

Kırık Kemiklerin Kaynamasında Kullanılan İmplant Materyalin Giriş Aksını Konumlama Yöntemi ve 3D Slicer Eklenti Yazılımının Geliştirilmesi

Muhammed Fatih TALU^{1*}, Oktay BELHAN²

¹ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Ortopedi ve Travmatoloji Bölümü, Tıp Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye

*¹ fatih.talu@inonu.edu.tr, ² obelhan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/12/2024;

Kabul/Accepted: 20/05/2025)

Öz: Ortopedik travma sonucunda kemik yapısında meydana gelen kırılma veya yerinden oynama sorunlarının tedavisinde tel veya vida gibi implant uygulaması yapılmaktadır. İmplant malzemenin kırık kemiğe doğru aks ve açıda uygulanması, kemiğin hızlı ve doğru kaynaması için önemlidir. Ancak kemik yapısının 3boyutlu karmaşık bir geometriye sahip olması ve iç dolgusunda delik veya boşluk içerebilmesi gibi durumlarda implant malzemenin doğru aks ve açıda uygulanması oldukça güçtür. Bu makalede, CT veya MRI çekimleri girdi olarak alarak belirlenen kemik yapısına implant malzemenin uygulanacağı aks ve açıyı otomatik tespit edebilen bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntem, CT veya MRI verisinin yüklemesi, veriden kemik yapısının ayıklanması, belirlenen kırık kemik bölgesinin kesilmesi ve modelinin üretilmesi, modelin merkez hattının çıkarılması (Voronoi) ve çıkarılan noktalar üzerine doğru modelinin uydurulması (Line Regression) aşamalarını içermektedir. Uygulama çalışmaları 3D Slicer yazılımında ve Python programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Uygulama çalışmalarında RibFrac2020 veri kümesindeki CT taramaları kullanılmıştır. Uygulama sonuçları incelendiğinde, düzgün ve simetrik kemik yapılarında implant malzemenin sorunsuz bir şekilde yerleştirilebildiği, bununla birlikte dış geometrik yapısı düzgün olmayan veya iç kısmında boşluklar bulunan kemik yapılarında merkez hattında çatallaşmanın meydana geldiği görülmüştür. Bu durumda cerrah çatallaşan hatları eleterek tek bir ana hat kalmasını sağlar. Böylece geliştirilen yöntemin düzgün veya düzensiz kemik yapılarına uygulanabildiği ve implant malzemenin en uygun aks ve açısını hesaplayabildiği görülmüştür. Önerilen yöntemin implant uygulama doğruluğunu maksimize ettiği, böylece hasta ve cerrah konforunu artırma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Kırık kemik kaynama, ortopedi, implant, görüntü işleme, MRI, CT.

The Method of Positioning the Insertion Axis of The Implant Material Used in The Union of Broken Bones and the Development of the 3D Slicer Add-On Software

Abstract: In the treatment of fractures or dislocations in the bone structure as a result of orthopedic trauma, implants such as wires or screws are applied. Applying the implant material to the broken bone at the correct axis and angle is important for the bone to heal quickly and correctly. However, in cases where the bone structure has a complex 3D geometry and may contain holes or gaps in its inner filling, it is quite difficult to apply the implant material at the correct axis and angle. This article presents a method that can automatically detect the axis and angle at which the implant material will be applied to the determined bone structure by taking CT or MRI images as input. This method includes the stages of loading the CT or MRI data, extracting the bone structure from the data, cutting the determined broken bone area and producing its model, extracting the centerline of the model (Voronoi) and fitting the correct model on the extracted points (Line Regression). The application studies were carried out in the 3D Slicer software and the Python programming language. CT scans in the RibFrac2020 dataset were used in the application studies. When the application results are examined, it is seen that the implant material can be placed without any problems in smooth and symmetrical bone structures, however, in bone structures with irregular external geometric structure or with gaps in the interior, bifurcation occurs in the center line. In this case, the surgeon eliminates the bifurcated lines and leaves a single main line. Thus, it has been seen that the developed method can be applied to smooth or irregular bone structures and can calculate the most appropriate axis and angle of the implant material. It is evaluated that the proposed method maximizes implant application accuracy, thus has the potential to increase patient and surgeon comfort.

Key words: Fracture bone healing, orthopedics, implant, image processing, MRI, CT.

1. Giriş

Kapalı redüksiyon, ortopedik travma sonucu yerinden oynamış veya kırılmış kemikleri yerine oturtma işlemidir [1]. Bu işlem yapılırken hastanın cildinde herhangi bir kesme yapılmadan tel veya vida gibi bir implant malzeme kemik yapısına direk uygulanır. Uygulanan implant malzeme doğrusal düz bir geometriye sahiptir.

* Sorumlu yazar: fatih.talu@inonu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1166-8404, ² 0000-0002-7612-7345

Ancak kompleks ve üç boyutlu bir geometriye sahip kemik parçasına uygulanmaktadır. Bu nedenle uygulanma esnasında implant malzemenin kemik storunun en sağlam/kalın olduğu bölgeden geçmesi hedeflenir. İmplant malzemenin uygun aks ve açıda uygulanması kemikleri birbirine kaynama işleminde önem arz etmektedir. Cerrahın tecrübe eksikliğine bağlı yanlış aks ve açıda implantı uygulaması verimli bir kemik kaynama sağlamadığı gibi farklı komplikasyonların ortaya çıkmasına neden olduğu bilinmektedir.

Bununla birlikte anestezi ile uyutulmuş hastaya implant uygulamasında uygun hasta pozisyonu ayarlama işleminin oldukça güç olduğu bilinir. Farklı pozisyonlarda implant uygulamalarını gözlemlemek için Skopi adlı cihaz kullanılmaktadır [2]. Ergonomi açısından kullanım zorluğu bulunan bu cihazların en büyük dezavantajı ameliyat ortamına radyasyon yaymasıdır. Kemik yapısının gerçek zamanlı olarak görüntülenebilmesi için ortama yayılan radyasyon, hasta ve sağlık personelinin olumsuz yönde etkilemektedir.

Literatür incelendiğinde genellikle kemik kırığının olduğu bölgenin tespitine yönelik çalışmaların yapıldığı [3, 4] ve kırık bölge tespiti yapıldıktan sonra kırık türünün sınıflandırılması üzerinde araştırma çalışmalarının yapıldığı görülmektedir [5-7]. Kırık bölge tespiti ve kırık türü sınıflama işlemlerinin her ikisi içinde derin konvolüsyonel ağların yoğun bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bu makalede yapılan çalışma, kırık kemiği kaynaştırmak için kullanılacak implant malzemenin hangi aks ve açıda olması gerektiği ile ilgilidir. Bu açıdan literatürdeki mevcut çalışmalardan ayrılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, kapalı redüksiyon işleminde hastanın 3B kemik yapısını göz önüne alarak uygulanacak implant materyalinin aks ve açısını tespit edebilen nesnel bir yöntem geliştirmek ve bu yöntemin açık kaynak kodlu 3D Slicer yazılımı içerisinde çalışabilmesini sağlayacak yeni bir eklenti yazılım modülü üretmektir. Önerilen yöntem CT veya MRI veri türüne bağlı olmadığı için geliştirilen eklentide her iki veride kullanılabilir. Ortopedi uzmanlarının bu eklentiyi kullanmasıyla yukarıda bahsedilen radyasyon ve ergonomi dezavantajları elimine edilmekte ve hekim tecrübesine bağlılık ortadan kalkmaktadır. Çünkü birleştirilmesi hedeflenen kırık kemik yapıları üç boyutludur. Karmaşık bir geometriye sahip olabilmektedir. Bazı kemik yapılarının iç bölgelerinde dıştan görünmeyen deliks yapılar bulunabilir. Bu karmaşık geometri uzmanların en uygun yere aks yerleştirme işlemini güçleştirmektedir. Hekimin geçmiş tecrübesi burada kritik rol oynamaktadır. Yeterli tecrübeye sahip olmayan bir hekimin yanlış bölgeye uygulayacağı aks materyalinin radyasyonel komplikasyonların ortaya çıkmasına ve kemik yapılarının birbiriyle kaynaşmamasına neden olabilir.

Önerilen yöntem, CT veya MRI verilerinde cerrahın kemik yapısını bölütlemesi ve kırık bölgeyi işaretlemesiyle başlamaktadır. İlk olarak işaretlenen bölgedeki kemik yapıları kırılır. Hacimsel olan bu bilgi yüzey modeline dönüştürülür. İçi boş yüzey modeli Voronoi yöntemiyle üçgensel şekillerle örülerek iç model iskeleti elde edilir. Daha sonra hekim tarafından belirlenen giriş ve çıkış düğümlerindeki en kısa yol tespiti yapılarak merkez hattı düğümleri tespit edilir. Son olarak bu noktalardan geçen doğrusal model (doğrusal regresyon) tespiti yapılır. Sonuç olarak kemik storunun en kalın bölgesinden geçecek implant materyalinin aks ve açısı hesaplanabilir. Böylece önerilen yöntem literatürde yer alan kırık türü/yeri tespit çalışmalarından farklılık içermekte ve sadece ilgili kırık bölgeye aks'ın yerleştirilmesi problemine çözüm sunmaktadır.

Bu makale şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2'de, kırık kemikleri içeren veri kümesinin tanıtımı yapılmaktadır. Bölüm 3'te, önerilen yöntem kapsamlı bir şekilde ifade edilmektedir. Bölüm 4'te, önerilen yöntemin veri kümesi üzerinde elde edilen uygulama sonuçları paylaşılmıştır. Bölüm 5'te, makale çalışmasından önce yapılan önsel çalışmalardan bahsedilmektedir. Sonuç bölümünde, makale çalışması sonrası elde edilen nihai değerlendirmeler ifade edilmektedir.

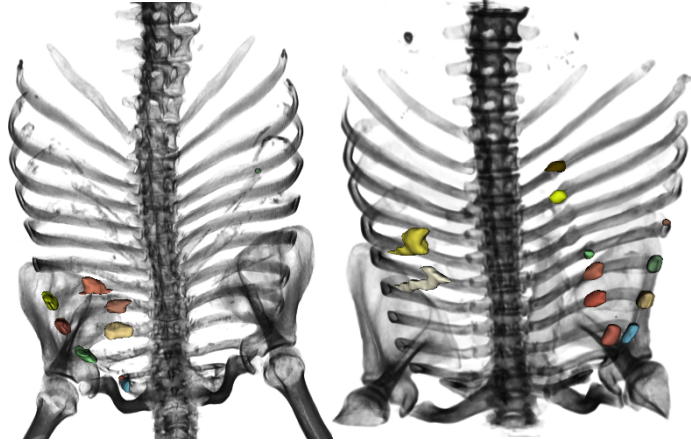
2. RibFrac2020 veri kümesi

Literatürde kemik kırığı ile ilgili birçok veri kümesi bulunmaktadır. Wrist-Fracture [8], MURA [9] ve Kaggle-Fracture [10] veri kümeleri kemik kırığı ile ilgili 2d X-ray görüntüler içerirken, RibFrac2020 veri kümesi [11] 3D CT verilerini içermektedir. Bu makalede önerilen yöntem 3D CT/MRI verilerinde çalışabilme özelliğine sahip olduğu için yapılan tüm deneysel faaliyetlerde RibFrac2020'deki 3d CT verileri kullanılmıştır.

RibFrac2020 [11] veri kümesi, kaburga kırığı teşhisinde hızlı ve yüksek doğruluk sağlayan yöntemlerin geliştirilmesi amacıyla hazırlanmıştır. Bu veri kümesinde toplam 660 CT taramasının yer aldığı ve bu taramalarda yaklaşık 5.000 kırık bölgenin bulunduğu görülmektedir. RibFrac2020 veri kümesinde yer alan iki farklı CT tarama örneği Şekil 1'de gösterilmektedir. Tarama üzerinde bulunan renkli yapılar kemik kırığının olduğu bölgelerdir. Bu bölgeler uzman hekimler tarafından manuel olarak belirlenmiştir. RibFrac2020 veri kümesinde bulunan veriler [12] numaralı linkten elde edilmiştir.

RibFrac2020 veri kümesinde yer alan üç farklı CT taramasına ait bilgiler uzamsal bilgiler Tablo 1'de verilmektedir. Taramaların aynı dilim kalınlığına (1,25), boyuta (512 x 512) ve minimum yoğunluk değerine (-3023) sahip olduğu, ancak dilim sayısı, x-y spacing değerleri ve maksimum yoğunluk değerlerinin farklı olduğu

görülmektedir. Veri kümesindeki örneklerde bulunan bu farklılıklar önerilen kemik birleştirme yönteminin kararlı çalışmasını engellemektedir.



Şekil 1. RibFrac2020 veri kümesindeki örnek CT taramaları ve kırık kemik bölgeleri (renkli yapılar).

Tablo 1. RibFrac2020'daki üç farklı CT verisine ait özellikler.

	Çekim boyutu	Çekim ölçüsü (Spacing)	Çekim aralığı (Intensity Range)
RibFrac1-image.nii	512 x 512 x 333	0,8262 x 0,8262 x 1,25	min: -3023, max: 1598
RibFrac2-image.nii	512 x 512 x 309	0,8008 x 0,8008 x 1,25	min: -3023, max: 1621
RibFrac3-image.nii	512 x 512 x 337	0,9063 x 0,9063 x 1,25	min: -3023, max: 3071

3. Önerilen yöntem

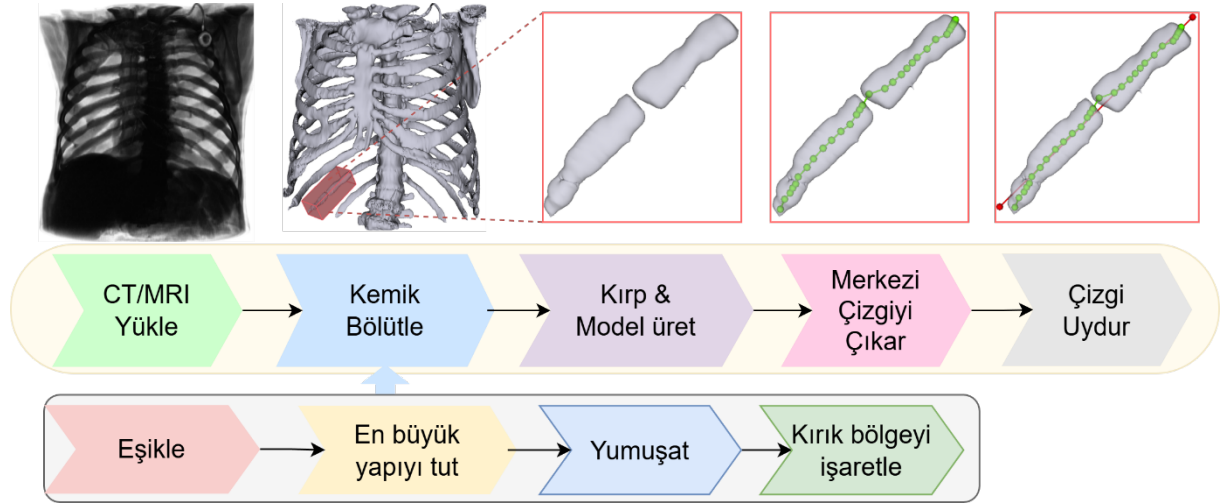
Kırık kemik parçalarını birleştirmek için önerdiğimiz yöntem beş aşamadan oluşmaktadır (bak Şekil 2). Bu aşamalar, CT veya MRI verisinin yüklemesi, veriden kemik yapısının ayıklanması, belirlenen kırık kemik bölgesinin kesilmesi ve modelinin üretilmesi, modelin merkez çizgi hattı noktalarının çıkarılması ve çıkarılan noktalar üzerine doğru modelinin uydurulması şeklindedir. Bu bölümde her bir aşamanın detaylarından kapsamlı bir şekilde bahsedilmektedir.

3.1. CT/MRI yükleme

Önerilen yöntem, üç boyutlu CT veya MRI verisini giriş olarak alabilir. Yöntemin çalışabilmesi için giriş veri çözünürlüğü (x ve y spacing), dilim kalınlığı (z spacing) veya ışık yoğunluk değerlerinde herhangi bir sınırlamaya ihtiyaç duyulmaz. Bununla birlikte giriş verisi, NIFTI veya DICOM uzantılara sahip olabileceği gibi, PNG, JPEG veya TIFF gibi uzantılardan oluşan bir görüntü koleksiyonu da olabilir. Bu nedenle önerilen yöntemin geniş bir kullanım alanına sahip olduğu rahatlıkla görülebilir.

3.2. Bölütlenme

Bu aşamada, yüklenen CT/MRI verisinden manuel kemik yapısı çıkarılmakta ve çıkarılan genel kemik yapısından sadece kaynama yapılacağı özel kemik bölgesi ayıklanmaktadır. Kemik yapısının otomatik çıkarılması veya kırıklı bölgenin otomatik tespiti gibi konular bu makalenin kapsamı dışındadır. Bu makalede bilinen 3boyutlu iki kırık kemik yapısının en uygun yerden kaynamasını sağlayacak aksın (trajeksiyonun) hesaplanabilmesidir. Bunun için üç alt operasyon ardışık bir şekilde gerçekleştirilir: Eşikleme, en büyük parçanın tutulması ve yumuşatma.



Şekil 2. Önerilen kırık kemik kaynama yönteminin genel şeması.

3.2.1. Eşikleme

CT verileri oldukça geniş bir değer aralığına (-3023, 3071 gibi) sahiptir. Bu geniş aralık içerisinde kemik yapısına ait değer aralığının eşiklenmesi gerekir. Bunun için kemik yapısının minimum ve maksimum yoğunluk değerlerinin bilinmesi ve bu değerlere göre filtre uygulanması gerekmektedir. Kemikğin sert yapısından dolayı maksimum filtre değeri genellikle CT değer aralığının üst sınırı olmaktadır. Ancak filtrenin alt sınır parametresini ayarlama işlemi zordur. Cihaz farklılıkları, çekim parametre farklılıkları, hastanın yaşına göre kemik sertliğinin değişimi gibi nedenlerden dolayı, alt sınır değeri değişken aralıklara sahiptir. Bu nedenle otomatik eşikleme yöntemleri yeterli performansı sağlayamazlar. Bu çalışmada klasik eşikleme algoritmalarını kullanan manuel bir eşikleme yaklaşımı tercih edilmiştir.

Klasik eşiklemede, global, lokal ve OTSU gibi seçenekler mevcuttur. Verideki zıtlık (kontrast) farklılıkları global eşikleme başarısız kılabilir. OTSU yöntemi, eşikleme noktalarını otomatik tespit etmek için kullanılır ve genellikle yoğunluk histogramında iki belirgin tepe olması durumunda iyi sonuçlar sağlar. Ancak CT'deki değer aralığının geniş olması ve histogramda birbiri içerisine geçmiş birçok tepenin bulunması, OTSU'nun kullanımını engeller. Bu çalışmada, bahsedilen problemlerin üstesinden gelmek ve minimum kemik yoğunluk değerini doğru tespit edebilmek için yerel eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Bunun için kaynamanın yapılacağı kemik üzerinde bir alan seçimi yapılır ve seçilen bölgedeki yoğunluk değerlerinin histogramı elde edilir. Histogramdaki alt ve üst sınırlara göre eşikleme gerçekleştirilir. Eşikleme sonucunda kemik yapıları CT içerisindeki diğer tüm yapılardan ayıklanmaktadır.

3.2.2. En büyük yapının tutulması

Genellikle eşikleme sonrası birbirinden bağımsız birçok irili ufaklı yapı ortaya çıkmaktadır. Bu yapılar içerisinde en büyük alana sahip olanı genellikle göğüs kafesini oluşturan kemik yapısıdır ve bunun haricindeki diğer yapıların elenmesi gerekir. 3B bir yapının alanı içerdiği vöksel sayısı olarak hesaplanır ve basit bir sayma işlemiyle rahatlıkla hesaplanabilir. Kemik yapısının haricindeki diğer yapıların elenmesi için alanı en büyük olan yapı tutulur ve diğerleri otomatik olarak elenir.

3.2.3. Yumuşatma

Eşikleme operasyonunun neden olduğu diğer bir olumsuzluk kemik yüzeylerinde pürüzlerin ve deliklerin ortaya çıkmasıdır ve düzgünleştirilmeye ihtiyaç duyulur. Bunun için yumuşatma operasyonu kullanılır. Median veya Gaussian yöntemleri yaygın kullanılan yumuşatma teknikleridir. Yumuşatma derecesi kernel parametresiyle belirlenir ve genellikle 3mm (3x3x3) boyutları tercih edilmektedir. Böylece uygulanan kernel maske boyutunun üç ekseninde (axial, sagittal ve koronal) 3'er piksel şeklinde olması sağlanmıştır. Daha yüksek değerler yapının yüzey eğriliklerinde bozulmaya neden olabilir. Median yönteminde, kernel içerisinde kalan yoğunluk değerleri

sıralanır ve ortanca değeri saklanır. Gaussian yönteminde, Denklem (1)'de gösterilen yumuşatma fonksiyonu kullanılmaktadır.

3.2.4. Kırık bölgenin işaretlenmesi

Kırık bölgenin otomatik tespiti konusu çalışma konusunun dışındadır. Bu çalışmada kırık bölgesindeki kemiklerin kaynama aksının optimal tespitine odaklanılmıştır. Bu nedenle göğüs kemiği bölütleme faaliyeti tamamlandıktan sonra cerrah tarafından kırık bölgenin seçimi yapılmaktadır. Manuel işaretlenen bölgeden (region of interest) alınan 3b kemik yapıları model üretim aşamasına iletilir. Bu çalışmada RibFrac2020 veri kümesinde cerrahlar tarafından işaretlenen kırık kemik yapıları kullanılarak önerilen yöntemin birçok farklı kırık kaynama durumundaki doğruluğu incelenmiştir.

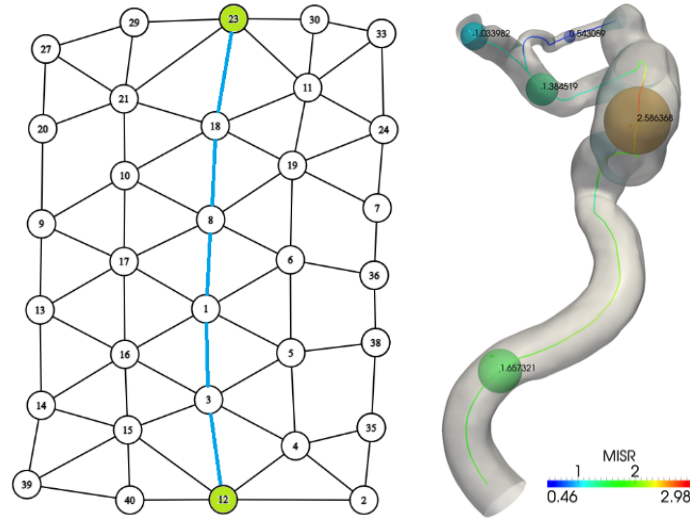
$$G(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

3.3. Model üretimi

CT/MRI verisindeki kemik yapısı bölütlendikten sonra kemik kırığı olan lokal bölgenin çıkarılması gerekir. Bu işlemi gerçekleştirmek için 3D Slicer [15], Itksnap [16], Mitk [17], Mricron [18] ve Brainbox [19] gibi yazılımlar kullanılabilir. 3D Slicer yazılımında bu işlem iki farklı araç kullanılarak gerçekleştirilebilir: 1) morfolojik kesme aracı, 2) ROI aracı. Bu araçların herhangi biriyle kırık kemik bölgesi belirlenir ve iki değerli (0 ve 1) hacimsel lokal kemik verisi 3B örgü modeline aktarılır. Örgü modellerinde veri, düğüm ve yüzeyler ile temsil edilir. Genellikle yoğun bir yapıya sahip olan bu modeller yüksek sayıda düğüm içerebilir. Bu durum, örgüler üzerinde yapılacak işlemlerin maliyetini arttırmaktadır. Bu nedenle düğüm sayısının azaltılması için sadeleştirme işlemi gerçekleştirilir. Ancak sadeleştirme oranının doğru belirlenmesi önemlidir. Yüksek bir değerin seçilmesi, örgü yüzeyindeki eğriliklerin kaybolmasına neden olurken, düşük bir değerin seçimi, örgüdeki düğüm sayısının yeterince azalmamasına neden olabilir. Bu çalışmada yapılan uygulama faaliyetleri göz önüne alındığında, kemik yüzey yapısı bozulmadan düğüm sayısının yaklaşık %80 oranında azaltılabildiği görülmüştür.

3.4. Yapı merkez hattının çıkarılması

Bu aşamada, 3B kemik modelinin (düğüm sayısı sadeleştirilmiş örgü modeli) merkez hattı elde edilmektedir. 3B nesne modellerinin merkez hattını çıkarmak için farklı yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlardan biri, başlangıç ve bitiş düğümleri arasında ağırlıklandırılmış en kısa yolun bulunmasıdır. Bu yaklaşım, yüzey modeli ve model üzerinde belirlenen iki noktayı (başlangıç ve bitiş) girdi olarak almakta ve Dijkstra algoritmasıyla [13] noktalar arasındaki en kısa yolu hesaplamaktadır. Şekil [3] (sol)'da 40 düğümlü bir örgü modeli gösterilmektedir. Bu örgünün 23 ve 12 numaralı başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki en kısa yol 'un merkez hattını nasıl temsil ettiği rahatlıkla görülebilmektedir. Bu yaklaşımın dezavantajı, başlangıç ve bitiş düğüm konumlarına olan bağımlılıktır. Eğer belirlenen bu noktalar merkezi hat üzerinde değilse sapmalar meydana gelebilir. Diğer bir yaklaşım, Voronoi diyagramlarının kullanımına dayanır. Voronoi yaklaşımında, kemik yapısının baş kısmından girip sonundan çıkan ve çapı maksimum olacak şekilde güncellenen kürenin merkez noktaları hesaplanır (bak Şekil [3] (sağ)). Yapı içerisine sığacak maksimum çaplı kürelerin orijin noktaları, merkez hattı temsil etmektedir. Bu noktaların birbirleriyle doğrusal birleşmesi sonucu merkezi hat elde edilir. Voronoi yaklaşımında başlangıç ve bitiş düğümleri kullanılması, hesaplanan çizgi hattında bozulmaya neden olmaz. Bu nedenle çalışmada Voronoi temelli merkezi hat belirleme yaklaşımı kullanılmıştır [14].



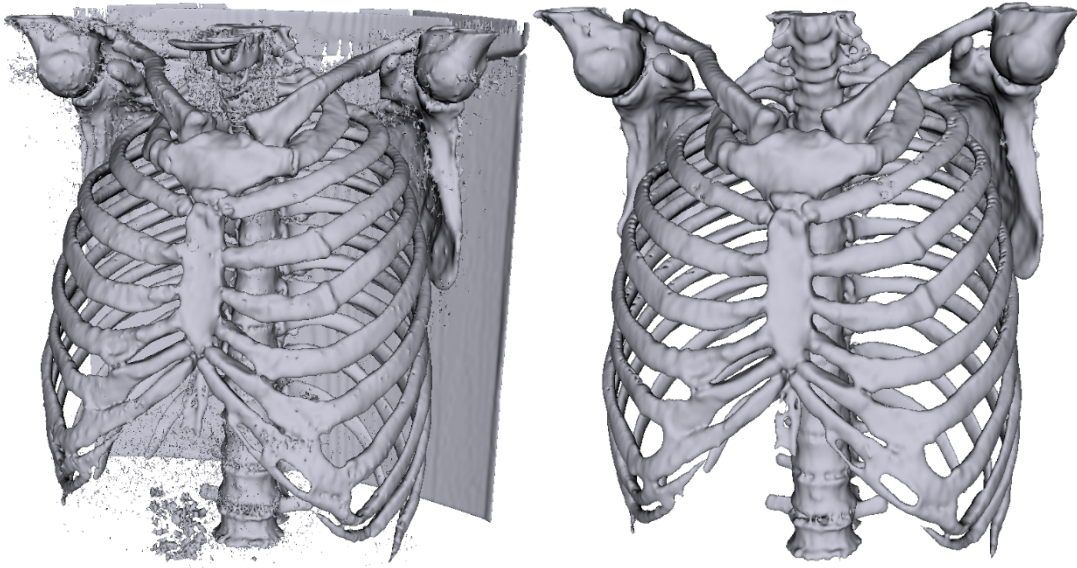
Şekil 3. Merkezi hattın tespiti. (sol) Dijkstra, (sağ) Voronoi [12].

3.5. Birleştirme materyali için çizgi uydurma

Kırık kemikleri birleştirme materyali, doğrusal bir yapıya sahiptir. Bu nedenle hesaplanan merkez çizgi hattı üzerindeki noktalardan geçecek doğrusal bir çizginin tespiti amaçlanmaktadır. Bunun için veri biliminde yaygın bir şekilde kullanılan “line fitting” algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma en küçük kareler tekniğini kullanmaktadır. Buna göre üç boyutlu uzayda yer alan nokta kümesine uzaklığı minimum olacak doğrusal çizginin parametrelerini tespit eder. Birleştirme materyali, hesaplanan bu doğrusal çizgi ekseninde uygulanabilir.

4. Uygulama sonuçları

Uygulama çalışmaları 3D Slicer yazılımında ve Python programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, kırık kemiklerin kaynaması için önerilen yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için CT göğüs verileri kullanılarak yapılan uygulamaların sonuçları paylaşılmaktadır. Buna göre RibFrac2020 veri kümesinden alınan CT göğüs verisinin yoğunluk aralığının [-1868.50-1598.00] olduğu görülmüştür. Oldukça geniş bir aralığa yayılan parlaklık değerleri içerisinde göğüs kafesi kemik yapının ayıklanabilmesi için uygun eşikleme işleminin yapılması gerekir. Birçok farklı kemik bölgesindeki lokal parlaklık değerlerinin toplanarak histogramlarının incelenmesi sonucu eşikleme işleminin alt sınır değeri 92 olarak belirlenmiştir. Eşikleme sonucu elde edilen iki seviyeli kemik yapısı Şekil [4] (sol) da gösterilmektedir. Sonuca bakıldığında ana kemik yapısının haricinde irili ufaklı birçok farklı yapının ortaya çıktığı görülmektedir. Ana kemik yapısının diğer yapılardan ayıklanabilmesi için hiçbirisi yapıların hacim özellikleri kullanılmıştır. En büyük hacimli yapı tutularak diğer küçük hacimli yapılar elenmiştir. Eşikleme ve eleme işlemi sonrası kemik yapısı üzerinde delikler ve pürüzlü dikenli yapılar görülmektedir. Daha yumuşak ve pürüzsüz kemik yapısının elde edilebilmesi yumuşatma operasyonu (Median operatörü) kullanılmıştır. Örnek bir CT verisi üzerinde ardışık gerçekleştirilen eşikleme, eleme ve yumuşatma operasyonlarının sonucu Şekil [4] (sağ) da gösterilmektedir.



Şekil 4. Kemik yapısının bölümlenmesi. (sol) Eşikleme sonucu, (sağ) Eşikleme, eleme ve yumuşatma sonucu.

Ham CT verisinden pürüzsüz göğüs kafesi kemik yapısı elde edildikten sonra kırık olan kemik bölgesinin bölümlenmesi aşamasına geçilmektedir. İlk olarak implant malzemenin uygulanacağı kemik bölgesinin (ROI) uzman hekim tarafından belirlenmesi gerekir. ROI belirlendikten sonra kırılma yapıları genel CT verisinden sadece kırık kemik bölgesinin çıkarılması sağlanır. RibFrac2020 veri kümesinde kırık bölgeler zaten uzman hekimler tarafından işaretlenmiş olduğu için bu çalışmada uzman hekim işaretlemesine gerek kalmadan kırık kemik bölgesinin kırılması işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil [5]'te, RibFrac2020 veri kümesinde işaretlenmiş altı farklı kırık kemik bölgesine ait kemik yapıları gösterilmektedir. Ayrıca kemik yapıları üzerinde merkez hattı çıkarma operasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen merkezi hat noktaları renkli olarak kemik yapıları üzerine çizilmiştir. Merkez hattı çıkarma modülü, giriş olarak model nesnesi kullanmaktadır. Oysa ROI kırılması sonucu hacimsel bir veri elde bulunmaktadır. Bu nedenle hacimsel verinin model (örgü) yapısına dönüşümü sağlanmıştır. Bu dönüşümle matris formundaki bilgi, düğüm ve yüzey bilgilerine dönüştürülmektedir. Hacimsel verinin model yapısına dönüşümü işlemi 3D Slicer yazılımında bulunmaktadır. Bu nedenle geliştirilen eklenti içerisinde ek yazılıma ihtiyaç duyulmadan rahatlıkla kullanılabilir.

Hacim-Model dönüşümü tamamlandıktan sonra **içi boş kemik yüzey modeli** elde edilmektedir. Model için küçük geometrik şekillerle (üçgenler) doldurulması ve böylece iç hacmi dolduran iskelet modelinin elde edilebilmesi işlemi Voronoi diyagramları [20] yardımıyla gerçekleştirilir. Voronoi diyagramı, kemik modelinin içyapı örgüsünün küçük geometrik şekiller ile temsil edilmesini sağlamaktadır. Merkezi hat tespit yazılımı belirlenen bu düğüm ve yüzeylerden oluşan yapı üzerinde çalışmaktadır. Voronoi, iç hacmi birçok noktaya (genellikle yüzeyden alınan örnekler) böler ve yüzey modelinin içinde bir iskelet yapısı (düğüm ve aygıtlardan oluşan çizge yapısı) üretir. Bu bölünmeler sonucu oluşan Voronoi hücrelerinin iskeleti, iç boşluğun geometrik merkezine en yakın geçen hatları oluşturur. Üretilen iskelet yapısı daha sonra merkez hattı çıkarımı için kullanılır. Merkez hattın çıkarılması için üretilen çizge modeli üzerinde bir başlangıç ve bir bitiş noktasının belirlenmesi gerekir. Daha sonra seçilen başlangıç ve bitiş düğümleri arasındaki en kısa yol (shortest path) Dijkstra [13] algoritmasıyla tespit edilir. Bu algoritma ile çizge üzerindeki belirli bir kaynak düğümden hedef düğüme olan en kısa yol tespit edilebilir. Bulunan en kısa yol üzerindeki düğüm noktaları merkez hat düğümlerini temsil eder. Bununla beraber Şekil [5]'te, kemik dış yapısından türetilen Voronoi iskeleti yeşilimsi bir renkle gösterilmektedir.

Şekil [5]'te altı farklı kırık kemik yapısında merkez hattı noktalarının tespiti ve bu noktalara çizgi uydurma işlemi sonuçları paylaşılmaktadır. 1, 2, 4 ve 6 numaralı kemik yapılarında merkez hattı tespitinde herhangi bir çatallaşmanın olmadığı, tek bir eğri hattının tespit edildiği, bu nedenle hat üzerindeki noktaların tek renkle ifade edildiği görülmektedir. 3 ve 5 numaralı kemik yapılarında ise merkez hat eğrisinde çatallaşmanın yaşandığı, üç farklı eğrinin ortaya çıktığı, her bir eğri noktalarının farklı renklerle boyandığı görülmektedir. Bu çatallaşmanın

bir nedeni, kemik yüzey geometrisinde bulunan farklılıklar olduğu görülmektedir. Düzgünlüğü bozan çıkıntılar ve kıvrılmaların olması merkezi hattın çatallaşmasına neden olmaktadır. Bir diğer neden, kemik içyapısında delik bulunmasıdır. Delik içermeyen dolgun kemik yapılarında çatallaşma olmazken, delikli yapılarda birden fazla çatal meydana gelmektedir. Hekim tarafından kemik yapısının dış geometrisi görülebilir, ancak içerisinde delik içerip içermediği bilinemeyeceği için implant malzemeyi doğru konuma uygulaması oldukça zordur. Önerilen yöntemde merkezi hat eğrileri hesaplanırken dış geometri ve iç delik yapıları bütüncül olarak değerlendirildiği ve buna göre iç örgü modeli oluşturulduğu için nesnel bir sonuç üretilmektedir.

Çatallaşmanın ortadan kaldırılması ve merkezi hattın ortaya çıkarılması için geliştirilen eklenti yazılımını kullanarak cerrah dışlanacak hatları belirleyebilmektedir. Bunun için dışlanacak hat üzerindeki herhangi bir düğümü seçmesi yeterlidir. Böylece silinecek hat belirlenir ve kalan hatların birleştirilerek merkezi hat elde edilir. Önerilen yaklaşımın son aşamasında, merkez hattı üzerinde bulunan 3B noktalara doğrusal bir çizgi uydurma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada Denklem 2’de gösterildiği gibi 3B uzayda N adet nokta bulunmaktadır.

$$\{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N \quad (2)$$

Bu nokta kümesine uydurulacak doğru Denklem 3’teki gibi ifade edilebilir:

$$r(t) = p + t \cdot v \quad (3)$$

$p \in \mathbb{R}^3$, N noktanın merkezini temsil eder ve sabittir. $v \in \mathbb{R}^3$, doğrunun yön vektörü temsil eder. $t \in \mathbb{R}$, v yön vektörüne bağlı parametrik değişkendir. Amaç her noktanın doğruya dik izdüşüm mesafesinin karesi toplamını minimize etmektir. Karesel toplam Denklem 4’te ifade edildiği gibi formüleleştirilebilir.

$$L(v) = \sum_{i=1}^N \|r_i - p - [(r_i - p) \cdot \hat{v}] \hat{v}\|^2 \quad (4)$$

Dolayısıyla problem Denklem 5’te gösterilen optimizasyon problemi haline dönüşmektedir.

$$\min_{v \in \mathbb{R}^3} L(v) \text{ şart } \|v\| = 1 \quad (5)$$

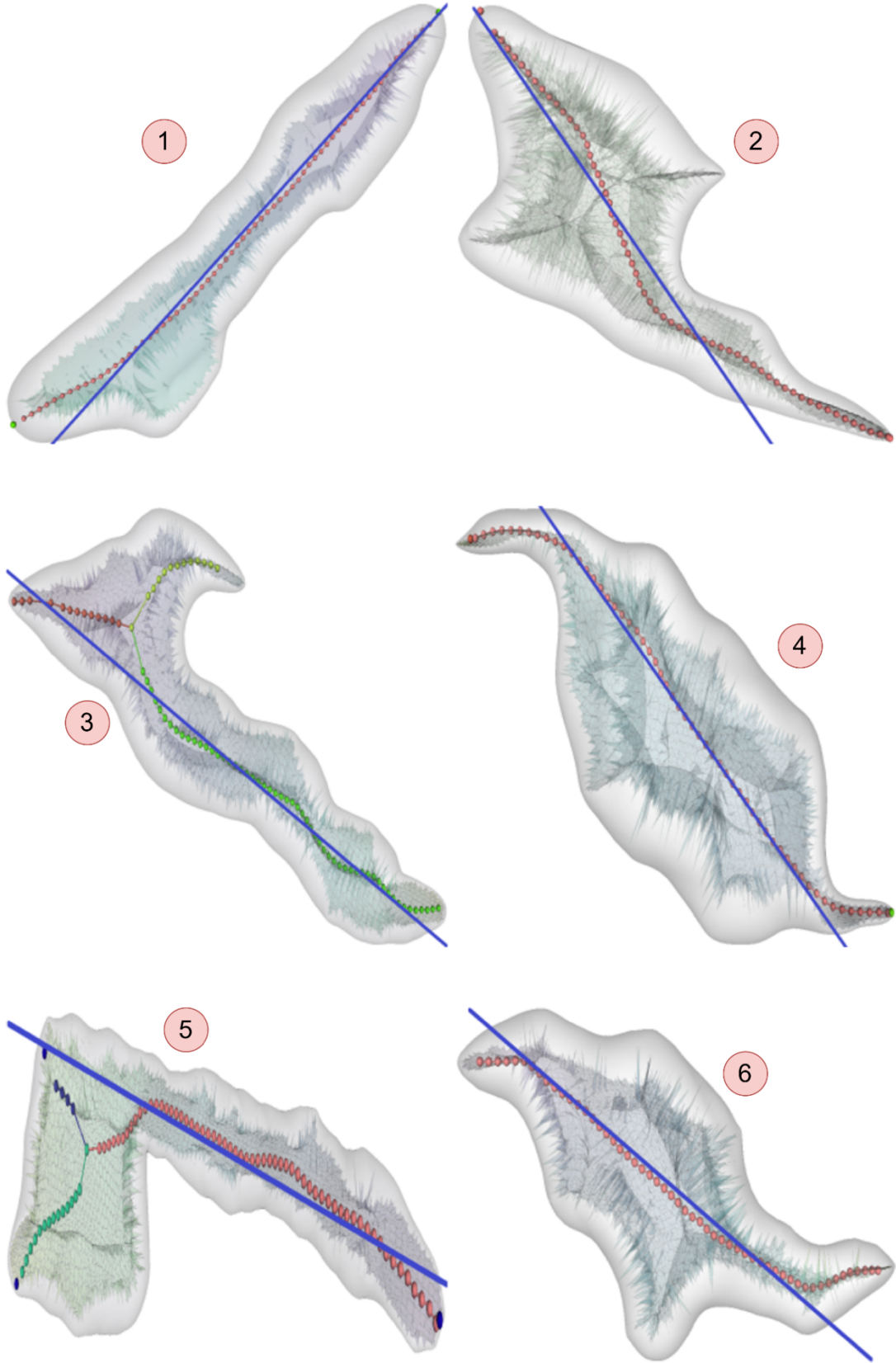
Bu minimizasyon probleminin çözümü için doğrudan SciPy.optimize kütüphanesinde bulunan minimize fonksiyonu kullanılmıştır. Bu işlemin sonucunda elde edilen doğru örnekleri, Şekil [5]’te kalın mavi renkle gösterilmektedir. Kemik yapıları üzerine çizilen bu doğru, kırık kemiklerin birleştirilmesinde kullanılan implant malzemenin hangi aks ve açıda uygulanması gerektiği noktasında cerraha rehberlik etmektedir. Böylece implant veriminin artırılması ve kemik kaynaşım sürecinin minimize edilmesi hedeflenmektedir.

Doğrulama Faaliyeti

İmplant malzemenin uygulama doğruluğunun sayısal olarak anlaşılabilmesi için çizgi uydurma işleminin ortalama başarımı hesaplanmıştır. RibFrac2020 veri kümesinde yaklaşık 5000 adet kırık bölge bulunmaktadır. Önerilen yöntem manuel işaretlemelere bağımlı olduğu için tüm kırıklar üzerinde işlem yapmak yüksek maliyet (uzun bir zaman ve iş yükü) gerektirir. Bu nedenle örnekleme yapılarak 20 farklı kırık bölgesi üzerinde doğrulama çalışması yapılmıştır. Geliştirilen 3D Slicer eklenti yazılımı kullanılarak her bir kırık yapının kemik bölütleme, Voronoi iskeleti inşa etme, merkezi hat noktalarını tespit etme ve çizgi uydurma işlemleri sırayla gerçekleştirilmiştir. Uydurulan her bir çizginin Denklem 6’da ifade edilen R^2 değeri hesaplanarak başarı ölçütleri hesaplanmıştır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

y_i , model noktasını, $\hat{y}_i$ ilgili model noktasının tahmini değerini, $\bar{y}$ ise ortalama tahmin değerini gösterir. R^2 değeri daima 0 ile 1 arasında sonuç üretir ve 1’e yakın değerler çizgi uydurmanın başarıyla gerçekleştiğini ifade eder. 20 farklı kırık yapının ortalama çizgi uydurma başarımı $R^2 = 0.83$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer implant malzemenin kemik yapısının merkez hattını önemli oranda temsil gücüne sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. 3B kemik yapılarının noktasal merkezi hattı (noktalar) ve bu hatta aksın (mavi çizgi) uydurulması.

Önerilen yöntemin sınırları

Kırık kemik yapılarının kaynaması için uygulanan implant malzemenin uygun açı ve konuma yerleştirilmesi ile ilgili önerilen yöntemin bazı sınırları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar aşağıda maddeler halinde listelenmektedir:

1. CT/MRI verilerindeki kemik yapıları manuel bölütlenmektedir. Literatürdeki otomatik kemik bölütleme yöntemlerinin geliştirilen eklenti yazılımına entegrasyonu hiç şüphesiz Ortopedi uzmanlarının iş yükünü azaltabilir.
2. Kemik yapısındaki kırık bölge cerrah tarafından manuel işaretlenmektedir. Özellikle derin öğrenme modelleriyle kırık bölgelerinin otomatik tespitini yapan çalışmaların entegrasyonu yapılan çalışmayı daha ileriye taşıyabilir.
3. Kemik yapısının içinde bulunan delikler ve dış geometrik farklılıklar merkez hattının inşasında çatallaşmalara neden olmaktadır. Bu durumda cerrahın istenmeyen çatalları elemesi gerekir. Bu eleme işlemi manuel gerçekleştirilmektedir. Otomatikleştirilmesi yönünde çalışmalar yapılabilir.

Şüphesiz listelenen bu sınırlamaların ortadan kaldırılmasıyla kullanımı daha kolay ve esnek bir eklenti yazılımı üretilebilir. Ancak manuel müdahaleleri içermesine rağmen mevcut geliştirilen yazılımın implant malzeme yerleştirme operasyonunda Ortopedi uzmanlarına önemli düzeyde rehberlik edebileceği değerlendirilmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada ortopedik travma sonucunda kırılan veya yerinden oynayan kemik yapılarının birleştirilmesi işleminde cerraha yardımcı olacak ve birleştirme materyalini kemik yapısına en uygun pozisyonda uygulanabilmesi için doğru aks ve açının tespitini yapabilecek yardımcı bir yazılım üretilmiştir. Bu yazılım 3D Slicer ortamında gerçekleştirilmiş ve Python programlama dili kullanılarak yeni bir eklenti üretilmiştir. Slicer'daki bu eklentiye kullanan bir cerrah, CT veya MRI verilerindeki kırık kemik yapılarını seçebilir ve implant malzemeyi seçilen kemik yapısına uygulaması sonucunda en uygun aks ve açının tespitini yapabilir.

Geliştirilen yazılımın uygulama faaliyetleri için RibFrac2020 veri kümesindeki CT taramaları kullanılmıştır. Önerilen yöntemin kırık kemik yapılarındaki düzensizlikler, kemik yapısının 3B olması, kemiğin dış geometrik yapısının oldukça karmaşık olması, iç kemik örgüsünde deliklerin veya boşlukların olması gibi birçok zorluğun üstesinden gelerek implant malzeme için en uygun aks ve açıyı hesaplayabildiği görülmüştür. 20 hasta verisi üzerinde yapılan doğrulama faaliyeti sonucunda implant malzemenin merkezi hatta oturma doğruluğu $R^2 = 0.83$ düzeyinde olduğu görülmüştür.

Bir sonraki çalışmada geliştirilen yazılımın gerçek zamanlı olarak çalışabilir hale dönüştürülmesi ve ameliyat sürecinde cerraha yardımcı bir araç olarak kullanılması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından ARDEB 1001 projesi ve 122E495 numarası ile desteklenmiştir. Çalışmamızın gerçekleştirilmesinde desteğin kritik bir rolü bulunmaktadır. Bu nedenle verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a minnettarız. O. B. fikir sahibi, M.F.T ise deneyleri gerçekleştirdi. Her iki yazar sonuçları yorumladı ve makaleyi birlikte yazdı.

Kaynaklar

- [1] Özel Adana Ortadoğu Hastanesi, Kapalı Redüksiyon. Retrieved from <https://www.ortadoguhastanesi.com.tr/kapali-reduksiyon>. Erişim tarihi: 10.01.2025.
- [2] Promedis, G. Skopi Cihazları. Retrieved from <https://www.promedis.com.tr/tr/urunler/c-kollu-skopi-cihazı>. Erişim tarihi: 02.04.2025.
- [3] Ma Y, Luo Y. Bone fracture detection through the two-stage system of Crack-Sensitive Convolutional Neural Network. Informatics in Medicine Unlocked. 2021, 22, 100452.
- [4] Shaghayegh Tabarestani AA, Ezoji M. Bone Fracture Detection and Localization on MURA Database Using Faster-RCNN. 2021 7th International Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS), 1–6.
- [5] Lind A, Others. Artificial intelligence for the classification of fractures around the knee in adults according to the 2018 AO/OTA classification system. PLoS ONE, 2021, 16(4). doi:10.1371/journal.pone.0248809
- [6] Chen Y. Classification of Atypical Femur Fracture with Deep Neural Networks (Dissertation). 2019. Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-255677>.

- [7] Y Qi, et al., “Ground Truth Annotated Femoral X-Ray Image Dataset and Object Detection Based Method for Fracture Types Classification” in IEEE Access, , pp. 189436-189444, 2020.
- [8] Malik H. Wrist Fracture - X-rays. Mendeley Data. 2020.
- [9] Pranav Rajpurkar, Jeremy Irvin, Aarti Bagul, Daisy Ding, Tony Duan, Hershel Mehta, Brandon Yang, Kaylie Zhu, Dillon Laird, Robyn L. Ball, Curtis Langlotz, Katie Shpanskaya, Matthew P. Lungren, & Andrew Y. Ng. 2018. MURA: Large Dataset for Abnormality Detection in Musculoskeletal Radiographs.
- [10] Srinivas V. Kaggle-Fracture. 2021. Retrieved from <https://www.kaggle.com/datasets/srinivasvishal7/fracture>.
- [11] Jin, Liang et al. Deep-learning-assisted detection and segmentation of rib fractures from CT scans: Development and validation of FracNet. eBioMedicine. 2020, Volume 62, 103106.
- [12] Piccinelli M. Description of geometric indices. Retrieved from <http://ecm2.mathcs.emory.edu/aneuriskweb/description>. Erişim tarihi: 01.03.2025.
- [13] Cormen, T. H.. Introduction to Algorithms (Second ed.). The MIT Press. Cambridge, Massachusetts London, England. 2001, 595–601.
- [14] Bai X. Voronoi Diagram Based Heterogeneous Circuit Layout Centerline Extraction for Mask Verification. 2022. pp. 172–177. 2022 27th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC).
- [15] 3D Slicer. Link: <https://www.slicer.org/>. Erişim Tarihi: 09.10.2024.
- [16] Itksnap. <http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php>. Erişim Tarihi: 20.12.2024.
- [17] Mitk. [https://www.mitk.org/wiki/The_Medical_Imaging_Interaction_Toolkit_\(MITK\)](https://www.mitk.org/wiki/The_Medical_Imaging_Interaction_Toolkit_(MITK)). Erişim Tarihi: 24.10.2024.
- [18] Mricron. <https://people.cas.sc.edu/rorden/mricron/index.html>. Erişim Tarihi: 04.02.2024.
- [19] Brainbox. <https://people.cas.sc.edu/rorden/mricron/index.html>. Erişim Tarihi: 04.02.2024.
- [20] Akça Z, Çalıř C. On The Voronoi Diagram and Taxicab Plane. Erzincan University Journal of Science and Technology. 2021. 14(1), 175-181.
- [21] RibFrac. <https://ribfrac.grand-challenge.org/publication/>. Erişim Tarihi: 16.10.2024.