

HASARLI BİR KAFATASININ ÜÇ BOYUTLU YAZICI ile İMALATI ve İMPLANT TASARIMI

Yard.Doç.Dr. Ahu ÇELEBİ ^{1*}, Halil TOSUN ², Ali Çağlar ÖNÇAĞ ²

¹ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa Celâl Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye

² ESHOT Genel Müdürlüğü, İzmir, Türkiye

ÖZET

Toplum içerisinde çeşitli yaralanmalı olaylar neticesinde, bazı insanlarda implant takılma ihtiyacı olan hasarlar oluşmaktadır. Bu çalışmada 3B (Üç boyutlu) yazıcıların implant tasarım sürecinde nasıl kullanıldığı ve olası bir kullanım yöntemi için 3B lazer tarama ile kontrolü de içeren uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sağ gözü bölgesine darbe almış bir hastanın kafatasının, bilgisayarlı tomografi (BT) görüntüsünün verileri dijital ortamda tekrar ele alınarak düzenlenmiştir. Düzenlenen verilerin, Poliaktik Asit (PLA) malzeme ile 3B yazıcıyla yazdırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. 3B yazıcıyla yazdırılan kafatasının çıktısı, dijital ortamda bulunan veri ile karşılaştırılmış, alınan çıktının ölçüsel olarak güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hasarlı olan bu bölgeye uygun olarak bilgisayar ortamında tasarımı yapılan Ti-6Al-4V biyouyumlu malzemeden protez tasarlanmıştır. 3 boyutlu yazıcıların özellikle medikal alanda güvenle kullanılabilirliği görülmüştür. Ayrıca bu çalışmadaki gibi bir tasarım sürecinin hasta üzerindeki operasyon süresini azaltabileceği ve hasarlı bölgeye daha az müdahale ile implant kontrolünün operasyon öncesi yapılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : 3B Yazıcı, İmplant Tasarımı, Bilgisayarlı Tomografi, 3B Tarama

MANUFACTURING a DAMAGED SKULL with 3D PRINTER and IMPLANT DESIGN

ABSTRACT

As a result of various injuries in the community, some people are suffering from the damages that need implantation. In this study, applications including how to use 3D printers in the implant design process and control using 3D laser scanning method have been carried out. In the study, the data of a computerized tomography (CT) image of a skull of a patient who had been hit in the right detention zone was regenerated in digital. Obtained data was printed with polymer printer (PLA) with 3D printer. The output of the skull printed with a 3D printer was found to be coincident with the data contained in the digital media and the received output was measurable. In addition, Ti-6Al-4V biocompatible prosthesis was designed according to this damaged area. It has been seen that 3D printers can be safely used especially in medical field. It was also seen that a design process like this one could reduce the operation time on the patient and the implant control could be done before the operation with less intervention in the damaged area.

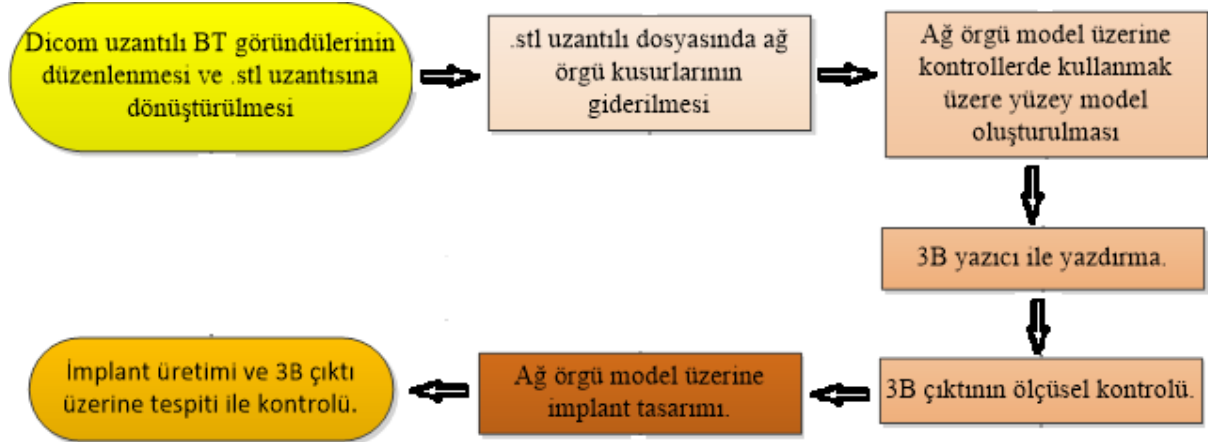
Key words : 3D Printer, Implant Design, Computerized Tomography, 3D Scanning

1. GİRİŞ

3 boyutlu yazıcı teknolojileri son yıllarda hızla gelişmiş ve kolay erişilebilir hale gelmiştir. Bu yazıcılar mühendislik, mimarlık ve endüstriyel tasarım alanlarında kullanılabilir. 3 boyutlu yazdırma, bilgisayar destekli tasarım programlarında dijital olarak oluşturulmuş 3 boyutlu modellerden gerçek dünyada yine üç boyutlu katı nesnelere üretme sürecidir. 3 boyutlu yazıcı teknolojilerinde dijital model katmanlara ayrılır ve her bir katman üst üste gelecek şekilde yazdırma işlemi gerçekleştirilir [1]. Bu çalışmada yarı profesyonel bir 3 boyutlu yazıcının biyomedikal alanda güvenle kullanılabilirliği inceleme altına alınmaktadır. Farklı üç boyutlu yazıcı teknolojileri var olup bu çalışmada Ergiterek

Biriktirme Yoluyla Modelleme (FDM – Fused Deposition Melting) tipi yazıcı tercih edilmiştir. Bu yazıcı tipinin tercih edilme sebebi açık kaynaklı olması ve maliyetlerinin diğer teknolojilere göre nispeten daha uygun olmasıdır.

Yapılan uygulamaların güvenilirliği açısından gerçek bir insanın tomografi görüntüleri üzerinden hareket edilmektedir. Uygulama çalışmasında sırasıyla Şekil.1’de belirtilen akış takip edilmekte ve detayları 3. Bölümde anlatılmaktadır.



Şekil 1. Çalışmada yapılan uygulamanın akışı

2. MEDİKAL UYGULAMALARDA BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIM ve 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI

Medikal alanlarda teknolojinin gelişimi ile birlikte teşhis ve tanı için kullanılan görüntüleme cihazlarının farklı disiplinlerde kullanılan teknolojiler ve ekipmanlar ile entegre edilebildiği görülmektedir. Mühendislik ve endüstriyel tasarımlarda kullanılan parametrik ve ağ örgü modelleme temelli BDT yazılımların medikal alanda kullanılan BT (Bilgisayarlı Tomografi) ve MRI görüntülerinin işlenmesinde kullanılabilirdiği bilinmektedir [2]. Bu durum kişiye özel implant, protez v.b. tasarımların yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Bunun yanı sıra medikal verilerden elde edilen veriler ile implant, protez ve dental tasarımlarının 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak imal edilmektedir. İmal edilecek olan implant ve protezlerin kişiye özel olması nedeniyle 3B yazıcıların bu alanda kullanımı bir avantaj teşkil etmektedir [3].

Medikal alanda farklı tekniklerde çalışan 3B yazıcılardan faydalanılmaktadır. Bu yazıcılara örnek olarak FDM, SLS, SLA, DLSM gibi yazıcılar gösterilebilir [4]. Bu yazıcılar ilgili detaylı bilgilere literatürde yapılan pek çok yayından ve üretici firmaların internet adreslerinden kolayca erişilebilmektedir, dolayısıyla bu makalede söz konusu yazıcıların özelliklerine değinilmemektedir. Bununla birlikte söz konusu yazıcılar ile daha çok ortez ve protez üretimi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Buna karşın doku ve organ üretimi amaçlı olarak biyoyazıcılar üzerine de çalışmalar yapıldığı görülmektedir [4, 5].

Modern imalat teknikleri ile karmaşık şekilli parçaların dar tolerans aralıklarında imal edilmesi mümkün olmamaktadır. 3B yazıcılar bu tür imal edilebilirlik sorununu ortadan kaldırarak günümüzde yaygın kullanılmaktadır. Diğer bir yandan, 3B yazıcıların endüstriyel alanda prototip üretimi yanında nihai ürün üretiminde de kullanıldığı bilinmekte ve bu açıdan bakıldığında ölçüsel olarak pek çok uygulamada yeterli hassasiyetlere erişildiği görülmektedir.

3B yazıcı parça üretildikten sonra boyutsal kontrolü çok önemlidir. Bu parçaların üretimi sonrasında metrolojik kontrolü her zaman kumpas mikrometre gibi kullanımı gelenekselleşmiş ölçüm aletleri ile yapılamamaktadır. Bu parçaların boyutsal kontrollerinin ve yüzey ölçümlerinin yapılabilmesi için ise yüksek hassasiyette ölçme tekniği metotlarına ihtiyaç duyulmaktadır [6], [7]. Bu tür durumlarda

Koordinat Ölçüm Makinaları (KÖM) ve 3B lazer tarayıcılar gibi ölçüm ekipmanları güvenilir sonuçlar vermektedir [8].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde Bilgisayarlı Tomografi (BT) görüntüsü alınan hastanın .stl uzantısına dönüştürülmesi, hasarlı kafatasının tasarımı, modellenmesi ve imalatı, imal edilen kafatası parçasının dijital ve gerçek boyutsal kontrolü anlatılmıştır.

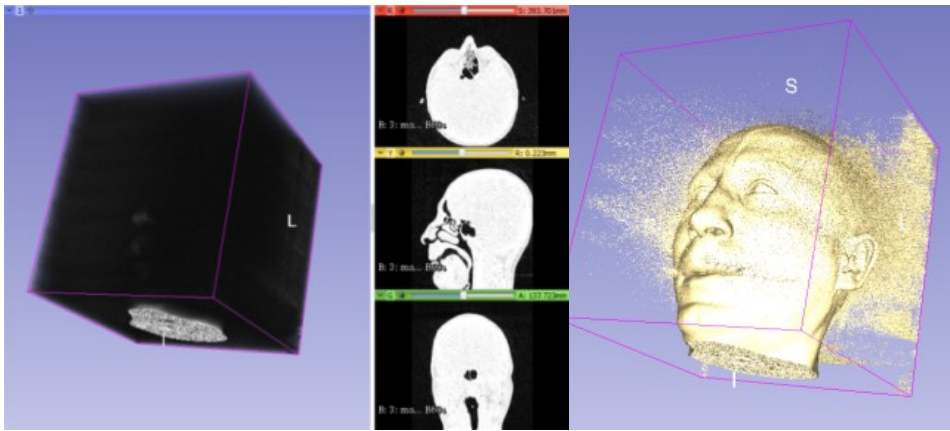
3.1 Tomografi Görüntüsünün .stl Uzantısına Dönüştürülmesi

Bilgisayarlı Tomografi (BT), röntgen ışınları (x ışınları) ile vücudu ince dilimler (3-10 mm) şeklinde kesitler ile inceleyen bir tekniktir [2]. Bu teknik sayesinde vücudumuzdaki hastalıkların tanısının konulması daha kolay olmaktadır. Teknolojinin ilerlemesi ile çok kesitli cihazlarının tarama hızları artmış, aldıkları kesit kalınlıkları azalmıştır. Diğer tarama yöntemlerine göre hastalık tanısında 10-15 saniye gibi kısa sürede yapılabilen tomografi yöntemine Multislice CT (Çok Kesitli Tomografi) denmektedir [9].

BT’de elde edilen görüntüler voksel şeklindedir [2]. Bu çalışmada modelleme işlemlerinde BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) programları ile tasarımda sıkça kullanılan 3B yazıcılar ile uyumlu ağ örgü modelleme ve parametrik katı modelleme yöntemleri kullanılacağından voksellerden oluşan yapının ağ örgü modele dönüştürülmesi gerekmektedir.

Bilgisayarlı tomografi görüntüsünün 3 boyutlu yazıcıya gönderilip çıktı alınabilmesi için seçilen Ergiterek Biriktirme Yoluyla Modelleme (FDM) yapan yazıcının çalıştığı “.stl” formatına çevirme işlemlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. “.stl” formatına çevirme işlemi yapabilmek için digital ortamda kullanılan 3D Mimics, Seg 3D 2 , 3D Slicer v.b. programlardan yararlanmak mümkündür. Bu çalışmada 3D Slicer programı tercih edilmiştir. Üzerinde işlem gerçekleştirilecek BT dicom dosyası 3D slicer programında açılmıştır.

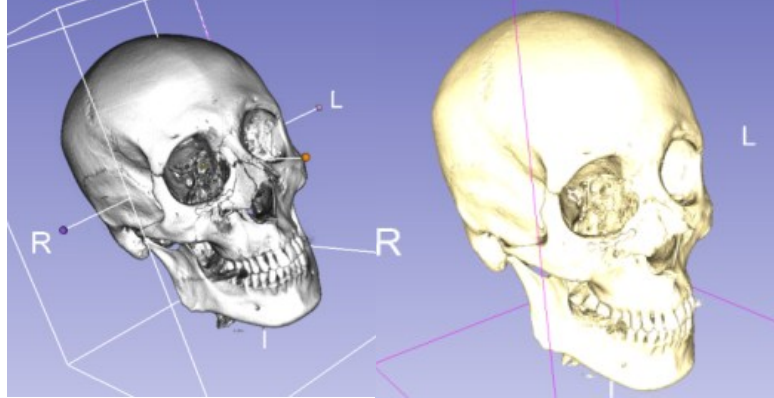
BT tarama görüntüsü hastanın sedyedeki konumuna göre doktorun BT istek formunda istediği, o bölge tümüyle taranmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü üzere taranan bölge dijital ortama, tüm detayları içerisinde nokta bulutu şeklinde bir küp içerisinde gelmektedir. Bu aşamada yapılması gereken, istenilmeyen bölgelerden kurtulmaktır. Hacim oluşturma (“Volume Rendering”) komutu sayesinde görüntü, istenilmeyen bu bölgelerden arındırılmıştır. “Hacim oluşturma” (“Volume Rendering”) komutu altında “BT görüntüsü kemiği” (“Ct Bone”) seçeneği kullanılmıştır.



Şekil 2. 3D Slicer Programında “Volume Rendering” Komutuyla Kesitin Alınması

Tarama görüntüsü “.stl” olarak kaydedilmeden önce son olarak hacmi kırp (“Crop Volume”) komutu altında değiştirme (“Shift”) seçeneği ile en uygun kesit aranmıştır. Bu çalışmada Şekil 3’de

kemik yapının istenilen hacimsel yoğunluğa sahip olunması sağlanmış ve çözünürlük işlemleri gerçekleştirilmiştir.

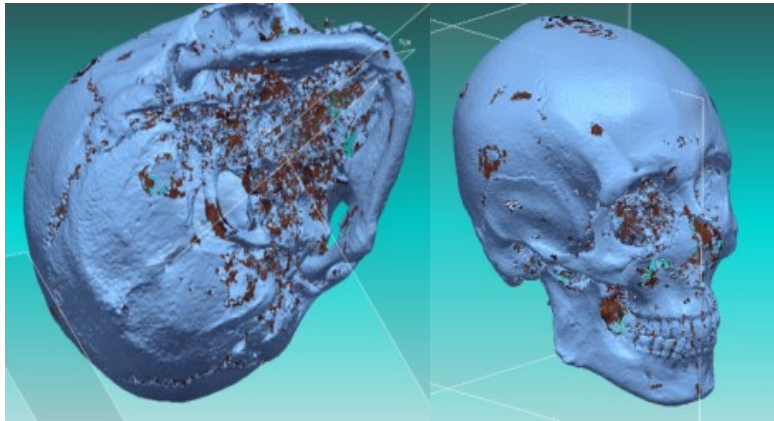


Şekil 3. Hacmi kırp komutu ile kemik dokunun temizlenmesi

Çalışma kaydedilmeden önce “Editör” seçeneği ile gerekli olan son düzeltmeler yapılmıştır. Son olarak farklı kaydet (“Save As”) komutu ile hastanın taranmış BT görüntüsü “.stl” formatına çevrilmiştir. 3D Slicer programını önemli bir özelliği, istenmeyen bazı dokulardan kolayca kurtularak, kemik yapısına ulaşılabilir. Bu sayede istenilen bölge kesit olarak alınır. Ayrıca program internet üzerinden ücretsiz olarak kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır.

3.2 3B Yazıcıda İmalat için Model Hazırlanması

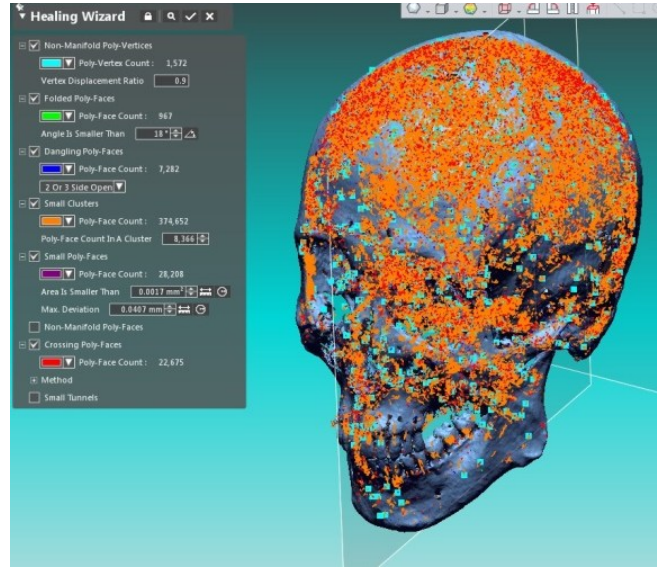
Yeniden tasarımda (rekonstrüksiyon) bir tersine mühendislik tasarım programı olan Geomagic Design X (2016) programı kullanılmıştır. Geomagic Design X programına başka programdan çağırma (“Import”) komutuyla elde edilen “.stl” formatı (ağ örgü-mesh görüntü) Şekil 4’ te görüldüğü gibidir. Çağrılan dosyada kafatası içerisinde çok fazla sayıda kümeler halinde sinir, bağ ve kırık dokular da bulunmaktadır. Bu program sayesinde bunların temizlenmesi ve istenilen bölgenin kesilerek hazırlanma safhaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Import edilen kafatasının Geomagic programındaki görüntüsü

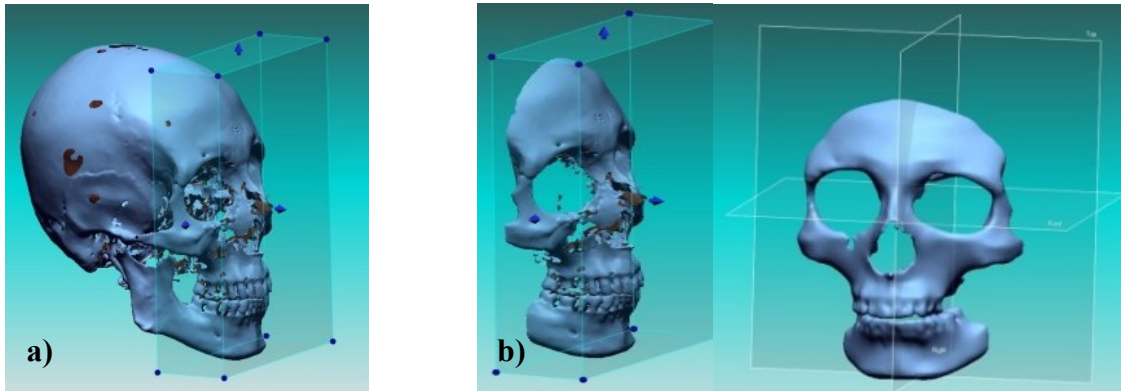
Dijital ortamdaki bu veriler nokta bulutu yerine ağ örgülerinden oluşmuştur. Hasarlı kafatasının dijital ortamda kapladığı dosya boyutu 224 MB olmuştur. Bu boyuttaki dosya bilgisayarda bir işlem yükü oluşturması istenmeyen bir durumdur. Tarama işleminden ve DICOM dosyasını “.stl” formatına çevirme işlemlerinden oluşan hatalardan kaynaklı, fazlalık ağ salkımları, iç içe geçmiş ağ örgüleri gibi kusurlar bulunmaktadır. Bu sebeple Şekil 5’ teki ağ örgüsü üzerinde kırmızı, turuncu ve açikmavi gibi renklerle görülen kusurların düzeltilmesi hem de dosya boyutunun azaltılması yoluna gidilmiştir. Bunun için iyileştirme sihirbazı (“healing wizard”), düzgünleştirme (smooth), delik doldurma (fill holes),

tekrar ağ örme (global remesh) ve ağ optimize etme (optimize mesh) komutları kullanılmıştır. Dijital ortamdaki mask model hatasız hale getirilerek, bu işlemler sonucunda dosya boyutu 3,33 MB' a düşürülmüştür.



Şekil 5. Turuncu renklerle görülen kafatası üzerindeki hatalar

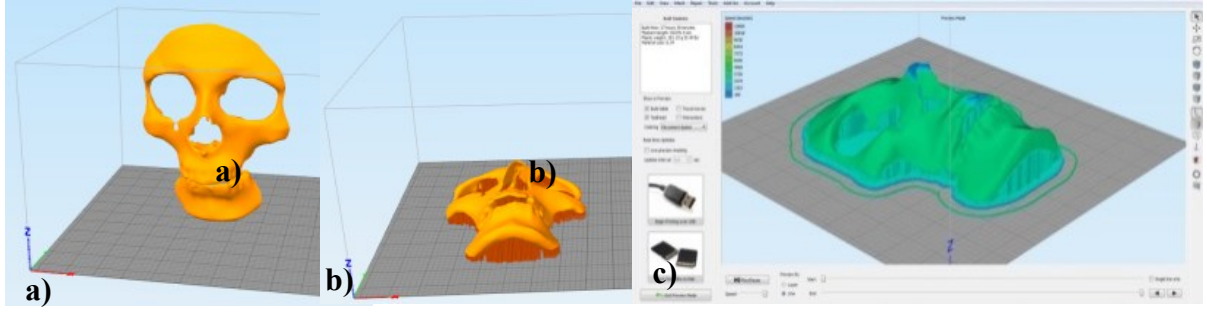
Ağ örgü kusurları düzeltilen modelin tamamının 3B yazıcıda yazdırılmasına ihtiyaç duyulmamış dolayısıyla “ağ örgü düzenleme sihirbazı” (“Mesh Buildup Wizard”) komutu ile Şekil 6a’da görüldüğü gibi hasarlı kafatasının sadece maske şeklinde hasarlı kısmının koparılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan düzenlemeler sonucunda elde edilen ağ örgüsü su geçirmez (watertight) diğer bir ifade ile tam kapalı hale getirilmiş ve 3B baskı işlemi için model hazır hale getirilmiştir. Ağ örgü modelin düzenlenmesinin son aşamasında ise hasarlı kafatasının 3B yazıcıya gönderilebilmesinde tablaya yerleştirme işleminde sorun yaşanmaması için koordinat sisteminin yeniden hizalama işlemi yapılmıştır. Hizalama işleminin gerçekleştirilmesi ile koordinat düzlemi Şekil 6 b’de görüldüğü gibi oluşmuş ve 3B yazıcıya gönderilebilir hale gelmiştir.



Şekil 6. a) “Mesh Buildup Wizard” ile kesit alma ve b) Koordinat hizalama işlemleri

3.3 3B Yazıcıda Üretim

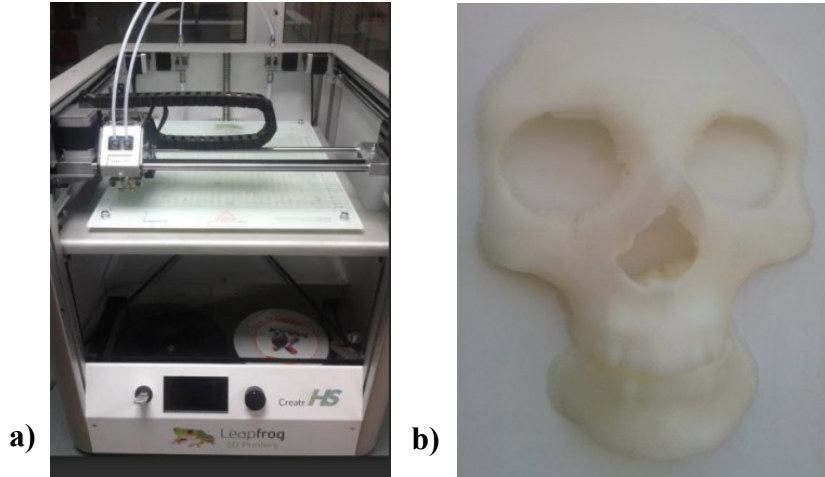
Bu işlemlerin ardından “.stl” uzantılı model dosyası sonra 3d yazıcı programına (Simplify3D) “.stl” olarak çağırılmış ve model yazdırma alanında uygun pozisyonda konumlandırılmıştır. Yazıcı tablası ile 45° üzeri açı yapan kısımlarda çıktıda eğrilmeler meydana gelmemesi için destek malzemesi atanmıştır. Bu işlemlere ilişkin ekran görüntüleri Şekil 7 a-b-c’ de görülmektedir.



Şekil 7. a) Tabla eksenine dik gelen model ve b) Tablaya hizalama işlemleri c) Yazdırma işlemi öncesi Simplify3D programı üzerindeki ekran görüntüsü

Yazdırma işleminde PLA malzeme kullanılmıştır. Yazdırma işlemi FDM tipi bir yazıcı olan Leapfrog Creatr HS 3B yazıcıda gerçekleştirilmiştir. Bu yazıcının seçilme sebebi; diğer yazıcı tiplerine göre nispeten düşük maliyetli olması ve aynı zamanda açık kaynaklı yazıcıların medikal uygulamalarda kullanımı için yeterli hassasiyette imalat gerçekleştirip gerçekleştirilemediğinin test edilmesidir.

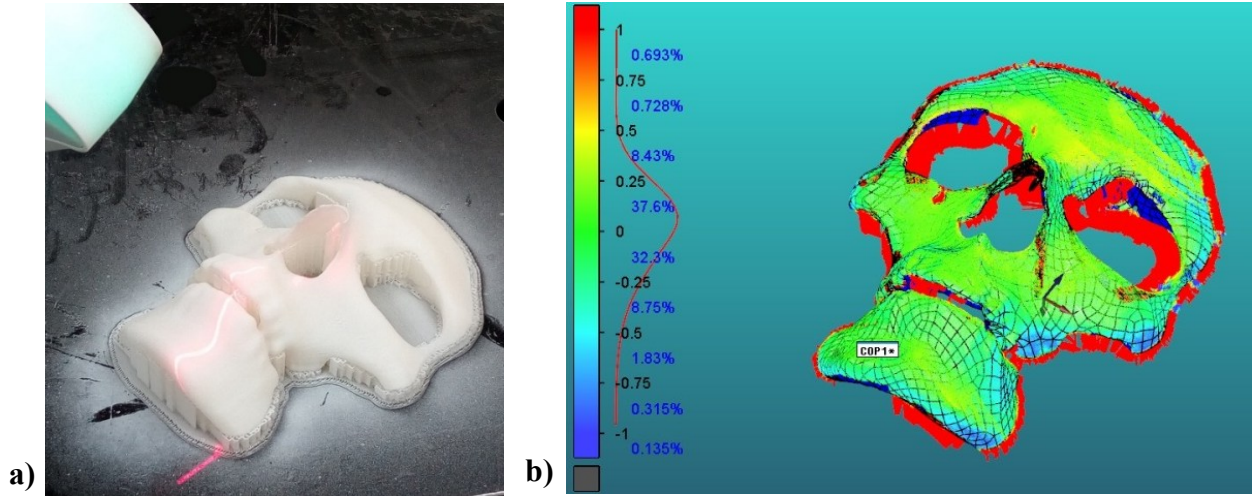
Modelin 3b yazıcıdan 1/1 olarak başarılı bir şekilde imalatı Şekil 8 a' da görülen yazıcıyla yaklaşık 31 saat sürmüştür. Yazdırma işlemi, 50 mikron katman kalınlığı, % 25 doluluk oranı ile yaklaşık 180 gram beyaz renkli PLA (Polilaktik Asit) malzeme kullanılarak yapılmıştır. Yazdırma işlemi sonucunda imal edilen model Şekil 8b'de görülmektedir.



Şekil 8. a) 3B Yazıcı ve b) Kafatasının Yazıcıdan alınmış çıktısı

3.4 Üretilen Parçanın Pc Dmis ile Kontrolü

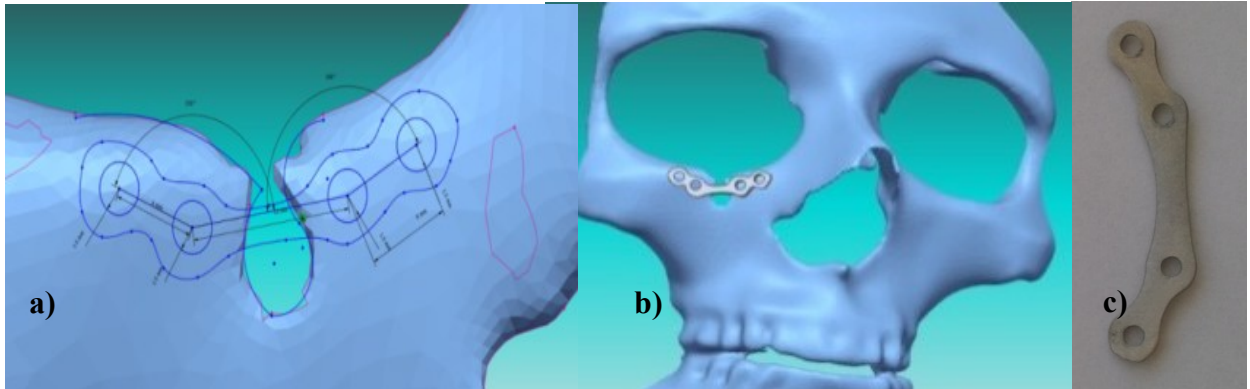
Yazıcı ile elde edilen çıktının ölçülerinin ne derece güvenilir olduğunu anlamak için çıktı ölçüleri ile dijital model ölçülerini karşılaştırma yoluna gidilmiştir. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için Geomagic Design X programında oluşturulmuş ağ örgü model üzerinde otomatik yüzey oluşturma komutu (“Auto Surface”) kullanılarak nurbs eğrileri temelli yüzey modellenmiştir. Bu yüzey model bir ölçme ve kontrol programı olan Pc-Dmis’te açılmıştır. Oluşturulan 3B çıktı “Romer 7325 Absolute Arm” Koordinat Ölçüm Makinasına (KÖM) entegre edilmiş 3B HP8.9 lazer tarayıcı ile taranmış ve sapma miktarları kontrol edilmiştir. Sapma miktarlarının ağırlıklı olarak $\pm 0,25$ mm olduğu görülmüş ve bu kontrole ilişkin görüntü Şekil 9’ da gösterilmiştir. Sapma değerlerinin düşük olması oluşturulacak implantın 3B çıktısı üzerinde denenebilirliği bakımından önem arz etmektedir.



Şekil 9. a) Pc-Dmis programında 3 boyutlu lazer tarayıcı ile tarama b) 3B çıktının ve BT görüntüsüyle çakıştırılması

3.5 Ölçüsel Uygunluğu Olan Kafatası Üzerine İmplant Tasarımı

Çıktısı alınan ve kontrolü yapılan 3B mask'ın üzerine tespit edilecek implantın tasarım ve imalatı aşamasına geçilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, Geomagic Design X programında oluşturulan ağ örgü üzerine, Şekil 10 a'da görüldüğü gibi eskiz düzlemleri ("sketch") açılarak hasarlı bölge için implant tasarımı yapılmıştır. Oluşturulan eskize ölçüler ve kalınlık verilerek Şekil 10 b'deki implant modeli tamamlanmıştır. Oluşturulan model ".dxf" uzantılı hale getirilip Ti-6Al-4V sac malzemedan lazerle kestirilerek hazırlanmıştır. Bu işleme ilişkin görüntüler Şekil 10 c' de gösterilmektedir.



Şekil 10. a) İmplant tasarımı b) Katı Modelleme c) Lazer ile Ti-6Al-4V malzemedan kesilmiş halleri
(a) İmplant design b) Solid modeling c) Lazer cut Ti-6Al-4V material)

Son işlem olarak 3B çıktı üzerinde hasarlı doku üzerine tasarlanan ve imal edilen implant denenerek uygunluğu tespit edilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. İmplantın 3B çıktı üzerine tespiti

4. SONUÇLAR

Bu çalışma ile, BT görüntülerinden elde edilen hasarlı kafatası yapısının 3B yazıcı ile baskısı yapılmış ve kusurlu bölgeye uygun implant tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V malzemeden elde edilen implant hasarlı kafatası kemiğine takılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir:

- BT verileri üzerinden BDT programları ile başarılı şekilde yeni dijital modeller üretilebilmektedir.
- FDM tipi 3B yazıcıların BT verilerinden elde edilen dijital modellerin 3B lazer tarayıcı ile kontrolünde yeterli hassasiyette üretilmesi gerçekleştirilebilmiştir.
- 3B yazıcıların protez, ortez vb. imalatı dışında BT tarama görüntülerinin çıktıları alınarak da cerrahi operasyonlara yardımcı şekilde kullanılabilir.
- BT verilerinden elde edilecek 3B çıktıların ile implant tasarımı öncesindeki tetkik amaçlı cerrahi operasyon zorunluluğunu ortadan kaldıracak ve sürecin hasta lehine iyileştirilebileceği görülmüştür.
- Hasarlı bölgedeki cerrahi operasyon sürecinin bu makaledeki gibi bir uygulama ile daha kısa sürede yapılabilecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, İzmir Tepecik Eğitim ve Araştırma Hastanesi'ne ayrıca Lazer Metal çalışanlarına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Kruth, J. P., Leu, M. C. and Nakagawa, T., "Progress in additive manufacturing and rapid prototyping", *Annals of the Cirp*, 47 (2): 525-540 1998.
- [2] Sarıtaş M.Z., 2015, *Adli Tıp Uygulamalarında 3d (Üç Boyutlu) Teknolojinin Kullanımı*, Pamukkale Üniversitesi Tıp Fakültesi Adli Tıp Anabilim Dalı, Uzmanlık Tezi 5s.
- [3] Yılmaz F., Koç E., 2016, *Biyomedikal Parçaların Eklemeli İmalatla (3d Baskı) Üretimi*, 1. Ulusal Biyomedikal Cihaz Tasarımı ve Üretimi Sempozyumu, 1-8s.
- [4] Aydın L., Küçük S. ve Kenar H., 2015, *Doku Ve Organ Biyo Yazdırma Amaçlı 3b Biyo Yazıcı Tasarımı Ve Geliştirilmesi*, Tıp Teknolojileri Ulusal Kongresi, 153-157s.
- [5] Lipson, H. and Kurman, M., 2013, *Fabricated: The New World of 3D Printing*, John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana, 105-128p.

- [6] Durakbasa, M.N., (2003). Geometrical Product Specifications and Verification for the Analytical Description of Technical and non-Technical Structures, TU, Abteilung Austauschbau und Messtechnik, Viyana.
- [7] Wolf, K., Roller, D. ve Schäfer, D., (2000). “An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology”, Journal of Materials Processing Technology, 107: 96-110.
- [8] Önçağ A.Ç, Tekcan Ç., Özden H., Mekanik Parçaların Tersine Mühendislik ile Modellenmesinin Değerlendirilmesi ve Bir Uygulama, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2017
- [9] İnternet: Özkan, R., Bilgisayarlı Tomografinin Temel Prensipleri, erişim: 27 Temmuz 2017, http://file.toraks.org.tr/TORAKSFD23NJKL4NJ4H3BG3JH/mse-ppt-pdf/ragip_ozkan.pdf