carew, French & Morgan, 2023; Cheng & ark., 2016). Adli bilimlerde 3D teknolojilerinin potansiyel faydalarını en üst düzeye çıkarırken, teknik sınırlılıkları ve etik sorumlulukları ele alan kapsamlı düzenlemelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak; adli bilimlerde 3D teknolojilerin sağladığı faydalardan tam anlamıyla yararlanabilmek için multidisipliner bir yaklaşımın benimsenmesi ve bu teknolojilerin doğruluk, güvenilirlik ve etik kullanımına ilişkin sürekli gelişen bilimsel araştırmalarla desteklenen standartların oluşturulması kaçınılmazdır. Ayrıca, ulusal ve uluslararası düzeyde yasa koyucular tarafından 3D teknolojilerle ilgili açık ve kapsamlı düzenleyici çerçevelerin geliştirilmesi, bu teknolojilerin adli mercilerde kabul edilebilirliğini artıracak, böylece 3D teknolojilerin sunduğu olanaklar, adalet süreçlerinde doğruluk ve adil yargılamanın güçlendirilmesine somut ve kalıcı bir katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

Carew, R. M., French, J. & Morgan, R. M. (2023). Drilling down into ethics: A thematic review of ethical considerations for the creation and use of 3D printed human remains in crime reconstruction. *Science & Justice*, 63(3), 330–342. doi: 10.1016/j.scijus.2023.03.003

Golomingi, R., Dobay, A., Franckenberg, S., Ebert, L., & Sieberth, T. (2023). Augmented reality in forensics and forensic medicine—current status and future prospects. *Science & Justice*, 63(4), 451–455. doi: 10.1016/j.scijus.2023.04.009

Brinsko-Beckert, K., & Palenik, C. S. (2020). The analysis of 3D printer dust for forensic applications. *Journal of Forensic Sciences*, 65(5), 1480–1496. doi: 10.1111/1556-4029.143834

Garvin, H. M., & Stock, M. K. (2016). The utility of advanced imaging in forensic anthropology. *Academic Forensic Pathology*, 6(3), 499–516. doi: 10.23907/2016.050

Ebert, L. C., Franckenberg, S., Sieberth, T., Schweitzer, W., Thali, M., Ford, J., & Decker, S. (2021). A review of visualization techniques of post-mortem computed tomography data for forensic death investigations. *International journal of legal medicine*, 135(5), 1855-1867. doi: 10.1007/s00414-021-02581-4

Errickson, D., Carew, R. M., Collings, A. J., Biggs, M. J. P., Haig, P., O’Hora, H., ... & Roberts, J. (2022). A survey of case studies on the use of forensic three-dimensional printing in England and Wales. *International Journal of Legal Medicine*, 136(6), 1605-1619. doi: 10.1007/s00414-022-02872-4

Henningsen, M. J., Thorlacius-Ussing, L., Jensen, L. G., Hansen, K., Jacobsen, C., Lou, S., & Villa, C. (2023). 3D printed skulls in court—a benefit to stakeholders?. *International Journal of Legal Medicine*, 137(6), 1865-1873. doi: 10.1007/s00414-023-03054-6

Pavan Kalyan, B. G., & Kumar, L. (2022). 3D printing: applications in tissue engineering, medical devices, and drug

delivery. *Aaps Pharmscitech*, 23(4), 92. doi: 10.1208/s12249-022-02242-8

Brachet, A., Belżek, A., Furtak, D., Geworgjan, Z., Tulej, D., Kulczycka, K., ... & Baj, J. (2023). Application of 3D printing in bone grafts. *Cells*, 12(6), 859. doi: 10.3390/cells12060859

Villa, C., Lynnerup, N., & Jacobsen, C. (2023). A virtual, 3D multimodal approach to victim and crime scene reconstruction. *Diagnostics*, 13(17), 2764.

Stabile, A. M., Pistilli, A., Mariangela, R., Rende, M., Bartolini, D., & Di Sante, G. (2023). New Challenges for Anatomists in the Era of Omics. *Diagnostics*, 13(18), 2963.

Prajapati, S., Madrigal, E., & Friedman, M. T. (2016). Acquisition, visualization and potential applications of 3d data in anatomic pathology. *Discoveries*, 4(4), e68. doi:10.15190/d.2016.15

Carew, R. M., Morgan, R. M., & Rando, C. (2019). A preliminary investigation into the accuracy of 3D modeling and 3D printing in forensic anthropology evidence reconstruction. *Journal of forensic sciences*, 64(2), 342-352.

Baier, W., Warnett, J. M., Payne, M., & Williams, M. A. (2018). Introducing 3D printed models as demonstrative evidence at criminal trials. *Journal of forensic sciences*, 63(4), 1298-1302.

Carew, R. M., & Errickson, D. (2020). An overview of 3D printing in forensic science: The tangible third-dimension. *Journal of forensic sciences*, 65(5), 1752-1760. doi:10.1111/1556-4029.14442

Li, S. Y., Turner, J., Golightly, S., Zelbst, P., & Yu, J. (2021). Potential impacts of 3D modeling and 3D printing in firearm toolmark examinations. *Journal of forensic sciences*, 66(6), 2201-2207. doi: 10.1111/1556-4029.14790

Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., & Spence, D. M. (2014). Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences.

Carew, R. M., French, J., & Morgan, R. M. (2021). 3D forensic science: A new field integrating 3D imaging and 3D printing in crime reconstruction. *Forensic Science International: Synergy*, 3, 100205. doi: 10.1016/j.fsisyn.2021.100205

Azlin, M. N. M., Ilyas, R. A., Zuhri, M. Y. M., Sapuan, S. M., Harussani, M. M., Sharma, S., ... & Afifah, A. N. (2022). 3D printing and shaping polymers, composites, and nanocomposites: a review. *Polymers*, 14(1), 180.

Sheth, R., Balesh, E. R., Zhang, Y. S., Hirsch, J. A., Khademhosseini, A., & Oklu, R. (2016). Three-dimensional printing: an enabling technology for IR. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 27(6), 859-865.

Spencer, S. R., & Watts, L. K. (2020). Three-dimensional printing in medical and allied health practice: A literature review. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 51(3), 489-500.

Cook, J. L. (2024). Annals of 3D printed medicine. *Ann 3D Printed Med*, 14, 100146. doi: 10.1016/j.stlm.2024.100146

Jani, G., Johnson, A., Marques, J., & Franco, A. (2021). Three-dimensional (3D) printing in forensic science—An emerging technology in India. *Annals of 3D Printed Medicine*, 1, 100006. doi:10.1016/j.stlm.2021.100006

Ren, P., Shui, W., Liu, J., Fan, Y., Zhao, W., & Zhou, M. (2018). A sketch-based rapid modeling method for crime scene presentation. *Journal of Digital Forensics, Security and Law*, 13(1), 8. doi:10.15394/jdfsl.2018.1484

CHAPTER 0

BİYOMEDİKAL UYGULAMALAR İÇİN YENİ SÜPER MALZEME OLARAK BOROFEN

Seda AYÇİÇEK¹

Şule COŞKUN CEVHER²

¹ Diğer, Gazi Üniversitesi, Biyoloji Bölümü, Orcid: 0000-0003-0553-6632

² Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Biyoloji Bölümü, Orcid: 0000-0001-6204-2845

1. GİRİŞ

2D nanomalzemeler, benzersiz ve üstün özellikleri nedeniyle bilim camiasının ilgisini çekmiştir (X. Huang, Qi, Boey, & Zhang, 2012; X. Huang et al., 2011). Yığın malzemelerle karşılaştırıldığında, ultra ince 2D nano tabakalar daha geniş yüzey alanına, daha yüksek kimyasal ve fiziksel aktiviteye ve onlara özel fotonik, elektronik, katalitik ve manyetik özellikler kazandıran kuantum hapsetme etkilerine sahiptir ve biyo-benzer malzemeler, ilaç taşıyıcılar, biyosensörler, elektronik cihazlar vb. alanlarda büyük uygulama potansiyeline sahiptir (Chhowalla et al., 2013; Sun et al., 2019). 2004 yılında grafenin ortaya çıkışı malzeme alanında büyük bir ilgiye yol açmıştır ve 2D malzemelerin çeşitli alanlardaki uygulamalarını büyük ölçüde geliştirmiştir (Geim & Novoselov, 2007; Novoselov et al., 2004). Bununla birlikte grafenin sıfır bant aralığına sahip olması elektronik bileşenler, biyolojik görüntüleme ve fotodinamik terapide grafenin birçok uygulamasını engellemektedir (Ou et al., 2021).

Son yıllarda araştırmacılar, mükemmel özelliklere sahip grafen benzeri malzemeler geliştirmeyi umarak grafen gibi bal peteği yapısına sahip 2D malzemeler veya karbon elementiyile aynı grupta yer alan veya ona bitişik olan tek elementli 2D nano tabakalar bulmaya çalışmaktadır. Neyse ki, geçiş metal sülfürleri (TMD'ler)(Ding et al., 2019; B. L. Li et al., 2019), kare bor nitrür (h-BN)(Dean et al., 2010) ve grafit faz karbon nitrür (g-C₃N₄)(Cao, Low, Yu, & Jaroniec, 2015) ile temsil edilen grafen benzeri yapıdaki malzemelerin yanı sıra borofen ile temsil edilen tek elementli 2D malzemelerin ortaya çıkması (B. Feng et al., 2016), siliken (Cao et al., 2015; L. Chen et al., 2012; Y. Du et al., 2014), stanen (Y. Wang et al., 2020; F. F. Zhu et al., 2015) ve germanen (Ni et al., 2012) grafenin sıfır bant aralığı eksikliğini telafi ederken, aynı zamanda yeni işlevler ve uygulamalar için arzu edilen bazı özel özelliklere de sahiptir.

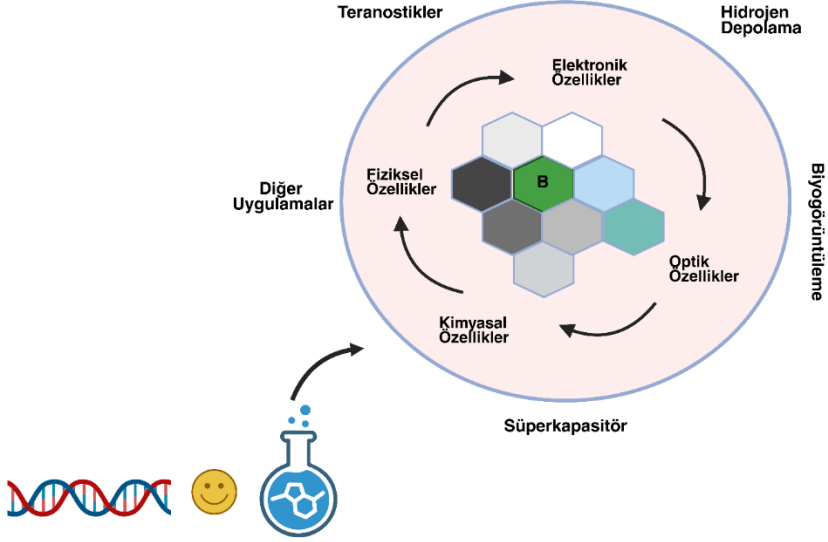
Diğer 2D malzemelerle karşılaştırıldığında, tek elementli nanomalzemelerin üç benzersiz avantajı vardır (Ou et al., 2021): Mevcut yarı iletken teknolojisi ile daha uyumludur. Örneğin, silikon ve germanyum elementleri geleneksel yarı iletken malzemelerin yapımında kullanılan ana elementlerdir. Tek bir elementten oluşmaları nedeniyle yüksek kalitede sentezlenmeleri nispeten daha kolaydır.

Biyolojik sistemler tarafından parçalanması ve metabolize edilmesi daha kolaydır. Siyah fosfor, iyi biyouyumluluğa sahip tek elementli 2D nanomalzemelerden biridir. Buna ek olarak, ultra yüksek spesifik yüzey alanı ve pH, ışık, elektrik vb. faktörlere farklı seviyelerde tepki vermesi, tek elementli 2D malzemeleri elektron cihazları, ilaç dağıtımı, optik terapi, biyolojik görüntüleme ve diğer alanlar için üstün adaylar haline getirmektedir (B. L. Li et al., 2020; Shi, Li, & Mei, 2020).

Tek elementli 2D malzemelerden biri olan borofen, grafen ve siyah fosfora benzer şekilde sadece yüksek spesifik yüzey alanı ve ilaç yükleme kapasitesine sahip olmakla kalmaz aynı zamanda pH, optik ve termal stimülasyon altında ilaçları duyarlı bir şekilde serbest bırakılmasını sağlar (Ou et al., 2021). Borofen polimorfizmi diğer monoelemental 2D malzemelerle karşılaştırıldığında en benzersiz özelliği olan gizemli tek elementli 2D nanomalzemelerden biridir. Farklı yöntem ve koşullarla sentezlenen borofen(ler) farklı yapılar sahiptir ve bu allotroplar farklı özelliklere sahiptir. Örneğin, Pmmn borofenin Dirac konileri ve yeni elektriksel özellikleri ile ilgi çekici Dirac malzeme olduğu tahmin edilmektedir (X.-F. Zhou et al., 2014); β 12 faz borofen ve α faz borofenin özellikleri farklıdır; β 12 faz borofen oldukça anizotropik iken α faz borofen izotropiktir (Xiao et al., 2017; H. Zhou, Cai, Zhang, & Zhang, 2017); Bu durum uygulama gereksinimlerini karşılamak için borofeni sentezlemek için hazırlama koşullarını düzenlenebileceğini ve kontrol edilebileceği anlamına gelir.

Bor, periyodik elementler tablosunun beşinci elementi olan Grup IIIA'daki tek yarı iletken elementtir, karbona komşu ve ona benzer değerlik orbitallerine sahiptir (Forte, La Magna, Deretzis, & Pucci, 2009). Bu benzerlikler, ışıklı 2D metal olan borofenin grafene benzer ilginç özelliklere sahip olabileceğine işaret etmektedir (Y. Huang, Shirodkar, & Yakobson, 2017; X. Liu, Zhang, Wang, Yakobson, & Hersam, 2018). Özel elektronik yapı, karmaşık bağlanma mekanizması ve karbon elementleriyle yakın korelasyon, borofenin grafeni yansıtan mükemmel özelliklere sahip olacağını ve hatta yeni bir süper malzeme olarak grafeni geçeceğini göstermektedir (Ou et al., 2021). Gerçekten de, teorik hesaplamalar borofenin birçok düşük boyutlu allotropa ve ilginç özelliklere sahip olduğunu işaret etmiştir (X. Liu & Hersam, 2019). Doğrudan deneysel testlerle tasarlanan çoğu geleneksel malzemenin aksine, borofenin tasarımı, potansiyel özellikleri ve olası hazırlama yöntemlerini öngören teorilerle başlar ve borofenin laboratuvarında hazırlanmasına ve daha fazla uygulanmasına başarılı bir şekilde rehberlik eder (Şema 1)(Ou et al., 2021). Borofenin geliştirilmesi şüphesiz materyal genom projesinin (MGI) başarılı bir örneğidir. İnsan genlerine benzer şekilde, malzemelerin de özelliklerini belirleyen anahtar “genleri” vardır. MGI, bilinmeyen malzemeleri keşfetmeden önce, malzeme sentezinin verimliliğini artırmak, malzeme araştırma maliyetini düşürmek ve malzeme tasarımının başarı oranını artırmak için malzeme bileşimi, yapısı ve özelliği arasındaki ilişkinin teorik araştırmalarla açıklığa kavuşturulması gerektiğini savunmaktadır. Borofenin ortaya çıkışı ve evrimi, yeni malzemelerin sentezi için olağanüstü bir model sunmaktadır.

Şema 1. Borofenin benzersiz gelişiminin gösterimi. Borofen teorileri oldukça fazladır. Borofenin özelliklerini ve sentezini etkileyen temel bilgiler, genel olarak borofen sentezine rehberlik etmek için gen yönlendirmeli protein sentezine benzer şekilde teorik tahmin yoluyla elde edilmiştir.



Kaynak: Ou et al., 2021

2. BOROFEN'İN SENTEZ YÖNTEMLERİ

2D nanomalzemelerin sentezlenmesi için yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya olmak üzere iki ana yaklaşım vardır. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, karmaşık yapıları daha küçük parçalara ayırmak için fiziksel, kimyasal ve biyolojik kaynaklardan gelen enerjiyi

kullanır (Rahman et al., 2023). Yukarıdan aşağıya yaklaşımlar mekanik eksfoliyasyon, ultrasonikasyon, iyon interkalasyon eksfoliyasyonu ve farklı aşındırma türlerini içerir (Şekil 1)(Ou et al., 2021). Aşağıdan yukarıya yaklaşım atomik ölçekte başlar ve nanopartikülleri üretmek için farklı kimyasal, fiziksel veya biyolojik etkileşimler kullanır (Rahman, Chowdhury, & Hossain, 2022). Aşağıdan yukarıya yöntemler kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve ıslak kimyasal sentezi içerir (Şekil 1)(Ou et al., 2021).

Şekil 1. 2D nanomalzemelerin temel sentez yöntemleri. Aşağıdan yukarıya sentez: CVD, PVD ve ıslak kimyasal. Yukarıdan aşağıya sentez: mekanik ayırma, ultrasonikasyon, iyon ara katman eksfoliasyonu, seçici aşındırma ve termal oksidasyon aşındırma



Kaynak: Ou et al., 2021

2.1.Yukarıdan Aşağıya Yaklaşım

Bor pullarından serbest duran borofen, sıvı faz sonokimyasal eksfoliasyon ile üretilir (Ranjan et al., 2019) . Lin ve arkadaşları, sıcaklık aralığının -20 ila -25 °C arasında olduğu düşük sıcaklıkta sıvı eksfoliasyon (LTLE) yöntemi ile serbest duran β_{12} borofeni sentezlemişlerdir (Lin et al., 2021). Borofeni sentezlemek için çok sayıda teknik kullanılmıştır ancak tekniklerin pahalı olması ve büyük ölçekli üretim için zor olması gibi bazı dezavantajları vardır. Hou ve arkadaşları, sodyum borohidrürün (NaBH_4) termal ayrışması

yoluyla ultrastabil kristalin hidrojenlenmiş borofenlerini başarıyla geliştirmişlerdir (Hou et al., 2020). Bu çalışmada metal substratlar kullanmadan borofen sentezlemek için, taşıyıcı gaz olarak hidrojen altında sodyum borohidrürün termal ayrışmasını kullanarak üç aşamalı bir ısıtma tekniği kullanılmıştır. Elde edilen borofen, güçlü asit ve bazik çözücülerde dikkate değer bir kararlılık sergiler ve $B_{1/9}$ yapısına sahip benzersiz bir 2D malzemedir. Ayrıca, borofenin elde edilen optik bant aralığı, birinci prensip simülasyonları ile iyi bir uyum göstermektedir. Nihayetinde yüksek performanslı bir cihaz uygulamasını göstermek için borofen tabanlı bir bellek cihazı geliştirilmiştir (Hou et al., 2020).

2.2.Aşağıdan Yukarıya Yaklaşım

Borofenin deneysel sentezi, Ag (111) (Xiaolong Liu et al., 2022), Au (111) (B. Kiraly et al., 2019), Cu (111) (R. Wu et al., 2022), Ir (111) (Radatović et al.), Al (111) (W. Li et al., 2018), Ru (0001) (Sutter & Sutter, 2021) ve kuvars (Z. Wu et al., 2022) alt tabaka üzerinde Moleküler Işın Epitaksi (MBE), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ve Elektron Işın Epitaksi (EBE) yöntemi ile biriktirme için uygundur. Tai ve arkadaşları, bor kaynağı olarak bor ve bor oksit tozu karışımı ve taşıyıcı gaz olarak hidrojen gazı kullanarak CVD yoluyla bakır Cu folyo üzerinde atomik olarak ince iki boyutlu (2D) γ -bor filmleri geliştirmişlerdir (Tai et al., 2015). 2D bor ince filmleri hazırlamak için iki bölgeli bir CVD fırını tasarlamışlardır. Sielicki ve arkadaşları borun elektrokimyasal eksfoliyasyonu ile borofeni başarıyla sentezlemişlerdir (Sielicki, Maślana, Chen, & Mijowska, 2022). Bu yöntem, elektrik iletkenliği sağlayan ve borofen üretimi için bir platform oluşturan metal bir ağı dökme bor eklenerek gerçekleştirilir. Tipik olarak, 0.1 g dökme bor tozu ilk olarak hidrolik presleme ile metal ağı (nikel veya bakır) diskler üzerinde hazırlanmıştır. Disk 15 mm çapındadır ve elektrot görevi görür. Dimetil sülfoksit (DMSO) içinde LiCl ve deiyonize su içinde Na_2SO_4 olmak üzere iki farklı elektrolit türü

kullanılmaktadır.Yardımcı elektrot platin telden yapılmıştır. Elektrokimyasal eksfoliyasyon yöntemi boyunca katot ve anot arasında bir elektrik akımı (1 A, 0.5 A veya 0.1 A) sağlanır. Tüm deneyler bir saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Süpernatant santrifüj edildikten ve 5000 rpm'de deiyonize su ile yıkandıktan sonra toplanmıştır.

Kitlesel üretimlerine ve verimli işlenmelerine olanak tanıyacak sentez yöntemlerinin ve tekniklerinin keşfi, tüm 2D malzemelerin araştırılmasında büyük bir zorluktur (Rahman, Chowdhury, Hossain, Rana, & Alam, 2022; Sobhan et al., 2021). Aynı durum, araştırmaların şu anda çoğunlukla örneklerin in situ karakterizasyonlarının küçük bir alanıyla sınırlı olduğu borofen için de geçerlidir. Borofen için sentez yöntemleri, substrat kaynak malzemeleri, elde edilen fazlar ve deney sıcaklığındaki son gelişmeler Tablo 1'de özetlenmiştir (Rahman et al., 2023).

Tablo 1. Borofen'in farklı yöntemlerle sentezi, elde edilen fazlar ve çalışma koşulları

Yöntem	Alt Tabaka	Kaynak Materyal	Borofenin Fazları	Sıcaklık (°C)	Kaynak
Sıvı faz sonokimyasal eksfoliasyon	Serbest duran	Bor tozu	β_{12} , χ_3	-	(Ranjan et al., 2019)
Düşük sıcaklıkta eksfoliasyon	Serbest duran	Bor tozu	β_{12}	- 20 ila - 25	(Lin et al., 2021)
Elektrokimyasal eksfoliasyon	Serbest duran	Bor çubuğu	-	600-1000	(Y. Liu, Penev, & Yakobson, 2013)
MBE	Ag (111)	-	Çift katmanlı- α borofen	-	(Xiaolong Liu et al., 2022)
EBE	Ag (111)	Katı bor çubuğu	$v_{1/5}$, $v_{1/5-30^\circ}$, $v_{1/6}$ ve $v_{1/6-30^\circ}$	400-550	(Q. Li et al., 2021)
EBE	Au (111)	Bor çubuğu	$v_{1/12}$	550	(Brian Kiraly et al., 2019)
MBE	Cu (111)	Bor	β_{12}	326–576	(C. Chen et al., 2022)
CVD	Ir (111)	Diboran	χ_6	960	(Cuxart et al., 2021)
	Cu (111)	Diboran	χ_3	500	
MBE	Cu(100)	-	β_{13}	480-450	(R. Wu et al., 2022)
Segregasyon-geliştirilmiş epitaksi	Ir (111)	Dorazin $B_3H_6N_3$	χ_6	1200	(Radatović et al.)
CVD	Ir (111)	Borazin	χ_6	850-1100	(Omamba c et al., 2021)

Tablo 1. Devam ediyor

EBE	Ir (111)	Bor çubuğu	β_{12} ve χ_3	300-600	(Vinogradov, Lyalin, Taketsugu, Vinogradov, & Preobrajenski, 2019)
MBE	Al (111)	Saf bor	Bal peteği	226	(W. Li et al., 2018)
CVD	Kuvars	Sodyum borohidrit (NaBH ₄)	α_2 -' H-borofen	650	(Z. Wu et al., 2022)
CVD	Ru (0001)	Borazin	-	850-950	(Sutter & Sutter, 2021)
Elektrokimyasal eksfoliyasyon	Serbest duran	Bor tozu	β_{12} ya da χ_3	-	(Sielicki et al., 2022)

Kaynak: Rahman et al., 2023

3. BOROFEN'İN ÖZELLİKLERİ

3.1.Kimyasal Özellik

2D borun oksidasyona karşı inert olduğu gösterilmiştir, oysa dış kenarı ve 3D yığın bor daha az inerttir (Baojie Feng et al., 2016). Borun üç değerlik elektronu vardır ([He]2S²2P¹); ancak 2S'den 2P orbitaline terfi eden bir elektron borun dört kullanılabılır değerlik orbitaline sahip olmasını sağlayabilmektedir. Bu nedenle, değerlik elektronlarının sayısı değerlik orbitallerinin sayısından daha azdır ve

kimyasal bağlar oluştururken elektronik orbitaller bor atomu elektronlarıyla tam olarak doldurulamaz, bu da elektron eksikliği olan bor atomlarının oluşumuna yol açar. Yığın 3D bor atomlarının ve çevre çevresindeki 2D bor atomlarının konjugasyonlarının her ikisi de klasik iki merkezli iki elektronlu bağlara dayanır, ancak 2D borun iç atomları delokalize çok merkezli iki elektronlu bağlardır, bu da oksidasyon kararlılığındaki farklılıklarına neden olur. Örneğin, bir bor tabakasında, HH'ler “alıcı” olarak görev yapar ve altıgenlerin merkezindeki bor atomları “verici” olarak hareket eder, böylece borda elektron eksikliğini telafi eder ve bor tabakalarını oksidasyona karşı inert hale getirir.

3.2.Mekanik Özellikler

Diğer sıradan 2D malzemelerde bulunan klasik iki merkezli kovalent bağlar yerine çok merkezli kovalent bağlardan inşa edilen borofen, olağanüstü mekanik özellikler vaat etmektedir (Le, Mortazavi, & Rabczuk, 2016; Mortazavi, Rahaman, Dianat, & Rabczuk, 2016; Y.-P. Zhou & Jiang, 2017). Bağ enerjisi ≈ 5.90 eV olan (Schabel & Martins, 1992) düzlem içi σ kovalent bağları doğadaki en güçlü bağlar arasındadır ve grafenin ultra yüksek düzlem içi mukavemeti ve mükemmel yapısal kararlılığı ile sonuçlanır. Borofen durumunda, tabakaya önemli bir güç veren klasik kovalent bağlara ek olarak, metalik benzeri çok merkezli bağlar yapıya genellikle potansiyel akışkanlık kazandırır. Ayrıca, 2 boyutlu bir malzeme olarak borofenin atomik kalınlığı nedeniyle mükemmel esneklik sergileyeceği tahmin edilmektedir. Ayrıca, tahminlere göre, borofen büyük bir gerinimde yapısal bir faz geçişine uğrayacak ve bu da daha yüksek bir mekanik tokluğa yol açacaktır. Buna ek olarak, Wang ve arkadaşları (H. Wang et al., 2016) çekme gerilmesi arttığında B-B bağları zayıfladığından, düzlem dışı yön boyunca Poisson oranının negatif olduğunu kanıtlamıştır (B. Liu & Zhou, 2019).

3.3.Elektriksel Özellikler

Bor elementinin elektron eksikliği olan doğası ile en kararlı yapı, sırasıyla iki ve üç merkezli bağlanma ile altıgen ve üçgen yapıların (Tang & Ismail-Beigi, 2007) bir karışımıdır (Boustani, Rubio, & Alonso, 1999; Evans, Joannopoulos, & Pantelides, 2005). Grafenin kararlı yapısından farklı olmasına rağmen, borofen ayrıca metaliklik, Dirac-Fermi etkileri, süper iletkenlik ve yarı iletkenlik gibi nispeten benzersiz elektriksel özelliklere sahiptir.

3.3.1. Metaliklik

Yakobson ve arkadaşları (Penev, Kutana, & Yakobson, 2016b) teorik olarak, borofenin tüm polimorflarının metalik olduğunu, 3D hacimli alotropların yarı iletken veya yalıtkan özelliklerinden farklı olduğunu ve bunların sadece küçük bir kısmının ultra yüksek basınç altında metale dönüşebileceğini öngörmüştür (Eremets, Struzhkin, Mao, & Hemley, 2001). Ardından, metalikliğin pz yörüngesi tarafından belirlendiği deneysel olarak doğrulanmıştır (Shang, Ma, Gu, & Kou, 2018). Wu ve arkadaşları (Baojie Feng et al., 2016), taramalı tünel spektroskopisi kullanarak başarıyla sentezlenen β_{12} ve χ_3 fazlarının elektronik durumlarını ölçtüler ve Fermi seviyesi çevresinde yerel durum yoğunlukları olduğunu bulmuşlardır, bu da metalikliğin enerji bandı yapısını kanıtlamıştır.

3.3.2. Topolojik Özellikler

Topolojik malzemeler, geleneksel malzemelerden farklı birçok yeni kuantum özelliği gösterir (Qi & Zhang, 2011) ve elektron yapılarına göre üç türe ayrılabilir: topolojik yalıtkanlar (Hsieh et al., 2013), topolojik Weyl yarımetaller (S. Y. Xu et al., 2015) ve topolojik Dirac yarımetaller (Yongping Du et al., 2017).

Topolojik Dirac yarı metali, Fermi seviyesine yakın enerji bantlarının 3D Dirac noktalarına sahip olduğu ve Dirac noktalarının etrafındaki üç bitişik momentum yöneliminin tümünün doğrusal dağılım ilişkileri olduğu benzersiz bir elektron yapısı gösterir. Bu tür bant geçiş özellikleri kristal simetrisi tarafından korunur, bu da onları elektronik cihazlar, yarı iletkenler ve diğer alanlarda çok cazip bir uygulama perspektifine sahip kılar (D. Zhao et al., 2020). Oysa, şimdiye kadar keşfedilen topolojik Dirac malzemeleri genellikle ağır metal elementler içerir ve bu da pratik uygulamalara elverişli olmayan çevre kirliliği, yüksek maliyet ve malzeme güvenliği bazı zorlu sorunları beraberinde getirir. Bu nedenle, kararlı topolojik malzemeler oluşturmak için hafif elementleri araştırmak gerekmektedir. Grafen, tipik olarak hafif bir Dirac malzemesidir ve araştırmacılar tarafından gözlemlenen birçok yeni fiziksel fenomen ve elektron özelliği Dirac konileri tarafından sağlanır. Günümüzde Dirac malzemeleri artık karbon malzemelerle sınırlı değildir, aynı zamanda çeşitli diğer malzemeleri de kapsamaktadır (Novoselov et al., 2004).

Karbon atomunun sol tarafındaki hafif element olan bor, birçok açıdan karbon malzemelerle benzer özelliklere sahip 2D Dirac malzemeleri üretme konusunda büyük potansiyele sahiptir. Deneylerle doğrulandığı üzere (B. Feng et al., 2017), β_{12} ve χ_3 borofenler Dirac konilerini barındırırken, $Pm\bar{m}n$ ve $Cmmm$ gibi tamamen hidrojenlenmiş borofenler, grafenden ($8.2 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$) yaklaşık dört kat daha yüksek olan ultra yüksek Fermi hızına ($3.5 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$) sahip bükülmüş Dirac konileri sergilerler; (Hwang et al., 2012; L. C. Xu, Du, & Kou, 2016) ancak, her ikisinin Dirac konileri de şekil olarak mükemmel değildir, bu da borofenin anizotropik taşıma özelliklerine yol açar. Dirac konilerinin varlığı, borofenin ilginç kuantum etkileri sergileyebileceğini gösterir. Borofen, sıfır kütleli Dirac–Fermi etkisine sahip saf bir element malzemesi olması

beklenir (X.-F. Zhou et al., 2014) ve yüksek hızlı, düşük tüketimli nano ölçekli elektronik cihazların uygulanmasında umut vaat eder.

3.3.3. Süperiletkenlik

Borun nispeten düşük atom kütesinin güçlü elektron-fonon kuplajı oluşturabileceği ve borofenin metalik yapısının daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonu oluşturabileceği bildirilmiştir (Kortus, Mazin, Belashchenko, Antropov, & Boyer, 2001); her ikisi de geleneksel süperiletkenlerin oluşumunda kilit faktörlerdir ve borofenin süperiletken olma potansiyeline sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Dikkat çekici bir şekilde, Yakobson ve arkadaşları (Penev, Kutana, & Yakobson, 2016a) teorik hesaplamalarla kritik sıcaklığının $T_c \approx 10\text{--}20$ K olacağını öngörmüşlerdir, bu da grafeninkinden (teorik olarak $T_c \approx 8.1$ K (Profeta, Calandra, & Mauri, 2012) ve deneysel olarak 4.5 K) çok daha yüksektir (Xue et al., 2012). Bununla birlikte, elektron dopingi ve gerilme gerilimi, borofenin süperiletkenliğini bastırabilmektedir (Cheng et al., 2017; R. Xiao et al., 2016), bu da borofenin kritik sıcaklığının deneylerde kanıtlanabilir şekilde tespit edilmesini zorlaştırır. Ancak, bu sorunlar çözüldüğünde, bu özellikler süperiletken cihazlarda borofenin tasarım esnekliğini ve kullanılabilirliğini artıracaktır.

3.3.4. Yarı iletkenlik

Bilim adamları, borofenin birkaç fazının da sıfır olmayan bant aralıkları nedeniyle yarı iletkenliğe sahip olduğunu deneysel olarak göstermiştir (Kistanov et al., 2018; Kou et al., 2016). PBEO hibrit hesaplama sonuçlarına dayanarak, Zeng ve arkadaşları (Wu et al., 2012), α ve α' -tabakalarının (hafifçe bükülmüş α -tabakası) her ikisinin de 1.40 ve 1.10 eV'lik dolaylı bant aralıklarına sahip küçük aralıklı yarı iletkenler olduğunu bulmuşlardır. 4.0 ve 1.10 eV olan küçük aralıklı yarı iletkenler olduğunu ve bunların arasında α' -tabakanın en yüksek kohezyon enerjisine sahip olduğunu ve

muhtemelen en kararlı bükülmüş borofen olduğunu bulmuştur. Kou ve arkadaşları (Kou et al., 2016), daha kalın borofenin yüzey bant aralığının, uygulanan gerilimi değiştirerek hala değiştirilebildiğini ve bunun da elektron hareketliliğinde bir değişikliğe neden olarak borofenin iletkenlik türünü metalikten yarı iletkenliğe dönüştürdüğünü bulmuştur. Bu durumda, uygulanan gerilimi değiştirerek daha yüksek elektron hareketliliği elde edilebilir. Bu nedenle, γ -B28 borofenin basınç duyarlı ve ışığa duyarlı cihazlar alanında uygulama olanakları bulunmaktadır.

3.3.5. 1D Yaklaşık Serbest Elektron Durumları

Serbest elektron kütlelerine (m_e) neredeyse uygun etkili kütle ile karakterize edilen (Eknapakul et al., 2016; M. Feng, Zhao, Huang, Zhu, & Petek, 2011) yaklaşık serbest elektron (NFE) durumları, tipik olarak parabolik enerji dağılımı gösterir ve elektron taşıma özellikleri oldukça dikkat çekicidir ve elektron yayıcılar da uygulanabilmektedir (L. Chen, Li, & Wee, 2009). NFE durumları, sınırlama potansiyelinin dik olduğu örneğin 0D C_{60} molekülleri (J. Zhao, Feng, Yang, & Petek, 2009), 1D nanotüpler ve nanoşeritler (Yamanaka & Okada, 2014) ve 2D grafen (Silkin et al., 2009) gibi düşük boyutlu malzeme yüzeylerinde yaygın olarak bulunabilmektedirler. Ancak, genellikle malzemenin taban düzlemine dik olan potansiyel gradyanının varlığı nedeniyle, bu NFE durumları taban düzlemi çevresinde kalmak yerine vakum bölgesinde yayılmayı tercih ederler, bu da taşıma özelliklerindeki üstünlüklerine kısıtlamalar getirir (Kong et al., 2019).

3.4. Termal Özellikler

Borofen, termal kararlılık ve termal iletkenlik dahil olmak üzere olağanüstü termal özelliklere sahiptir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, termal özelliklerinin borofenin yapısı ile büyük bir ilişkisi olduğunu göstermiştir. Borofenin termal kararlılığı ve termal iletkenliğine aşağıda yer verilmiştir. Son yıllarda, Ag (111) üzerinde

epitaksiyel olarak büyütülen β_{12} , δ_6 ve χ_3 fazları da dahil olmak üzere birçok farklı borofen türü teorik olarak tahmin edilmiştir ve deneysel olarak doğrulanmıştır (Baojie Feng et al., 2016; Mannix et al., 2015). Substrattan çıkarıldıktan sonra, özellikle δ_6 fazı termal olarak kararsız olabilmektedir (Ou et al., 2021). δ_6 faz borofenin kararsızlığını kontrol etmek için Zhou ve arkadaşları (Y.-P. Zhou & Jiang, 2017) düşük enerjili üçgen yapılar ve borofen arasındaki etkileşimi anlamak üzere moleküler dinamik simülasyonları için iki etkili ampirik potansiyel geliştirmiştir: doğrusal potansiyel valans kuvvet alanı modu ve doğrusal olmayan Stillinger-Weber potansiyeli. Buna ek olarak, borofenin kararsızlığını ortadan kaldırmak için bir başka strateji de tamamen hidrojenlenmiş borofen üretmektir (G. Liu, Wang, Gao, Zhou, & Wang, 2017; Z. Wang, Lü, Wang, Feng, & Zheng, 2016). Brillouin bölgesindeki fonon frekanslarının fonon spektrumundan pozitif olduğu fark edilmiştir (G. Liu et al., 2017), bu da dinamik kararlılığı gösterir (Ablikim et al., 2018).

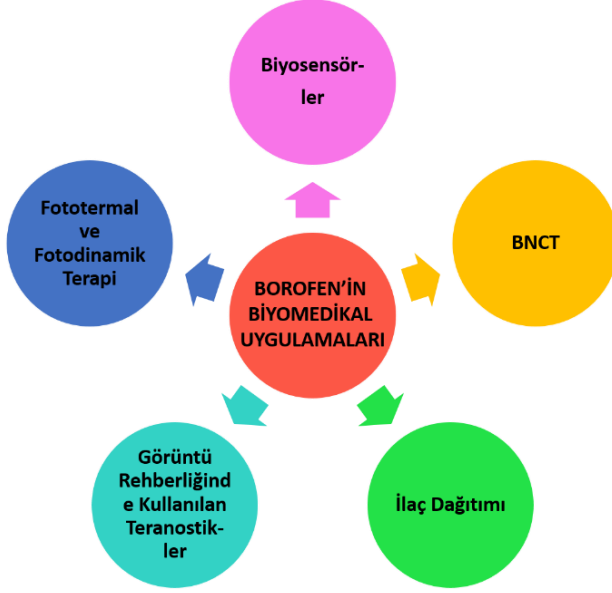
Borofen aynı bor atomundan oluştuğu için çeşitli borofen fazlarının fonon frekansları birbirine yakındır. Bununla birlikte, her birim hücredeki bor atomlarının miktarları aynı değildir, bu da farklı geometrik simetrilere ve farklı sayıda optik fonon dallarına yol açarak çoklu termal taşınımın sonuçlanır (Wu et al., 2012; R. C. Xiao et al., 2016). Düşük frekanslı fononlar için, grafene benzer şekilde, borofende fonon iletimi neredeyse izotropikken, yüksek frekanslı fononlar için iletim tek boyutludur ve bu da ultra yüksek termal iletkenliğe yol açar (H. Zhou et al., 2017). Bu durum, farklı fonon saçılma oranlarının termal iletkenlik ve termal özelliklerde gözlemlenen farklılıklara yol açtığını göstermektedir. Örneğin, α fazı izotropik iken β_{12} fazı borofen oldukça anizotropiktir; α fazı içsel olarak kararlı iken δ_6 fazı termal olarak kararsızdır (Xiao et al., 2017; H. Zhou et al., 2017).

Yukarıda açıklanan borofenin özel termal özellikleri, farklı endüstrilerin farklı gereksinimlerini karşılayabilen bu malzemelerin olası uygulamaları için rehberlik sağlar. Örneğin, yüksek termal iletkenlik fotovoltaiik ve elektronik ekipmanlarda biriken ısınn ortadan kaldırılmasına yardımcı olabilirken, termoelektrik ve termal yalıtım endüstrileri düşük termal iletkenlik malzemeleri gerektirir (Ou et al., 2021). Borofende termal taşınımın çokluğu, termal yönetim ve şeffaf iletkenlerde uygulanmasını mümkün kılmaktadır.

4. BOROFEN'İN BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI

Borofen ve grafenin yapısal benzerlikleri nedeniyle, borofen piller gibi uygulamalarda da kullanılabilir. Ancak, biyosensörler dışında, biyomedikal uygulamalar nadiren bildirilmiştir. Ancak, diğer elementlerle etkileşime giren 2D bor kümeleri, tümör hücresi lokalizasyonu ve tedavisi için büyük potansiyel göstermektedir. Borofenin biyomedikal uygulamaları aşağıda verilmiştir (Şekil 3).

Şekil 3. Borofen'in biyomedikal uygulamaları



4.1.Biyosensörler

Biyosensörler, hormonlar, proteinler ve glukoz gibi biyobelirteçleri yüksek özgüllük ve hassasiyetle hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebilir (Tao et al., 2019). Biyosensörler kan örneği tespiti, erken kanser teşhisi ve klinik analiz için kullanılabilir ve biyotıp alanında büyük ilgi görmektedir. 2D nanomalzemeler, üstün elektrokimyasal performansları, yüksek yüzey-hacim oranları (C.-S. Huang, Murat, Babar, Montes, & Schwingenschlögl, 2018), daha fazla yüzey-aktif bölgeleri (Choi et al., 2018; Qiu et al., 2018), ve tek katman kalınlıklarında yüksek elektronik hareketlilikleri nedeniyle biyosensörler için mükemmel adaylar haline gelmiştir (Chahal et al., 2021). Borofen, olağanüstü geniş yüzey alanı ve gaz moleküllerine karşı üstün emiciliği nedeniyle gaz algılama için geniş bir biyoalgılama uygulama potansiyeli göstermektedir (D. Li et al.,

2020). Biyosensörler etanol (CH_2OH)(Xie et al., 2020) ve amonyak (NH_3)(C.-S. Huang et al., 2018) gibi toksik olmayan gazları izleyebilirken, formaldehit (CHOH), CO ve NO (C.-S. Huang et al., 2018) gibi yüksek derecede toksik gazları grafen ve fosforen gaz biyosensörleri tarafından izlenebilir.

Borofen yüzeyinde yüksek derecede zehirli gazların oldukça güçlü adsorpsiyon gücüne ek olarak, borofenin yüksek derecede zehirli gaz biyosensörleri olmaya daha uygun olmasının nedeni kısmen grafen gibi diğer 2D malzemelerin sahip olmadığı elektronik bant aralığıdır. Borofenin elektronik bant aralığı, gaz adsorbe olduğunda hızla azalabilmektedir, bu da bol miktarda elektron transferini kolaylaştırır ve elektrik iletkenliğini artırır ve böylece borofeni yüksek derecede toksik gaz biyosensörleri uygulamalarında dikkate değer kılar (Shukla, Warna, Jena, Grigoriev, & Ahuja, 2017). HCOH yüksek derecede toksik ve tahriş edici kanserojen olarak bilinir ve buna maruz kalmak gözlerde sulanma, solunum yolu tahrişi ve astım gibi istenmeyen reaksiyonlara neden olabilir (Latorre, Silvestre, & Monteagudo, 2011). Bununla birlikte, mükemmel kimyasal reaktivitesi ve yüksek termal stabilitesi nedeniyle birçok endüstriyel ve tıbbi alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Cockcroft, Hoepfner, & Dolovich, 1982). Bu nedenle, HCOH'nin neden olabileceği olumsuz etkilerden etkili bir şekilde kaçınmak için oldukça hassas bir HCOH biyosensörünün geliştirilmesi gerekmektedir. Ansari ve arkadaşları (Kootenaei & Ansari, 2016) Yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) hesaplamaları ile konsolide altıgen oyuk yapısını analiz ederek B_{36} 'nın HCOH biyosensörü olarak uygulama potansiyelini incelemiş ve HCOH varlığının B_{36} 'nın iletkenliğini önemli ölçüde artırabileceğini ve böylece elektrik sinyalleri üretebileceğini bulmuşlardır. Ayrıca, elektrik sinyallerinin gücü daha fazla adsorbe edilmiş HCOH molekülü ile birlikte artabilir, bu da B_{36} 'nın HCOH konsantrasyonuna (veya

basıncına) karşı yüksek bir duyarlılığa sahip olduğunu ve HCOH biyosensörü olarak büyük bir potansiyele sahip olacağını gösterir.

Pratik fayda açısından bakıldığında, bu aynı zamanda borofenin bazı toksik gazların konsantrasyonunu tespit etmede daha üstün olabileceğini göstermektedir. Borofen biyosensörü teoride özellikle gaz tespiti için seçkin bir cihaz olmasına rağmen, gaz adsorpsiyonundan sonra azalan stabilite ve yüksek adsorpsiyon enerjileri nedeniyle düşük yeniden kullanılabilirlik, ele alınması gereken önemli konulardır. Dolayısıyla, borofen biyosensörlerin biyotıp alanındaki dönüşümünü gerçekleştirmek için sitotoksik etkileri, süreklilik kararlılığı, biyolojik dokularla yakın temas halinde etkileri vb. konuların açıklığa kavuşturulması için daha kapsamlı araştırmalar yapılması gerekecektir (Marco Tatullo et al., 2019). Ayrıca, borofen havaya maruz kaldığında kararsızdır; bu nedenle, metalik aletlerle reaksiyonlar (Inchingolo et al., 2011) veya sigara metabolitleri (M. Tatullo, Gentile, Paduano, Santacroce, & Marrelli, 2016) gibi olası dış reaksiyonları dikkate almak gerekir..

4.2.BNCT (Nötron Tedavisi)

Biyosensörlerin yanı sıra borofen, bor nötron yakalama terapisi (BNCT) (Chadha et al., 1998; Nakagawa & Hatanaka, 1997) gibi terapötik uygulamalarda da kullanılabilir. BNCT'de termal bir nötron, ^7Li ve ^4He partiküllerine ayrılan ^{10}B tarafından yakalanır. Bu iyonize partiküller yaklaşık 7-9 μm çapındadır ve tümör hücrelerine benzer boyuttadırlar. Bu partiküller serbest bırakıldıklarında sadece bir tümör bölgesinde seçici olarak birikmektedir ve aynı zamanda BT veya MRI ile görüntülediği gibi beyin yüzeyinden en derin gelişmiş lezyonlara da nüfuz ederler (Nakagawa & Hatanaka, 1997; Son et al., 2018). 1968'de termal nötron ışınları kanser tedavisi için $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$ (BSH) ile birleştirilmiştir. Nakagawa, 1963 ve 1991 yılları arasında farklı boyutlarda kötü huylu beyin tümörü olan 183 hastayı tedavi etmek için BCNT (Nakagawa et al., 2003) yöntemini

kullanmıştır. Sonuçlar, hastaların %15.7'sinin 5 yıldan uzun süre hayatta kaldığını ve tedaviyi takiben kanda az miktarda bor partikülü gözlemlendiğini göstermektedir. Ayrıca, BCNT'nin He ve Li partiküllerini kullanarak beyin tümör hücrelerini hedefleyebilmektedir. BT ve MRG kullanılarak, derin penetrasyon derinlikleri nedeniyle, tümörün yeri beyin yüzeyinden tespit edilebilmektedir (J. Coderre & Makar, 1992; J. A. Coderre et al., 1997). BNCT için daha arzu edilen ajanlar seçilerek, C₂B₁₀ küme kafes bileşikler aşıırı sitotoksisiteyi önlemek için hücre başına bor miktarının azaltılmasına yardımcı olmuştur. C₂B₁₀ kafeslerinin kanser tedavisindeki ana mekanizması, amino asitler (F.-f. Zhu et al., 2015), nükleik asit öncüleri (Tjarks, 2000), DNA (Tjarks, Ghaneolhosseini, Henssen, Malmquist, & Sjöberg, 1996) ve fototerapide kullanılan porfirinler (Bregadze, Sivaev, Gabel, & Wöhrle, 2001) gibi çeşitli moleküllerin bağlanması ve DNA'nın çoğaltılmasını veya mRNA'ya transkripsiyonunu bozmaktır. Bu bağlanma özelliklerinin hepsi kenar etkilerinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, C₂B₁₀ kümelerine ek olarak, az sayıda inceleme biyomedikal uygulamalarda saf 2D borofeni tanımlamıştır. Buna karşılık, bakteriyel direnç, biyo-görüntüleme ve ilaç dağıtımı dahil olmak üzere biyomedikal uygulamalarda grafen kullanımına ilişkin çok sayıda rapor yayınlanmıştır. Bu durum, yapı ve özelliklerdeki benzerliklerle borofenin yalnızca grafeninkine benzer uygulamalar için yararlı olmakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekte nanotıp uygulamalarının geliştirilmesi için yeni bir 2D nanomalzeme olabileceğini göstermektedir.

4.3.Fototermal ve Fotodinamik Tedavi

Bir nanomateryalin fototermal etkisi, termal enerjiyi serbest bırakan nanopartiküller tarafından emilen elektromanyetik uyarım ile temsil edilir. Bu yapılar, foto emicilerin yakın kızılötesi (NIR) lazer ışınlanmasının kanser hücrelerinin termal ablasyonu için ısı ürettiği kanser için fototermal tedavide yaygın olarak kullanılmaktadır. Son

zamanlarda, grafen oksit (GO) (Lim, Kim, Kim, Ahrberg, & Chung, 2018), Au nanopartikülleri (Doremus, 1964) ve siyah fosforun (W. Chen et al., 2016) arzu edilen absorpsiyon piklerine sahip olduğu ve bu nedenle kanser tedavisinde kullanılmak üzere yeni 2D fototermal ajanlar olarak potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir. Borofen, düzlem içi yönden (yaklaşık 3.65 eV ve 10.36 eV) zig-zag yönüne (~ 1.09 , 8.29 ve 10.31 eV'de gözlenen absorpsiyon pikleri) kadar bir dizi absorpsiyon bölgesine sahiptir (Peng et al., 2016). Dolayısıyla borofen, spektrumun NIR ucunda yer alan ışık emme özelliklerine sahiptir ve bu da fototermal terapi için daha yakından araştırılması gereken potansiyel bir kabiliyete sahip olduğunu düşündürmektedir. Fotodinamik etkiyi kullanarak tedavi, belirli ışık dalga boylarına tepki veren nanopartiküller gibi fotosensitizerler tarafından tetiklenen bir dizi fotokimyasal reaksiyon yoluyla ilerler. Normalde fotosensitizerler, reaktif oksijen türleri (ROS) üreten bir lazer tarafından aydınlatıldığında yüksek enerjinin salınmasını gerektirir (Zou et al., 2016). Bu nedenle, NIR veya UV bölgesi gibi yüksek bir ışık absorpsiyon aralığı gereklidir. Yukarıda tartışıldığı gibi borofenin soğurma bölgesi, düzlem içi yönde 100 mm'den 800 mm'ye kadar geniş bir aralığa sahiptir ve yüksek enerjili radyasyon soğurma kabiliyetini temsil eder (Duo et al., 2021). Borofenin katmanlar arası mesafesi 2.6 Å (Omidvar, 2017) olup, siyah fosforun (5.24 Å) yarısı kadardır, ancak borofenin reaktivite bölgeleri merkezden ziyade çoğunlukla kenarlarında olacaktır (Duo et al., 2021). Bu durum borofenin bir ilaç taşıyıcısı olarak potansiyelini sınırlamaktadır, ancak kanser tedavisi için ROS üretimi açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, borofenin özellikleri şu ana kadar teoriktir ve fiziksel, kimyasal veya biyolojik özelliklerinin incelendiği veya kanser tedavisinde uygulandığı çok az çalışma yayınlanmıştır ve bu nedenle bu daha fazla gelişme gerektirir.

4.4.Görüntü Rehberliğinde Terapi Kullanan Teranostikler

Teranostikler, eşzamanlı görüntüleme rehberliğinde tedaviye ek olarak hastalık teşhisi ve terapötiklere imkan sağlayan teşhis ile terapötik işlevlerin kombinasyonunu kapsar. Borofen, terapötik fototermal (PTT) ve tümör öldürücü fotodinamik (PDT) özelliklerine ek olarak görüntüleme için floresan ve fotoakustik (PA) kontrastı nedeniyle umut verici bir teranostik malzemedir (Mannix et al., 2015). Borofen, sınırlı sentetik adımlarla yüzey modifikasyonu veya kargo yüklemesi kullanılarak çoklu, çeşitli işlevselliklerle işlevselleştirilir. Floroforlar, in vitro veya in vivo floresan görüntüleme için borofen yüzeyine bağlanabilir veya yüklenebilir. Altın nanopartikülleri sistemin PTT etkinliğini artırabilir ve SERS aracılığıyla Raman biyo-deteksiyonuna olanak sağlayabilir. Buna ek olarak, borofen üzerine eklendiğinde demir oksit nanopartikülleri, nanopartikül dağılımının MRI yoluyla görüntülenmesine izin verir (Yuan et al., 2018). Görüntüleme verileri, alım yolları ve hücresel lokalizasyon dahil olmak üzere borofen bazlı nanosistemlerin biyoaktivitesinin izlenmesine izin verir. Bu veriler, azaltılmış yan etkilerle malign hücrelerin hassas bir şekilde yok edilmesi için tümörleri tam olarak belirleyebilmektedir. Erogbogbo ve arkadaşları, hastalığa özgü tanı ve tedaviyi iyileştirmek için biyobelirteç keşfini rasyonel olarak tasarlanmış nano-silikona entegre etmiştir (Karmodak & Jemmis, 2018). Borofen bazlı tanı rehberli tedavi bu nedenle biyotıp alanında potansiyel taşımaktadır.

4.5.İlaç Dağıtımı

Kemoterapötik ilaçların lokalize salınımı, kemoterapinin yan etkilerini azaltmanın anahtarıdır. Bu nedenle, akıllı bir tümör mikroçevresi yanıtı ilaç salım platformu tasarlamak özellikle önemlidir. Borofenin ultra yüksek spesifik yüzey alanı, ilaç yüklemesi için alan ve fonksiyonel grup modifikasyonu için bağlantı noktaları sağlar, bu da onu anti-kanser tedavisinin birçok yönü için

uygun bir malzeme haline getirir (Ou et al., 2021). Borofen bazlı bir ilaç salım sisteminde, doksorubisin (DOX) borofen ile inkübe edilmiş (yükleme oranı: %114) ve kemoterapötik ilaçların vücutta uzun süreli dolaşımını sağlamak için sistem PEG-NH₂ ile kaplanmıştır. PEG'in başarılı bir şekilde modifiye edildiğini ve DOX'un yüklendiğini göstermiştir (Ji et al., 2018). Bir ilaç taşıyıcısı olarak borofen iyi pH ve fototermal duyarlılık göstermiştir. DOX'un pH 7.4 ve pH 5.0'da borofen tarafından salınım oranları sırasıyla %8.3 ve %24 olmuştur. Tümör mikro çevresinin pH'ı normal dokununkinden daha düşüktür, bu da borofenin ilacın tümörde hedeflenen salımını gerçekleştirmesini sağlar. Ayrıca borofen, Yakın İnfrared Spektroskopisi (NIR) yanıtı için de bir ilaç taşıyıcısıdır. Yukarıdaki koşullar altında, farklı pH gruplarına 5 dakikalık NIR aydınlatması uygulanmış, pH 7.4'teki ilaç salım oranı %41.4'e ve pH 5.0'daki %77.6'ya yükselmiştir.

Özetle, yüksek ilaç yükleme kapasitesine ve pH ve kızılötesi ikili tepkiye sahip borofen, kanserin hem teşhisi hem de tedavisi için umut verici bir entegre ilaç dağıtım platformudur.

5. GELECEK PERSPEKTİFLERİ ve SONUÇ

Borofen, hafif olması, iyi bir mekanik tokluğa sahip olması, mükemmel süper iletkenlik özellikleri ve elektronik ekipman ve biyotıp alanlarında uygulama potansiyelini artıran bir dizi

olağanüstü biyomedikal özellik dahil olmak üzere birçok büyüleyici özelliğe sahiptir. Borofenin (2 boyutlu bir malzeme) deneysel sentezinin başarılması bu alanda ilgi odağı olmuştur.

Borofen farklı araştırma alanlarından büyük ilgi görmesine ve biyomedikal uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymasına rağmen, çok sayıda zorluk devam etmektedir. İlk olarak, biyomedikal uygulamalarda borofenin geliştirilmesindeki yapısal sınırlamalar yeni 2D nanomedikallerin seçimini kısıtlamaktadır. Grafenin aksine borofen, elektrotlar ve süper iletkenlik için reaktifler gibi endüstriyel uygulamalarda daha yüksek performans sergilemektedir. Bununla birlikte, grafenle karşılaştırıldığında potansiyel biyomedikal uygulamaları, CoB_8 ve RuB_9 , IrB_9 , FeB_8 ve FeB_9 gibi metallerle koordinasyon kümelerinin oluşumu yoluyla yüksek reaktivitesi nedeniyle sınırlıdır ve bu tür metal merkezli bor kümelerinin insanlar için toksik olduğu kanıtlanmıştır. İkinci olarak, üretim sürecinde kullanılan toksik maddelerin de dikkate alınması gerekmektedir. Borofeni daha büyük miktarlarda sentezlemek için kimyasal eksfoliyasyon yöntemleri ilk tercih olacaktır. Aşındırma için kullanılan hidroklorik asit ve toksik öncüller biyomedikal uygulamalarda kullanımını sınırlayabilir. Elektron ışını buharlaştırması öncüllerin kullanılmasını önleyebilse de, bu sadece laboratuvarlar için uygundur ve yüksek bir maliyeti vardır. Üçüncü olarak, borofen sentez yöntemlerinin çoğu teorik kalmaktadır. Daha önce açıklandığı gibi HH yoğunluğunun ve düzeninin kontrolü, hem mekanik hem de kimyasal özellikleri büyük ölçüde etkileyebilir, ancak borofenin özelliklerini optimize etmek için nasıl kontrol edilebilecekleri gelişmemiştir. Dördüncü olarak, borofenin öngörülen çeşitli özellikleri teorik modellerin kullanımından ziyade deneysel olarak doğrulanmalıdır. Teorik modeller tahmin doğruluğu açısından önemli ölçüde ilerlemiş olsa da, biyomedikal uygulamalar için daha fazla araştırılmalıdır. Örneğin, borofenin kenarındaki elektriksel özellikler, bir ilaç molekülünün polar bölgelerini

elektronik aktivite yoluyla kontrol edilen salınımla bağlayarak ilaç dağıtımı için kullanılabilir. Son olarak, borofenin kenar etkilerine odaklanmak önemli bir ilerleme sağlayacaktır, çünkü biyomedikal uygulamalara yönelik özelliklerin çoğu kenar etkilerine dayanmaktadır.

Gelecekteki araştırmalar borofenin biyomedikal uygulamalarıyla ilgili potansiyel sorunları daha derinlemesine araştırmalıdır. Yerinde bir yaklaşım, öncelikle sendromik durumlar (Figliuzzi et al., 2016; Paduano et al., 2013) veya onkolojik durumlar (Giudice et al., 2018; Marco Tatullo et al., 2015) gibi çeşitli klinik durumları dikkate alması gereken protokolleri göz önünde bulundurmalıdır. Ayrıca, borofenin bu tür son teknoloji uygulamalarını hayata geçirmek için bilim insanlarının, özellikle borofenin biyolojik dokularla yakın temas halindeyken davranışına özel dikkat göstererek, borofenin dayanıklılığı ve sitotoksik etkileri üzerine daha derinlemesine çalışmalar yapması gerekecektir. Ayrıca, sigara metabolitleri (M. Tatullo et al., 2016) veya metalik aletler (Inchingolo et al., 2011) gibi harici maddelerle etkileşimler, klinik kullanımdan önce dikkatlice ve önleyici olarak değerlendirilmelidir. Sonuç olarak, borofen umut verici bir (biyo)materyaldir. Farklı şekillerde davranabildiği ve farklı fazlarda bulunabildiği, tıbbi cihazlar ve kişiselleştirilmiş biyotıp için heterojen olarak uygulanabilir farklı kimyasal ve fiziksel özellikler gösterdiği için biyomedikal malzemelerin “bukalemunu” olarak kabul edilebilir.

Kaynakça

- Ablikim, M., Achasov, M. N., Ai, X., Ambrose, D., Amoroso, A., An, F., . . . Ban, Y. (2018). Determination of the number of ψ (3686) events at BESIII. *Chinese Physics C*, 42(2), 023001.
- Boustani, I., Rubio, A., & Alonso, J. A. (1999). Ab initio study of B32 clusters: competition between spherical, quasiplanar and tubular isomers. *Chemical physics letters*, 311(1-2), 21-28.
- Bregadze, V. I., Sivaev, I. B., Gabel, D., & Wöhrle, D. (2001). Polyhedral boron derivatives of porphyrins and phthalocyanines. *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*, 5(11), 767-781.
- Cao, S., Low, J., Yu, J., & Jaroniec, M. (2015). Polymeric photocatalysts based on graphitic carbon nitride. *Adv Mater*, 27(13), 2150-2176. doi:10.1002/adma.201500033
- Chadha, M., Capala, J., Coderre, J. A., Elowitz, E. H., Iwai, J.-i., Joel, D. D., . . . Chanana, A. D. (1998). Boron neutron-capture therapy (BNCT) for glioblastoma multiforme (GBM) using the epithermal neutron beam at the Brookhaven National Laboratory. *International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics*, 40(4), 829-834.
- Chahal, S., Ranjan, P., Motlag, M., Yamijala, S., Late, D. J., Sadki, E. H. S., . . . Kumar, P. (2021). Borophene via Micromechanical Exfoliation. *Adv Mater*, 33(34), e2102039. doi:10.1002/adma.202102039
- Chen, C., Lv, H., Zhang, P., Zhuo, Z., Wang, Y., Ma, C., . . . Cheng, P. (2022). Synthesis of bilayer borophene. *Nature Chemistry*, 14(1), 25-31.
- Chen, L., Li, H., & Wee, A. T. (2009). Nonlocal chemical reactivity at organic-metal interfaces. *ACS Nano*, 3(11), 3684-3690. doi:10.1021/nn900811t
- Chen, L., Liu, C. C., Feng, B., He, X., Cheng, P., Ding, Z., . . . Wu, K. (2012). Evidence for Dirac fermions in a honeycomb lattice based on silicon. *Phys Rev Lett*, 109(5), 056804. doi:10.1103/PhysRevLett.109.056804

- Chen, W., Ouyang, J., Liu, H., Chen, M., Zeng, K., Sheng, J., . . . Li, J. (2016). Black phosphorus nanosheet-based drug delivery system for synergistic photodynamic/photothermal/chemotherapy of cancer. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 29(5).
- Cheng, C., Sun, J.-T., Liu, H., Fu, H.-X., Zhang, J., Chen, X.-R., & Meng, S. (2017). Suppressed superconductivity in substrate-supported β 12 borophene by tensile strain and electron doping. *2D Materials*, 4(2), 025032.
- Chhowalla, M., Shin, H. S., Eda, G., Li, L. J., Loh, K. P., & Zhang, H. (2013). The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nat Chem*, 5(4), 263-275. doi:10.1038/nchem.1589
- Choi, J. R., Yong, K. W., Choi, J. Y., Nilghaz, A., Lin, Y., Xu, J., & Lu, X. (2018). Black Phosphorus and its Biomedical Applications. *Theranostics*, 8(4), 1005-1026. doi:10.7150/thno.22573
- Cockcroft, D. W., Hoepfner, V. H., & Dolovich, J. (1982). Occupational asthma caused by cedar urea formaldehyde particle board. *Chest*, 82(1), 49-53. doi:10.1378/chest.82.1.49
- Coderre, J., & Makar, M. (1992). Radiobiology of boron neutron capture therapy: problems with the concept of relative biological effectiveness. In *Progress in neutron capture therapy for cancer* (pp. 435-437): Springer.
- Coderre, J. A., Elowitz, E. H., Chadha, M., Bergland, R., Capala, J., Joel, D. D., . . . Chanana, A. D. (1997). Boron neutron capture therapy for glioblastoma multiforme using p-boronophenylalanine and epithermal neutrons: Trial design and early clinical results. *Journal of neuro-oncology*, 33, 141-152.
- Cuxart, M. G., Seufert, K., Chesnyak, V., Waqas, W. A., Robert, A., Bocquet, M.-L., . . . Auwärter, W. (2021). Borophenes made easy. *Science Advances*, 7(45), eabk1490.
- Dean, C. R., Young, A. F., Meric, I., Lee, C., Wang, L., Sorgenfrei, S., . . . Hone, J. (2010). Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics. *Nat Nanotechnol*, 5(10), 722-726. doi:10.1038/nnano.2010.172

- Ding, X., Peng, F., Zhou, J., Gong, W., Slaven, G., Loh, K. P., . . . Leong, D. T. (2019). Defect engineered bioactive transition metals dichalcogenides quantum dots. *Nat Commun*, 10(1), 41. doi:10.1038/s41467-018-07835-1
- Doremus, R. H. (1964). Optical properties of small gold particles. *The Journal of Chemical Physics*, 40(8), 2389-2396.
- Du, Y., Tang, F., Wang, D., Sheng, L., Kan, E.-j., Duan, C.-G., . . . Wan, X. (2017). CaTe: a new topological node-line and Dirac semimetal. *npj Quantum Materials*, 2(1), 3.
- Du, Y., Zhuang, J., Liu, H., Xu, X., Eilers, S., Wu, K., . . . Dou, S. X. (2014). Tuning the band gap in silicene by oxidation. *ACS Nano*, 8(10), 10019-10025. doi:10.1021/nn504451t
- Duo, Y., Xie, Z., Wang, L., Mahmood Abbasi, N., Yang, T., Li, Z., . . . Zhang, H. (2021). Borophene-based biomedical applications: Status and future challenges. *Coordination Chemistry Reviews*, 427, 213549. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213549>
- Eknapakul, T., Fongkaew, I., Siriroj, S., Vidyasagar, R., Denlinger, J., Bawden, L., . . . Limpijumnong, S. (2016). Nearly-free-electron system of monolayer Na on the surface of single-crystal HfSe 2. *Physical review B*, 94(20), 201121.
- Eremets, M. I., Struzhkin, V. V., Mao, H., & Hemley, R. J. (2001). Superconductivity in boron. *Science*, 293(5528), 272-274. doi:10.1126/science.1062286
- Evans, M. H., Joannopoulos, J., & Pantelides, S. T. (2005). Electronic and mechanical properties of planar and tubular boron structures. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 72(4), 045434.
- Feng, B., Sugino, O., Liu, R. Y., Zhang, J., Yukawa, R., Kawamura, M., . . . Matsuda, I. (2017). Dirac Fermions in Borophene. *Phys Rev Lett*, 118(9), 096401. doi:10.1103/PhysRevLett.118.096401
- Feng, B., Zhang, J., Zhong, Q., Li, W., Li, S., Li, H., . . . Wu, K. (2016). Experimental realization of two-dimensional boron sheets. *Nat Chem*, 8(6), 563-568. doi:10.1038/nchem.2491
- Feng, B., Zhang, J., Zhong, Q., Li, W., Li, S., Li, H., . . . Wu, K. (2016). Experimental realization of two-dimensional boron sheets. *Nature Chemistry*, 8(6), 563-568.

- Feng, M., Zhao, J., Huang, T., Zhu, X., & Petek, H. (2011). The electronic properties of superatom states of hollow molecules. *Acc Chem Res*, 44(5), 360-368. doi:10.1021/ar1001445
- Figliuzzi, M. M., Giudice, A., Pileggi, S., Pacifico, D., Marrelli, M., Tatullo, M., & Fortunato, L. (2016). Implant-Prosthetic Rehabilitation in Bilateral Agenesis of Maxillary Lateral Incisors with a Mini Split Crest. *Case Rep Dent*, 2016, 3591321. doi:10.1155/2016/3591321
- Forte, G., La Magna, A., Deretzis, I., & Pucci, R. (2009). Ab Initio Prediction of Boron Compounds Arising from Borozene: Structural and Electronic Properties. *Nanoscale Res Lett*, 5(1), 158-163. doi:10.1007/s11671-009-9458-8
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nat Mater*, 6(3), 183-191. doi:10.1038/nmat1849
- Giudice, A., Bennardo, F., Barone, S., Antonelli, A., Figliuzzi, M. M., & Fortunato, L. (2018). Can Autofluorescence Guide Surgeons in the Treatment of Medication-Related Osteonecrosis of the Jaw? A Prospective Feasibility Study. *J Oral Maxillofac Surg*, 76(5), 982-995. doi:10.1016/j.joms.2017.10.024
- Hou, C., Tai, G., Hao, J., Sheng, L., Liu, B., & Wu, Z. (2020). Ultrastable crystalline semiconducting hydrogenated borophene. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(27), 10819-10825.
- Hsieh, T. H., Lin, H., Liu, J., Duan, W., Bansil, A., & Fu, L. (2013). Correction: Corrigendum: Topological crystalline insulators in the SnTe material class. *Nature Communications*, 4(1), 1-1.
- Huang, C.-S., Murat, A., Babar, V., Montes, E., & Schwingenschlögl, U. (2018). Adsorption of the gas molecules NH₃, NO, NO₂, and CO on borophene. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(26), 14665-14670.
- Huang, X., Qi, X., Boey, F., & Zhang, H. (2012). Graphene-based composites. *Chem Soc Rev*, 41(2), 666-686. doi:10.1039/c1cs15078b
- Huang, X., Yin, Z., Wu, S., Qi, X., He, Q., Zhang, Q., . . . Zhang, H. (2011). Graphene-based materials: synthesis,

- characterization, properties, and applications. *Small*, 7(14), 1876-1902. doi:10.1002/sml.201002009
- Huang, Y., Shirodkar, S. N., & Yakobson, B. I. (2017). Two-Dimensional Boron Polymorphs for Visible Range Plasmonics: A First-Principles Exploration. *J Am Chem Soc*, 139(47), 17181-17185. doi:10.1021/jacs.7b10329
- Hwang, C., Siegel, D. A., Mo, S.-K., Regan, W., Ismach, A., Zhang, Y., . . . Lanzara, A. (2012). Fermi velocity engineering in graphene by substrate modification. *Scientific Reports*, 2(1), 590.
- Inchingolo, F., Tatullo, M., Abenavoli, F. M., Marrelli, M., Inchingolo, A. D., Palladino, A., . . . Dipalma, G. (2011). Oral piercing and oral diseases: a short time retrospective study. *Int J Med Sci*, 8(8), 649-652. doi:10.7150/ijms.8.649
- Ji, X., Kong, N., Wang, J., Li, W., Xiao, Y., Gan, S. T., . . . Xiong, Q. (2018). A novel top-down synthesis of ultrathin 2D boron nanosheets for multimodal imaging-guided cancer therapy. *Advanced Materials*, 30(36), 1803031.
- Karmodak, N., & Jemmis, E. D. (2018). Metal templates and boron sources controlling Borophene structures: An ab initio study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(4), 2268-2274.
- Kiraly, B., Liu, X., Wang, L., Zhang, Z., Mannix, A. J., Fisher, B. L., . . . Guisinger, N. P. (2019). Borophene synthesis on Au (111). *ACS Nano*, 13(4), 3816-3822.
- Kiraly, B., Liu, X., Wang, L., Zhang, Z., Mannix, A. J., Fisher, B. L., . . . Guisinger, N. P. (2019). Borophene Synthesis on Au(111). *ACS Nano*, 13, 3816.
- Kistanov, A. A., Cai, Y., Zhou, K., Srikanth, N., Dmitriev, S. V., & Zhang, Y. W. (2018). Exploring the charge localization and band gap opening of borophene: a first-principles study. *Nanoscale*, 10(3), 1403-1410. doi:10.1039/c7nr06537j
- Kong, L., Liu, L., Chen, L., Zhong, Q., Cheng, P., Li, H., . . . Wu, K. (2019). One-dimensional nearly free electron states in borophene. *Nanoscale*, 11(33), 15605-15611. doi:10.1039/c9nr03792f

- Kootenaei, A. S., & Ansari, G. (2016). B36 borophene as an electronic sensor for formaldehyde: quantum chemical analysis. *Physics Letters A*, 380(34), 2664-2668.
- Kortus, J., Mazin, I. I., Belashchenko, K. D., Antropov, V. P., & Boyer, L. L. (2001). Superconductivity of Metallic Boron in MgB2. *Phys. Rev. Lett.*, 86, 4656.
- Kou, L., Ma, Y., Zhou, L., Sun, Z., Gu, Y., Du, A., . . . Chen, C. (2016). High-mobility anisotropic transport in few-layer γ -B(28) films. *Nanoscale*, 8(48), 20111-20117. doi:10.1039/c6nr07271b
- Latorre, N., Silvestre, J. F., & Monteagudo, A. F. (2011). [Allergic contact dermatitis caused by formaldehyde and formaldehyde releasers]. *Actas Dermosifiliogr*, 102(2), 86-97. doi:10.1016/j.ad.2010.09.004
- Le, M. Q., Mortazavi, B., & Rabczuk, T. (2016). Mechanical properties of borophene films: a reactive molecular dynamics investigation. *Nanotechnology*, 27(44), 445709. doi:10.1088/0957-4484/27/44/445709
- Li, B. L., Li, R., Zou, H. L., Ariga, K., Li, N. B., & Leong, D. T. (2020). Engineered functionalized 2D nanoarchitectures for stimuli-responsive drug delivery. *Materials Horizons*, 7(2), 455-469.
- Li, B. L., Wang, J., Gao, Z. F., Shi, H., Zou, H. L., Ariga, K., & Leong, D. T. (2019). Ratiometric immunoassays built from synergistic photonic absorption of size-diverse semiconducting MoS 2 nanostructures. *Materials Horizons*, 6(3), 563-570.
- Li, D., Gao, J., Cheng, P., He, J., Yin, Y., Hu, Y., . . . Zhao, J. (2020). 2D boron sheets: structure, growth, and electronic and thermal transport properties. *Advanced Functional Materials*, 30(8), 1904349.
- Li, Q., Kolluru, V. S. C., Rahn, M. S., Schwenker, E., Li, S., Hennig, R. G., . . . Hersam, M. C. (2021). Synthesis of borophane polymorphs through hydrogenation of borophene. *Science*, 371(6534), 1143-1148.
- Li, W., Kong, L., Chen, C., Gou, J., Sheng, S., Zhang, W., . . . Wu, K. (2018). Experimental realization of honeycomb borophene. *Science Bulletin*, 63(5), 282-286.

- Lim, J. H., Kim, D. E., Kim, E.-J., Ahrberg, C. D., & Chung, B. G. (2018). Functional graphene oxide-based nanosheets for photothermal therapy. *Macromolecular Research*, 26(6), 557-565.
- Lin, H., Shi, H., Wang, Z., Mu, Y., Li, S., Zhao, J., . . . Liu, F. (2021). Scalable production of freestanding Few-layer β 12-borophene single crystalline sheets as efficient electrocatalysts for lithium–sulfur batteries. *ACS Nano*, 15(11), 17327-17336.
- Liu, B., & Zhou, K. (2019). Recent progress on graphene-analogous 2D nanomaterials: Properties, modeling and applications. *Progress in Materials Science*, 100, 99-169.
- Liu, G., Wang, H., Gao, Y., Zhou, J., & Wang, H. (2017). Anisotropic intrinsic lattice thermal conductivity of borophane from first-principles calculations. *Phys Chem Chem Phys*, 19(4), 2843-2849. doi:10.1039/c6cp07367k
- Liu, X., & Hersam, M. C. (2019). Borophene-graphene heterostructures. *Sci Adv*, 5(10), eaax6444. doi:10.1126/sciadv.aax6444
- Liu, X., Li, Q., Ruan, Q., Rahn, M. S., Yakobson, B. I., & Hersam, M. C. (2022). Borophene synthesis beyond the single-atomic-layer limit. *Nature materials*, 21(1), 35-40.
- Liu, X., Zhang, Z., Wang, L., Yakobson, B. I., & Hersam, M. C. (2018). Intermixing and periodic self-assembly of borophene line defects. *Nat Mater*, 17(9), 783-788. doi:10.1038/s41563-018-0134-1
- Liu, Y., Penev, E. S., & Yakobson, B. I. (2013). Probing the Synthesis of Two-Dimensional Boron by First-Principles Computations. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 52, 3156.
- Mannix, A. J., Zhou, X.-F., Kiraly, B., Wood, J. D., Alducin, D., Myers, B. D., . . . Guest, J. R. (2015). Synthesis of borophenes: Anisotropic, two-dimensional boron polymorphs. *Science*, 350(6267), 1513-1516.
- Mortazavi, B., Rahaman, O., Dianat, A., & Rabczuk, T. (2016). Mechanical responses of borophene sheets: a first-principles study. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(39), 27405-27413.

- Nakagawa, Y., & Hatanaka, H. (1997). Boron neutron capture therapy: clinical brain tumor studies. *Journal of neuro-oncology*, 33, 105-115.
- Nakagawa, Y., Pooh, K., Kobayashi, T., Kageji, T., Uyama, S., Matsumura, A., & Kumada, H. (2003). Clinical review of the Japanese experience with boron neutron capture therapy and a proposed strategy using epithermal neutron beams. *Journal of neuro-oncology*, 62, 87-99.
- Ni, Z., Liu, Q., Tang, K., Zheng, J., Zhou, J., Qin, R., . . . Lu, J. (2012). Tunable bandgap in silicene and germanene. *Nano Lett*, 12(1), 113-118. doi:10.1021/nl203065e
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., . . . Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666-669. doi:10.1126/science.1102896
- Omambac, K. M., Petrovic, M., Bampoulis, P., Brand, C., Kriegel, M. A., Dreher, P., . . . Valerius, P. (2021). Segregation-enhanced epitaxy of borophene on Ir (111) by thermal decomposition of borazine. *ACS Nano*, 15(4), 7421-7429.
- Omidvar, A. (2017). Borophene: a novel boron sheet with a hexagonal vacancy offering high sensitivity for hydrogen cyanide detection. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1115, 179-184.
- Ou, M., Wang, X., Yu, L., Liu, C., Tao, W., Ji, X., & Mei, L. (2021). The Emergence and Evolution of Borophene. *Advanced Science*, 8(12), 2001801. doi:<https://doi.org/10.1002/advs.202001801>
- Paduano, S., Uomo, R., Amato, M., Riccitiello, F., Simeone, M., & Valletta, R. (2013). Cyst-like periapical lesion healing in an orthodontic patient: a case report with five-year follow-up. *Giornale italiano di endodonzia*, 27(2), 95-104.
- Penev, E. S., Kutana, A., & Yakobson, B. I. (2016a). Can Two-Dimensional Boron Superconduct? *Nano Lett.*, 16, 2522.
- Penev, E. S., Kutana, A., & Yakobson, B. I. (2016b). Can Two-Dimensional Boron Superconduct? *Nano Lett*, 16(4), 2522-2526. doi:10.1021/acs.nanolett.6b00070
- Peng, B., Zhang, H., Shao, H., Xu, Y., Zhang, R., & Zhu, H. (2016). The electronic, optical, and thermodynamic

- properties of borophene from first-principles calculations. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(16), 3592-3598.
- Profeta, G., Calandra, M., & Mauri, F. (2012). Phonon-mediated superconductivity in graphene by lithium deposition. *Nature physics*, 8(2), 131-134.
- Qi, X.-L., & Zhang, S.-C. (2011). Topological insulators and superconductors. *Reviews of modern physics*, 83(4), 1057-1110.
- Qiu, M., Ren, W. X., Jeong, T., Won, M., Park, G. Y., Sang, D. K., . . . Kim, J. S. (2018). Omnipotent phosphorene: a next-generation, two-dimensional nanoplatform for multidisciplinary biomedical applications. *Chem Soc Rev*, 47(15), 5588-5601. doi:10.1039/c8cs00342d
- Radatović, B., Jadriško, V., Kamal, S., Kralj, M., Novko, D., Vujičić, N., & Petrović, M. Macroscopic single-phase monolayer borophene on arbitrary substrates, *ACS Appl Mater Interfaces* 14 (2022) 21727–21737. In.
- Rahman, A., Chowdhury, M. A., & Hossain, N. (2022). Green synthesis of hybrid nanoparticles for biomedical applications: A review. *Applied Surface Science Advances*, 11, 100296.
- Rahman, A., Chowdhury, M. A., Hossain, N., Rana, M., & Alam, M. J. (2022). A review of the tribological behavior of electrodeposited cobalt (Co) based composite coatings. *Composites Part C: Open Access*, 9, 100307.
- Rahman, A., Rahman, M. T., Chowdhury, M. A., Bin Ekram, S., Uddin, M. M. K., Islam, M. R., & Dong, L. (2023). Emerging 2D borophene: Synthesis, characterization, and sensing applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 359, 114468. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114468>
- Ranjan, P., Sahu, T. K., Bhushan, R., Yamijala, S. S., Late, D. J., Kumar, P., & Vinu, A. (2019). Freestanding borophene and its hybrids. *Advanced Materials*, 31(27), 1900353.
- Schabel, M. C., & Martins, J. L. (1992). Energetics of interplanar binding in graphite. *Physical review B*, 46(11), 7185.
- Shang, J., Ma, Y., Gu, Y., & Kou, L. (2018). Two dimensional boron nanosheets: synthesis, properties and applications.

- Phys Chem Chem Phys*, 20(46), 28964-28978.
doi:10.1039/c8cp04850a
- Shi, Z., Li, Q., & Mei, L. (2020). pH-Sensitive nanoscale materials as robust drug delivery systems for cancer therapy. *Chinese Chemical Letters*, 31(6), 1345-1356.
- Shukla, V., Warna, J., Jena, N. K., Grigoriev, A., & Ahuja, R. (2017). Toward the realization of 2D borophene based gas sensor. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(48), 26869-26876.
- Sielicki, K., Maślana, K., Chen, X., & Mijowska, E. (2022). Bottom up approach of metal assisted electrochemical exfoliation of boron towards borophene. *Scientific Reports*, 12(1), 15683.
- Silkin, V., Zhao, J., Guinea, F., Chulkov, E., Echenique, P., & Petek, H. (2009). Image potential states in graphene. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 80(12), 121408.
- Sobhan, A., Muthukumarappan, K., Wei, L., Qiao, Q., Rahman, M. T., & Ghimire, N. (2021). Development and characterization of a novel activated biochar-based polymer composite for biosensors. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 26(6), 544-560.
- Son, D., Kang, J., Vardoulis, O., Kim, Y., Matsuhisa, N., Oh, J. Y., . . . Liu, Y. (2018). An integrated self-healable electronic skin system fabricated via dynamic reconstruction of a nanostructured conducting network. *Nature nanotechnology*, 13(11), 1057-1065.
- Sun, Z., Fan, Q., Zhang, M., Liu, S., Tao, H., & Texter, J. (2019). Supercritical fluid-facilitated exfoliation and processing of 2D materials. *Advanced Science*, 6(18), 1901084.
- Sutter, P., & Sutter, E. (2021). Large-scale layer-by-layer synthesis of borophene on Ru (0001). *Chemistry of Materials*, 33(22), 8838-8843.
- Tai, G., Hu, T., Zhou, Y., Wang, X., Kong, J., Zeng, T., . . . Wang, Q. (2015). Synthesis of atomically thin boron films on copper foils. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(51), 15473-15477.

- Tang, H., & Ismail-Beigi, S. (2007). Novel Precursors for Boron Nanotubes: The Competition of Two-Center and Three-Center Bonding in Boron Sheets. *Phys. Rev. Lett.*, 99, 115501.
- Tao, W., Kong, N., Ji, X., Zhang, Y., Sharma, A., Ouyang, J., . . . Kim, J. S. (2019). Emerging two-dimensional monoelemental materials (Xenes) for biomedical applications. *Chem Soc Rev*, 48(11), 2891-2912. doi:10.1039/c8cs00823j
- Tatullo, M., Gentile, S., Paduano, F., Santacroce, L., & Marrelli, M. (2016). Crosstalk between oral and general health status in e-smokers. *Medicine (Baltimore)*, 95(49), e5589. doi:10.1097/md.0000000000005589
- Tatullo, M., Marrelli, M., Amantea, M., Paduano, F., Santacroce, L., Gentile, S., & Scacco, S. (2015). Bioimpedance detection of oral lichen planus used as preneoplastic model. *Journal of Cancer*, 6(10), 976.
- Tatullo, M., Zavan, B., Genovese, F., Codispoti, B., Makeeva, I., Rengo, S., . . . Spagnuolo, G. (2019). Borophene is a promising 2D allotropic material for biomedical devices. *Applied Sciences*, 9(17), 3446.
- Tjarks, W. (2000). The use of boron clusters in the rational design of boronated nucleosides for neutron capture therapy of cancer. *Journal of Organometallic Chemistry*, 614, 37-47.
- Tjarks, W., Ghaneolhosseini, H., Henssen, C. L., Malmquist, J., & Sjöberg, S. (1996). Synthesis of para-and nido-carboranyl phenanthridinium compounds for neutron capture therapy. *Tetrahedron letters*, 37(38), 6905-6908.
- Vinogradov, N. A., Lyalin, A., Taketsugu, T., Vinogradov, A. S., & Preobrajenski, A. (2019). Single-phase borophene on Ir (111): formation, structure, and decoupling from the support. *ACS Nano*, 13(12), 14511-14518.
- Wang, H., Li, Q., Gao, Y., Miao, F., Zhou, X.-F., & Wan, X. (2016). Strain effects on borophene: ideal strength, negative Poisson's ratio and phonon instability. *New Journal of Physics*, 18(7), 073016.
- Wang, Y., Kong, L., Chen, C., Cheng, P., Feng, B., Wu, K., & Chen, L. (2020). Realization of Regular-Mixed Quasi-1D

- Borophene Chains with Long-Range Order. *Advanced Materials*, 32(48), 2005128.
- Wang, Z., Lü, T. Y., Wang, H. Q., Feng, Y. P., & Zheng, J. C. (2016). High anisotropy of fully hydrogenated borophene. *Phys Chem Chem Phys*, 18(46), 31424-31430. doi:10.1039/c6cp06164h
- Wu, R., Eltinge, S., Drozdov, I. K., Gozar, A., Zahl, P., Sadowski, J. T., . . . Božović, I. (2022). Micrometre-scale single-crystalline borophene on a square-lattice Cu (100) surface. *Nature Chemistry*, 14(4), 377-383.
- Wu, X., Dai, J., Zhao, Y., Zhuo, Z., Yang, J., & Zeng, X. C. (2012). Two-dimensional boron monolayer sheets. *ACS Nano*, 6(8), 7443-7453. doi:10.1021/nm302696v
- Wu, Z., Tai, G., Liu, R., Shao, W., Hou, C., & Liang, X. (2022). Synthesis of borophene on quartz towards hydroelectric generators. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(15), 8218-8226.
- Xiao, H., Cao, W., Ouyang, T., Guo, S., He, C., & Zhong, J. (2017). Lattice thermal conductivity of borophene from first principle calculation. *Sci Rep*, 7, 45986. doi:10.1038/srep45986
- Xiao, R., Shao, D., Lu, W., Lv, H., Li, J., & Sun, Y. (2016). Enhanced superconductivity by strain and carrier-doping in borophene: A first principles prediction. *Applied Physics Letters*, 109(12).
- Xiao, R. C., Shao, D. F., Lu, W. J., Lv, H. Y., Li, J. Y., & Sun, Y. P. (2016). Enhanced Superconductivity by Strain and Carrier-Doping in Borophene: A First Principles Prediction. *Appl. Phys. Lett.*, 109, 122604.
- Xie, Z., Meng, X., Li, X., Liang, W., Huang, W., Chen, K., . . . Zhang, H. (2020). Two-Dimensional Borophene: Properties, Fabrication, and Promising Applications. *Research (Wash D C)*, 2020, 2624617. doi:10.34133/2020/2624617
- Xu, L. C., Du, A., & Kou, L. (2016). Hydrogenated borophene as a stable two-dimensional Dirac material with an ultrahigh Fermi velocity. *Phys Chem Chem Phys*, 18(39), 27284-27289. doi:10.1039/c6cp05405f

- Xu, S. Y., Belopolski, I., Alidoust, N., Neupane, M., Bian, G., Zhang, C., . . . Hasan, M. Z. (2015). TOPOLOGICAL MATTER. Discovery of a Weyl fermion semimetal and topological Fermi arcs. *Science*, 349(6248), 613-617. doi:10.1126/science.aaa9297
- Xue, M., Chen, G., Yang, H., Zhu, Y., Wang, D., He, J., & Cao, T. (2012). Superconductivity in potassium-doped few-layer graphene. *J Am Chem Soc*, 134(15), 6536-6539. doi:10.1021/ja3003217
- Yamanaka, A., & Okada, S. (2014). Electron injection into nearly free electron states of graphene nanoribbons under a lateral electric field. *Applied Physics Express*, 7(12), 125103.
- Yuan, H., Deng, L., Lv, B., Wu, Z., Yang, Z., Li, S., . . . Tian, F. (2018). Investigation on the reported superconductivity in intercalated black phosphorus. *Materials Today Physics*, 4, 7-11.
- Zhao, D., Cui, L., Cai, J., Guo, Y., Cui, X., Song, T., & Liu, Z. (2020). Palgraphyne: a promising 2D carbon Dirac semimetal with strong mechanical and electronic anisotropy. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 14(4), 1900670.
- Zhao, J., Feng, M., Yang, J., & Petek, H. (2009). The superatom states of fullerenes and their hybridization into the nearly free electron bands of fullerites. *ACS Nano*, 3(4), 853-864. doi:10.1021/nn800834k
- Zhou, H., Cai, Y., Zhang, G., & Zhang, Y.-W. (2017). Superior lattice thermal conductance of single-layer borophene. *npj 2D Materials and Applications*, 1(1), 14.
- Zhou, X.-F., Dong, X., Oganov, A. R., Zhu, Q., Tian, Y., & Wang, H.-T. (2014). Semimetallic two-dimensional boron allotrope with massless Dirac fermions. *Physical Review Letters*, 112(8), 085502.
- Zhou, Y.-P., & Jiang, J.-W. (2017). Molecular dynamics simulations for mechanical properties of borophene: parameterization of valence force field model and Stillinger-Weber potential. *Scientific Reports*, 7(1), 45516.

- Zhu, F.-f., Chen, W.-j., Xu, Y., Gao, C.-l., Guan, D.-d., Liu, C.-h., . . . Jia, J.-f. (2015). Epitaxial growth of two-dimensional stanene. *Nature materials*, 14(10), 1020-1025.
- Zhu, F. F., Chen, W. J., Xu, Y., Gao, C. L., Guan, D. D., Liu, C. H., . . . Jia, J. F. (2015). Epitaxial growth of two-dimensional stanene. *Nat Mater*, 14(10), 1020-1025. doi:10.1038/nmat4384
- Zou, L., Wang, H., He, B., Zeng, L., Tan, T., Cao, H., . . . Li, Y. (2016). Current approaches of photothermal therapy in treating cancer metastasis with nanotherapeutics. *Theranostics*, 6(6), 762.

BİLİMİN IŞIĞINDA BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİNDE YENİ GELİŞMELER

