

(Araştırma Makalesi)

Sağlıkta 3B Teknoloji ve Yapay Zekâ Uygulamaları: Güncel Durum, Eğitimsel Katkılar ve Geleceğe Yönelik PerspektiflerSemih ÖZ*¹, Burak Malik KAYA²¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, 26480, Eskişehir, ORCID No:<https://orcid.org/0000-0002-1543-2223>²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, 26480, Eskişehir, ORCID No:<https://orcid.org/0000-0002-1251-6915>**Anahtar Kelimeler:**3B Baskı Teknolojileri,
Yapay Zeka,
Dijital Sağlık,
Sağlık Eğitimi,
Tıp Teknolojileri

Özet: Son yıllarda sağlık sektöründe dijital dönüşümün hız kazanmasıyla birlikte, üç boyutlu (3B) baskı teknolojileri ve yapay zekâ (YZ) sistemleri sağlık uygulamalarında devrimsel bir değişimin önünü açmıştır. Bu teknolojiler hem klinik hizmetlerin etkinliğini artırmakta hem de sağlık eğitiminin niteliğini yeniden tanımlamaktadır. 3B yazıcılar; anatomi öğretimi, cerrahi planlama, protez ve implant üretimi ile biyoyazıcı tabanlı doku mühendisliği gibi birçok alanda kişiselleştirilmiş çözümler sunmaktadır. Yapay zekâ ise tıbbi görüntüleme, hastalık teşhisi, ilaç keşfi, hasta izleme ve bireyselleştirilmiş tedavi süreçlerinde önemli karar destek mekanizmaları geliştirmektedir. Eğitimsel bağlamda, bu iki teknolojinin entegrasyonu öğrencilerin öğrenme süreçlerini güçlendirmekte, soyut kavramların somutlaştırılmasını sağlamakta ve problem çözüme yetkinliğini artırmaktadır. Bu çalışma, 3B baskı teknolojisi ve YZ sistemlerinin sağlık alanındaki güncel kullanım alanlarını, eğitim kurumlarına entegrasyon yöntemlerini ve mesleki yeterlik gelişimi üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde incelemektedir. Bulgular, 3B baskı ve YZ tabanlı eğitim sistemlerinin öğrencilerin bilişsel performansını artırdığını, klinik uygulamalarda hata oranlarını azalttığını ve öğrenme motivasyonunu güçlendirdiğini göstermektedir. Ayrıca, bu teknolojilerin sağlık kurumlarında maliyet etkinliği sağladığı, üretim süreçlerini hızlandırdığı ve hasta güvenliği standartlarını yükselttiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, 3B yazıcı ve YZ teknolojilerinin etik, yasal ve ekonomik yönleri de sağlık sistemlerinin sürdürülebilir dijital dönüşümünü belirleyen kritik faktörler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle veri gizliliği, algoritmik önyargı, biyoyazıcı ürünlerin klinik kullanımı ve telif hakları gibi konular, geleceğe yönelik uygulamalarda düzenleyici çerçevelerin önemini artırmaktadır. Çalışmanın sonuçları, 3B baskı ve YZ tabanlı teknolojilerin sağlıkta sadece teknik bir yenilik değil, aynı zamanda pedagojik ve etik bir paradigma değişimi yarattığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, sağlık hizmetleri meslek yüksekokulları başta olmak üzere tüm eğitim kurumlarının, bu teknolojilerin potansiyelini stratejik planlarına dahil etmeleri ve disiplinler arası bir yaklaşımla dijital sağlık okuryazarlığını güçlendirmeleri önerilmektedir.

(Research Article)

3D Technology and Artificial Intelligence Applications in Healthcare: Current Status, Educational Contributions, and Future Perspectives**Keywords:**3D Printing Technologies
Artificial Intelligence
Digital Health
Health Education
Medical Technologies

Abstract: In recent years, the rapid acceleration of digital transformation in the healthcare sector has paved the way for a revolutionary shift through the introduction of three-dimensional (3D) printing technologies and artificial intelligence (AI) systems. These technologies not only enhance the efficiency of clinical services but also redefine the quality of healthcare education. 3D printers offer personalized solutions in numerous areas, including anatomy instruction, surgical planning, prosthesis and implant

production, and bioprinter-based tissue engineering. Artificial intelligence, on the other hand, develops crucial decision-support mechanisms in medical imaging, disease diagnosis, drug discovery, patient monitoring, and individualized treatment processes. In the educational context, the integration of these two technologies strengthens students' learning processes, facilitates the concretization of abstract concepts, and enhances problem-solving competencies. This study provides a comprehensive examination of the current applications of 3D printing technology and AI systems in the healthcare field, their methods of integration into educational institutions, and their effects on professional competency development. Findings indicate that 3D-printing- and AI-based educational systems improve students' cognitive performance, reduce error rates in clinical practices, and boost learning motivation. Furthermore, these technologies contribute to cost-effectiveness in healthcare institutions, accelerate production processes, and elevate patient safety standards. However, the ethical, legal, and economic dimensions of 3D printer and AI technologies emerge as critical factors that shape the sustainable digital transformation of healthcare systems. Issues such as data privacy, algorithmic bias, the clinical use of bioprinted products, and intellectual property rights highlight the increasing importance of regulatory frameworks in future applications. The results of this study reveal that 3D printing and AI-based technologies represent not only a technical innovation in healthcare but also a pedagogical and ethical paradigm shift. In this context, it is recommended that all educational institutions—particularly vocational schools of health services—incorporate the potential of these technologies into their strategic plans and strengthen digital health literacy through an interdisciplinary approach.

1. GİRİŞ

Dijital dönüşüm süreci, 21. yüzyılda sağlık hizmetlerinin yeniden tanımlanmasını gerektiren en önemli toplumsal ve teknolojik olgulardan biridir. Sağlıkta dijitalleşme, yalnızca elektronik sağlık kayıtlarının tutulmasından ibaret olmayıp, klinik karar destek sistemlerinden robotik cerrahiye kadar uzanan çok katmanlı bir ekosistem meydana getirmiştir (1,2). Özellikle sağlıkta yaygın olarak kullanılan optik tabanlı sensor sistemlerinin (3-9) yüksek maliyetli oluşu, donanımlı personel ihtiyacı, hassasiyet ve bakım süreçlerinin uzun zaman alması farklı bir platforma yönelim kapılarını açmıştır. Bu dönüşümün iki temel bileşeni olan 3B baskı teknolojileri ve yapay zekâ sistemleri hem hasta bakımının kalitesini hem de sağlık çalışanlarının mesleki yeterliliğini artırmada stratejik öneme sahiptir. Özellikle pandemi sonrası dönemde, sağlık eğitiminde dijital araçlara olan bağımlılığın artması bu teknolojilerin önemini daha görünür hâle getirmiştir (10).

3B baskı teknolojisi, dijital bir tasarımın katmanlı üretim prensibiyle fiziksel bir modele dönüştürülmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Sağlık alanında, hasta spesifik implantlar, protezler, cerrahi rehberler ve anatomi modelleri üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Eğitim kurumlarında ise, 3B baskı teknolojisi özellikle tıp, diş hekimliği, hemşirelik ve biyomedikal mühendisliği programlarında somut öğrenme materyali sunarak kavramsal öğrenmeyi güçlendirmektedir (11). Bu yönüyle 3B baskı hem klinik hem de eğitsel açıdan devrimsel bir araç konumuna gelmiştir.

Yapay zekâ (YZ), sağlıkta veri analitiği, öngörücü modelleme ve kişiselleştirilmiş tedavi planlaması alanlarında dönüşüm yaratmaktadır. Makine öğrenmesi, derin öğrenme ve doğal dil işleme gibi yöntemler; hastalık

tahmini, tanı doğruluğunun artırılması ve tedavi süreçlerinin optimize edilmesi için kullanılmaktadır (12). Sağlık eğitimi boyutunda ise YZ, öğrenci performansını analiz eden, bireysel öğrenme stillerine uyum sağlayan ve geri bildirim döngüsünü otomatikleştiren sistemlerle öğretim kalitesini artırmaktadır (13).

Türkiye'de sağlık hizmetleri meslek yüksekokulları (SHMYO), uygulamalı eğitim temelinde nitelikli sağlık teknikeri yetiştirmeyi amaçlamaktadır. Bu kurumlarda 3B baskı ve YZ tabanlı öğretim teknolojilerinin entegrasyonu hem öğrenme etkinliğini artırmakta hem de öğrencilerin gelecekteki dijital sağlık ekosistemine adaptasyonunu kolaylaştırmaktadır. Ancak bu entegrasyon süreci, altyapı, maliyet, öğretim üyesi yeterliliği ve etik farkındalık gibi çok boyutlu sorun alanlarını da beraberinde getirmektedir (14).

Kaya ve Aşıcı'nın çalışmasında, 3B baskı teknolojisinin optik sektöründeki uygulamaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polietilen tereftalat glikol (PETG) filamentleri kullanılarak üretilen gözlük çerçevelerinin yüzey pürüzlülüğü ve gerilme dayanıklılığı analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, 3B baskı teknolojisinin kişiselleştirilmiş tasarımlar sunma ve üretim süreçlerini optimize etme potansiyelini ortaya koymaktadır (3).

Sonuç olarak, 3B baskı ve YZ teknolojilerinin sağlık eğitimine entegrasyonu, yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda pedagojik bir paradigma değişimi anlamına gelmektedir. Bu makale, söz konusu teknolojilerin güncel durumunu, eğitsel katkılarını, karşılaşılan zorlukları ve geleceğe yönelik potansiyel etkilerini akademik bir çerçevede incelemeyi amaçlamaktadır.

2. SAĞLIK ALANINDA 3B TEKNOLOJİLERİN KULLANIM ALANLARI

Üç boyutlu (3B) baskı teknolojileri, son on yılda sağlık sektöründe dönüşüm yaratan yenilikçi araçlardan biri haline gelmiştir. Özellikle kişiselleştirilmiş tıp anlayışının gelişmesiyle birlikte, hasta odaklı üretim süreçlerinin önem kazanması 3B baskının klinik uygulamadaki rolünü artırmıştır. 3B yazıcılar; cerrahi planlama modelleri, protez ve implant üretimi, biyoyazıcılarla doku mühendisliği çalışmaları ve eğitim amaçlı anatomik modellerin üretilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (15). Bu teknoloji, karmaşık anatomik yapıların daha iyi anlaşılmasını sağlayarak cerrahi başarının artırılmasına önemli katkılar sunmaktadır.

Eğitim alanında 3B baskı teknolojileri, sağlık profesyoneli adaylarının teorik bilgilerini uygulama temelli öğrenme deneyimlerine dönüştürmelerini mümkün kılar. Özellikle anatomi ve fizyoloji gibi görsel yoğunluğu yüksek derslerde, öğrencilerin organ ve sistem modellerini fiziksel olarak inceleyebilmeleri soyut kavramların somutlaştırılmasını sağlar. Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulları (SHMYO) gibi uygulamalı eğitim kurumlarında, 3B yazıcılar sayesinde düşük maliyetli eğitim materyalleri üretilmekte; böylece laboratuvar altyapısına yapılan yatırımların verimliliği artmaktadır (16). Bu bağlamda, 3B teknolojiler sağlık eğitiminin dijital dönüşümünde kilit rol oynamaktadır.

Klinik uygulamalarda, 3B baskı teknolojisi hasta spesifik cerrahi planlamanın merkezinde yer almaktadır. Özellikle ortopedi, maksillofasial cerrahi, kardiyovasküler cerrahi ve diş hekimliği alanlarında hastaya özgü implant ve kılavuzların üretilmesi cerrahi doğruluğu artırmakta, operasyon süresini azaltmakta ve postoperatif komplikasyonları minimize etmektedir (17). Bununla birlikte, 3B baskı tekniklerinin biyoyumlu materyallerle entegrasyonu sayesinde biyomedikal mühendislik ile klinik pratik arasındaki sınırlar giderek azalmaktadır.

Araştırma alanında ise 3B biyoyazıcı teknolojileri, doku mühendisliği ve rejeneratif tıp çalışmalarının merkezine yerleşmiştir. Hücre bazlı 3B baskı teknikleriyle deri, kıkırdak, karaciğer dokusu ve vasküler yapılar gibi biyolojik sistemlerin laboratuvar ortamında üretimi üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır (18). Bu gelişmeler, uzun vadede organ nakli bekleme sürelerinin azaltılması ve kişiye özel tedavi stratejilerinin geliştirilmesi açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

Son olarak, 3B baskı teknolojilerinin etik ve yasal boyutları da sağlık alanındaki uygulamaların geleceğini şekillendiren önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Biyoyazıcılarla üretilen insan dokularının klinik kullanımını, veri güvenliği, telif hakkı ve hastaya özgü tasarımların mülkiyet hakları gibi konular tartışma konusu olmaya devam etmektedir (19). Bu nedenle, 3B teknolojilerin eğitim ve klinik ortamlarda sürdürülebilir şekilde kullanılabilmesi için etik farkındalık, standart oluşturma ve regülasyon süreçlerinin eşzamanlı olarak geliştirilmesi gerekmektedir.

3. SAĞLIK ALANINDA YAPAY ZEKA UYGULAMALARI

Yapay zekâ (YZ), sağlık sektörünün dijital dönüşüm sürecinde en güçlü itici güçlerden biri haline gelmiştir. Makine öğrenmesi (ML), derin öğrenme (DL) ve doğal dil işleme (NLP) gibi YZ alt alanları, hastalık teşhisi, tedavi planlaması, hasta izleme, ilaç keşfi ve sağlık yönetimi gibi farklı düzlemlerde kullanılmaktadır (2). Bu sistemler, büyük veri kümelerinden anlamlı bilgi çıkararak sağlık profesyonellerine karar destek sistemleri sunmakta ve klinik doğruluğu artırmaktadır. Özellikle görüntüleme tabanlı YZ algoritmaları, radyoloji ve patoloji alanlarında insan gözünün fark edemeyeceği mikro anomalileri tespit edebilme kapasitesiyle ön plana çıkmıştır. Yapay zekâ algoritmalarının geliştirilmesi sürecinde veri çeşitliliği, hassas hesaplama kapasitesi ve iyileştirilmesi ve geliştirilmesi açısından sunduğu fırsatlar görsel olarak Şekil 1'de özetlenmiştir.



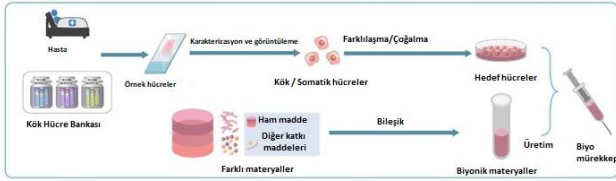
Şekil 1. Yapay zekâ algoritmalarının geliştirilmesine yönelik fırsatlar (20)

Eğitimsel açıdan YZ sistemleri, sağlık öğrencilerinin bireyselleştirilmiş öğrenme deneyimleri yaşamalarına olanak tanımaktadır. Akıllı öğrenme platformları, öğrencilerin öğrenme hızına ve hatalarına göre dinamik olarak adapte olan içerikler sunmakta, sanal hasta senaryoları ile klinik karar verme yetilerini geliştirmektedir (21). Özellikle simülasyon destekli tıp eğitiminde, YZ tabanlı modellerin öğrenci performansını ölçmesi ve geribildirim sağlaması, öğrenme döngüsünün etkinliğini artırmaktadır. Bu sayede, öğrenci değerlendirmesi yalnızca sınav puanlarına değil, davranışsal ve bilişsel analizlere dayalı çok boyutlu bir yapıya dönüşmektedir.

Klinik pratikte YZ uygulamaları, tanısal doğruluğu artırmakla kalmayıp, sağlık hizmetlerinin maliyet etkinliğini de iyileştirmektedir. Örneğin, YZ tabanlı görüntü analizi yazılımları, radyolojik değerlendirme sürelerini %30'a kadar azaltmakta; erken tanı konulabilmesini sağlamaktadır (22). Ayrıca elektronik sağlık kayıtlarının (EHR) otomatik analizinde kullanılan NLP algoritmaları, hastaların geçmiş verilerinden risk tahmini yaparak önleyici tıp uygulamalarına katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda YZ, sadece bir tanı aracı değil, aynı zamanda bir halk sağlığı yönetim sistemidir.

Kaliteye Göre Tasarım (Quality by Design, QbD) yaklaşımı çerçevesinde yapılandırılmış yapay zekâ destekli 3B biyoyazdırma sürecinin tüm aşamalarını bütüncül bir sistem olarak özetlemektedir. Süreç, hastadan alınan örnek hücrelerin karakterizasyonu ve görüntülenmesi ile başlamakta; bu hücreler kök veya

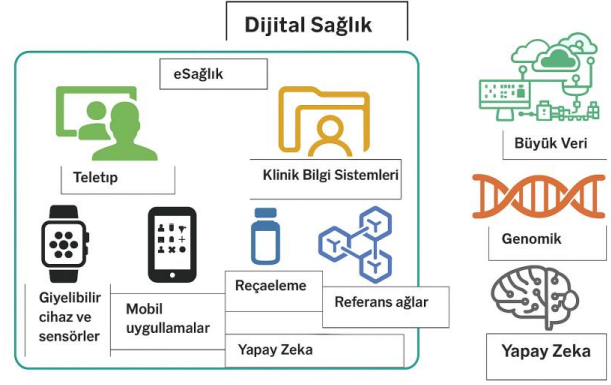
somatik hücreler olarak sınıflandırıldıktan sonra farklılaşma ve çoğalma aşamalarından geçirilerek hedef hücrelere dönüştürülmektedir. Eş zamanlı olarak, kök hücre bankasından sağlanan hücre kaynakları ile ham maddeler ve çeşitli katkı maddeleri bir araya getirilerek biyomürekkep üretiminde kullanılacak biyometrik materyaller elde edilmektedir. Bu aşamada biyomürekkep; hücresel içerik, biyomalzeme bileşimi ve fonksiyonel katkıları açısından QbD ilkelerine uygun şekilde ve yapay zekâ destekli veri odaklı optimizasyon ile tasarlanmaktadır. Ardından model yapılandırması ve baskı parametreleri, çok ölçekli ve çok modlu algılama sistemlerinden elde edilen veriler doğrultusunda yapay zekâ tarafından optimize edilerek hat içi süreç kontrolü sağlanmakta ve hedeflenen fonksiyonel özelliklere sahip biyoyapılar üretime aktarılmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, 3B biyoyazdırma sürecinde kalite, tekrarlanabilirlik ve klinik uygulamaya uyarlanabilirliğin sistematik olarak kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır. Kaliteye Göre Tasarım (QbD) yaklaşımı temelinde yapılandırılan yapay zekâ destekli 3B biyoyazdırma sürecinin tüm aşamaları Şekil 2’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. QbD yaklaşımı çerçevesinde yapay zekâ destekli 3B biyoyazdırma sürecinin; hücre kaynağı, biyomürekkep hazırlanması, baskı parametrelerinin optimizasyonu ve fonksiyonel biyoyapıların üretimini kapsayan şematik gösterimi. (23)

Araştırma alanında YZ, ilaç keşfi süreçlerini hızlandıran ve klinik deney verilerini optimize eden bir araç olarak öne çıkmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları, moleküler yapıların etkileşimlerini tahmin ederek yeni ilaç adaylarını belirlemekte ve klinik testlerin başarısını öngörmektedir (24). Bu gelişme, klasik deneysel süreçlerde yıllar sürebilecek keşiflerin aylar içinde gerçekleştirilmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca, genetik verilerin analiziyle kişiselleştirilmiş tedavi yaklaşımlarının tasarlanması da YZ’nin biyoinformatik alanındaki katkılarından biridir. Yapay zekâ uygulamalarının dijital sağlık ekosistemi içerisindeki çok boyutlu etkileşim alanları Şekil 3’te bütüncül bir yaklaşımla sunulmuştur.

Ancak YZ’nin sağlıkta yaygınlaşmasıyla birlikte veri gizliliği, algoritmik önyargı, etik karar verme süreçleri ve klinik sorumluluk sınırları gibi önemli sorunlar da gündeme gelmiştir. Örneğin, algoritmik kararların şeffaf olmaması veya eğitim verilerinin demografik dengesizlikler içermesi, klinik sonuçlarda yanlılık yaratabilmektedir (25). Bu nedenle, YZ uygulamalarının sağlıkta etik ve adil biçimde kullanımı için algoritmik hesap verebilirlik, insan denetimi ve veri anonimleştirme ilkeleri zorunlu hale gelmiştir.



Şekil 3. Yapay zekâ ve dijital sağlık (26)

4. EĞİTİMSEL, ETİK VE EKONOMİK BOYUTLAR

4.1. EĞİTİMSEL BOYUT

Sağlık eğitimi, doğası gereği teorik bilginin yanı sıra yoğun pratik beceri kazandırmayı amaçlayan uygulamalı bir disiplin yapısına sahiptir. Bu nedenle eğitim sürecinde kullanılan teknolojiler, öğrencilerin klinik yeterliliklerini doğrudan etkileyen faktörler arasındadır. Üç boyutlu (3B) baskı ve yapay zekâ (YZ) tabanlı sistemler, bu anlamda öğrenme ortamlarına yenilikçi katkılar sunmaktadır. 3B baskı teknolojisi, öğrencilerin karmaşık anatomik yapıları üç boyutlu biçimde incelemelerine imkân tanıyarak kavramsal öğrenmeyi somutlaştırır (27). Bu tür materyallerin kullanımı, özellikle anatomi, protez-ortez uygulamaları ve cerrahi planlama eğitimlerinde görsel öğrenmeyi desteklemekte, bilişsel yükü azaltmakta ve kalıcı öğrenmeyi teşvik etmektedir.

Bilgisayar ortamındaki veriler aracılığıyla, katman katman malzeme eklenerek üç boyutlu nesnelerin üretilmesi eklemeli üretim olarak adlandırılır. Günümüzde 3 boyutlu üretim, eklemeli üretim terimini de içerisinde barındırmakta ve hızlı prototipleme olarak da adlandırılmaktadır. Dijital veya konvansiyonel olarak alınan hasta ölçülerinden faydalanılarak çeşitli tedavilerin yapılmasına olanak veren bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknolojisi (CAD/CAM); diş hekimliği uygulamalarında önemli gelişmelerin önünü açmakta ve hasta bilgilerinin döküman edilebilir, saklanabilir ve iletilbilir verilere dönüşmesini sağlamaktadır. Eklemeli üretim; bilgisayar destekli tasarlanan (CAD) 3 boyutlu sanal model ve prototiplerin, bilgisayar destekli aşamalar ile üretimini gerçekleştirmektedir.

Diş hekimliğinde 3 boyutlu üretimde en sık kullanılan vinil polimer, poli (metil metakrilat-PMMA) vinildir. PMMA, akrilat ailesine ait amorf polimerlerden biridir. Oda sıcaklığında 100 °C ile 130 °C arasında cam geçiş sıcaklığına ve 1.20 g/cm³ yoğunluğa sahip berrak, renksiz bir polimerdir. Çok iyi bir termal kararlılığa sahiptir ve 100 °C’ye kadar yüksek ve -70 °C’ye kadar düşük sıcaklıklara dayandığı bilinmektedir. Aynı zamanda, 1.490 kırılma indeksi ile çok iyi optik özelliklere, yüksek

bir young modülüne ve düşük bir kırılma uzamasına sahiptir. Diş hekimliğinde geçici restorasyon üretiminde kullanılan foto polimerize rezinlere ait örnek bir uygulama Şekil 4'te gösterilmektedir. İşleme kolaylığı, kabul edilebilir mekanik özellikler, maliyet uygunluğu ve nispeten düşük toksisite özellikleri nedeniyle, PMMA, protez kaide materyali olarak kullanılmaktadır. 20. yüzyılın son yarısında, sadece protez kaide materyali olarak değil, obturatör, geçici kron-köprü yapımı ve çeşitli dental ve maksillofasiyal protezlerin yapımında kazanmıştır.



Şekil 4. Geçici restorasyon üretiminde kullanılan foto polimerize rezin (28)

YZ destekli eğitim sistemleri ise, öğrenci merkezli ve uyarlanabilir öğrenme deneyimlerinin önünü açmaktadır. Yapay zekâ algoritmaları, öğrencilerin öğrenme hızlarını, hatalarını ve güçlü yönlerini analiz ederek kişiselleştirilmiş bir öğretim planı sunabilir (29). Bu yaklaşım, geleneksel öğretim yöntemlerinde görülmeyen bir öğrenme esnekliği yaratır. Ayrıca YZ tabanlı sanal hastalar, öğrencilerin klinik karar verme süreçlerini güvenli bir sanal ortamda deneyimlemelerine olanak tanımaktadır (30). Bu durum, öğrencinin hasta üzerindeki uygulama öncesinde deneyim kazanmasını ve hata yapmadan öğrenmesini sağlar.

Eğitimsel boyutun önemli bir diğer unsuru, bu teknolojilerin öğretim elemanlarının rolünü dönüştürmesidir. Geleneksel bilgi aktarıcı rol, yerini rehberlik eden ve teknolojik arayüzleri yöneten öğretici konumuna bırakılmaktadır. 3B baskı laboratuvarlarında eğitimciler, öğrencilerin kendi modellerini üretmelerine olanak sağlayarak yaparak-öğrenme yaklaşımını desteklerken; YZ tabanlı değerlendirme sistemleriyle öğrencilerin sürekli geri bildirim almasını mümkün kılar. Böylece eğitim, statik bir bilgi aktarımı olmaktan çıkarak dinamik bir öğrenme döngüsüne dönüşür (14).

Sağlıkta 3B ve YZ entegrasyonunun eğitsel başarısı, disiplinler arası iş birliğine de bağlıdır. Tıp, mühendislik, bilişim ve tasarım alanlarının bir araya geldiği projeler, öğrencilere sistem düşüncesi kazandırmakta ve çok boyutlu problem çözme becerilerini geliştirmektedir. Bu sayede öğrenciler yalnızca klinik beceri değil, aynı

zamanda yenilikçilik ve teknoloji okuryazarlığı da kazanır (11). Bu tür uygulamalar, sağlık teknolojileri alanında mesleki adaptasyonun temelini oluşturur. Üç boyutlu yazdırma sürecinin tasarım, modelleme ve üretim aşamalarını içeren temel safhaları Şekil 5'te şematik olarak verilmiştir.

Sonuç olarak, 3B baskı ve YZ teknolojilerinin eğitimsel entegrasyonu, sadece öğrenme çıktıları artırarak kalmaz; öğrencinin eleştirel düşünme, yaratıcılık ve teknolojiye uyum becerilerini de geliştirir. Bu durum, gelecekteki sağlık profesyonellerinin dijital sağlık ekosisteminde daha donanımlı bireyler olarak yer almasına katkı sağlar.



Şekil 5. Tasarım aşamasında 3B yazdırma safhaları (31)

4.2. ETİK BOYUT

Sağlıkta dijital teknolojilerin yaygınlaşması, beraberinde önemli etik soruları gündeme getirmektedir. Özellikle YZ tabanlı karar destek sistemleri, algoritmik önyargı (bias), veri gizliliği ve şeffaflık gibi konularda tartışmaları artırmıştır (32). Öğrenme ortamlarında kullanılan YZ sistemleri, öğrencilerin performans verilerini analiz ederken kişisel bilgileri işleme tabidir. Bu nedenle veri güvenliğinin sağlanması ve gizlilik ilkelerinin korunması büyük önem taşır. Eğitim kurumlarının, bu tür teknolojileri kullanırken etik ilkeleri belirleyen yönergeler geliştirmesi gerekmektedir. Yapay zekâ uygulamalarının sağlık alanında yol açtığı temel etik zorluklar ve risk alanları Şekil 6'da görsel olarak sunulmaktadır.

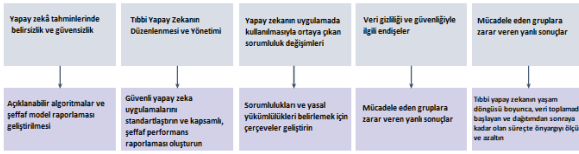
YZ'nin etik yönlerinden biri de algoritmik kararların doğruluğu ve adaletiyle ilgilidir. Eğitimde kullanılan değerlendirme algoritmaları, bazı öğrenci gruplarını istemeden dezavantajlı duruma sokabilecek önyargılar içerebilir. Bu durum, teknolojik tarafsızlık kavramını tartışmalı hâle getirmektedir (1,2). Dolayısıyla, insan denetiminin sistem içinde sürekli bir unsur olarak korunması gerekmektedir. Eğitimde insan öğreticinin etik ve pedagojik rehberliği, YZ'nin özerk karar alma eğilimlerinin önünde dengeleyici bir unsur olarak kalmalıdır.

3B baskı teknolojileri de etik açıdan incelendiğinde, biyolojik materyal üretimi bağlamında yeni sorun alanlarını gündeme getirmektedir. Özellikle biyobaskı (bioprinting) uygulamalarında canlı dokuların laboratuvar ortamında üretilmesi, organ nakli ve insan hakları çerçevesinde tartışılmaktadır (33). Bu teknolojilerin eğitimsel kullanımında etik sınırların açık biçimde

tanımlanması, gelecekte mesleki etik anlayışının da şekillenmesini sağlar.

Etik boyutun bir diğer yönü, teknolojik bağımlılıkla ilgilidir. Öğrencilerin YZ sistemlerine aşırı güven duyması, kendi eleştirel düşünme ve karar verme yeteneklerini zayıflatır. Bu durum insan faktörünün sağlık uygulamalarında geri planda kalmasına yol açabilir. Eğitim programlarında teknolojik farkındalıkla birlikte etik bilinç eğitiminin de verilmesi, bu riskleri azaltacaktır (13).

Sonuç olarak, 3B baskı ve YZ tabanlı uygulamaların eğitimde kullanımı kaçınılmaz bir gelişme olmakla birlikte, etik ilkelerden sapılmadan yürütülmesi gerekmektedir. Etik, teknolojinin hızına yetişebilen bir rehber olmalı; insan merkezli bir eğitim yaklaşımının temelini oluşturmalıdır.



Şekil 6. Tıpta yapay zekâ için etik zorluklar. (20)

4.3. EKONOMİK BOYUT

Sağlıkta 3B baskı ve YZ uygulamaları ekonomik açıdan hem fırsatlar hem de zorluklar barındırmaktadır. 3B yazıcı sistemlerinin donanım ve sarf malzeme maliyetleri başlangıçta yüksek görünse de uzun vadede eğitim kurumları için maliyet-etkin çözümler sunar. Özellikle açık kaynaklı 3B yazıcı modelleri ve geri dönüştürülebilir baskı malzemeleri sayesinde eğitim laboratuvarlarında sürdürülebilir üretim süreçleri oluşturmak mümkündür (34). Bu durum hem bütçe tasarrufu sağlar hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı verir.

YZ tabanlı sistemler açısından değerlendirildiğinde, eğitim kurumları için yazılım lisanslama ve veri depolama maliyetleri önemli bir gider kalemidir. Ancak bulut tabanlı yapay zekâ platformları sayesinde bu maliyetlerin zaman içinde azaldığı görülmektedir. Ayrıca, YZ destekli otomatik değerlendirme sistemleri, öğretim elemanlarının iş yükünü azaltarak eğitim maliyetlerini dolaylı biçimde düşürür (29). Dolayısıyla, bu teknolojiler uzun vadeli yatırım stratejileriyle değerlendirildiğinde ekonomik açıdan verimli bir dönüşüm potansiyeline sahiptir.

Sağlık kurumlarında 3B baskı teknolojilerinin kullanımı, medikal cihaz tedarik süreçlerini de kısaltmaktadır. Özelleştirilmiş protez ve implantların kurum içinde üretilmesi hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlamaktadır (35). Bu durum, eğitim kurumlarının da kendi 3B üretim altyapılarını kurmalarını ekonomik açıdan teşvik edici bir unsur hâline getirmiştir.

Ekonomik boyutun bir başka yönü, dijital eşitsizliktir. Gelişmiş eğitim kurumları bu teknolojilere hızla adapte olurken, kaynakları sınırlı kurumlar geride kalma riskiyle karşı karşıyadır. Bu durum, dijital sağlık eğitimi alanında

fırsat eşitsizliğine yol açabilir. Dolayısıyla devlet politikaları ve ulusal fon programları, bu teknolojilerin tabana yayılmasını desteklemelidir (14).

Sonuç olarak, ekonomik analizler göstermektedir ki 3B baskı ve YZ teknolojileri kısa vadede maliyetli görünse de uzun vadede verimlilik, hız ve özelleştirme olanakları sayesinde sağlık eğitimi ve hizmet sunumunda yüksek ekonomik getiriler sağlamaktadır.

5. GELECEĞE YÖNELİK PERSPEKTİFLER

Sağlıkta dijital dönüşümün geleceği, teknolojik yeniliklerin eğitim, klinik ve yönetim süreçlerine daha bütünleşik biçimde entegre edilmesine bağlıdır. 3B baskı ve YZ teknolojileri, bu dönüşümün öncü araçları olarak görülmektedir. Önümüzdeki yıllarda, sağlık meslek yükseköğretiminde bu teknolojilerin modüler biçimde müfredata dahil edilmesi ve öğrencilerin uygulamalı olarak deneyim kazanması beklenmektedir. Özellikle sanal laboratuvarlar ve artırılmış gerçeklik destekli 3B modeller, fiziksel sınırlamaları ortadan kaldırarak daha erişilebilir bir eğitim modeli sunacaktır (10).

YZ teknolojilerinin gelecekteki yönelimi, öngörücü analiz (predictive analytics) ve otomatik öğrenme sistemleri üzerine odaklanacaktır. Bu sistemler, öğrencilerin öğrenme süreçlerinden elde edilen büyük verileri analiz ederek bireysel eğitim profilleri oluşturacak ve öğretim sürecini dinamik olarak uyarlayacaktır (13). Böylelikle, öğrenme materyalleri öğrencinin bilişsel kapasitesiyle eş zamanlı olarak şekillenecektir. Bu yaklaşım, eğitimde hiper-kişiselleştirme (hyper-personalization) dönemini başlatabilir.

3B baskı teknolojilerinde ise biyoyazıcı sistemlerin daha erişilebilir hâle gelmesiyle, sağlık eğitimi biyoteknolojik boyut kazanacaktır. Öğrenciler yalnızca anatomik model değil, canlı hücre dokularını da üretme becerisi kazanacaklardır. Bu durum, sağlık meslek eğitiminde doku mühendisliği, organ nakli ve rejeneratif tıp alanlarının temel bileşen hâline gelmesini sağlayacaktır (25). Ayrıca, sürdürülebilir biyomalzeme kullanımı ile çevresel duyarlılık da artacaktır.

Gelecekte, 3B baskı ve YZ'nin entegrasyonu "akıllı laboratuvar" konseptini doğuracaktır. Bu laboratuvarlar, öğrenci davranışlarını analiz eden sensörlerle donatılmış, otomatik geri bildirim veren ve adaptif öğrenme sağlayan ortamlardan oluşacaktır. Bu sistemler, eğitim süreçlerinin hem pedagojik hem de ergonomik olarak optimize edilmesini mümkün kılacaktır (34). Böylece eğitim ortamları, yaşayan ve öğrenen ekosistemlere dönüşecektir.

Son olarak, bu teknolojilerin gelecekteki başarısı, öğretim üyelerinin dijital pedagojik yeterlilikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle öğretmen eğitimi programlarına YZ okuryazarlığı, dijital etik ve 3B tasarım modüllerinin entegre edilmesi gerekmektedir (14). Eğitim sisteminin bu dönüşüme uyum sağlayabilmesi, geleceğin dijital sağlık profesyonellerinin niteliğini belirleyecektir.

6. SONUÇ

Sağlıkta 3B baskı ve yapay zekâ teknolojilerinin yükselişi hem hizmet sunumunda hem de sağlık eğitimi paradigmasında devrimsel bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu teknolojiler, öğrenme süreçlerini daha etkileşimli, veri temelli ve öğrenci odaklı hâle getirerek geleneksel sağlık eğitiminin sınırlarını aşmaktadır. Bulgular, 3B baskı teknolojilerinin somut öğrenme ve klinik simülasyon becerilerini güçlendirdiğini; YZ sistemlerinin ise kişiselleştirilmiş öğrenme, hata analizi ve karar destek alanlarında önemli katkılar sağladığını göstermektedir.

Eğitimsel açıdan, bu teknolojiler öğrencilerin bilişsel ve psikomotor becerilerini bütüncül biçimde geliştirirken; etik açıdan, veri gizliliği ve insan denetimi gibi kavramların yeniden tanımlanmasını gerektirmektedir. Ekonomik olarak ise, uzun vadeli yatırım getirisi ve üretim verimliliği sayesinde sürdürülebilir bir dönüşüm sağlamaktadır.

Sonuç olarak, 3B baskı ve yapay zekâ teknolojilerinin sağlık eğitiminde sistematik biçimde uygulanması, dijital sağlık ekosisteminin geleceği açısından bir zorunluluk hâline gelmiştir. Bu dönüşüm, yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda insan merkezli, etik ve sürdürülebilir bir eğitim paradigmasının da başlangıcını temsil etmektedir.

Etik Hususlar

Etik kurallara uyum

Bu çalışmanın, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmanın hazırlık, veri toplama, eğitim ve bilgilerin sunumu üzere tüm aşamalarından bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımızı beyan ederiz.

Finansman

Bu proje Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenen FHD-2021-1768 kodlu projeden kısmen desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar, bu çalışmayla ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

- Topol, E. (2023). *The creative destruction of medicine: How digital health will transform learning and care*. Basic Books.
- Topol, E. (2023). The convergence of AI and digital medicine: Redefining healthcare systems. *The Lancet Digital Health*, 5(1), 1–9.
- Kaya, B. M., & Aşıcı, C. (2025). Analysis of surface roughness and strain durability of eyeglasses frames by the 3D printing technology. *ACS Omega*, 10(12), 12214–12223.
- Kaya, B. M. (2025). *Fiber halka döngü sönümleme spektroskopisi tekniğinin eğitimsel tanımı: Çalışma prensibi ve uygulama alanları*. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 37, 263–271.
- Kaya, B. M. (2024). A novel single mode fiber optic temperature sensor combined with the FLRDS technique. *Physica Scripta*, 99(9), 095405.
- Kaya, M. (2020). Fiber optic chemical sensors for water testing by using fiber loop ringdown spectroscopy technique. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 28, 2375–2387.
- BM Kaya, S Oz, O Esenturk, (2024) Application of fiber loop ringdown spectroscopy technique for a new approach to beta-amyloid monitoring for Alzheimer Disease's early detection. *Biomedical Physics & Engineering Express* 10 (3), 035037
- Herath, C., Wang, C., Kaya, M., & Chevalier, D. (2011). Fiber loop ringdown DNA and bacteria sensors. *Journal of Biomedical Optics*, 16(5), 050501–050501-3.
- Wang, C., Kaya, M., & Wang, C. (2012). Evanescent field–fiber loop ringdown glucose sensor. *Journal of Biomedical Optics*, 17(3), 037004–037004.
- Zhao, L., Chen, P., & Lin, X. (2024). Post-pandemic transformation of healthcare education through digital innovation. *Journal of Medical Internet Research*, 26(4), e54562.
- Attaran, M., & Celik, B. (2023). 3D printing in medical education: Current trends and pedagogical impacts. *Journal of Medical Systems*, 47(8), 122–139.
- Esteve, A., Topol, E. J., & Parikh, R. (2024). Deep learning in medical diagnosis: From theory to clinical impact. *Nature Medicine*, 30(1), 56–73.
- Rajpurkar, P., & Lungren, M. P. (2023). AI in healthcare education: Personalization, prediction, and performance. *The Lancet Digital Health*, 5(4), e289–e298.
- Ay, F. (2017) Öğretim Üyesinin Etik Sorumluluğu, Sağlık Bilimleri ve Meslekleri Dergisi 4(3):267-271
- Ventola, C. (2024). 3D printing applications in medicine and pharmacy: Current developments and future trends. *Pharmacy and Therapeutics*, 49(1), 24–38.
- Kibar A, Karademir Coşkun T, Karaçalı Taze H, (2023). *Sosyal Bilgiler Öğretmeni Perspektifinden 3B Yazıcıların Eğitimde Kullanımı*. Karadeniz Sosyal Bilimler Dergisi, 15, S. 29, s.465-489
- Martinez, P., Rossi, G., & Vella, M. (2024). Patient-specific 3D printed implants: A review of materials and surgical outcomes. *Biomedical Engineering Advances*, 15(2), 210–227.
- Li, C., Zhang, Y., & Ren, L. (2024). Advances in 3D bioprinting for regenerative medicine applications. *Biofabrication*, 16(3), 034002.
- Rahman, M., & Ahmed, S. (2023). Legal and ethical considerations of 3D bioprinting in medical

- contexts. *Journal of Health Law and Ethics*, 9(2), 67–82.
20. Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O., & Topol, E. J. (2022). AI in health and medicine. *Nature Medicine*, 28, 31–38.
 21. Zhou, H., Wang, D., & Lee, J. (2024). AI-driven adaptive learning platforms in medical education: Emerging evidence and implications. *Computers & Education*, 206, 104933.
 22. Huang, Y., Lin, S., & Zhao, Q. (2024). AI-based medical imaging systems and diagnostic efficiency in clinical practice. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 43(2), 115–128.
 23. Zhan, Z., Zhou, X., Fang, Y., Xiong, Z., & Zhang, T. (2025). AI-driven 3D bioprinting for regenerative medicine: From bench to bedside. *Bioactive Materials*, 45, 201–230.
 24. Jumper, J., Evans, R., & Hassabis, D. (2024). Deep learning in protein structure prediction and drug discovery. *Nature Biotechnology*, 42(1), 45–59.
 25. Miller, T., & Patel, S. (2023). Ethical frameworks for AI in healthcare: Balancing innovation and responsibility. *AI & Society*, 38(1), 89–104.
 26. Yorgancıoğlu, T., Pınar, Y. B., & Sebiki, N. B. (2024). Türkiye ve dünyada sağlık hizmetlerinde yapay zekâ. *Lokman Hekim Dergisi*, 14(1), 50–60.
 27. Foster, C., Lin, Y., & Huang, J. (2023). Immersive visualization technologies in anatomy education. *Anatomical Sciences Education*, 16(2), 223–238.
 28. Özay, M., & Sarıdağ, S. (2023). Diş hekimliğinde fotopolimerizasyon ile 3 boyutlu üretim yöntemleri ve kullanım alanları. *Selçuk Dental Journal*, 10(2), 479–485.
 29. Nguyen, K., Lee, J., & Park, H. (2024). Artificial intelligence-enhanced learning analytics in health sciences education. *Computers & Education*, 209, 104925.
 30. Haque, M. A., Islam, M., & Karim, S. (2023). AI-driven clinical simulations for nursing education. *Nurse Education Today*, 126, 105812.
 31. Demir, K., Demir, E. B., Çaka, C. K., Tuğtekin, U., İslamoğlu, H., & Kuzu, A. (2016). Üç boyutlu yazdırma teknolojilerinin eğitim alanında kullanımı: Türkiye’deki uygulamalar. *Ege Eğitim Dergisi*, 17(2), 481–503.
 32. Glikson, E., & Woolley, A. W. (2024). Human-AI collaboration and ethics in education. *Science*, 383(6674), 88–92.
 33. Miller, P., Zhou, H., & Nguyen, D. (2024). Bioprinting in regenerative medicine: Current advancements and future directions. *Biofabrication*, 16(1), 014002.
 34. Chen, L., Zhang, Y., & Wu, T. (2024). Cost efficiency and sustainability of additive manufacturing in healthcare training. *Computers in Industry*, 156(3), 104875.
 35. Ventola, C. L. (2023). 3D printing of medical devices: Opportunities, challenges, and regulation. *P&T Journal*, 48(2), 56–68.