



3B BİYOMODEL ÜRETİMİ İÇİN MEDİKAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hakan Burçin ERDOĞUŞ

Kavram Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İstanbul / Türkiye

ÖZET

Yirminci yüzyılın sonlarına doğru, hızlı prototipleme veya diğer bir ifadeyle katmanlı üretim teknolojisi, uzay ve havacılık sektörü için üretilmesi hedeflenen parçaların seri imalat öncesinde test edilmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde katmanlı üretim teknolojisi, başta medikal uygulamalar olmak üzere mimari, ayakkabı, mücevher, eğitim ve otomotiv gibi her alanda varlığını genişleterek sürdürmektedir. Medikal alanda katmanlı üretim yöntemi, cerrahi müdahale öncesi planlama yapabilmek için oluşturulan üç boyutlu biyomodel sayesinde ameliyatlarda başarı sağlamada, hastanın anatomik yapısına uygun implant veya operasyonel cihaz tasarımında ve cerrahi eğitimlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Medikal görüntüleme, katmanlı üretim teknolojisi yardımıyla anatomik model yapımının ilk basamağını oluşturmaktadır. Görsel verinin doğru şekilde işlenebilmesi ve biyomodel elde edilebilmesi için uygun görüntüleme tekniğinin seçilmesi önemli bir unsurdur. Bununla beraber, anormal veya patolojik yapısal görüntü kümesinin üç boyutlu model oluşumuna en uygun biçimde imkân sağlaması gerekmektedir. Bu çalışmada, medikal görüntülemeden üç boyutlu biyomodel üretimine kadar geçen sürecin aşamaları irdelenmiştir. Ayrıca, çene ve yüz kemikleri ve kalp-damar cerrahisi uygulamalarında üç boyutlu biyomodel oluşturabilmek için kullanılan medikal görüntüleme teknikleri araştırılmış ve uygulamaya özgü faktörler dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı üretim, 3B baskı, üç boyutlu ekokardiyografi, medikal görüntüleme, 3B biyomodel.

A COMPARISON OF MEDICAL IMAGING TECHNIQUES FOR 3D PRINTED BIOMODEL

ABSTRACT

At the end of the twentieth century, rapid prototyping or in other words additive manufacturing technology was used to test parts intended for production in aerospace industry before mass production. Additive manufacturing technology continues to expand its presence in all areas of architecture, shoemaking, jewelry, education and automotive, especially medical applications. Thanks to the three-dimensional biomodel designed to make planning before the surgical intervention with the medical field, additive manufacturing method has been used frequently in the design of implant or patient-specific device design that is suitable for anatomical structure and surgical training as well as successful operations. Medical imaging is the first step to building anatomic models with the aid of additive manufacturing technology. It is important to select the suitable imaging technique so that visualization can be successfully processed and the biomodel can be obtained. However, an abnormal or pathological structural data set must be provided in a way that is most appropriate for the three-dimensional model modality. In this study, stages of process were examined from medical imaging to three-dimensional biomodel production. In addition, medical imaging techniques used to create three-dimensional biomodels were investigated in maxillofacial and cardiovascular applications, and comparison was made taking into account the application-specific factors.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, 3D echocardiography, medical imaging, 3D biomodel.

1. GİRİŞ

Mimari tasarımlar ve ar-ge uygulamaları başta olmak üzere, üretim yapılan çalışma alanlarında kritik detayların model maket üzerinde simüle edilmesi, nihai üründe oluşan hataları en aza indirmek için gerekli olmaktadır. Seri üretimde proses akışı esnasında ön görülemeyen maliyetleri artıran durumlar nihai ürünün fiyatını olumsuz yönde etkilemektedir. Proaktif düşünce yapısının bir sonucu olarak geliştirilen ve hızla yaygınlaşan “hızlı prototipleme” teknolojisinin, birçok sektör için sağlamış olduğu avantajlar nedeniyle kullanım alanı giderek artmaktadır. Hızlı prototipler, mühendis ve ürün tasarımcıları tarafından seri üretim öncesi parçaya estetik açıdan son şeklin verilmesinde kullanıldığı gibi (konsept prototipleme), aynı zamanda boyutsal analizler yapılırken ve parçanın mekanik özellikleri test edilirken (fonksiyonel prototipleme) de son ürün öncesi çalışmalara ciddi katkı sağlamaktadır [1]. Yirminci yüzyılın sonlarında hızlı prototipleme makinelerinin geliştirilmesiyle ortaya çıkan “katmanlı üretim” bir diğer ifadeyle “üç boyutlu baskı teknolojisi”; kişiye özel üretim, düşük hacimde üretim ve kişisel fabrikasyon gibi yeni nesil üretim anlayışına dair kavramları beraberinde getirmiştir. Katmanlı üretim teknolojileri medikal alanda tanı ve tedavi başta olmak üzere; somut model üzerinde cerrahi operasyon çalışması ve planlaması, hastaya özgü cihaz tasarımı, doğudan kişiye özel implant veya protez (diz, diş veya kalça) üretimi ve cerrahi personelin eğitimi gibi konularda son yılların tercih edilen üretim yöntemi haline gelmiştir.

Cerrahlar, tıp eğitimi alırken kadavra üzerinde uygulama yaparak anatomi hakkında temel pratik bilgiye sahip olmaktadır. Bu yüzden cerrahlar, radyologların sunmuş olduğu iki boyutlu (2B) görüntü raporlarına bakarak gerçek zamanlı operasyonel sorunlardan birisi olan hastanın anatomisine dair biçimsel iç yapı anormalliklerini veya patolojik bulguları teorik bilgi ve tecrübe birikimleri nispetinde değerlendirmeye çalışır [2]. Fakat, karmaşık patolojiler için hastaya özgü operasyon yöntemi belirlenmesinde 2B görüntü verileri yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, operasyon prosedürleri esnasında karşılaşılan problemlerin ön görülebilmesi ve buna göre hazırlık yapılması için gerçeğine en yakın üç boyutlu (3B) model üzerinde çalışma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Kapsamlı müdahale planı gerektiren operasyonlarda çok yönlü analiz sonrası cerrahi karmaşıklığından çıkılması ve hastaya özgü yöntemlerin oluşturulması, katmanlı üretim teknolojisi sayesinde üretilen 3B modeller ile mümkün olmaktadır.

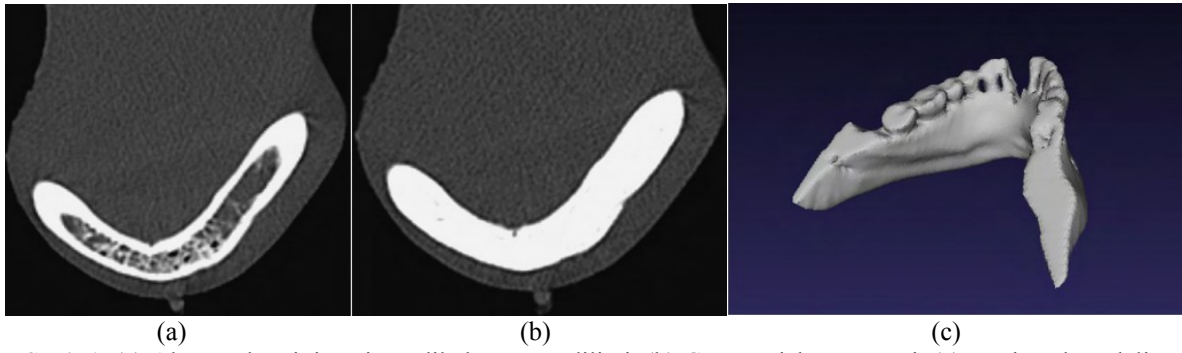
Bilgisayarlı Tomografi (CT) ve Manyetik Rezonanslı Görüntüleme (MRI) gibi medikal alanda en sık tercih edilen görüntü yakalama teknikleri aracılığıyla, hasta anatomisine dair bilgiler elde edilebilmektedir. Bilgisayar destekli özel yazılımlar sayesinde, yakalanan görüntü verileri çeşitli aşamalardan geçirilerek farklı üretim teknolojileriyle 3B model oluşturulmaktadır. Önceleri, CT görüntüsünden elde edilen görsel veriler, çok eksenli bilgisayar destekli freze tekniği yardımıyla katı bir bloktan işlenerek cerrahi operasyon öncesinde somut model yapılmaktaydı [3]. Günümüzde ise katmanlı üretim teknolojileri medikal amaçlı 3B model üretimini daha hızlı ve hassas şekilde yapabilmektedir. Medikal görüntü verisinin doğru olarak yakalanmasıyla başlayan süreci etkileyen en önemli parametrelerden birisi, verinin yalın ve kaliteli çözünürlükte elde edilmesidir [4]. Bu çalışmada, üç boyutlu modelin kalitesine doğrudan etki eden medikal görüntü datası oluşturma aşamaları incelenmiş ve bir uygulama örneği olarak iskemik mitral yetmezliği konusu ele alınmıştır. Ayrıca, üç boyutlu modelin en fazla kullanıldığı kalp - damar ve çene - yüz kemiği cerrahisi operasyonları için tercih edilen görüntüleme teknikleri karşılaştırılmıştır.

2. GÖRSEL VERİDEN 3B MODEL OLUŞTURMA ADIMLARI

Daha önce yapılan çalışmalarda belirtildiği üzere, medikal alanda kullanılan 3B kopya modelleri oluşturmak için atılması gereken adımları dört aşamada toplamak mümkün olmaktadır. Bu adımlar, iki boyutlu görüntü verisinin özel bir yazılım yardımıyla üç boyutlu hacimsel yapı haline getirilmesiyle başlar ve 3B somut model oluşturulmasıyla sonlandırılır. İşlem akışı esnasında meydana gelen geometrik sapmalar, katmanlı üretim yöntemiyle oluşturulan somut model geometrisinde ölçüsel değişikliğe neden olabilmektedir [5]. Bazı çalışmalarda, medikal görüntüler ve 3B model arasındaki bu ölçüsel sapmanın 1,40 mm civarında olduğu tespit edilmiştir [6]. Somut model yapımı için seçilen

katmanlı üretim teknolojisi, medikal görüntü verisi ve 3B model arasındaki ölçünün eşleşmemesi gibi sorunları gidermek adına düşünülmesi gereken önemli bir parametre olarak çalışmalara yansımıştır [7].

Görüntü Yakalama aşamasında, yeterli sayıda aksinel kesitin biraraya getirilmesiyle sanal 3B hacimsel yapı oluşturulur. *Görüntünün İşlenmesinde*, herhangi bir medikal görüntüleme tekniği aracılığıyla elde edilen hacimsel yapı, bazı işlemlerden (örneğin; gereksiz verilerin temizlenmesi, istenen bölgenin ayrılması gibi) geçirilerek 3B model basımına uygun hale getirilmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirmek için Mimics ve 3D Slicer gibi özel yazılımlar kullanılır. Medikal görüntüleme uzmanları, hacimsel veri üzerinden hasarlı bölgeyi istenmeyen diğer yerden ayırma (segmentasyon) ve düzeltme yapabilmeleri için bu yazılımları kullanmaktadır. Şekil 1'de görüntü yakalama, işleme ve hacimsel yapı oluşturma adımları sonrası meydana getirilen bir alt çene kemiği modeli görülmektedir. *3B Üçgenleme* adımı, 3B baskı için anatomiden ayrılan hacimsel bölge birçok yazılım tarafından Stereolithografi (STL) dosya formatına otomatik olarak dönüştürülmektedir. 3B model oluşturmada temel amaç, gerçek anatomiye en yakın seviyede pürüzsüzlük eldesi olduğu için belirli bir optimum uygunluk değerinde üçgenleme yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır [9].



Şekil 1. (a) Alt çene kemiğine ait medikal görüntü dilimi, (b) Görüntü işleme süreci, (c) Hacimsel modelin oluşturulması [8].

3B Baskısı alınacak anatomik model için seçilmiş olan malzemeye göre katmanlı üretim teknolojisi belirlenebildiği gibi, pürüzsüz yüzey oluşturma düşüncesi temelinde de malzeme seçimi yapılabilmektedir. FDM, SLS ve Polijet teknolojileri, kalp-damar cerrahisi için en sık atıf yapılan yöntemler olmuştur. Polijet diğer bir ifadeyle polimer püskürtme teknolojisinin, kalp-damar gibi karmaşık anatomiye sahip yapıları, iyi derecede geometrik hassasiyete sahip olan 3B modele dönüştürme yeteneği vardır. Ayrıca, karmaşık geometrileri üretebilme özelliği ve sunmuş olduğu malzeme çeşitliliği bakımından hastaya özgü model yapımında sıklıkla tercih edilmektedir [10].

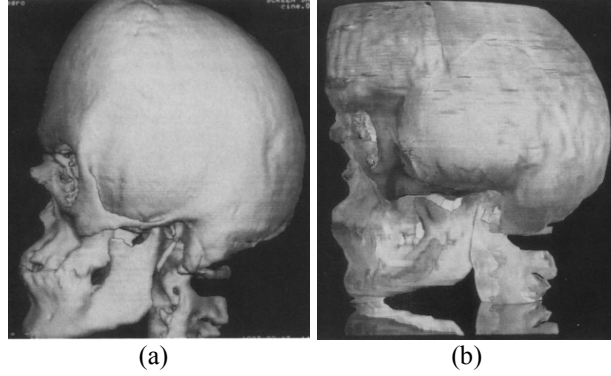
3. BİYOMODEL ÜRETİMİ İÇİN MEDİKAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİ SEÇİMİ

Biyomodel, katmanlı üretim teknolojisi ve bilgisayar destekli medikal görüntüleme tekniğinin birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Medikal alanda biyomodeller genel olarak; çene ve yüz kemiği, kalp-damar, beyin ve sinir cerrahisi operasyonları öncesinde hastalığın tanı ve tedavisi için planlama ve simülasyon yapılması ve hastanın patolojisi hakkında bilgilendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır [11, 12].

3.1. Çene ve Yüz Kemikleri Cerrahisi

Yapılan çalışmalar neticesinde birçok farklı alanda üretime fayda sağlayan katmanlı üretim teknolojisi, medikal alanda en fazla çene ve yüz kemiği uygulamalarında kendine yer bulmuştur. Her ne kadar 3B biyomodel üretiminde insan vücuduna ait olan bölümlerin taranması için görüntü verileri oluşturmaya yarayan bir çok yöntem olsa da, tanı kalitesi bakımından Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (CBCT) milimetre altı çözünürlükte görüntü sağladığından, alternatif görüntüleme tekniği olarak öne çıkmaktadır. 3B yüzey modelinin yeniden oluşturulmasıyla ilgili CBCT ve Çoklu Dilimleme Spiral Tomografi (MSCT) arasında geometrik hassasiyet üzerine yapılan bir karşılaştırma neticesinde CBCT'nin cerrahi müdahale öncesinde planlama ve STL transferi için daha uygun sonuçlar verdiği görülmüştür [13].

Yapılan diğerk bir araştırma sonucunda çeneve ait olan dişsiz bölümün CBCT görüntülerinin, bilgisayar destekli hızlı prototipleme için cerrahi kılavuz olması açısından yararlı olduğı vurgulanmıştır. Ayrıca, her türlü implant tedavisi için yapılan klinik çalışmalar göstermiştir ki, stereolithografik cerrahi kılavuzlara olan güvenilirliğin artmasında 3B tabanlı görüntü verilerine dayanarak şablon tasarlanması etkili olmuştur. CBCT'nin cerrahi planlamaya sunduğı imkanlarla ilgi yapılan bir başka çalışmada, data transferi esnasında oluşan bazı ölçüsel sapmalara rağmen neredeyse mükemmel sonuç verdiğı ve bu medikal görüntü yakalama yönteminin klinik uygulamalara yönelik güvenilirliğini ispatlayan diğerk bir unsur olduğı belirtilmiştir [14, 15]. Bununla birlikte CBCT, nispeten daha düşük radyasyon maruziyeti ve daha az maliyetle görüntü yakaladığı için tercih edilen bir teknik haline gelmiştir. Kemik genişliğinin cerrahi müdahale için yetersiz olduğı alanlarda oral implant planlamasının daha hassas yapılması gerektiğı cerrahi uzmanlar tarafından bilinmektedir. Bu amaçla yapılan bir uygulamada, çene kemiğı genişliğı en az 4 mm olduğı zaman mevcut implant tipleri yerleştirilebilirken, bu değer 3 mm olursa "mm" seviyesinde hassasiyet gereksinimi ortaya çıkmış ve bunun için CBCT yöntemi tercih edilmiştir. CBCT ve spiral tomografi arasında yapılan bir karşılaştırmada ise, kemik hacminin tahmin edilmesinde CBCT'nin kabul edilebilir sonuçlar verdiğı, ayrıca operator kullanımından kaynaklanan veya hastanın uygun pozisyonda olmaması gibi faktörlerin etkisiyle görüntü işleme aşamasında bölgesel hacim ve bölümlenimin değişikliğe uğradığı belirtilmiştir [16].



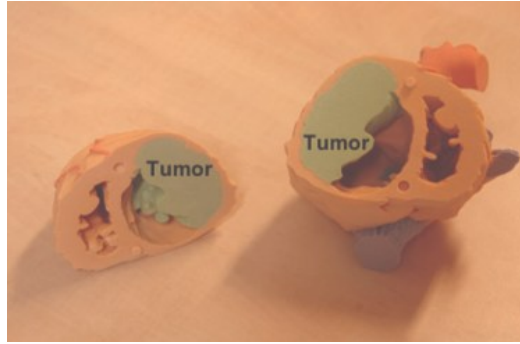
Şekil 2. (a) 3D-CT'den alınmış görüntü bilgisi, (b) SL teknolojisiyle üretilen 3B biyomodel [16].

Çene ve yüz kemikleri, hipoplazi gibi zorluk derecesi yüksek sendromlar için CT ve MRI tarafından sağlanmış olan en uygun anatomik yapı görüntüsü, aksenal dilimlerin ölçü yetersizliğı nedeniyle somut 3B model üretimi için uygun olmamaktadır. Bu sorunu gidermek adına, SL ve 3D-CT'nin birlikte kullanımından kaynaklanan en iyi görselleştirme ve modelleme tekniğı ile karmaşık kemik yapısı üzerinde cerrahi planlama simulasyonu başarıyla sağlanabilmiştir. Yüz kemikleri ile ilgili karmaşık sendromların cerrahi planlamasında 3B biyomodel önemli ölçüde faydalı olmaktadır. Şekil 2'de görülen çalışmada, 3D-CT görüntü verileri sayesinde bire bir ölçüde üretilen SL katı model ile rekonstrüksiyon işlemleri için kemiklerde meydana gelen deformasyon açık bir şekilde belirlenebilmiştir [17].

3.2. Kalp-Damar Cerrahisi

Kardiyologlar ve radyoloji uzmanları arasında, doğuştan gelen kalp hastalığı ile ilgili karmaşık ve tanımlanması zor olan bazı kısımlar yüzünden cerrahi müdahale konusunda anlaşmazlık yaşanabilmektedir. Bu türden karmaşık patolojileri anlamak için 2B bilgisayar görüntüsü yeterli olmamaktadır. Kalp-damar cerrahisi için yapılan 3B biyomodeller, karmaşık patolojiye sahip hastaların tanı ve tedavi süreçlerini, olması gerekenden çok daha kısa sürede ve başarıyla tamamlamada ciddi katkı sağladığı tespit edilmiştir [18]. Yüksek çözünürlükte görüntü verisi sağlayan medikal görüntüleme teknikleri ve 3B baskı teknolojileri birlikte kullanıldığında oluşturulan biyomodelin, kalp-damar cerrahisi için sağlamış olduğı faydalardan bazıları; cerrahi müdahale öncesi ameliyat prosedürlerinin gözden geçirilmesi veya kullanılacak en uygun cihazın seçilmesi, damar yollarının tespit edilmesi ve simulasyonu, hastalığı hakkında kişiye somut model üzerinden detaylı bilgi verilebilmesi, ileri kalp-damar araştırmaları ve cerrahi eğitimde öğrencilere farklı kalp anatomilerinin gösterilmesi şeklinde özetlenebilir [4, 19].

Kalp-damar anatomisi ile ilgili yapılan çalışmalarda; Elektrokardiyografi (EKG), Üç Boyutlu Ekokardiyografi (3D-EKG) ve Kardiyak Manyetik Rezonans (CMR) tekniklerinin sunmuş olduğu imkanlar dahilinde 3B biyomodel oluşturmak için kullanılan görüntü verisinin mutlaka “hacimsel” olması gerektiği vurgulanmıştır. Transözofageal Ekokardiyografi (TEE) veri kaynağının, karıncık ve broşların açık olarak görülebilmesi ve bu kapsamda hastaya özgü biyomodel üretilmesi için tercih edildiği belirtilmiştir. Anatomik yapı üzerinde kritik öneme sahip bazı kısımların karanlık çıkması nedeniyle ultrason görüntüsü genellikle tercih edilmemektedir, fakat CMR tekniği ile seçilen bölgede görsel kayıp yaşamadan yüksek çözünürlükte görüntü sağlanabilmektedir. Bu yüzden CMR, doğuştan gelen kalp odacıkları ile ilgili hastalıkların ayrıntılı olarak gözlemlenmesi ve tümörün modellenmesi için hassas 3B biyomodel üretimine imkan tanımaktadır [10]. Şekil 3’de bir kalp-damar operasyonu için tümörün yayılmasını izlemek amacıyla üretilen 3B biyomodel görülmektedir. Burada, tümörün yeri ve sızma miktarı biyomodel sayesinde belirgin şekilde fark edilmektedir [20].



Şekil 3. Tümörün sağ karıncık duvarına doğru sızma miktarı 3B biyomodel sayesinde belirlenmiştir [20].

Hassas biyomodel baskısı için ihtiyaç duyulan görüntüleme tekniği seçimi konusunda yapılan bir diğer araştırmada, EKG-CT anjiyografi tekniğiyle sağlanan kalp-damar yapısına ait görüntülerin, diğer görüntüleme tekniklerine kıyasla daha hassas çözünürlükte (0,3 – 0,7 mm arası) olduğu belirtilmiştir [18].

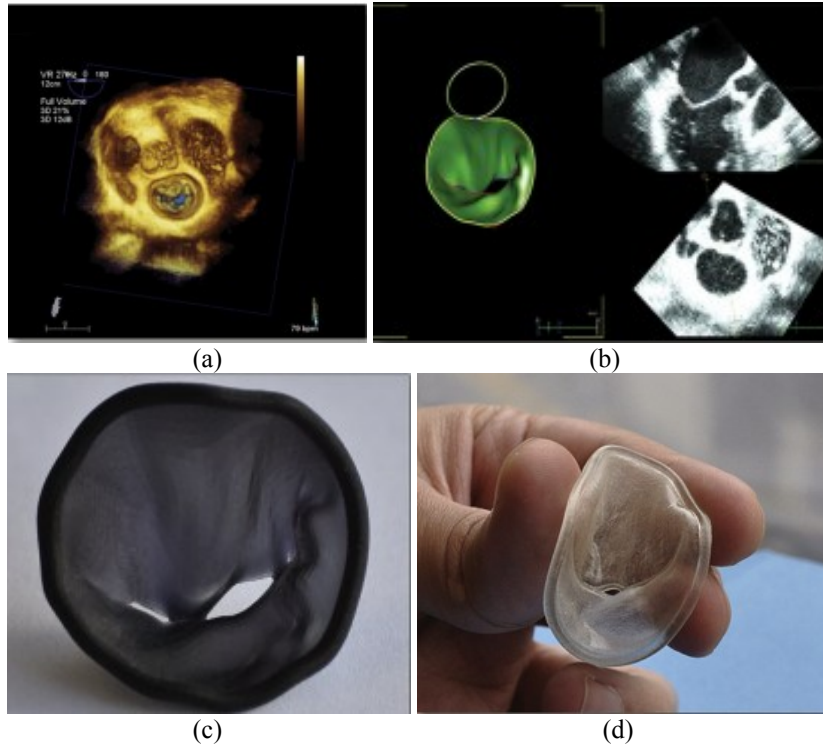
4. 3B BİYOMODEL UYGULAMA ÖRNEĞİ: MİTRAL KAPAKÇIK ÜRETİMİ

Sürekli geliştirilen bir teknoloji olması ve sağlamış olduğu avantajlar sayesinde, kalp – damar cerrahisi gibi kritik ameliyatlarda etkin rol oynayan 3B biyomodel üretimi, medikal görüntü verisinin başarılı bir şekilde yakalanmasıyla başlamaktadır. Görüntünün yakalanması esnasında hastanın; doğru pozisyonda olmaması, hareket etmesi ve nefes tutma problemi gibi faktörler görüntü kalitesine olumsuz yönde etki etmektedir [21]. Tanı ve tedavi aşamasında daha önce sıklıkla kullanılan iki boyutlu ekokardiyografi (2D-EKG) görüntüleme tekniği, sağladığı avantajlara rağmen hacimsel olarak üç boyutlu sanal model oluşturmada yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bu sebeple, görselleştirme işlemi üç boyutlu uzayda elde edebilmek için, yeni donanım ve yazılım araçlarının katkısıyla üç boyutlu ekokardiyografi (3D-EKG) tekniği geliştirilmiştir [22]. Özellikle doğuştan gelen kalp hastalıklarının tanı ve tedavisinde 3D-EKG, EKG-CT, CMR ve 3D-TEE teknikleri, hacimsel görüntü veri kümesi (Volumetric Image Dataset) oluşturmada tercih edilen başlıca yöntemler olmuştur.

Biyomodel uygulama aşamalarını incelemek için güncel bir çalışma olması nedeniyle kalp hastalıkları içerisinde ciddi öneme sahip konulardan birisi olan iskemik mitral yetmezliği ele alınmıştır. İskemik mitral yetmezliği ameliyatı için ön operasyon planlanırken kritik bazı detayların belirlenmesi amacıyla ihtiyaç duyulan 3B biyomodelin üretimi aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmektedir;

- 1- *Görüntünün Yakalanması:* 3D-TEE tekniği ile görüntü veri kümesinin kaydedilmesi ve özel bir yazılım (Image area, TomTech GmGH veya QLAB Cardiac Analysis) aracılığıyla gereksiz bölgelerin temizlenmesi bu adımda gerçekleşir. Şekil 4(a)’da 3D-TEE tekniğiyle ön pozisyondan yakalanan mitral kapakçık verisi görülmektedir. Cihazdan alınan görüntü kümesi ilgili yazılımla düzenlenir ve görüntü işleme aşaması için dosya DICOM formatına dönüştürülür.

- 2- *Görüntünün İşlenmesi:* Dilimler halinde alınan görüntü verileri; otomatik, yarı otomatik ve manuel segmentasyon metotlarıyla biyomodel baskısına uygun hale getirilmektedir. Bunun için, Mimics ve MVA gibi görüntü işleme yazılımları kullanılmaktadır. Şekil 4(b)'de TEE tarafından sağlanan hassas görüntü verisinden, otomatik segmentasyon işlemi sonrası oluşturulan mitral kapakçık görüntüsü verilmiştir.
- 3- *3B Biyomodel Üretimi:* SLA ve Polijet gibi üç boyutlu baskı teknolojileri polimer esaslı esnek malzemeden model üretimine imkan tanımaktadır. Şekil 4(c)'de biyomodel olarak üretilen mitral kapakçığın anormal yapısı ve içeri çekilme miktarı net olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 4(d)'teki gibi esnek malzeme kullanılması sayesinde biyomodel mitral kapakçığa bükülebilme özelliği kazandırılmıştır. Bu sayede, kapakçığın doğal davranışına en yakın 3B biyomodel üretilmiştir [23,24].



Şekil 4. (a) TEE tekniği ile yakalanan mitral kapakçık görüntüsü, (b) Segmentasyon işlemi, (c) 3B biyomodel, (d) Esnek malzemeden yapılan biyomodel [24].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Özellikle kalp-damar ve sinir cerrahisi gibi kritik ameliyatlar esnasında önceden tahmin edilemeyen ve cerrahları zorlayan durumlar meydana gelebilmektedir. Görselleştirilmiş verilerin etkin rol oynamadığı ve sadece teknik ekibin tecrübesiyle etkili olabildiği bu tarz müdahalelerde başarı şansının azaldığı bilinmektedir. Cerrahlar, anatomik açıdan zorlayıcı operasyonlara girmeden önce teknik uzmanların desteğiyle planlama yaparken en doğru kararı vermeyi amaçlamaktadır. Muhtemel risklerin hesaplanması, karmaşık patolojilerin basitleşmesi ve anlaşılabilir hale getirilmesi operasyonun başarısı için oldukça önemlidir. Bu amaçla son yıllarda üç boyutlu medikal görselleştirme sıklıkla kullanılmaktadır. Gelişmiş medikal görüntüleme teknikleriyle oluşturulan kesitleri, hacimsel veriler halinde toplayarak somut katı modele dönüştüren ve gerçek insan anatomisine en yakın hassasiyete sahip kopya 3B modeller, yeni nesil üretim teknolojisi olarak kabul gören katmanlı üretim sayesinde rahatlıkla yapılabilmektedir. Literatürde, CT ve MRI gibi medikal görüntüleme teknikleriyle yakalanan görsel verilerin işlenmesi sonrası oluşturulan hacimsel anatomik yapının somut model halinde üretilmesi “3B biyomodel” olarak tanımlanmıştır. 3B biyomodelin kalitesi, medikal görüntü kaynağından alınan verinin kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte, görüntü kalitesinin iyi olmasıyla segmentasyon işleminin daha kolay yapıldığı konusuna dikkat çekilmiştir.

Yapılan araştırmalar neticesinde, çene ve yüz kemiği cerrahisinde kemik genişliğinin sınırlı olduğu yerlere implant yerleşimi yapabilmek için ön operasyon planlaması ve 3B biyomodel üretimi gibi konularda, CBCT görüntüleme tekniğinin daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca CBCT'nin, düşük radyasyon maruziyeti, tarama süresinin kısa olması ve görüntü kalitesinin iyi olması tercih edilmesinde etkili olmuştur. Rekonstrüksiyon işlemi gibi karmaşık operasyonlarda, 2B görsel verilerin yetersiz kaldığı belirtilmiştir. Bu yüzden, 3D-CT tekniği ile yakalanan ve işlenen görüntü verileri hem bilgisayar ekranı üzerinde teknik uzmanlara yardımcı olmakta, hem de katmanlı üretim teknolojisiyle biyomodel üretimi için önemli ölçüde fayda sağlamaktadır.

Kalp-damar cerrahisi üzerine yapılan çalışmalar göstermiştir ki, 3B biyomodeller her ne kadar canlı organ anatomisi veya patolojik yapının uzaysal geometrisi kadar gerçek olmasa da cerrahi prosedürün planlamasında, operasyon için uygun cihaz seçiminde ve kardiyologların eğitiminde önemli birer yardımcı kaynak olmuştur. Yapısal kalp hastalıklarına cerrahi müdahale planı hazırlanırken, fiziksel biyomodeller hastalığın yayılma sürecini yönetmede etkin rol oynamaktadır. Bunun için, Polijet ve SLA gibi katmanlı üretim teknolojileri farklı renklerde model üretimine imkan vermektedir. En uygun görüntüleme tekniği seçimi sonrası üretilen model kalp üzerinde tümörün sızma oranı ve bu tümörün hacmi rahatlıkla hesaplanabilir. Benzer şekilde, karmaşık anatomiye sahip bir yapının biyomodeli oluşturulurken dış kabuğu saydam, içindeki patolojik bölge renkli yapılarak durum hakkında daha net bilgi edinilebilir.

Katmanlı üretim teknolojisi ve malzeme teknolojisinin eř zamanlı gelişmesiyle, üretilen biyomodeller gerçek organ veya doku davranışına yaklaşabilecektir. Bu gelişme sayesinde gelecek yıllarda 3B biyomodeller, sadece görselliğin ön planda olduğu somut model olarak değil, aynı zamanda fonksiyonel olarak da cerrahi operasyonlara büyük fayda sağlaması beklenmektedir.

REFERANSLAR

- [1] Gebhardt A, Hötter JS. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich.2016; 7.
- [2] D'Urso PS, Barker TM, Earwaker WJ, Bruce LJ, Atkinson RL, Lanigan MW, Arvier JF, Effney DJ. Stereolithographic biomodelling in cranio-maxillofacial surgery: a prospective trial. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery. 1999; 27: 30-37.
- [3] Arvier JF, Barker TM, Yau YY, D'Urso PS, Atkinson RL, McDermant GR. Maxillofacial biomodelling. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 1994; 32: 276-283.
- [4] Giannopoulos AA, Mitsouras D, Yoo SJ, Liu PP, Chatzizisis YS, Rybicki FJ. Applications of 3D printing in cardiovascular diseases. NB ature Reviews Cardiology 2016;13: 701–718.
- [5] Van Eijnatten M, van Dijk R, Dobbe J, Streekstra G, Koivisto J, Wolff J. CT image segmentation methods for bone used in medical additive manufacturing. Medical Engineering and Physics. 2018; 51:1–11.
- [6] Israel V, Gorka G, Cristina SM, Amir-Reza H, Mark H, Arno R, Jaime F VJ, Issam El-R, Sergio U , Tomas GC. 3D printed cardiovascular models for surgical planning in complex congenital heart diseases. Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance. 2015;17(1):196.
- [7] Salmi M, Paloheimo KS, Tuomi. J, Wolff J, Mäkitie A. Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery. 2013;41(7): 603-609.
- [8] Liang X, Lambrichts I, Sun Y, Denis K, Hassan B, Li L, Pauwels R, Jacobs R. A comparative evaluation of Cone Beam Computed Tomography (CBCT) and Multi-Slice CT (MSCT). Part II: On 3D model accuracy. Eur J Radiol. 2010;75(2):270-4.
- [9] Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A, Giannopoulos AA, Cai T, Kumamaru KK, George E, Wake N, Catterson EJ, Pomahac B, Ho VB, Grant GT, Rybicki FJ. Medical 3D Printing for the Radiologist. Radiographics, 2015; 35(7):1965-88.

- [10] Vukicevic M, Mosadegh B, Min JK, Little SH. Cardiac 3D Printing and its Future Directions. *Cardiovascular Imaging*. 2017;10: 171-84.
- [11] Wurm G, Tomancok B, Pogady P, Holl K, Trenkler J. Cerebrovascular stereolithographic biomodeling for aneurysm surgery. *J Neurosurg*. 2004;100(1):139-45.
- [12] Rozen WM., Ting JW., Leung M., Wu T., Ying D., Leong J. Advancing image-guided surgery in microvascular mandibular reconstruction: combining bony and vascular imaging with computed tomography-guided stereolithographic bone modeling. *Plast Reconstr Surg*. 2012 Jul; 130(1):227-229.
- [13] Liang X, Jacobs R, Hassan B, Li L, Pauwels R, Corpas L, Souza PC, Martens W, Shahbazian M, Alonso A, Lambrechts I. A Comparative Evaluation of Cone Beam Computed Tomography (CBCT) and Multi-Slice CT (MSCT) Part I. On subjective image quality. *European Journal of Radiology*. 2010; 75:265–269.
- [14] Van Assche N, van Steenberghe D, Guerrero ME, Hirsch E, Schutyser F, Quirynen M, Jacobs R. Accuracy of implant placement based on pre-surgical planning of three-dimensional cone-beam images: a pilot study. *J Clin Periodontol*. 2007;34(9):816-21.
- [15] Loubele M, Maes F, Schutyser F, Marchal G, Jacobs R, Suetens P. Assessment of bone segmentation quality of cone-beam CT versus multislice spiral CT: a pilot study. *Oral Surgery Oral Med Oral Pathology Oral Radiology Endod*. 2006; 102:225-34.
- [16] Loubele M, Guerrero ME, Jacobs R, Suetens P, van Steenberghe D. A Comparison of Jaw Dimensional and Quality Assessments of Bone Characteristics with Cone-Beam CT, Spiral Tomography, and Multi-Slice Spiral CT. *International Journal of Oral Maxillofacial Implants*. 2007;22(3):446-54.
- [17] Kragsskov J, Sindet-Pedersen S, Gyldensted C, Jensen KL. A Comparison of Three-Dimensional Computed Tomography Scans and Stereolithographic Models for Evaluation of Craniofacial Anomalies. *Journal Oral Maxillofacial Surgery* 1996;54(4):402-11.
- [18] Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligk H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, Giesel FL. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2010 Jul;5(4):335-41.
- [19] Shi-Joon Y, Omar T, Eul Kyung K, Haruki I, Deane Y, Anreea D, Mike S, Lars Grosse-W, and Glen van A. 3D printing in medicine of congenital heart diseases. *3D Printing in Medicine*. 2016; 2:3.
- [20] Jacobs S, Grunert R, Mohr FW, Falk V. 3D-Imaging of cardiac structures using 3D heart models for planning in heart surgery: a preliminary study. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*. 2008;7(1):6-9.
- [21] Gereide DM, Erol C. Three-dimensional Echocardiography, *MN Cardiol* 2014;21:122-127.
- [22] Binder TM, Moertl D, Mundigler G, Rehak G, Franke M, Delle-Karth G, Mohl W, Baumgartner H, Maurer G. Stereolithographic biomodeling to create tangible hard copies of cardiac structures from echocardiographic data: in vitro and in vivo validation. *Journal of the American College of Cardiology*. 2000 Jan;35(1):230-7.
- [23] Olivieri LJ, Krieger A, Loke YH, Nath DS, Kim PC, Sable CA. Three-dimensional printing of intracardiac defects from three-dimensional echocardiographic images: feasibility and relative accuracy. *Journal of the American Society of Echocardiography*. 2015 Apr;28(4):392-7.
- [24] Mahmood F, Owais K, Taylor C, Montealegre-Gallegos M, Manning W, Matyal R, Khabbaz KR. Three-dimensional printing of mitral valve using echocardiographic data. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2015 Feb;8(2):227-9.