



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**FARKLI SEGMENTASYON METOTLARI İLE KOYUN KAFA
BÖLGESİNDE YER ALAN ANATOMİK YAPILARIN
MORFOMETRİK VE VOLUMETRİK VERİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Muharrem AYVALI

**VETERİNERLİK ANATOMİSİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Caner BAKICI**

**ANKARA
2026**

**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ANKARA ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI SEGMENTASYON METOTLARI İLE KOYUN KAFA
BÖLGESİNDE YER ALAN ANATOMİK YAPILARIN
MORFOMETRİK VE VOLUMETRİK VERİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Muharrem AYVALI

**VETERİNERLİK ANATOMİSİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

DANIŞMAN

Doç. Dr. Caner BAKICI

**Bu tez, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün TDK-2024-3461
proje numarası ile desteklenmiştir.**

ANKARA

2026

ETİK BEYAN

Ankara Üniversitesi
Sağlık Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

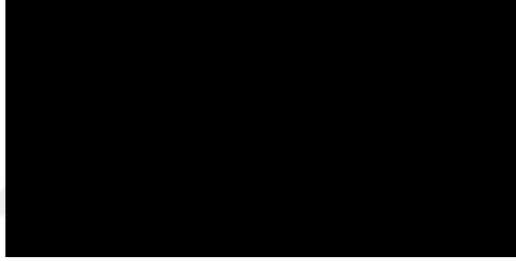
Doktora tezi olarak hazırlayıp sunduğum “Farklı Segmentasyon Metotları ile Koyun Kafa Bölgesinde Yer Alan Anatomik Yapıların Morfometrik ve Volumetrik Verilerinin Değerlendirilmesi” başlıklı tez; bilimsel ahlak ve değerlere uygun olarak tarafımdan yazılmıştır. Tezimin fikir/hipotezi tümüyle tez danışmanım ve bana aittir. Tezde yer alan deneysel çalışma/araştırma tarafımdan yapılmış olup, tüm cümleler, yorumlar bana aittir.

Yukarıda belirtilen hususların doğruluğunu beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Muharrem AYVALI

Tarih: 28/01/2026

İmza:



KABUL VE ONAY

Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü
Veterinerlik Anatomisi Anabilim Dalı'nda,
Muharrem AYVALI tarafından hazırlanan
“Farklı Segmentasyon Metotları ile Koyun Kafa Bölgesinde Yer Alan Anatomik Yapıların
Morfometrik ve Volumetrik Verilerinin Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması
aşağıdaki jüri tarafından DOKTORA TEZİ olarak OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile kabul
edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 28.01.2026

İmza

Prof. Dr. R. Merih Hazıroğlu
Ankara Üniversitesi
Jüri Başkanı

İmza

Prof. Dr. Çağdaş OTO
Ankara Üniversitesi

Raportör

İmza

Doç. Dr. Beste DEMİRCİ
Kastamonu Üniversitesi

Üye

İmza

Doç Dr. Caner BAKICI
Ankara Üniversitesi

Üye

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Remzi Orkun AKGÜN
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Raportör

Tez hakkında alınan jüri kararı, Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu tarafından onaylanmıştır.

İmza

Prof. Dr. Fügen Atan
Sağlık Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Farklı Segmentasyon Metotları ile Koyun Kafa Bölgesinde Yer Alan Anatomik Yapıların Morfometrik ve Volumetrik Verilerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışma, Romanov koyunlarına ait baş bölgesi anatomik yapılarının bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) verileri üzerinden altı farklı segmentasyon yöntemi kullanılarak elde edilen morfometrik ve hacimsel özelliklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi amaçlandı. Özellikle mandibula, molar dişler ve beyin; anatomik ve klinik önemleri nedeniyle seçildi. Altın standart olarak kabul edilen manuel segmentasyon, yarı otomatik ve otomatik segmentasyon yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Morfometrik ölçümler (uzunluk, genişlik ve yükseklik), hacim ve yüzey alanı verileri ile segmentasyon için harcanan süre kantitatif yönden değerlendirmeye alınmıştır. Ayrıca her yönteme ait üç boyutlu modeller üzerinden yapılan görsel analizlerle nitel değerlendirme yapıldı. Ortaya çıkan bu sonuçlar, değerlendirilen tüm parametreler açısından segmentasyon yöntemleri arasında anlamlı istatistik farklar olduğunu gösterdi ($p < 0,05$). Fazla zaman almış olsa da en gerçekçi ve detaylı modeller manuel segmentasyonla elde edildi. Yarı otomatik segmentasyon ve dilimler arası doldurma algoritması, manuel yöntemle nicel olarak yakın sonuçlar vermiş ve diğer yarı otomatik algoritmalar ve otomatik yöntemlere göre daha yüksek görsel doğruluk göstermiştir. Otomatik eşikleme ve büyüme tabanlı segmentasyonlar ise zamandan tasarruf sağlamalarına rağmen, fazla veya eksik modellemelere neden oldu, yapısal gerçekliği ve ölçüm güvenilirliğini düşürdü. Nitel değerlendirmelerde; delikler, çıkıntı-oluk yapıları ve diş konturlarının manuel segmentasyon modellerinde en iyi şekilde korunduğu gözlemlendi. Sonuç olarak, segmentasyon yöntemi seçiminin morfometrik ve hacimsel verilerin anatomik doğruluğu ve güvenilirliği üzerinde doğrudan etkili olduğu ortaya kondu. Zaman ve doğruluk açısından denge sunan yarı otomatik yöntemler belirli durumlar için uygun olsa da yüksek hassasiyet gerektiren anatomik modellemelerde manuel segmentasyonun vazgeçilmez olduğu sonucuna varıldı.

Anahtar Sözcükler: 3B modelleme, hacimsel analiz, koyun anatomisi, morfometri, segmentasyon

SUMMARY

Evaluation of Morphometric and Volumetric Data of Anatomical Structures in the Sheep Head Region Using Different Segmentation Methods

This study was aimed to evaluate and compare morphometric and volumetric characteristics of anatomical structures in the head region of Romanov sheep using six different segmentation methods applied to computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) data. Specifically, the mandible, molar teeth, and brain were selected due to their anatomical and clinical relevance. Manual segmentation, considered the gold standard, was compared to semi-automatic and automatic segmentation methods. Morphometric measurements (length, width, and height), volumetric and surface area data, as well as the time required for segmentation, were quantitatively assessed. Furthermore, qualitative evaluations based on 3D model visuals were performed to determine the anatomical realism of each method. The results indicated significant statistical differences between the segmentation techniques in terms of all parameters evaluated ($p < 0.05$). Manual segmentation consistently provided the most anatomically realistic and detailed models, albeit requiring the most time. Semi automatic segmentation and fill between slices algorithm yielded results that were quantitatively close to the manual method and showed higher visual fidelity than other semi automatic algorithms and automatic methods. Automatic thresholding and Grow-based methods, while time-efficient, resulted in over- or under-segmentation, affecting structural realism and measurement reliability. Qualitative evaluations revealed that fine anatomical details such as foramina, gyri-sulci structures, and dental contours were best preserved in manual models. In conclusion, the study demonstrates that segmentation choice significantly impacts the anatomical accuracy and reliability of morphometric and volumetric data. While semi-automatic methods may offer a good balance between time and accuracy, manual segmentation remains essential for high-precision anatomical modeling, especially in veterinary and comparative anatomy research.

Keywords: 3D modeling, morphometry, segmentation, sheep anatomy, volumetric analysis

İÇİNDEKİLER

Etik Beyan	ii
Kabul ve Onay	iii
Özet	iv
Summary	v
İçindekiler	vi
Önsöz	viii
Simgeler ve Kısaltmalar	x
Şekiller	xi
Çizelgeler	xii

1.GİRİŞ

1.1. Anatomide Morfometrik ve Hacimsel Analizlere Genel Bakış	1
1.2. Tıbbi Görüntüleme ve Üç Boyutlu Modellemedeki Gelişmeler	2
1.3. Veteriner Hekimlik ve Karşılaştırmalı Anatomide Doğru Ölçümün Önemi	3
1.4. Anatomide Üç Boyutlu Görüntüleme ve Modelleme	3
1.4.1. Görüntüleme Tekniklerinin Evrimi: İki Boyutludan Üç Boyutluya	4
1.4.2. Veteriner Anatomi Eğitimi ve Araştırmalarında Üç Boyutlu Modellemenin Uygulamaları ve Avantajları	5
1.5. Üç Boyutlu Tıbbi Görüntülemede Segmentasyon Yöntemleri	8
1.5.1. Segmentasyonun Tanımı ve Amacı	8
1.5.2. Manuel Segmentasyon	8
1.5.3. Yarı Otomatik Segmentasyon Teknikleri: Eşikleme, Tohumdan Yetiştirme ve Küre Boyama	8
1.5.4. Otomatik Segmentasyon Yöntemi: Eşik Tabanlı ve Yapay Zekâ Destekli Yaklaşımlar	9
1.5.5. Segmentasyon Yöntemi Seçimini Etkileyen Faktörler	9
1.6. Segmentasyon Yöntemleri Arasındaki Farklar	10
1.6.1. Doğruluk ve Hassasiyet	10
1.6.2. Yeniden Üretilbilirlik ve Kullanıcı Bağımlılığı	10
1.6.3. Zaman Verimliliği	11
1.6.4. Morfometrik ve Hacimsel Ölçümler Üzerindeki Etki	12
1.6.5. Son Üç Boyutlu Modellerdeki Nitel Farklılıklar	12
1.7. Anatomik Çalışmalarda Segmentasyonun Önemi	13
1.7.1 Morfolojik Araştırmaya Katkı	14
1.7.2. Anatomik Eğitim ve Görselleştirmeyi Geliştirme	15
1.7.3. Klinik Uygulamalarda Segmentasyonun Rolü	15
1.8. Veteriner Hekimlikte Anatomik Yapıların Segmentasyonundaki Zorluklar	16
1.8.1. Türe Özgü Anatomik Karmaşıklık	17
1.8.2. Segmentasyon Protokollerinin Standardizasyonu ve Doğrulanması	17
1.9. Çalışmanın Odak Noktası ve Gerekçesi	18
1.9.1. Mandibula, Azı Dişleri ve Beyinin Seçilmesinin Gerekçesi	19
1.9.2. Veteriner Hekimlikte Model Olarak Koyunun Önemi	20
1.9.3. Morfometrik ve Hacimsel Verilerde Segmentasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılmasının Önemi	21
1.10. Amaç ve Hipotez	22
1.10.1. Çalışmanın Amacı	22
1.10.2. Araştırma Soruları ve Hipotezler	23
1.10.2.1. Araştırma Soruları	23
1.10.2.2. Hipotezler	23

2. GEREÇ ve YÖNTEM	24
3. BULGULAR	27
3.1. Hacim Ölçümlerinde Segmentasyon Yöntemlerinin Süre ile Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi	27
3.2. Yüzey Alanı Ölçümlerinde Segmentasyon Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi	32
3.3. Morfometrik Ölçümlerde Segmentasyon Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi: Uzunluk, Genişlik, Yükseklik Verileri	32
4.TARTIŞMA	42
5.SONUÇ ve ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	58
EKLER	76
Ek-1. Ankara Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu Karar Örneği	77
ÖZGEÇMİŞ	79

ÖNSÖZ

Segmentasyon, anatomik yapıların, lezyonların veya belirli bölgelere ait doku sınıflarının tanımlanması, sınırlandırılması ve ayrıştırılması işlemidir. Anatomide morfometrik ve volumetrik analiz, gelişmiş görüntüleme teknikleri ve istatistiksel yöntemler kullanılarak herhangi bir yapı ya da yapı grubunun boyut ve şekillerinin nicel olarak değerlendirilmesini içermektedir. Bu çalışma ile, Romanov ırkı koyunlarda dokusal kontrastları, geometrik karmaşıklıkları ve klinik önemleri birbirinden farklı olan mandibula, molar diş ve beyin; (1) manuel segmentasyon, (2) yarı-otomatik segmentasyon, (3) yarı-otomatik segmentasyon + grow-from-seeds (GFS), (4) yarı-otomatik segmentasyon + GFS + eşikleme, (5) yarı-otomatik segmentasyon + fill-between-slices (FBS), (6) otomatik segmentasyon yöntemleri uygulayarak değerlendirilmiştir. Bu sayede de kullanıcı bağımlı varyasyon parametreleri, yöntem bazlı zaman süreçleri ve benzerlik düzeylerini karşılaştırma imkânı bulunmuştur. Lineer morfometri, volumetrik parametreler ve segmentasyon zaman ölçütleri de kaydedilmiştir. Çalışmamız ile, Romanov koyunlarına ait anatomik verileri arttırmak, veteriner hekimliğinde kullanılan dijital modellemelerin standardizasyonuna katkıda bulunmak hedeflenmiştir.

Öncelikle bu kıymetli eğitimi tamamlama aşamasına gelebilmemin mimarı Ulu Önder, Başöğretmen Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'ü ve bugüne kadar üzerimde emekleri olan Türkiye Cumhuriyeti'nin kıymetli öğretmenlerini saygı ve minnetle anıyorum.

Farklı hedeflerim sebebiyle yarım bıraktığım doktora eğitimime ilk etapta yeniden dönmem konusunda cesaretlendiren, sonrasında da yarım kalan hikayemi tamamlarken her aşamada benim arkamda olup desteğini bir an bile eksik etmeyen kıymetli danışmanım Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Anatomi Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Caner BAKICI'ya en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

Gerek tez projesi gerekse ana tez çalışmalarım esnasındaki tüm aşamalarda fedakârca destek veren ve bu yükün altından kalkabilmemde yoğun çabaları olan, Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Anatomi Anabilim Dalı öğretim elemanları Sayın Araş. Gör. Barış BATUR ile Sayın Öğr. Gör. Dr. Hasen Awel Yunus'a; radyolojik görüntüleme aşamalarındaki katkıları sebebiyle Sayın Vet. Hek. Ezgi Deniz MAVİLİ'ye; istatistik çalışmalarımızdaki destekleri için Ankara Üniversitesi Biyoistatistik Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Doğukan ÖZEN'e ve hayvan materyalleri konusundaki katkıları sebebiyle kıymetli dostum Sayın Vet. Hek. Arif Osman GÜRDAL'a minnetlerimi bildiririm.

Yine daha önceki doktora çalışmalarım ve araştırma görevlisi kariyerim esnasında, kendileri ile çalışmaktan büyük keyif duyduğum, üzerimde çok büyük emekleri olan, yarım kalan eğitimimi tamamlamak için tekrar döndüğümde Anabilim Dalı'nın tüm imkanlarını seferber eden ve aynı sıcaklıkla beni bağrlarına basan Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Anatomi Anabilim Dalı öğretim üyelerinden; üzerimde çok büyük emekleri olan hocalarım, başta o dönemki Anabilim Dalı Başkanı ve danışmanım Sayın Prof. Dr. R. Merih HAZIROĞLU'na olmak üzere;, Anatomi Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Ahmet ÇAKIR'a, Sayın Prof. Dr. İ. Önder ORHAN'a, Sayın Prof. Dr. Çağdaş OTO'ya, Sayın Prof. Dr. Okan EKİM'e ve Emekli Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Nejdet DURSUN'a; değerli mesai arkadaşlarım Sayın Vet. Hek. Murat HARMAN, Sayın Dr. Öğr. Üyesi R. Orkun AKGÜN'e ve Sayın Kemal ŞAHBAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin gerçekleşmesinde maddi destek sağlayan Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğü'ne teşekkür ederim. Bu tez, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün TDK-2024-3461 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Çok özel birer teşekkür de Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Histoloji ve Embriyoloji Anabilim Dalı Öğretim Üyesi iki kişi için. Birincisi, akademik kariyerim ve doktora eğitimim esnasında her ihtiyacım olduğunda sorgusuz yardımına koşan kıymetli dostum Sayın Doç. Dr. Ahmet CEYLAN'a. İkincisi ise, çok değerli bir hocam, meslek büyüğüm olmasının ötesinde, hayatımda derin iz bırakan örnek aldığım kişilerden olan ağabeyim, Sayın Prof. Dr. Alev Gürol BAYRAKTAROĞLU'na.

Tez çalışmalarım esnasında ihtiyacım olan zamanı oluşturmamdaki anlayış ve destekleri için başta amirlerim TMEA Kıdemli Direktörü Sayın Uz. Vet. Hek. Alper KESKİNER ve Kanatlı Kıdemli İş Birim Müdürü Sayın Vet. Hek. Ali YOLUK olmak üzere, parçası olmaktan büyük bir gurur duyduğum Elanco Hayvan Sağlığı Kanatlı İş Birimi çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak da, hayatımın her aşamasında aldığım kararlarda dağ gibi arkamda duran ve beni destekleyen annem Döndü AYVALI ve kardeşim Sevim Hanım AYVALI GİLBERT'e; attığım her adımı destekleyen, bana güvenen, beni onurlandıran ve ihtiyacım olan enerjimin temel kaynağı, anaçlığı ile ailemizi güçlendiren, en büyük dayanağım, canım eşim İrem ERDOĞAN AYVALI'ya; ve kıymetli ortak zamanımızın önemli bölümünü bu amacıma feda eden, en değerli hazinem, ilham kaynağım, canım oğlum Kıvanç AYVALI'ya katkılarından ve sabırlarından dolayı minnettarım.

SİMGELER VE KISALTMALAR

2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
3T	Üç Tesla
AR	Artırılmış Gerçeklik
Arit.Ort.	Aritmetik Ortalama
BT	Bilgisayarlı Tomografi
FBS	Fill-Between-Slices
FoV	Field of View
GFS	Grow-From-Seeds
KSA	Konvolüsyonel Sinir Ağları
kV	Kilovolt
mAs	Milliampere-second
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
MDBT	Multi Dedektörlü Bilgisayarlı Tomografi
MRG	Manyetik Rezonans Görüntüleme
SH	Standart Hata
STL	Stereolitografi
T1	T1 Relaxation Time / Boylamsal Relaksasyon Zamanı
TR	Repetition Time
TE	Echo Time
VR	Sanal Gerçeklik
VU	Volumetrik Ultrasonografi
YZ	Yapay Zekâ

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Romanov koç, koyun ve kuzuları	1
Şekil 3.1. Segmentasyon yöntemlerinden elde edilen sonuçların hacim ve süre değerleri	27
Şekil 3.2. Mandibula, Diş ve Beyin üzerinde hesaplanan yükseklik, genişlik ve uzunluk ölçümlerine ait görsel	34
Şekil 3.3. Segmentasyon yöntemlerinden elde edilen morfometrik ölçümlerin karşılaştırılması	34
Şekil 3.4. Dişi mandibula'sına ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait lateral görseller	39
Şekil 3.5. Dişi mandibula'sına ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait ventral görseller	40
Şekil 3.6. Erkek mandibula'sına ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait craniolateral görseller	41
Şekil 3.7. Dişi molar dişine ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait dorsal, medial ve ventral görseller	42
Şekil 3.8. Erkek beynine ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait cranial, caudaodorsal ve ventral görseller	42

ÇİZELGELER

Çizelge 3.1. Her bir doku/organın süre bakımından yöntem ve cinsiyet yönüyle karşılaştırılması	29
Çizelge 3.2. Her bir doku/organın hacim bakımından yöntem ve cinsiyet yönüyle karşılaştırılması	30
Çizelge 3.3. Her bir doku/organın yüzey alanı bakımından yöntem ve cinsiyet yönüyle karşılaştırılması	31
Çizelge 3.4. Her bir doku/organın uzunluk bakımından yöntem ve cinsiyete göre karşılaştırılması	36
Çizelge 3.5. Her bir doku/organın yükseklik bakımından yöntem ve cinsiyete göre karşılaştırılması	37
Çizelge 3.6. Her bir doku/organın genişlik bakımından yöntem ve cinsiyete göre karşılaştırılması	38

1. GİRİŞ

Romanov ırkının tarihi 19. Yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Bu ırk, Rusya gibi zorlu ortamlara karşı iyi direnç gösterirken, poliöstrus özelliği, bir batındaki yüksek yavru sayısı, pubertaya erken erişme ve kaliteli kürk gibi benzersiz özelliklere sahip, kısa ve ince kuyruklu bir ırktır (Deniskova vd., 2018; Marzanov vd., 2023) (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Romanov koç, koyun ve kuzuları

Vücutları orta iridir ve griden siyaha uzanan bir skalada tüylerle örtülü iken; kuyrukları, başları ve bacakları da kısa, parlak siyah tüyler ile kaplıdır. Başları geniş ve uzunken, burunlarının üstü ise kemerlidir. Türkiye’de saf yetiştirme ve yerel ırklar ile melezlemeleri ile ilgili çalışmalar yaygınlaşmaktadır (Şen ve Uğurlu, 2021).

1.1. Anatomide Morfometrik ve Hacimsel Analizlere Genel Bakış

Anatomide morfometrik ve volumetrik analiz, gelişmiş görüntüleme teknikleri ve istatistiksel yöntemler kullanılarak herhangi bir yapı ya da yapı grubunun boyut ve şekillerinin nicel olarak değerlendirilmesini içermektedir. Morfometri, şekil ve boyut dâhil olmak üzere formların geometrik temsillerini karşılaştırmak amacıyla kullanılan nicel bir analiz yöntemidir. Volumetrik analiz ise, biyolojik yapıların toplam hacmini, hacim oranlarını ve hacim yoğunluğunu belirlemeye yönelik ölçümleri kapsamaktadır. Bu yaklaşımlar; anatomik detayların ortaya konulması, anatomik varyasyonların anlaşılması, cerrahi yaklaşım düzeyinde ön planlama yapılması ve/veya son duruma ilişkin fikir edinilmesi ve eğitim kaynaklarının

iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir (Bakıcı vd., 2019; Li vd., 2016). Aşağıdaki bölümlerde morfometrik ve volumetrik analizin temel yönleri özetlenmekte, kullanılan yaklaşımlar hakkında kısa bir inceleme yapılmakta ve bu yaklaşımların yapılacak olan çalışmayla ilişkisine değinilmektedir.

1.2. Tıbbi Görüntüleme ve Üç Boyutlu Modellemedeki Gelişmeler

Morfometrik ve volumetrik analizler, biyolojik yapıların nicel olarak değerlendirilmesini sağlayarak anatomik araştırmalarda yalnızca yeni bir alan açmakla kalmamış, aynı zamanda belirli sonuçların gözlemlenmesine de olanak tanımıştır. Volumetrik verilerin ileri görüntüleme yöntemlerine entegrasyonu, tanısal doğruluğun ve cerrahi planlamanın önemli ölçüde artmasına katkı sağlamıştır. Bu analizler, objektif ve tekrarlanabilir ölçümler sağlayarak, anatomik kuram ile klinik uygulamalar arasında önemli bir köprü işlevi görmektedir (Slice, 2007).

Tıbbi görüntüleme ve üç boyutlu (3B) modellemedeki son gelişmeler hem anatomik analizlerde hem de klinik uygulamalarda devrim niteliğinde ilerlemelere yol açmıştır. Manyetik rezonans görüntüleme (MRG), bilgisayarlı tomografi (BT) ve volumetrik ultrasonografi (VU) gibi yüksek çözünürlüklü görüntüleme yöntemleri, sorunsuz bir biçimde üç boyut hesaplamalı yeniden yapılandırma teknikleriyle entegre olabilmekte; bu durum, morfometrik ve volumetrik değerlendirmelerde eşi benzeri görülmemiş bir hassasiyet sunmaktadır. Söz konusu teknolojiler, karmaşık anatomik yapıların detaylı biçimde görselleştirilmesini kolaylaştırmakta, tanı doğruluğunu artırmakta ve hastaya özgü cerrahi planlamayı desteklemektedir (Zhonghua, 2018). Ayrıca, görüntüleme tekniklerinin gelişmiş versiyonlarının 3B modelleme yazılımlarıyla entegrasyonu, organların ve dokuların yüzey alanı, hacmi ve boyutsal ilişkileri gibi kritik morfolojik özelliklerinin nicel olarak analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, özellikle veteriner anatomi gibi tür çeşitliliğinin yüksek olduğu disiplinlerde, türler arası karşılaştırmalı analizlerin doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır.

Üç boyutlu baskı teknolojisi, bu yetkinlikleri daha da ileriye taşımakta ve geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında; karmaşık iç geometrilere sahip yapıların üretilmesi, hastaya özgü ihtiyaçlara göre kişiselleştirme yapılabilmesi ve alan tasarrufu sağlanması gibi özellikler yer almaktadır. Tıbbi görüntüleme ile birleştirildiğinde, 3B baskı teknolojisi preoperatif planlamadan hastaya özel implantların geliştirilmesine kadar uzanan pek çok alanda dönüştürücü fırsatlar sunmaktadır. Bu teknolojinin veteriner hekimlikteki uygulamaları da giderek yaygınlaşmakta olup; öğrenci

eğitimi, klinik müdahaleler ve araştırma süreçlerinde anatomik yapıların üç boyutlu temsili önemli avantajlar sağlamaktadır. Farklı tıp ve veteriner disiplinlerinde yürütülen güncel araştırmalar, bu teknolojinin klinik uygulamalardaki potansiyelini ortaya koymakta ve sağlık hizmetlerinde standartların yeniden tanımlanmasına katkı sunmaktadır (Berman, 2012).

1.3. Veteriner Hekimlik ve Karşılaştırmalı Anatomide Doğru Ölçümün Önemi

Doğru morfometrik ve volumetrik ölçümler, veteriner hekimliğin ve karşılaştırmalı anatominin gelişimi açısından temel bir öneme sahiptir. Bu nicel değerlendirmeler, yalnızca türlere özgü anatomik yapıların hassas analizine olanak tanımakla kalmaz; aynı zamanda tanı doğruluğunu artırır ve farklı hayvan anatomilerine yönelik tedavi planlamalarını yönlendirir. Veteriner klinik uygulamaların ötesinde, karşılaştırmalı anatomide elde edilen doğru ölçümler, türler arası çalışmalara önemli katkılar sağlamakta; bu da evrimsel adaptasyonların, biyomekanik işlevlerin ve fizyolojik varyasyonların anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Örneğin, kemik morfometrisine yönelik 3B rekonstrüksiyon işlemleri, memeli türleri arasındaki hareket kalıplarını ortaya koymuş; organ sistemlerine ilişkin volumetrik analizler ise yaban hayatı koruma çalışmalarına destek sağlamıştır (Childs vd., 2017; Martín-Serra vd., 2014). Buna ek olarak, türler arası karşılaştırmalı ölçümlerin doğruluk düzeyi, hayvan modellerinin biyomedikal araştırmalarda kullanılabilirliği açısından da belirleyici bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Organ boyutları, kemik yoğunluğu ve yüzey şekilleri gibi parametrelerdeki farklılıkların sistematik biçimde analiz edilmesi, özellikle translasyonel tıp alanında insan-hayvan ilişkisini güçlendirmektedir (Hutchinson, 2006).

Veteriner hekimlik alanında ileri görüntüleme ve modelleme teknolojilerinin benimsenmesiyle birlikte, standartlaştırılmış ölçüm protokollerine duyulan ihtiyaç bariz bir hale gelmiştir. Standartların oluşturulması, yalnızca tanı ve cerrahi müdahalelerde tutarlılığı sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda araştırma bulgularının tekrarlanabilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini güvence altına almaktadır. Sonuç olarak, bu alandaki teknolojik ve metodolojik gelişmeler, yalnızca hayvan sağlığı hizmetlerinin niteliğini artırmanın yanı sıra; aynı zamanda “Tek Sağlık” yaklaşımı kapsamında insan sağlığına da önemli katkılar sunmaktadır (Nguyen vd., 2015; Travis vd., 2014).

1.4. Anatomide Üç Boyutlu Görüntüleme ve Modelleme

Anatomi, organizmaların yapısal organizasyonunu anlamaya yönelik temel bir bilim dalı olarak uzun bir geçmişe sahiptir. Ancak geleneksel anatomi eğitimi, iki boyutlu (2B) çizimler, kadavra diseksiyonları ve radyografiler gibi sınırlı görselleştirme yöntemlerine dayanmıştır. Bu yöntemler, özellikle karmaşık mekânsal ilişkilerin kavranmasında yetersiz

kalmakta ve öğrencilerin öğrenme sürecini zorlaştırmaktadır (Fredieu vd., 2015; Pujol vd., 2016). Son yıllarda 3B modelleme ve görüntüleme teknolojilerindeki hızlı gelişmeler hem insan hem de veteriner hekimliğinde eğitim, araştırma ve klinik uygulamalar açısından ilerlemeler sağlamıştır (Karataş ve Toy, 2014; Zaidi ve Xu, 2007).

Modern anatomi eğitiminde kullanılan 3B modelleme süreci; BT, MRG, mikro-BT gibi tekniklerden elde edilen verilerin dijital ortama aktarılması ve bu verilerden 3B modellerin oluşturulmasını içermektedir. Bu yöntemler, organların gerçek boyutları, hacimleri ve komşuluk ilişkileri hakkında daha doğru ve anlamlı bilgiler sunarak klasik diseksiyon temelli öğrenmenin sınırlamalarını aşmaktadır (Chickness vd., 2022; Gürses vd., 2023). Ye vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen bir meta-analiz çalışmasında, 3B baskılı modellerle eğitim alan öğrencilerin; yalnızca 2B görsellerle ya da kadvralarla çalışan gruplara kıyasla bilgi kazanımı, yanıt süresi ve doğru yanıt oranları açısından daha başarılı oldukları ortaya konmuştur. Yuen (2020) ise düşük maliyetli üretim, tekrar edilebilirlik ve cerrahi simülasyon imkânı sunması nedeniyle 3B baskıların, özellikle lisans düzeyindeki eğitimde giderek daha fazla tercih edilen bir alternatif olduğunu belirtmektedir. Görsel algıyı ve mekânsal yetiyi desteklemek amacıyla geliştirilen bu modeller hem fiziksel baskılar şeklinde hem de dijital simülasyonlar aracılığıyla öğrencilere sunulmaktadır. Öğrenciler, bu modeller sayesinde yapıları farklı açılardan inceleyebilme fırsatı bulmakta; interaktif etkileşim yoluyla bilgiyi daha etkin biçimde yapılandırabilmektedir (Erolin, 2019; Vernon ve Peckham, 2002). Özellikle fotogrametri ve yüzey tarayıcı teknolojileri, dijital modellerin hem eğitim hem de klinik planlama süreçlerinde kullanımını yaygınlaştırmıştır (Chytas vd., 2024). Ayrıca 3B modelleme, patolojik yapıların, anatomik varyasyonların ve belirli oluşumların detaylı biçimde görselleştirmesine olanak sağlayarak, araştırma süreçlerinde önemli avantajlar sunmaktadır (Azer ve Azer, 2016).

3B modelleme ve görüntüleme teknikleri, yalnızca geleneksel yöntemleri desteklemekle kalmamış; aynı zamanda tıbbi görselleştirmede yeni bir paradigma sunarak hem eğitimde hem de klinik uygulamalarda doğruluk ve verimliliği artırmıştır. Bu teknolojilerin artan erişilebilirliği ve gelişen yazılım altyapısı sayesinde, anatomi eğitiminin daha etkili, bireyselleştirilmiş ve etik temelli biçimde yürütülmesi mümkün hale gelmiştir (Bati vd., 2020; Joseph ve Singh, 2019).

1.4.1. Görüntüleme Tekniklerinin Evrimi: İki Boyutludan Üç Boyutluya

Anatomik yapıların görselleştirilmesi, tarih boyunca önemli evrimsel süreçlerden geçmiştir. İlk dönemlerde, 2B düzlemsel çizimler ve radyografiler, anatomi eğitiminin ve

klirik pratiğin temelini oluşturmuştur. Ancak bu tekniklerin derinlik hissi sunamaması, özellikle kompleks yapıların mekânsal ilişkilerinin kavranmasında yetersiz kalmasına neden olmuştur (Fredieu vd., 2015). Bu eksiklikleri gidermek amacıyla BT ve MRG gibi kesitsel görüntüleme yöntemleri geliştirilmiş; bu tekniklerle elde edilen hacimsel verilerin dijital ortamda birleştirilmesiyle 3B görselleştirme mümkün hale gelmiştir (Karataş ve Toy, 2014; Todd, 2014).

Gelişen yazılım altyapısı sayesinde, bu görüntüler 3D Slicer gibi açık kaynak kodlu araçlarla segmentasyon işleminden geçirilmekte, Stereolitografi (STL) formatında dışa aktarılabilmekte ve üç boyutlu baskılarla fiziksel modellere dönüştürülebilmektedir (Gürses vd., 2023). Örneğin, at, sığır, köpek ve kedi gibi hayvanlara ait dil kemiklerinin multidetekt rl  BT ile taranarak 3B modellerinin oluşturulması, kırılğan yapıda olan bu kemiklerin veteriner anatomi eğitiminde kullanılmasına önemli katkı sağlamaktadır (Bakıcı vd., 2019).

Üç boyutlu modelleme tekniklerinin gelişimiyle birlikte, geleneksel görsel materyallerin ötesine geçilmiş; teknolojik gelişimlerden artırılmış gerçeklik (AR), fotogrametri ve sanal gerçeklik (VR) sistemleri anatomi eğitimine entegre edilmiştir. Bu teknolojiler, öğrencilere sanal diseksiyon yapma, yapıları 360 derece döndürerek inceleme ve katmanlı anatomik yapıları keşfetme imkânı sunmaktadır. Özellikle AR uygulamaları, canlı hayvan modelleri üzerine dijital anatomik yapıların bindirilmesini sağlayarak, gerçek zamanlı ve etkileşimli bir öğrenme deneyimi sunmaktadır (Hackett ve Proctor, 2016; Jiang vd., 2024; Kapoor, 2024).

Yapılan araştırmalar, bu yeni nesil teknolojilerin hem bilişsel yükü azalttığını hem de öğrenme motivasyonunu artırdığını göstermektedir (Adams ve Barbante, 2012). Hackett ve Proctor (2016) tarafından yapılan derlemede, 3B teknolojilerin %74'ünün bilgi kazanımı ve mekânsal algı gelişimi açısından olumlu sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Bu bağlamda, holografik ve otostereoskopik sistemlerin gelecekte daha yaygın biçimde kullanılması beklenmektedir (Blanche, 2021; Blinder vd., 2022).

1.4.2. Veteriner Anatomi Eğitimi ve Araştırmalarında    Boyutlu Modellemenin Uygulamaları ve Avantajları

Veteriner anatomi eğitiminde 3B modelleme uygulamaları, klasik kadavra diseksiyonu temelli eğitimde karşılaşılan etik, ekonomik ve lojistik problemlere etkili çözümler sunmaktadır (Means vd., 2023; Su ol vd., 2018). Geleneksel yöntemlerin sınırlı olması ve kadavra kullanımına yönelik etik kaygılar, veteriner anatomi  ğretiminde alternatif

yaklaşımların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu kapsamda anatomik modellerin ve sanal teknolojilerin kullanımı, hem hayvan refahına duyarlı bir yaklaşımı desteklemiş hem de eğitimin kalitesini artırmıştır (Alcázar-Chávez vd., 2021).

Üç boyutlu dijital ve fiziksel modellerin kullanımı, öğrencilerin mekânsal algılarını geliştirerek karmaşık yapıları daha kolay kavramalarına olanak tanımaktadır (Öktem vd., 2019; Preece vd., 2013). Bu kapsamda Suñol vd. (2018) çalışmalarında, veteriner hekimliği öğrencilerinin 3B baskılı omurga kırığı modelleriyle çalışmaları sonucunda, BT görüntülerine kıyasla daha yüksek başarı gösterdikleri ortaya konmuştur. Means vd. (2023) ise sanal 3B abdominal organ modelleriyle eğitim alan öğrencilerin, radyografik patolojileri tanımda daha yetkin hale geldiklerini bildirmiştir.

Son yıllarda, spesifik anatomik bölgelerin dijitalleştirilmesi ve 3B baskı yöntemlerinin eğitimde yaygın olarak kullanılması dikkat çekmektedir. Özellikle köpek kafatası ve at sinüsleri gibi spesifik yapılar üzerine yapılan çalışmalar, öğrenci başarısını ve mekânsal anlayışı önemli ölçüde artırmıştır (Bakıcı vd., 2019; Canright vd., 2022; da Silveira vd., 2021). Bakıcı vd. (2019) farklı türlere ait dil kemiklerinin BT ile taranarak oluşturulan 3B modellerinin, özellikle ince ve kırılgan yapılar için eğitimde etkili ve dayanıklı bir eğitim materyali sunduğunu vurgulamıştır. Köpek kafatasının AR teknolojileriyle modellenerek öğrencilere sunulması, klasik yöntemlere kıyasla öğrenme motivasyonunda belirgin artış sağlamıştır (Jiang vd., 2024). Nöroanatomi gibi daha karmaşık alanlarda geliştirilen 3B interaktif modeller ise, özellikle beyin damar yapılarının mekânsal olarak kavranmasına önemli ölçüde katkı sunmuştur (Raffan vd., 2017).

Veteriner hekimliğine ait araştırmalarda da 3B modelleme dikkate değer katkılar sağlamaktadır. Kedilerin burun boşluğu ve sinüs anatomisinin 3B baskı yoluyla detaylandırıldığı çalışmalar, türler arası anatomik varyasyonların daha iyi anlaşılmasına ve klinik uygulamalarda isabetli planlamalar yapılmasına olanak tanımıştır (Diaz Martinez vd., 2024). Hackmann vd. (2019) ise, köpek mide modellerinin 3B baskı ile oluşturulmasının, sindirim sistemi anatomisinin öğretiminde somut ve etkili bir alternatif sunduğunu belirtmiştir. Bu çalışmalar, öğrencilerin 3B modellerle hem fiziksel hem de sanal ortamlarda çalışarak anatomi bilgilerini daha etkin biçimde kullanabildiklerini ve klinik pratikte karşılaşılan mekânsal problemleri çözmeye yeteneklerinin geliştiğini göstermektedir (Canright vd., 2022; Nöller vd., 2005; Raffan vd., 2017). Özellikle veteriner anatomi eğitiminde dijitalleştirme ve 3B görselleştirme tekniklerinin, geleneksel diseksiyon temelli eğitimle birleştirilmesi en etkili öğrenme çıktılarının elde edilmesini sağlar (Alcázar-Chávez vd., 2021; Hackmann vd., 2019). Günümüzdeki modern eğitim yaklaşımları doğrultusunda, öğrencilere açık kaynaklı veri

setleri ve 3B baskı dosyalarının sunulması anatomi öğrenimini daha erişilebilir ve fırsat eşitliğine dayalı bir yapıya dönüştürmüştür (Shapiro, 2024).

Üç boyutlu görselleştirmenin en önemli avantajı, anatomik yapılar arasındaki mekânsal ilişkilerin daha doğru ve etkili bir şekilde kavranmasına olanak sağlamasıdır. Öğrenciler, sanal ve fiziksel modeller aracılığıyla yapıları farklı açılardan inceleyebilmekte; bu da öğrenme sürecinde daha derin ve kalıcı bir kavrayış geliştirmelerine yardımcı olmaktadır (Fredieu vd., 2015; Preece vd., 2013). Özellikle üç boyutlu modeller, 2B atlaslar veya görüntülerle çalışırken yaşanan mekânsal algı zorluklarını aşmada etkili olmuştur (Triepels vd., 2020). Modern 3B modelleme yalnızca anatomi eğitimine katkı sunmakla kalmamakta; aynı zamanda klinik uygulamalarda bireyselleştirilmiş cerrahi planlama ve hastaya özgü tedavi stratejilerinin geliştirilmesine de olanak tanımaktadır (Amparore vd., 2022). Örneğin, pelvis bölge anatomisi gibi yapılar söz konusu olduğunda, in vivo görüntülerden türetilen 3B modellerin, ilgili bölgelerin anatomisini daha derinlemesine öğretmek açısından etkili olduğu gösterilmiştir (Abdulcadir vd., 2020; Luo vd., 2011).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, öğrencilerin 3B görselleştirme teknolojilerini kullanarak öğrenme motivasyonlarının arttığını ve edindikleri bilgileri daha uzun süre koruduklarını ortaya koymuştur. Özellikle dijital masaüstü sistemlerle öğrencilere vücut yapılarının doğal boyutlarda ve etkileşimli olarak sunulması, kavramsal anlama düzeylerini belirgin şekilde yükseltmiştir. Ayrıca, öğrencilerin kendi öğrenme hızlarında keşif yapabilmeleri ve yapılar arasında bağlantılar kurmaları teşvik edilmiştir (Pettersson vd., 2023). Web tabanlı 3B etkileşimli görselleştirme araçlarının da geleneksel eğitim materyallerine kıyasla öğrenme sürecini olumlu yönde etkilediği; özellikle damar yapıları gibi karmaşık sistemlerde öğrencilerin yapılar arası ilişkileri daha doğru bir biçimde kavrayabildikleri gösterilmiştir (Petersson vd., 2009). Bununla birlikte, mediastinum gibi karmaşık anatomik bölgeler için geliştirilen dijital modellerin, bilişsel yükü azaltarak öğrenmeyi optimize ettiği bildirilmektedir (Chickness vd., 2022). Renk kodlamaları, stereoskopik görüntüleme ve etkileşimli katman soyma teknikleri gibi yöntemler, öğrenmenin çok boyutlu doğasına katkı sağlamış; öğrencilerin kavramsal bilgiyi aktif biçimde yapılandırmalarına olanak tanımıştır (Pujol vd., 2016; Zhou vd., 2022).

Fiziksel 3B modellerin sanal modellere kıyasla bazı üstünlüklere sahip olduğu çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur. Öğrencilerin anatomik yapıları doğrudan fiziksel olarak manipüle edebilmesi, mekânsal becerilerin gelişimini desteklemiş ve anatomik bilgilerin daha hızlı ve etkin biçimde pekişmesini sağlamıştır (Öktem vd., 2019; Preece vd., 2013). Ayrıca

Triepels vd. (2020) yaptığı derlemeye göre, öğrenciler 3B görselleştirme tekniklerini geleneksel yöntemlere kıyasla daha motive edici ve etkili bulmaktadır.

Sonuç olarak, 3B modelleme ve görselleştirme teknolojileri; tıbbi görüntü analizi, klinik karar destek sistemleri ve bireyselleştirilmiş tıp uygulamaları gibi alanlarda vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir. İleri düzey tıbbi görüntüleme teknikleri (BT, MRG gibi) ile elde edilen verilerin üç boyutlu anatomik yapılar şeklinde görselleştirilmesi hem bireysel hem de popülasyon düzeyindeki sağlık sorunlarına daha doğru ve hedefe yönelik müdahalelerde bulunulmasını mümkün kılmakta; bu teknolojiler, modern tıbbın geleceğinde merkezi bir rol üstlenmektedir (Zhou vd., 2022).

1.5. Üç Boyutlu Tıbbi Görüntülemeye Segmentasyon Yöntemleri

1.5.1. Segmentasyonun Tanımı ve Amacı

Tıbbi görüntülemeye segmentasyon, anatomik yapıların, lezyonların veya belirli bölgelere ait doku sınıflarının tanımlanması, sınırlandırılması ve ayrıştırılması sürecidir (Pham vd., 2000). Bu yöntem, görüntülerin klinik olarak anlamlandırılması, 3B modelleme ve cerrahi planlama gibi uygulamalarda temel bir rol oynamaktadır (Withey ve Koles, 2008). Özellikle volumetrik görüntülerde segmentasyon, yapıların ayrı ayrı analiz edilebilmesine ve sanal ortamda etkileşimli olarak incelenebilmesine olanak sağlar (Lakare, 2000).

1.5.2. Manuel Segmentasyon

Manuel segmentasyon, uzman klinisyenlerin görüntülerde ilgilenilen bölgeleri elle çizerek ayırması işlemidir. Yüksek doğruluğu nedeniyle ‘altın standart’ olarak kabul edilmekle birlikte; zaman alıcı, yorucu ve kullanıcıya bağlı sonuçlar üretmesi en önemli sınırlamaları arasında yer almaktadır (Elnakib vd., 2011). Her gözlemcide değişiklik arz eden farklılıkları, özellikle detaylı doku sınırlarının belirlenmesinde tekrar edilebilirliği önemli ölçüde kısıtlamaktadır (Withey ve Koles, 2008).

1.5.3. Yarı Otomatik Segmentasyon Teknikleri: Eşikleme, Tohumdan Yetiştirme ve Küre Boyama

Yarı otomatik segmentasyon yöntemleri, kullanıcıdan alınan başlangıç bilgisinin ardından, segmentasyon sürecinin algoritmalar tarafından yürütülmesine dayanır. En yaygın tekniklerden biri olan eşikleme (threshold), dokuya ait belirli bir yoğunluk aralığına göre doku ayrımı yapar (Pham vd., 2000; Zhao ve Xie, 2013). Tohumdan büyütme (region growing) yöntemi ise, kullanıcının belirlediği başlangıç pikselinden hareketle benzer yoğunlukta

piksellerin genişletilmesine dayanır. Küre boyama (paintbrush/ ball painting) gibi sezgisel kullanıcı girdisine dayalı teknikler ise, özellikle hassas sınırlandırma gerektiren durumlarda avantaj sağlar. Bu yöntemler, kullanıcı yönlendirmesi ile yüksek doğruluk sağlayabilmekle birlikte, otomasyon düzeyleri sınırlıdır ve kullanıcı kaynaklı hatalara açık olmaları çarpıcı bir dezavantaj olarak ele alınmaktadır (Zhou ve Xie, 2013).

1.5.4. Otomatik Segmentasyon Yöntemi: Eşik Tabanlı ve Yapay Zekâ Destekli Yaklaşımlar

Otomatik segmentasyon sistemleri, kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duymadan doku ayrımını gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemler arasında eşik tabanlı segmentasyon, istatistiksel sınıflandırma, deformasyon modelleri ve yapay zekâ (YZ) tabanlı teknikler yer almaktadır. Özellikle istatistiksel şekil modelleri, anatomik yapıların varyasyonlarını öğrenerek, bu bilgileri görüntü üzerine uyarlayabilmektedir (Heimann ve Meinzer, 2009).

Son yıllarda derin öğrenme tabanlı konvolüsyonel sinir ağları (KSA) kullanılarak segmentasyon doğruluğunda önemli artışlar elde edilmiştir. Özellikle 3B KSA, hacimsel verileri doğrudan işleyebilme yetenekleri sayesinde karmaşık doku yapılarını yüksek doğrulukla segmente edebilmektedir. Bu yöntemler, belirlenmiş veri setleri üzerine eğitilmekte olup, birçok klinik uygulamada umut verici sonuçlar vermektedir (Ilesanmi vd., 2024; Liu vd., 2021).

1.5.5. Segmentasyon Yöntemi Seçimini Etkileyen Faktörler

Segmentasyon yöntemi seçimi; görüntüleme modalitesi (BT, MRG vb.), çözünürlük düzeyi, doku homojenliği, görüntüdeki artefakt miktarı, klinik amaç ve işlem süresi gibi birçok etkene bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Marro vd., 2016; Pham vd., 2000). Segmentasyon yöntemleri, anatomik yapıların şekil ve oryantasyonunda gözlemlenen geniş çeşitlilikle mücadele etmekte ve bu durum özellikle 3B segmentasyon yönteminin seçim aşamasını etkilemektedir. Örneğin, düşük kontrasta sahip yapıların segmentasyonu için deformasyon modelleri daha uygun olurken; homojen yapılarda eşikleme gibi basit yöntemler yeterli olabilmektedir. Ayrıca segmentasyonun gerçek zamanlı gerçekleştirilmesinin gerektiği durumlarda, hız ve kaynak kullanımı açısından verimli tekniklerin tercih edilmesi büyük önem taşımaktadır (Elnakib vd., 2011; Lakare, 2000). 3B tıbbi görüntülerde manuel segmentasyonun maliyetli ve zaman alıcı olması, verimlilik ve doğruluk açısından gelişmiş otomatik segmentasyon yöntemlerine duyulan ihtiyacın daha belirgin bir hale bürünmesini sağlamaktadır (Kumar, 2018).

1.6. Segmentasyon Yöntemleri Arasındaki Farklar

Daha önce belirtildiği şekliyle, farklı segmentasyon yöntemleri, uygulama alanına ve görüntü özelliklerine bağlı olarak çeşitli avantajlar ve sınırlamalar sunmaktadır. Bu teknikler, yalınlıkları ve işlem etkinlikleri nedeniyle tercih edilebildiği gibi, işlem sırasında sağladıkları esneklik de kullanım bakımından önemli bir avantaj yaratabilmektedir. Kenar tabanlı ve sınır tabanlı yaklaşımlar, farklı bölgelerin tespiti açısından etkili yöntemlerdir; ancak bu teknikler, özellikle görüntüdeki artefaktlara karşı duyarlı olmaları nedeniyle bazı durumlarda sınırlayıcı olabilmektedir. Bu yöntemler arasındaki farkları doğru biçimde anlamak, belirli görevler için uygun segmentasyon yöntemini seçmek için çok önemlidir. Çeşitli segmentasyon yöntemleri arasındaki farkları anlamak için, her yaklaşımın ilkelerini, avantajlarını ve sınırlamalarını incelemeyi ya da araştırmayı önemli kılmaktadır (Afandi vd., 2020; Bali ve Singh, 2015; Divya ve Ganesh Babu, 2019).

1.6.1. Doğruluk ve Hassasiyet

Görüntü segmentasyonu, doğruluk ve kesinliğin çok önemli olduğu tıbbi görüntüleme de dahil olmak üzere birçok alanda kritik bir aşamadır. Segmentasyondaki doğruluk sorunları, mevcut ölçümlerin eksikliklerini veya segmentasyon hatalarını tespit edememesinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca, segmentasyon sürecinin öznel doğası da hatalara yol açabilmektedir; çünkü bireysel segmentasyonlar, iyileştirme seviyelerine göre farklılık gösterebilmekte ve bu durum yetersiz ya da aşırı segmentasyona neden olabilmektedir (Alonso vd., 2004; Wu vd., 2023). Segmentasyondaki kesinlik sorunları, özellikle küçük nesneler için görüntü segmentasyonunun kesinliği üzerindeki enterpolasyonun etkileri gibi faktörlerden kaynaklanabilmektedir (Coca-Rodríguez ve Lorenzo-Ginori, 2014). Bölge büyütme yöntemleri, genellikle artefakt gibi problemleri önleyebilmektedir. Bu yöntemler tümör ve organ gibi bölgeler dahil olmak üzere çeşitli segmentasyon görevlerine uyarlanabilmektedir. Bölge büyütme, özellikle eğrilik analizi veya olasılıksal yaklaşımlar gibi diğer tekniklerle birleştirildiğinde tıbbi görüntüleri segmentlere ayırmada yüksek doğruluk sağlayabilir (Hore vd., 2016).

1.6.2. Yeniden Üretilirlik ve Kullanıcı Bağımlılığı

Segmentasyon metotlarının, tekrar üretilebilirliği ve kullanıcı bağımlılığı arasındaki farklılıklar, özellikle görüntü analizi ve segmentasyon uygulamalarında dikkatle değerlendirilmesi gereken unsurlardır. Farklı segmentasyon yöntemleri, yaklaşım biçimleri ve etkililik düzeyleri açısından önemli ölçüde değişkenlik göstermekte; bu durum hem elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğini hem de kullanıcıya olan bağımlılık derecesini doğrudan

etkilemektedir. Manuel Segmentasyon, uygulayıcıya bağlılık ve sınırların izlenmesindeki sübjektif farklılıklar nedeniyle genellikle düşük tekrarlanabilirliğe sahiptir (Standard, 2019). Çalışmalar, uygulayıcıların çıktıları arasında önemli farklılıklar ve manuel eşiklemede düşük tekrarlanabilirlik olduğunu göstermektedir (Levin vd., 2019). Buna karşın otomatik segmentasyon, genellikle manuel yöntemlere kıyasla daha yüksek tekrarlanabilirlik sunmaktadır. Ancak, derin öğrenme modelleri ön işleme ve sayısal kararlılıktaki farklılıklar nedeniyle değişkenlik göstermektedir (Des Ligneris vd., 2023; Renard vd., 2020). Yarı otomatik segmentasyon ise, kullanıcı girdisi ile otomatik süreçleri birleştirerek yeniden üretilebilirliği artırma potansiyeli taşımaktadır. Ancak yine de kullanıcı doğruluğu ve girdi yerleşiminden etkilenir (Gan vd., 2016).

Tekrarlanabilirlik, bilimsel çalışmalarda sonuçların doğrulanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bazı segmentasyon yöntemlerinde yüksek düzeyde tekrarlanabilirlik sağlanırken, bazı tekniklerin önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği belirtilmektedir (Einstein vd., 1997; Xiong ve Cribben, 2023). Kullanıcı bağımlılığı açısından değerlendirildiğinde, segmentasyon sürecinin yönlendirilmesinde kullanıcı girdisi çoğu zaman kaçınılmazdır. Bu durum, segmentasyon sonuçlarında kullanıcı becerisine ve girdi doğruluğuna bağlı olarak değişkenlik ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Tekrarlanabilirlik düzeyi, kullanıcı girdilerinin yerleşimi, sayısı ve uzunluğu gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilenmekte; bu faktörler segmentasyon sonuçlarının üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynamaktadır. (Chai ve Goh, 2017).

1.6.3. Zaman Verimliliği

Segmentasyon yöntemlerini karşılaştırırken, zaman verimliliği, uygulanabilirliği ve performansı etkileyen kritik bir değişken olarak kabul edilmektedir. Grafik tabanlı segmentasyon yöntemleri, hesaplama açısından yoğun olmakla birlikte, piksel sayısına orantılı olarak çalışacak şekilde optimize edilebilmekte; bu da belirli kısıtlamalar altında daha verimli olmalarını sağlamaktadır (Falcao vd., 2006; Malmberg vd., 2011). Bu yöntemlerde kullanılan yazılımlar genellikle etkileşimli kullanıcı girdisi gerektirmektedir; bu durum toplam işlem süresini artırabilmekte, ancak daha hassas segmentasyon sonuçları elde edilmesine olanak tanımaktadır (Maleike vd., 2009; Malmberg vd., 2011). Geleneksel eşikleme yöntemleri, özellikle büyük arama alanlarıyla çalışıldığında zaman alıcı olabilmektedir. Eşikleme segmentasyon yöntemi, nesneleri piksel yoğunluğunun önceden tanımlanmış bir eşik değerine göre arka plandan ayıran bir tekniktir. Bu yöntemin avantajları arasında yapısal olarak basit olması ve uygulama kolaylığı yer almaktadır (Wu ve Castleman, 2023). Bölge büyütme yöntemlerinin en önemli dezavantajlarından biri, segmentasyonun doğruluğunun büyük

ölçüde ilk tohum (seed) seçimine bağlı olmasıdır. Bu seçim süreci çoğunlukla manuel gerçekleştirilmektedir. Özellikle büyük hacimli 3B veri kümeleri için hesaplama açısından zaman alıcı olabilmektedir. Ayrıca homojen bölgelerde aşırı segmentasyon riski bulunmakta ve bu durum, sonrasında ek son işleme gerektirebilmektedir (Cheng ve Wang, 2020).

1.6.4. Morfometrik ve Hacimsel Ölçümler Üzerindeki Etki

Segmentasyon yöntemleri, morfometrik ve hacimsel ölçümlerde doğruluk ve tekrarlanabilirlik açısından yüksek düzeyde etkileşim içerisindedir. Seçilen segmentasyon yöntemi, uygulama çeşitliliği ve kullanılan yaklaşım doğrultusunda hacimsel ölçümlerin doğruluğunu direkt olarak etkileyebilmektedir. Bazı yöntemler, segmente edilen anatomik yapıların sınır bölgelerinde daha isabetli hacim tahminleri gösterebilmektedir (Mayer vd., 2004). Otomatik segmentasyon yöntemleri, özellikle klinik diş hekimliği uygulamalarında zaman tasarrufu sağlamak ve metrik açıdan güvenilir ölçümler üretebilmektedir; ancak optimum doğruluğa ulaşmak için çoğu zaman manuel düzeltmelere ihtiyaç duyulmaktadır. (Galibourg vd., 2018). Otomatik segmentasyon tekniklerinin yaygınlaşması, yüksek verimlilikle yürütülen embriyo fenotipleme çalışmalarında beyin ve böbrek hacimlerinin doğru bir şekilde ölçülmesini mümkün kılmış; bu da volumetrik analizde otomatik yöntemlerin sahip olduğu potansiyeli açıkça ortaya koymuştur (Norris vd., 2013).

ITK-Snap ve ImageJ gibi bazı yazılım programlarında kullanılan manuel segmentasyon tekniklerinin, dişlerin fiziksel hacim ölçümlerine en yakın sonuçları verdiği gösterilmiş ve doğruluk açısından önemli avantajlar sunduğu vurgulanmıştır. Segmentasyon yöntemlerinin karşılaştırılmasında karşılaşılan başlıca zorluklardan biri; voksel boyutlarının, yazılım programlarının ve ağız içi tarayıcıların hacim ölçümleri üzerindeki tesirini atlamamak gerekliliğidir. Zira bu faktörler, elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkileyebilmektedir (Aydogdu vd., 2024). Farklı segmentasyon yöntemleriyle elde edilen sonuçlardaki doğal belirsizlik ve muğlaklık, özellikle yüksek düzeyde doğrudan ayırım yapılamayan yapılarda klinik doğruluğa ulaşmayı güçleştirmekte; bu da daha ayrıntılı analizlerin yapılmasını ve potansiyel kalibrasyon adımlarının uygulanmasını zorunlu kılmaktadır (Bertels vd., 2021).

1.6.5. Son Üç Boyutlu Modellerdeki Nitel Farklılıklar

Segmentasyon yöntemleri, nihai 3B modellerin kalitesi ve yapısal özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmakta ve önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Farklı segmentasyon yöntemleri, farklı segmentasyon kaliteleriyle sonuçlanabilmekte; bu durum, birden fazla

algoritma ile elde edilen segmentasyon çıktılarının karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır (Bouksim vd., 2016). Şekil segmentasyonu, birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak farklı segmentasyon yöntemlerinin verimliliği ve doğruluğu birbirinden farklılık göstermekte, bu da belirli gereksinimler için etkili bir yöntem seçimini zorlaştırmaktadır (Li ve Peng, 2022). Bilgisayar grafiklerinde 3B hedef nesnelerin tutarlı alt bölgelere segmentasyonu çok önemlidir ve segmentasyon yöntemlerinin verimliliği ve doğruluğu farklılık göstererek nihai 3B model kalitesini etkilemektedir. Önerilen 3B model segmentasyon metodolojisi, bir 3B modeldeki alt bölgelerin birleştirilmesi ve bölünmesini içermekte olup, farklı segmentasyon yöntemlerinin nihai model kalitesi üzerindeki tesirini açıkça ortaya koymaktadır (Yoon ve Kuijper, 2010).

3B segmentasyon teknikleri üzerine yapılan kapsamlı araştırmalara karşın, bu yöntemlerin kalitesini karşılaştırmak ve değerlendirmek halen zorlu bir süreç olmaya devam etmekte; bu da farklı segmentasyon yöntemleriyle üretilen nihai 3B modellerin karşılaştırılmasındaki zorlukları göstermektedir (He ve Wang., 2018). 3B segmentasyon yöntemlerini değerlendirmek için tatmin edici performans ölçütlerinin olmaması bir problem ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunu çözmek için Sokal-Sneath metriğine dayalı yeni bir değerlendirme yöntemi önerilmiştir ve farklı segmentasyon yöntemleriyle üretilen nihai 3B modellerin karşılaştırılmasındaki zorlukların altı çizilmiştir (Arhid vd., 2016). Bir başka çalışmada ise segmentasyon niteliklerinin değerlendirilmesinin hala çözülmemiş bir sorun olduğu belirtilmiş; bu doğrultuda, Kulczynski benzerlik endeksine dayalı yeni bir objektif değerlendirme ölçütü geliştirilmiş ve farklı segmentasyon yöntemleriyle üretilen nihai 3B modellerin karşılaştırılmasındaki güçlükler bir kez daha vurgulanmıştır (Zakani vd., 2016).

1.7. Anatmik Çalışmalarda Segmentasyonun Önemi

Kesitsel tıbbi görüntülerde segmentasyon, anatomik yapıların tanımlanması ve incelenmesi açısından temel bir adımdır. Segmentasyon aracılığıyla bir anatomik yapı çevresindeki dokulardan ayrılarak belirginleştirilmekte; böylece ham görüntülerde fark edilmesi güç olan sınırlar ve anomaliler daha kolay saptanabilmektedir (Mortada vd., 2023). Örneğin, MRG'de bir tümörün segmentasyonu, lezyonun sınırlarını ve yayılımını açık bir biçimde ortaya koymakta; bu da tanı koyma ve karakterizasyon sürecinde önemli avantajlar sağlamaktadır (Wang vd., 2018a). Segmentasyon, yalnızca görüntülerdeki yapıları tanımlamakla kalmaz; aynı zamanda her bir piksel ya da vokselin hangi yapıya ait olduğunu belirleyerek yapılandırılmamış veriyi anlamlı ve ölçülebilir hâle getirir. Anatomik yapılara yönelik kantitatif analizler büyük ölçüde segmentasyonun doğruluğuna bağlıdır; zira segmentasyon işlemi tamamlandıktan sonra hacim, şekil ve morfolojik özellikler yüksek

hassasiyetle hesaplanabilmektedir (Mortada vd., 2023). Örneğin, bir organ ya da tümörün hacimsel ölçümleri segmentasyonla elde edilmekte ve bu veriler hastalık progresyonunun ya da tedaviye yanıtın takibi açısından oldukça kıymetlidir (Mori, 2018). Ayrıca, radyomik ve doku analizlerinde, segmentasyonla ayrılmış bölgelerden; yoğunluk dağılımları, yüzey alanı, düzensizlik gibi sayısal özellikler çıkarılmakta ve bu veriler histopatolojik bulgular ya da klinik prognoz ile ilişkilendirilebilmeye imkân tanımaktadır (Mortada vd., 2023). Nöroanatomik çalışmalarda ise özellikle hipokampus gibi beyin yapılarının segmentasyonu, morfolojik analizler için vazgeçilmezdir; bireyler ya da zaman noktaları arasında boyut ve şekil karşılaştırmaları bu sayede gerçekleştirilmektedir (Fel vd., 2023). Bu tür analizler, büyüme, yaşlanma ve nörodejeneratif değişiklikler gibi süreçlere ilişkin nitelikli bilimsel çıkarımlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Segmentasyonla arka plandan ayrılan bir yapı, farklı bir renkle vurgulanabilmekte ya da üç boyutlu model hâline getirilerek detaylı incelemeye imkân sunmaktadır (Zhou vd., 2018)

1.7.1. Morfolojik Araştırmaya Katkı

Anatomik çalışmalarda segmentasyon, morfolojik araştırmaların ilerletilmesi, belirli anatomik yapıların hassas bir şekilde tanımlanması ve ayrıştırılması yoluyla bu yapıların formu, işlevi ve varyasyonlarının anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır (Somasundaram ve Alli, 2012; Wasserthal vd., 2023). Örneğin, toplam segmentasyon gibi modellerin geliştirilmesiyle BT görüntülerinde 104 anatomik yapının segmentasyonu mümkün hale gelmiş ve bu sayede kapsamlı morfolojik analizler gerçekleştirilebilmiştir (Wasserthal vd., 2023). Bununla birlikte alfa ağacı yöntemi ve hu-moment eşikleme gibi gelişmiş segmentasyon tekniklerinin de daha ayrıntılı etiketleme ve ileri düzey morfolojik analizleri kolaylaştırdığı gösterilmiştir (Tabone vd., 2019). Ayrıca segmentasyon, karmaşık anatomik yapıların ve varyasyonlarının anlaşılmasında büyük önem taşıyan üç boyutlu anatomik modellerin oluşturulmasına da olanak sağlamaktadır (Niessen, 2008; Puranik ve Krishnan, 2010). Morfolojik araştırmalarda segmentasyonun teknik temeli genellikle ileri düzey algoritmalara dayanmaktadır. U-Net ve türevleri gibi derin öğrenme modelleri, karmaşık anatomik yapıların sınırlarını yüksek doğrulukla belirlemekte ve morfolojik araştırmalarda devrim gibi gelişmelere olanak sağlamaktadır. Bu modellerin büyük veri setlerini işleyebilme kapasiteleri ve farklı görüntü kaliteleriyle uyumlu çalışabilme yetenekleri, onları morfolojik analizler açısından oldukça önemli bir hale getirmektedir (Palazzo vd., 2024; Xu vd., 2024).

1.7.2. Anatomik Eğitim ve Görselleştirmeyi Geliştirme

Segmentasyon, anatomik yapıların detaylı ve doğru biçimde görselleştirilmesini sağlayarak anatomi eğitimine ve görsel algının gelişimine önemli katkılar sunmaktadır. (Bücking vd., 2017; Jinga vd., 2023). Bu süreçte dayanan 3B görselleştirme teknolojilerinin, öğrencilerin mekânsal bilgi düzeylerini ve anatomiye dair kavrayışlarını artırdığı gösterilmiştir (Hackett ve Proctor, 2016). Segmentasyona dayalı 3B uygulamaların yer aldığı eğitim atölyelerinde, tıp öğrencilerinin ve sağlık profesyonellerinin BT görüntülerini yorumlama konusundaki özgüvenlerinin arttığı ve anatomik bilgilerinde belirgin bir gelişme sağlandığı saptanmıştır (Jinga vd., 2023). Ayrıca, segmentasyon teknikleriyle geliştirilen artırılmış gerçeklik modellerinin, radyolojik anatomi ve patoloji öğretiminde etkileşimli ve sezgisel bir araç olarak kullanıldığı; bu sayede kompleks kesitsel görüntülerin daha basit erişilebilir bir hale getirildiği bildirilmiştir (Pinsky vd., 2023). Segmentasyonun 3B baskı teknolojileriyle entegrasyonu ise anatomi eğitiminde dönüştürücü bir etki yaratmıştır. Segmentasyonla elde edilen görüntülerin fiziksel modellere dönüştürülmesi, öğrencilerin karmaşık anatomik yapıları dokunsal olarak deneyimlemelerine olanak tanımakta ve öğrenme sürecini derinleştirmektedir (Bücking vd., 2017).

1.7.3. Klinik Uygulamalarda Segmentasyonun Rolü

Günümüzde klinik uygulamalarda segmentasyon, modern tıbbın vazgeçilmez enstrümanlarından biri olarak kullanılmaktadır. Özellikle cerrahi planlama ve çeşitli tıbbi müdahalelerde, segmentasyon işlemleri anatomik yapıların detaylı ve doğru bir şekilde sınırlandırılmasını sağlayarak hayati bir rol üstlenmektedir. Bu süreç, görüntüleme teknikleriyle entegre bir şekilde çalışarak görüntü rehberliğinde gerçekleştirilen cerrahi operasyonlar, minimal invaziv girişimler ve bireyselleştirilmiş tedavi planlamaları için temel bir yapı taşı olarak değerlendirilmektedir (Ansari vd., 2022; Niessen, 2008).

Özellikle tümörler ve diğer hayati anatomik yapıların hassasiyetle tanımlanması, cerrahi müdahalelerin başarısını doğrudan etkileyen bir faktördür. Segmentasyonun bu noktada sunduğu ayrıntılı sınırlandırma imkânı, cerrahi rezeksiyonların doğruluğunu artırmakta, çevre dokuların korunmasına katkı sağlamakta ve tedavi sürecinin genel etkinliğini yükseltmektedir. Ayrıca bu tür uygulamalar, nöroşirürji, ortopedi, kardiyovasküler cerrahi gibi uzmanlık alanlarında yaygın olarak kullanılmakta ve klinik kararı destekleyen tüm ana sistemlerin geliştirilmesine de katkıda bulunmaktadır (Ansari vd., 2022; Nebril, 2011).

Günümüzde etkileşimli segmentasyon yöntemleri, klinisyenlerin segmentasyon sürecine doğrudan dahil olabilmelerine imkân tanıyan dinamik bir yapı sunmaktadır. Bu yöntemler sayesinde sağlık profesyonelleri, segmentasyon sonucunda elde edilen yapı konturlarını hızlı ve etkili bir şekilde gözden geçirebilmekte, gerekli durumlarda manuel düzeltmelerle son haline getirebilmektedir. Bu durum, segmentasyonun klinik pratikteki uygulanabilirliğini ve günlük iş akışlarına entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır (Kolesov vd., 2012; Zhou ve Xie, 2013).

Öte yandan, son yıllarda yapay zekâ temelli algoritmaların, özellikle derin öğrenme modellerinin, segmentasyon süreçlerine entegrasyonu ile büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Derin öğrenme sistemleri, özellikle görüntülerde daha önce karşılaşılmamış ya da karmaşık yapılar söz konusu olduğunda dahi sınırların belirlenmesinde yüksek doğruluk ve zaman tasarrufu sağlamaktadır. Klasik yöntemlere kıyasla daha az insan müdahalesi gerektiren bu teknolojiler, daha hızlı ve güvenilir sonuçlar üreterek klinik karar verme süreçlerinin bilgi temelli ve kişiye özel yaklaşımlarıyla desteklenmektedir (Trimpl vd., 2021).

1.8. Veteriner Hekimlikte Anatomik Yapıların Segmentasyonundaki Zorluklar

Veteriner hekimlikte canlıların anatomik yapılarını segmente etmek, insan tıbbındaki görüntüleme uygulamalarıyla belirli yönlerden örtüşse de pek çok kendine özgü güçlüğü de beraberinde getirmektedir. Çoğu veteriner kliniğinde kullanılan görüntüleme cihazları özellikle taşınabilir ya da saha koşullarına uyarlanmış sistemler iken, insan hastanelerinde kullanılan son teknoloji tarayıcılara kıyasla genellikle daha düşük uzamsal ve kontrast çözünürlüğü sunmaktadır. Bu durum, özellikle yumuşak doku–kemik geçişlerinde ya da ince anatomik detayların görüntülenmesinde sınırların belirsizleşmesine ve karmaşık yapıların doğru biçimde ayrıştırılmasının zorlaşmasına neden olmaktadır (Wang vd., 2011). Ayrıca, pek çok geleneksel segmentasyon algoritması; görüntüde yüksek gradyanlı kenarlar, pikseller arası tutarlı parlaklık geçişleri veya pürüzsüz konturlar gibi varsayımlara dayanmakta; ancak bu varsayımların her hayvan türünde veya her patolojik durumda geçerli olmaması, özellikle tümöral kitleler, kırıklar veya dejeneratif değişiklikler gibi kompleks olgularda yanlış pozitif ya da negatif sınırlamalara yol açabilmektedir. Sonuç olarak, veteriner kliniklerinde meydana gelen segmentasyon hataları hem tanısal doğruluğu düşürebilmekte hem de preoperatif planlama süreçlerinde hatalı ölçümlere ve yanlış cerrahi kararlar alınmasına zemin hazırlayabilmektedir (Georgescu vd., 2005; Ibragimov vd., 2017; Namias vd., 2016).

1.8.1. Türe Özgü Anatomik Karmaşıklık

Veteriner anatominin kapsadığı canlı çeşitliliği küçük evcil memelilerden çiftlik hayvanlarına, kuşlardan egzotik türlere kadar her biri kendine özgü morfolojik özellikler sergileyen son derece geniş bir yelpazeyi oluşturmaktadır. Bu biyolojik çeşitlilik, genelleştirilmiş (türden bağımsız) segmentasyon algoritmalarının tasarımını ve yaygın klinik kullanımını doğal olarak zorlaştırmaktadır (Blázquez-Llorca vd., 2023; Raudaschl vd., 2017; Vickram vd., 2024). Aynı tür içerisinde görülen ırk farklılıkları, yaşa bağlı büyüme paternleri ve cinsiyet dimorfizmi gibi faktörler de anatominin şekil, boyut ve orantılarında ek varyasyon katmanları yaratmaktadır. Örneğin, köpek ırkları arasında brakisefalik, mezosefalik ve dolikosefalik kafatası tipleri, morfometrik parametrelerde dramatik değişikliklere neden olurken; sığır ırklarında boynuz kaidesinin konumu ve sinüs volümü gibi yapısal özelliklerde belirgin farklılıklar gözlemlenebilmektedir (Bukovec vd., 2004). Bu nedenle, segmentasyon süreci türe veya hatta ırka özgü anatomik bilgi ve uygun referans atlasları gerektirir; aksi hâlde algoritmalar, karmaşık geometrileri yeterince temsil edemeyerek eksik veya hatalı segmentler üretebilir. Dolayısıyla, veteriner görüntüleme alanında başarılı bir segmentasyon süreci yalnızca güçlü modellere değil; aynı zamanda zengin tür-spesifik eğitim setlerine, uzman düzeyinde anatomi bilgisine ve gerektiğinde manuel ince ayarlarla desteklenmiş bir doğrulama mekanizmasına ihtiyaç duymaktadır (Burti vd., 2024; Lamb ve David, 2012).

1.8.2. Segmentasyon Protokollerinin Standardizasyonu ve Doğrulanması

Segmentasyon protokollerinin standardizasyonu, otomatik yöntemlerin zaman alıcı ve maliyetli olabilen sınırlamaları nedeniyle genellikle manuel segmentasyona duyulan ihtiyacı gündeme getirmektedir (Ibragimov vd., 2017; Wagenknecht vd., 2006). Anatomik bilginin segmentasyon algoritmalarına dahil edilmesi, segmentasyon doğruluğunu artırabilmektedir. Örneğin, anatomik yapıların göreceli konumlarına dair önceden bilinen bilgilerin kullanılması, özellikle yakın konumdaki organların daha başarılı bir biçimde segmente edilmesini sağlayabilmektedir. Yapay zekânın yanı sıra, derin öğrenme teknikleri, daha doğru ve verimli segmentasyon süreçleri sağlayarak bu zorlukların bazılarının üstesinden gelme konusunda umut vaat etmekte, doğruluğu arttırmaktadır (Chen vd., 2019; Vickram vd., 2024). Çoklu atlas yöntemleri ve veri tabanı güdümlü segmentasyon, benzer vakalardan elde edilen ön bilgileri kullanarak segmentasyon doğruluğunu artırmak için geniş açıklamalı veri kümelerinden yararlanmaktadır (Georgescu vd., 2005). İlgili yapının segmentasyonu sırasında, konunun uzmanı tarafından gerçekleştirilen ya da uzman gözetiminde yürütülen ve kullanıcı etkileşimine olanak tanıyan yarı otomatik araçların kullanılması, segmentasyonun doğruluk ve tutarlılığını artırabilmektedir. Bu durum, manuel düzeltmelerin sıklıkla gerekli olduğu

veteriner hekimlik uygulamalarında söz konusu yöntemleri özellikle değerli kılmaktadır (Wagenknecht vd., 2006).

1.9. Çalışmanın Odak Noktası ve Gerekçesi

Morfometrik ve volumetrik veriler aracılığıyla koyun baş bölgesinin incelenmesi, özellikle veteriner hekimlik, karşılaştırmalı anatomi ve hatta insan tıbbi araştırmaları açısından önemli klinik ve anatomik katkılar sunmaktadır. Koyunlar, kraniyofasiyal yapı bakımından insanla gösterdikleri benzerlikler nedeniyle, insan kraniyofasiyal anatomisini incelemeye yönelik büyük hayvan modellerin arasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu kapsamda elde edilen morfometrik veriler, veteriner hekimlerin koyun kafatasındaki normal varyasyonları ve patolojik durumları değerlendirmelerine yardımcı olarak doğumsal veya edinsel deformitelerin tanı sürecine katkı sağlamaktadır (Banstola ve Reynolds, 2022; Gokyer vd., 2024; Ianacone vd., 2016; Masoudifard vd., 2022; Parés-Casanova ve Domènech-Domènech, 2021). Bu veriler ayrıca, maloklüzyon, kırık gibi kraniyofasiyal bozuklukların tedavisi için dental ve maksillofasiyal cerrahi uygulamalarda da kullanılmaktadır. Koyun kafatası, bazı morfolojik özellikleriyle insan anatomisi ile benzerlik gösterdiğinden; sinüs cerrahisi, dental işlemler ve nörocerrahi yaklaşımlar gibi cerrahi uygulamalarda eğitim modeli olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır (Hicdonmez vd., 2006; Stan vd., 2023). Volumetrik çalışmalar, özellikle BT ve MRG gibi ileri görüntüleme teknikleriyle elde edilen veriler aracılığıyla, cerrahi planlama ve prosedürlerin simülasyonu açısından önemli bir araç haline gelmiştir. Morfometrik analizler ayrıca çiğneme mekaniği, stres dağılımı ve biyomekanik yüklenme paternlerinin anlaşılması gibi alanlarda da koyun kafatasını değerli bir model olarak öne çıkarmaktadır (de Oliveira vd., 2017; Hicdonmez vd., 2006). Koyun kafatası morfometrisinin araştırılması, büyüme paternleri, evrimsel adaptasyonlar ve ırka özgü morfolojik farklılıkların belirlenmesi açısından da bilimsel önem taşımaktadır. Bu kapsamda elde edilen volumetrik veriler, veteriner cerrahide kullanılmak üzere bireye veya türe özel implantların ve cerrahi kılavuzların tasarlanmasında değerlendirilebilmektedir. Ayrıca eğitim ve araştırma amaçlı olarak 3B baskı ve hesaplamalı modelleme açısından da önemlidir. Öte yandan, 3B modelleme ve BT taramalarının kullanımı, morfometrik çalışmaların doğruluğunu artırarak kafatası yapılarına ilişkin detaylı analizler yapılmasına ve adli araştırmalara da katkı sağlamaktadır (İşbilir ve Güzel, 2023; Jashari vd., 2022; Jeanjean vd., 2025; Manuta vd., 2024).

1.9.1. Mandibula, Molar Diş ve Beynin Seçilmesinin Gerekçesi

Bu projede mandibula, molar diş ve beyin çalışma materyali olarak seçilmesi, veteriner hekimlik uygulamaları ve karşılaştırmalı araştırmalar açısından taşıdıkları anatomik, işlevsel ve metodolojik öneme dayanmaktadır. Mandibula, geviş getiren hayvanlarda ruminasyona özgü dikey ve yatay kuvvet bileşenlerine uzun süre maruz kaldığı için, biyomekanik adaptasyonların, büyüme modellerinin ve türe özgü morfolojik varyasyonların anlaşılmasında çok önemli bir anatomik yapıdır (Choudhary vd., 2015; Raia vd., 2018). Ayrıca kortikal-trabeküler geçiş bölgeleri, alveoler düzlemler, diş kökleri ve temporomandibular eklem yüzeyleri gibi çok farklı radyolojik yoğunluklara sahip mikro-anatomik alanlar içermesi, mandibulayı çeşitli segmentasyon yöntemlerinin doğruluk ve ayırt edebilme yeteneğini değerlendirmek için ideal bir model haline getirmektedir (Mulder vd., 2006; Moon vd., 2004). Öte yandan, koyun mandibulası diş hekimliği ve ortopedi araştırmalarında sıklıkla model olarak kullanılmakta olup (Al-Qareer vd., 2004), bu çalışmada geliştirilecek segmentasyon stratejilerinin hem veteriner klinik uygulamalarda hem de insan-hayvan karşılaştırmalı maksillofasiyal araştırmalarında doğrudan uygulanabilirliği öngörülmektedir.

Araştırmada molar dişlerin seçilmesinin başında bu dişlerin karmaşık morfolojileri gelmektedir. Aşınma modelleri, evrimsel adaptasyonlar, gelişimsel biyoloji, beslenme alışkanlıkları ve evrimsel süreçler hakkında kapsamlı bilgiler sağlamaktadır. Tabi ki bu özellikler, dişin morfolojik karmaşıklığını ve buna bağlı segmentasyon zorluğunu artırır. Fakat bu özellikler, molar dişleri memelilerde diş yapısının hem işlevsel hem de evrimsel dinamiklerini anlamak için çok değerli kılmaktadır (Genaro vd., 2019; Knight-Sadler ve Fiorenza, 2017; Selig vd., 2019). Dentin-mine ara yüzeyinin yüksek kontrastlı görüntü sağlaması, otomatik eşik-tabanlı segmentasyonlar için avantaj oluştururken, fissür-çatlak bölgeleri ve sement-mine geçişleri algoritmaların hata payını artırabilir; bu durum, manuel, yarı-otomatik ve tam otomatik segmentasyon yöntemlerinin karşılaştırılması için ideal bir test alanı yaratır. Molar dişlerin doğru hacimsel değerlendirmesi, yaş tahmini, patoloji teşhisi ve tür karşılaştırması için hassas diş ölçümlerinin gerekli olduğu veteriner diş hekimliği, paleontoloji ve adli bilimlerdeki araştırmaları geliştirebileceği düşünülmektedir (Asif vd., 2018; Diéguez-Pérez ve Ticona-Flores, 2022). Bu çalışmayla birlikte, dişin sert doku yapısındaki heterojenliğe karşı en uygun segmentasyon stratejisinin hangisi olduğunun sistematik biçimde ortaya konması hedeflenmektedir.

Son olarak beyin, nörobilim ve tanısal görüntülemedeki giderek daha fazla tercih edilen model olması ve önemi nedeniyle dahil edilmiştir. Koyun beyni, insana çok benzeyen yapısı nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir model olup nöroanatomik ve translasyonel çalışmalarda da tercih edilmektedir. Gri ve beyaz madde kontrastı, MRG üzerinde segmente edilebilir nitelikte olsa da koyun beyin ventriküllerinin küçük hacimli olması, otomatik algoritmalar için ayırt etme eşiğini daraltabilmektedir. Bu nedenle, manuel ve otomatik segmentasyon yöntemlerinin beyin hacim ölçümleri açısından karşılaştırılması; veteriner nörogörüntüleme protokollerinin iyileştirilmesine ve nörolojik hastalık modellemelerine yönelik gelişmelere katkıda bulunabileceği düşünülmektedir (Chau vd., 2025; Ella ve Keller, 2015; Powell vd., 2008). Elde edilecek volumetrik verilerin, nörodejeneratif hastalık modellerinin kantitatif takibinden hayvan refahı araştırmalarına kadar geniş bir yelpazede değerlendirilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca koyun beyninin insana oranla benzer boyutlara sahip olması, yeni beyin cerrahi tekniklerinin ölçeklenebilirlik analizleri açısından avantaj sağlayarak, manuel, yarı otomatik ve otomatik segmentasyon yöntemlerinin klinik zaman problemi ve doğruluk çıktılarının direkt olarak karşılaştırılmasına zemin hazırlayacaktır (Ella ve Keller, 2015; John vd., 2017).

Bu üç anatomik yapının (kemik, sert diş dokusu, sinir dokusu) birbirinden farklı doku yoğunlukları, şekil karmaşıklıkları ve klinik önem düzeyleri, çalışmanın nihai hedefi olan “çeşitli segmentasyon tekniklerinin zamansal verimliliğini ve ölçüm doğruluğunu sistematik olarak kıyaslama” amacına doğrudan hizmet etmektedir; böylece hem yöntemsel hem de biyolojik bakımdan sağlam temelli hipotezlerin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

1.9.2. Veteriner hekimlikte Model Olarak Koyunun Önemi

Koyun, fizyolojik, anatomik ve genetik açıdan insanlarla gösterdiği benzerliklerin yanı sıra tarımsal alandaki önemi nedeniyle, veteriner ve biyomedikal araştırmalarda sıkça tercih edilen önemli bir hayvan modelidir (Banstola ve Reynolds, 2022; Deml vd., 2019; Quinn vd., 2013). Kullanım alanları; kardiyoloji, diş hekimliği, ortopedi, nörobilim ve bulaşıcı hastalık araştırmaları gibi çok çeşitli disiplinleri kapsamaktadır (Banstola ve Reynolds, 2022; Deml vd., 2019; Paping vd., 2024; Quinn vd., 2013). Koyun modelinin en büyük avantajlarından biri, cerrahi eğitim ve tıbbi cihaz değerlendirilmelerini kolaylaştıran boyutlara sahip olmasıdır (Shofti vd., 2004). Ayrıca, uysal yapıları ve kolay yönetilebilirlikleri, deneysel çalışmalara olan uygunluklarını arttırmaktadır (Arney, 2009). Bunun yanı sıra, düşük bakım maliyetleri sayesinde koyunlar, çeşitli biyomedikal uygulamalarda ekonomik ve pratik bir model olarak öne çıkmaktadır (Diogo vd., 2017).

1.9.3. Morfometrik ve Hacimsel Verilerde Segmentasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılmasının Önemi

Morfometrik ve hacimsel veriler üzerinden segmentasyon yöntemlerinin karşılaştırılması, nicel görüntüleme temelli tüm araştırmalarda ölçüm hatasının kaynağını doğrudan tanımladığı ve bu hatanın sonraki analizlere katlanarak yansımaları engellediği için kritik bir basamaktır. Segmentasyon kurgusundaki en küçük sınırlandırma hatası dahi; yüzey alanı, hacim, lineer boyut ve eğrilik gibi çıktılarda orantısız bir şekilde büyüyen sapmalar olarak yansıyabilmekte; bu durum özellikle karşılaştırmalı çalışmaların istatistiksel gücünü azaltmaktadır (Manuta vd., 2024; Masoudifard vd., 2022). Koyun anatomisinde hassas ölçümlere duyulan gereksinim, segmentasyon doğruluğunun veteriner hekimlik, deneysel biyomekanik ve türler arası evrimsel analizler açısından belirleyici bir role büründüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Nitekim, geometrik morfometri kullanılarak gerçekleştirilen güncel bir çalışmada, koyun kafatası üzerindeki ırklar arası şekil varyasyonlarının adli taksonomide güvenilir ayıracılar sunabileceği gösterilmiştir (Manuta vd., 2024). Benzer şekilde, Romanov koyunlarına ait mandibula'nın BT tabanlı 3B rekonstrüksiyonu hem klinik ortopedik planlamada hem de öğretim modellerinin geliştirilmesinde yüksek düzeyde öngörü doğruluğu sağlamıştır (İşbilir ve Güzel, 2023). Bu tür çıktılar, segmentasyonun yalnızca bir "model oluşturma" değil, aynı zamanda biyomekanik simülasyonlar, yaş tayini, patoloji skorlaması ve implant tasarımı gibi ikincil uygulamaların güvenilirliğini belirleyen çekirdek bir unsur olduğunu kanıtlamaktadır.

Bu çalışma, dokusal kontrast, geometrik karmaşık ve klinik önem açısından birbirinden farklı üç yapıya (çene kemiği, molar diş ve beyin) manuel, yarı-otomatik (eşikleme, bölge büyütme) ve tam otomatik segmentasyon yöntemlerini uygulayarak, yöntem-bazlı zaman süreci, benzerlik düzeyi ve kullanıcı-bağımlı varyasyon parametrelerini sistematik biçimde karşılaştırmaktadır. Veteriner görüntüleme alanında dijital iş akışlarını ve yapay zekâ destekli yazılımların hızla yaygınlaştığı günümüzde, elde edilecek bulgular; belirli klinik ya da araştırma senaryoları için "hangi yöntem, hangi koşulda en uygun çözümü sunar?" sorusuna ampirik bir yanıt sağlayacaktır. Bununla birlikte, bu çalışma segmentasyon protokollerinin standardizasyonuna ve hacimsel analizlerin tekrarlanabilirliğinin artırılmasına katkıda bulunarak, koyun modellerinin insan tıbbına uzanan potansiyelini daha da güçlendirecektir.

1.10. Amaç ve Hipotez

1.10.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, Romanov koyunlarına ait baş bölgesi anatomik yapılarını; özellikle mandibula, molar diş ve beyni yüksek çözünürlüklü BT ($\leq 0,6$ milimetre [mm] kesit kalınlığı) ve 3 Tesla (3T) MRG (1 mm kesit kalınlığı) verileri kullanılarak ayrıntılı şekilde incelemek ve bu verilerden 3B dijital modeller üretmektir.

Modelleme sürecinde altı segmentasyon yaklaşımı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir:

- (1) manuel segmentasyon,
- (2) yarı-otomatik segmentasyon,
- (3) yarı-otomatik segmentasyon + grow-from-seeds (GFS),
- (4) yarı-otomatik segmentasyon + GFS + eşikleme,
- (5) yarı-otomatik segmentasyon + fill-between-slices (FBS),
- (6) otomatik segmentasyon.

Her bir segmentasyon yöntemine ait ara ve nihai modellerde aşağıdaki parametreler kaydedilmiştir:

- Lineer morfometri: maksimum uzunluk-genişlik-yükseklik,
- Volumetrik parametreler: hacim (mm^3), yüzey alanı (mm^2),
- Zaman ölçütleri: segmentasyon süresi

Bu veriler doğrultusunda yöntemler arası tutarlılık değerlendirilmiş, ayrıca cinsiyete bağlı varyasyonların segmentasyon sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntü arşivi, gelecek çalışmalarda yapay zekâ modellerinin yeniden eğitilebilmesi için bir referans veri seti oluşturma hedefiyle uygun meta-verilerle saklanacaktır. Böylece çalışma, (i) Romanov koyunlarına özgü, güncel anatomik veri tabanını genişletmek, (ii) veteriner dijital modelleme protokollerinin standardizasyonuna katkı sağlamak ve (iii) benzer segmentasyon karşılaştırmalarına metodolojik çerçeve oluşturmak üzere tasarlanmıştır.

1.10.2. Araştırma Soruları ve Hipotezler

1.10.2.1. Araştırma Soruları

- Farklı segmentasyon yöntemleriyle elde edilen 3B modellerin anatomik doğruluk düzeyleri arasında anlamlı istatistik fark var mıdır?
- İşlem süresi açısından en verimli yöntem hangisidir ve bu verimlilik ile doğruluk arasında nasıl bir ilişki bulunmaktadır (zaman-doğruluk eğrisi)?
- Otomatik segmentasyon yöntemi, manuel yöntem kadar güvenilir morfometrik sonuçlar üretebilmekte midir?
- Segmentasyon yöntemlerine göre hesaplanan morfometrik (mm) ve volumetrik (mm^3 , mm^2) ölçümler arasında fark istatistik anlam taşır mı?
- Romanov koyunlarında mandibula ve beyin ölçümleri cinsiyete bağlı olarak farklılık göstermekte midir; segmentasyon yöntemi bu farkların saptanabilirliğini etkiler mi?
- Yüksek çözünürlüklü BT ve 3T MRG görüntüleri, koyun baş bölgesine ait anatomik yapıların segmentasyonu için yeterli düzeyde anatomik detay sunmakta mıdır? Görüntüleme modalitesi seçimi segmentasyon çıktısını etkiler mi?

1.10.2.2. Hipotezler

- H1: Manuel, yarı-otomatik ve otomatik segmentasyon yöntemleriyle oluşturulan 3B modeller arasında anatomik doğruluk, morfometrik ölçümler ve hacimsel veriler açısından istatistiki anlamlı farklar bulunmaktadır.
- H2: Segmentasyon yöntemi, toplam modelleme süresini istatistiksel olarak anlamlı biçimde etkiler; otomatik yöntemler süreyi kısaltırken doğrulukta sınırlı veya önemsiz kayıplar oluşturur.
- H3: Romanov koyunlarında mandibula ve beyin morfometrisi cinsiyet yönü ile anlamlı farklılık gösterir; bu farklılıkları tespit etme gücü seçilen segmentasyon yöntemiyle değişir.
- H4: Yüksek çözünürlüklü BT ve 3T MRG teknikleri, koyun baş bölgesi anatomik yapılarını gerçeğe en yakın biçimde modellemek için yeterli detayda veri sağlar; BT sert dokuda, MRG yumuşak dokuda daha yüksek doğruluk sunar.

2. GEREÇ ve YÖNTEM

Çalışmada 10 dişi (Yaş ort. = 11,7 ay) ve 10 erkek (Yaş ort. = 11,8 ay) olmak üzere toplam 20 romanov koyununa ait baş kadavrası materyal olarak kullanıldı. Görüntüleme işlemi yapılmadan önce, mezbahadan temin edilen koyun başları soğuk zincir koşulları altında, görüntüleme işleminin gerçekleştirileceği tesise getirildi. Çalışma, Ankara Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu tarafından onaylandı (Karar No. 2023-22-204). Tüm anatomik terminoloji için Nomina Anatomica Veterinaria, 2017 kullanıldı.

Tüm örnekler, 256 kesitli multidedektörlü BT ve 3T MRG cihazları ile görüntülendi. BT çekimi parametreleri; kV = 120, mAs = 165, kesit kalınlığı = 0,6 mm kullanılarak olacak şekilde elde edildi. MRG parametreleri ise; T1 ağırlıklı çekimde TR = 700 ms, TE = 24 ms, Matrix = 512 x 512, FoV = 250 mm, FoV Phase %100, kesit kalınlığı 1 mm olacak şekilde elde edildi.

Üç boyutlu modelleme; mandibula (sol ve sağ beraber), maxilla'ya ait ikinci molar diş ve beyin (encephalon) yapılarının dijital olarak elde edilmesi ile gerçekleştirildi. Mandibula, temporomandibular eklem bölgesinin anatomik karmaşıklığı ve adli bilimler, diş hekimliği ile ortopedi gibi alanlardaki önemi nedeniyle çalışmaya dahil edildi. Molar diş, kemiksel yapılarla olan yakın anatomik ilişkisi ve segmentasyon hassasiyetinin değerlendirilmesine imkân tanınması nedeniyle tercih edildi. Beyin ise yumuşak doku yapısında ve düzensiz morfolojide bir organ olması nedeniyle segmentasyon sırasında çeşitli zorluklar oluşturduğundan; ayrıca karmaşık sınır özellikleri sayesinde farklı segmentasyon yöntemlerinin etkinliğini karşılaştırmaya imkân tanıdığından çalışmaya dahil edildi.

Mandibula, molar diş ve beyne ait BT ve MRG veri kümelerinin segmentasyon işlemleri, 3D Slicer yazılımı v4.11.2021 (3D Slicer, GitHub, San Francisco) kullanılarak gerçekleştirildi. Segmentasyon öncesinde, pencereleme işlemi (gri seviye eşleme, kontrast germe, histogram modifikasyonu veya kontrast geliştirme olarak da bilinen) uygulandı. Bu işlem, görüntülerin gri tonlamalı bileşenlerin sıralı kesitler boyunca ayarlanması esasına dayanmaktadır ve Hounsfield birimleri ile ifade edilmektedir. Çalışmada pencereleme değerleri, her yapı için ayrı ayrı belirlendi. Buna göre, mandibula, molar diş ve beyin yapıları için sırasıyla şu genişlik (W:x) ve seviye (L:y) değerleri kullanıldı: 3500/600, 2500/1400 ve 650/350. Ardından tüm görüntü veri setleri, 6 farklı segmentasyon metoduyla işlenerek üç boyutlu olarak yeniden yapılandırıldı ve her yapı için dijital modeller elde edildi.

Segmentasyon işlemleri, 3D Slicer v4.11.2021 (3D Slicer, GitHub, San Francisco) yazılımı kullanılarak altı farklı yöntemle gerçekleştirildi ve her bir segmentasyon yaklaşımı, hedeflenen anatomik yapıların üç boyutlu modellerini oluşturmak amacıyla uygulandı. Bu yöntemlerden manuel segmentasyon, 3D Slicer yazılımı içerisinde çizim efekti kullanılarak gerçekleştirildi. Tüm kesitler tek tek sırasıyla atlanmadan manuel olarak işlendi; Uygulama sırasında uygun eşikleme maskesi (threshold) skalası kullanıldı. Son model oluşturulurken seçilen bölgeler üzerinde herhangi bir silme işlemi uygulanmadı. Otomatik segmentasyon, 3D Slicer yazılımı içerisinde otomatik modelleme aracı ile gerçekleştirildi. Bu yöntemde kesitler üzerinde herhangi bir manuel müdahale olmaksızın segmentasyon tamamlandı. Uygulama sırasında uygun eşikleme maskesi kullanıldı. İstenilen model dışında segmente edilen yapılar için silme işlemi uygulandı. Yarı-otomatik segmentasyon işlemi boyama efekti kullanılarak uygulandı. 6-7 kesitte bir, dairesel boyama efekti ile istenilen yapılar seçilerek segmente edildi. Uygulama sırasında uygun eşikleme maskesi kullanıldı. Segmentasyonu bitirmeden önce silme işlemi kullanıldı. Bir diğer yarı-otomatik segmentasyon için, GFS efekti uygulandı. Bu efekt, kullanıcı girdilerini birleştirebilen ve yalnızca yeni girdiden etkilenen yerel bölgeleri güncelleyebilen uyarlanabilir Dijkstra algoritması üzerine işlenmektedir. Uygulama, nesneleri birbirinden ayırmak için nesnelere ait görüntü piksellerini tohum (seed) adı verilerek niteler. GFS algoritmasına dayalı yarı otomatik segmentasyon iki farklı varyasyonla gerçekleştirildi. İlkinde, eşikleme maskesi kullanılmadan her 12-13 kesitte bir uygun yapılar seçilerek segmente edildi. İlgili kesitlerdeki tüm bölgelere otomatik olarak etiket atandı. Segmentasyonu bitirmeden önce silme işlemi kullanılmadı. Aynı yöntem, ikinci varyasyonda bu sefer uygulama sırasında uygun eşikleme maskesi kullanıldı; 12-13 kesitte bir segmentasyon yapıldı ve segmentasyon sırasında silme işlemi gerçekleştirilmedi. Bir diğer yarı-otomatik segmentasyon metodu için, FBS efekti uygulandı. Bu yöntem, segmente edilmiş kesitlerden oluşan örneklem dilimlerinin arasını doldurmaya dayanan bir algoritmadır ve gri seviyelerinin benzerliği ilkesine dayanmaktadır. Segmentasyonda, 6-7 kesitte bir uygun yapılar segmente edildi. Uygulama sırasında uygun eşikleme maskesi kullanıldı. Segmentasyonu bitirmeden önce silme işlemi kullanılmadı. Yukarıda belirtilen eşikleme maskesi, aynı anatomik yapı için farklı segmentasyonlarda bir tutuldu. Böylece elde edilecek görüntülerde yanlışlık azaltılmak istendi. Çalışmada da bu değerler, mandibula, molar diş ve beyin için sırasıyla 394-2259, 1000-3071 ve 75-350 olarak belirlendi.

Tüm bu segmentasyon işlemleri sırasında 3B modellerin elde edilmesine kadar geçen süre ayrıca kaydedildi. Böylece altı farklı segmentasyon yöntemine ait nihai modellerin kalitatif ve kantitatif verileri, elde edilme süreleri ile karşılaştırılmalı olarak değerlendirildi.

Morfometrik hesaplamalar, segmentasyon işlemleri tamamlandıktan sonra, elde edilen 3B modeller üzerinden 3D Slicer yazılımı v4.11.2021 (3D Slicer, GitHub, San Francisco) sürümü kullanılarak gerçekleştirildi. Ölçüm parametreleri, ilgili literatür doğrultusunda (Von den Driesch, 1976) belirlendi ve her bir segmentasyon yöntemi sonucunda oluşturulan modellerde, cinsiyetler ayrı ayrı değerlendirilerek hesaplamalar FBS yapıldı. Elde edilen ölçümler için, yeniden yapılandırılmış yapılarda herhangi bir düzeltme algoritması uygulanmadı.

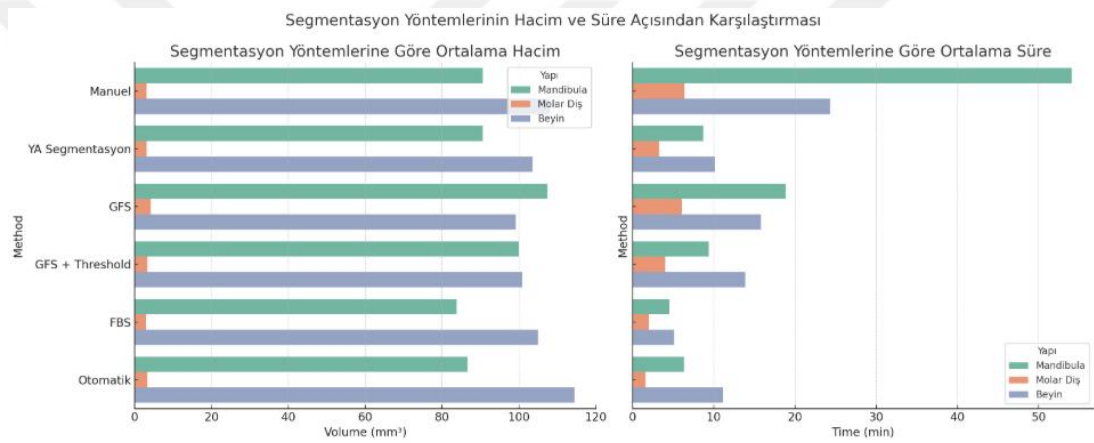
Hacimsel hesaplamalar da benzer şekilde, segmentasyon işlemleri sonucunda üretilen 3B modellerin hacim ve yüzey alanı ölçümleriyle gerçekleştirildi. Bu ölçümler de 3D Slicer yazılımı v4.11.2021 (3D Slicer, GitHub, San Francisco) sürümü kullanılarak yürütüldü ve her bir segmentasyon yöntemi ile her iki cinsiyet için ayrı ayrı hesaplamalar yapıldı. Hacim ve yüzey alanı hesaplamalarında da yeniden yapılandırılmış yapılara herhangi bir düzeltme algoritması uygulanmadı. Elde edilen veriler yöntemler arası karşılaştırma için kullanıldı.

İstatistiksel hesaplamalar için verilere ilişkin tanımlayıcı istatistik veriler hesaplanmış ve verilerin dağılımları dikkate alınarak “Aritmetik Ortalama (Arit.Ort.) $\pm$ Standart Hata (SH)” olarak verilmiştir. Her bir doku ve/veya organdan elde edilen ölçümlere, kullanılan cihazın ve cinsiyetin etkisi, tek faktör tekrarlı iki yönlü varyans analizi (two way mixed design ANOVA) ile incelenmiştir. Oluşturulan modelde cihaz, cinsiyet temel etkileri ile cihaz x cinsiyet etkileşim terimi dahil edilmiştir. Küresellik varsayımı Mauchly's küresellik testi ile test edilmiş olup varsayımın sağlanmadığı durumlarda Greenhouse-Geisser düzeltmesi yapılmıştır. Etkileşim teriminin çözümlenmesinde basit etkiler analizi ve Sidak düzeltmesi kullanılmıştır. Tüm istatistiksel karşılaştırmalarda $P < 0,05$ kriterinden yararlanılmıştır. Verilerin analizleri SPSS 30.0 paket istatistik programı ile yapıldı.

3. BULGULAR

3.1. Hacim Ölçümlerinde Segmentasyon Yöntemlerinin Süre ile Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Bu çalışmada Romanov koyunlarına ait mandibula, molar diş ve beyin yapılarının segmentasyonu için uygulanan farklı yöntemler hem hacimsel doğruluk hem de işlem süresi bakımından karşılaştırıldı (Çizelge 3.1). Segmentasyonun, kantitatif görüntüleme süreçlerinde en kritik adımlardan biri olduğu belirlendi (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Segmentasyon yöntemlerinden elde edilen sonuçların hacim ve süre değerleri

Hacimsel değerlendirmede, manuel segmentasyon yöntemi literatürde olduğu gibi bu çalışmada da “altın standart” (referans) olarak kabul edildi. Bu yönteme kıyasla elde edilen hacimlerin anlamlı düzeyde farklılık göstermesi, yöntemsel sapmanın bir göstergesi olarak değerlendirildi. Hacim bakımından değerlendirildiğinde (Çizelge 3.2) birçok yöntemin manuel segmentasyona göre önemli sapmalar içerdiği görüldü ($p < 0,05$). Farklı segmentasyon metotları kullanılarak ölçülen mandibula yüzey alanlarında, manuel, semi-otomatik ve otomatik yöntemler arasında anlamlı istatistiki farklılıklar görülmemiştir ($p > 0,05$) (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.1. Her bir doku/organın süre bakımından yöntem ve cinsiyet yönüyle karşılaştırılması. GFS; grow-from-seeds, FBS; fill-between-slices, Arit. Ort.; aritmetik ortalama, SH; standart hata

		Yöntem						P		
		Manuel	Yarı-otomatik segmentasyon	Yarı-otomatik segmentasyon – GFS	Yarı-otomatik segmentasyon- GFS + Eşikleme	Yarı-otomatik segmentasyon- FBS	Otomatik Segmentasyon	Cinsiyet	Yöntem	Yöntem x Cinsiyet
	Cinsiyet	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH			
Mandibula	D	49 $\pm$ 3,3 Ab	8,1 $\pm$ 0,38 Cb	17 $\pm$ 0,82 Bb	8,6 $\pm$ 0,43 Cb	4,2 $\pm$ 0,39 Ea	5,6 $\pm$ 0,56 Db	<0,001	<0,001	0,021
	E	59,2 $\pm$ 1,47 Aa	9,4 $\pm$ 0,22 Ca	20,7 $\pm$ 0,65 Ba	10,2 $\pm$ 0,42 Ca	4,9 $\pm$ 0,28 Ea	7,1 $\pm$ 0,28 Da			
Molar Diş	D	5,6 $\pm$ 0,16 Ab	3,2 $\pm$ 0,2 Ca	5,7 $\pm$ 0,26 Aa	4 $\pm$ 0 Ba	2,1 $\pm$ 0,1 Da	1,7 $\pm$ 0,26 Da	0,002	<0,001	0,006
	E	7,2 $\pm$ 0,13 Aa	3,3 $\pm$ 0,15 Ca	6,4 $\pm$ 0,34 Aa	4,1 $\pm$ 0,1 Ba	2 $\pm$ 0,01 Da	1,5 $\pm$ 0,31 Da			
Beyin	D	22,3 $\pm$ 0,86 Ab	10,2 $\pm$ 0,39 Da	15,5 $\pm$ 0,45 Ba	13,1 $\pm$ 0,48 Ca	4,9 $\pm$ 0,38 Ea	11,4 $\pm$ 0,5 CDa	0,167	<0,001	0,014
	E	26,4 $\pm$ 1,21 Aa	10,1 $\pm$ 0,77 Ca	16,1 $\pm$ 0,69 Ba	14,7 $\pm$ 1,12 BCa	5,4 $\pm$ 0,58 Da	10,9 $\pm$ 0,8 Ca			

A, B, C, D, E: Aynı satırdaki farklı harf kodları, istatistiki anlamlı farkları anlatmaktadır ($p < 0,05$); a, b: Her bir doku/organ için ayrı ayrı olmak üzere aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan anlamlı farklılığı ifade eder ($p < 0,05$).

Çizelge 3.2. Her bir doku/organın hacim bakımından yöntem ve cinsiyet yönüyle karşılaştırılması. GFS; grow-from-seeds, FBS; fill-between-slices, Arit. Ort.; aritmetik ortalama, SH; standart hata

		Yöntem						P		
		Manuel	Yarı-otomatik segmentasyon	Yarı-otomatik segmentasyon – GFS	Yarı-otomatik segmentasyon- GFS + Eşikleme	Yarı-otomatik segmentasyon - FBS	Otomatik Segmentasyon	Cinsiyet	Yöntem	Yöntem x Cinsiyet
	Cinsiyet	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH			
Mandibula	D	83,34 $\pm$ 4,82 Cb	83,31 $\pm$ 4,82 Cb	100,49 $\pm$ 6,97 Ab	92,58 $\pm$ 5,88 Bb	75,69 $\pm$ 4,8 Eb	78,73 $\pm$ 4,6 Db	0,053	<0,001	0,82
	E	97,83 $\pm$ 4,86 Ca	97,81 $\pm$ 4,86 Ca	114,32 $\pm$ 5,12 Aa	107,28 $\pm$ 5,04 Ba	91,75 $\pm$ 5,11 Ea	94,44 $\pm$ 5,1 Da			
Molar Diş	D	2,83 $\pm$ 0,11 Cb	2,83 $\pm$ 0,1 Cb	4,03 $\pm$ 0,08 Ab	3,01 $\pm$ 0,09 BCb	2,76 $\pm$ 0,1 Cb	2,96 $\pm$ 0,1 Bb	<0,001	<0,001	0,169
	E	3,38 $\pm$ 0,08 Ca	3,39 $\pm$ 0,08 Ca	4,36 $\pm$ 0,18 Aa	3,51 $\pm$ 0,11 BCa	3,37 $\pm$ 0,1 Ca	3,57 $\pm$ 0,09 Ba			
Beyin	D	103,74 $\pm$ 2,47 B	100,82 $\pm$ 2,48 C	96,65 $\pm$ 2,39 D	98,55 $\pm$ 2,4 D	101,32 $\pm$ 2,86 C	109,94 $\pm$ 3,08 A	0,12	<0,001	0,111
	E	112,25 $\pm$ 3,45 B	106,27 $\pm$ 2,83 C	101,72 $\pm$ 3,09 D	102,9 $\pm$ 2,78 D	108,63 $\pm$ 3,65 C	118,74 $\pm$ 3,64 A			

A, B, C, D, E: Aynı satırdaki farklı harf kodları, istatistiki anlamlı farkları anlatmaktadır (p <0,05); a, b: Her bir doku/organ için ayrı ayrı olmak üzere aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan anlamlı farklılığı ifade eder (p<0,05).

Çizelge 3.3. Her bir doku/organın yüzey alanı bakımından yöntem ve cinsiyet yönüyle karşılaştırılması. GFS; grow-from-seeds, FBS; fill-between-slices, Arit. Ort.; aritmetik ortalama, SH; standart hata

		Yöntem						P		
		Manuel	Yarı-otomatik segmentasyon	Yarı-otomatik segmentasyon-GFS	Yarı-otomatik segmentasyon-GFS + Eşikleme	Yarı-otomatik segmentasyon - FBS	Otomatik Segmentasyon	Cinsiyet	Yöntem	Yöntem x Cinsiyet
	Cinsiyet	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH			
Mandibula	D	40736,33 $\pm$ 2112,66 Ab	40732,72 $\pm$ 2112,01 Ab	34677,13 $\pm$ 1482,19 Bb	35798,25 $\pm$ 1281,54 Bb	40744,12 $\pm$ 2040,89 Aa	40876,87 $\pm$ 1892,9 Aa	0,04	<0,001	0,028
	E	49291,89 $\pm$ 2881,07 Aa	49275,28 $\pm$ 2880,82 Aa	41321,8 $\pm$ 2426,62 Ca	42533,83 $\pm$ 2400,13 Ca	45641,14 $\pm$ 2436,55 Ba	46603,84 $\pm$ 2428,16 ABa			
Molar Diş	D	1869,31 $\pm$ 81,9 B	1888,01 $\pm$ 92,92 B	2096,12 $\pm$ 63,73 A	1936,35 $\pm$ 35,7 AB	1893,06 $\pm$ 63,32 AB	1944,6 $\pm$ 77,95 A	0,107	<0,001	0,863
	E	2017,61 $\pm$ 33,76 B	2004,24 $\pm$ 35,07 B	2257,09 $\pm$ 72,7 A	2051,68 $\pm$ 79,89 AB	2002,06 $\pm$ 39,36 AB	2053,85 $\pm$ 43,85 A			
Beyin	D	17632,48 $\pm$ 359,31 C	17472,28 $\pm$ 354,42 C	21339,97 $\pm$ 414,54 A	19738,24 $\pm$ 375,58 B	17276 $\pm$ 320,54 C	16078,3 $\pm$ 282,95 D	0,083	<0,001	0,059
	E	18424,77 $\pm$ 675,22 C	18570,39 $\pm$ 650,73 C	23752,7 $\pm$ 944,24 A	21988,47 $\pm$ 1146,79 B	18433,9 $\pm$ 478,03 C	16585,56 $\pm$ 605,55 D			

A, B, C, D, E: Aynı satırdaki farklı harf kodları, istatistiki anlamlı farkları anlatmaktadır ($p < 0,05$); a,b: Her bir doku/organ için ayrı ayrı olmak üzere aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan anlamlı farklılığı ifade eder ($p < 0,05$).

Mandibula hacimlerinde, GFS yöntemi (D: $100,49 \pm 6,97 \text{ mm}^3$; E: $114,32 \pm 5,12 \text{ mm}^3$) manuel yöntemle mukayese edildiğinde anlamlı istatistiki yüksek hacim hesaplandı ($p < 0,001$). Benzer şekilde GFS + Eşikleme ve otomatik segmentasyon yöntemleri de farklı düzeyde sapmalar gösterdi. Öte yandan, yarı otomatik yöntem manuel yönteme oldukça yakın sonuçlar üretmiştir. Ayrıca, bu yöntemlerin segmentasyon süresi açısından da (D: 8,1 dk; E: 9,4 dk) avantajlı olması, zaman-doğruluk dengesi bakımından en uygun seçenekler olabileceğini gösterdi.

Cinsiyet temelinde değerlendirildiğinde, erkek bireylerde mandibula hacimleri sistematik olarak daha yüksek bulundu ($p < 0,05$) ve bu durum segmentasyon süresine de yansımıştır. Erkek bireylerde hem hacim hem de süre artışı gözlenmiştir; bu, cinsiyete bağlı morfolojik farklılıkların segmentasyon çıktılarında belirgin hale geldiğini gösterdi.

Molar diş, boyut olarak küçük ancak yapısal olarak karmaşık bir doku olması nedeniyle segmentasyon doğruluğu açısından oldukça duyarlıdır. Hacim verilerine göre GFS yöntemi ile manuel yönteme göre anlamlı şekilde daha yüksek hacim hesaplandı (D: $4,03 \pm 0,08 \text{ mm}^3$; E: $4,36 \pm 0,18 \text{ mm}^3$). Otomatik yöntem ise nispeten daha tutarlı sonuçlar vermekle birlikte, bazı bireylerde fazla segmente edilmiş minör yüzey detayları nedeniyle hacmi abartılı hesapladığı gözlemlendi.

Molar dişte segmentasyon süresi açısından ise otomatik yöntem (D: 1,7 dk; E: 1,5 dk) açık şekilde en hızlı teknik olurken, manuel yöntemin yine en uzun süreye sahip olduğu görüldü. Bu bağlamda, işlem süresi ile hacimsel doğruluk arasında negatif bir korelasyon olduğu söylenebilir.

Beyin hacim ölçümlerinde manuel segmentasyon ile karşılaştırıldığında, en yüksek hacim sonuçları otomatik yöntem ile elde edildi (D: $109,94 \pm 3,08 \text{ mm}^3$; E: $118,74 \pm 3,64 \text{ mm}^3$). Bu yöntemle, manuel yönteme göre ortalama %6–8 daha fazla hacim hesaplandı ve bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulundu ($p < 0,05$).

İşlem süresi açısından ise otomatik yöntem (D: 11,4 dk; E: 10,9 dk), manuel yönteme (D: 22,3 dk; E: 26,4 dk) göre neredeyse yarı sürede tamamlandı. Ancak doğruluk açısından değerlendirildiğinde bu kazanımın görece bir dezavantajı bulundu.

Bu sonuçlar göstermektedir ki, segmentasyon yöntemlerinin seçiminde tek başına işlem süresi değil, aynı zamanda doğruluk düzeyi ve segmente edilecek doku tipi de dikkate alınmalıdır. Öte yandan, yarı otomatik yöntemler birçok durumda manuel yönteme yakın doğrulukta, ancak daha kısa sürede uygulanabilir çözümler sunmuştur.

Cinsiyetin hem hacim hem de süre üzerinde etkili olduğu görüldü ve bu durum, bireyselleştirilmiş anatomik modelleme uygulamalarında cinsiyetin mutlaka bir değişken olarak değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koydu.

3.2. Yüzey Alanı Ölçümlerinde Segmentasyon Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

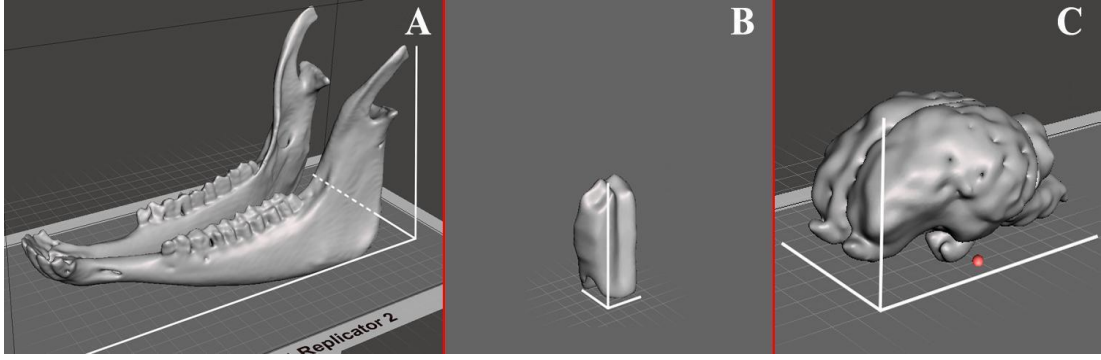
Çalışmada kullanılan farklı segmentasyon yöntemleriyle elde edilen mandibula yüzey alanı ölçümleri karşılaştırıldığında, manuel, semi-otomatik ve otomatik yöntemler arasında anlamlı istatistik farklılık olmadığı belirlendi ($p > 0,05$) (Çizelge 3.3). Ancak, GFS yöntemi ile hesaplanan yüzey alanlarının diğer yöntemlere kıyasla %12 – 14 oranında daha düşük olduğu gözlemlendi. Genel olarak manuel segmentasyon yöntemi, tüm dokular için en uzun işlem süresini gerektirdiğinden, yarı otomatik ve otomatik segmentasyonun önemli bir avantaj oluşturduğu belirlendi.

Altın standart olarak kabul edilen manuel segmentasyon yöntemi ile, molar diş ve beyin dikkate alındığında, yarı otomatik segmentasyon ile FBS efekti kullanılan yöntemlerle karşılaştırıldığında benzer yüzey alanı değerleri üretildi ($p > 0,05$). GFS efekti kullanılan yöntemlerde ise %12 – 28 oranında daha yüksek yüzey alanı hesaplandığı belirlendi.

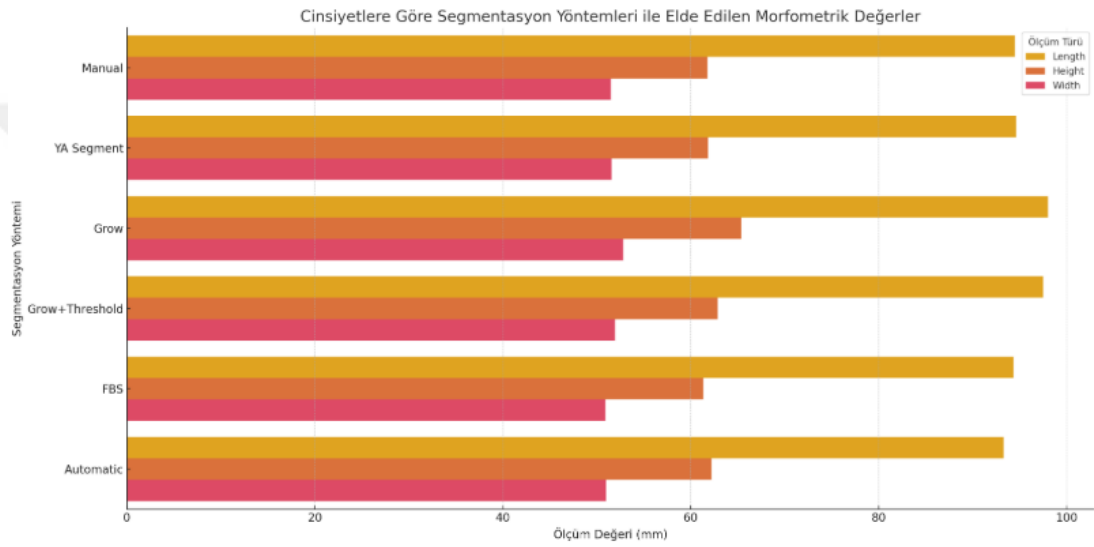
Molar diş ve beyin yüzey alanı ölçümlerinde, cinsiyetler arasında istatistik açısından anlamlı olan farklılık belirlenmedi ($p > 0,05$). Buna karşın, mandibula yüzey alanı ölçümlerinde, genel olarak tüm yöntemlerle elde edilen veriler arasında cinsiyete bağlı anlamlı bir fark saptandı ($p < 0,05$)

3.3. Morfometrik Ölçümlerde Segmentasyon Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi: Uzunluk, Genişlik ve Yükseklik Verileri

Romanov koyunlarına ait mandibula, molar diş ve beyin yapılarının üç boyutlu dijital modellerinden elde edilen uzunluk, genişlik ve yükseklik ölçümleri, altı farklı segmentasyon yöntemi (manuel, yarı otomatik, GFS, GFS + Eşikleme, FBS, otomatik segmentasyon) kullanılarak hesaplandı. Morfometrik doğruluğun belirlenmesinde, manuel segmentasyon yöntemi “altın standart” olarak kabul edildi; diğer yöntemlerle elde edilen ölçümlerin bu yöntemle kıyasla istatistiksel anlamlılık düzeyinde sapma gösterip göstermediği analiz edildi (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Mandibula (A), Diş (B) ve Beyin (C) üzerinde hesaplanan yükseklik, genişlik ve uzunluk ölçümlerine ait görsel



Şekil 3.3. Segmentasyon yöntemlerinden elde edilen morfometrik ölçümlerin karşılaştırılması

Mandibula uzunluk ölçümleri dişi bireylerde, GFS (161,66 mm) ve GFS + Eşikleme (161,23 mm) yöntemleri, manuel yönteme (156,74 mm) göre anlamlı yüksek uzunluk değerleri hesaplandı ($p < 0,001$). Erkek bireylerde benzer eğilim gözlemlendi, ancak aradaki farkların daha sınırlı kaldığı görüldü.

Yükseklik, en yüksek değer GFS yönteminde (D: 103,37 mm; E: 107,2 mm) bulundu, bu durum manuel segmentasyona kıyasla fazla segmentasyon (oversegmentation) eğilimini ortaya koymaktadır. Yarı otomatik, FBS ve otomatik segmentasyon yöntemleri ise yükseklik değerleri açısından manuel yöntemle istatistiksel olarak daha tutarlı bulundu ($p > 0,05$).

Mandibula genişlik ölçümlerinde GFS ve GFS + Eşikleme yöntemleri, manuel yönteme göre anlamlı düzeyde daha yüksek uzunluk değerleri hesaplandı ($p < 0,001$).

Molar diş morfometrik ölçümleri değerlendirildiğinde, GFS yöntemi uzunluk (D: 20,95 mm; E: 22,69 mm), yükseklik (D: 37,07 mm; E: 37,88 mm) ve genişlik (D: 16,87 mm; E:

17,85 mm) göz önüne alındığında manuel yöntemle göre anlamlı şekilde daha yüksek ölçümler elde edildi ($p < 0,001$). Diğer yarı otomatik yöntemler, genel olarak manuel yöntemle daha yakın değerler hesaplandı. Manuel segmentasyon ile yarı otomatik segmentasyon arasında ölçüm farklılığı oldukça düşük belirlendi.

Beyin uzunluk ölçümü GFS ve GFS + Eşikleme segmentasyon yöntemleri ile, manuel yöntemle karşılaştırıldığında anlamlı şekilde daha uzun beyin yapıları hesaplandı ($p < 0,001$). Otomatik segmentasyon yöntemi ile bu parametrede en düşük değerleri üretildi. Bu durum, yöntemin fazla sadeleştirilmiş konturlar ile çalıştığını düşündürdü.

Beyin yüksekliğinde de benzer bir eğilim görüldü, GFS yönteminde en yüksek değer hesaplandı. Bu sonuçlar, yumuşak doku sınırlarının segmentasyon açısından zorluk içerdiğini ve otomatikleşmiş tekniklerin burada daha çok hata payına sahip olabileceğini göstermektedir.

Beyin genişliğinde genel farklar daha sınırlı bulundu ve segmentasyon yöntemleri arasında fark bulunmadı.

Cinsiyet açısından bakıldığında, tüm anatomik yapılarda erkek bireylerde istatistiki olarak anlamlılığının daha yüksek düzeyde olduğu görüldü ($p < 0,05$). Özellikle mandibula uzunluğu ölçümünde cinsiyet farkı belirgin olarak tespit edildi ($p < 0,004$). Aynı şekilde beyin hacmine karşılık gelen yükseklik ve genişlik ölçümlerinin de erkek bireylerde daha yüksek olduğu belirlendi (Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.6). Molar diş ölçümlerinde cinsiyetler arasında daha düşük düzeyde fark saptandı, ancak bazı yöntemlerde bu fark anlamlı hale getirildi (Çizelge 3.5).

Farklı yöntemler ile oluşturulan görsellerdeki segmentasyon hataları da gözlemlendi (Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8).

Çizelge 3.4. Her bir doku/organın uzunluk bakımından yöntem ve cinsiyete göre karşılaştırılması. GFS; grow-from-seeds, FBS; fill-between-slices, Arit. Ort.; aritmetik ortalama, SH; standart hata

		Yöntem						P		
		Manuel	Yarı-otomatik segmentasyon	Yarı-otomatik segmentasyon - GFS	Yarı-otomatik segmentasyon- GFS + Eşikleme	Yarı-otomatik segmentasyon - FBS	Otomatik Segmentasyon	Cinsiyet	Yöntem	Yöntem x Cinsiyet
	Cinsiyet	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH			
Mandibula	D	156,74 $\pm$ 2,43 Bb	156,8 $\pm$ 2,4 Bb	161,66 $\pm$ 2,62 Ab	161,23 $\pm$ 2,52 Ab	157,52 $\pm$ 2,83 Bb	157,37 $\pm$ 2,53 Bb	0,004	<0,001	0,579
	E	169,35 $\pm$ 3,25 Ba	169,46 $\pm$ 3,21 Ba	173,46 $\pm$ 2,54 Aa	174,66 $\pm$ 2,22 Aa	170,89 $\pm$ 2,98 Ba	169,78 $\pm$ 3,3 Ba			
Molar Diş	D	17,07 $\pm$ 0,48 BCa	17,54 $\pm$ 0,65 BCa	20,95 $\pm$ 0,59 Aa	17,23 $\pm$ 0,44 BCb	17,37 $\pm$ 0,41 Ba	16,32 $\pm$ 0,49 C	0,267	<0,001	0,026
	E	18,09 $\pm$ 0,24 Ba	17,97 $\pm$ 0,25 BCa	21,1 $\pm$ 0,21 Aa	18,52 $\pm$ 0,36 Ba	17 $\pm$ 0,26 Ca	17,25 $\pm$ 0,3 C			
Beyin	D	102,65 $\pm$ 0,24 Ba	102,54 $\pm$ 0,25 Ba	105,55 $\pm$ 0,49 Aa	107,09 $\pm$ 0,42 Aa	100,69 $\pm$ 0,31 Bb	97,72 $\pm$ 0,54 Cb	0,074	<0,001	0,015
	E	103,12 $\pm$ 0,32 Ba	103,31 $\pm$ 0,32 Ba	105,39 $\pm$ 1,01 Aa	106,33 $\pm$ 0,95 Aa	102,47 $\pm$ 0,77 Ba	101,31 $\pm$ 0,87 Ca			

A, B, C, D, E: Aynı satırdaki farklı harf kodları, istatistiki anlamlı farkları anlatmaktadır (p <0,05); a,b: Her bir doku/organ için ayrı ayrı olmak üzere aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan anlamlı farklılığı ifade eder (p <0,05).

Çizelge 3.5. Her bir doku/organın yükseklik bakımından yöntem ve cinsiyete göre karşılaştırılması. GFS; grow-from-seeds, FBS; fill-between-slices, Arit. Ort.; aritmetik ortalama, SH; standart hata

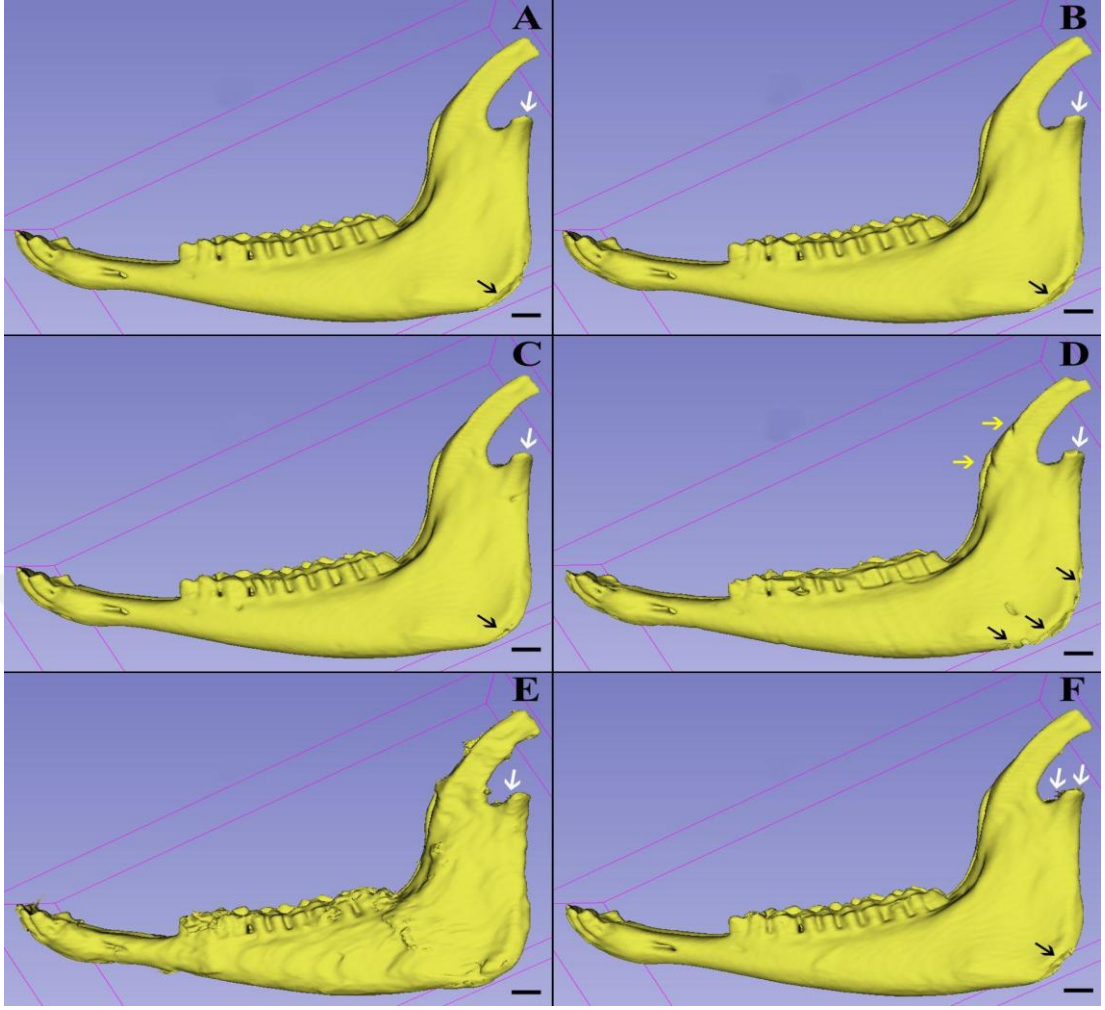
		Yöntem						P		
		Manuel	Yarı-otomatik segmentasyon	Yarı-otomatik segmentasyon-GFS	Yarı-otomatik segmentasyon-GFS + Eşikleme	Yarı-otomatik segmentasyon - FBS	Otomatik Segmentasyon	Cinsiyet	Yöntem	Yöntem x Cinsiyet
	Cinsiyet	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH			
Mandibula	D	100,33 $\pm$ 2,07 C	100,74 $\pm$ 2,08 B	103,37 $\pm$ 2,43 A	102,13 $\pm$ 2,25 A	100,15 $\pm$ 2,27 BC	101,11 $\pm$ 2,41 BC	0,156	<0,001	0,072
	E	104,86 $\pm$ 2,26 C	105,05 $\pm$ 2,25 B	107,2 $\pm$ 2,07 A	106,9 $\pm$ 1,95 A	106,1 $\pm$ 2,26 BC	105,36 $\pm$ 2,28 BC			
Molar Diş	D	30,55 $\pm$ 0,53 BCb	30,6 $\pm$ 0,55 BCb	37,07 $\pm$ 0,53 Aa	31,19 $\pm$ 0,52 Bb	30,77 $\pm$ 1,01 BCa	30,44 $\pm$ 0,57 Cb	0,115	<0,001	0,028
	E	32,72 $\pm$ 0,8 BCa	32,79 $\pm$ 0,84 BCa	37,15 $\pm$ 0,67 Aa	33,47 $\pm$ 0,8 Ba	30,95 $\pm$ 0,85 Ca	32,61 $\pm$ 0,81 Ca			
Beyin	D	48,97 $\pm$ 0,37 BCb	48,87 $\pm$ 0,34 BCb	52,36 $\pm$ 1,48 Ab	49,79 $\pm$ 0,89 Bb	47,88 $\pm$ 0,89 Cb	51,03 $\pm$ 0,41 ABb	0,007	<0,001	0,148
	E	53,26 $\pm$ 1,04 BCa	53,18 $\pm$ 0,89 BCa	55,08 $\pm$ 1,05 Aa	53,49 $\pm$ 0,8 Ba	51,92 $\pm$ 1,21 Ca	52,47 $\pm$ 1,29 ABa			

A, B, C, D, E: Aynı satırdaki farklı harf kodları, istatistiki anlamlı farkları anlatmaktadır (p <0,05); a,b: Her bir doku/organ için ayrı ayrı olmak üzere aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan anlamlı farklılığı ifade eder (p <0,05).

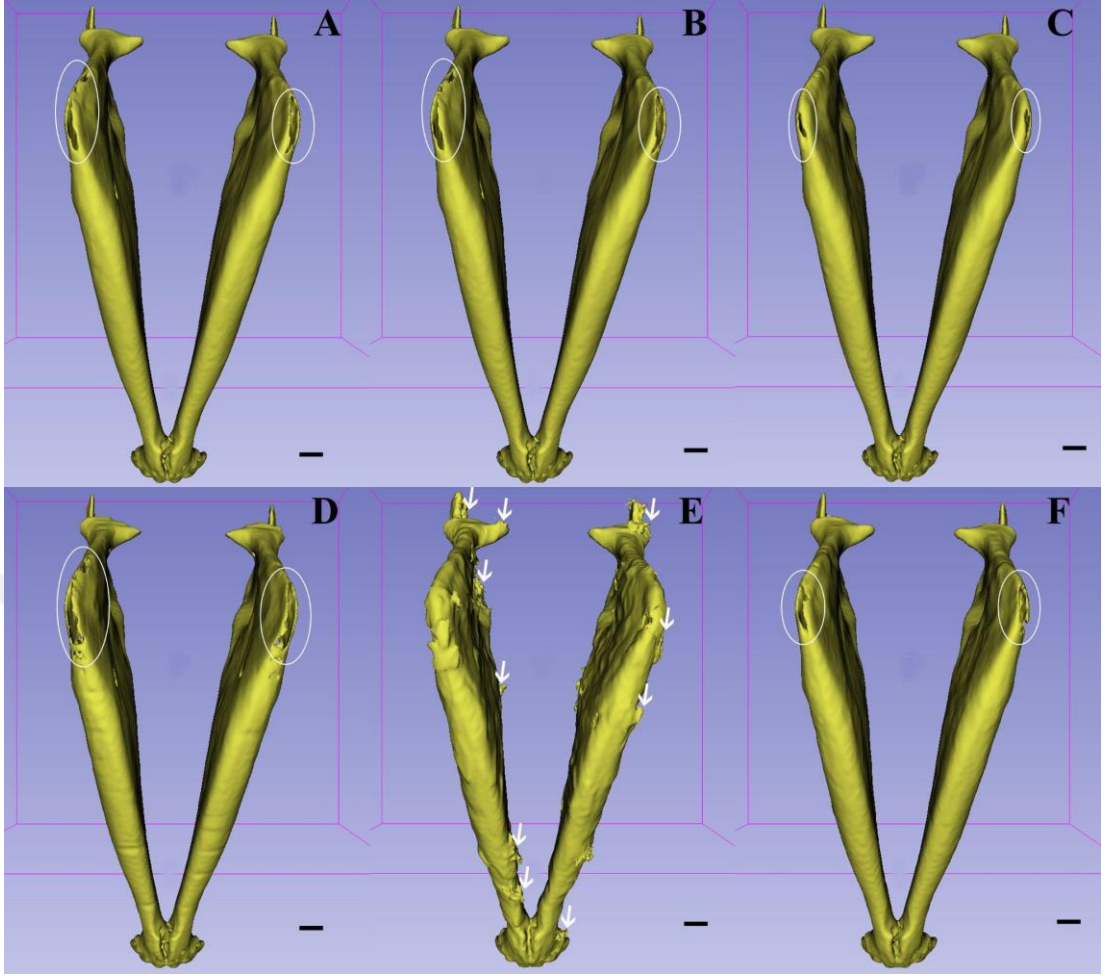
Çizelge 3.6. Her bir doku/organın genişlik bakımından yöntem ve cinsiyete göre karşılaştırılması. GFS; grow-from-seeds, FBS; fill-between-slices, Arit. Ort.; aritmetik ortalama, SH; standart hata

		Yöntem						P		
		Manuel	Yarı-otomatik segmentasyon	Yarı-otomatik segmentasyon-GFS	Yarı-otomatik segmentasyon-GFS + Eşikleme	Yarı-otomatik segmentasyon - FBS	Otomatik Segmentasyon	Cinsiyet	Yöntem	Yöntem x Cinsiyet
	Cinsiyet	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH	Arit. Ort. $\pm$ SH			
Mandibula	D	81,95 $\pm$ 1,09 Ba	82,01 $\pm$ 1,09 Ba	83,59 $\pm$ 1,15 Aa	82,58 $\pm$ 1,11 Ba	80,97 $\pm$ 1,1 Ca	81,65 $\pm$ 1,08 BCa	0,16	<0,001	0,005
	E	79,2 $\pm$ 0,98 Ba	79,33 $\pm$ 0,98 Ba	81,48 $\pm$ 0,89 Aa	81,19 $\pm$ 0,87 Aa	79,18 $\pm$ 0,97 Ba	79,75 $\pm$ 1,02 Ba			
Molar Diş	D	14,63 $\pm$ 0,28 BCa	14,71 $\pm$ 0,26 BCa	16,87 $\pm$ 0,44 Aa	14,89 $\pm$ 0,3 Bb	15,03 $\pm$ 0,19 BCa	14,31 $\pm$ 0,38 Ca	0,502	<0,001	0,003
	E	14,97 $\pm$ 0,4 Ca	15,55 $\pm$ 0,67 Ca	17,85 $\pm$ 0,63 Aa	16,59 $\pm$ 0,61 Ba	15,26 $\pm$ 0,7 Ca	15,28 $\pm$ 0,64 Ca			
Beyin	D	57,22 $\pm$ 0,48 Ab	57,25 $\pm$ 0,53 Ab	57,55 $\pm$ 0,54 Ab	57,33 $\pm$ 0,49 Ab	56,77 $\pm$ 0,46 Aa	57,08 $\pm$ 0,32 Aa	0,013	0,007	0,041
	E	61,09 $\pm$ 1,02 Aa	61,07 $\pm$ 1,03 Aa	60,06 $\pm$ 0,9 ABa	59,81 $\pm$ 0,93 ABa	59 $\pm$ 1,02 ABa	58,66 $\pm$ 1,01 Ba			

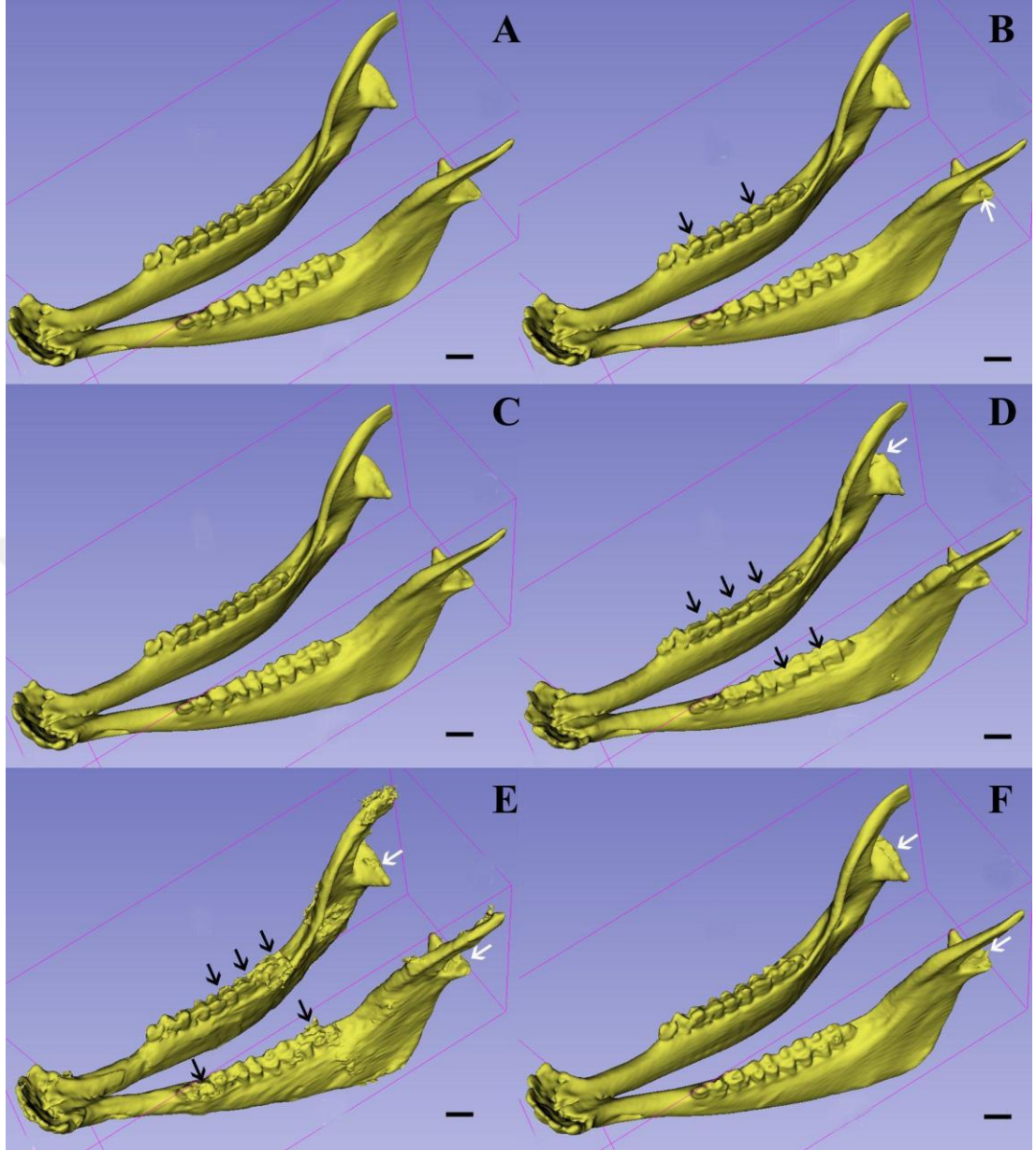
A, B, C, D, E: Aynı satırdaki farklı harf kodları, istatistiki anlamlı farkları anlatmaktadır (p <0,05); a,b: Her bir doku/organ için ayrı ayrı olmak üzere aynı sütundaki farklı harfler istatistiksel açıdan anlamlı farklılığı ifade eder (p <0,05)



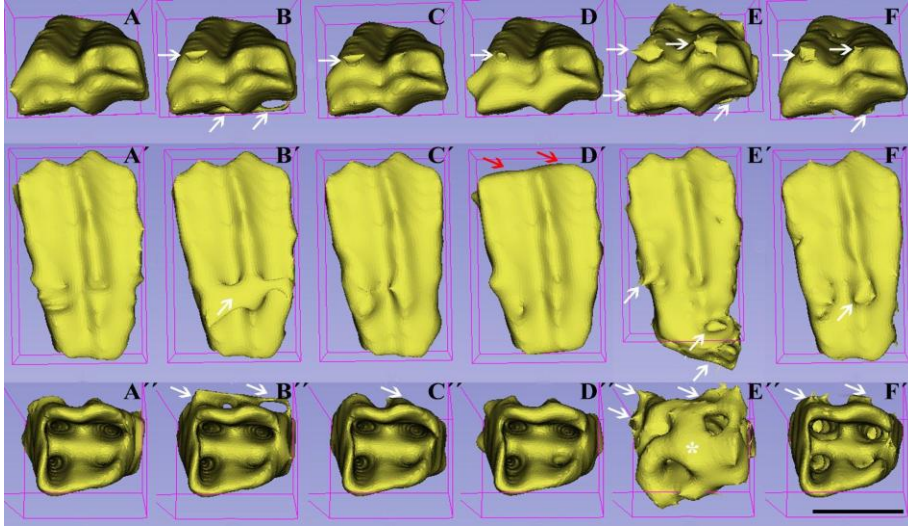
Şekil 3.4. Dişi mandibula'sına ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait lateral görseller. A, manuel segmentasyon; B, otomatik segmentasyon; C, yarı otomatik segmentasyon; D, yarı otomatik segmentasyon + FBS; E, yarı otomatik segmentasyon + GFS; F, yarı otomatik segmentasyon + GFS + Eşikleme Maskesi. Beyaz ok processus condylaris yapısındaki hatalı segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Siyah ok angulus mandibulae'de karşılaşılan segmentasyon problemlerini belirtmektedir. Sarı ok processus coronoideus'un uzamında görülen segmentasyon eksikliklerini belirtmektedir. Bar = 1cm.



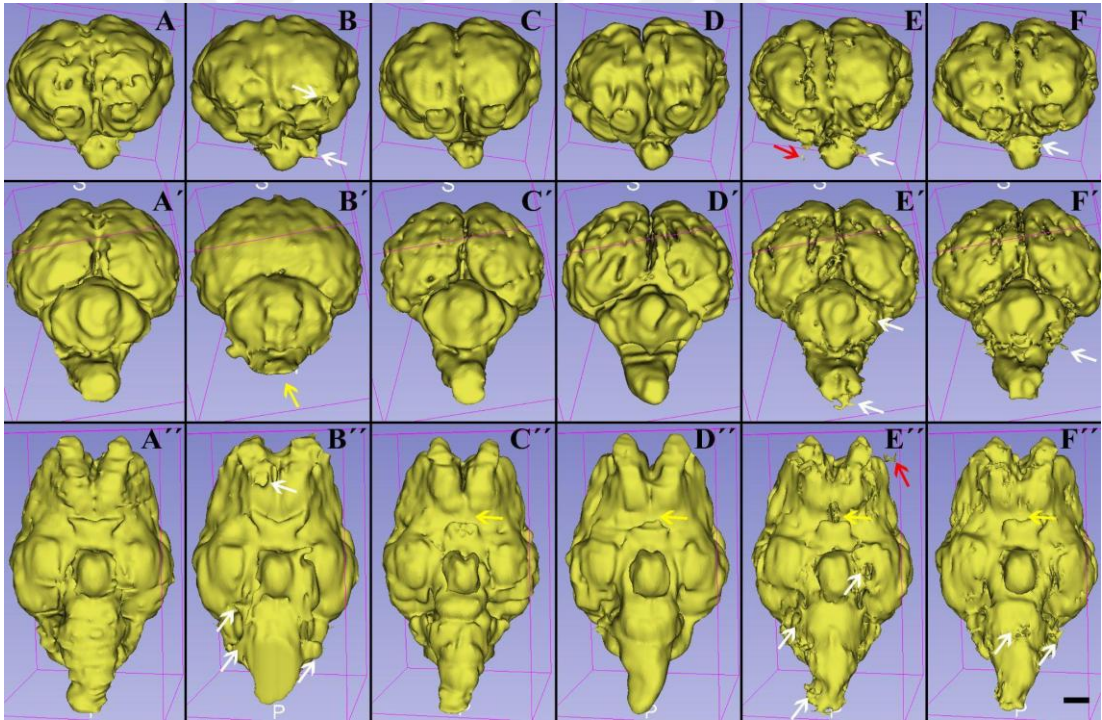
Şekil 3.5. Dişi mandibula'sına ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait ventral görseller. A, manuel segmentasyon; B, otomatik segmentasyon; C, yarı otomatik segmentasyon; D, yarı otomatik segmentasyon + FBS; E, yarı otomatik segmentasyon + GFS; F, yarı otomatik segmentasyon + GFS + Eşikleme Maskesi. Beyaz ok mandibula yapısındaki hatalı segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Beyaz daire angulus mandibulae'de karşılaşılan segmentasyon problemlerini belirtmektedir. Bar = 1cm.



Şekil 3.6. Erkek mandibula'sına ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait craniolateral görseller. A, manuel segmentasyon; B, otomatik segmentasyon; C, yarı otomatik segmentasyon; D, yarı otomatik segmentasyon + FBS; E, yarı otomatik segmentasyon + GFS; F, yarı otomatik segmentasyon + GFS + Eşikleme Maskesi. Beyaz ok processus condylaris yapısındaki hatalı segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Siyah ok premolar ve molar diş detayındaki hatalı (fazla ya da az) segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Bar = 1cm.



Şekil 3.7. Dişi molar dişine ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait dorsal, medial ve ventral görseller. A-A'-A'', manuel segmentasyon; B-B'-B'', otomatik segmentasyon; C-C'-C'', yarı otomatik segmentasyon; D-D'-D'', yarı otomatik segmentasyon + FBS; E-E'-E'', yarı otomatik segmentasyon + GFS; F-F'-F'', yarı otomatik segmentasyon + GFS + Eşikleme Maskesi. Beyaz ok diş yüzeyinde hatalı (fazla) segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Kırmızı ok diş yüzeyinde hatalı (az) segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Bar = 1cm.



Şekil 3.8. Erkek beynine ait üç boyutlu farklı segmentasyonlara ait cranial, caudaodorsal ve ventral görseller. A-A'-A'', manuel segmentasyon; B-B'-B'', otomatik segmentasyon; C-C'-C'', yarı otomatik segmentasyon; D-D'-D'', yarı otomatik segmentasyon + FBS; E-E'-E'', yarı otomatik segmentasyon + GFS; F-F'-F'', yarı otomatik segmentasyon + GFS + Eşikleme Maskesi. Beyaz ok beyin yüzeyinde hatalı (fazla) segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Kırmızı ok beyin dışında şekillenmiş hatalı (fazla) segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Sarı ok beyinde hatalı (az) segmentasyonları belirtmek için kullanılmıştır. Bar = 1cm.

4. TARTIŞMA

Segmentasyonun amacı, bir görüntünün temsilini basitleştirmek ve/veya daha anlamlı, analiz edilmesi daha kolay bir hale getirmektir. Görüntü segmentasyonu, bir görüntüdeki her piksele, aynı etikete sahip piksellerin belirli bir görsel özelliği paylaşacağı şekilde bir etiket atama işlemidir (Parveen ve Kavitha, 2013). Bu bağlamda, doğru segmentasyonun üç boyutlu anatomik modellemenin temel basamağı olduğu söylenebilir ve morfometrik, hacimsel ve yüzey alanı ölçümlerinin güvenilirliğini doğrudan etkilediği ifade edilebilir. Bu çalışmada, Romanov koyunlarına ait BT ve 3T MR görüntüleri kullanılarak altı farklı segmentasyon yöntemi -manuel (referans standart), yarı otomatik, GFS, GFS + Eşikleme, FBS ve tam otomatik segmentasyon- üç farklı anatomik yapıda (mandibula, molar diş ve beyin) sistematik olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırma, veteriner anatomi ve karşılaştırmalı görüntüleme alanında her bir yöntemin doğruluğu, verimliliği ve uygulanabilirliği hakkında temel bir anlayış sunmakta, nicel/nitel değerlendirmeleri içermektedir. Ayrıca çalışmada, farklı yöntemlerle hesaplanan hacim ve yüzey alanı verileri, uygulanan işlem süreleri bakımından da değerlendirilmiştir. Segmentasyonun, kantitatif görüntüleme süreçlerinin en kritik adımlardan biri olduğu göz önünde bulundurulduğunda (Jayadevappa vd., 2011), elde edilen bulgular; yöntemlerin klinik uygulanabilirliği, dijital modelleme güvenilirliği ve çeviri değeri açısından önemli sonuçlar sunmaktadır.

Görüntü segmentasyon algoritmaları son birkaç on yılda geliştirilmiş olmasının yanında, karmaşık ve zorluklarını hala korumaktadır. Belirli bir segmentasyon yöntemi, bazı problem alanlarında yüksek performans sergileyebilirken, farklı alanlarda yetersiz performans gösterebilmektedir (Jayadevappa vd., 2011; Parveen ve Kavitha, 2013). Anatomik görüntü segmentasyon yönteminin seçimini çevreleyen en önemli soruların başında; uygulayıcı uzmanla uyumlu segmentasyon algoritmalarının doğruluk, hassasiyet ve hesaplama hızı açısından nasıl iyileştirilebileceği ve aynı zamanda manuel etkileşim gereksiniminin nasıl azaltılabileceği gelmektedir.

Bu çalışmada uygulanan tüm segmentasyon teknikleri arasında, manuel segmentasyon; zaman alıcı olmasına rağmen, anatomik olarak en tutarlı ve ayrıntılı 3B rekonstrüksiyon yapılarını vermiştir. Anatomi uzmanı rehberliğinde kontur tanımlamasına dayalı olarak gerçekleştirilen bu yöntem, özellikle karmaşık yapılarda yer alan detay bölgelerde ince anatomik sınırların etkili bir şekilde yakalanmasına olanak sağlamıştır. Yapılan çalışmada, diğer tüm segmentasyon yöntemleri, bu manuel altın standart referansla karşılaştırmalı olarak

değerlendirilmiştir. Özellikle, yarı otomatik segmentasyon ve FBS yöntemlerinin, mandibula ve beyin modellemelerinde, manuel segmentasyon ile dikkate değer kantitatif uyum gösterdiği belirlenmiştir. Bu yöntemlerin referans standarda olan yakınlıkları, verimlilik ile anatomik doğruluk arasında denge kurulması gereken modelleme görevleri açısından önemli bir tercih nedeni olarak öne çıkmaktadır.

Buna karşılık, GFS ve GFS + Eşikleme segmentasyon yöntemlerinin ise kısmen yarı otomatik yapıda olmalarına rağmen, hacim ve morfometrik ölçümlerde anlamlı düzeyde aşırı tahminler ürettiği saptanmıştır. Bu durumun, özellikle yüksek eğrilik gösteren ya da düşük kontrast sınırlarına sahip yapılarda (örneğin molar diş yüzeyi veya beyindeki sulkus yapıları gibi), yayılma süreci sırasında komşu düşük yoğunluklu voksellerin aşırı şekilde dâhil edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tam otomatik, eşik tabanlı segmentasyon ise tüm yöntemler arasında en hızlısı olmasına rağmen, tutarlı biçimde en düşük hassasiyeti gösteren yöntem olarak öne çıkmaktadır. İşlem sonrası düzeltme yaklaşımları uygulanmadığı sürece, bu yöntemin ayrıntılı anatomik çalışmalar açısından sınırlı bir fayda sağladığı görülmüştür.

Bu çalışmada, mandibula segmentasyonu sırasında kullanılan yöntemler işlem süresi ve cinsiyet değişkeni açısından anlamlı istatistiki farklılıklar göstermiştir ($p < 0,001$). Dişi bireylere ait mandibula ölçümlerinde, manuel segmentasyonun en fazla zaman alan yöntem olduğu belirlenmiş; bunu sırasıyla GFS, GFS + Eşikleme, yarı otomatik, otomatik ve FBS yöntemleri takip etmiştir. Çalışmada elde edilen verilere göre, manuel segmentasyon ile karşılaştırıldığında; otomatik segmentasyonun mandibula, molar diş ve beyin yapılarına ait segmentasyon işlemlerinde sırasıyla yaklaşık %85, %70 ve %50 oranında zaman tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir. Ancak bu kazanımın, anatomik doğruluk pahasına elde edildiği anlaşılmıştır.

GFS + Eşikleme ve GFS yöntemlerinin ise hem işlem süresi hem de doğruluk açısından orta düzeyde performans sergilediği, ancak yapıların sınırlarında meydana gelen yanlış sınıflamaların düzeltilmesi için manuel denetime ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, özellikle geniş örneklemler için FBS veya yarı otomatik segmentasyon yöntemlerinin, doğruluk ve verimlilik açısından kabul edilebilir bir sonuç sunduğunu göstermektedir.

Yapılan çalışmada, koyun beyni segmentasyon yönteminde hem işlem süresi hem de cinsiyet açısından istatistiki olarak farklılıklar ($p < 0,001$) ortaya koymuştur. Erkek hayvan beyni için manuel segmentasyon en uzun süreyi almıştır, bunu GFS, GFS + Eşikleme, otomatik, yarı otomatik ve son olarak FBS en hızlı yöntem olarak belirlenmiştir. Dişi hayvan

beyinlerinde segmentasyon yöntemlerinin verimliliği aynı sırayı göstermiş, ancak işleme süreleri erkeklere göre sürekli olarak daha uzun sürmüştür. Manuel segmentasyonun en yavaş, FBS'in en hızlı olduğu segmentasyon yöntemlerinin verimlilik hiyerarşisi, diğer türlerde gözlemlenen eğilimleri özellikle, yarı otomatik ile GFS + Eşikleme segmentasyon yöntemleri arasındaki süre farkı minimum düzeydedir. Erkek bireyler benzer bir sıralama modeli sergilemiş olsa da genel segmentasyon süreleri dişilere kıyasla daha uzundur. Gözlemlenen işlem süresi ve cinsiyete bağlı farklılıklar anlamlı ve insan çene kemiğinde manuel ve otomatik segmentasyon teknikleri arasında benzer zaman eşitsizlikleri bildiren Qiu vd. (2021) ile Wallner vd. (2018) bulgularıyla uyum göstermektedir. Segmentasyon yöntemlerinin verimliliğe göre sıralanması sonucunda, manuel segmentasyonun en fazla zaman gerektiren yöntem olarak öne çıkması, klinik çalışmalarda genel eğilimleri yansıtmaktadır. Segmentasyon süresinin hem klinik uygulamalarda hem de araştırma iş akışlarında kritik bir faktör olduğu bilinmektedir. Yapıların anatomik sınırlarının manuel olarak tanımlanması, çoğu zaman tekrarlanabilirliği düşük sonuçlara yol açmakta ve oldukça zaman alıcı olmaktadır (Jayadevappa vd., 2011). Nitekim Tingelhoff vd. (2007) insan BT taramalarında manuel segmentasyonunun yarı otomatik yöntemlere kıyasla yaklaşık 3-5 kat daha uzun sürdüğünü bulmuştur ki bu araştırmadaki sonuçlarla tutarlı bir farktır. Çalışmada, yarı otomatik segmentasyon ile GFS + Eşikleme arasındaki minimum süre farkı; eşikleme tabanlı iyileştirmelerin küçük hayvan modellerinde zaman kazancı açısından genellikle sınırlı katkılar sağladığını ortaya koyan Varga-Szemes vd. (2016) ile Wagenknecht vd. (2006) tarafından raporlanan gözlemlerle paralellik göstermektedir. Segmentasyon süresindeki cinsiyet farklılıkları, erkeklerde daha uzun işlem sürelerine ihtiyaç duyulması, önceki literatürde yaygın olarak bildirilmemiştir. Bu bulgunun, koyun çene kemiğinde erkek ve dişiler arasındaki mandibular yapı büyüklüğüne bağlı anatomik farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Manuel segmentasyon, doğruluk açısından altın standart olmaya devam etmektedir, ancak Arora ve Kaur (2024)'a göre son derece zaman alıcı bir yöntemdir. FBS yöntemi ise diğer yarı otomatik ve otomatik yaklaşımlara kıyasla üstün hız performansı göstermekte olup; seçici özellik çıkarımının, işlem süresinin optimizasyonunda kritik bir rol üstlendiğini açıkça ortaya koymaktadır (Wang vd., 2021). Bununla birlikte, otomatik segmentasyonun yalnızca orta düzeyde performans sergilemesi; otomasyonun verimliliği artırmakla birlikte, hız-hassasiyet dengesi açısından optimize edilmiş yarı otomatik tekniklerin gerisinde kalabileceğini göstermektedir (Koh vd., 2020; Le vd., 2024). Son dönemde geliştirilen, yapay zekâ algoritmaları ile eşikleme tekniklerini birleştiren hibrit yaklaşımlar (Kaur ve Devendran, 2024), umut verici bir orta yol sunmakta olsa da bu yöntemlerin koyun beyni gibi yapılara uygulanabilirliği henüz yeterince araştırılmamıştır. Yarı otomatik segmentasyon yöntemleri;

manuel segmentasyonun yüksek doğruluğunu, otomatik tekniklerin sağladığı işlem verimliliği ile birleştirerek dengeli bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemler, operatör müdahalesini azaltmakta, farklı görüntü kalitelerine uyum sağlayabilmekte ve doğruluk düzeyinden ödün vermeden çalışabilmektedir. Tüm bu avantajları sayesinde, özellikle büyük hayvan modellerinde kullanıma uygun seçenekler olarak öne çıkmaktadırlar (Wagenknecht vd., 2006; Wang vd., 2016).

Yüzey alanı karşılaştırmaları dikkate alındığında manuel segmentasyon, çoğunlukla iki boyutlu kesitler üzerinden yürütülen işlemlerle sınırlı kalmakta ve segmentasyon yapılan dilimler arasında tutarsızlıkların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Ancak, tıbbi görüntülerin kantitatif analizinde; tekrarlanabilirlik, doğruluk ve verimlilik açısından daha gelişmiş segmentasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir (Jayadevappa vd., 2011). Literatürde, yüzey alanı hesaplamalarının sistematik biçimde abartıldığına dair bulgular da mevcuttur. Örneğin, level set yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmada, segmentasyon sonrasında elde edilen yüzey alanı değerlerinin anlamlı ölçüde yüksek hesaplandığı bildirilmiştir (Feng vd., 2017). Bu bulgular, özellikle molar diş gibi küçük ve karmaşık anatomik yapılarda segmentasyondan kaynaklanan yüzey sapmalarının varlığını doğrular niteliktedir.

Yapılan istatistiksel analizler, molar diş ve beyin dokusuna ait yüzey alanı ve hacim ölçümleri bakımından manuel segmentasyon ile diğer (manuel olmayan) segmentasyon yöntemlerinin büyük çoğunluğu arasında anlamlı farklar olduğunu ortaya koymuştur ($p < 0,05$). Bununla birlikte, FBS ve yarı otomatik segmentasyon yöntemleri, özellikle mandibula bölgesine ait ölçümlerde, manuel yöntemlerle kıyaslandığında anlamlı istatistik farklılık göstermemiştir. Bu sonuç, söz konusu yöntemlerin yüksek kortikal kontrasta sahip anatomik yapılar üzerindeki etkinliğini desteklemektedir. Ayrıca, yüzey alanı ile segmentasyon süresi arasındaki ilişki incelendiğinde, segmentasyon süresi arttıkça daha karmaşık ve ayrıntılı yüzeylerin üretildiği gözlemlenmiştir. Bu bulgu sezgisel olarak da anlaşılabilir niteliktedir; çünkü voksel düzeyinde sağlanan daha yüksek doğruluk, özellikle mandibular açığı veya sulcus cerebialis gibi eğimli ve kompleks anatomik bölgelerde kenar belirleme kapasitesini artırmaktadır.

Çalışmada oluşturulan 3B modellerin görsel değerlendirmesi, elde edilen nicel bulguları daha da desteklemiştir. Özellikle mandibula, molar diş ve beyin gibi karmaşık morfolojiye sahip bölgelerde 3B segmentasyon sonuçlarının anatomik gerçekçiliğinin değerlendirilmesi açısından nitel analiz kritik öneme sahiptir. Mandibula'ların yanal görünümüne ait ilk şekil, altı farklı segmentasyon yöntemi arasında anatomik doğruluk bakımından belirgin farklılıklar

olduğunu ortaya koymuştur. Manuel segmentasyon, condylus mandibularis'in eklem yüzeyini en doğru şekilde yansıtarak bu sinovyal eklem karakteristik pürüzsüz ve yuvarlak yapısını korumuştur. Buna karşın, Otomatik ve GFS + Eşikleme yöntemleri söz konusu bölgeyi ya düzleştirerek ya da yapısını bozarak, klinik olarak gerçekçi olmayan açılı veya silik konturlar üretmiştir (Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6).

Bir diğer önemli anatomik unsur olan angulus mandibulae, eşik düzeltilmesi içermeyen yöntemlerle, özellikle GFS ve Otomatik segmentasyonlarda yeterince temsil edilememiştir. Arcus dentalis'in dişlerin açıkça tanımlandığı ve ayrıştığı yapısı, yalnızca manuel ve yarı otomatik segmentasyonlarda başarılı bir şekilde korunmuştur. Otomatik yöntemlerde ise dişler genellikle birbirine kaynaşmış biçimde modellenmiş ya da diş morfolojisi hatalı şekilde temsil edilmiştir. Bu durum, diş köklerinin ana hatlarında ve oklüzal topografide bozulmalara yol açmıştır. Ayrıca, küçük ancak anatomik ve cerrahi açıdan önemli olan foramen mentale ve foramen mandibulae, yalnızca manuel segmentasyonla elde edilen modellerde ve daha sınırlı ölçüde yarı otomatik ile FBS yöntemlerinde güvenilir biçimde tanımlanabilmiştir. Diğer yöntemlerde bu yapıların ya belirsiz ya da tamamen eksik olması, sinir haritalama ya da implant planlaması gibi klinik uygulamalarda sorun yaratma potansiyeli taşımaktadır.

Yarı otomatik segmentasyon yöntemleri mandibula'nın ventral görünümünü sunmakta ve segmentasyon kaynaklı modelleme tutarsızlıklarını daha da belirginleştirmektedir. Özellikle GFS ve GFS + Eşikleme yöntemlerinde mandibula sınırlarında yaygın düzensizlikler gözlemlenmiştir. Bu anomalilerin, yumuşak doku artefaktlarının dahil edilmesinden veya düşük yoğunluklu kortikal kemik kenarlarının doğru ayırt edilememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Manuel segmentasyon, bilinen anatomik referanslara en yakın sonuçları üretmiştir. Buna karşılık, otomatik eşikleme yöntemi mandibula eğriliğini yeterince modelleyememiş ve ani açısal geçişlerle geometrik olarak olası olmayan formlar üretmiştir. Bu tür hatalar, modellerin klinik öncesi simülasyon veya karşılaştırmalı anatomik eğitim amacıyla kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Yarı otomatik ve FBS yöntemleri genel doğruluk açısından daha başarılı olmakla birlikte, segmentasyon algoritmalarının bilateral birleşim bölgelerini doğru tanıyamadığı durumlar da tespit edilmiştir. Ayrıca bu saptamalar, zaman açısından verimli olsalar da yarı otomatik yöntemlerin yüksek anatomik hassasiyet gerektiren ortamlarda kullanılmadan önce dikkatle doğrulanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yedinci şekil, molar diş segmentasyonlarının dorsal, medial ve ventral görünümünü sunmakta ve küçük, yüksek eğrilikli anatomik yapıların modellenmesinde kullanılan yöntemlerin güçlü ve zayıf yönlerini göstermektedir (Şekil 3.7). Karmaşık taç morfolojileri ve kök sistemleri nedeniyle molar dişler segmentasyon açısından önemli zorluklar oluşturmıştır.

Zaman zaman kök bölgelerinde aşırı yumuşatma gözlemlense de yarı otomatik segmentasyonlar modelleme bakımından başarılı bulunmuştur. Öte yandan, GFS, GFS + Eşikleme ve Otomatik segmentasyonla elde edilen modeller, taç hatlarının yuvarlak ve şişkin, olukların ise düzleşmiş olması nedeniyle aşırı modelleme belirtileri göstermiştir. Bazı ventral görünüm, komşu alveolar kemik voksellerinin yanlılıkla dahil edilmesi sonucu biyolojik oranları aşan yapay olarak kalınlaşmış kök yapıları sergilemiştir. Bu tür sapmalar, özellikle diş aşınması, facies occlusalis değerlendirmesi ya da yaş tahmini gibi kritik morfolojik parametrelerin önemli olduğu çalışmalarda, yalnızca hacimsel verilere güvenmenin taşıdığı riski gözler önüne sermektedir.

Sekizinci şekil, bölümlenmiş beyinlerin cranial, caudo-dorsal ve ventral görünümünü içermekte olup, yöntemler arasındaki en belirgin farkları ortaya koymaktadır (Şekil 3.8). Manuel segmentasyon, nöroanatomik doğruluk açısından gerekli olan kıvrımlı kortikal yapıyı koruyarak gyrus ve sulcus ayırımlarında üstünlük sağlamıştır. Ayrıca, karşılaştırmalı nörobiyoloji açısından kritik öneme sahip bulbus olfactorius ve hypophysis cerebri gibi yapıların da doğru şekilde modellenmesini mümkün kılmıştır. Buna karşın, GFS + Eşikleme ve Otomatik segmentasyon yöntemleri, sıklıkla önemli sulcus'ları modelleyememiş ve gyrus'ları farklılaşmamış kütleler halinde birleştirerek küresel, aşırı basitleştirilmiş beyin modelleri üretmiştir. Bu eksiklikler, modellerin işlevsel ya da gelişimsel araştırmalardaki potansiyel kullanımını sınırlandırmaktadır. Yarı otomatik ve FBS yöntemleri genel beyin şeklini kısmen doğru yansıtarak orta düzeyde bir başarı göstermiştir. Özellikle otomatik yöntemin chiasma opticum ve hypophysis cerebri'nin bulunduğu ventral beyin yüzeyini doğru şekilde modelleyememesi, kontrast sınırlarının zayıf olduğu izodens yumuşak dokuların segmentasyonundaki zorlukları ortaya koymaktadır. Bu görsel farklılıklar, bazı yöntemlerin hacim açısından istatistiksel olarak benzer olmasına rağmen, özellikle karmaşık yumuşak doku yapılarında anatomik yorumlanabilirlik açısından önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmadaki görsel doğruluk değerlendirmeleri, özellikle karmaşık, değişken ve klinik açıdan önemli yapıların modellenmesinde manuel segmentasyonun anatomik gerçekçilik açısından en güvenilir yöntem olduğunu güçlü bir şekilde desteklemektedir. Bununla birlikte, yarı otomatik ve FBS yöntemleri işlem verimliliği ile kabul edilebilir anatomik doğruluğu dengeleyerek önemli alternatifler sunmaktadır. Buna karşılık, GFS + Eşikleme ve otomatik segmentasyon gibi yöntemler kullanıcıdan daha az zaman ve çaba gerektirse de yapısal detay, anatomik bütünlük ve kritik yapıların görünürlüğü açısından önemli ödünler vermektedir. Bu bulgular, manuel segmentasyonla karşılaştırmalı

olarak doğrulanan hibrit veya yarı otomatik yöntemlerin büyük veri kümeleri için en uygun çözümü sunabileceğini ortaya koyan önceki literatürle de uyumludur (Ibragimov ve Xing, 2017; Zhou vd., 2017). Bu bağlamda, nicel karşılaştırmaların yanı sıra nitel değerlendirmelerin de entegre edilmesi, veteriner ve biyomedikal bilimlerdeki 3B anatomik modellerin pratik değeri ve çeviri potansiyelini belirlemek için yalnızca tamamlayıcı değil, aynı zamanda zorunlu bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir.

Segmentasyon yönteminin, doku tipi ve görüntüleme parametreleri ile hacim ölçümlerinin doğruluğunu doğrudan etkilediği bilinmektedir. Özellikle yumuşak dokular ve kompleks anatomik yapılar söz konusu olduğunda, manuel segmentasyon genellikle “altın standart” olarak kabul edilse de bu yöntemin kullanıcıya bağlılık ve zaman açısından önemli sınırlılıkları bulunmaktadır. Whymys vd. (2013) mandibula ölçümlerinde farklı multi dedektörlü bilgisayarlı tomografi (MDBT) protokollerinin hacimsel doğruluğa etkisini sistematik olarak incelemiş ve dilim kalınlığını hacim doğruluğunu belirleyen temel faktör olarak tanımlamıştır. Bu bulgu, çalışmamızda GFS yönteminin segmentasyon süresini kısaltmasına rağmen hacim ölçümlerinde anlamlı sapmalara yol açtığını desteklemektedir.

Bu çalışmada, hacim analizleri segmentasyon yöntemleri arasında anlamlı hacimsel farklılıklar ortaya koymuştur ($p < 0,001$); buna karşılık, cinsiyet temelli farklar anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,053$). Dişi hayvanlara ait mandibula’larda, en yüksek hacimsel değer GFS yöntemiyle elde edilirken, bunu sırasıyla GFS + Eşikleme, manuel, yarı otomatik, otomatik ve FBS segmentasyon yöntemleri izlemiştir. Manuel ve yarı otomatik yöntemler minimum hacimsel farklılık sergilemiş, yarı otomatik yöntem ise belirgin şekilde daha kısa işlem süresi sunmuştur. Bu sonuçlar, yarı otomatik segmentasyon yöntemlerinin mandibula üzerinde ölçüm doğruluğu ile hesaplama verimliliği arasında optimal bir denge sağlayabileceğini, özellikle geleneksel manuel tekniklere kıyasla işlem süresi avantajının belirgin olduğunu göstermektedir.

Koyun mandibula’larına ilişkin bulgularımız hem insan hem de hayvan modellerine dayalı önceki çalışmalarla benzerlikler ve bazı farklılıklar göstermektedir. İnsan mandibula’sı üzerine yapılan araştırmalarda da yarı otomatik segmentasyonun doğruluk ile verimlilik arasında uygun bir denge sunduğu rapor edilmiştir. Örneğin Parmar vd. (2014) ile Vidholm vd. (2008) yarı otomatik segmentasyon tekniklerinin yüksek hacimsel doğruluğu korurken manuel iş yükünü önemli ölçüde azalttığını ve bu yönüyle yapılan çalışmadaki gözlemleri yansıttığını bildirmiştir. Öte yandan, 3B tam erişimli sinir ağı ile yapılan otomatik segmentasyon çalışmalarında da manuel segmentasyonlarla yüksek örtüşme oranları elde edilmiştir (Xu vd., 2021). Ayrıca, kortikal kemik segmentasyonu üzerine yapılan bir

çalışmada, distal tibia'da otomatik bir algoritmanın %95,1 doğrulukla manuel sınırlarla uyum gösterdiği rapor edilmiştir (Li vd., 2015).

Molar dişe ait hacim analizlerinde ise segmentasyon yöntemleri arasında istatistik açısından anlam teşkil eden farklar bulunmuştur ($p < 0,001$). Ayrıca, cinsiyete dayalı farklılıklar da anlamlıdır ($p < 0,001$). Molar dişte, manuel, yarı otomatik ve FBS yöntemleri benzer hacimsel sonuçlar verirken; GFS, GFS + Eşikleme ve otomatik segmentasyon yöntemleri daha yüksek hacimsel değerler üretmiştir. Bu veriler, işlem süresiyle birlikte değerlendirildiğinde, yarı otomatik ve FBS yöntemlerinin hem doğruluk hem de verimlilik açısından avantajlı olduğunu göstermektedir. Yarı otomatik yazılımlar, diş yapısının üç boyutlu modellenmesinde değişken hacimsel sapmalara rağmen yüksek doğruluk sunmuştur. Nitekim, Lo Giudice vd. (2020a) ve Lo Giudice vd. (2020b) yarı otomatik segmentasyon yöntemlerinin yüksek kalite sağladığını vurgulamıştır. Bu bulgular, çalışmanın sonuçlarıyla da örtüşmektedir.

Molar diş, küçük boyutuna rağmen yapısal karmaşıklığı nedeniyle segmentasyon doğruluğu açısından son derece hassastır. Otomatik yöntemler genel olarak daha tutarlı sonuçlar sunmuş olsa da bazı bireylerde küçük yüzey detaylarının fazladan segmente edilmesi, hacimlerin olduğundan büyük hesaplanmasına neden olmuştur. Segmentasyon süresi açısından değerlendirildiğinde, otomatik yöntem en kısa işlem süresine sahipken, manuel yöntem en uzun süreyi gerektirmiştir. Bu durum, işlem süresi ile hacimsel doğruluk arasında negatif bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. Daha hızlı yöntemler genellikle hacimsel sapmalarla sonuçlanmış, zaman kazancı doğruluk kaybı pahasına elde edilmiştir. Özellikle GFS ve GFS + Eşikleme yöntemleri, molar dişte sürekli olarak hacmi olduğundan büyük tahmin etmiş, ancak bu sapmalar segmentasyon süresiyle ilişkili bulunmamıştır. Bu da hızlı segmentasyonun her zaman daha doğru sonuçlar sağlamadığını göstermektedir. Borowska vd. (2023) tarafından atlarda kesici dişlerin 3B segmentasyonu ve kümeleme analizi ile hacim ve yüzey alanı başarıyla ayrımlanmış, segmentasyonun tür ve lokalizasyon farklarını belirlemedeki etkinliği ortaya konmuştur. Bu yaklaşım, çalışmamızda erkek bireylerde gözlenen sistematik hacim artışlarını ve segmentasyon süresine etkilerini desteklemektedir. Ayrıca, kontrastlı ve kontrastsız MRG görüntülerinin karşılaştırıldığı yakın tarihli bir çalışmada, hacimsel ölçümlerde küçük ancak anlamlı farklar bulunmuş; bu farkların görüntüleme tekniğinden ziyade segmentasyon algoritmasına bağlı olduğu vurgulanmıştır (Chen vd., 2025). Nitekim, segmentasyon algoritmasının seçiminin yalnızca hacimsel çıktıları değil, aynı zamanda işlem süresini de belirlediği çalışmamızda da gözlemlenmiştir. Özellikle manuel segmentasyon, yalnızca en doğru hacim ölçümlerini sunmakla kalmayıp, aynı

zamanda en düşük standart sapma ile sonuçlanarak tekrarlanabilirliğe yönelik yüksek potansiyel sergilemiştir. Öte yandan, otomatik yöntemlerdeki hacim tutarsızlıkları, özellikle anatomik implant tasarımı veya hacimsel nöroanatomik analiz gibi hassas niceliksel ölçüm gerektiren alanlarda sınırlayıcı bir faktör olarak değerlendirilmelidir.

Yapılan çalışma, koyun beyinlerine uygulanan tüm segmentasyon yöntemlerinde istatistiksel olarak anlamlı hacimsel farklılıklar ($p < 0,001$) ortaya çıkarmış, ancak cinsiyete bağlı anlamlı farklılıklar tespit edilmemiştir ($p = 0,12$). Dişi koyun örneklerinde, otomatik segmentasyon en büyük hacimsel ölçümleri verirken, bunu sırasıyla manuel, FBS, yarı otomatik, GFS + Eşikleme ve GFS izledi. Bu bulgular, segmentasyon tekniklerinin hacim ölçümlerini önemli ölçüde etkilediğini gösteren önceki nörogörüntüleme çalışmalarıyla uyumludur ancak bu farklılıkların yönü ve büyüklüğü, metodolojiye ve türe bağlı olarak değişebilmektedir. Otomatik segmentasyon, sınır yumuşatma veya kısmi hacim etkileri gibi algoritmik önyargılar nedeniyle manuel ve yarı otomatik yöntemlere kıyasla daha büyük hacimler üretmektedir (Zoghbi vd., 2010; Zwettler ve Backfrieder, 2015). Ancak bu, otomatik yöntemlerin daha küçük hacimler verdiği bazı kemirgen çalışmalarında (Kohler vd., 2024; Lau vd., 2018) elde edilen sonuçlarla çelişmektedir, bu da türlere özgü anatomik farklılıkların veya yazılım parametrelerinin önemli bir rol oynayabileceğini düşündürmektedir. Koyun beyinlerinde cinsiyete bağlı anlamlı hacimsel farklılıkların olmaması, insan nörogörüntülemesinde gözlemlenen cinsel dimorfizmden farklılık gösterir (Ramzanpour vd., 2023). Bazı hayvan çalışmalarıyla da tutarlılık gösterebilir (Nuruddin vd., 2013). Bu, cinsiyete bağlı beyin yapısal varyasyonlarının bazı türlerde daha az belirgin olabileceğini veya tespit edilmesi için daha büyük örneklem boyutları gerektirebileceğini göstermektedir. Otomatik segmentasyonun en büyük hacimleri verdiği dişi koyunlarda segmentasyon yöntemlerinin sıralaması, manuel ve çeşitli yarı otomatik yaklaşımların ardından, verimlilik ve hassasiyet arasındaki dengeyi vurgulamaktadır. Otomatik yöntemler yüksek verimli çalışmalar için avantajlı olabilirken, manuel veya yarı otomatik teknikler, özellikle daha küçük beyin bölgelerinde ayrıntılı anatomik analizler için tercih edilebilir (Ramadan vd., 2023). Genel olarak, bu çalışma preklinik modellerde nörogörüntüleme segmentasyonunun zorluklarının daha geniş bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmakta ve hacimsel analizde standartlaştırılmış yaklaşımların gerekliliğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmanın bulguları, altı farklı segmentasyon yöntemi arasında yüzey alanı ölçümleri açısından farklı anlamlı istatistiksel veriler olduğunu ($p < 0,001$) ve cinsiyete bağlı anlamlı varyasyonların da mevcut olduğunu ($p < 0,04$) ortaya koymuştur. Literatürde, otomatik segmentasyon yöntemlerinin manuel ve yarı otomatik yaklaşımlara kıyasla daha yüksek

hacimsel ve yüzey alanı ölçümleri üretme eğiliminde olduğu tutarlı bir şekilde bildirilmiştir. Järnstedt vd. (2022) otomatik segmentasyonun daha geniş ve daha az kısıtlayıcı sınır tanımlamaları nedeniyle anatomik yapıları olduğundan daha büyük tahmin ettiğini ifade etmiştir. Benzer biçimde, Kim vd. (2020) yarı otomatik segmentasyon yöntemlerinin kullanıcı girdisine ve segmentasyon eşiklerine bağlı olarak hacim tahminlerinde tutarsızlıklar oluşturduğunu ve bu nedenle potansiyel hatalara açık olduklarını bildirmiştir. Mevcut çalışmada ayrıca, dişi koyun örnekleri arasında yüzey alanı ölçümlerinde cinsiyete bağlı istatistiksel anlam taşıyan farklılıklar saptanmıştır. Bu bulgu, mandibula anatomisinde belirgin cinsel dimorfizm bulunduğunu ortaya koyan mevcut morfometrik literatürle örtüşmektedir. Nitekim hem insan hem de hayvan modellerinde, panoramik radyografi ve geometrik morfometri yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar, mandibular şekil ve boyut bakımından cinsiyetler arasında anlamlı farklar olduğunu göstermiştir (Nuzzolese vd., 2019). Koyunlara özgü morfometrik araştırmalar da farklı ırklar ve cinsiyetler arasında tutarlı mandibular varyasyonların varlığını ortaya koymuştur (Boz vd., 2023).

Beyin yapısı üzerinde elde edilen çalışma bulguları, farklı segmentasyon yöntemleri arasında yüzey alanı ölçümleri açısından istatistiksel olarak anlamlı farklar olduğunu göstermekte olup ($p < 0,001$), bu durum segmentasyon teknikleri arasında doğruluk değişkenliğine dikkat çeken güncel nörogörüntüleme literatürüyle uyum içindedir. GFS yöntemi en yüksek hacimsel ölçümleri üretmiş; bunu sırasıyla GFS + Eşikleme, manuel ve otomatik yaklaşımlar izlemiştir. Bu sıralama, özellikle yüksek anatomik varyasyon veya düşük görüntü kontrastı gibi durumlarda yarı otomatik ve hibrit yöntemlerin tam otomatik sistemlerden daha üstün olduğunu ortaya koyan farklı türlerdeki çalışmalarla paralellik göstermektedir. Naziroglu vd. (2017) insan MRG'lerinde yarı otomatik segmentasyon yöntemlerinin, yalnızca otomatik derin öğrenme modellerine kıyasla daha güvenilir kortikal kalınlık ölçümleri sağladığını bildirmiştir. Benzer şekilde, kemirgen beyinlerinde uygulanan eşikleme tabanlı yarı otomatik segmentasyonun, düşük kontrastlı bölgelerde otomatik derin öğrenme yaklaşımlarına kıyasla histolojik altın standarda daha yüksek düzeyde tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir (Dieckhaus vd., 2022; Kohler vd., 2024). Bununla birlikte, yakın dönemde yapılan bazı çalışmalar, gelişmiş erişimli sinir ağı mimarilerinin iyi etiketlenmiş veri setleri üzerinde yarı otomatik yöntemlerle karşılaştırılabilir doğruluk düzeylerine ulaşabildiğini ortaya koymuştur. Bu durum, yeterli düzeyde eğitim verisi sağlandığında koyun beyni segmentasyonunda otomatik yöntemlerin iyileştirilebileceğini göstermektedir (Eikenes and Kadry, 2024; Shen vd., 2023).

Çalışmada segmentasyon yöntemlerinin cinsiyetler arasında benzer performans sergilemesi ($p = 0,083$), nöroanatomiye cinsiyete bağlı dimorfizme yönelik güncel tartışmalar göz önüne alındığında dikkate değerdir. İnsan nörogörüntüleme çalışmalarında toplam yüzey alanına ilişkin cinsiyet farklılıkları sıkça rapor edilmekle birlikte (Ritchie vd., 2018), koyun beynine yönelik bir çalışmada toplam kortikal yüzey alanında anlamlı cinsiyet dimorfizmi bulunmamış; ancak limbik yapılar gibi bazı bölgesel farklılıklar saptanmıştır (Del Mauro vd., 2022). Bu durum, bazı türlerde toplam yüzey alanı gibi genel metriklerin, bölgesel ölçütlere kıyasla daha az cinsiyete bağlı farklılık gösterebileceğini ve bu bulgunun çalışmadaki sonuçları açıklayabileceğini düşündürmektedir.

Otomatik yöntemlerin göreceli olarak daha düşük performans göstermesi, veteriner nörogörüntüleme alanında karşılaşılan yapısal ve teknik zorlukları yansıtmaktadır. Derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar insan beyin segmentasyonunda ilerlemeler sağlamış olsa da (Purohit ve Bhatt, 2025), bu tekniklerin insan dışı türlere uygulanabilirliği, çoğunlukla yüksek kaliteli ve yeterli sayıda eğitim veri setinin eksikliği nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, türlere özgü derin öğrenme modelleri yaygınlık kazanana dek, koyun beyni nöroanatomisinde yüzey alanı ölçümlerinde yüksek doğruluk sağlamak adına yarı otomatik segmentasyon yöntemlerinin altın standart olarak önemini sürdüreceğini göstermektedir.

Koyun mandibula'sına ilişkin morfometrik veriler incelendiğinde, altı segmentasyon yönteminde mandibula uzunluğu ölçümlerinde anlam taşıyan farklar saptanmış ($p < 0,001$) ve erkek bireylerde daha uzun mandibular uzunluklar gözlemlenmiştir ($p = 0,004$). Çalışmada, en yüksek uzunluk değerlerinin GFS yöntemi ile elde edildiği, bunu sırasıyla GFS + Eşikleme, FBS, otomatik, yarı otomatik ve manuel segmentasyonun izlediği görülmüştür. Bu sıralama, daha otomatik ya da kılavuzlu yöntemlerin, özellikle GFS'in, anatomik sınırları daha geniş kapsamda yakalayabildiğini ve dolayısıyla daha yüksek uzunluk tahminleri ürettiğini göstermektedir. Curceac vd. (2020) eşik tabanlı ve GFS yaklaşımlarının, manuel izlemeye kıyasla ölçümlerde aşırı tahmin eğiliminde olduğunu, buna karşın tam otomatik derin öğrenme tabanlı yöntemlerin daha tutarlı ve tekrarlanabilir sonuçlar sağladığını bildirmiştir. Bu çalışmadaki cinsiyete dayalı mandibular uzunluk farklılıkları, erkeklerin daha uzun mandibula'lara sahip olduğunu ortaya koyarak, koyunlarda daha önce yapılan anatomik çalışmalarla uyum göstermektedir (Sundaram vd., 2019). Bu kapsamda, dikkat artırıcı mimarilerle uzamsal farkındalık modellerinin birleştirilmesinin, mevcut yarı otomatik yöntemlerin performansını aşabileceği ve hem hayvan modeli hem de klinik mandibula

görüntülemelerinde segmentasyon doğruluğunu artırırken cinsiyet veya anatomi kaynaklı ölçüm yanlışlıklarını azaltabileceği ileri sürülmektedir (Wacan vd., 2025).

Mandibula genişlik ölçümlerinde de altı segmentasyon yöntemi arasında farklar anlamlıdır ($p < 0,001$), ancak cinsiyete bağlı farklar anlamlı bulunmamıştır ($p = 0,16$). GFS yöntemi en yüksek genişlik değerlerini verirken, bunu sırasıyla GFS + Eşikleme, yarı otomatik, otomatik, manuel ve FBS segmentasyon yöntemleri takip etmiştir. Bu bulgular, segmentasyon yöntemlerinin kraniyofasiyal ölçümleri önemli ölçüde etkilediğini gösteren önceki araştırmalarla büyük ölçüde paralellik göstermektedir. Wallner vd. (2018), GrowCut tabanlı yarı otomatik segmentasyonun manuel izleme ile karşılaştırılabilir hacim ölçümleri sağladığını ve güçlü örtüşme düzeyi ile minimum mesafe farkları sunduğunu bildirmiştir. Bu durum, çalışmamızda gradyan tabanlı yarı otomatik yöntemlerle elde edilen yüksek değerlere dair gözlemlerimizi desteklemektedir. Öte yandan, kondiler bölgenin segmentasyonunda manuel ve yarı otomatik yöntemler arasında anlamlı fark bulamamış; bu da belirli anatomik yapıların segmentasyon yöntemine daha az duyarlı olabileceğini göstermektedir. Gelişmiş derin öğrenme tabanlı modeller ise son derece doğru, tam otomatik mandibular segmentasyonlar sağlamıştır. Yakın tarihli bir çalışmada, klinisyenler tarafından etiketlenmiş verilerle eğitilen bir modelin, manuel segmentasyonla ayırt edilemeyecek düzeyde performans gösterdiği bildirilmiştir (Yurdakurban vd., 2025). Bu bulgu, otomatik segmentasyon yöntemlerinin doğruluk açısından yarı otomatik yaklaşımlara yaklaşma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Mandibula yüksekliği ölçümlerinde de altı segmentasyon yöntemi arasında istatistiksel farklar anlamlı iken ($p < 0,001$), ancak cinsiyete bağlı farklar anlamlı değildir ($p = 0,156$). En yüksek yükseklik değerleri GFS yöntemiyle elde edilmiş; ardından GFS + Eşikleme, otomatik, yarı otomatik, manuel ve FBS yöntemleri sıralanmıştır. Bu sonuçlar, koyun mandibula yüksekliğine ilişkin ölçümlerde belirgin metodolojik farklılıklar olduğunu, ancak cinsiyet temelli varyasyonların sınırlı düzeyde kaldığını göstermektedir. Bulgularımız, mandibula morfometrisine ve segmentasyon tekniklerine yönelik güncel araştırmalarla tutarlıdır. Lo Giudice vd. (2022) eşik tabanlı yarı otomatik segmentasyon yönteminin, manuel izlemeye kıyasla insan mandibula ölçümlerini fazla tahmin etme eğiliminde olduğunu bildirmiştir. Bu durum, çalışmamızda GFS yöntemlerinin manuel yöntemden daha yüksek ölçüm değerleri verdiğine dair gözlemlerimizle örtüşmektedir. Buna karşın, sığır mandibula'larına yönelik çalışmalarda yarı otomatik ve manuel segmentasyon yöntemleri arasında ölçüm doğruluğu ve hacmi açısından anlamlı fark bulunmadığı bildirilmiştir. Yarı otomatik segmentasyon süreci, işlem süresini önemli ölçüde kısaltmakta ve ölçüm tutarlılığını artırmaktadır. Bu özellikleriyle

büyük ölçekli çalışmalar ve klinik uygulamalar için uygun bir seçenek sunarken, rutin cerrahi süreçler için tam otomatik yöntemlerin tercih edilmesi gerekebilir (Chuang vd., 2018; Tingelhoff vd., 2007). Çalışmamızda cinsiyet temelli anlamlı farklara rastlanmaması, mandibula ölçümlerinde cinsel dimorfizm bildirilen insan çalışmalarıyla (Ramphaleng vd., 2025) çelişmekle birlikte, koyun mandibula'larında cinsiyete bağlı minimal varyasyon bildiren veteriner literatürüyle uyumludur (de Lana vd., 2025).

Bu çalışma, koyun beyni uzunluğu ölçümleri açısından altı farklı segmentasyon yöntemi arasında istatistiksel anlamı bulunan farkları ortaya koymuştur: Manuel, Yarı otomatik, GFS, GFS + Eşikleme, FBS ve Otomatik segmentasyon ($p < 0,001$). Cinsiyete bağlı anlamlı bir farklılık gözlenmemekle birlikte, erkek bireylerde beyin uzunluğunun hafifçe daha yüksek olma eğiliminde olduğu belirlenmiştir ($p = 0,074$). Yöntemler arasında, en yüksek uzunluk ölçümleri GFS + Eşikleme yaklaşımıyla elde edilirken, en düşük değerler Otomatik segmentasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Manuel segmentasyon ile yarı otomatik yöntem ise birbirine oldukça yakın sonuçlar üretmiştir. Son dönemlerde gerçekleştirilen nöroanatomik segmentasyon çalışmalarının bulguları, bu çalışmada farklı teknikler arasında gözlenen beyin uzunluğu ölçüm değişkenliğiyle örtüşmektedir. Örneğin, manuel ve otomatik segmentasyon yöntemlerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda, eşikleme temelli yarı otomatik yöntemlerin tam otomatik yaklaşımlara kıyasla daha yüksek ölçümler ürettiği belirtilmiştir. Bu durum, GFS + Eşikleme yönteminin en büyük, otomatik segmentasyonun ise en küçük beyin uzunluklarını verdiği mevcut çalışmanın bulgularıyla uyumludur (Lancelot vd., 2014; Makowski vd., 2018). Ayrıca, söz konusu çalışmalar, kullanıcı etkileşimi içeren yarı otomatik yöntemlerin yalnızca manuel segmentasyona göre daha yüksek tekrarlanabilirlik sağladığını belirtmiştir. Bu durum, çalışmamızda manuel ve yarı otomatik yöntemin benzer sonuçlar üretmiş olması ile örtüşmektedir. Elde edilen bulgular, segmentasyon yöntemlerindeki metodolojik farklılıkların özellikle insan müdahalesinin derecesinin ölçüm sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu da nörogörüntüleme çalışmalarında güvenilir ve karşılaştırılabilir verilerin elde edilebilmesi için standart segmentasyon protokollerine duyulan gereksinimi pekiştirmektedir (Kim vd., 2018; Lee vd., 2005).

Bu çalışmanın bulguları, koyun beyni yüksekliği ölçümleri açısından altı farklı segmentasyon yöntemi arasında farklı istatistiksel sonuçların bulunduğunu ($p < 0,001$) ve aynı zamanda cinsiyete bağlı anlamlı varyasyonların ortaya çıktığını ($p < 0,05$) göstermiştir. Dişi bireylerde en yüksek beyin yüksekliği değerleri GFS segmentasyon yöntemiyle elde edilmiş; bunu sırasıyla otomatik, GFS + Eşikleme, manuel, yarı otomatik ve FBS yöntemleri takip etmiştir. Erkek bireylerde de en yüksek değerler yine GFS yöntemiyle hesaplanmış; bunu

sırasıyla GFS + Eşikleme, manuel, yarı otomatik, otomatik ve FBS izlemiştir. Segmentasyon yöntemlerine göre ölçülen beyin yüksekliği değerlerinde anlamlı istatistik fark bulunması ve cinsiyete bağlı varyasyonların varlığı, güncel nöroanatomik segmentasyon literatürüyle örtüşmekte ve bu alana katkı sunmaktadır. Her iki cinsiyette de GFS yönteminin en yüksek, FBS yönteminin ise en düşük yükseklik değerlerini üretmiş olması, segmentasyon algoritmalarının özellikle anatomik sınırların tanımlanmasındaki farklılıklar nedeniyle morfometrik analiz sonuçları üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Hassan vd., 2023; Tang vd., 2013). Bu durum, segmentasyon protokollerinin seçimi sırasında incelenen anatomik yapının özgün özelliklerinin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Çalışmada gözlenen cinsiyete bağlı beyin yüksekliği farklılıkları, karşılaştırmalı nöroanatomisi alanında cinsiyet dimorfizmine ilişkin süregelen tartışmalara katkı sağlamaktadır. Koyun beyinine yönelik yapılan bazı çalışmalarda toplam hacim ve yükseklik bakımından belirgin cinsiyet farkları bildirilmemiş olsa da kortikal kalınlık gibi bazı metriklerde cinsiyete bağlı küçük ancak anlamlı farklılıkların saptandığı görülmektedir. Bu bulgular, çalışmamızdaki sonuçlarla örtüşmektedir (Joffe vd., 2005; Shi vd., 2015). Ayrıca, otomatik segmentasyon yönteminin dişilerde erkeklere göre daha yüksek sıralarda yer alması, segmentasyon algoritmalarının cinsiyete özgü performans farklılıkları sergileyebileceğini göstermektedir. İnsan MR çalışmalarında da benzer şekilde, otomatik segmentasyon sistemlerinin doğruluğunun, eğitim veri kümelerindeki cinsiyet dengesizliklerinden etkilendiği bildirilmiştir (Andrushko vd., 2023; Colom vd., 2013). Bu durum, makine öğrenmesi tabanlı segmentasyon yazılımlarında cinsiyet dengesi gözetilmiş eğitim verilerinin kullanılması gerekliliğini ve bu sayede tüm bireyler için adil ve güvenilir analiz sonuçlarının elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, koyun beyin genişliği ölçümleri açısından altı farklı segmentasyon yöntemi arasında anlamlı olan farklı istatistiksel nihai sonuçlar tespit edilmiştir ($p < 0,05$). En yüksek genişlik değerleri GFS yöntemiyle elde edilmiş; GFS + Eşikleme, yarı otomatik, manuel, otomatik ve FBS yöntemleri izlemiştir. Ayrıca, daha önce yalnızca beyin yüksekliği ile sınırlı olduğu bildirilen koyun nöroanatomisindeki cinsiyet dimorfizmine kıyasla, bu çalışmada beyin genişliği açısından da anlamlı cinsiyet temelli farklar gözlemlenmiştir ($p < 0,05$). Elde edilen bulgular, nöro görüntüleme alanındaki literatürle uyumludur. Makowski vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen kapsamlı bir derleme çalışmasında, segmentasyon araçlarının temel algoritmik farklılıklarına bağlı olarak sistematik biçimde farklı morfometrik ölçümler üretebildiği ortaya konmuştur. Özellikle, GFS ile sınır iyileştirme aşamalarını bir

araya getiren hibrit yöntemlerin çalışmamızda kullanılan GFS + Eşikleme yöntemine benzer şekilde otomatik veya manuel tekniklere göre daha yüksek doğrulukla sonuç verdiği tutarlı biçimde raporlanmıştır (Karsch vd., 2009; Wang vd., 2018b). Beyin genişliğine ilişkin olarak saptanan cinsiyet farklılıkları, insan nörogörüntüleme çalışmalarında da genel beyin boyutu düzeltildikten sonra belirli anatomik bölgelerde tanımlanan cinsiyet dimorfizmi ile örtüşmektedir (Barrière vd., 2019). Özellikle son dönemde yürütülen derin öğrenme temelli araştırmalarda, dengesiz cinsiyet dağılımına sahip veri kümeleriyle eğitilen erişimli sinir ağı modellerinin, cinsiyet temelli performans önyargılarına sahip olabildiği bildirilmiştir (Ioannou vd., 2022; Knopp vd., 2025). Bu durum, çalışmamızda elde edilen sonuçların, veteriner nörogörüntülemede daha adil ve dengeli algoritmaların geliştirilmesi açısından önemli katkılar sağlayabileceğini düşündürmektedir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

- Manuel segmentasyon, zaman alıcı olsa da karmaşık anatomik çalışmalar ve yeni tekniklerin doğrulanması için referans standart olarak kalmalıdır.

- Yarı otomatik segmentasyon ve FBS, hız ve hassasiyet dengesi sunan rutin morfometrik ve volümetrik çalışmalar için önerilmektedir.

- Tam otomatik yöntemler, hızlı olmalarına rağmen, özellikle düşük kontrastlı veya geometrik olarak karmaşık dokular için anatomik değerlendirmede yerini almadan önce iyileştirme gerektirmektedir.

- GFS ve GFS + Eşikleme'deki aşırı tahmin eğilimleri göz önüne alındığında, bu yöntemlerin segmentasyon sonrası düzeltme olmadan, özellikle de cerrahi planlamada kullanılması konusunda dikkatli olunması düşünülmektedir.

- Kapsamlı anatomik modelleme için kantitatif metriklerin yanı sıra görsel doğrulamanın da dahil edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma koyunlarda üç anatomik bölgeye odaklanmıştır ve geliştirilebilirliğini sınırlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, segmentasyon tutarlılığını doğrulamak için ek dokulara (örn. paranasal sinüsler, vasküler ağlar) ve diğer türlere genişletilebilmesi gerekmektedir. Ayrıca, artık 3D Slicer uzantılarında giderek daha fazla bulunan derin öğrenme tabanlı yöntemlerin entegre edilmesi, doğruluğu korurken otomasyonu geliştirebileceği düşünülmektedir. Sınırlamalar arasında manuel segmentasyonda operatörler arası potansiyel değişkenliğin de yer aldığını belirtmenin uygun olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdulcadir, J., Dewaele, R., Firmenich, N., Remuinan, J., Petignat, P., Botsikas, D. & Brockmann, C. (2020). In vivo imaging-based 3-dimensional pelvic prototype models to improve education regarding sexual anatomy and physiology. *The journal of sexual medicine*, 17(9), 1590-1602. <https://doi.org/10.1016/j.jsxm.2020.05.025>
- Adams, F. and Barbante, C. (2012). History and present status of imaging analysis. *Talanta*, 102, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2012.06.057>
- Afandi, A., Isa, I.S., Sulaiman, S.N., Marzuki, N.N.M. & Karim, N.K.A. (2020). *Comparison of different image segmentation techniques on mri image*. [Bildiri sunumu]. In Smart Trends in Computing and Communications: Proceedings of SmartCom 2019 (ss. 1-9). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0077-0_1
- Alcázar-Chávez, I., Olmedo-Pérez, G., Estrada-Dávila, M.G. & Tabarez-Rojas, A. (2021). Use of anatomical models in the teaching of veterinary anatomy as an animal welfare strategy. *Journal of Technical Education/Revista de Educación Técnica*, 5(15), 15-29. <https://doi.org/10.35429/JOTE.2021.15.5.15.29>
- Alonso, F., Algorri, M.E. & Flores-Mangas, F. (2004, 1-5 Eylül). *Composite index for the quantitative evaluation of image segmentation results*. [Bildiri sunumu]. In The 26th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (1, ss. 1794-1797), San Fransisco, CA, US. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2004.1403536>
- Al-Qareer, A.H., Afsah, M.R. & Müller, H.P. (2004). A sheep cadaver model for demonstration and training periodontal surgical methods. *European Journal of Dental Education*, 8(2), 78-83. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0579.2003.00334.x>
- Amparore, D., Pecoraro, A., Piramide, F., Verri, P., Checcucci, E., De Cillis, S., Piana, A., Burgio, M., Di Dio, M., Manfredi, M., Fiori, C. & Porpiglia, F. (2022). Three-dimensional imaging reconstruction of the kidney's anatomy for a tailored minimally invasive partial nephrectomy: a pilot study. *Asian Journal of Urology*, 9(3), 263-271. <https://doi.org/10.1016/j.ajur.2022.06.003>
- Andrushko, J.W., Rinat, S., Kirby, E.D., Dahlby, J., Ekstrand, C. & Boyd, L.A. (2023). Females exhibit smaller volumes of brain activation and lower inter-subject variability during motor tasks. *Scientific Reports*, 13(1), 17698. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44871-4>
- Ansari, M.Y., Abdalla, A., Ansari, M.Y., Ansari, M.I., Malluhi, B., Mohanty, S., Mishra, S., Singh, S.S., Abinahed, J., Al-Ansari, A., Balakrishnan, S. & Dakua, S. P. (2022). Practical utility of liver segmentation methods in clinical surgeries and interventions. *BMC medical imaging*, 22(1), 97. <https://doi.org/10.1186/s12880-022-00825-2>
- Arhid, K., Bouksim, M., Zakani, F. R., Gadi, T., & Aboulfatah, M. (2016, 29 Eylül-1 Ekim). *An objective 3D mesh segmentation evaluation using Sokal-Sneath metric*. [Bildiri sunumu]. In 2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) (ss. 29-34), Marakech, Morocco. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMCS.2016.7905609>
- Arney, D.R. (2009). Sheep behaviour, needs, housing and care. *Scandinavian Journal of Laboratory Animal Science*, 36(1), 69-73. <https://doi.org/10.23675/sjlas.v36i1.170>
- Arora, A.K., and Kaur, A. (2024). *Deep insight of medical images segmentation and classification by deep learning*. In Computational Methods in Science and Technology (ss. 42-45), London. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003501244>

- Asif, M.K., Nambiar, P., Mani, S.A., Ibrahim, N.B., Khan, I.M. & Sukumaran, P. (2018). Dental age estimation employing CBCT scans enhanced with Mimics software: Comparison of two different approaches using pulp/tooth volumetric analysis. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 54, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2017.12.010>
- Aydogdu, M., Adisen, M.Z. & Ertas, G. (2024). The effect of imaging programs and segmentation methods on the accuracy of volume measurements of teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 138(6), 794-802. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2024.07.001>
- Azer, S.A. and Azer, S. (2016). 3D anatomy models and impact on learning: a review of the quality of the literature. *Health professions education*, 2(2), 80-98. <https://doi.org/10.1016/j.hpe.2016.05.002>
- Bakıcı, C., Akgün, R.O. & Oto, Ç. (2019). The applicability and efficiency of 3 dimensional printing models of hyoid bone in comparative veterinary anatomy education. *Veteriner Hekimler Derneği Dergisi*, 90(2), 71-75. <https://doi.org/10.33188/vetheder.518909>
- Bali, A., and Singh, S.N. (2015, 21-22 Şubat). *A review on the strategies and techniques of image segmentation*. [Bildiri sunumu]. In 2015 Fifth international conference on advanced computing & communication technologies (ss. 113-120), Haryana, India. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACCT.2015.63>
- Banstola, A., and Reynolds, J.N. (2022). The sheep as a large animal model for the investigation and treatment of human disorders. *Biology*, 11(9), 1251. <https://doi.org/10.3390/biology11091251>
- Barrière, D.A., Ella, A., Adriaensen, H., Roselli, C.E., Chemineau, P. & Keller, M. (2019). In vivo magnetic resonance imaging reveals the effect of gonadal hormones on morphological and functional brain sexual dimorphisms in adult sheep. *Psychoneuroendocrinology*, 109, 104387. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2019.104387>
- Bati, A.H., Guler, E., Ozer, M.A., Govsa, F., Erozkhan, K., Vatansever, S., Ersin, M.S., Elmas, Z.N. & Harman, M. (2020). Surgical planning with patient-specific three-dimensional printed pancreaticobiliary disease models—Cross-sectional study. *International Journal of Surgery*, 80, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2020.06.017>
- Berman, B. (2012). 3D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Bertels, J., Robben, D., Vandermeulen, D. & Suetens, P. (2021). Theoretical analysis and experimental validation of volume bias of soft dice optimized segmentation maps in the context of inherent uncertainty. *Medical Image Analysis*, 67, 101833. <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101833>
- Blanche, P.A. (2021). Holography, and the future of 3D display. *Light: Advanced Manufacturing*, 2(4), 446-459. <https://doi.org/10.37188/lam.2021.028>
- Blázquez-Llorca, L., Morales de Paz, L., Martín-Orti, R., Santos-Álvarez, I., Fernández-Valle, M.E., Castejón, D., García-Real, M.I., Salguero-Fernandez, R., Perez-Lloret, P., Moreno, N., Jimenez, S., Herrero-Fernandez, M.J. & González-Soriano, J. (2023). The application of 3D anatomy for teaching veterinary clinical neurology. *Animals*, 13(10), 1601. <https://doi.org/10.3390/ani13101601>
- Blinder, D., Birnbaum, T., Ito, T. & Shimobaba, T. (2022). The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display. *Light: Advanced Manufacturing*, 3(3), 572-600. <https://doi.org/10.37188/lam.2022.035>

- Borowska, M., Jasiński, T., Gierasimiuk, S., Pauk, J., Turek, B., Górski, K. & Domino, M. (2023). Three-dimensional segmentation assisted with clustering analysis for surface and volume measurements of equine incisor in multidetector computed tomography data sets. *Sensors*, 23(21), 8940. <https://doi.org/10.3390/s23218940>
- Bouksim, M., Zakani, F.R., Arhid, K., Aboulfatah, M. & Gadi, T. (2016, 24-26 Ekim). *New evaluation method for 3D mesh segmentation*. [Bildiri sunumu]. In 2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt) (ss. 438-443), Tangier, Morocco. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CIST.2016.7805087>
- Boz, İ., Manuta, N., Jashari, T., Kahvecioğlu, O., Pazvant, G., Ince, N.G., Duro, S. & Spataru, M. C. (2023). Mandibular Shape Variation in Different Sheep Breeds. *Research Square*, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2936833/v1>
- Bukovec, M., Truyen, R., Likar, B. & Pernus, F. (2004, 12 Mayıs). *Image segmentation by connected parametrical models*. [Bildiri sunumu]. In Medical Imaging 2004: Image Processing (Vol. 5370, pp. 398-409), San Diego, CA, US. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.533629>
- Burti, S., Banzato, T., Coghlan, S., Wodzinski, M., Bendazzoli, M. & Zotti, A. (2024). Artificial intelligence in veterinary diagnostic imaging: Perspectives and limitations. *Research in Veterinary Science*, 175, 105317. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2024.105317>
- Bücking, T.M., Hill, E.R., Robertson, J.L., Maneas, E., Plumb, A.A. & Nikitichev, D.I. (2017). From medical imaging data to 3D printed anatomical models. *PloS one*, 12(5), e0178540. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178540>
- Canright, A., Bescoby, S. & Dickson, J. (2022). Evaluation of a 3D computer model of the equine paranasal sinuses as a tool for veterinary anatomy education. *Journal of Veterinary Medical Education*, 50(2), 234-242. <https://doi.org/10.3138/jvme-2021-0134>
- Chai, S.S. and Goh, K.L. (2017). Evaluation of Different User Input Types in Interactive Segmentation. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 9(2-10), 91-99.
- Chau, M., Vu, H., Debnath, T., & Rahman, M.G. (2025). A scoping review of automatic and semi-automatic MRI segmentation in human brain imaging. *Radiography*, 31(2), 102878. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2025.01.013>
- Chen, L., Shen, C., Zhou, Z., Maquilan, G., Albuquerque, K., Folkert, M.R. & Wang, J. (2019). Automatic PET cervical tumor segmentation by combining deep learning and anatomic prior. *Physics in Medicine & Biology*, 64(8), 085019. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab0b64>
- Chen, Z., Xiao, C., Liu, Y., Hassan, H., Li, D., Liu, J., Li, H., Xie, W. & Huang, B. (2025). Comprehensive 3D analysis of the renal system and stones: segmenting and registering non-contrast and contrast computed tomography images. *Information Systems Frontiers*, 27: 97-111. <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10485-y>
- Cheng, Z., and Wang, J. (2020). Improved region growing method for image segmentation of three-phase materials. *Powder Technology*, 368, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.032>
- Chickness, J.P., Trautman-Buckley, K.M., Evey, K. & Labranche, L. (2022). Novel development of a 3D digital mediastinum model for anatomy education. *Translational Research in Anatomy*, 26, 100158. <https://doi.org/10.1016/j.tria.2021.100158>
- Childs, H., Liu, P. & Zhang, Y. (2017). Comparative anatomy and evolutionary biomechanics in mammals. *Journal of Morphology*, 278(5), 567-580.

- Choudhary, O.P., Singh, I., Bharti, S.K., Mohd, K.I., Sathapathy, S. & Mrigesh, M. (2015). Gross and Morphometrical Studies on Mandible of Blackbuck (*Antelope cervicapra*). *International Journal of Morphology*, 33(2). 428-432.
- Chuang, Y.J., Doherty, B.M., Adluru, N., Chung, M.K. & Vorperian, H.K. (2018). A novel registration-based semiautomatic mandible segmentation pipeline using computed tomography images to study mandibular development. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 42(2), 306-316. <https://doi.org/10.1097/RCT.0000000000000669>
- Chytas, D., Paraskevas, G., Noussios, G., Demesticha, T., Salmas, M., Vlachou, C., Vasiliadis, A.V. & Troupis, T. (2024). Use of photogrammetry-based digital models in anatomy education: An overview. *Morphologie*, 108(363), 100792. <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2024.100792>
- Coca-Rodríguez, A., and Lorenzo-Ginori, J.V. (2014). Effects of interpolation on segmentation in cell imaging. *Computación y Sistemas*, 18(1), 97-109. <http://doi.org/10.13053/CyS-18-1-2014-021>
- Colom, R., Stein, J.L., Rajagopalan, P., Martínez, K., Hermel, D., Wang, Y., Alvarez-Linera, J., Burgaleta, M., Quiroga, M.A., Shih, P.C. & Thompson, P.M. (2013). Hippocampal structure and human cognition: Key role of spatial processing and evidence supporting the efficiency hypothesis in females. *Intelligence*, 41(2), 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.01.002>
- Curceac, S., Atkinson, P.M., Milne, A., Wu, L. & Harris, P. (2020). An evaluation of automated GPD threshold selection methods for hydrological extremes across different scales. *Journal of Hydrology*, 585, 124845. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124845>
- da Silveira, E.E., da Silva Lisboa Neto, A.F., Carlos Sabino Pereira, H., Ferreira, J.S., Dos Santos, A.C., Siviero, F., da Fonseca, R., & de Assis Neto, A.C. (2021). Canine skull digitalization and three-dimensional printing as an educational tool for anatomical study. *Journal Of Veterinary Medical Education*, 48(6), 649-655. <https://doi.org/10.3138/jvme-2019-0132>
- de Lana, J.F., Lopes, C.F., Pereira, V.P., Chiarello, G.P., Depedrini, J.S., Pérez, W. & de Moraes-Pinto, L. (2025). Applied Mandibular Osteometry in Young Lambs: Morphometric and Clinical Insights. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 54(1), e70018. <https://doi.org/10.1111/ahe.70018>
- de Oliveira, H.F., Bollela, V.R., Anselmo-Lima, W.T., Costa, C.A.P.D.O. & Nakanishi, M. (2017). A feasible, low-cost, reproducible lamb's head model for endoscopic sinus surgery training. *PLoS One*, 12(6), e0180273. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180273>
- Del Mauro, G., Del Maschio, N., Sulpizio, S., Fedeli, D., Perani, D. & Abutalebi, J. (2022). Investigating sexual dimorphism in human brain structure by combining multiple indexes of brain morphology and source-based morphometry. *Brain Structure and Function*, 227(1), 11-21. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02376-8>
- Deniskova, T.C., Dostev, A.V., Selinova, M.I., Kunz, E., Medugorac, I., Reyer, H., Wimmers, K., Barbato, M., Traspov, A.A., Brem, G. & Zinovieva, N.A. (2018). Population structure and genetic diversity of 25 Russian sheep breeds based on whole-genome genotyping. *Genet Sel Evol*, 50,29 <https://doi.org/10.1186/s12711-018-0399-5>
- Deml, M.C., Benneker, L.M., Schmid, T., Sakai, D., Albers, C.E., Hoppe, S. & Zeiter, S. (2019). Ventral surgical approach for an intervertebral disc degeneration and regeneration model in sheep cervical spine: anatomic technical description, strengths and limitations. *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology*, 32(05), 389-393. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1688988>

- Des Ligneris, M., Bonnet, A., Chatelain, Y., Glatard, T., Sdika, M., Vila, G., Wagnier-Dauchelle, V., Pop, S., & Frindel, C. (2023, 18-21 Nisan). *Reproducibility of tumor segmentation outcomes with a deep learning model*. In 2023 IEEE 20th International Symposium on Biomedical Imaging, (ISBI) (ss. 1-5), Cartagena Colombia. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISBI53787.2023.10230482>
- Díaz Martínez, E., Arencibia Espinosa, A., Soler Laguía, M., Ayala Florenciano, M.D., Kilroy, D., García García, M.I., Gomariz, F.M., Collado, C.S., Cano, F.G., Jaber, J.R. & Zarzosa, G.R. (2024). The Bony Nasal Cavity and Paranasal Sinuses of Big Felids and Domestic Cat: A Study Using Anatomical Techniques, Computed Tomographic Images Reconstructed in Maximum-Intensity Projection, Volume Rendering and 3D Printing Models. *Animals*, 14(17), 2609. <https://doi.org/10.3390/ani14172609>
- Dieckhaus, H., Meijboom, R., Okar, S., Wu, T., Parvathaneni, P., Mina, Y., Chandran, S., Waldman, A.D., Reich, D. & Nair, G. (2022). Logistic regression-based model is more efficient than u-net model for reliable whole brain magnetic resonance imaging segmentation. *Topics in Magnetic Resonance Imaging*, 31(3), 31-39. <https://doi.org/10.1097/RMR.0000000000000296>
- Diéguez-Pérez, M., and Ticona-Flores, J.M. (2022). Three-dimensional analysis of the pulp chamber and coronal tooth of primary molars: an in vitro study. *International journal of environmental research and public health*, 19(15), 9279. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159279>
- Diogo, C.C., Camassa, J.A., Pereira, J.E., Costa, L.M.D., Filipe, V., Couto, P.A., Geuna, S., Mauricio, A.C. & Varejao, A.S. (2017). The use of sheep as a model for studying peripheral nerve regeneration following nerve injury: review of the literature. *Neurol. Res.* 39, 926–939. <https://doi.org/10.1080/01616412>
- Divya, D., and Ganesh Babu, T. R. (2019, 7 Kasım). *A survey on image segmentation techniques*. [Bildiri sunumu]. In International Conference on Emerging Current Trends in Computing and Expert Technology (ss. 1107-1114). Cham, Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32150-5_112
- Eikenes, V. and Kadry, S. (2024). U-Net-based approaches for brain tumor segmentation. In *Data Science in the Medical Field* (ss. 165–191). Chennai, India: Elsevier.
- Einstein, A.J., Gil, J., Wallenstein, S., Bodian, C.A., Sanchez, M., Burstein, D.E., Wu, H.S. & Liu, Z. (1997). Reproducibility and accuracy of interactive segmentation procedures for image analysis in cytology. *Journal of microscopy*, 188(2), 136-148. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.1997.2510808.x>
- Ella, A., and Keller, M. (2015). Construction of an MRI 3D high resolution sheep brain template. *Magnetic resonance imaging*, 33(10), 1329-1337. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2015.09.001>
- Elnakib, A., Gimel'farb, G., Suri, J.S. & El-Baz, A. (2011). Medical image segmentation: a brief survey. *Multi Modality State-of-the-Art Medical Image Segmentation and Registration Methodologies, II*, 1-39. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8204-9_1
- Erolin, C. (2019). Interactive 3D digital models for anatomy and medical education. *Biomedical Visualisation 2*, 1-16. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14227-8_1
- Falcao, A.X., Miranda, P.A., & Rocha, A. (2006). *A linear-time approach for image segmentation using graph-cut measures* [Bildiri sunumu]. In International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (pp. 138-149). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11864349_13
- Fel, J.T., Ellis, C.T. & Turk-Browne, N.B. (2023). Automated and manual segmentation of the hippocampus in human infants. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 60, 101203. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2023.101203>

- Feng, C., Zhao, D., & Huang, M. (2017). Image segmentation and bias correction using local inhomogeneous iNtensity clustering (LINC): A region-based level set method. *Neurocomputing*, 219, 107-129. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.09.008>
- Fredieu, J.R., Kerbo, J., Herron, M., Klatte, R. & Cooke, M. (2015). Anatomical models: a digital revolution. *Medical science educator*, 25, 183-194. <https://doi.org/10.1007/s40670-015-0115-9>
- Galibourg, A., Dumoncel, J., Telmon, N., Calvet, A., Michetti, J. & Maret, D. (2018). Assessment of automatic segmentation of teeth using a watershed-based method. *Dentomaxillofacial Radiology*, 47(1), 20170220. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20170220>
- Gan, H.S., Karim, A.H.A., Sayuti, K.A., Tan, T.S. & Kadir, M.R.A. (2016, 10-12 Ağustos). *Analysis of parameters' effects in semi-automated knee cartilage segmentation model: Data from the osteoarthritis initiative*. In AIP Conference [Bildiri Sunumu] (Vol. 1775, No. 1), Songkhla, Thailand. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.4965172>
- Genaro, L.E., Ferreira, G., Conte, M.B., de Almeida Gonçalves, M. & Capote, T.S.O. (2019). Morphological Differences between the First and Second Permanent Upper Molars. *Journal of Morphological Sciences*, 36(04), 303-308. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1695756>
- Georgescu, B., Zhou, X. S., Comaniciu, D., & Gupta, A. (2005, 20-25 Haziran). *Database-guided segmentation of anatomical structures with complex appearance*. [Bildiri sunumu]. In 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) (Vol. 2, pp. 429-436), San Diego, CA, US. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.119>
- Gokyer, S., Monsef, Y.A., Buyuksungur, S., Schmidt, J., Dragomir, A.V., Uygur, S., Oto, C., Orhan, K., Hasirci, V., Hasirci, N. & Yilgor, P. (2024). MgCa-based alloys modified with Zn- and Ga-doped CaP coatings lead to controlled degradation and enhanced bone formation in a sheep cranium defect model. *ACS Biomater Sci Eng*. 14;10(7):4452–4462. <https://10.1021/acsbiomaterials.4c00358>
- Gürses, M.E., Hanalioglu, S., Mignucci-Jiménez, G., Gökalp, E., Gonzalez-Romo, N.I., Gungor, A., Cohen-Gadol, A.A., Türe, U., Lawton, M. & Preul, M.C. (2023). Three-dimensional modeling and extended reality simulations of the cross-sectional anatomy of the cerebrum, cerebellum, and brainstem. *Operative Neurosurgery*, 25(1), 3-10. <https://doi.org/10.1227/ons.0000000000000703>
- Hackett, M. and Proctor, M. (2016). Three-dimensional display technologies for anatomical education: a literature review. *Journal of Science Education and Technology*, 25(4), 641-654. <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9619-3>
- Hackmann, C.H., Dos Reis, D.D.A. & de-Assis-Neto, A.C. (2019). Digital revolution in veterinary anatomy: confection of anatomical models of canine stomach by scanning and three-dimensional printing (3D). *Int. j. morphol*, 37(2), 486-90. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022019000200486>
- Hassan, A.A.A., Azab, A.O., Ahmed, H.M., Mohamed, L.M.A.M., Adel, M. & El-Basmy, A.A. (2023). Cross-platform comparison of precision and time effectiveness of automated versus semi-automated brain volumetric measurements in healthy Egyptian adults. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 54(1), 144. <https://doi.org/10.1186/s43055-023-01091-0>
- He, C., and Wang, C. (2018). A survey on segmentation of 3D models. *Wireless Personal Communications*, 102, 3835-3842. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5414-1>
- Heimann, T., and Meinzer, H. P. (2009). Statistical shape models for 3D medical image segmentation: a review. *Medical image analysis*, 13(4), 543-563. <https://doi.org/10.1016/j.media.2009.05.004>

- Hicdonmez, T., Parsak, T. & Cobanoglu, S. (2006). Simulation of surgery for craniosynostosis: A training model in a fresh cadaveric sheep cranium. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*, 105(2), 150-152. <https://doi.org/10.3171/ped.2006.105.2.150>
- Hore, S., Chakraborty, S., Chatterjee, S., Dey, N., Ashour, A.S., Van Chung, L. & Le, D.N. (2016). An integrated interactive technique for image segmentation using stack based seeded region growing and thresholding. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), 6(6). <https://doi.org/10.11591/ijece.v6i6.11801>
- Hutchinson, J.R. (2006). The evolution of locomotion in archosaurs. *Biological Reviews*, 86(1), 1–56. <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2005.09.002>
- Ianacone, D.C., Gnadt, B.J. & Isaacson, G. (2016). Ex vivo ovine model for head and neck surgical simulation. *American Journal of Otolaryngology*, 37(3), 272-278. <https://doi.org/10.1016/j.amjoto.2016.01.015>
- Ibragimov, B., Korez, R., Likar, B., Pernuš, F., Xing, L. & Vrtovec, T. (2017). Segmentation of pathological structures by landmark-assisted deformable models. *IEEE transactions on medical imaging*, 36(7), 1457-1469. <https://doi.org/10.1109/TMI.2017.2667578>
- Ibragimov, B., and Xing, L. (2017). Segmentation of organs-at-risks in head and neck CT images using convolutional neural networks. *Medical physics*, 44(2), 547-557. <https://doi.org/10.1002/mp.12045>
- Ilesanmi, A.E., Ilesanmi, T.O. & Ajayi, B.O. (2024). Reviewing 3D convolutional neural network approaches for medical image segmentation. *Heliyon*. 10, 6 e27398 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27398>
- Ioannou, S., Chockler, H., Hammers, A., King, A.P. & Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. (2022, 18 Eylül). *A study of demographic bias in CNN-based brain MR segmentation*. In International Workshop on machine learning in clinical neuroimaging (pp. 13-22), Singapore, Singapore. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17899-3_2
- İşbilir, F., and Güzel, B.C. (2023). Morphometric analysis of the mandible of ram and ewe romanov sheep (*Ovis aries*) with 3D modelling: A CT study. *Anatomia, histologia, embryologia*, 52(5), 742-751. <https://doi.org/10.1111/ahc.12932>
- Jashari, T., Duro, S., Gündemir, O., Szara, T., Ilieski, V., Mamuti, D. & Choudhary, O.P. (2022). Morphology, morphometry and some aspects of clinical anatomy in the skull and mandible of Sharri sheep. *Biologia*, 77(2), 423-433. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00955-y>
- Jayadevappa, D., Srinivas Kumar, S., & Murty, D.S. (2011). Medical image segmentation algorithms using deformable models: a review. *IETE Technical review*, 28(3), 248-255. <https://doi.org/10.4103/0256-4602.81244>
- Järnstedt, J., Sahlsten, J., Jaskari, J., Kaski, K., Mehtonen, H., Lin, Z., Hietanen, A., Sundqvist, O., Varjonen, V., Mattila, V., Prapayasotok, S. & Nalampang, S. (2022). Comparison of deep learning segmentation and multigrader-annotated mandibular canals of multicenter CBCT scans. *Scientific Reports*, 12(1), 18598. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20605-w>
- Jeanjean, M., Mureau, C., Claude, J., Balcarcel, A., & Evin, A. (2025). Two species, two stories: divergent morphometric evolution of sheep and goats over the last 8000 years. *Philosophical Transactions B*, 380(1926), 20240514. <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0514>
- Jiang, N., Jiang, Z., Huang, Y., Sun, M., Sun, X., Huan, Y. & Li, F. (2024). Application of augmented reality models of canine skull in veterinary anatomical education. *Anatomical Sciences Education*, 17(3), 546-557. <https://doi.org/10.1002/ase.2372>

- Jinga, M.R., Lee, R.B.Y., Chan, K.L., Marway, P.S., Nandapalan, K., Rhode, K., Kui, C. & Lee, M. (2023). Assessing the impact of 3D image segmentation workshops on anatomical education and image interpretation: A prospective pilot study. *Anatomical Sciences Education*, 16(6), 1024-1032. <https://doi.org/10.1002/ase.2314>
- Joffe, T.H., Tarantal, A.F., Rice, K., Leland, M., Oerke, A.K., Rodeck, C., Geary, M., Hindmarsh, P., Wells, J.C.K. & Aiello, L.C. (2005). Fetal and infant head circumference sexual dimorphism in primates. *American Journal of Physical Anthropology*, 126(1), 97-110. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20035>
- John, S.E., Lovell, T.J., Opie, N.L., Wilson, S., Scordas, T.C., Wong, Y.T., Rind, G.S., Ronayne, S., Bauquier, S.H., May, C.N., Grayden, D.B., O'Brien, T.J. & Oxley, T.J. (2017). The ovine motor cortex: a review of functional mapping and cytoarchitecture. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 80, 306-315. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.06.002>
- Joseph, M. and Singh, B. (2019). Recent advances and changing face of anatomy teaching and learning in medical education. *National Journal of Clinical Anatomy*, 8(2), 49-52. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1693843>
- Kapoor, K. (2024). 3D visualization and printing: An “Anatomical Engineering” trend revealing underlying morphology via innovation and reconstruction towards future of veterinary anatomy. *Anatomical Science International*, 99(2), 159-182. <https://doi.org/10.1007/s12565-023-00755-1>
- Karatas, O.H. and Toy, E. (2014). Three-dimensional imaging techniques: A literature review. *European journal of dentistry*, 8(01), 132-140. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.126269>
- Karsch, K., He, Q. & Duan, Y. (2009, 1-4 Kasım). *A fast, semi-automatic brain structure segmentation algorithm for magnetic resonance imaging*. [Bildiri sunumu]. In 2009 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (pp. 297-302), Washington, DC, US. IEEE. <https://doi.org/10.1109/BIBM.2009.40>
- Kaur, N., and Devendran, V. (2024). A novel framework for semi-automated system for grape leaf disease detection. *Multimedia Tools and Applications*, 83(17), 50733-50755. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-17629-3>
- Kim, J.J., Nam, H., Kaipatur, N.R., Major, P.W., Flores-Mir, C., Lagravere, M.O. & Romanyk, D.L. (2020). Reliability and accuracy of segmentation of mandibular condyles from different three-dimensional imaging modalities: a systematic review, *Dentomaxillofacial Radiology*, 49(5), 20190150. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20190150>
- Kim, S., Bae, W.C., Masuda, K., Chung, C.B. & Hwang, D. (2018). Semi-automatic segmentation of vertebral bodies in MR images of human lumbar spines. *Applied sciences*, 8(9), 1586. <https://doi.org/10.3390/app8091586>
- Knight-Sadler, J., and Fiorenza, L. (2017). Tooth wear inclination in great ape molars. *Folia Primatologica*, 88(2), 223-236. <https://doi.org/10.1159/000478775>
- Knopp, M., Bender, C.J., Holzwarth, N., Li, Y., Kempf, J., Caranovic, M., Knieling, F., Lang, W., Rother, U., Seitel, A., Maier-Hein, L. & Dreher, K.K. (2025). Shortcut learning leads to sex bias in deep learning models for photoacoustic tomography. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 20, 1325-1333. <https://doi.org/10.1007/s11548-025-03370-9>
- Koh, J.Y., Nguyen, D.T., Truong, Q.T., Yeung, S.K. & Binder, A. (2020, 23-28 Ağustos). *Sideinfnet: A deep neural network for semi-automatic semantic segmentation with side information*. [Bildiri sunumu]. In European Conference on Computer Vision (pp. 103-118), Glasgow, UK. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58586-0_7

- Kohler, J., Bielser, T., Adaszewski, S., Kuennecke, B. & Bruns, A. (2024). Deep learning applied to the segmentation of rodent brain MRI data outperforms noisy ground truth on full-fledged brain atlases. *NeuroImage*, 304, 120934. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2024.120934>
- Kolesov, I., Karasev, P., Muller, G., Chudy, K., Xerogeanes, J. & Tannenbaum, A. (2012, 7 Mart). *Human Supervisory Control Framework for Interactive Medical Image Segmentation*. [Bildiri sunumu]. In Computational Biomechanics for Medicine: Deformation and Flow (ss. 77-88), New York, NY, US. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3172-5_9
- Kumar, A. (2018, 23-24 Şubat). *A method of segmentation in 3d medical image for selection of region of interest (ROI)*. [Bildiri sunumu]. In 2018 3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU) (ss. 1-5), Bhimtal, India. IEEE. 10.1109/IoT-<https://doi.org/SIU.2018.8519916>
- Lakare, S. (2000). 3D segmentation techniques for medical volumes. Center for Visual Computing, Department of Computer Science, State University of New York, 2000(59-68), 6.
- Lamb, C.R., and David, F.H. (2012). Advanced imaging: Use and misuse. *Journal of Feline Medicine and Surgery*, 14(7), 483-497. <https://doi.org/10.1177/1098612X12451550>
- Lancelot, S., Roche, R., Slimen, A., Bouillot, C., Levigoureux, E., Langlois, J.B., Zimmer, L. & Costes, N. (2014). A multi-atlas based method for automated anatomical rat brain MRI segmentation and extraction of PET activity. *PloS one*, 9(10), e109113. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109113>
- Lau, Y.S., Xu, L., Gao, Y. & Han, R. (2018). Automated muscle histopathology analysis using CellProfiler. *Skeletal Muscle*, 8:32. <https://doi.org/10.1186/s13395-018-0178-6>
- Le, Q.A., Pham, X.L., van Walsum, T., Dao, V.H., Le, T.L., Franklin, D., Moelker, A., Le, V.H., Trung, N.L. & Luu, M.H. (2024). Precise ablation zone segmentation on CT images after liver cancer ablation using semi-automatic CNN-based segmentation. *Medical Physics*, 51(12), 8882-8899. <https://doi.org/10.1002/mp.17373>
- Lee, W.W., Richardson, I., Gow, K., Zhao, Y., & Staff, R. (2005, 4-8 Eylül). *Hybrid segmentation of the hippocampus in MR images*. [Bildiri sunumu]. In 2005 13th European Signal Processing Conference (ss. 1-4) Antalya, Türkiye. IEEE.
- Levin, E. A., Morgan, R.M., Griffin, L.D. & Jones, V.J. (2019). A comparison of thresholding methods for forensic reconstruction studies using fluorescent powder proxies for trace materials. *Journal of forensic sciences*, 64(2), 431-442. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13938>
- Li, B., Murray, A.P., Myszka, D.H. & Subsol, G. (2016). Synthesizing planar rigid-body chains for morphometric applications. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference 50169*, p. V05BT07A036. American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/DETC2016-59412>
- Li, C., Jin, D., Chen, C., Letuchy, E.M., Janz, K.F., Burns, T.L., Torner, J.C., Levy, S.M. & Saha, P.K. (2015). Automated cortical bone segmentation for multirow-detector CT imaging with validation and application to human studies. *Medical physics*, 42(8), 4553-4565. <https://doi.org/10.1118/1.4923753>
- Li, R., and Peng, Q. (2022). 3D shape segmentation: A review. *Recent Patents on Engineering*, 16(5), 19-35. <https://doi.org/10.2174/1872212115666210203152106>
- Liu, X., Song, L., Liu, S. & Zhang, Y. (2021). A review of deep-learning-based medical image segmentation methods. *Sustainability*, 13(3), 1224. <https://doi.org/10.3390/su13031224>

- Lo Giudice, A., Quinzi, V., Ronsivalle, V., Farronato, M., Nicotra, C., Indelicato, F. & Isola, G. (2020a). Evaluation of Imaging Software Accuracy for 3-Dimensional Analysis of the Mandibular Condyle. A Comparative Study Using a Surface-to-Surface Matching Technique. *Int J Environ Res Public Health*. 17(13): 4789. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134789>
- Lo Giudice, A., Ronsivalle, V., Grippaudo, C., Lucchese, A., Muraglie, S., Lagravere, M.O. & Isola, G. (2020b). One step before 3D printing-evaluation of imaging software accuracy for 3-dimensional analysis of the mandible: A comparative study using a surface-to-surface matching technique. *Materials (Basel)*. 13(12): 2798. <https://doi.org/10.3390/ma13122798>
- Lo Giudice, A., Ronsivalle, V., Gastaldi, G. & Leonardi, R. (2022). Assessment of the accuracy of imaging software for 3D rendering of the upper airway, usable in orthodontic and craniofacial clinical settings. *Progress in Orthodontics*, 23, 22. <https://doi.org/10.1186/s40510-022-00413-8>
- Luo, J., Ashton-Miller, J.A. & DeLancey, J.O. (2011). A model patient: female pelvic anatomy can be viewed in diverse 3-dimensional images with a new interactive tool. *American journal of obstetrics and gynecology*, 205(4), 391-e1. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2011.08.018>
- Makowski, C., Béland, S., Kostopoulos, P., Bhagwat, N., Devenyi, G.A., Malla, A.K., Joober, R., Lepage, M. & Chakravarty, M.M. (2018). Evaluating accuracy of striatal, pallidal, and thalamic segmentation methods: Comparing automated approaches to manual delineation. *Neuroimage*, 170, 182-198. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.02.069>
- Maleike, D., Nolden, M., Meinzer, H.P., & Wolf, I. (2009). Interactive segmentation framework of the medical imaging interaction toolkit. *Computer methods and programs in biomedicine*, 96(1), 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2009.04.004>
- Malmberg, F., Strand, R. & Nyström, I. (2011, Mayıs). *Generalized hard constraints for graph segmentation*. [Bildiri sunumu] In 17th Scandinavian Conference on Image Analysis (ss. 36-47). Ystad, Sweden. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21227-7_4
- Manuta, N., Duro, S., Szara, T., Jashari, T., Demircioğlu, İ., Avanus, K. & Büyükcinal, S.K. (2024). Skull asymmetry in various sheep breeds: Directional asymmetry and fluctuating asymmetry. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 53(3), e13047. <https://doi.org/10.1111/ahc.13047>
- Marro, A., Bandukwala, T. & Mak, W. (2016). Three-dimensional printing and medical imaging: A review of the methods and applications. *Current problems in diagnostic radiology*, 45(1), 2-9. <https://doi.org/10.1067/j.cpradiol.2015.07.009>
- Martín-Serra, A., Figueirido, B. & Palmqvist, P. (2014). A three-dimensional analysis of morphological evolution and locomotor performance of the carnivoran forelimb. *PLoS ONE*, 9(1): e85574. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085574>
- Marzanov, N.S., Devrishov, D.A., Ozerov, M.Y., Maluchenko, O.P., Marzanova, S.N., Shukurova, E.B., Koreckaya, E.A., Kantanen, J. & Petit, D. (2023). The significance of a multilocus analysis for assessing the biodiversity of the Romanov sheep breed in a comparative aspect. *Animals*, 13(8), 1320. <https://doi.org/10.3390/ani13081320>
- Masoudifard, M., Zehtabvar, O., Modarres, S.H., Pariz, F. & Tohidifar, M. (2022). CT anatomy of the head in the Ile de France sheep. *Veterinary medicine and science*, 8(4), 1694-1708. <https://doi.org/10.1002/vms3.834>
- Mayer, D., Bartz, D., Fischer, J., Ley, S., del Rio, A., Thust, S., Kauczor, H.U. & Heussel, C.P. (2004). Hybrid segmentation and virtual bronchoscopy based on CT images. *Academic Radiology*, 11(5), 551-565. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2004.01.012>

- Means, K., Voges, A. & Ritter, N.L. (2023). Students with access to 3D study materials are better able to translate spatial relationships between abdominal organs and correctly interpret abnormal radiographic images. *Veterinary Radiology & Ultrasound*, 64(3), 521-529. <https://doi.org/10.1111/vru.13217>
- Moon, H.S., Won, Y.Y., Kim, K.D., Ruprecht, A., Kim, H.J., Kook, H.K. & Chung, M.K. (2004). The three-dimensional microstructure of the trabecular bone in the mandible. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 26(6), 466-473. <https://doi.org/10.1007/s00276-004-0247-x>
- Mori, S. (2018). *Automatic Segmentation*. ISMRM. <https://cds.ismrm.org/protected/18MProceedings/PDFfiles/E1049.html>
- Mortada, M.J., Tomassini, S., Anbar, H., Morettini, M., Burattini, L. & Sbrollini, A. (2023). Segmentation of anatomical structures of the left heart from echocardiographic images using deep learning. *Diagnostics*, 13(10), 1683. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13101683>
- Mulder, L., Koolstra, J.H., de Jonge, H.W. & van Eijden, T.M. (2006). Architecture and mineralization of developing cortical and trabecular bone of the mandible. *Anatomy and embryology*, 211(1), 71-78. <https://doi.org/10.1007/s00429-005-0054-0>
- Namias, R., D'amato, J.P., Del Fresno, M., Vénere, M., Pirró, N. & Bellemare, M.E. (2016). Multi-object segmentation framework using deformable models for medical imaging analysis. *Medical & biological engineering & computing*, 54, 1181-1192. <https://doi.org/10.1007/s11517-015-1387-3>
- Naziroglu, R.E., Puylaert, C.A.J., Tielbeek, J.A.W., Makanyanga, J., Menys, A., Ponsioen, C.Y., Hatzakis, H., Taylor, S.A., Stoker, J., van Vliet, L.J. & Vos, F. M. (2017). Semi-automatic bowel wall thickness measurements on MR enterography in patients with Crohn's disease. *The British Journal of Radiology*, 90(1074), 20160654. <https://doi.org/10.1259/bjr.20160654>
- Nebril, B.A. (2011). Breast segments: a model for the prevention of deformities in conservative surgery for breast cancer. *Cirugía Española (English Edition)*, 89(9), 574-580. <https://doi.org/10.1016/j.cireng.2011.04.007>
- Nguyen, K.T., Bakeer, N., von Drygalski, A., Babyn, P., Pergantou, H., Dunn, A., Ludlin, B. & Strike, K. (2015). Point-of-care musculoskeletal ultrasound for hemophilic arthropathy: a scoping review of scanning protocols by the Imaging Expert Working Group of the International Prophylaxis Study Group. *Res Pract Thromb Haemost*, 18;9(7), 103185. <https://doi.org/10.1016/j.rpth.2025.103185>
- Niessen, W. (2008). *Model-based image segmentation for image-guided interventions. In Image-guided interventions: technology and applications* (ss. 219-239). Boston, MA: Springer US.
- Nomina Anatomica Veterinaria. Prepared by the International Committee on Veterinary Gross Anatomical Nomenclature and authorized by the general assembly of the World Association of Veterinary Anatomists, The Editorial Committee, Hannover, Germany. 2017.
- Norris, F.C., Modat, M., Cleary, J.O., Price, A.N., McCue, K., Scambler, P.J., Ourselin, S. & Lythgoe, M.F. (2013). Segmentation propagation using a 3D embryo atlas for high-throughput MRI phenotyping: Comparison and validation with manual segmentation. *Magnetic Resonance in Medicine*, 69(3), 877-883. <https://doi.org/10.1002/mrm.24306>
- Nöller, C., Henninger, W., Grönemeyer, D. & Budras, K.D. (2005). 3D-Reconstructions: New Application Fields in Modern Veterinary Anatomy. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 34, 38. https://doi.org/10.1111/j.1439-0264.2005.00669_86.x

- Nuruddin, S., Bruchhage, M., Ropstad, E., Krogenæs, A., Evans, N.P., Robinson, J.E., Endestad, T., Westlye, L.T., Madison, C., Haraldsen, I.R.H. & Sex On Brain European Research Group–SOBER. (2013). Effects of peripubertal gonadotropin-releasing hormone agonist on brain development in sheep—a magnetic resonance imaging study. *Psychoneuroendocrinology*, 38(10), 1994-2002. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2013.03.009>
- Nuzzolese, E., Randolph-Quinney, P., Randolph-Quinney, J. & Di Vella, G. (2019). Geometric morphometric analysis of sexual dimorphism in the mandible from panoramic X-ray images. *The Journal of Forensic Odonto-Stomatology*, 37(2), 35.
- Öktem, H., Şençelikel, T., Akçiçek, E., Koçyiğit, A.S., Penekli, U.S. Sungur, S., Tanrıyakul, B. & Ulusoy, B. N. (2019). Contribution of 3D modeling to anatomy education: a pilot study. *Anatomy*, 13(2), 116-121. <https://doi.org/10.2399/ana.19.054>
- Palazzo, S., Zambetta, G. & Calbi, R. (2024). An overview of segmentation techniques for CT and MRI images: Clinical implications and future directions in medical diagnostics. *Medical Imaging Process & Technology*. 7(1), 7227. <https://doi.org/10.24294/mipt7227>
- Paping, A., Ehrlich, L., Melchior, K., Ziska, T., Wippermann, W., Starke, A., Heinichen, K., Henrich, W. & Braun, T. (2024). A sustainable translational sheep model for planned cesarean delivery of contraction-free ewes. *Reproductive Sciences*, 31(3), 791-802. <https://doi.org/10.1007/s43032-023-01365-y>
- Parés-Casanova, P.M., and Domènech-Domènech, X. (2021). A comparative analysis of sphenoid bone between domestic sheep (*ovis aries*) and goat (*capra hircus*) using geometric morphometrics. *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 50(3), 556-561. <https://doi.org/10.1111/ahe.12661>
- Parmar, C., Rios Velazquez, E., Leijenaar, R., Jermoumi, M., Carvalho, S., Mak, R. H., Mitra, S., Shankar, B.U., Kikinis, R., Haibe-Kains, B., Lambin, P. & Aerts, H.J.W. (2014). Robust radiomics feature quantification using semiautomatic volumetric segmentation. *PloS one*, 9(7), e102107. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102107>
- Parveen, S.S., and Kavitha, C. (2013, 4-6 Haziran). *Detection of lung cancer nodules using automatic region growing method*. [Bildiri sunumu]. In 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT) (ss. 1-6) Tiruchengode, India. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT31661.2013>
- Petersson, H., Sinkvist, D., Wang, C. & Smedby, Ö. (2009). Web-based interactive 3D visualization as a tool for improved anatomy learning. *Anatomical sciences education*, 2(2), 61-68. <https://doi.org/10.1002/ase.76>
- Pettersson, A.F., Karlgren, K., Al-Saadi, J., Hjelmqvist, H., Meister, B., Zeberg, H. & Silén, C. (2023). How students discern anatomical structures using digital three-dimensional visualizations in anatomy education. *Anatomical sciences education*, 16(3), 452-464. <https://doi.org/10.1002/ase.2255>
- Pham, D. L., Xu, C., & Prince, J.L. (2000). Current methods in medical image segmentation. *Annual review of biomedical engineering*, 2(1), 315-337. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.2.1.315>
- Pinsky, B.M., Panicker, S., Chaudhary, N., Gemmete, J.J., Wilseck, Z.M. & Lin, L. (2023). The potential of 3D models and augmented reality in teaching cross-sectional radiology. *Medical Teacher*, 45(10), 1108-1111. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2023.2242170>
- Powell, S., Magnotta, V.A., Johnson, H., Jammalamadaka, V.K., Pierson, R. & Andreasen, N.C. (2008). Registration and machine learning-based automated segmentation of subcortical and cerebellar brain structures. *Neuroimage*, 39(1), 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.05.063>

- Preece, D., Williams, S.B., Lam, R. & Weller, R. (2013). "Let's get physical": advantages of a physical model over 3D computer models and textbooks in learning imaging anatomy. *Anatomical sciences education*, 6(4), 216-224. <https://doi.org/10.1002/ase.1345>
- Pujol, S., Baldwin, M., Nassiri, J., Kikinis, R. & Shaffer, K. (2016). Using 3D modeling techniques to enhance teaching of difficult anatomical concepts. *Academic radiology*, 23(4), 507-516. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2015.12.012>
- Puranik, M. M., and Krishnan, S. (2010, 26-27 Şubat). *Volume segmentation in medical image analysis: a survey*. [Bildiri sunumu]. In International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ss. 439-442), Mumbai Maharashtra, India. <https://doi.org/10.1145/1741906.1742003>
- Purohit, N., and Bhatt, C.P. (2025). Overview of Deep Learning Algorithms and Optimizers for Brain Tumor Segmentation. *Journal of Medical Physics*, 50(2), 185-197. https://doi.org/10.4103/jmp.jmp_12_25.
- Qiu, B., van der Wel, H., Kraeima, J., Glas, H.H., Guo, J., Borra, R.J., Witjes, M.J.H. & van Ooijen, P. M.A. (2021). Automatic segmentation of mandible from conventional methods to deep learning—a review. *Journal of personalized medicine*, 11(7), 629. <https://doi.org/10.3390/jpm11070629>
- Quinn, C.T., Rasis, A.L. & Musk, G.C. (2013). Evaluation of Masimo signal extraction technology pulse oximetry in anaesthetized pregnant sheep. *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*, 40(2), 149-156. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2995.2012.00772.x>
- Raffan, H., Guevar, J., Poyade, M., & Rea, P. M. (2017). Canine neuroanatomy: Development of a 3D reconstruction and interactive application for undergraduate veterinary education. *Plos one*, 12(2), e0168911. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168911>
- Raia P., Boggioni M., Carotenuto F., Castiglione, S., Di Febbraro, M., Di Vincenzo, F., Melchionna, M., Mandanaro, A., Papini, A., Profico, A., Serio, C., Veneziano, A., Vero, V.A., Rook, L., Meloro, C. & Manzi, G. (2018). Unexpectedly rapid evolution of mandibular shape in hominins. *Sci Rep*. 8(1):7340. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25309-8>
- Ramadan, G. M., Salem, M., Alanssari, A. I., Abdullah, M. T., & Nair, R. (2023, 20-21 Nisan). *Brain abnormality detection and analysis through tissues detection and segmentation in magnetic resonance imaging of the brain*. [Bildiri sunumu]. In 2023 International Conference on Computational Intelligence, Communication Technology and Networking (CICTN) (ss. 681–684) Ghaziabad, India. <https://doi.org/10.1109/CICTN57981.2023.10140389>
- Ramphaleng, T., Billings, B. & Hemingway, J. (2025). The effect of tooth loss on sexual dimorphism of South African mandible using geometric morphometrics. *Forensic Science International: Reports*, 11, 100421. <https://doi.org/10.1016/j.fsir.2025.100421>
- Ramzanpour, M., Jafari, B., Smith, J., Allen, J. & Hajiaghamemar, M. (2023). Comprehensive study of sex-based anatomical variations of human brain and development of sex-specific brain templates. *Brain Multiphysics*, 4, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.brain.2023.100077>
- Raudaschl, P.F., Zaffino, P., Sharp, G.C., Spadea, M.F., Chen, A., Dawant, B.M., Albrecht, T., Gass, T., Langguth, C., Lüthi, M., Jung, F., Knapp, O., Wesarg, S., Mannion-Haworth, R., Bowes, M., Ashman, A., Guillard, G., Brett, A., Vincent, G., Orbes-Arteaga, M., Cardenas-Pena, D., Castellanos-Dominguez, G., Aghdasi, N., Li, Y., Berens, A., Moe, K., Hannaford, B., Schubert, R. & Fritscher, K.D. (2017). Evaluation of segmentation methods on head and neck CT: auto-segmentation challenge 2015. *Medical physics*, 44(5), 2020-2036. <https://doi.org/10.1002/mp.12197>

- Renard, F., Guedria, S., Palma, N.D. & Vuillerme, N. (2020). Variability and reproducibility in deep learning for medical image segmentation. *Scientific Reports*, 10(1), 13724. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69920-0>
- Ritchie, S.J., Cox, S.R., Shen, X., Lombardo, M.V., Reus, L.M., Alloza, C., Harris, M.A., Alderson, H.L., Hunter, S., Neilson, E., Liewald, D.C.M., Auyeung, B., Whalley, H.C., Lawrie, S.M., Gale, C.R., Bastin, M.E., McIntosh, A.M. & Deary, I.J. (2018). Sex differences in the adult human brain: evidence from 5216 UK biobank participants. *Cerebral cortex*, 28(8), 2959-2975. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy109>
- Selig, K.R., López-Torres, S., Sargis, E.J. & Silcox, M.T. (2019). First 3D dental topographic analysis of the enamel-dentine junction in non-primate euarchontans: contribution of the enamel-dentine junction to molar morphology. *Journal of Mammalian Evolution*, 26(4), 587-598. <https://doi.org/10.1007/s10914-018-9440-2>
- Shapiro, L. (Ed.). (2024). *How to use 3D printing innovations and digital storage to democratize anatomy education (Vol. 6)*. Cape Town: Springer Nature.
- Shen, J., Sharifzadeh-Kermani, A., Tayebi, M., Kwon, E., Guild, S.J., Abbasi, H., Holdsworth, S., Talou, G.M. & Safaei, S. (2023, 24-27 Temmuz). *Atlas-free automatic segmentation of sheep brain MRI*. [Bildiri sunumu]. In 2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC) (ss. 1-4), Sidney, Avustralya. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMBC40787.2023.10340739>
- Shi, L., Lin, Q. & Su, B. (2015). Estrogen regulation of microcephaly genes and evolution of brain sexual dimorphism in primates. *BMC Evolutionary Biology*, 15(1), 127. <https://doi.org/10.1186/s12862-015-0398-x>
- Shofti, R., Zaretzki, A., Cohen, E., Engel, A. & Bar-El, Y. (2004). The sheep as a model for coronary artery bypass surgery. *Laboratory animals*, 38(2), 149-157. <https://doi.org/10.1258/002367704322968821>
- Slice, D. (2007). Geometric morphometrics in anatomy: Principles and applications. *Annual Review of Anthropology*, 36, 261-281. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.34.081804.120613>
- Somasundaram, S.K., and Alli, P. (2012). A review on recent research and implementation methodologies on medical image segmentation. *Journal of Computer Science*, 8(1), 170.
- Stan, C., Ujvary, L.P., Blebea, C.M., Vesa, D., Tănase, M.I., Tănase, M., Pop, S.S., Radeanu, D.G., Maniu, A.A. & Cosgarea, M. (2023). Sheep's head as an anatomic model for basic training in endoscopic sinus surgery. *Medicina*, 59(10), 1792. <https://doi.org/10.3390/medicina59101792>
- Standard, G. (2019, 7-9 Kasım). *Manual Segmentation Errors in Medical Imaging. Proposing a Reliable Gold Standard*. [Bildiri sunumu] In Applied Informatics: Second International Conference, ICAI 2019, (Vol. 1051, p. 230-241), Madrid, Spain. Springer Nature.
- Sundaram, V., Dharani, P., Gnanadevi, R. & Kavya, R. (2019). Studies on clinical anatomy of the maxillofacial and mandibular regions of the Madras Red sheep (*Ovis aries*) in India. *Folia Morphologica*, 78(2), 389-393. <https://doi.org/10.5603/FM.a2018.0098>
- Suñol, A., Aige, V., Morales, C., López-Beltran, M., Feliu-Pascual, A.L. & Puig, J. (2018). Use of three-dimensional printing models for veterinary medical education: impact on learning how to identify canine vertebral fractures. *Journal of veterinary medical education*, 46(4), 523-532. <https://doi.org/10.3138/jvme.0817-109r>
- Şen, M. and Uğurlu, M. (2021). Romanov koyun ırklarında dölverimi özellikleri, yaşama gücü, büyüme performansı ve bazı vücut ölçüleri. *Atatürk Üniversitesi Vet. Bil. Derg.*, 16(2): 155-163. <https://doi.org/10.17094/ataunivbd.813491>

- Tabone, W., Wilkinson, M.H., Gaalen, A.E., Georgiadis, J., & Azzopardi, G. (2019, 7-9 Ocak). *Alpha-tree segmentation of human anatomical photographic imagery*. [Bildiri sunumu]. In Proceedings of the 2nd International Conference on Applications of Intelligent Systems (. 1-6), Las Palmas de Gran Canaria, Spain. <https://doi.org/10.1145/3309772.3309776>
- Tang, T., Jiao, Y., Wang, X. & Lu, Z. (2013). Gender versus brain size effects on subcortical gray matter volumes in the human brain. *Neuroscience Letters*, 556, 79-83. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2013.09.060>
- Tingelhoff, K., Moral, A.I., Kunkel, M.E., Rilk, M., Wagner, I., Eichhorn, K.W., Wahl, F.M. & Bootz, F. (2007, 22-27 Ağustos). *Comparison between manual and semi-automatic segmentation of nasal cavity and paranasal sinuses from CT images*. [Bildiri sunumu]. In 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (ss. 5505-5508) Lyon, France. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353592>
- Todd, R. (2014). Dental imaging—2 D to 3 D: a historic, current, and future view of projection radiography. *Endodontic Topics*, 31(1), 36-52. <https://doi.org/10.1111/etp.12067>
- Travis, D.A., Sriramamo, P., Cardona, C., Ster, C.J., Kennedy, S., Sreevatsan, S. & Martaugh, M.P. (2014). One Medicine One Science: a framework for exploring challenges at the intersection of animals, humans, and the environment. *Ann. N.Y. Acad. Sci*, 1334(1) 26–44. <https://doi.org/10.1111/nyas.12601>
- Triepels, C.P., Smeets, C.F., Notten, K.J., Kruitwagen, R.F., Futterer, J.J., Vergeldt, T.F. & Van Kuijk, S.M. (2020). Does three-dimensional anatomy improve student understanding? *Clinical Anatomy*, 33(1), 25-33. <https://doi.org/10.1002/ca.23405>
- Trimpl, M.J., Boukerroui, D., Stride, E.P., Vallis, K.A. & Gooding, M.J. (2021). Interactive contouring through contextual deep learning. *Medical Physics*, 48(6), 2951-2959. <https://doi.org/10.1002/mp.14852>
- Varga-Szemes, A., Muscogiuri, G., Schoepf, U.J., Wichmann, J.L., Suranyi, P., De Cecco, C.N., Cannao, P.M., Renker, M., Mangold, S., Fox, M.A. & Ruzsics, B. (2016). Clinical feasibility of a myocardial signal intensity threshold-based semi-automated cardiac magnetic resonance segmentation method. *European radiology*, 26(5), 1503-1511. <https://doi.org/10.1007/s00330-015-3952-4>
- Vernon, T. and Peckham, D. (2002). The benefits of 3D modelling and animation in medical teaching. *Journal of Audiovisual media in Medicine*, 25(4), 142-148. <https://doi.org/10.1080/0140511021000051117>
- Vickram, A.S., Infant, S.S. & Chopra, H. (2024). AI-Powered Techniques in Anatomical Imaging: Impacts on Veterinary Diagnostics and Surgery. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger*, 258, 152355. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2024.152355>
- Vidholm, E., Golubovic, M., Nilsson, S. & Nyström, I. (2008, 17 Mart). *Accurate and reproducible semi-automatic liver segmentation using haptic interaction*. [Bildiri sunumu]. In Medical Imaging 2008: Visualization, Image-Guided Procedures, and Modeling (Vol. 6918, ss. 903-910), San Diego, CA, US. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.769864>
- Von Den Driesch, A. (1976). *A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites* (Vol. 1). Peabody museum press.

- Wacan, R.W., Romero, L.A., Ardiente, P.J., Velasco, L.C., Shanmugam, M. & Aliac, C.J. (2025, 22 Ocak). *Automated Mandible Segmentation from Computed Tomography Scans Using U-Net and U-Net Transformer*. In *Current and Future Trends on AI Applications: Volume 1* (ss. 89-105). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75091-5_6
- Wagenknecht, G., Belitz, H., Wolff, R. & Castellanos, J. (2006). Segmentation of ROIs/VOIs from small animal images for functional analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 569(2), 481-487. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.08.126>
- Wallner, J., Hohegger, K., Chen, X., Mischak, I., Reinbacher, K., Pau, M., Zrnc, T., Schwenzer-Zimmerer, K., Zemmann, W., Schmalstieg, D. & Egger, J. (2018). Clinical evaluation of semi-automatic open-source algorithmic software segmentation of the mandibular bone: Practical feasibility and assessment of a new course of action. *PLoS One*, 13(5), e0196378. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196378>
- Wang, G., Zuluaga, M.A., Li, W., Pratt, R., Patel, P.A., Aertsen, M., Doel, T., David, A.L., Deprest, J., Ourselin, S. & Vercauteren, T. (2018 a). DeepIGeoS: A deep interactive geodesic framework for medical image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(7), 1559–1572. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.00652>
- Wang, J.Y., Ngo, M.M., Hessel, D., Hagerman, R.J. & Rivera, S.M. (2016). Robust machine learning-based correction on automatic segmentation of the cerebellum and brainstem. *PLoS One*, 11(5), e0156123. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156123>
- Wang, L., Tan, J., Ge, Y., Tao, X., Cui, Z., Fei, Z., Lu, J., Zhang, H. & Pan, Z. (2021). Assessment of liver metastases radiomic feature reproducibility with deep-learning-based semi-automatic segmentation software. *Acta Radiologica*, 62(3), 291-301. <https://doi.org/10.1177/0284185120922822>
- Wang, X., Fang, C., Xia, Y. & Feng, D. (2011). Airway segmentation for low-contrast CT images from combined PET/CT scanners based on airway modelling and seed prediction. *Biomedical Signal Processing and Control*, 6(1), 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2010.05.002>
- Wang, Y., Meng, Q., Qi, Q., Yang, J. & Liu, Y. (2018b). Region merging considering within-and between-segment heterogeneity: An improved hybrid remote-sensing image segmentation method. *Remote Sensing*, 10(5), 781. <https://doi.org/10.3390/rs10050781>
- Wasserthal, J., Breit, H.C., Meyer, M.T., Pradella, M., Hinck, D., Sauter, A.W., Heye, T., Boll, D.T., Cyriac, J., Yang, S., Bach, M. & Segeroth, M. (2023). TotalSegmentator: robust segmentation of 104 anatomic structures in CT images. *Radiology: Artificial Intelligence*, 5(5), e230024. <https://doi.org/10.1148/ryai.230024>
- Whymys, B.J., Vorperian, H.K., Gentry, L.R., Schimek, E.M., Bersu, E.T. & Chung, M.K. (2013). The effect of computed tomographic scanner parameters and 3-dimensional volume rendering techniques on the accuracy of linear, angular, and volumetric measurements of the mandible. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology and oral radiology*, 115(5), 682-691. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2013.02.008>
- Withey, D.J., and Koles, Z.J. (2008). A review of medical image segmentation: methods and available software. *International Journal of Bioelectromagnetism*, 10(3), 125-148.
- Wu, B., Gu, Z., Zhang, W., Fu, Q., Zeng, M. & Li, A. (2023). Investigator accuracy: A center-weighted metric for evaluating the location accuracy of image segments in land cover classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103402. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103402>

- Wu, Q., and Castleman, K.R. (2023). *Image segmentation. In Microscope image processing* (ss. 119-152). Straive, India: Academic Press.
- Xiong, X., and Cribben, I. (2023). The state of play of reproducibility in statistics: an empirical analysis. *The American Statistician*, 77(2), 115-126. <https://doi.org/10.1080/00031305.2022.2131625>
- Xu, J., Liu, J., Zhang, D., Zhou, Z., Jiang, X., Zhang, C. & Chen, X. (2021). Automatic mandible segmentation from CT image using 3D fully convolutional neural network based on DenseASPP and attention gates. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 16(10), 1785-1794. <https://doi.org/10.1007/s11548-021-02447-5>
- Xu, Y., Quan, R., Xu, W., Huang, Y., Chen, X. & Liu, F. (2024). Advances in medical image segmentation: a comprehensive review of traditional, deep learning and hybrid approaches. *Bioengineering*, 11(10), 1034. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11101034>
- Ye, Z., Dun, A., Jiang, H., Nie, C., Zhao, S., Wang, T. & Zhai, J. (2020). The role of 3D printed models in the teaching of human anatomy: a systematic review and meta-analysis. *BMC medical education*, 20, 1-9. <https://doi.org/10.1186/s12909-020-02242-x>
- Yoon, S.M., and Kuijper, A. (2010, 21-23 Haziran). *3D human action recognition using model segmentation*. [Bildiri sunumu]. In International Conference Image Analysis and Recognition (ss. 189-199), Póvoa de Varzin, Portugal. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13772-3_20
- Yuen, J. (2020). What is the role of 3D printing in undergraduate anatomy education? A scoping review of current literature and recommendations. *Medical Science Educator*, 30, 1321-1329. <https://doi.org/10.1007/s40670-020-00990-5>
- Yurdakurban, E., Süküt, Y. & Duran, G.S. (2025). Assessment of deep learning technique for fully automated mandibular segmentation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 167(2), 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2024.09.006>
- Zaidi, H. and Xu, X.G. (2007). Computational anthropomorphic models of the human anatomy: the path to realistic Monte Carlo modeling in radiological sciences. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 9(1), 471-500. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.9.060906.151934>
- Zakani, F. R., Arhid, K., Bouksim, M., Gadi, T. & Aboulfatah, M. (2016). *Kulczynski similarity index for objective evaluation of mesh segmentation algorithms*. [Bildiri sunumu]. In 2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) (ss. 12-17). Marakech, Morocco. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMCS.2016.7905611>
- Zhao, F., and Xie, X. (2013). An overview of interactive medical image segmentation. *Annals of the BMVA*, 2013(7), 1-22.
- Zhonghua, S. (2018). 3D printing in medicine: Current applications and future directions. *Quant Imaging Med Surg*. 8(11), 1069-1077. <https://doi.org/10.21037/qims.2018.12.06>
- Zhou, L., Fan, M., Hansen, C., Johnson, C. R. & Weiskopf, D. (2022). A Review of Three-Dimensional Medical Image Visualization. *Health data science*, 2022, 9840519. <https://doi.org/10.34133/2022/9840519>
- Zhou, W. and Xie, Y. (2013). Interactive medical image segmentation using snake and multiscale curve editing. *Computational and mathematical methods in medicine*, 2013(1), 325903. <https://doi.org/10.1155/2013/325903>

- Zhou, Y., Xie, L., Fishman, E.K. & Yuille, A.L. (2017, 11-13 Eylül). *Deep supervision for pancreatic cyst segmentation in abdominal CT scans*. [Bildiri sunumu]. In International conference on medical image computing and computer-assisted intervention (ss. 222-230), Quebec City, QC, Canada. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66179-26>
- Zhou, Z., Siddiquee, M.M.R., Tajbakhsh, N. & Liang, J. (2018, 20 Eylül). *UNet++: A nested U-Net architecture for medical image segmentation*. [Bildiri sunumu]. In Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support (ss. 3–11), Granada, İspanya. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00889-5_1
- Zoghbi, J.M., Mamede, M.H. & Jackowski, M.P. (2010, 8-9 Kasım). *Computer-assisted segmentation of brain tumor lesions from multi-sequence Magnetic Resonance Imaging using the Mumford-Shah model*. [Bildirisunumu]. In 2010 25th International Conference of Image and Vision Computing New Zealand (ss. 1-6) Queenstown, New Zealand. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IVCNZ.2010.6148803>
- Zwettler, G. and Backfrieder, W. (2015, 26-27 Şubat). *Evolution strategy classification utilizing meta features and domain-specific statistical a priori models for fully-automated and entire segmentation of medical datasets in 3D radiology*. [Bildiri sunumu]. In 2015 International Conference on Computing and Communications Technologies (ICCCT) (ss.12-18) Chennai, India. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCT2.2015.7292712>

EKLER

Ek-1. Ankara Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu Karar Örneği

ANKARA ÜNİVERSİTESİ HAYVAN DENEYLERİ YEREL ETİK KURULU KARAR ÖRNEĞİ

TOPLANTI TARİHİ : 27/12/2023
TOPLANTI NO : 2023-23
DOSYA NO : 2023-154
KARAR NO : 2023-22-204

Yürütücülüğünü Üniversitemiz Veteriner Fakültesi, Anatomi Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Doç. Dr. Çaner BAKICI' nın yaptığı, araştırmacı olarak Vet. Hek. Muharrem AYVALI' nın katıldığı "Farklı Segmentasyon Metodları ile Koyun Kafa Bölgesinde Yer Alan Anatomi Yapıların Morfometrik ve Volumetrik Verilerinin Değerlendirilmesi" başlıklı çalışma Üniversite senatosunun 12/2/2016 tarihli toplantısında 430/3642 sayılı kararı ile kabul edilen ve Hayvan Deneyleri Merkezi Etik Kurulu'nun 19/2/2016 tarih ve 42 sayılı kararı ile onaylanan "Ankara Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu Yönergesi" nin 7 (h) maddesi kapsamında değerlendirilmiş ve çalışmanın Etik Kurul iznine tabi olmadığına oy birliği ile karar verilmiştir.

Geçerlilik Süresi : 15/01/2024-15/01/2025

ASLININ AYNIDIR
27/12/2023

Prof. Dr. M. Taner KARAOĞLU
A.Ü. HADYЕК Başkanı



T.C.
ANKARA ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu

HAYVAN DENEYLERİ YEREL ETİK KURULU KARARI

TOPLANTI TARİHİ : 27/12/2023
TOPLANTI NO : 2023-23
DOSYA NO : 2023-154
KARAR NO : 2023-22-204

Yürütücülüğünü Üniversitemiz Veteriner Fakültesi, Anatomi Anabilim Dalı öğretim üyelerinden Doç. Dr. Çanır BAKICI' nın yaptığı, araştırmacı olarak Vet. Hek. Muharrem AYVALI' nın katıldığı "Farklı Segmentasyon Metodları ile Koyun Kafa Bölgesinde Yer Alan Anatomik Yapıların Morfometrik ve Volumetrik Verilerinin Değerlendirilmesi" başlıklı çalışma Üniversite senatosunun 12/2/2016 tarihli toplantısında 430/3642 sayılı kararı ile kabul edilen ve Hayvan Deneyleri Merkezi Etik Kurulu'nun 19/2/2016 tarih ve 42 sayılı kararı ile onaylanan "Ankara Üniversitesi Hayvan Deneyleri Yerel Etik Kurulu Yönergesi" nin 7 (h) maddesi kapsamında değerlendirilmiş ve çalışmanın Etik Kurul iznine tabi olmadığına oy birliği ile karar verilmiştir.

Geçerlilik Süresi : 15/01/2024-15/01/2025

ETİK KURUL ÜYELERİ				
Unvanı / Adı / Soyadı	Uzmanlık Dalı	Kurumu	Cinsiyeti	İmza
Prof. Dr. M. Taner KARAOĞLU (Başkan)	Viroloji Anabilim Dalı	Veteriner Fakültesi	E	
Prof. Dr. Tanju ÖZÇELİKAY (Başkan Vekili)	Farmakoloji Anabilim Dalı	Eczacılık Fakültesi	E	
Prof. Dr. Emine DEMİREL YILMAZ (Üye)	Tıbbi Farmakoloji Anabilim Dalı	Tıp Fakültesi	K	
Prof. Dr. Nuri YİĞİT (Üye)	Zooloji Anabilim Dalı	Fen Fakültesi	E	
Prof. Dr. Mine KIRKAĞAÇ (Üye)	Su Ürünleri Mühendisliği Bölümü	Ziraat Fakültesi	K	
Prof. Dr. Halit KANCA (Üye)	Doğum ve Jinekoloji Anabilim Dalı	Veteriner Fakültesi	E	
Prof. Dr. Gülnur GÖLLÜ BAHADIR (Üye)	Çocuk Cerrahisi Anabilim Dalı	Tıp Fakültesi	K	

Doç. Dr. Neşe Nuray TOPRAK (Üye)	Yemler ve Hayvan Besleme Anabilim Dalı	Ziraat Fakültesi	K
Doç. Dr. Nigâr YERLİKAYA (Üye)	Veteriner Hekimliği Tarihi ve Deontoloji Anabilim Dalı	Veteriner Fakültesi	K
Dr. Vet. Hek. Gürbüz ERTÜRK (Üye)	Active Veteriner Sağlık Merkezi	Serbest	E
Uzm. Vet. Hek. Hüseyin DEDE (Üye)	Veteriner Hekimler Derneği	Serbest	E
Uzm. Vet. Hek. Attila İŞGÖREN (Üye)	Deney Hayvanları Yetiştirme ve Araştırma Laboratuvarı	Tıp Fakültesi	E
Fatma Aysun COŞKUN (Üye)	İktisat	Serbest	K