

CERRAHİ UYGULAMALARDA MEDİKAL GÖRÜNTÜLEMENİN ÖNEMİ VE ÜÇ BOYUTLU ANATOMİK MODEL KULLANIMI

*Hakan Burçin ERDOĞUŞ** 

Alınma: 16.04.2018; düzeltme: 31.07.2019; kabul: 05.09.2019

Öz: Katmanlı üretim teknolojisi son yirmi yıl içerisinde endüstriyel devrim tanımıyla hayatımıza giriş yapmıştır. Geleneksel üretim yöntemiyle üstesinden gelinemeyen karmaşık geometriler, katmanlı üretim teknolojisi sayesinde rahatlıkla üretilmektedir. Üç boyutlu baskı olarak da tanımlanan bu teknoloji, her ne kadar bazı sınırlamalara sahip olsa da gelecek yıllar için sadece tasarım bakımından değil aynı zamanda üretim bakımından da önemli gelişmelere açıktır. Bu çalışmada; sağlık sektöründe tanı ve tedavi amacıyla kullanılan görselleştirme tekniklerinin önemine vurgu yapılarak, elde edilen iki boyutlu görsel verilerin işlenmesi sonrası üç boyutlu olarak üretilen modellerin faydalarından bahsedilmiştir. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki; cerrahi operasyon öncesinde planlamada, çeşitli biyomedikal araştırmalarda ve tıp öğrencilerinin eğitiminde üç boyutlu modeller büyük fayda sağlamaktadır. Üç boyutlu baskı teknolojisinin gelişmesiyle birlikte gelecek yıllarda üretim maliyetlerinin azalması, anatomik modelin daha hızlı yapılması ve organların doğrudan biyobaskı yoluyla üretilmesi gibi yeniliklerle medikal kullanım sahasının daha da genişlemesi beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı Üretim, 3B Yazdırma Teknolojileri, Medikal Görselleştirme, Biyobaskı Teknolojisi.

An Importance of Medical Imaging on Surgical Applications And Used Three Dimensional Anatomical Model

Abstract: Additive manufacturing technology has entered our life in the last twenty years with the definition of "industrial revolution". Complex geometries that can not be overcome by conventional manufacturing methods are easily produced by additive manufacturing technology. This technology, also referred to as three-dimensional printing, is open to significant developments not only in terms of design but also in terms of production for future years, even though it has some limitations. In this study; the benefits of models produced in three dimensions after the processing of two dimensional visual data obtained by emphasizing the importance of medical imaging techniques used for diagnosis and treatment in health sector are mentioned. Research has shown that; three-dimensional models are great benefit of planning before surgery, in biomedical research and in the education of medical students. The development of three-dimensional printing technology is expected that the field of medical use will expand further in the years to come with innovations such as reduction of production costs, faster anatomical modeling and direct bioprinting of organs.

Keywords: Additive Manufacturing, 3D Printing Technologies, Medical Imaging, Bioprinting Technologies

* Bursa Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Doktora Programı 152 Evler Mahallesi Eğitim Caddesi No:85
16330 Yıldırım/BURSA
İletişim Yazarı: Hakan Burçin ERDOĞUŞ (hakanberdogus@hotmail.com)

1. GİRİŞ

Üretim endüstrisinde yer alan teknolojiler kişisel ihtiyaçlara ve çağın gereksinimlerine göre gelişim göstermektedir. İnsanların merakı ve ilgisi, yaşam koşullarının farklılaşması ve ekonomik ihtiyaçlardan kaynaklanan endüstriyel devrimler nesnelerin interneti (IOT) ve katmanlı üretim teknolojisi (AM) ile birlikte dördüncü dönemini yaşamaktadır. Katmanlı üretim teknolojisi sayesinde, geleneksel yöntemlerle yapılması zor olan karmaşık içyapı tasarımları ve kişiye özel tasarlanmış parçalar rahatlıkla üretilebilir. Katmanlı üretim (Additive Manufacturing) veya üç boyutlu baskı (3D Printing) olarak adlandırılan bu teknoloji, geleneksel yöntemlerden farklı olarak üç boyutlu görsel verilerin özel yazılımlarla dilimlere bölünmesi ve hızlı prototipleme makineleri aracılığıyla bu dilimlerin katmanlar halinde inşa edilerek katı modelin oluşması esasına dayanmaktadır. Görsel verilerden katı model oluşturmak için, öncelikle modele ait görsel bilginin bilgisayar destekli çizim programlarında (CAD) tasarlanması veya üç boyutlu tarama (3D Scanner) sonrası görüntü verisinin işlenerek üretime hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Sağlık sektörü, görsel verinin en sık kullanıldığı alanlardan birisidir. Birçok patolojik bulgunun tanı aşamasında tespit edilmesine olanak sağlayan CT (Computer Tomography) ve MRI (Magnetic Resonance Imaging) teknikleri, medikal görüntü verisi oluşturmak için tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, görsel verilerin elde edilmesi ve çeşitli aşamalardan geçirilmesi sonrası üç boyutlu baskısı (3B Baskı) oluşturma adımları açıklanmıştır. Ayrıca, anatomik modelin cerrahi operasyon öncesi tanı uygulamaları ve hastaya özgü tedavi yöntemi belirlenmesi için sağladığı faydalardan bahsedilmiştir.

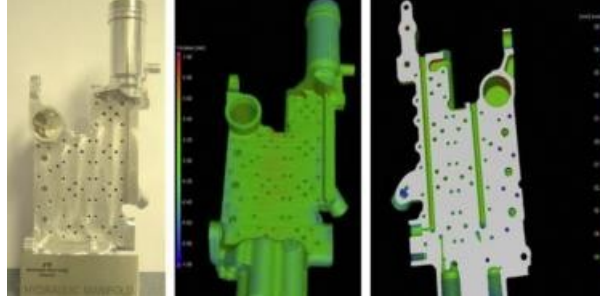
2. HIZLI PROTOTİPLEME VE ÜÇ BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİ

Otoinşa teknolojisi ilk kullanım yıllarında hızlı model veya prototip imalatı amacıyla geliştirilip kullanıldığından bu teknoloji zamanla “Autofabrication” (Otoinşa) veya “Rapid Prototyping” (Hızlı Prototipleme) adıyla anılmıştır. Hızlı prototipleme makineleri olarak adlandırılan üç boyutlu yazıcılarla; metal, plastik ve seramik gibi malzemelerden model yapılmaktadır. Hızlı prototipleme teknolojisi; otomotiv, uzay ve havacılık, mimari, ayakkabıcılık, kuyumculuk, eğitim ve medikal uygulamalar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Otoinşa veya hızlı prototipleme teknolojisinde üretilmesi düşünülen parça, öncelikle üç boyutlu tasarım programı ile bilgisayarda modellenir. Tasarıma sıfırdan başlanabileceği gibi var olan bir nesnenin üç boyutlu taranmasıyla elde edilen nokta bulutu verisinin işlenmesiyle de oluşturulabilir. Üç boyutlu model baskısı üretmek için, CT gibi medikal görüntüleme teknikleri veya görüntü analiz cihazlarından elde edilen STL verisi doğrudan prototip üretimi için kullanılabilir, buna ilave olarak özel yazılımlar sayesinde modelin destek yapıları, pozisyonu ve yazdırma tablasına göre konumu ayarlanabilir (Erdoğuş 2006, Gebhard ve Hötter 2016).

3. MEDİKAL GÖRÜNTÜDEN ÜÇ BOYUTLU MODEL OLUŞTURULMASI

Görselleştirme, verilerin veya bilgilerin resimlere dönüşmesiyle insanın görme gücünü kullanarak karşılaştırma yapmasına ve yorumlamasına imkân sağlamaktadır. Veri görselleştirme, finansal veriler ve ticari veriler gibi veri kümelerinin görsel hale getirilmesi esasına dayanmaktadır. Medikal alanda görselleştirilmiş veriler; tanı, tedavi ve cerrahi operasyon öncesinde sıklıkla kullanılmaktadır. İnsan vücuduna ait parçaların taranması sonucu görüntü verisinin elde edilmesini sağlayan birçok yöntem vardır. Bunun için kullanılan başlıca görselleştirme teknikleri CT ve MRI'dir. CT, endüstriyel uygulamalarda karmaşık geometriye sahip parçaların iç ve dış ölçümleri için kullanılan kalite kontrol yöntemlerinden birisidir. Geleneksel üretim yöntemleriyle yapılan parçalardan alınan

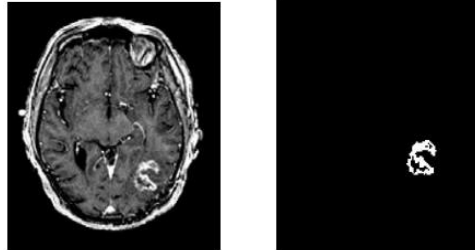
ölçümlerde ve katmanlı üretim yöntemiyle üretilen ve içyapısı hakkında çok az bilgi sahibi olunan karmaşık parçalara da CT ölçümleri uygulanmaktadır (Chiffre ve ark. 2014). Yarış arabası için üretilen bir hidrolik manifoldun CAD modeli ve iç-dış ölçümleri arasındaki karşılaştırma CT yardımıyla yapılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1:

Soldan sağa; Taranan manifold, iç ve dış kısım için karşılaştırılan nominal ölçüler (Chiffre,2014)

Başarılı bir üç boyutlu anatomik model oluşturmak için görselleştirme teknikleri doğru kullanılmalıdır. Anatomiden gelen görüntü ve oluşturulan model arasında düşük çözünürlükten kaynaklanan uyumsuzluk olasılığı nedeniyle, görsel verinin seçildiği bölge oldukça önemlidir. Bu sebeple, görüntü verisinin işlenmesi, uzmanların doğru tanıya ulaşabilmelerinde kritik rol oynamaktadır. CT ve MRI verilerinden üç boyutlu görsel oluşturmak için nesnelerin iç özellikleriyle ve yüzey etkileşimleriyle modellenmesi gerektiği belirlenmiştir. Herhangi bir anatomiden alınan CT kesitleri, hacim kaplama yöntemine göre bazı aşamalardan geçirilir ve görselleştirilmiş model oluşturulur (Dogan ve Altan 2003). Birbirinden bağımsız olarak elde edilen bu kesitler, görüntü bölümlene teknikleriyle ayrılıp çıkarılabilmektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi beyin tümörü uygulamasında, tümörün yüzey alanı belirlenirken dikkate alınmayan diğer bölgeler silinebilir. Şekil 3’de özel bir yazılımla hesaplanabilen tümörün yüzey alanı ve üç boyutlu hacim geometrisi görülmektedir.



Şekil 2:

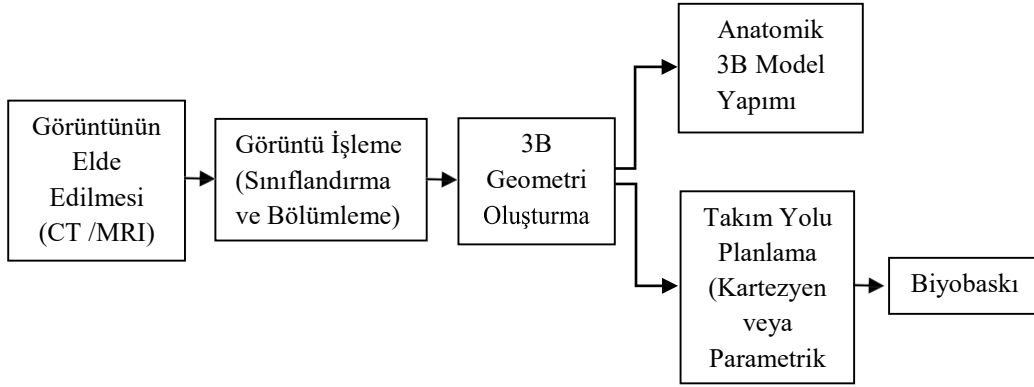
Beyin görüntüsüne ait olan aksenal kesit ve tümörün ayrılması (Dogan,2003)



Şekil 3:

Tümörün 3B modeli (Dogan,2003)

Görüntünün işlenmesi, hasta anatomisi ile ilgili verinin belirlenen önemli düzlemlerde kesitlere bölünmesi ve sınıflandırılması esasına dayanmaktadır (Şekil 4). Ancak, zor operasyonlarda tedaviyi yapacak olan cerrahi ekip, kesitler halinde alınan iki boyutlu görüntü verilerini yorumlamada güçlük çekmektedir. Radyoloji uzmanları, tecrübeleri sayesinde üç boyutlu görsel modeli hayal gücüyle oluştursa bile cerrahi operasyon ekibine tam manasıyla bunu aktaramamaktadır. Bu zorluğu gidermek adına iki boyutlu kesitler bir araya getirilerek hacimsel anatomik yapılar oluşturulur. CT'den alınan DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) formatındaki dijital görüntüler, üç boyutlu son işlem takımları (Visualization Toolkit) kullanılarak üç boyutlu örgü geometrisine (3D Mesh Geometry) dönüştürülür. Son aşamada, bu geometri yazıcıya gönderilmeden önce herhangi bir CAD yazılımı ile optimize edilebilir (Malik 2015, Ferry 2012, Üstünelan ve Erden 2009). Anatomik yapının baskıya hazır hale getirilen 3B geometrisi için, yapı iskeletini canlı dokudan oluşturmak amacıyla en uygun takım yolu örgüsü belirlenirse "Biyobaskı" olarak tanımlanan yapay organ üretimi gerçekleştirilebilir (Erdoğuş 2017).



Şekil 4:

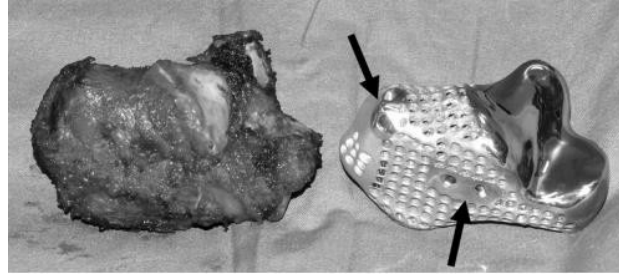
Üç boyutlu anatomik model üretim süreci (Erdoğuş, 2017)

4. TANI VE TEDAVİDE ÜÇ BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİ

Medikal alanda birçok farklı türden uygulamaya sahip olan üç boyutlu baskı teknolojileri; anatomik model üretimi, özel cerrahi aygıt tasarımı ve kişiye özel implant ya da protez yapımı olmak üzere üç konuya indirgenebilir. Tanı uygulaması için kullanılan medikal görüntüleme teknikleri, hasta anatomisindeki anormalliğin tespit edilmesi ve yorumlanmasında radyologlara önemli ölçüde yardımcı olmaktadır. Bu sebeple, medikal görüntünün anlaşılması için bilgisayar destekli tanı uygulaması başarıyla gerçekleştirilmelidir (Doi 2006).

Radyolojik görüntüden üç boyutlu model çıkarılması için iki önemli unsur vardır. Bunlardan birincisi, hasta anatomisindeki hassasiyet, ikincisi ise radyologların patolojik yapıya ait olan ve üç boyutlu model üretebilen veriyi oluşturabilmesidir (Mitsouras ve ark. 2015). Anatomik yapı özelliklerini içeren bu üç boyutlu "biyomodeller"; tanı, cerrahi operasyon planlama, simülasyon, sinir cerrahisi ve tıp eğitiminde kullanılmaktadır (Wurm 2004, Rozen ve ark. 2012). Cerrahi planlama yapılırken en uygun kararı vermeden önce; muhtemel risklerin hesaplanması, karmaşık anatomiye sahip bir yapının basitleştirilmesi ve anlaşılabilir hale getirilmesi operasyonun başarısı için gereklidir. Örneğin, omurdaki tümör lezyonu için yapılması gereken bir operasyon, cerrahlar için oldukça zordur. Üç boyutlu baskı teknolojisi çok iyi bir uygulama olarak bu tümörün görüntülenmesinde ve ortaya çıkmasında etkili olmuştur (Silva ve ark. 2007). Benzer şekilde üç boyutlu biyomodel, kalp cerrahisinde karmaşık patolojileri iyileştirmek için teorik ve pratik avantajlar sağlamaktadır. CT verileri kullanılarak oluşturulan abdominal atar damarın genişlemesine ait model, operasyon öncesi planlamaya destek olmuştur. Ana kalp

tümörünün konumu ve içeri sızma miktarı üç boyutlu model sayesinde daha anlaşılır hale gelmiştir. Hastaya özgü olan ve tahmin edilemeyen durumların oluşabildiği kalp-damar anatomilerinde operasyon öncesinde karar vermek ve planlama yapmak oldukça zordur. Çocuk ve yetişkin kalp-damar cerrahisi için yapılan bir çalışmada, aort daralması gibi anormallikler üç boyutlu model üzerinde rahatlıkla görülebilmekte ve böylece hastaya özgü bazı ön görülemeyen durumlar analiz edilebilmektedir (Schmauss ve ark 2013). Bir başka uygulamada cerrahlar, karmaşık aortik boyun morfolojisi anevrizması ile ilgili karar verirken hızlı prototipleme sayesinde üretilen üç boyutlu model kullanmışlardır (Schmauss ve ark 2015). 75 yaşında 6,6 cm iç aort anevrizmasına sahip bir hasta için CT verileri analiz edildiğinde müdahalenin yapılaş şekli ile ilgili bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Üç boyutlu üretilen model, boyun bölgesindeki hasarlı yerin onarılmasıyla ilgili kullanılacak olan en uygun cerrahi ekipmanın belirlenmesinde önemli rol oynamıştır (Tam ve ark. 2013). Karmaşık geometriye sahip tasarımları üretme kabiliyeti nedeniyle hızlı prototipleme teknolojisi sinir bilimi araştırmaları için de oldukça önemli olmuştur. Bu teknolojiyle üretilen 3B modelin düşük hata oranı ve yeniden üretilebilirliği sayesinde sinir cerrahisi için kullanımı giderek daha cazip hale gelmektedir. Aynı doğrultuda, hızlı prototipleme teknolojisi karmaşık modele sahip çok fonksiyonlu bir platform, sinirsel aktivitelere izin verecek şekilde üretebilme imkânı sağlamaktadır (Tek ve ark. 2008). Çocuklarda yapısal beyin anormallığı konusunda yapılan bir çalışmada, MR verilerinden oluşturulan üç boyutlu model üzerinden ventrikül hacimler hesaplanmıştır. Seçilen çocuklar arasından, normal beyin morfolojisine sahip olanlar ve anormal beyin yapısına sahip olanlar karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu görselleştirme ve hacimsel ölçümlerde morfolojik anormallikler detaylı olarak incelenmiştir. Bu sayede anormal ventriküler anatomi daha iyi kavranmıştır (Giesel ve ark. 2009). Katmanlı üretim teknolojisi aynı zamanda protez ve ortez uygulamalarına da yeni bakış açıları kazandırmıştır. Kâğıt üzerinde tasarlanan bir ortez AFO modeli, FDM yöntemiyle kişiye özel ve düşük maliyetle üretilmiştir (Aydın ve Küçük 2014). Şekil 5'te 71 yaşındaki bir hastanın sağ ayak topuğunda oluşan anormal lezyonun giderilmesi için yapılan titanyum topuk kemiği protezi görülmektedir (Imanishi ve Choong 2015). Bu protez, lateral radyografi yardımıyla başarılı bir operasyon sonucu yerine yerleştirilmiştir. (Şekil 6).



Şekil 5:

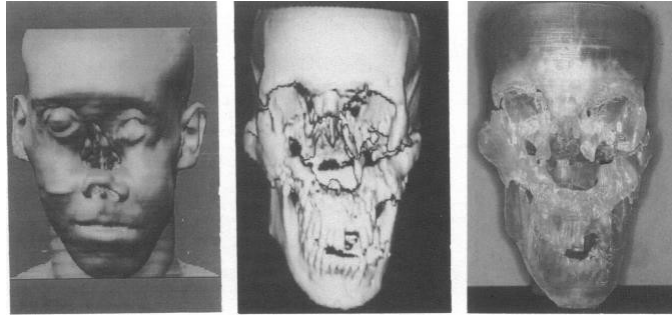
Solda hastadan çıkarılan topuk lezyonu ve üretilen titanyum protezin montaj yerleri okla gösterilmiştir (Imanishi ve Choong,2015)



Şekil 6:

Lateral radyografi yöntemi kullanılarak katmanlı üretim yöntemiyle üretilen topuğun yerine yerleştirilmesi (Imanishi ve Choong,2015)

Kemik cerrahisinde operasyon planlaması yapılırken, örneğin kürek kemiği ameliyatı için hazırlanan bir hasta için cerrahi operasyon öncesinde CT'den elde edilen görselleştirme verisi üç boyutlu yazıcıda kopya modele dönüştürülmüştür. Bu sayede cerrahlar, üç boyutlu kürek kemiği kopyası üzerinden hasta için fonksiyonel ve estetik açıdan en uygun sonucu veren düzeltme ve osteonomik müdahaleyi prova etmiş olmaktadır. Hastanın anesteziye maruz kalma süresinin azalması, kan kaybının düşmesi ve daha az yarayla operasyonun gerçekleşmiş olması bu yöntemin en önemli faydaları arasında yer almaktadır (Marro ve ark. 2015). Trafik kazası geçirmiş ve çene kemiği hasara uğramış olan bir hastaya yapılacak cerrahi müdahalede, alt ve üst çene kemiklerinin doğru konumlandırılması hedeflenmiştir (McGurk ve ark. 1997). SLS katmanlı üretim teknolojisi sayesinde oluşturulan üç boyutlu modelin, anatomik deformasyon ile bire bir uyumlu olması nedeniyle çene kemikleri aslına uygun olarak doğru yerleştirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7:

Soldan sağa doğru; hasarlı bölgenin yumuşak doku MRI görüntüsü, sert kemik dokusu CT görüntüsü ve SLS 3B baskı modeli (McGurk, 1997)

Cerrahlar, üç boyutlu osteonom model sayesinde operasyonu gerçekleştirecekleri alandan haberdar olurken, tahmin edilemeyen bazı cerrahi olumsuzlukların önüne geçmiş olurlar (Hammoudeh ve ark. 2015). Çene ve yüz kemiği cerrahisinde; titanyum malzemeden yapılan bir köprünün bazı parçaları, zamanla çene dokusunda ve çevresinde hasar oluşturmaktadır. Bunların %50'den fazlası; vida kırılması, vida kaybı veya kilitleme plakasında enfeksiyon oluşması gibi mekanik hasarlardır. Bu sorunu gidermek adına, üç boyutlu baskı teknolojisiyle yapılan kilitleme plakası tercih edilmiştir. Bu sayede, yüksek ölçüsel hassasiyet sağlanmıştır, ayrıca uygun simetride yeniden üretilen kilitleme plakası, çeneye başarıyla yerleştirilmiştir (Cohen ve ark.

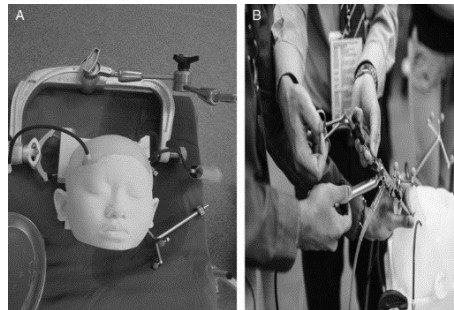


Şekil 8:
3B görsel veri ve 3B baskı model (Rengier,2010)

2009). Medikal görüntüleme sayesinde, CT ve MRI verisi işlenerek hastaya özgü implant yapımına uygun olan şablonlar hazırlanabilmektedir (Ballyns ve Bonassar 2009). Örneğin; göz çukurundaki hasarlı bölge için üretilmesi planlanan bir implantın ölçüleri, CT görüntü verileriyle elde edilmiştir. Sonraki adımda, hızlı prototipleme teknolojisiyle üretilen implant, hasarlı bölgeye başarıyla uygulanmıştır (Elgalal ve ark. 2009). Canlı organ nakli öncesinde, alıcı ve donörden alınan medikal görüntüler sayesinde üç boyutlu yazdırılan karaciğer, safra ve benzeri damarlı yapı modelleri, cerrahi ekibin operasyon teknikleri belirlemesinde ve önceden prova yapmasında ciddi fayda sağlamaktadır (Zein ve ark. 2009). Bununla birlikte, üç boyutlu modelin sağladığı ek bilgiler farklı cerrahi yaklaşımlara imkân tanımaktadır. Ayrıca, CT verileriyle desteklenen anatomik üç boyutlu model aracılığıyla, patolojik ve cerrahi riskler hastalara sunulabilmektedir. Şekil 8'de hastaya sunulan torasik aort anevrizması medikal görüntü verisi ve üç boyutlu baskı modeli görülmektedir. Bu model sayesinde hastaya, patoloji durumu hakkında detaylı bilgi verilmekte, ayrıca cerrahi operasyonun prosedürleri hakkında ayrıntılı açıklama yapılabilmektedir (Rengier ve ark. 2010).

5. TIP EĞİTİMİNDE ÜÇ BOYUTLU MODEL KULLANIMI

Tıp eğitiminde öğrenciler, geleneksel olarak kadavra üzerinde uygulama yapmaktadır. Hastaların başarıyla tedavi edilebilmesi için bu tecrübenin kazanılması oldukça önemlidir. Bazı hastalara ait karmaşık iki boyutlu veya üç boyutlu anatomik görüntü verisinin cerrahi müdahale öncesi yetersiz kaldığı durumlar olabilmektedir. Örneğin; orta kulak cerrahisi için iyi bir eğitim modeli olarak kullanılan büyütülmüş üç boyutlu modeller, öğrencilerin eğitimine büyük katkı sağlamıştır. Öğrenciler, gerçek kemik üzerinde yaptıkları tıraşlama işlemini SLS teknolojisiyle üretilen model üzerinde uygulama imkânı bulmuştur (Marro 2015, Rengier ve ark. 2010).



Şekil 9:
*A. Cerrahi operasyon öncesi eğitim için hazırlanan cerrahi 3B biyomodel,
B. Model üzerinde eğitim yapılırken (Warran ve ark.2015)*

Üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak, hastaya ait gerçek görüntü verilerine dayanarak patolojik 3B biyomodel oluşturulabilmektedir. Bu modeller, cerrahların nöroendoskopik işlem prosedürlerini gerçeğe en yakın koşullarda öğrenmelerine imkan tanımaktadır (Warran ve ark. 2015).

6. ÜÇ BOYUTLU BİYOBASKI TEKNOLOJİSİ

Son yıllarda yapılan araştırmalar ortaya çıkarmıştır ki; insan ömrünün uzaması, beslenme şekillerinin değişmesi ve doğal etkiler nedeniyle organ yetmezliği sorunu giderek artmaktadır. Doku veya organ nakillerinde sıkça yaşanan durumlardan bir tanesi de uygun vericiye ulaşılamaması veya hasta ve verici arasındaki uyum problemleridir. Bütün bu sorunları gidermek adına dokuya ait biyolojik, mekanik ve biyokimyasal dönüşüme neden olan hücre bilgisini kullanarak yapay organ üretim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde, temel anlamda doku mühendisliği (Tissue Engineering) üzerine kurulu olan ve laboratuvar çalışmalarıyla gün yüzüne çıkan biyo-eklemeli üretim teknolojisi (Bio-Additive Manufacturing) veya diğer bir adıyla üç boyutlu biyobaskı (3D Bioprinting) yöntemi keşfedilmiştir. Birçok anlamda çığır açan bu keşif sayesinde, biyobaskı yöntemiyle böbrek, karaciğer, safra, pankreas ve kalp naklinin yakın zamanda gerçekleşmesi beklenmektedir (Barnatt 2014, Ozbolat ve Gudapati 2016).

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Havacılık ve uzay endüstrisinde hızlı prototipleme ihtiyacı için geliştirilen katmanlı üretim teknolojisi, medikal alanın birçok yerinde fayda sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde medikal görüntüleme verileri ve üç boyutlu anatomik modeller;

- Tanı ve tedavi aşamasında hastayla ilgili detaylı bilgi edinerek cerrahi operasyon öncesi planlama yapılmasında,
- Hastaya özgün ölçülerde ve uyumda implant veya protez üretiminde,
- Tıp öğrencileri için bire bir ölçekteki patolojik yapı üzerinde eğitim verilmesinde,
- Biyobaskı olarak adlandırılan doğrudan organ üretiminde,

kullanılmaktadır. Cerrahların, hayati öneme sahip ameliyatları başarıyla tamamlaması için en uygun yöntemi belirlemede üç boyutlu anatomik modellerin ciddi fayda sağladığı görülmektedir. İlerleyen yıllarda malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, canlı anatomik yapıyla benzer nitelikte mekanik ve fiziksel davranış gösteren üç boyutlu biyomodeler yapılabilir hale gelecektir.

Her yeni üretim teknolojisinde olduğu gibi katmanlı üretimde de bazı sınırlayıcı etkenler bulunmaktadır. Bunlar; üç boyutlu modelin yüksek maliyetle üretilmesi, hastaya özel anatomik bilgilerin üretici firmaya transferinde bilginin korunması ihtiyacı, model üretim süresinin uzun olması ve parçaya nihai şeklin kazandırılması için ek işlemlere gereksinim duyulması olarak vurgulanmıştır. Ayrıca, CT’de yakalanan ve görsel verilerde fark edilmeyen veya kapalı görünen bazı boşlukların var olması cerrahi uygulamalarda karşılaşılan en büyük zorluklardan birisidir. Katmanlı üretim teknolojisi sayesinde şeffaf olarak basılabilen üç boyutlu anatominin içyapısı daha rahat anlaşılabilir.

Medikal görüntülerin fiziksel nesneye dönüşmesiyle sonuçlanan süreç, üretim maliyetlerinin yüksek olması ve yazdırma zamanının uzun olması gibi olumsuz faktörlere rağmen, modern cerrahinin geleceği açısından radikal gelişmeler içermektedir.

KAYNAKLAR

1. Aydın, L. ve Küçük, S. (2014) Üç Boyutlu Yazıcıyla Ayak Bileği Ortezinin Tasarlanması ve Üretimi, *Tip Teknolojileri Ulusal Kongresi*,129-132.
2. Ballyns, J.J. ve Bonassar, L.J. (2009) Image-guided tissue engineering, *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 13(8A):1428-36, doi: 10.1111/j.1582-4934.2009.00836.x.
3. Barnatt, C. (2014) *3D Printing Second Edition*, Explainingthefuture.com Edition, sf:175-197.
4. Chiffre, De L. Carmignato, S. Kruth, J.-P. Schmitt, R. ve Weckenmann, A. (2014) Industrial applications of computed tomography, *CIRP Annals*, Volume 63, Issue 2, Pages 655-677, doi: 10.1016/j.cirp.2014.05.011.
5. Cohen, A. Laviv, A. Berman, P. Nashef R. ve Abu-Tair, J. (2009) Mandibular reconstruction using stereolithographic 3-dimensional printing modeling technology, *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology*.108(5):661-6, doi: 10.1016/j.tripleo.2009.05.023.
6. Doi, K. (2006) Diagnostic imaging over the last 50 years: research and development in medical imaging science and technology, *Physics in Medicine and Biology*, 51(13), R5–R27, doi: 10.1088/0031-9155/51/13/R02.
7. Doğan, S. and Altan, M.O. (2003). Detection of tumours by using CT, MR slices and digital images, *itüdergisi/d mühendislik*, Cilt:2, Sayı:4, 45-55.
8. Elgalal, M.T. Kozakiewicz, M. Olszycki, M. Walkowiak, B. ve Stefanczyk, L. (2009) Custom implant design and surgical pre-planning using rapid prototyping and anatomical models for the repair of orbital floor fractures, *European Society of Radiology*, Page 1-17, doi: 10.1594/ecr2009/C-292.
9. Erdoğan, H.B. (2006) Tersine Mühendislik Uygulamaları Kullanılarak 3B Yüzey Modelleme Yapımı, Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği, Makine Mühendisliği Uygulaması-2, Sayfa:1-15.
10. Erdoğan, H.B. (2017) The Importance of Medical Imaging and Using 3D Printer, International Conference on Engineering Technologies, sf:5-8, E-ISBN: 978-605-67535-4-1.
11. Ferry, P.W.M. Marco, A.N.D. Travis, J.K. Jos, M. Paulo J.B. ve Dietmar, W.H. (2012) Additive manufacturing of tissues and organs, *Progress in Polymer Science*,37:1079–1104, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2011.11.007.
12. Gebhard, A. ve Hötter, J.S. (2016) *Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*, page: 332-335, ISBN-10: 1569905827.
13. Giesel F.L.Hart A.R. Hahn, H.K.Wignall, E. Rengier, F. Talanow, R.Wilkinson, I.D. Zechmann, C.M. Weber, M.A. Kauczor, H.U. Essig, M. ve Griffiths, P.D. (2009) 3D Reconstructions of the Cerebral Ventricles and Volume Quantification in Children with Brain Malformations, *Academic Radiology*, 16(5):610-7, doi: 10.1016/j.acra.2008.11.010.
14. Hammoudeh, J. A. Howell, L.K. Boutros, S. Scott, M.A. ve Urata, M.M. (2015) Use of 3D modeling for planning of orthognathic surgery,*Plastic and Reconstructive Surgery*, 3(2): e307, doi: 10.1097/scs.0b013e318069014f.

15. Imanishi, J. ve Choong, P.F.M. (2015) Three-dimensional printed calcaneal prosthesis following total calcanectomy, *International Journal of Surgery Case Reports*, 10: 83–87, doi: 10.1016/j.ijscr.2015.02.037.
16. Malik, H. H. Darwood, A.R.J Shaunak, S. Mulki, O. ve Baskaradas A. (2015) Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications, *Journal of Surgical Research*, Volume 199, Issue 2, Pages: 512-522, doi: 10.1016/j.jss.2015.06.051.
17. Marro, A., Bandukwala, T., and Mak, W. (2015) 3D printing and medical imaging: A review of the methods and applications, *Current Problems in Diagnostic Radiology*, Volume 45, Issue 1, Pages 2–9, doi: 10.1067/j.cpradiol.2015.07.009.
18. McGurk, M. Amis, A. A. Potamianos, P. ve Goodger, N. M. (1997) Rapid prototyping techniques for anatomical modelling in medicine, *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, 79(3): 169–174.
19. Mitsouras, D. Liacouras, P. Imanzadeh A. Giannopoulos A.A. Cai T. K.K. Kumamaru, George, E. Wake, N. Catterson, E.J. Pomahac, B. Ho, V.B. Grant, G.T. Rybicki, F.J. (2015) Medical 3D Printing for the Radiologist, *Radiographics*, 35(7):1965-88, doi: 10.1148/rg.2015140320.
20. Ozbolat, İ. Gudapati, H. (2016) A review on design for bioprinting, *Bioprinting*, Volume 3-4, sf:1- 14, doi: 10.1016/j.bprint.2016.11.001.
21. Rengier, F., Mehndiratta, A. von Tengg-Koblighk, H. Zechmann, C.M. Unterhinninghofen, R. Kauczor, H.U. and Giesel, F.L. (2010), 3D printing based on imaging data: review of medical applications, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(4):335-41, doi: 10.1007/s11548-010-0476-x.
22. Rozen, W.M. Ting, J.W Leung, M. Wu, T. Ying, D. ve Leong, J. (2012) Advancing image-guided surgery in microvascular mandibular reconstruction: combining bony and vascular imaging with computed tomography-guided stereolithographic bone modeling, *Plastic and Reconstructive Surgery*, 130(1):227e-229e, doi: 10.1097/PRS.0b013e318255028e.
23. Schmauss, D. Gerber, N. Ve Sodian, R. (2013) Three-dimensional printing of models for surgical planning in patients with primary cardiac tumors, *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 145 (5), 1407-1408, 10.1016/j.jtcvs.2012.12.030.
24. Schmauss, D. Haerberle, S. Hagl, C. ve Sodian, R. (2015) Three-dimensional printing in cardiac surgery and inventional cardiology: a single-centre experience, *European Journal of Cardio- Thoracic Surgery*, 47(6), 1044–1052, doi: 10.1093/ejcts/ezu310.
25. Silva, P.W. Amorim, R. Bezerra, D.A.F. Masini, M. ve Neuropsiquiatr, A. (2007) Application of the stereolithography technique in complex spine surgery, *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, vol.65 no.2b,443-445.
26. Tam, M.D. Laycock, S.D. Brown, J.R. Jakeways, M. (2013) 3D Printing of an Aortic Aneurysm to Facilitate Decision Making and Device Selection for Endovascular Aneurysm Repair in Complex Neck Anatomy, *Journal of Endovascular Therapy*, 20(6):863-7, doi: 10.1583/13- 4450MR.1.
27. Tek, P. Chiganos, T.C. Mohammed, J.S. Eddington, D.T. Fall, C.P. Ifft, P. Ve Rousche, P.J. (2008) Rapid prototyping for neuroscience and neural engineering, *Journal of Neuroscience Methods*, 172(2):263-9, doi: 10.1016/j.jneumeth.2008.03.011.

28. Üstünelan, D. Erden, N. (2009). Üç boyutlu Medikal Görselleştirme, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Bilgisayar Mühendisliği Bilgisayar Bilimleri, İstanbul.
29. Waran, V. Narayanan, V. Karuppiyah, R. Thambynayagam, H.C. Muthusamy, K.A. Rahman, Z.A., Kirolos, R.W. (2015) Neurosurgical endoscopic training via a realistic 3-dimensional model with pathology, *Simulation in Healthcare*,10(1):43-8, doi: 10.1097/SIH.0000000000000060.
30. Wurm, G. Tomancok, P. Pogady, B. Holl, K. ve Trenkler, J. (2004) Cerebrovascular stereolithographic biomodeling for aneurysm surgery, *Journal of Neurosurgery*, 100(1):139-4, doi: 10.1177/1553350610395031.
31. Zein, N.N. Hanouneh, I.A. Bishop, P.D. Samaan, M. Eghtesad, B. Quintini, C. Miller, C. Yerian, L.ve Klatt, R. (2013) 3-Dimensional (3D) Print of Liver for Preoperative Planning in Live Donor Liver Transplantation, *Liver Transplantation*, 19(12):1304-10, doi:10.1002/lt.23729.

