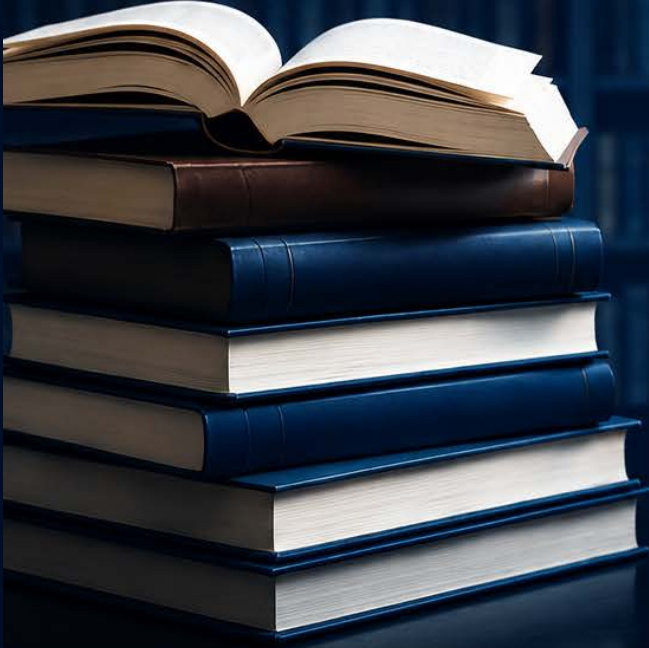


ANATOMİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Canan ERTEMOĞLU ÖKSÜZ



yaz
yayınları

Anatomi Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Canan ERTEMÖĞLU ÖKSÜZ

yaz
yayınları

2026

**Anatomi Alanında Güncel Konular ve
Akademik Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Canan ERTEMOĞLU ÖKSÜZ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5450-01-2

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Morphological and Metric Indicators of Sex in the Axial Skeleton of the Turkish Population	1
<i>Beyza ÇELİK, Seda DERTEL MEYVACI</i>	
Karpal Tünel Bölgesi ve N. Medianus Anatomisi	36
<i>Şeyma Kevser YILMAZ</i>	
Tıbbi Görüntülerde Nicel Anatomik Analiz: Anatomik Landmarklar, Morfometri ve Morphomics.....	52
<i>Emrah ALTUNTAŞ</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

MORPHOLOGICAL AND METRIC INDICATORS OF SEX IN THE AXIAL SKELETON OF THE TURKISH POPULATION

Beyza CELİK¹

Seda SERTEL MEYVACI²

1. INTRODUCTION

The construction of a biological profile is a fundamental step in the identification of unknown human remains in forensic anthropology. Within this profile, which encompasses sex, age, stature, and population characteristics, sex estimation is a priority because it narrows the range of potential identities and informs the selection of certain age and stature estimation methods (Krishan et al., 2016; Spradley, 2016). Sex estimation from skeletal remains relies on sexual dimorphism in bone size, shape, robusticity, articular surfaces, and muscle attachment sites. These differences, shaped by hormonal, genetic, developmental, and biomechanical factors, are influenced by nutrition, physical activity, environmental conditions, and secular changes (Spradley, 2016; Mello-Gentil & Souza-Mello, 2021). Consequently, applying methods developed in one population to another may reduce classification accuracy, highlighting the need for population-specific reference data (Hora & Sládek, 2018).

The axial skeleton, comprising the cranium, vertebral column, sternum, ribs, and hyoid bone, provides numerous

¹ PhD Student, Bolu Abant İzzet Baysal University, Faculty of Medicine, Department of Anatomy, ORCID: 0000-0003-4401-8678.

² Assoc. Prof. Dr., Bolu Abant İzzet Baysal University, Faculty of Medicine, Department of Anatomy, ORCID: 0000-0002-9450-145X.

anatomical structures for sex estimation. The dimensions, articular surfaces, anatomical projections, and muscle and ligament attachment sites of these structures can be assessed using morphological and morphometric methods (Krishan et al., 2016; Mello-Gentil & Souza-Mello, 2021; Wang et al., 2024). The cranium is frequently used, particularly when the pelvis is unavailable or inadequately preserved (Spradley & Jantz, 2011; Franklin et al., 2013). The glabella, supraorbital margin, mastoid process, nuchal crest, and external occipital protuberance are prominent features in morphological assessment. Cranial length and breadth, bizygomatic breadth, cranial base and orbital measurements, and facial height are used to develop population-specific classification models (Franklin et al., 2013; Čechová et al., 2019; Cappella et al., 2022; Braun et al., 2024).

Other axial skeletal elements also contribute to sex estimation. High accuracy rates have been reported across different populations using linear measurements of the cervical and thoracic vertebrae (Rozendaal et al., 2020; Garoufi et al., 2020; Rohmani et al., 2021; Sakaran et al., 2023). Measurements of the manubrium and sternal body, rib head and neck, and hyoid body and greater horns can also be used to distinguish between the sexes (Kindschuh et al., 2010; Bedalov et al., 2019; Kalbouneh et al., 2021; Partido Navadijo et al., 2021). This chapter reviews studies on sex estimation from axial skeletal elements in the Turkish population in light of the current literature and summarizes the role of morphological and morphometric approaches in forensic anthropology.

2. SEX ESTIMATION FROM THE AXIAL SKELETON

2.1. Vertebral Column

The vertebral column provides an important alternative for sex estimation when the pelvis and cranium are absent or damaged. Vertebral mechanical strength favors preservation in archaeological and forensic contexts (Krishan et al., 2016; Rohmani et al., 2021). Ekizoglu et al. assessed 20 linear morphometric parameters per vertebra using three-dimensional C1–C7 models derived from computed tomography (CT) images of 294 adults. All parameters differed significantly between sexes, with model accuracies of 83.3–91.4%. Combining parameters from different cervical vertebrae improved classification accuracy (Ekizoglu et al., 2021). A study comparing four classification algorithms assessed 22 atlas measurements on cone-beam computed tomography (CBCT) images of 145 females and 145 males. Twenty measurements differed significantly between sexes ($p < 0.05$). Artificial neural networks achieved the highest accuracy (91.3%), followed by logistic regression (90.9%), supporting the use of atlas morphometry with machine learning for sex estimation (Sertel Meyvaci et al., 2024).

Sertel Meyvaci et al. evaluated 22 atlas parameters and 57 derived ratios on CBCT images of 359 individuals (180 males, 179 females). Only two ratios did not differ significantly from the golden ratio. This study provides reference data on atlas proportions in the Turkish population (Sertel Meyvaci et al., 2026). Harmandaoglu et al. analyzed computed tomography (CT)-derived dens height, anteroposterior and anterosuperior lengths, and angular parameters of the axis (C2) using machine learning algorithms. Dens morphometry contributed to sex estimation, while combining angular and linear measurements could improve performance (Harmandaoglu et al., 2025).

Secgin et al. examined C7 using geometric morphometrics on CT images of 150 females and 150 males. Following generalized Procrustes and principal component analyses of anatomical landmarks, linear discriminant analysis achieved 83.33% overall accuracy, supporting C7 shape analysis for sex estimation (Secgin et al., 2025). Karabag et al. assessed linear measurements, indices, and volumetric features of C7 on CT images. In multivariable logistic regression, the model based on direct morphometric measurements achieved 87.7% accuracy, outperforming index- and volume-based models (Karabag et al., 2025). For lumbar vertebrae, Bozdog and Karaman examined linear measurements of the vertebral body, foramen, and processes on three-dimensional L1 models from 241 adults. Most measurements differed significantly between sexes, with discriminant function analysis achieving a maximum accuracy of 72.6%. L1 was considered a complementary option, particularly for fragmented remains (Bozdog & Karaman, 2021). Ayturk et al. evaluated eight L4 and L5 morphometric parameters using eight machine learning algorithms on retrospective CT images of 540 individuals aged 18–79 years. Logistic regression achieved the highest accuracy: 91.3% for L4 and 90.7% for L5. Anterior vertebral body height and anteroposterior diameter were the most discriminative parameters for both vertebrae (Ayturk et al., 2026). Etli et al. analyzed CT measurements of the sacrum and coccyx using discriminant analysis and artificial neural networks in an age- and sex-balanced sample. Both methods performed well, with neural networks achieving higher classification performance. These findings support the contribution of the sacrum and coccyx to sex estimation when pelvic integrity is compromised (Etli et al., 2019).

2.2. Sternum

The sternum, located in the anterior thoracic wall, exhibits marked sexual dimorphism. Manubrial and sternal body

measurements rely on readily identifiable landmarks, supporting their use in direct skeletal examinations and CT-based virtual anthropology. Uysal Ramadan et al. examined manubrial length and width, sternal body length, sternal widths, and fourth rib width on thoracic CT images of 340 adults. Combined assessment of the sternum and fourth rib contributed to sex estimation (Uysal Ramadan et al., 2010). Ekizoglu et al. assessed manubrial and sternal body lengths and widths on multidetector CT images. Measurements were generally greater in males, with combined sternal length performing best in univariate analyses. Multivariable discriminant functions correctly classified 86.1% of females and 83.8% of males, whereas the sternal index showed limited discriminatory power (Ekizoglu et al., 2014). Bolatlı et al. examined sternal morphometry and morphology on multidetector CT images of 700 individuals. Sternal measurements differed between sexes, while xiphoid process shape and manubriosternal fusion varied with age and sex (Bolatlı et al., 2020). Kosar et al. assessed manubrial and sternal body measurements on multidetector CT images of 237 adults (113 males, 124 females). All morphometric parameters were significantly greater in males. Combined and total sternal lengths each achieved approximately 85% accuracy. Sternal measurements also supported stature estimation but performed better in sex discrimination (Kosar et al., 2022). Bakan et al. evaluated manubrial and sternal body measurements, combined length, sternal index, and sternal area on CT images of 485 adults. Measurements were analyzed using machine learning algorithms, while sagittal and coronal images were processed by a deep neural network. Model accuracies ranged from approximately 85% to 95%, with linear discriminant analysis performing best and the image-based deep neural network performing worst (Bakan et al., 2025). Atesoglu et al. examined 20 variables, including sternal lengths, widths, thicknesses, angles, and indices, on multidetector CT images of 103 females and 97 males. Manubrial, sternal body, and total

sternal lengths were significantly greater in males, with total length providing more reliable sex discrimination. Hyrtl's law and the sternal index showed insufficient discriminatory power. Variations included sternal foramina (3.5%) and sternal clefts (0.5%) (Atesoglu et al., 2018).

2.3. Ribs

Cologlu et al. conducted one of the first comprehensive studies on rib-based sex estimation in the Turkish population. They assessed the sternal ends of fourth ribs obtained at autopsy and developed age-specific discriminant functions using superoinferior height and anteroposterior width. Superoinferior height showed the greatest sexual dimorphism, while combining both measurements yielded approximately 86–90% accuracy (Cologlu et al., 1998). Kocak et al. examined 251 right fourth ribs from 78 females and 173 males autopsied in Izmir. Sternal-end superoinferior height and anteroposterior width were measured and analyzed using age-specific discriminant functions. Height alone was the strongest discriminator in younger individuals, whereas combining height and width improved classification in older individuals (Kocak et al., 2003). Uysal Ramadan et al. assessed five sternal measurements and bilateral fourth-rib sternal-end widths on multislice thoracic CT images of 340 adults (143 females, 197 males). Left fourth-rib width had greater discriminatory power than right-sided width. Combined sternal length, sternal area, and fourth-rib width each achieved over 80% accuracy. Combining sternal area with left fourth-rib width yielded the highest accuracy (88.2%) (Uysal Ramadan et al., 2010). Further studies incorporating different rib levels, three-dimensional morphometry, and artificial intelligence may provide more comprehensive reference data for the Turkish population.

2.4. Hyoid Bone

Despite its small size and lack of direct articulation with other bones, the hyoid exhibits sexual dimorphism. Body width, greater horn length, total width, and ossification may contribute to sex estimation (Kindschuh et al., 2010). Balseven-Odabasi et al. obtained 33 digital measurements from photographs of hyoid bones from 85 cadavers of known age and sex and assessed fusion between the body and greater horns. Discriminant classification accuracy ranged from approximately 77.4% to 81.3%, depending on the variables used, with some models reaching 87% overall accuracy. Hyoid dimensions supported sex estimation, whereas fusion was more closely associated with age (Balseven-Odabasi et al., 2013). Kose and Goller Bulut examined eight hyoid measurements and body–greater horn fusion on cone-beam CT images of 130 individuals. Total length and certain greater horn tip widths differed significantly between sexes. Dimensions supported sex estimation, while fusion was particularly useful for age assessment. The study demonstrated that hyoid assessment was feasible on CBCT images without dry bone specimens (Kose & Goller Bulut, 2022). Demet Mutlu et al. evaluated eight commonly used hyoid measurements on three-dimensional CT images of 240 adults. Classification used discriminant function analysis, support vector machines, and artificial neural networks. Support vector machines achieved the highest accuracy, reaching 94.2% in males, supporting hyoid morphometry for machine learning-based sex estimation (Demet Mutlu et al., 2024). Keven et al. examined neck CT images of 51 individuals aged 19–29 years (29 males, 22 females). Measurements included body length and width, greater horn length, upper and lower tip widths and heights, and intercornual distance. Greater horn length, lower tip width and height, body dimensions, and intercornual distance were significantly greater in males. Upper tip width and height showed no significant sex differences (Keven et al., 2024).

Other morphological and anatomical studies in the Turkish population also report sex-related differences in hyoid shape and dimensions (Kopuz & Ortug, 2016; Dursun et al., 2021; Nteli Chatzioglou et al., 2023). Overall, total hyoid width and length, body dimensions, greater horn length, and intercornual distance are prominent parameters for sex estimation in the Turkish population. Support vector machines and artificial neural networks applied to three-dimensional CT measurements have improved classification performance (Balseven-Odabasi et al., 2013; Demet Mutlu et al., 2024).

3. SEX ESTIMATION FROM THE CRANIUM

Craniofacial sex estimation uses both linear measurements and angular relationships between anatomical landmarks and planes. Celik et al. evaluated ten angles defined between the Frankfort horizontal plane and craniofacial landmarks on cranial CT images of 218 individuals (109 females, 109 males). MARS and multivariable logistic regression achieved classification accuracies of 94.95% and 93.1%, respectively. These findings support craniofacial angles referenced to the Frankfort horizontal plane as a complementary approach to sex estimation (Celik et al., 2026).

3.1. Frontal Bone

The frontal bone is frequently assessed for cranial sex estimation, particularly through frontal sinus morphometry and glabellar and supraorbital morphology. Most studies in the Turkish population have focused on linear and volumetric frontal sinus measurements. Using paranasal CT images, Tatlisumak et al. demonstrated that frontal sinus dimensions vary with age and sex (Tatlisumak et al., 2017). CBCT studies similarly reported greater bilateral sinus widths, depths, and total width in males (Turk et al., 2019). Comparing Turkish and Dutch samples,

Boyacioglu et al. found that right frontal sinus volume significantly discriminated sex in the Turkish population (Boyacioglu et al., 2020). Studies assessing frontal and maxillary sinuses together also supported bilateral sinus height, width, and anteroposterior diameter for sex estimation (Durum Polat et al., 2020). CBCT examinations of archaeological skulls identified frontal sinus volume as a potential discriminator in historical populations (Demiralp et al., 2019). Plain skull radiographs showed greater frontal sinus height and width in males, although discrimination was more limited than with cross-sectional imaging (Emekli, 2023). Recent studies combining frontal sinus and mandibular measurements also reported significantly greater sinus height, width, depth, and volume in males (Kalkan & Kalkan, 2026). The glabella and supraorbital margin are the most frequently assessed frontal morphological features. The glabella shows marked sexual dimorphism and improves sex estimation when combined with other cranial features (Yasar & Sagir, 2023). A study using three-dimensional CBCT reconstructions likewise identified the glabella as a strong discriminator, while the supraorbital margin contributed less (Apaydin & Icoz, 2025).

Overall, frontal sinus dimensions and volume and glabellar prominence appear to be reliable indicators, whereas the discriminatory power of features such as the supraorbital margin varies across studies.

3.2. Occipital Bone

The foramen magnum is the most extensively studied occipital structure, with length, width, area, and perimeter commonly used for sex discrimination. Three-dimensional CT studies reported significantly greater anteroposterior and transverse diameters, area, and perimeter in males, supporting their use in sex estimation (Uysal et al., 2005). CBCT assessments also identified discriminatory foramen magnum parameters, with

substantially improved classification when combined with mandibular measurements (Ilguy et al., 2014). Other CT-based studies in Turkish adults similarly found greater measurements in males and supported their use in discriminant models (Meral et al., 2020). More recently, artificial intelligence models have supplemented conventional statistical methods. Kartal et al. compared discriminant analysis and artificial neural networks using foramen magnum measurements. Neural networks achieved higher classification performance, supporting machine learning analysis of these morphometric data (Kartal et al., 2022).

Beyond the foramen magnum, other posterior cranial fossa openings may inform sex estimation. A recent study assessed anteroposterior and transverse diameters of the foramen magnum, jugular foramen, and internal acoustic opening, along with distances between them. Several transverse measurements showed marked sexual dimorphism (Depreli et al., 2025).

Overall, Turkish studies of the occipital bone predominantly focus on foramen magnum morphometry. Linear and area measurements are generally greater in males, but classification based on these alone remains moderate. Multiparameter models incorporating other posterior cranial fossa openings or mandibular measurements provide more reliable sex estimation.

3.3. Sphenoid Bone

In the Turkish population, the sphenoid bone has mainly been assessed through sinus morphometry, reflecting its central skull-base location and associated sinus. Studies indicate sex differences in sphenoid sinus volume and linear dimensions.

CT and CBCT studies reported greater sphenoid sinus volumes in males, with total and right-sided volumes among the strongest discriminators (Kaplanoglu et al., 2013; Koc, 2020). Recent research supports these findings, reporting greater

volumes and more pronounced shape features in males (Gurlek Celik & Akman, 2024; Keles et al., 2024). However, associations between sex and anatomical variations, including pneumatization patterns and clival extension, have been inconsistent (Ozeren Keskek & Aytugur, 2021). Overall, assessment focuses on sphenoid sinus volume and morphology rather than direct bone morphometry. These parameters have limited utility alone but contribute more when combined with other cranial and paranasal sinus measurements.

3.4. Ethmoid Bone

Given its complex relationships with the orbit, nasal cavity, and anterior skull base, the ethmoid bone has mainly been studied for anatomical variations in the Turkish population. Most research addresses ethmoid cell variations and paranasal sinus anatomy rather than sex estimation. CT and CBCT studies assessed variations involving agger nasi cells, ethmoid bullae, and Haller and Onodi cells, reporting possible associations with age or sex (Borahan et al., 2019; Bora et al., 2021). A comparative study including Turkish Cypriots identified agger nasi cells, concha bullosa, and supraorbital ethmoid cells as the most frequent variations (Gruszka et al., 2022). Current evidence suggests limited discriminatory power for the ethmoid bone alone. Nevertheless, it remains a complementary component of craniofacial morphometry when assessed alongside the orbit, nasal cavity, and other paranasal sinuses.

3.5. Mandible

The mandible is among the most frequently studied facial bones for sex estimation. Its robust structure, prominent muscle attachments, and accessibility on radiological images support its widespread forensic use. Turkish studies primarily assess the ramus, condylar and coronoid processes, gonial and antegonial angles, body dimensions, and transverse widths. The ramus is

among the most reliable regions for sex estimation. Three-dimensional CT, multidetector CT, and CBCT studies reported significantly greater linear measurements in males, particularly ramus height and width (Inci et al., 2016; Acar et al., 2017; Okkesim & Sezen Erhamza, 2020). Body length and height and bicondylar and bigonial widths also show marked sexual dimorphism (Acar et al., 2017; Icoz & Akgunlu, 2019; Celebi et al., 2025). Angular measurements have yielded less consistent findings. Gonial and antegonial angles were generally greater in females, although some studies found no significant differences (Direk et al., 2018; Apaydin et al., 2018; Sapanci et al., 2019). Nevertheless, angles defined by condylion, gonion, and gnathion, together with condylar and coronoid measurements, contributed substantially to sex discrimination (Meyvaci et al., 2021; Dogan et al., 2025). Recent CT and CBCT studies also reported greater condylar and coronoid lengths, symphyseal height, and sigmoid notch depth in males (Celebi et al., 2025; Dogan et al., 2025). A CT-based study in the Eastern Anatolian Turkish population likewise reported high classification accuracy using linear mandibular measurements (Mutlu et al., 2025).

Overall, ramus height and width, condylar and coronoid lengths, and bigonial and bicondylar widths are the strongest mandibular sex indicators in the Turkish population. Models combining multiple linear and angular variables provide more reliable estimates than individual measurements.

3.6. Maxilla and Maxillofacial Measurements

Studies of maxillary and maxillofacial sex estimation in the Turkish population primarily focus on maxillary sinus morphometry. Hard palate dimensions and other linear maxillofacial measurements also inform sexual dimorphism assessment. Sinus height, width, depth, and volume are the most frequently examined parameters. CT and CBCT studies generally

report greater dimensions in males, supporting their supplementary role in sex estimation (Teke et al., 2007; Ekizoglu et al., 2014). Three-dimensional analyses likewise show greater sinus volumes in males (Aktuna Belgin et al., 2019; Dogan & Uluisik, 2024). However, some Turkish subpopulations show no significant association between sinus volume and sex, suggesting that biological variation may influence findings (Gulec et al., 2020). Recent studies support sinus height and width for sex discrimination but emphasize their insufficient accuracy alone (Simsek et al., 2021; Kolak et al., 2024). The hard palate has also been investigated. CBCT studies report greater palatal length and width in males, whereas parameters such as the palatal index show no marked sex differences (Kaplanoglu et al., 2022). Morphological and morphometric studies also identify age- and sex-related changes, supporting the palate as a supplementary structure in maxillofacial assessment (Akkitap, 2025).

Overall, maxillary sinus dimensions and volume and palatal length and width are the leading sex indicators in this region. Given inconsistent findings, combining them with mandibular and other craniofacial measurements provides more reliable estimates.

3.7. Zygomatic Bone and Arch

In the Turkish population, the zygomatic region is primarily assessed through bizygomatic breadth, the distance between the most lateral points of the bilateral zygomatic arches. Reflecting transverse facial size, it is considered a reliable indicator of craniofacial sexual dimorphism. CT, multidetector CT, and direct anthropometric studies report significantly greater bizygomatic breadth in males (Ekizoglu et al., 2016; Meral et al., 2022). Multiplanar CT studies also show high discriminatory power when combined with biorbital breadth and other craniometric measurements (Kalkan et al., 2025). Direct

cephalometric studies similarly identify marked sexual dimorphism, with the highest accuracy achieved by models combining multiple head and facial measurements (Alkan, 2025).

Overall, bizygomatic breadth is a practical, reliable parameter for sex estimation, particularly when combined with other craniofacial measurements.

3.8. Orbital Region

Studies of the orbital region in the Turkish population focus on orbital width, height, index, biorbital and interorbital breadths, and orbital volume. CT and multidetector CT studies generally report greater orbital width and height and biorbital and interorbital breadths in males. Conversely, the orbital index usually shows no significant sex differences (Kaplanoglu et al., 2014; Kaya et al., 2014). Studies jointly assessing the orbital aperture, globe, and optic nerve also identify sex differences in orbital dimensions and certain soft tissue parameters (Ozer et al., 2016). Recent studies show moderate accuracy for orbital measurements alone, with improved classification when combined with biorbital breadth, bimalar breadth, and other craniofacial parameters (Meral et al., 2022; Can et al., 2022). Three-dimensional assessments also report greater orbital depth and volume in males (Erdem et al., 2023).

Overall, orbital width and height and biorbital and interorbital breadths show the clearest sexual dimorphism. Their highest accuracy is achieved in models incorporating other craniofacial measurements.

3.9. Nasal Bones and Piriform Aperture

Although relatively few Turkish studies address the nasal bones and piriform aperture, CT-based morphometry has assessed nasal bone length and thickness and aperture width, height, area, and perimeter. Early studies reported greater nasal

bone length in males, whereas piriform aperture width had limited discriminatory power (Karadag et al., 2011). Subsequent CT studies generally found greater nasal bone dimensions and aperture height and width in males (Yuzbasioglu et al., 2014; Kabakci et al., 2020). A study of 103 Turkish males aged 21–30 years evaluated six craniofacial measurements and three indices on three-dimensional CT images. Groups defined by piriform aperture ratio differed significantly in maximum cranial breadth, bizygomatic breadth, nasal width, and upper facial index ($p<0.05$) (Sertel Meyvaci et al., 2021). More recently, machine learning models using aperture length, width, area, and perimeter outperformed conventional discriminant analysis (Parlak et al., 2025). Overall, these structures provide useful information but insufficient accuracy alone. Combining their measurements with orbital, zygomatic, maxillary, and mandibular parameters provides more reliable estimates.

3.10. Palatal Region and Hard Palate

Turkish studies of the palatal region primarily address hard palate morphometry and palatal canal anatomy. Parameters include palatal length, width, depth, index, vault angle, and features of the greater palatine foramen and nasopalatine canal. Palatal length, width, and depth are generally greater in males, whereas sex differences in palatal index and vault angle are less consistent (Ayyildiz & Dursun, 2021; Tassoker et al., 2024). Studies of greater palatine foramen number, shape, and position document anatomical variations that may supplement sex assessment (Ortug & Uzel, 2019). Palatal measurements alone have limited accuracy but provide more reliable sex estimates when combined with maxillary, orbital, zygomatic, and mandibular measurements.

3.11. Vomer, Lacrimal Bone, and Inferior Nasal Concha

These small facial bones have received limited attention in Turkish sex estimation studies. Existing research primarily examines nasal cavity, nasolacrimal canal, and sinonasal morphometry. No clear study directly addressing vomer-based sex estimation has been identified; the bone is generally assessed indirectly through nasal septal and cavity morphometry. A CBCT study examining nasolacrimal canal diameters and angles found a greater angle between the bony canal and nasal floor in females (Okumus, 2020). Studies of inferior conchal thickness, hypertrophy, and concha bullosa indicate stronger associations with sinonasal morphology than with sex (Acar et al., 2025). These findings provide complementary morphometric data for integrated assessment of the nasal cavity, orbit, and maxillofacial complex.

4. CONCLUSION

Turkish studies show that the cranium, vertebral column, sternum, ribs, and hyoid bone offer valuable alternatives for constructing biological profiles. CT and three-dimensional imaging enable standardized measurements and reproducible morphometric data across large samples. Vertebral and sternal models generally achieve high classification accuracy, while ribs and the hyoid provide complementary information when other skeletal structures are unavailable. Alongside discriminant analysis and logistic regression, machine learning and artificial neural networks enable combined assessment of numerous anatomical parameters and have improved accuracy. However, sexual dimorphism varies with age, population structure, lifestyle, and secular changes, limiting direct application of formulas developed elsewhere to the Turkish population. Larger,

balanced samples are therefore needed to develop population-specific models that combine axial skeletal structures and undergo independent validation. Systematic synthesis of Turkish studies will support reliable forensic reference data and future AI-assisted sex estimation models.

REFERENCES

- Acar, M., Alkan, S. B., Tolu, İ., Arslan, F. Z., Çağlan, F., Vermez, H., Şaşmaz, S., & Okutan, Ş. (2017). Morphometric analysis of mandibula with MDCT method in Turkish population. *Asian Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 7(62), 13–15.
- Açar, G., Gökşan, A.S. & Magat, G. Three-dimensional CBCT analysis of how sinonasal variations affect maxillary sinus volume in individuals with different skeletal malocclusion. *Sci Rep* 15, 34040 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13624-w>
- Akkitap, M. P. (2025). Evaluation of Variations in Morphology and Morphometry of the Hard Palate Using CBCT Images: A Radio-Surgical Perspective. *Current Research in Dental Sciences*, 35(3), 232-236. <https://doi.org/10.17567/currresdentsci.1484849>
- Aktuna Belgin, C., Colak, M., Adiguzel, O., Akkus, Z., & Orhan, K. (2019). Three-dimensional evaluation of maxillary sinus volume in different age and sex groups using CBCT. *European archives of oto-rhino-laryngology : official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS) : affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery*, 276(5), 1493–1499. <https://doi.org/10.1007/s00405-019-05383-y>
- Alkan, Y. (2025). Sex estimation using cephalometric data in a Turkish population: A logistic and ROC-based analysis. *International Journal of Morphology*, 43(6), 1987–1994. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022025000601987>
- Apaydın, B. K., & İçöz, D. (2025). Assesment of Cranial Traits for Gender Determination by Using 3D Models: A

- Retrospective CBCT Study. *Cyprus Journal of Medical Sciences*, 10(4), 264-271.
<https://doi.org/10.4274/cjms.2025.2025-8>
- Apaydın, B., İçöz, D., Yaşar, F., & Akgünlü, F. (2018). Evaluation of mandibular anatomical formation for gender determination in Turkish population. *Balkan Journal of Dental Medicine*, 22(3), 133–137.
- Ateşoğlu, S., Deniz, M., & Uslu, A. I. (2018). Evaluation of the morphological characteristic and sex differences of sternum by multi-detector computed tomography. *Folia morphologica*, 77(3), 489–497.
<https://doi.org/10.5603/FM.a2018.0002>
- Ayturk, B. G., Keles, A., & Osmanoglu, U. O. (2026). Sex estimation from morphometry of lumbar vertebrae (L4-L5): A machine learning approach. *International journal of legal medicine*, 10.1007/s00414-026-03912-z. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1007/s00414-026-03912-z>
- Ayyildiz, V. A., & Dursun, A. (2021). Evaluation of hard palate asymmetry in turkish population. *Annals of Medical Research*, 28(5). doi: 10.5455/annalsmedres.2020.09.901
- Bakan, H. U., Emir Yetim, E., İlhanlı, N., Kılınç, O., Öz, M., Karagöz, Y. M., & Sönmez, S. (2025). Sex estimation from the sternum in Turkish population using various machine learning methods and deep neural networks. *Egyptian Journal of Radiology and Nuclear Medicine*, 56, Article 176. <https://doi.org/10.1186/s43055-025-01583-1>
- Balseven-Odabasi, A., Yalcinozan, E., Keten, A., Akçan, R., Tumer, A. R., Onan, A., Canturk, N., Odabasi, O., & Hakan Dinc, A. (2013). Age and sex estimation by metric measurements and fusion of hyoid bone in a Turkish

- population. *Journal of forensic and legal medicine*, 20(5), 496–501. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2013.03.022>
- Bedalov, A., Bašić, Ž., Marelja, I., Dolić, K., Bukarica, K., Missoni, S., Šlaus, M., Primorac, D., Andjelinović, Š., & Kružić, I. (2019). Sex estimation of the sternum by automatic image processing of multi-slice computed tomography images in a Croatian population sample: a retrospective study. *Croatian medical journal*, 60(3), 237–245. <https://doi.org/10.3325/cmj.2019.60.237>
- Bolatlı, G., Unver Dogan, N., Koplay, M., Fazlıoğulları, Z., & Karabulut, A. K. (2020). Evaluation of sternal morphology according to age and sex in multidetector computerized tomography. *Anatomy*, 14(1), 29–38. <https://izlik.org/JA64CZ59ZK>
- Bora, A., Koç, M., Durmuş, K. *et al.* Evaluating the frequency of anatomical variations of the sinonasal region in pediatric and adult age groups according to gender: computed tomography findings of 1532 cases. *Egypt J Otolaryngol* 37, 58 (2021). <https://doi.org/10.1186/s43163-021-00122-9>
- Borahan, M. O., Ulay, G., Yıldız Sadıkoğlu, A. N., & Namdar Pekiner, F. (2019). The Prevalence of Paranasal Sinus Anatomic Variations on Cone Beam Computed Tomography Scan Images of Turkish Populationanatomical. *Clinical and Experimental Health Sciences*, 9(1), 42–48. <https://doi.org/10.5152/clinexphealthsci.2018.1001>
- Boyacioglu, H., van der Stelt, P. F., Kamburoglu, K., Goksuluk, D., & Avcu, N. (2020). Assessment of the frontal sinus dimensions using CBCT for gender determination among samples of Dutch and Turkish individuals. *RJLM* -

- Romanian Journal of Legal Medicine, 28(3), 288-293.
<https://doi.org/10.4323/rjlm.2020.288>
- Bozdag, M., & Karaman, G. (2021). Virtual Morphometry of the First Lumbar Vertebrae for Estimation of Sex Using Computed Tomography Data in the Turkish Population. *Cureus*, 13(7), e16597.
<https://doi.org/10.7759/cureus.16597>
- Braun, S., Schwendener, N., Kanz, F., Lösch, S., & Milella, M. (2024). What we see is what we touch? Sex estimation on the skull in virtual anthropology. *International journal of legal medicine*, 138(5), 2113–2125.
<https://doi.org/10.1007/s00414-024-03244-w>
- Can, A. R., Korkmaz, İ., Atamtürk, D., Karazincir, S., & Duyar, İ. (2022). Üst yüz ve orbita bölgesinden alınan genişlik ölçülerinin cinsiyet tayininde kullanımı. *The Medical Journal of Mustafa Kemal University*, 13(47), 296-302. <https://doi.org/10.17944/mkutfd.1022278>
- Cappella, A., Bertoglio, B., Di Maso, M., Mazzarelli, D., Affatato, L., Stacchiotti, A., Sforza, C., & Cattaneo, C. (2022). Sexual Dimorphism of Cranial Morphological Traits in an Italian Sample: A Population-Specific Logistic Regression Model for Predicting Sex. *Biology*, 11(8), 1202.
<https://doi.org/10.3390/biology11081202>
- Čechová, M., Dupej, J., Brůžek, J., Bejdová, Š., Horák, M., & Velemínská, J. (2019). Sex estimation using external morphology of the frontal bone and frontal sinuses in a contemporary Czech population. *International journal of legal medicine*, 133(4), 1285–1294.
<https://doi.org/10.1007/s00414-019-02063-8>

- Celik, B., Meyvacı, S. S., Ankaralı, H., Yasar, A. B., & Sarioglu, A. E. (2026). Sexual dimorphism in the angles between Frankfort horizontal plane and craniofacial profile landmarks. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*, 86, 102997. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2026.102997>
- Çelebi, E., Ersoy Kölege, S. N., Koşkan, Ö., & Görmez, Ö. (2025). Evaluation of sex estimation through mandibular morphometric measurements on cone-beam computed tomography images. *Journal of Health Sciences and Medicine*, 8(6), 1011-1017. <https://doi.org/10.32322/jhsm.1752625>
- Çöloğlu, A. S., Işcan, M. Y., Yavuz, M. F., & Sari, H. (1998). Sex determination from the ribs of contemporary Turks. *Journal of forensic sciences*, 43(2), 273-276.
- Demet Mutlu, G., Asirdizer, M., Kartal, E., Keskin, S., Mutlu, İ., & Goya, C. (2024). Sex estimation from the hyoid bone measurements in an adult Eastern Turkish population using 3D CT images, discriminant function analysis, support vector machines, and artificial neural networks☆. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*, 67, 102383. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2023.102383>
- Demiralp, K. O., Cakmak, S. K., Aksoy, S., Bayrak, S., ORHAN, K., & DEMİR, P., (2019). Assessment of paranasal sinus parameters according to ancient skulls' gender and age by using cone-beam computed tomography. *FOLIA MORPHOLOGICA*, vol.78, no.2, 344-350.
- Depreli, A., Sahin, N. E., Sonmez, S., Ozgen Sonmez, M. N., Sahin, M., Dogan, B., Simsek, S. B., & Bakan, H. U. (2025). Morphometric Analysis of the Openings in the Posterior Cranial Fossa and Their Relationship with Sex. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 15(24), 3189. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15243189>

- Direk, F., Uysal, I. I., Kivrak, A. S., Unver Dogan, N., Fazliogullari, Z., & Karabulut, A. K. (2018). Reevaluation of Mandibular Morphometry According to Age, Gender, and Side. *The Journal of craniofacial surgery*, 29(4), 1054–1059.
<https://doi.org/10.1097/SCS.00000000000004293>
- Doğan, M. E., Turkoglu, B. N., & Şengul, I. (2025). A Morphometric Evaluation of the Mandibular Condyle, Coronoid Process, and Gonial Angle: Age and Gender Differences in CBCT Imaging. *Diagnostics*, 15(12), 1459. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15121459>
- Doğan, M. E., & Uluışık, N. (2024). Analysis of maxillary sinus volume of a group of population living on the southern border of Southeastern Anatolia. *Anatolian Current Medical Journal*, 6(3), 210-214.
<https://doi.org/10.38053/acmj.1433517>
- Dursun, A., Ayazoğlu, M., Ayyıldız, V. A., Kastamoni, Y., Öztürk, K., & Albay, S. (2021). Morphometry of the hyoid bone: a radiological anatomy study. *Anatomy*, 15(1), 44-51. <https://izlik.org/JA22AJ69KU>
- Durum Polat, Y., Tellioglu, A. M., Şahmelikoğlu, A. G., Çapacı, B., & Karaman, C. Z. (2020). Use of Maxillary and Frontal Sinus Diameters in Sex Determination: Which is Superior?. *Cerrahpaşa Medical Journal*, 44(1), 27–34.
<https://doi.org/10.5152/cjm.2020.19013>
- Ekizoglu, O., Hocaoglu, E., Inci, E., Bilgili, M. G., Solmaz, D., Erdil, I., & Can, I. O. (2014). Sex estimation from sternal measurements using multidetector computed tomography. *Medicine*, 93(27), e240.
<https://doi.org/10.1097/MD.00000000000000240>

- Ekizoglu, O., Hocaoglu, E., Inci, E., Can, I. O., Solmaz, D., Aksoy, S., Buran, C. F., & Sayin, I. (2016). Assessment of sex in a modern Turkish population using cranial anthropometric parameters. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*, 21, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2016.06.001>
- Ekizoglu, O., Hocaoglu, E., Inci, E., Karaman, G., Garcia-Donas, J., Kranioti, E., Moghaddam, N., & Grabherr, S. (2021). Virtual morphometric method using seven cervical vertebrae for sex estimation on the Turkish population. *International journal of legal medicine*, 135(5), 1953–1964. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02510-5>
- Ekizoglu, O., Inci, E., Hocaoglu, E., Sayin, I., Kayhan, F. T., & Can, I. O. (2014). The use of maxillary sinus dimensions in gender determination: a thin-slice multidetector computed tomography assisted morphometric study. *The Journal of craniofacial surgery*, 25(3), 957–960. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000000734>
- Emekli E. (2023). Sex Determination Using Frontal Sinus Diameters on Direct Radiography. *Cureus*, 15(10), e47476. <https://doi.org/10.7759/cureus.47476>
- Erdem, H., Tekeli, M., Cevik, Y., Kilic Safak, N., Kaya, O., Boyan, N., & Oguz, O. (2023). Three-Dimensional (3D) Analysis of Orbital Morphometry in Healthy Anatolian Adults: Sex, Side Discrepancies, and Clinical Relevance. *Cureus*, 15(9), e45208. <https://doi.org/10.7759/cureus.45208>
- Etli, Y., Asirdizer, M., Hekimoglu, Y., Keskin, S., & Yavuz, A. (2019). Sex estimation from sacrum and coccyx with discriminant analyses and neural networks in an equally distributed population by age and sex. *Forensic science*

- international*, 303, 109955.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109955>
- Franklin, D., Cardini, A., Flavel, A., & Kuliukas, A. (2013). Estimation of sex from cranial measurements in a Western Australian population. *Forensic science international*, 229(1-3), 158.e1–158.e1588.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.03.005>
- Garoufi, N., Bertsatos, A., Chovalopoulou, M. E., & Villa, C. (2020). Forensic sex estimation using the vertebrae: an evaluation on two European populations. *International journal of legal medicine*, 134(6), 2307–2318.
<https://doi.org/10.1007/s00414-020-02430-w>
- Gruszka, K., Aksoy, S., Różyło-Kalinowska, I., Gülbeş, M. M., Kalinowski, P., & Orhan, K. (2022). A comparative study of paranasal sinus and nasal cavity anatomic variations between the Polish and Turkish Cypriot Population with CBCT. *Head & face medicine*, 18(1), 37.
<https://doi.org/10.1186/s13005-022-00340-3>
- Gulec, M., Tassoker, M., Magat, G., Lale, B., Ozcan, S., & Orhan, K. (2020). Three-dimensional volumetric analysis of the maxillary sinus: a cone-beam computed tomography study. *Folia morphologica*, 79(3), 557–562.
<https://doi.org/10.5603/FM.a2019.0106>
- Gurlek Celik, N., & Akman, B. (2024). Analysis of sphenoid sinus and ethmoid sinus volume and asymmetry by sex: A 3D-CT study. *Surgical and radiologic anatomy : SRA*, 46(5), 551–558. <https://doi.org/10.1007/s00276-024-03319-8>
- Harmandaoğlu, O , Seçgin, Y , Kaya, S , Öztürk, O , Şenol, D and Önbaşı, Ö . (2025). Gender Classification Using Parameters Obtained from the Dens Axis with Machine

- Learning Algorithms and Multilayer Perceptron Classifier. (e217608). *Iranian Red Crescent Medical Journal (IRCMJ)*, 27(1), e217608 doi:10.22034/ircmj.2025.490322.1636
- Hora, M., & Sládek, V. (2018). Population specificity of sex estimation from vertebrae. *Forensic science international*, 291, 279.e1–279.e12. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.08.015>
- Inci, E., Ekizoglu, O., Turkey, R., Aksoy, S., Can, I. O., Solmaz, D., & Sayin, I. (2016). Virtual Assessment of Sex: Linear and Angular Traits of the Mandibular Ramus Using Three-Dimensional Computed Tomography. *The Journal of craniofacial surgery*, 27(7), e627–e632. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000002979>
- İçöz, D., & Akgünlü, F. (2019). Cinsiyetin mandibuler parametreler üzerine etkisi: Retrospektif KIBT çalışması. *Selcuk Dental Journal*, 6(4), 55-59. <https://izlik.org/JA52BD47MY>
- İlgüy, D., İlgüy, M., Ersan, N., Dölekoğlu, S. and Fişekçioğlu, E. (2014), Measurements of the Foramen Magnum and Mandible in Relation to Sex Using CBCT. *J Forensic Sci*, 59: 601-605. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12376>
- Kabakci, A. G., Polat, S., Öksüzler, M., Öksüzler, F. Y., & Yücel, A. H. (2020). The determination of the piriform aperture morphometry and golden ratio in healthy Turkish subjects: A CT study. *International Journal of Morphology*, 38(2), 444–447. doi: 10.4067/S0717-95022020000200444
- Kalbounieh, H., Mubarak, N., Daradkeh, S., Ashour, O., Alkhatib, A. M., Suboh, L., Nofal, A., Mahafzah, W., & Alsalem, M. (2021). Estimation of sex based on metrics of the

- sternum in a contemporary Jordanian population: A computed tomographic study. *Medicine*, 100(49), e28169. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000028169>
- Kalkan, E. D., Baransel, A., Akşamoğlu, M., Akbaba, M., & Kalkan, H. (2025). Sex Determination Using Craniometric Parameters: A Computed Tomography-Based Assessment. *Adli Tıp Dergisi*, 39(2), 125-135. <https://doi.org/10.61970/adlitip.1700509>
- Kalkan, H., & Kalkan, E. D. (2026). Forensic application of CT-based frontal sinus and mandibular ramus measurements for sex and age estimation in a Turkish population: A retrospective analytical cross-sectional study. *Medicine*, 105(5), e47496. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000047496>
- Kaplanoglu, H., Kaplanoglu, V., Toprak, U., & Hekimoglu, B. (2013). Surgical Measurement of the Sphenoid Sinus on Sagittal Reformatted CT in the Turkish Population. *The Eurasian journal of medicine*, 45(1), 7–15. <https://doi.org/10.5152/eajm.2013.02>
- Kaplanoglu, V., Kaplanoglu, H., Toprak, U., Parlak, I. S., Tatar, I. G., Deveer, M., & Hekimoglu, B. (2014). Anthropometric measurements of the orbita and gender prediction with three-dimensional computed tomography images. *Folia morphologica*, 73(2), 149–152. <https://doi.org/10.5603/FM.2014.0022>
- Kaplanoğlu, K., Esen, G., & Servi, T. (2022). A retrospective investigation of the hard palate morphometry with 416 cone-beam CT images. *International Journal of Academic Medicine and Pharmacy*, 4(2), 25–29.
- Karabag, G., Zeybek, V., Can, F., & Yavuz, M. S. (2025). Sex estimation via the measurement of the seventh cervical

- vertebrae on Computerized Tomography images. *Anthropologischer Anzeiger; Bericht über die biologisch-anthropologische Literatur*, 81(2), 233–242. <https://doi.org/10.1127/anthranz/2024/1837>
- Karadag, D., Ozdol, N. C., Beriat, K., & Akinci, T. (2011). CT evaluation of the bony nasal pyramid dimensions in Anatolian people. *Dento maxillo facial radiology*, 40(3), 160–164. <https://doi.org/10.1259/dmfr/35578628>
- Kartal, E., Etli, Y., Asirdizer, M., Hekimoglu, Y., Keskin, S., Demir, U., Yavuz, A., & Celbis, O. (2022). Sex estimation using foramen magnum measurements, discriminant analyses and artificial neural networks on an eastern Turkish population sample. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*, 59, 102143. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2022.102143>
- Kaya, A., Uygün, S., Eraslan, C., Akar, G. C., Koçak, A., Aktaş, E., & Govsa, F. (2014). Sex estimation: 3D CTA-scan based on orbital measurements in Turkish population. *Romanian Journal of Legal Medicine*, 22(4), 257–262. doi: 10.4323/rjlm.2014.257
- Keleş, H., Yakar, H., Kaya, İ., Çiçek, F., Ceranoğlu, F. G., Çiftçi, A. T., & Karadağ, H. (2024). The relationship between sphenoidal sinus and sella turcica morphometry in the Turkish population: a retrospective study. *Surgical and radiologic anatomy : SRA*, 46(7), 977–984. <https://doi.org/10.1007/s00276-024-03392-z>
- Keven, A., Öztürk, S., Aytaç, G., & Sindel, M. (2024). Identification of hyoid bone morphometry in terms of gender in the Turkish population. *Anatomy*, 18(2), 61–65. <https://izlik.org/JA22CD88HJ>

- Kindschuh, S. C., Dupras, T. L., & Cowgill, L. W. (2010). Determination of sex from the hyoid bone. *American journal of physical anthropology*, 143(2), 279–284. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21315>
- Koç, A. (2020). Are Maxillary And Sphenoid Sinus Volumes Predictors Of Gender and Age? A Cone Beam Computed Tomography Study. *Cumhuriyet Dental Journal*, 23(4), 348-355. <https://doi.org/10.7126/cumudj.795870>
- Koçak, A., Ozgür Aktas, E., Ertürk, S., Aktas, S., & Yemişçigil, A. (2003). Sex determination from the sternal end of the rib by osteometric analysis. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*, 5(2), 100–104. [https://doi.org/10.1016/s1344-6223\(03\)00045-2](https://doi.org/10.1016/s1344-6223(03)00045-2)
- Kolak, M., Sunar, M., & Ocak, A. (2024). Sinus Maxillaris Morphometric Measurements and Comparative Anatomy Between Genders. *Archives of Basic and Clinical Research*, 6(2), 140-145. <https://doi.org/10.5152/ABCR.2024.23235>
- Kopuz, C., & Ortug, G. (2016). Variable morphology of the hyoid bone in anatolian population: clinical implications-a cadaveric study. *International Journal of Morphology*, 34(4), 1396-1403.
- Koşar, M. İ., Uğuz Gençer, C., Tetiker, H., Yeniçeri, İ. Ö., & Çullu, N. (2022). Sex and stature estimation based on multidetector computed tomography imaging measurements of the sternum in Turkish population. *Forensic Imaging*, 28, 200495. <https://doi.org/10.1016/j.fri.2022.200495>
- Köse, E., & Göller Bulut, D. (2022). The use of hyoid bone dimensions in age and sex estimation in a Turkish population: a cone-beam computed tomography

- study. *Folia morphologica*, 81(1), 183–189.
<https://doi.org/10.5603/FM.a2021.0051>
- Krishan, K., Chatterjee, P. M., Kanchan, T., Kaur, S., Baryah, N., & Singh, R. K. (2016). A review of sex estimation techniques during examination of skeletal remains in forensic anthropology casework. *Forensic science international*, 261, 165.e1–165.e1658.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.02.007>
- Mello-Gentil, T., & Souza-Mello, V. (2021). Contributions of anatomy to forensic sex estimation: focus on head and neck bones. *Forensic sciences research*, 7(1), 11–23.
<https://doi.org/10.1080/20961790.2021.1889136>
- Meral, O., Belkıs Toklu, B., Meydan, R., Kaya, A., Karadayı, B., & Acar, T. (2020). Sex estimation from foramen magnum parameters in adult Turkish population: A computed tomography study. *Legal medicine (Tokyo, Japan)*, 47, 101775. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2020.101775>
- Meral, O., Meydan, R., Toklu, B. B., Kaya, A., Karadayı, B., & Acar, T. (2022). Estimation of sex from computed tomography images of skull measurements in an adult Turkish population. *Acta radiologica (Stockholm, Sweden : 1987)*, 63(11), 1513–1521.
<https://doi.org/10.1177/02841851211044978>
- Meral, O., Toklu, B. B., Meydan, R., Kaya, A., Karadayı, B., & Acar, T. (2022). Sexing from the orbital measurements using computed tomography images and discriminant function analysis in Turkish population. *The Imaging Science Journal*, 70, 207–213. doi: 10.1080/13682199.2023.2165237
- Mutlu, İ., Asirdizer, M., Kartal, E., Etli, Y., Keskin, S., Sever, D., & Göya, C. (2025). Sex estimation from mandible by

- computerized tomography images and discriminant function analysis in an Eastern Turkish population. *Eastern Journal of Medicine*, 30(3), 367–381. <https://doi.org/10.5505/ejm.2025.71780>
- Nteli Chatzioglou, G., Toklu, E., Bayraktar, E., Ertaş, A., Kale, A., Coşkun, O., Öztürk, A., & Gayretli, Özcan. (2023). Morphological and Morphometric Variations of the Hyoid Bone in Anatolian Population. *European Journal of Therapeutics*, 29(3), 508–517. <https://doi.org/10.58600/eurjther1721>
- Okkesim, A., & Sezen Erhamza, T. (2020). Assessment of mandibular ramus for sex determination: Retrospective study. *Journal of oral biology and craniofacial research*, 10(4), 569–572. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2020.07.019>
- Okumuş Ö. (2020). Investigation of the morphometric features of bony nasolacrimal canal: a cone-beam computed tomography study. *Folia morphologica*, 79(3), 588–593. <https://doi.org/10.5603/FM.a2019.0099>
- Ortug, A., & Uzel, M. (2019). Greater palatine foramen: assessment with palatal index, shape, number and gender. *Folia morphologica*, 78(2), 371–377. <https://doi.org/10.5603/FM.a2018.0088>
- Özer, C. M., Öz, I. I., Şerifoğlu, I., Büyükuysal, M. Ç., & Barut, Ç. (2016). Evaluation of Eyeball and Orbit in Relation to Gender and Age. *The Journal of craniofacial surgery*, 27(8), e793–e800. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000003133>
- Özeren Keşkek, C., & Aytuğar, E. (2021). Investigation of Sphenoid Sinus Pneumatization in Turkish Population with Cone-Beam Computed Tomography. *European*

Journal of Rhinology and Allergy, 4(2), 41-47. <https://doi.org/10.5152/ejra.2021.21826>

Parlak, M. E., Etili, Y., Beyhan, M., Kanat, K., & Kızıloğlu, H. A. (2025). Sex estimation with ensemble learning: An analysis using anthropometric measurements of piriform aperture. *Egyptian Journal of Forensic Sciences*, 15, Article 10. doi: 10.1186/s41935-025-00426-4

Partido Navadijo, M., Fombuena Zapata, I., Borja Miranda, E. A., & Alemán Aguilera, I. (2021). Discriminant functions for sex estimation using the rib necks in a Spanish population. *International journal of legal medicine*, 135(3), 1055–1065. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02537-8>

Rohmani, A., Shafie, M.S. & Nor, F.M. Sex estimation using the human vertebra: a systematic review. *Egypt J Forensic Sci* 11, 25 (2021). <https://doi.org/10.1186/s41935-021-00238-2>

Rozendaal, A. S., Scott, S., Peckmann, T. R., & Meek, S. (2020). Estimating sex from the seven cervical vertebrae: An analysis of two European skeletal populations. *Forensic science international*, 306, 110072. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.110072>

Sakaran, R., Alias, A., Woon, C. K., Kamarul Zaman, M. F., Hasmi, A. H., Abdullah, N., Mahat, N. A., & Chung, E. (2023). Sex estimation on thoracic vertebrae: A systematic review. *Translational Research in Anatomy*, 31, 100243. <https://doi.org/10.1016/j.tria.2023.100243>

Sapancı, İ., Şahin, H. O., & Doğan, Ö. (2019). Mandibular parametreler ile yaş ve cinsiyet arasındaki ilişkinin araştırılması: Retrospektif çalışma. *Selcuk Dental Journal*, 6(4), 328–334.

- Seçgin, Y., Erkartal, H. Ş., Zanaqah, Z. A. N., Yılmaz, N., Keskin, N. K., & Toy, Ş. (2025). Sex Prediction Using Geometric Morphometry with Parameters Obtained From Computed Tomography Images of the Seventh Cervical Vertebra. *Harran Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 22(4).
- Sertel Meyvaci, S., Ankarali, H., Goller Bulut, D., Celik, B., Taskin, B. (2026). Evaluation of the Golden Ratio in Atlas with its Unique Anatomical Features. *Int. J. Morphol*, 44(3), 959-967. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-95022026000300959>.
- Sertel Meyvaci, S., Ankarali, H., Goller Bulut, D. & Taskin, B. Performances of different classification algorithms in sex determination from first cervical vertebra measurements. *Int. J. Morphol.*, 42(5):1439-1445, 2024.
- Sertel Meyvaci, S., Goller Bulut, D., Ozturk, A. T., & Ankarali, H. (2021). Gender estimation from angular parameters of mandible in Turkish adults. *Medical Journal of Western Black Sea*, 5(2), 240-247. <https://doi.org/10.29058/mjwbs.873771>
- Sertel Meyvaci, S., Hizal, M., & Ankarali, H. (2021). Examination of craniofacial parameters in Turkish males with golden ratio in piriform aperture size. *Journal of Surgery and Medicine*, 5(3), 289-293. <https://doi.org/10.28982/josam.860747>
- Spradley M. K. (2016). Metric Methods for the Biological Profile in Forensic Anthropology: Sex, Ancestry, and Stature. *Academic forensic pathology*, 6(3), 391–399. <https://doi.org/10.23907/2016.040>
- Spradley, M. K., & Jantz, R. L. (2011). Sex estimation in forensic anthropology: skull versus postcranial elements. *Journal*

- of forensic sciences, 56(2), 289–296.
<https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01635.x>
- Şimşek, H. A., Gültekin, T., Bilecenoğlu, B., Kolsuz, M. E., & Atakan, C., (2021). Sex Determination from the Maxillary Sinus by Cone Beam Computed Tomography. *Türkiye Klinikleri Journal of Dental Sciences* , vol.27, no.3, 364-371.
- Tassoker, M., Öztürk, B., & Aydın Kabakçı, A. D. (2024). Investigation of the relationship of palatal arch morphometry with maxillary sinus volume: CBCT study. *Balkan Journal of Dental Medicine*, 28(1), 71–79.
- Tatlisumak, E., Asirdizer, M., Bora, A., Hekimoglu, Y., Etli, Y., Gumus, O., & Keskin, S. (2017). The effects of gender and age on forensic personal identification from frontal sinus in a Turkish population. *Saudi medical journal*, 38(1), 41–47.
<https://doi.org/10.15537/smj.2017.1.16218>
- Teke, H. Y., Duran, S., Canturk, N., & Canturk, G. (2007). Determination of gender by measuring the size of the maxillary sinuses in computerized tomography scans. *Surgical and radiologic anatomy : SRA*, 29(1), 9–13. <https://doi.org/10.1007/s00276-006-0157-1>
- Türk, E., Görmez, Ö., Çelebi, E., & Koşkan, Ö. (2019). Frontal sinüs boyutlarının yaş ve cinsiyet ile ilişkisinin değerlendirilmesi. *Selcuk Dental Journal*, 6(4), 119-124.
<https://izlik.org/JA72KR83JY>
- Uysal Ramadan, S., Türkmen, N., Dolgun, N. A., Gökharman, D., Menezes, R. G., Kaçar, M., & Koşar, U. (2010). Sex determination from measurements of the sternum and fourth rib using multislice computed tomography of the

- chest. *Forensic Science International*, 197(1–3), 120.e1–120.e5. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2009.12.049>
- Uysal, S., Gokharman, D., Kacar, M., Tuncbilek, I., & Kosa, U. (2005). Estimation of sex by 3D CT measurements of the foramen magnum. *Journal of forensic sciences*, 50(6), 1310–1314.
- Wang, X., Liu, G., Wu, Q., Zheng, Y., Song, F., & Li, Y. (2024). Sex estimation techniques based on skulls in forensic anthropology: A scoping review. *PloS one*, 19(12), e0311762. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311762>
- Yasar, B., & Sağır, M., (2023). Testing of morphological sex estimation traits with a sex-known collection: Ottoman period skulls. *International Journal Of Osteoarchaeology* , vol.33, 1042-1051.
- Yüzbaşıoğlu, N., Yilmaz, M. T., Çicekcibasi, A. E., Şeker, M., & Sakarya, M. E. (2014). The evaluation of morphometry of nasal bone and pyriform aperture using multidetector computed tomography. *The Journal of craniofacial surgery*, 25(6), 2214–2219. <https://doi.org/10.1097/SCS.0000000000001063>

KARPAL TÜNEL BÖLGESİ VE N. MEDIANUS ANATOMİSİ

Şeyma Kevser YILMAZ¹

1. GİRİŞ

Karpal tünel (KT), el bileğinin volar yüzünde yer alan, tabanı karpal kemikler, tavanı ise retinaculum musculorum flexorum tarafından oluşturulan osteofibröz bir kanaldır. KT'den dokuz fleksör kas tendonu ile n. medianus geçer. N. medianus'un KT düzeyinde sıkışması karpal tünel sendromuna (KTS) yol açar ve KTS, üst ekstremitenin en sık görülen tuzak nöropatisidir (Padua et al., 2016).

KTS'nin etiyojisi multifaktöriyeldir. Diyabet, hipotiroidi, obezite, gebelik, menopo ve ileri yaş risk faktörleri arasında bildirilmiştir (Padua et al., 2016; Padua et al., 2023). Tekrarlayan el ve bilek hareketleri gibi mesleki faktörlerin KTS ile ilişkisi de sistematik olarak incelenmiştir (Hassan, Beumer, Kuijer, & van der Molen, 2022). Ayrıca bifid n. medianus gibi anatomik varyasyonlar KTS için anatomik bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir (Asghar et al., 2022).

KTS prevalansı; tanı kriterlerine, çalışma popülasyonuna ve değerlendirme yöntemlerine göre değişir. Genel popülasyonda prevalansın yaklaşık %3–5 olduğu bildirilmektedir (Padua et al., 2016). Gebrye ve ark., 30 çalışmayı kapsayan meta-analizlerinde havuzlanmış küresel prevalansı %14,4 (%95 GA: %6,7–28,2) olarak bulmuştur

¹ Öğretim Görevlisi, Hitit Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Anatomi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0002-9942-2424.

(Gebrye, Jeans, Yeowell, Mbada, & Fatoye, 2024). Güven aralığının genişliği nedeniyle bu değer dikkatli yorumlanmalıdır.

Bu bölümde KT'nin anatomisi, n. medianus'un seyri ve dalları ile KT düzeyindeki anatomik varyasyonları ele alınacaktır. Bu bilgiler KTS'nin tanısı, tedavisi ve cerrahi planlaması açısından önem taşımaktadır.

2. KARPAL TÜNEL ANATOMİSİ

Karpal tünel (KT), el bileğinin volar yüzünde yer alan osteofibröz bir geçittir. Tabanını ve yan duvarlarını, iki sıra hâlinde dizilmiş sekiz karpal kemiğin oluşturduğu, palmar yüze doğru konkv karpal ark meydana getirir. Tavanı retinaculum musculorum flexorum (retinaculum flexorum) oluşturur (Şekil 1). Retinaculum flexorum, fascia antebrachii'nin el bileğinde palmar tarafta kalınlaşmasıyla oluşur. Distal bölümü thenar ve hypothenar kasları örten aponevrozlarla devam eder. Esas bölümünü, kalın fibröz bir bant olan lig. carpi transversum oluşturur. Bu bant medialde os pisiforme ve hamulus ossis hamati'ye tutunur. Laterale doğru uzanırken yüzeysel ve derin olmak üzere iki yaprağa ayrılır. Yüzeysel yaprak tuberculum ossis scaphoidei ve os trapezium oluğunun lateral kısmına, derin yaprak ise os trapezium oluğunun medial kenarına tutunur. Böylece lig. carpi transversum karpal arkı köprü gibi kapatarak KT'yi sınırlandırır (Alemdar, 2016; Atik, 2019; Serarslan, Melek, & Duman, 2008; Şen & Kömürcü, 2011).

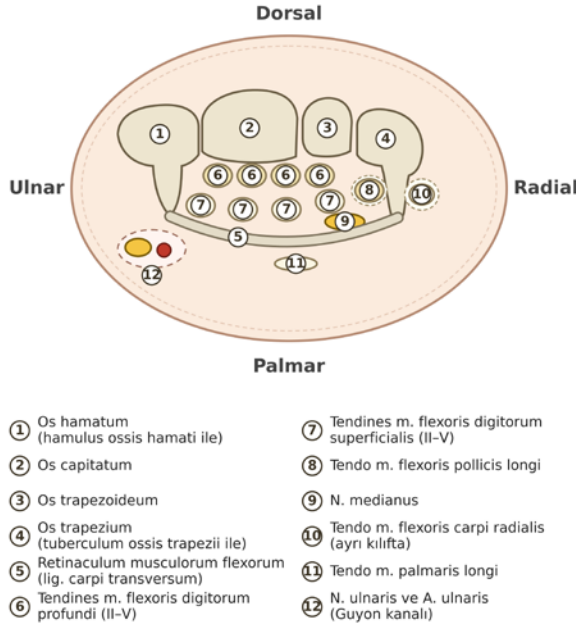
KT'nin transvers kesitte palmardan dorsale yüksekliği 1–1,5 cm, radyalden ulnara genişliği 2,5–2,8 cm arasındadır (Yu, Chase, & Strauch, 2004).

KT'den 10 anatomik yapı geçer: dokuzu fleksör kas tendonu, biri n. medianus'tur (Tablo 1) (Moore, Dalley, & Agur, 2014).

Tablo 1. Karpal tünelden geçen anatomik yapılar

Anatomik yapı	Sayı	Temel Özellik
M. flexor digitorum superficialis tendonları	4	II–V. parmakların yüzeysel fleksör tendonları
M. flexor digitorum profundus tendonları	4	II–V. parmakların derin fleksör tendonları
M. flexor pollicis longus tendonu	1	Başparmağın fleksör tendonu
N. medianus	1	Karpal tünelden geçen tek sinir yapısı
Toplam	10	

Kaynak: Moore ve ark. (2014) ve Standing (2016) kaynaklarından yararlanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır.



Sağ el, distalden proksimale bakış. Şematik çizim, ölçekli değildir.

Şekil 1. El bileğinin transvers kesiti (yazar tarafından çizilmiştir).

Üstte dorsal, altta palmar yüz; karpal tünel sınırları, fleksör tendonlar, n. medianus, n. ulnaris, a. ulnaris ve karpal kemiklerin komşulukları.

2.1. Ligamentum Carpi Transversum

Lig. carpi transversum, KT'nin fibröz çatısını oluşturan güçlü bir bağ dokusu yapısı ve retinaculum flexorum'un en kalın bölümüdür. Proksimal düzeyde os pisiforme ile tuberculum ossis scaphoidei, distal düzeyde hamulus ossis hamati ile tuberculum ossis trapezii arasında uzanarak karpal arkı fibröz bir köprü gibi kapatır. Bu osteofibröz yapı n. medianus ve fleksör tendonlar için koruyucu bir tünel oluşturur (Goitz, Fowler, & Li, 2014; Moore et al., 2014; Standring, 2016).

Histolojik olarak lig. carpi transversum yoğun düzenli kollajen liflerden oluşur ve laminar bir yapı gösterir. Liflerin büyük bölümü transvers doğrultuda uzanır. Ligamentin kalınlığı ve genişliği bölgeler arasında farklılık gösterir (Isogai et al., 2002; Pacek, Chakan, Goitz, Kaufmann, & Li, 2010).

Lig. carpi transversum yalnızca pasif bir çatı değildir; KT kompliyansında ve karpal arkın şeklinin korunmasında biyomekanik rol oynar (Li, Marquardt, Evans, & Seitz, 2014). Kadavra çalışmasında ligament sağlamken karpal arkın distraksiyonla %50'ye kadar genişleyebildiği, ligament kesildiğinde ise bu genişlemenin yaklaşık %30 daha arttığı gösterilmiştir (Vanhees, Verstreken, & van Riet, 2015).

Lig. carpi transversum'un klinik önemi KTS ile ilişkisinde ortaya çıkar. KT hacmi sınırlı olduğundan ligamentte meydana gelen kalınlaşma, fibrozis veya elastikiyet kaybı n. medianus üzerindeki basıncı artırabilir. KTS'li bireylerde ligamentin yapısal değişiklik gösterdiği bildirilmiştir (Goitz et al., 2014).

Cerrahi açıdan lig. carpi transversum, KT gevşetme operasyonlarının temel hedefidir. Açık veya endoskopik yöntemle ligamentin kesilmesi KT hacmini artırır ve n. medianus üzerindeki basıncı azaltır. Ancak ligament kesildiğinde karpal arkın yük altında daha fazla genişlemesinin,

pillar ağrısı, palmar hassasiyet ve kavrama kuvvetinde azalma gibi bazı cerrahi sonrası şikâyetlerle ilişkili olabileceği ileri sürülmüştür (Vanhees et al., 2015).

3. N. MEDIANUS ANATOMİSİ

N. medianus, fasciculus medialis'ten ayrılan radix medialis nervi mediani (C8, T1) ile fasciculus lateralis'ten ayrılan radix lateralis nervi mediani'nin (C5–C7) fossa axillaris'te a. axillaris'in önünde veya dış yanında birleşmesiyle oluşur. Kolda dal vermez ve a. brachialis ile birlikte seyrederek. Dirsek düzeyinde fossa cubiti içerisinde seyrederek ve m. pronator teres'in iki başı arasından geçerek ön kola girer. Ön kolun orta bölümünde m. flexor digitorum superficialis ile m. flexor digitorum profundus arasında ilerler. Distal ön kolda ise m. flexor carpi radialis ve m. palmaris longus tendonları arasında daha yüzeysel bir konum kazanır (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

El bileği düzeyinde n. medianus, retinaculum flexorum'un derininde yer alan KT'den geçerek ele ulaşır. KT'de n. medianus'a, m. flexor digitorum superficialis ve m. flexor digitorum profundus tendonları ile m. flexor pollicis longus tendonu eşlik eder. KT'nin sınırlı hacmi ve rijit osteofibröz yapısı nedeniyle n. medianus, tünel içi basınç artışından etkilenmeye en yatkın yapılardan biridir (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

N. medianus elde thenar kasların büyük bölümünü ve I. ile II. mm. lumbricales'i innerve eder. Ayrıca ilk üç parmak ile dördüncü parmağın radyal yarısının palmar yüzüne ve bu parmakların distal dorsal bölümlerine duyu innervasyonu sağlar. Bu motor ve duyu fonksiyonları nedeniyle KT düzeyindeki kompresyon, thenar kas güçsüzlüğüne ve karakteristik duyu bozukluklarına yol açar (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

3.1. N. Medianus Dalları

3.1.1. N. Medianus'un Ön Kol Bölgesinde Verdiği Dallar

Rami musculares: N. medianus'un ön kol fleksör kompartmanındaki kasların büyük bölümünü innerve eden dallarıdır. Bu dallar özellikle m. pronator teres, m. flexor carpi radialis, m. palmaris longus ve m. flexor digitorum superficialis kaslarına dağılım gösterir (Tablo 2) (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

N. interosseus anterior: Ön kolun proksimalinde n. medianus'tan ayrılır ve a. interossea anterior ile birlikte seyrederek ön kolda m. flexor pollicis longus, m. flexor digitorum profundus'un lateral yarısı ve m. pronator quadratus'u innerve ederek el bileği düzeyinde sonlanır (Tablo 2) (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

Ramus palmaris nervi mediani: Ön kolun alt kısmında, n. medianus'un radyal tarafından ayrılan ön koldaki son dal olarak ayrılır. Bu dal KT'ye girmeden önce ayrılır ve retinaculum flexorum'un yüzeyinden geçerek thenar bölge derisinin duyu innervasyonunu sağlar. Bu nedenle KTS'de thenar bölge üzerindeki deri duyusu genellikle korunmaktadır (Tablo 2) (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

3.1.2. N. Medianus'un El Bölgesinde Verdiği Dallar

N. medianus, KT'den geçtikten sonra elde motor ve duyu dallarına ayrılır. En önemli motor dalı olan ramus recurrens, m. opponens pollicis, m. abductor pollicis brevis ve m. flexor pollicis brevis'in yüzeyel başını innerve ederek başparmağın abduksiyon, fleksiyon ve opozisyon hareketlerine katkı sağlar. N. medianus ayrıca I. ve II. lumbrikal kaslara nn. digitales palmares communes'ten ayrılan motor dallar gönderir (Tablo 2) (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

Duyusal innervasyon ise nn. digitales palmares communes ve bunların terminal uzantıları olan nn. digitales palmares proprii aracılığıyla sağlanır. Bu dallar başparmak, işaret parmağı, orta parmak ve yüzük parmağının radyal yarısının palmar yüzüne duyu lifleri gönderir. Ayrıca aynı parmakların distal falankslarına ait dorsal deri ve tırnak yatağı bölgelerinin duyusal innervasyonundan da sorumludur. N. medianus'un el bölgesindeki bu motor ve duyu dalları, KTS'de görülen thenar kas güçsüzlüğü, kavrama fonksiyonunda azalma ve karakteristik duyu bozukluklarının anatomik temelini oluşturmaktadır (Tablo 2) (Moore et al., 2014; Standring, 2016).

Tablo 2. N. medianus'un anatomik seyri boyunca dallanma paterni, innervasyon alanları ve klinik özellikleri

Bölge	Verdiği dal/dallar	Dal tipi	İnnervasyon / Hedef yapı	Klinik özellikleri/ Önemi
Brachium	Dal vermez	—	—	N. medianus, kol boyunca a. brachialis ile birlikte seyreder
Antebrachium	Rami musculares	Motor	M. pronator teres	Pronasyon
		Motor	M. flexor carpi radialis	El bileği fleksiyonu ve radyal deviasyon
		Motor	M. palmaris longus (varsa)	Aponeurosis palmaris'in gerilmesi, elin fleksiyonu
		Motor	M. flexor digitorum superficialis (II-V parmaklar)	Art. interphalangealis proximalis fleksiyonu
	N. interosseus anterior	Motor	M. flexor pollicis longus	Başparmak fleksiyonu
		Motor	M. pronator quadratus	Ön kol pronasyonu
		Motor	M. flexor digitorum profundus'un radyal yarısı (II ve III. parmaklar)	Art. interphalangealis distalis fleksiyonu

Bölge	Verdiği dal/dallar	Dal tipi	İnnervasyon / Hedef yapı	Klinik özellikleri/ Önemi
Antebrachium distali	Ramus palmaris n. mediani	Duyu	Thenar bölge derisi ve avuç içinin radyal kısmı	KT'ye girmediği için KTS'de genellikle korunur
Canalis carpi	Tünel içinde tipik dal vermez (varyasyonlar için Tablo 3)	—	—	N. medianus'un bu bölgede sıkışması sonucunda KTS oluşur
Palma manus	Ramus recurrens	Motor	M. abductor pollicis brevis	Başparmak abdüksiyonu
		Motor	M. opponens pollicis	Oppozisyon
		Motor	M. flexor pollicis brevis'in yüzeyel başı	Başparmak fleksiyonu
	Nn. digitales palmares communes	Miks	Ortak dijital dallar	Nn. digitales palmares proprii'ye ayrılırlar
	Nn. digitales palmares communes	Motor	I. ve II. lumbrikal kaslar	Art. metacarpophalangealis fleksiyonu, art. interphalangealis proximalis ve art. interphalangealis distalis'e ekstansiyon
	Nn. digitales palmares proprii	Duyu	Başparmak, işaret, orta ve yüzük parmağının radyal yarısının palmar yüzü ile aynı parmakların distal dorsal falanksları ve tırnak yatağı	N. medianus'un ana duyuusal alanı

Kaynak: Moore ve ark. (2014) ve Standring (2016) kaynaklarından yararlanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

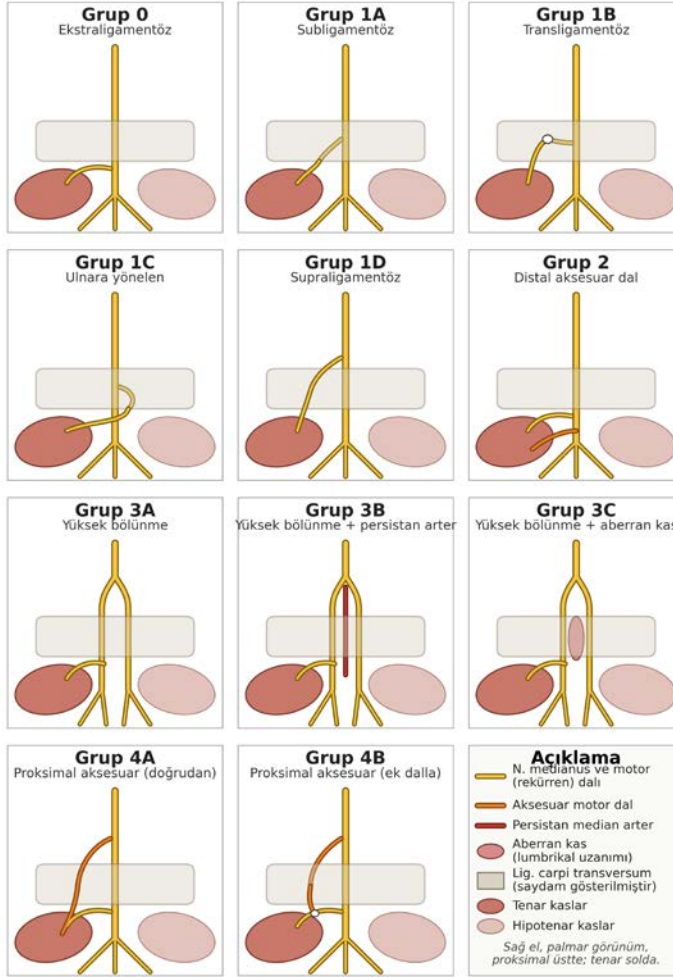
3.2. N. Medianus'un Karpal Tünel Düzeyindeki Varyasyonları

N. medianus birçok anatomik varyasyon gösterebilir. Varyasyonlar sinirin oluşumu, dallanma paterni ve terminal motor dallarının seyri ile ilişkili olabilir. Özellikle KT düzeyindeki varyasyonlar KTS'nin klinik bulgularını

etkileyebilir ve cerrahi girişimler sırasında iyatrojenik yaralanma riskini artırabilir. Bu nedenle bu varyasyonların bilinmesi tanı ve tedavi süreçlerinde önem taşır (Lanz, 1977; Moore et al., 2014).

3.2.1. Motor Dal Varyasyonları

Thenar bölgeye giden motor dalın seyri Lanz (1977) tarafından sınıflandırılmıştır (Şekil 2, Tablo 3). Bu dal n. medianus'un radyal, ulnar veya volar yüzünden ayrılabilir. Lig. carpi transversum ile ilişkisine göre ekstraligamentöz (ligamentin distalinde), subligamentöz (ligamentin derin yüzünde, tünel içinde), transligamentöz (ligamenti delerek) veya supraligamentöz (ligamentin yüzeyinde) seyredebilir. Lanz (1977), 246 el üzerindeki çalışmasında thenar dalın %46'sında ekstraligamentöz, %31'inde subligamentöz ve %23'ünde transligamentöz seyir bildirmiştir. Henry ve ark.'nın 31 çalışmayı kapsayan meta-analizinde havuzlanmış oranlar sırasıyla %75,2, %13,5 ve %11,3'tür. Bu varyasyonlar KT gevşetme cerrahisinde motor dalın korunması açısından önemlidir (Henry et al., 2015). Transligamentöz seyir gösteren motor dalın cerrahi sırasında kesildiği olgular bildirilmiştir (Kang et al., 2022).



Şekil 2. N. medianus'un karpal tünel düzeyindeki varyasyonlarının Lanz (1977) sınıflamasına göre şematik gösterimi (yazar tarafından çizilmiştir). Grup 0: ekstraligamentöz thenar dal. Grup 1: thenar dal varyasyonları; 1A: subligamentöz, 1B: transligamentöz, 1C: ulnara yönelen, 1D: supraligamentöz. Grup 2: distal aksesuar thenar dal. Grup 3: n. medianus'un yüksek seviyede bölünmesi; 3A: eşlik eden arter veya kas olmaksızın, 3B: persistan median arter ile birlikte, 3C: lumbrikal kas eşliğinde. Grup 4: proksimal aksesuar thenar dal; 4A: thenar kaslara doğrudan katılım, 4B: ek dal aracılığıyla katılım. Sağ el, palmar görünüm.

Tablo 3. Lanz sınıflamasına göre n. medianus'un karpal tünel içerisindeki anatomik varyasyonları

Lanz grubu	Varyasyon	Temel anatomik özellik	Cerrahi önemi
0	Ekstraligamentöz thenar dal	Rekürren motor dal, retinaculum flexorum'un distalinde ayrılır ve ligamentin dışından thenar kaslara ulaşır.	En sık görülen seyirdir. Gevşetme insizyonu proksimalde kaldığı sürece dal ligament kesisinin dışında kalır.
1A	Subligamentöz	Dal tünel içinde ayrılır, ligamentin derin yüzü boyunca ilerleyerek thenar kaslara ulaşır.	Dal ligamentin hemen altında seyrettiği için ligament kesilirken dikkatli diseksiyon gerekir.
1B	Transligamentöz	Dal tünel içinde ayrılır ve ligamenti delerek thenar kaslara ulaşır.	Dal kesilecek ligamentin içinden geçtiği için gevşetme sırasında yaralanma riski taşır (Kang et al., 2022).
1C	Ulnara yönelen	Dal sinirin ulnar tarafından çıkar ve radyale doğru yönelerek thenar kaslara ulaşır.	Dalın çıkış yeri insizyon hattına yaklaşabilir. Ulnar yönlü çıkış, cerrahi sırasında dalın görülmesini zorlaştırabilir.
1D	Supraligamentöz	Dal ligamentin yüzeyinden ilerleyerek thenar kaslara ulaşır.	Dal ligamentin üzerinde olduğu için ligament kesisi öncesi cilt ve fasya diseksiyonunda korunmalıdır.
2	Distal aksesuar thenar dal	Rekürren dala ek olarak tünelin distalinde ikinci bir motor dal bulunur.	Distal bölgede birden fazla dal bulunabilir, bu bölge cerrahi sırasında dikkatle ele alınmalıdır.
3A	Yüksek bölünme	N. medianus tünele girmeden önce iki ana dala ayrılır (bifid sinir).	İki ayrı sinir gövdesi olabileceği için tünelin tamamı gözden geçirilmelidir.

Lanz grubu	Varyasyon	Temel anatomik özellik	Cerrahi önemi
3B	Yüksek bölünme, persistan median arter ile	Bifid sinire persistan median arter eşlik eder.	Arter tünel içinde ek hacim oluşturur. Cerrahi sırasında arter yaralanma olasılığı akılda tutulmalıdır.
3C	Yüksek bölünme, lumbrikal kas eşliğinde	Bifid sinire lumbrikal kas uzanımı eşlik eder.	Kas uzanımı tünel hacmini daraltabilir.
4A	Proksimal aksesuar thenar dal (doğrudan)	Tünelin proksimalinden çıkan aksesuar dal doğrudan thenar kaslara katılır.	Dal tünel dışında seyrettiği için insizyonun proksimal ucunda dikkat gerekir.
4B	Proksimal aksesuar thenar dal (ek dalla)	Aksesuar dal, iletişim dalı aracılığıyla thenar kaslara katılır.	4A ile aynı.

Kaynak: Lanz (1977) sınıflamasına göre yazar tarafından hazırlanmıştır. "Cerrahi önemi" sütunu yazar değerlendirmesidir.

3.2.2. Yüksek Bölünme (Bifid N. Medianus)

N. medianus'un yüksek bölünmesi (bifid n. medianus, Lanz grup 3), sinirin lig. carpi transversum'un proksimalinde iki ana dala ayrıldığı nadir bir varyasyondur. Henry ve ark.'nın meta-analizinde havuzlanmış prevalans %2,6 olarak bildirilmiştir (Henry et al., 2015). Bu durumda cerrahi sırasında her iki dalın da değerlendirilmesi önemlidir (Lanz, 1977). Bifid n. medianus ayrıca KTS için anatomik bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir (Asghar et al., 2022).

3.2.3. Aberran Kaslara Eşlik Eden N. Medianus:

N. medianus varyasyonları, aksesuar veya aberran kas yapıları ile birlikte görülebilmektedir. Özellikle aksesuar lumbrikal kaslar, anormal yerleşimli fleksör kas lifleri ve persistan median arter gibi anatomik oluşumlar KT içerisindeki hacmi daraltarak n. medianus üzerinde kompresyona neden olabilir. Bu varyasyonların bilinmesi, KTS etiopatogenezinin

anlaşılması ve cerrahi girişimlerin planlanması açısından önem taşımaktadır (Lanz, 1977; Moore et al., 2014; Standring, 2016).

4. SONUÇ

Karpal tünel, tabanı karpal kemikler, tavanı retinaculum flexorum ve onun esas bölümü olan lig. carpi transversum tarafından oluşturulan osteofibröz bir kanaldır. Tünelden dokuz fleksör kas tendonu ile n. medianus geçer. Tünelin sınırlı hacmi ve rijit yapısı nedeniyle n. medianus, tünel içi basınç artışından etkilenmeye yatkındır. N. medianus ön kolda yüzeysel fleksör kaslara, m. flexor pollicis longus'a, m. flexor digitorum profundus'un lateral yarısına ve m. pronator quadratus'a dallar verir. Elde ise thenar kaslara ve I.–II. lumbrikal kaslara motor, ilk üç parmak ile dördüncü parmağın radyal yarısına duyu innervasyonu sağlar.

KT düzeyinde en önemli varyasyonlar, thenar kasları innerve eden rekürren motor dalın lig. carpi transversum ile ilişkisi, n. medianus'un yüksek bölünmesi ve bu bölünmeye eşlik edebilen persistan median arter ile aberran kas yapılarıdır. Meta-analiz verilerine göre rekürren motor dal olguların büyük çoğunluğunda ekstraligamentöz seyreder; transligamentöz seyir daha az görülür ancak cerrahi sırasında yaralanma riski taşır. Yüksek bölünme ise nadir bir varyasyondur (%2,6) ve KTS için anatomik bir risk faktörü olarak değerlendirilmektedir (Asghar et al., 2022; Henry et al., 2015; Lanz, 1977). Bu ilişkilerin ve varyasyonların bilinmesi, KTS'nin tanısı, tedavisi ve cerrahi planlaması açısından önemlidir.

KAYNAKÇA

- Alemdar, M. (2016). Ring finger sensorial conduction studies in grading carpal tunnel syndrome. *J Back Musculosket Rehabil*, 29(2), 309-315. doi:10.3233/BMR-150631
- Asghar, A., Patra, A., Satish Ravi, K., Tubbs, R. S., Kumar, A., & Naaz, S. (2022). Bifid median nerve as an anatomical risk factor for carpal tunnel syndrome: A meta-analysis. *Clin Anat*, 35(7), 946-952. doi:10.1002/ca.23900
- Atik, B. S. (2019). *Karpal tünel sendromuna radyoanatomik bakış* (Master's thesis). Balıkesir Üniversitesi,
- Gebrye, T., Jeans, E., Yeowell, G., Mbada, C., & Fatoye, F. (2024). Global and Regional Prevalence of Carpal Tunnel Syndrome: A Meta-Analysis Based on a Systematic Review. *Musculoskeletal Care*, 22(4), e70024. doi:10.1002/msc.70024
- Goitz, R. J., Fowler, J. R., & Li, Z. M. (2014). The transverse carpal ligament: anatomy and clinical implications. *J Wrist Surg*, 3(4), 233-234. doi:10.1055/s-0034-1394150
- Hassan, A., Beumer, A., Kuijer, P., & van der Molen, H. F. (2022). Work-relatedness of carpal tunnel syndrome: Systematic review including meta-analysis and GRADE. *Health Sci Rep*, 5(6), e888. doi:10.1002/hsr2.888
- Henry, B. M., Zwinczewska, H., Roy, J., Vikse, J., Ramakrishnan, P. K., Walocha, J. A., & Tomaszewski, K. A. (2015). The Prevalence of Anatomical Variations of the Median Nerve in the Carpal Tunnel: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLoS One*, 10(8), e0136477. doi:10.1371/journal.pone.0136477
- Isogai, S., Murakami, G., Wada, T., Akita, K., Yamashita, T., & Ishii, S. (2002). Laminar configuration of the transverse

- carpal ligament. *J Orthop Sci*, 7(1), 79-83. doi:10.1007/s776-002-8424-2
- Kang, D. H., Lee, K. C., Kim, J. Y., Seo, H., Kim, J. W., & Kim, J. D. (2022). Repair of severed recurrent thenar branch of median nerve after open carpal tunnel release. *Trauma Case Rep*, 42, 100690. doi:10.1016/j.tcr.2022.100690
- Lanz, U. (1977). Anatomical Variations of the Median Nerve in the Carpal Tunnel. *The Journal of Hand Surgery*, 2(1), 44-53.
- Li, Z. M., Marquardt, T. L., Evans, P. J., & Seitz, W. H., Jr. (2014). Biomechanical role of the transverse carpal ligament in carpal tunnel compliance. *J Wrist Surg*, 3(4), 227-232. doi:10.1055/s-0034-1394136
- Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. R. (2014). *Clinically Oriented Anatomy* (7 ed.). Philadelphia: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins.
- Pacek, C. A., Chakan, M., Goitz, R. J., Kaufmann, R. A., & Li, Z. M. (2010). Morphological analysis of the transverse carpal ligament. *Hand (N Y)*, 5(2), 135-140. doi:10.1007/s11552-009-9219-2
- Padua, L., Coraci, D., Erra, C., Pazzaglia, C., Paolasso, I., Loreti, C., . . . Hobson-Webb, L. D. (2016). Carpal tunnel syndrome: clinical features, diagnosis, and management. *Lancet Neurol*, 15(12), 1273-1284. doi:10.1016/S1474-4422(16)30231-9
- Padua, L., Cuccagna, C., Giovannini, S., Coraci, D., Pelosi, L., Loreti, C., . . . Hobson-Webb, L. D. (2023). Carpal tunnel syndrome: updated evidence and new questions. *Lancet Neurol*, 22(3), 255-267. doi:10.1016/S1474-4422(22)00432-X

Serarslan, Y., Melek, İ. M., & Duman, T. (2008). Karpal Tünel Sendromu. *Pamukkale Tıp Dergisi*, 1(1), 45-49.

Standring, S. (2016). *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice* (41 ed.): Elsevier.

Şen, T., & Kömürcü, M. (2011). El bileği ekleminin ve karpal tünelin anatomisi. *Totbid Dergisi*, 10(1), 18-24.

Vanhees, M., Verstreken, F., & van Riet, R. (2015). What does the transverse carpal ligament contribute to carpal stability? *J Wrist Surg*, 4(1), 31-34. doi:10.1055/s-0034-1398486

Yu, H.-L., Chase, R. A., & Strauch, B. (2004). *Atlas of Hand Anatomy and Clinical Implications*: Mosby.

TIBBİ GÖRÜNTÜLERDE NİCEL ANATOMİK ANALİZ: ANATOMİK LANDMARKLAR, MORFOMETRİ VE MORPHOMICS

Emrah ALTUNTAŞ¹

1. GİRİŞ

Anatomik bir ölçümün anlamı, ölçülen yapının sınırlarının nasıl belirlendiğine bağlıdır. Kumpasla iki nokta arasındaki uzaklığın alınması ve bilgisayarlı tomografi görüntüsünden bir organ hacminin hesaplanması farklı teknikler gerektirir; her ikisinde de anatomik referansın açıkça tanımlanması gerekir. Referans noktaları ve eğri veya yüzey üzerindeki yarı-landmarklar, homolog geometrik özelliklerin temsilinde kullanılır (Bardua, Felice, Watanabe, Fabre, & Goswami, 2019; Bookstein, 1991; Gunz & Mitteroecker, 2013; Mitteroecker & Schaefer, 2022; Wärmländer, Garvin, Guyomarc'h, Petaros, & Sholts, 2019; Zelditch, Swiderski, & Sheets, 2012). Segmentasyon ise hedef yapının alan veya hacim sınırlarını tanımlar (Fedorov et al., 2012; Yushkevich et al., 2006).

Dijital görüntüleme, iki boyutlu ölçümlerin yanı sıra kesitsel alan, hacim ve üç boyutlu şekil analizine olanak tanır. ImageJ ve Fiji görüntü analizi için, 3D Slicer ve ITK-SNAP ise hacimsel görüntüleme ve segmentasyon için kullanılabilir (Fedorov et al., 2012; Rueden et al., 2017; Schindelin et al., 2012; Schneider, Rasband, & Eliceiri, 2012; Yushkevich et al., 2006). Buna karşın piksel aralığı ve projeksiyon büyütmesi

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Samsun Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Anatomi Anabilim Dalı, Samsun, Türkiye. ORCID: 0000-0002-1180-6275.

(National Electrical Manufacturers Association, 2026), BT çekim ve rekonstrüksiyon parametreleri (Lortie et al., 2022; Yoo & Choi, 2025) ile gözlemci kararları (Engelkes et al., 2019; Fruciano, 2016) ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Bu kaynaklar biyolojik değişkenlikten ayrı değerlendirilmelidir.

Analitik morphomics, rutin tanısal görüntülerden anatomik yapı ve vücut kompozisyonu ölçülerinin elde edilmesine dayanır. Kas alanı ve atenuasyonu, yağ dokusu kompartımanları, kemik özellikleri ve vasküler kalsifikasyon bu alanda incelenen değişkenlerdir (O'Regan, O'Regan, Maher, & Ryan, 2024; Pickhardt et al., 2021). Kas ve yağ dokusu ölçümleri için farklı yazılım ve BT kesit yaklaşımları da geliştirilmiştir (Englesbe et al., 2012; Mourtzakis et al., 2008; Mullie & Afilalo, 2019). Bu bölümde morphomics terimi, tek bir doğrusal ölçümün ötesine geçen ve anatomik yapıların nicel özelliklerini birlikte ele alan daha geniş bir anlamda kullanılmaktadır. Arşiv görüntülerinin yeniden kullanılması araştırmaya elverişlidir; ancak farklı endikasyonlar ve görüntüleme protokolleri karşılaştırılabilirliği sınırlandırabilir.

Bu bölümün amacı, tıbbi görüntülerde nicel anatomik analizin temel yaklaşımlarını anatomik landmarklar, geleneksel ve geometrik morfometri, segmentasyon ve morphomics çerçevesinde incelemektir. Anatomik referans seçimi, görüntüden ölçüme geçiş, ölçüm hatası ve otomasyonun yöntemsel sınırları da ele alınmaktadır. Klinik sonuçlarla bildirilen ilişkiler uygulama örnekleri olarak kullanılmış, gözlemsel bulgulardan nedensel çıkarım yapılmamıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Geleneksel morfometri uzunluk, genişlik, açı, alan ve hacim gibi ölçülerle çalışır. Bu ölçüler anatomik olarak anlaşılır olsa da yapının tüm geometrisini temsil etmeyebilir. Benzer

uzunluklara sahip iki kemiğin konturları farklı olabilir. Geometrik morfometri, homolog landmark koordinatlarını birlikte değerlendirerek bu farklılıkları inceler. Genelleştirilmiş Procrustes analizi konum, dönme ve izotropik ölçek değişimlerini ayırır; geriye kalan koordinat bilgisi şekil analizinde kullanılır (Bookstein, 1991; Mitteroecker & Schaefer, 2022; Zelditch et al., 2012). Boyutun biyolojik önemi varsa centroid size ve allometrik ilişkiler ayrıca değerlendirilmelidir.

Morphomics terimi farklı araştırma alanlarında aynı kapsamda kullanılmaz. Klinik görüntüleme literatüründeki analitik morphomics, özellikle BT görüntülerinden kas ve yağ dokusu gibi vücut kompozisyonu özelliklerinin çıkarılmasını anlatır (Mourtzakis et al., 2008; Mullie & Afilalo, 2019; O'Regan et al., 2024). MR ile de nicel kas ve yağ değerlendirmeleri yapılabilir (Borga, 2018). Bu bölümde morphomics, tıbbi görüntülerden çıkarılan ve tek bir doğrusal ölçünün ötesine geçen nicel anatomik özellikler bütünü anlamında kullanılmıştır. Terim yalnızca kas ve yağ ölçümüyle sınırlandırılmamıştır.

Morphomics ve radiomics aynı görüntüler üzerinde uygulanabilse de ürettikleri özelliklerin ağırlığı farklıdır. Radiomics, tanımlanan görüntü bölgesinden yoğunluk, doku örüntüsü, biçim ve filtrelenmiş görüntüye ait hesaplamalı özellikler çıkarır (Gillies, Kinahan, & Hricak, 2016; Lambin et al., 2012; Zwanenburg et al., 2020). Morphomics daha çok anatomik yapıların boyutunu, konumunu, biçimini ve doku kompartımanlarını doğrudan ölçer. Örneğin bir kasın kesitsel alanı morphomic ölçü olarak değerlendirilebilirken aynı bölgenin gri-seviye eş oluşturma matrisi özellikleri radiomics kapsamındadır. Biçim özellikleri iki yaklaşımda da bulunabilir. Bu nedenle raporlamada kullanılan terim kadar ölçüm bölgesinin ve hesaplama yönteminin tanımlanması da gereklidir.

Tablo 1 Nicel görüntü analizindeki temel yaklaşımların karşılaştırılması

Yaklaşım	Temel veri	Tipik çıktı	Başlıca güçlük
Geleneksel morfolometri	Uzaklık, açı, alan ve oran	Doğrudan yorumlanabilen tekil ölçüler	Karmaşık şeklin ayrı değişkenlere indirgenmesi
Geometrik morfolometri	İki veya üç boyutlu homolog koordinatlar	Şekil değişimi, centroid size, deformasyon görselleştirmesi	Landmark karşılıklılığı, boyut indirgeme ve allometri
Morphomics	Anatomik bölge, yüzey veya hacim	Kas, yağ, kemik ve organlara ait alan, hacim, yoğunluk ve şekil ölçütleri	Protokol heterojenliği, segmentasyon ve referans değerler
Radiomics	Tanımlı ilgi bölgesindeki voksellerin değerleri	Birinci derece, doku, biçim ve filtre tabanlı özellikler	Özellik tanımı, hesaplama standardizasyonu ve aşırı uyum

3. ANATOMİK LANDMARKLARIN SEÇİMİ VE TANIMLANMASI

3.1. Landmark Kavramı ve Biyolojik Karşılıklılık

Landmark, farklı örneklerde aynı anatomik ilişkiyi temsil etmesi beklenen noktadır. Görüntü üzerinde belirgin olması, tek başına biyolojik karşılıklılığı garanti etmez. Sütür kesişimleri, eklem kenarları veya foraminal merkezler buna örnek verilebilir. Ossifikasyon, yaş, patoloji, cerrahi girişimler ve görüntüleme düzlemi aynı adla işaretlenen noktaların konumunu veya yorumunu değiştirebilir.

Landmark seçilirken noktanın araştırma sorusuyla ilişkisi, görüntüde belirlenebilirliği ve tekrar ölçümlerdeki kararlılığı değerlendirilmelidir. Bir noktanın kolay işaretlenmesi, anatomik geçerlilik için yeterli değildir. Bookstein tipolojisi noktaları sınıflandırmada yardımcı olsa da operasyonel tanımların ve gözlemci hatasının ayrıca raporlanması gerekir (Wärmländer et al., 2019).

3.2. Landmark Tipleri ve Yarı-landmarklar

Bookstein sınıflaması, landmarkları anatomik dokuların kesişimi, eğrilik ekstremumu veya diğer yapılara göre geometrik konum gibi özelliklere dayanarak Tip I, Tip II ve Tip III biçiminde ayırır (Bookstein, 1991). Tip I noktalar genellikle sütür birleşimi gibi yerel doku karşılıklılığı güçlü noktalardır. Tip II noktalar bir çıkıntının ucu veya eğriliğin en yüksek olduğu yer gibi geometriyle tanımlanır. Tip III noktalar ise bir eksenin sonu, en geniş veya en dar nokta gibi başka yapılara göre konumlandırılır. Uygulamada aynı landmarkın farklı çalışmalarda farklı tiplere atanabildiği ve tip ile ölçüm tekrarlanabilirliği arasında sabit bir ilişki bulunmadığı bildirilmiştir (Wärmländer et al., 2019). Bu nedenle sınıflama, landmarkın nasıl yerleştirildiğini açıklayan bir dil olarak yararlıdır; kalite derecesi olarak kullanılmamalıdır.

Klasik landmarkların seyrek kaldığı düzgün eğri ve yüzeylerde yarı-landmarklar kullanılır. Eğri yarı-landmarkları kontur boyunca, yüzey yarı-landmarkları ise üç boyutlu ağ üzerinde başlangıç konumlarına yerleştirilir. Ardından bükülme enerjisini veya Procrustes uzaklığını azaltacak biçimde kaydırılarak örnekler arasındaki geometrik karşılıklılık iyileştirilir (Bardua et al., 2019; Gunz & Mitteroecker, 2013). Kaydırma işlemi, noktaları biyolojik olarak yeni landmarklara dönüştürmez; koordinatların eğri veya yüzey geometrisini karşılaştırılabilir biçimde örneklemesini sağlar. Başlangıç şablonu, nokta yoğunluğu, kaydırma ölçütü ve yüzeye projeksiyon yöntemi sonuçları etkileyebileceği için raporlanmalıdır.

Tablo 2. Landmark türleri ve uygulamadaki değerlendirme ölçütleri

Tür	Tanım	Örnek	Başlıca risk
Tip I	Yerel doku veya yapıların kesişimine dayanan nokta	Kraniyal sütürlerin kesişimi	Sütür kapanması veya görüntü çözünürlüğü nedeniyle görünürlüğün azalması
Tip II	Yerel eğrilik veya anatomik çıkıntının ekstremumu	Bir kemik çıkıntısının en uç noktası	Eğrilik değişiminin geniş bir alana yayılması ve düzleme bağımlılık
Tip III	Uzaklık, eksen veya başka yapılara göre geometrik olarak tanımlanan nokta	Bir yapının en geniş çapındaki uç nokta	Referans eksenin değişmesiyle konumun değişmesi
Eğri yarı-landmarkı	Homolog eğri boyunca kaydırılan örnekleme noktası	Mandibula alt kenarı boyunca noktalar	Başlangıç aralığı ve kaydırma ölçütünün etkisi
Yüzey yarı-landmarkı	Üç boyutlu yüzey üzerinde kaydırılan örnekleme noktası	Kranial kubbe yüzey ağı	Şablon, ağ kalitesi ve yüzeye projeksiyon hatası

3.3. Operasyonel Tanım ve Landmark Sözlüğü

Landmark protokolünde yalnızca anatomik adın verilmesi yeterli değildir. İşaretlenecek yapı, yön, düzlem, görüntüleme görünümü, komşu referanslar ve belirsiz olgularda uygulanacak karar kuralı belirtilmelidir. Örneğin femur başı merkezinin hangi kesitte, hangi kontur ve hangi geometrik yaklaşımla belirlendiği açıklanmadığında aynı ad altında farklı koordinatlar üretilebilir. BT'de kortikal sınırın seçimi de eşikleme ve pencereleme koşullarından etkilenebilir.

Landmark sözlüğünde örnek görüntülerin kullanılması, sözel tanımın farklı yorumlarını azaltır. İdeal bir sözlükte noktanın doğru yerleşimi, kabul edilebilir varyantı ve dışlama gerektiren durum ayrı örneklerle gösterilir. Eğitim seti araştırma örneklerinden ayrılmalı; gözlemciler veri toplamadan önce ortak örnekler üzerinde uyum sağlamalıdır. Görüntülerin kimlik ve

sonuç değişkenlerinden körlenmesi, beklentiye bağlı yerleştirme farkını azaltır. Tekrarlanan işaretlemelerde ilk koordinatların görünür bırakılması, bağımsız tekrar varsayımını bozar.

4. GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMİNE BAĞLI ANATOMİK REFERANSLAR

Landmarkın görünür konumu görüntüleme fiziğinden bağımsız değildir. Projeksiyon radyografisi üç boyutlu anatomiye iki boyutlu düzleme aktarır; üst üste binme, rotasyon ve kaynak–nesne–dedektör geometrisi ölçümü etkiler. DICOM Pixel Spacing alanı görüntüdeki piksel merkezleri arasındaki fiziksel uzaklığı tanımlayabilir; projeksiyon görüntülerinde Imager Pixel Spacing dedektör düzlemine ait olabilir. DICOM standardı, geometrik büyütme veya bilinen boyuttaki bir cisimle düzeltme yapıldığında kalibrasyon türünün ayrıca belirtilmesini öngörür (National Electrical Manufacturers Association, 2026). Bu ayırım yapılmadan pikseli milimetreye çevirmek, hasta düzlemindeki gerçek uzunluğu garanti etmez.

BT, izotropik veya izotropiğe yakın hacim verisi sağlayabilir; yine de kesit kalınlığı ve voksel boyutu küçük yapıların sınırında kısmi hacim etkisi yaratır. Multiplanar rekonstrüksiyon, landmarkın anatomik eksene uygun düzlemde görülmesini sağlar. Ölçüm tek bir aksiyel kesitte yapılıyorsa vertebral seviye, kesit seçme kuralı ve görüntü fazı tanımlanmalıdır. Kontrast madde, tüp voltajı, kesit kalınlığı, rekonstrüksiyon algoritması ve cihaz farklılığı özellikle atenüasyon tabanlı kas kalitesi ölçülerini değiştirebilir (Lortie et al., 2022; Yoo & Choi, 2025). Alan ve hacim ölçüleri de segmentasyon eşiği veya sınır görünürlüğü üzerinden etkilenebilir.

MR görüntüleme, yumuşak doku kontrastı ve iyonizan radyasyon içermemesi nedeniyle kas ve yağ kompartımanları ile

beyin ve eklem yapılarının nicel analizinde kullanılır. Ancak sinyal şiddeti mutlak bir doku ölçeği değildir; sekans, alan gücü, bobin duyarlılığı, tekrar ve eko zamanı ile düzeltme yöntemlerine bağlıdır. Yağ-su ayrımı veya proton yoğunluklu yağ fraksiyonu gibi nicel yöntemler, standart anatomik MR sinyalinin farklı değerlendirilmelidir (Borga, 2018). Ultrasonografi gerçek zamanlı ve erişilebilir olsa da prob basısı, insonasyon açısı ve operatör konumu sınırları değiştirebilir. Üç boyutlu yüzey tarayıcıları dış anatomiye yüksek yoğunlukta örnekler; saç, parlaklık, hareket ve görünmeyen bölgelerde oluşan ağ boşlukları ölçümü etkiler.

Tablo 3. Görüntüleme yöntemlerinde nicel anatomik analizi etkileyen başlıca etmenler

Yöntem	Uygun nicel çıktılar	Kontrol edilmesi gereken etmenler
Projeksiyon radyografisi	Uzunluk, genişlik, açı, oran ve belirli alan ölçüleri	Pozisyon, rotasyon, üst üste binme, büyütme, piksel kalibrasyonu
Bilgisayarlı tomografi	Alan, hacim, yüzey, şekil, atenuasyon ve kalsifikasyon	Voksel boyutu, kesit kalınlığı, kV, kontrast fazı, rekonstrüksiyon çekirdeği
Manyetik rezonans	Hacim, şekil, kas ve yağ dağılımı, sekansa özgü nicel haritalar	Sekans, alan gücü, bobin, sinyal düzensizliği, hareket ve distorsiyon
Ultrasonografi	Kalınlık, kesitsel alan, ekojenite ve dinamik konum	Prob basısı, insonasyon açısı, cihaz ayarı ve operatör bağımlılığı
Yüzey taraması	Dış yüzey koordinatları, kontur, hacim ve asimetri	Poz, hareket, görünmeyen alan, ağ temizleme ve ölçek kalibrasyonu

5. GÖRÜNTÜDEN NİCEL VERİYE ÖLÇÜM İŞ AKIŞI

Nicel analiz için önce ölçülmesi amaçlanan anatomik yapı ve onun biyolojik karşılığı tanımlanır. Görüntüler bu hedefe uygun çözünürlük, kapsam ve kalite ölçütleriyle seçilir. Arşiv verilerinde çekim protokolleri, hasta pozisyonu, artefaktlar,

patoloji ve önceki cerrahi işlemler bakımından farklılıklar bulunabilir. Bu nedenle dahil etme ve dışlama koşullarının ölçüme başlamadan önce belirlenmesi, mümkün olduğunda sonuç değişkeninden bağımsız uygulanması gerekir.

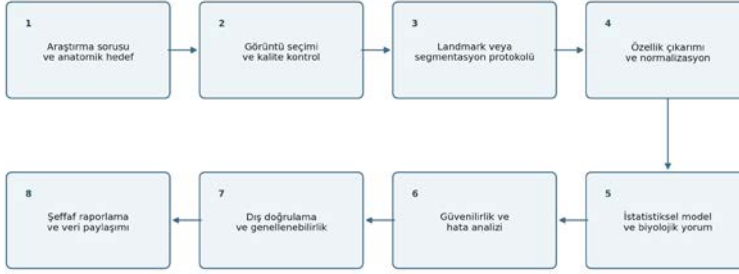
Ön işleme, ölçümün gerektirdiği en düşük düzeyde tutulmalıdır. Yeniden örnekleme, filtreleme, kontrast düzenleme ve yüzey yumuşatma koordinatları veya sınırları değiştirebilir. Bu işlemler araştırma yazılımının varsayılan ayarlarıyla bırakılmamalı; algoritma, parametre ve hedef çözünürlük kaydedilmelidir. BT ve MR hacimlerinde hasta koordinat sistemi korunmalı, sağ-sol yönü kontrol edilmeli ve DICOM dönüşümleri doğrulanmalıdır. Ekran görüntüsü üzerinden ölçüm yapılması, uzamsal metadata ve dinamik pencereleme bilgisini kaybettirebilir.

Manuel ölçümde yazılım adı ve sürümü kadar, ölçüm aracının nasıl kullanıldığı da önemlidir. ImageJ ve Fiji iki boyutlu ölçüm, eşikleme ve ilgi bölgesi analizi için; 3D Slicer ile ITK-SNAP hacim görüntüleme ve segmentasyon için yaygın açık kaynaklı seçeneklerdir (Fedorov et al., 2012; Rueden et al., 2017; Schindelin et al., 2012; Schneider et al., 2012; Yushkevich et al., 2006). Yazılımın açık kaynaklı olması sonuçların kendiliğinden yeniden üretilebilir olduğu anlamına gelmez. Eklenti sürümü, makro veya betik, ölçüm birimi, yuvarlama basamağı ve görüntüye uygulanan dönüşümler kaydedilmelidir. Otomatik işlem hatlarında model sürümü, ağırlık dosyası ve ön-son işleme adımları aynı öneme sahiptir.

Ölçüme geçmeden önce küçük bir pilot görüntü grubunda landmark tanımları, segmentasyon sınırları ve kayıt formu denenebilir. Protokolde değişiklik yapılırsa önceki görüntülerin de aynı kurala göre yeniden işlenmesi gerekir. Nihai veri setinde görüntü ve seri kimliği, taraf, düzlem, gözlemci, ölçüm tarihi ve kalite kontrol kararı saklanmalıdır.

Landmark koordinatları ve segmentasyon maskelerinin korunması, olası sistematik hataların daha sonra incelenmesini kolaylaştırır.

Şekil 1. Nicel anatomik analiz için önerilen iş akışı



6. LANDMARKLARDAN MORFOMETRİK DEĞİŞKENLERE GEÇİŞ

Landmark koordinatları, araştırma sorusuna göre farklı değişkenlere dönüştürülebilir. İki nokta arası Öklid uzaklığı uzunluğu; üç nokta veya iki doğru arasındaki ilişki açısı; kapalı kontur alanı ve çevreyi verir. Oranlar bireyler arası boyut farkını kısmen azaltabilir, fakat pay ve paydadaki ölçüm hatasını birlikte taşır. Oran kullanımı, allometrik ilişkinin doğrusal ve orijinden geçen bir yapı gösterdiği varsayımını da örtük olarak içerebilir. Bu nedenle boyut düzeltmesi için oran, regresyon veya geometrik morfometri seçimi biyolojik modele göre yapılmalıdır.

Geometrik morfometride koordinatların tamamı aynı yapılandırma içinde değerlendirilir. Genelleştirilmiş Procrustes analizi çeviri, dönme ve ortak ölçek farkını kaldırır; centroid size boyut göstergesi olarak saklanır (Mitteroecker & Schaefer, 2022; Zelditch et al., 2012). Şekil uzayındaki varyasyon temel bileşenler analiziyle özetlenebilir, grup farkları veya

kovaryatlarla ilişkiler çok değişkenli modellerle incelenebilir. Başlıca bileşenlerin görsel çekiciliği, biyolojik anlamı garanti etmez. Eksendeki deformasyonun anatomik yorumuyla açıklanan varyans oranı ve örneklem dağılımı birlikte değerlendirilmelidir. Landmark sayısının örneklem büyüklüğüne göre yüksek olduğu analizlerde boyut indirgeme ve doğrulama aynı veri üzerinde yapılırsa aşırı uyum riski artar.

İki boyutlu analiz, üç boyutlu yapının projeksiyonda yeterli ve tutarlı biçimde temsil edildiği durumlarda uygundur. Derinlik yönündeki varyasyon araştırma grupları arasında sistematikse, iki boyutlu koordinatlar biyolojik şekil farkını projeksiyon farkıyla karıştırabilir. Üç boyutlu yüzeylerin iki boyutlu ekran görüntüsüne dönüştürülmesi de kamera açısı ve perspektif nedeniyle aynı sorunu üretir. Bu karar, daha fazla boyutun her zaman daha iyi olduğu varsayımıyla değil, ölçülecek yapının geometrisi ve görüntü kalitesiyle verilmelidir.

7. SEGMENTASYON VE MORPHOMİCS

7.1. Manuel, Yarı Otomatik ve Otomatik Segmentasyon

Segmentasyon, görüntü elemanlarının anatomik yapı veya doku sınıflarına ayrılmasıdır. Manuel yöntemde sınırlar gözlemci tarafından çizilir; anatomik denetime elverişlidir ancak zaman alır. Yarı otomatik yöntemlerde eşikleme, bölge büyütme veya atlas tabanlı işlemler başlangıç maskesi oluşturur ve gözlemci düzeltme yapar. Otomatik yöntemler ise önceden tanımlanan algoritmalarla maske üretir. Otomatik çıktının kalite kontrolü ve gerektiğinde düzeltilmesi yine ayrı bir iş akışı olarak planlanmalıdır.

Referans maske de hatasız bir gerçek değildir. Bir anatomik sınır keskin değilse uzmanlar arasında anlamlı farklılık

bulunabilir. Eğitim verisindeki uzlaşmış maske, belirli bir protokolün uygulamasıdır. Modelin bu maskeye yüksek benzerlik göstermesi, başka bir anatomik tanım altında aynı başarıyı göstereceğini kanıtlamaz. Bu nedenle otomatik yöntemler değerlendirilirken referans maskeyi oluşturan gözlemcilerin sayısı, uzmanlığı, uzlaşma yöntemi ve gözlemciler arası değişkenlik bildirilmelidir.

7.2. Analitik Morphomics ve Vücut Kompozisyonu

Analitik morphomics'in klinik uygulamalarından birinde Englesbe ve arkadaşları, BT'den elde edilen çekirdek kas ölçüleri ile cerrahi sonuçlar arasındaki ilişkileri incelemiştir (2012). Kas ve yağ kompartımanlarına ilişkin ölçüm yaklaşımları başka hasta gruplarında da kullanılmıştır (Linder, Denecke, & Busse, 2024; Mourtzakis et al., 2008; Mullie & Afilalo, 2019; O'Regan et al., 2024). Rutin klinik görüntüler bu yolla tanısal amaçlarının dışında nicel veri sağlayabilir. Bununla birlikte gözlemsel bir ilişki, ölçülen anatomik özelliğin klinik sonucun nedeni olduğunu veya tek başına karar vermek için yeterli bulunduğunu göstermez.

Vücut kompozisyonu analizinde belirli bir vertebral düzeydeki kesitsel alan, toplam vücut doku miktarı için vekil ölçü olarak kullanılabilir. L3 düzeyi kas ve yağ ölçümlerinde sık kullanılır (Mourtzakis et al., 2008; Yoo & Choi, 2025). Tek kesit yaklaşımı mevcut klinik görüntülerle uygulanabilirken hacimsel segmentasyon dokuların üç boyutlu dağılımını değerlendirmeye imkân verir. Mai ve arkadaşlarının sistematik derlemesinde, BT üzerinden otomatik üç boyutlu vücut kompozisyonu segmentasyonunun uygulanabilirliği ve hasta grupları, referans maskeler ile görüntü kapsamındaki heterojenlik değerlendirilmiştir (2023). Bedrikovetski ve arkadaşları ise daha geniş olarak BT tabanlı yapay zekâ

yöntemleriyle vücut kompozisyonu ve sarkopeni değerlendirmelerini sistematik olarak incelemiştir (2022).

Kas alanı miktarı, ortalama atenüasyon ise BT’de doku bileşimiyle ilişkili farklı bir özelliktir. Düşük kas atenüasyonu çoğu zaman yağ infiltrasyonu veya düşük kas kalitesiyle ilişkilendirilir; fakat kontrast fazı, tüp voltajı ve rekonstrüksiyon parametreleri aynı ölçüyü değiştirebilir (Lortie et al., 2022; Yoo & Choi, 2025). “Sarkopeni” terimi yalnızca görüntüde düşük kas alanıyla eşitlenmemelidir. EWGSOP2 uzlaşısı kas gücünü temel bileşen olarak ele alır ve kas miktarı veya kalitesini tanıyı doğrulayan ölçüt olarak kullanır (Cruz-Jentoft et al., 2019). Görüntüye dayalı tek değişken bu klinik sendromun tamamını temsil etmez.

Morphomic özelliklerin nüfusa aktarılması için referans dağılımlara ihtiyaç vardır. Yaş, biyolojik cinsiyet, beden boyutu, etnik ve coğrafi yapı ile görüntüleme protokolü dağılımı etkileyebilir. Tek merkezli travma veya kanser arşivinden üretilen eşik değerinin sağlıklı nüfusa ait normal sınır gibi sunulması uygun değildir. Referans veri setinin seçilme biçimi, dışlama ölçütleri ve standardizasyonu ölçüm kadar önemlidir.

8. MORPHOMİCS VE RADIOMİCS ARASINDAKİ SINIR

Morphomics çalışmalarında çoğunlukla anatomik bir yapının büyüklüğü, biçimi, konumu veya doku bileşimi incelenir. Radiomics ise seçilen görüntü bölgesindeki voksel dağılımlarından hesaplamalı özellikler üretir; bu özellikler sınıflandırma ve öngörü modellerinde kullanılabilir (Gillies et al., 2016; Lambin et al., 2012). Organ hacmi ve eksen uzunlukları morphomic ölçüye, entropi ve dalgacık tabanlı özellikler ise radiomics analizine örnektir. Biçim özellikleri iki yaklaşımın kesişiminde yer alır.

Bu ayırım, değişken seçimi ve doğrulama planını etkiler. Önceden belirlenmiş az sayıdaki anatomik ölçüyle belirli hipotezler sınanabilir. Çok sayıda radiomics özelliğinin analizinde ise çoklu deneme ve aşırı uyum riski ayrıca ele alınmalıdır (Gillies et al., 2016; Lambin et al., 2012). Image Biomarker Standardisation Initiative, radiomics özelliklerinin matematiksel tanımlarını ve referans değerlerini standartlaştırmak üzere geliştirilmiştir (Zwanenburg et al., 2020). PyRadiomics, tanımlanmış görüntü bölgelerinden nicel radiomics özelliklerinin hesaplanmasını sağlayan açık kaynaklı bir yazılım sistemidir (van Griethuysen et al., 2017). Morphomics çalışmalarında da landmark, segmentasyon ve türetilmiş ölçülerin hesaplama kuralları açık biçimde raporlanmalıdır.

Radiogenomics, görüntü özelliklerini genomik veya moleküler verilerle ilişkilendirir. Anatomik fenotipleme ise daha geniş bir üst kavramdır; morphomic, radiomic veya başka nicel görüntü özelliklerinin bireyin yapısal fenotipini tanımlamak üzere kullanılmasını içerebilir. Kavramların birbiri yerine kullanılması, yöntemin yeniden üretilebilirliğini zorlaştırır. En güvenli raporlama biçimi, alan etiketinden sonra iş akışını somut olarak tanımlamaktır.

9. ÖLÇÜM HATASI, GÜVENİLİRLİK VE UYUM

9.1. Hata Kaynaklarının Ayrıştırılması

Ölçüm hataları rastgele veya sistematik özellik gösterebilir. Rastgele hata değişkenliği artırabilir; sistematik hata ise cihaz, protokol veya gözlemciye bağlı farkların biyolojik fark olarak yorumlanmasına yol açabilir (Engelkes et al., 2019; Fruciano, 2016). Hata değerlendirmesi görüntü ediniminden rekonstrüksiyona, landmark yerleştirmeden veri aktarımına kadar her aşamayı kapsamalıdır. Aynı görüntüyü

yeniden ölçmek gözlemciyle ilgili değişkenliği inceleyebilir, ancak cihazlar veya görüntüleme protokolleri arasındaki farkı ortaya koymaz.

Gözlemci içi değerlendirme, aynı gözlemcinin bağımsız zamanlarda yaptığı ölçümlerin tutarlılığını; gözlemciler arası değerlendirme, farklı gözlemcilerin sonuçlarını karşılaştırır. Örneklem, kolay ve zor olguları temsil etmeli; tekrar sayısı ve aralık gerekçelendirilmelidir. Rastgele seçilmiş küçük bir alt örneklem, ana veri setindeki patoloji ve görüntü kalitesi çeşitliliğini içermeyebilir. Tekrarlanan ölçümlerin ortalaması kullanılacaksa, tek ölçüm ve ortalama ölçüm için hesaplanan güvenilirlik katsayıları farklıdır.

9.2. İstatistiksel Değerlendirme

Sınıf içi korelasyon katsayısı, sürekli ölçümlerde güvenilirlik için yaygındır; model, değerlendirici etkisi, mutlak uyum veya tutarlılık seçimi ve tek ya da ortalama ölçüm açıkça belirtilmelidir (Koo & Li, 2016). Yüksek ICC, örnekler arası varyansın geniş olduğu veri setinde ölçüm farkları görece küçük kaldığında elde edilebilir. Bu nedenle ICC tek başına mutlak hatayı göstermez. Teknik ölçüm hatası, standart ölçüm hatası, değişim katsayısı veya tekrarlanabilirlik katsayısı ölçüm birimindeki hatayı tamamlayıcı olarak verir. Bland–Altman analizi iki yöntem veya iki ölçüm seti arasındaki ortalama farkı ve uyum sınırlarını gösterir (Bland & Altman, 1986). Korelasyon katsayısı uyumu değil, birlikte değişimi ölçtüğü için yöntemlerin birbirinin yerine kullanılabilirliğini kanıtlamaz.

Landmark koordinatları arasındaki Öklid uzaklığı, eksenlere göre sapma ve Procrustes ANOVA, işaretleme hatasını değerlendirmek için kullanılabilir (Engelkes et al., 2019; Fruciano, 2016). Kabul edilebilir hata, anatomik yapıya ve kullanım amacına göre belirlenmelidir. Segmentasyon değerlendirmesinde Dice katsayısı maskeler arasındaki

örtüşmeyi, Hausdorff uzaklığı ise sınırların en büyük ayrımını ölçer. Hausdorff uzaklığı tek bir aykırı noktadan etkilenebilir; Dice katsayısı da tek başına yerel sınır hatalarını tanımlamaz. Yüzey uzaklığı, hacim farkı ve hedef morphomic ölçüdeki mutlak hata, görevle ilişkili ölçütler olarak birlikte değerlendirilebilir (Maier-Hein et al., 2024; Taha & Hanbury, 2015).

Güvenilirlik ve uyum çalışmalarının tasarım ve raporlamasında değerlendirici evreni, örneklem seçimi, körleme, zaman aralığı, katsayı modeli ve güven aralığı belirtilmelidir. GRRAS, bu unsurların şeffaf raporlanması için geliştirilmiştir (Kottner et al., 2011). Yalnızca “ICC mükemmeldi” ifadesi, katsayının hangi veri ve modelden üretildiğini açıklamaz.

10. OTOMATİK LANDMARK BELİRLEME VE YAPAY ZEKÂ

Otomatik landmark belirleme çalışmalarında regresyon, sınıflandırma ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar kullanılmıştır (Noothout et al., 2020; Zhang, Liu, & Shen, 2017). Zhang ve arkadaşlarının iki aşamalı yönteminde önce yerel görüntü parçaları ile landmark konumları arasındaki ilişki öğrenilmiş, ardından birden çok landmarkın koordinatları birlikte tahmin edilmiştir (Zhang et al., 2017). Noothout ve arkadaşları ise landmark lokalizasyonunda derin öğrenmeye dayalı regresyon ve sınıflandırma yaklaşımlarını incelemiştir (2020). Geometrik morfometri için geliştirilen görüntü kaydı ve derin öğrenme yaklaşımı, manuel işaretleme yükünü azaltmayı hedeflemiştir (Devine et al., 2020).

Modelin otomatik olarak ürettiği koordinatlar, eğitimde kullanılan etiketlerin tanımı ve doğruluğuyla sınırlıdır. Uzmanların farklı yerleştirdiği bir landmark için modelin tek nokta vermesi, belirsizliğin ortadan kalktığı anlamına gelmez.

Isı haritası yayılımı veya tekrarlı tahminler bu belirsizliği değerlendirmede kullanılabilir. İnsan incelemesine yönlendirme için seçilen belirsizlik ölçüsünün gerçek lokalizasyon hatasıyla ilişkisi doğrulanmalıdır.

Otomatik segmentasyonda nnU-Net, veri kümesinin özelliklerine göre yapılandırılan derin öğrenme tabanlı bir çerçevedir (Isensee, Jaeger, Kohl, Petersen, & Maier-Hein, 2021). TotalSegmentator, BT görüntülerinde 104 anatomik yapının segmentasyonu için geliştirilmiş ve organ, kemik, kas ile damar sınıflarını kapsayan bir araçtır (Wasserthal et al., 2023). Bu sistemlerin farklı cihaz, hasta grubu ve görüntüleme koşullarında ayrıca değerlendirilmesi gerekir. Ortalama örtüşme performansı, her anatomik sınırdaki aynı doğruluk düzeyinin sağlandığını ya da türetilen hacimlerin kullanım amacına uygun olduğunu tek başına kanıtlamaz (Maier-Hein et al., 2024; Taha & Hanbury, 2015).

Veri bölme stratejisi hasta düzeyinde yapılmalıdır. Aynı hastaya ait farklı kesit veya zaman noktalarının eğitim ve test kümelerine dağılması veri sızıntısı oluşturur. Ön işleme ve özellik seçimi yalnızca eğitim verisinde öğrenilmeli, test verisi model seçimi için tekrar tekrar kullanılmamalıdır. Dış doğrulama, performansın farklı veri üretim koşullarında korunup korunmadığını değerlendirir. Alt grup analizleri örneklem büyüklüğü elverdiğinde yaş, biyolojik cinsiyet, beden boyutu, cihaz ve patolojiye göre hata dağılımını göstermelidir.

11. STANDARDİZASYON VE YENİDEN ÜRETİLEBİLİRLİK

Standardizasyon, bütün görüntülerin tek protokolle çekilmesi anlamına gelmez. Retrospektif çalışmalarda bu çoğu zaman mümkün değildir. Amaç, ölçümü etkileyen koşulları tanımlamak, mümkün olanları uyumlaştırmak ve kalan

heterojenliği analizde hesaba katmaktır. Görüntüleme cihazı, çekim parametreleri, kontrast fazı, rekonstrüksiyon, voksel boyutu, hasta pozisyonu ve görüntü kapsamı kaydedilmelidir. Yeniden örnekleme yapılmışsa orijinal ve hedef çözünürlük ile interpolasyon yöntemi bildirilmelidir.

Yazılım tabanlı nicel analizde sürüm kontrolü ve işlem kaydı gerekir. Manuel ölçüm protokolü, landmark sözlüğü ve örnek görüntüler; otomatik analizde kod, model ağırlıkları, ortam bilgisi ve rastgelelik ayarları saklanmalıdır. Verinin paylaşılması etik veya hukuki nedenlerle mümkün değilse, sentetik veya anonimleştirilmiş örnekler, ölçüm şablonları ve hesaplama kodu paylaşılabilir. Araştırma metni, sonuçların başka bir ekip tarafından aynı adımlarla yeniden üretilebilmesini sağlayacak ayrıntıyı içermelidir.

Yapay zekâ içeren tıbbi görüntüleme araştırmalarında CLAIM'in 2024 güncellemesi veri kaynağı, referans standart ve değerlendirme süreçlerinin şeffaf raporlanmasına yönelik bir kontrol listesi sunar (Tejani et al., 2024). Klinik öngörü modelleri için TRIPOD+AI, regresyon ve makine öğrenmesine dayalı yöntemleri aynı raporlama çerçevesinde ele alır (Collins et al., 2024). Yapay zekâ kullanılan tanısal doğruluk çalışmalarında STARD-AI, çalışma tasarımı, veri setleri ve değerlendirme yöntemlerinin raporlanmasına ilişkin maddeler içerir (Sounderajah et al., 2025). Bu rehberler, bilimsel kaliteyi otomatik olarak güvence altına alan puanlama sistemleri değildir.

Tablo 4. Nicel anatomik görüntüleme çalışmaları için asgari raporlama öğeleri

Alan	Bildirilecek bilgiler
Araştırma örnekleme	Kaynak nüfus, tarih aralığı, dahil etme ve dışlama ölçütleri, görüntü seçme birimi, çoklu incelemelerin yönetimi
Görüntü edinimi	Modalite, cihaz, temel çekim ve rekonstrüksiyon parametreleri, kontrast fazı, pozisyon ve uzamsal çözünürlük
Anatomik protokol	Landmark veya sınırların operasyonel tanımı, düzlem ve seviye seçimi, taraf ve varyantlara ilişkin karar kuralları
Yazılım ve işlem	Yazılım ve sürüm, eklenti veya model, yeniden örnekleme, filtreleme, eşik, manuel düzeltme ve özellik formülü
Hata değerlendirmesi	Gözlemci sayısı ve eğitimi, tekrar aralığı, güvenilirlik modeli, mutlak hata, güven aralığı ve başarısız olgular
Model doğrulama	Hasta düzeyinde veri bölme, iç doğrulama, dış veri, alt grup performansı, kalibrasyon ve belirsizlik
Yeniden üretilebilirlik	Protokol, sözlük, kod, model sürümü, veri erişim koşulları ve kalite kontrol kaydı

12. VERİ YÖNETİŞİMİ VE ETİK

Tıbbi görüntüler kişisel sağlık verisidir. DICOM dosyasından doğrudan kimlik alanlarının kaldırılması her durumda yeterli değildir; görüntü üzerine yazılmış bilgiler, yüz rekonstrüksiyonu, nadir anatomik bulgular ve bağlantılı klinik metadata yeniden tanımlama riski taşıyabilir. Veri minimizasyonu, amaçla sınırlı erişim, yetkilendirme kaydı ve güvenli saklama araştırma planının parçası olmalıdır. Retrospektif arşiv çalışmaları için etik kurul değerlendirmesi ve ulusal mevzuata uygun veri işleme zemini gerekir.

Otomatik anatomik fenotipleme, görüntünün ilk çekim endikasyonu dışında yeni sağlık bilgileri üretebilir. Fırsatçı analizde osteoporoz, sarkopeni veya vasküler kalsifikasyonla ilişkili ölçütlerin saptanması, araştırma çıktısının klinik kayda nasıl ve hangi doğrulama düzeyinde aktarılacağı sorusunu

doğurur (Pickhardt et al., 2021; Pickhardt, 2022). Araştırma modeli klinik tanı aracı gibi kullanılmamalıdır. Beklenmeyen bulguların yönetimi, veri toplama başlamadan önce kurumun etik ve klinik süreçleriyle uyumlu biçimde belirlenmelidir.

13. UYGULAMA ALANLARI

Klinik anatomide nicel görüntü analizi, cerrahi planlama, implant veya protez boyutlandırma, deformite değerlendirmesi ve tedavi sonrası anatomik değişimin izlenmesinde kullanılabilir. Landmarklar referans düzlem ve açıları sağlar; segmentasyon hedef yapıların hacmini ve komşuluklarını gösterir. Aynı ölçümün farklı zamanlarda karşılaştırılması için görüntü kaydı, pozisyon ve protokol değişiklikleri kontrol edilmelidir. Aksi durumda gözlenen fark biyolojik değişim yerine teknik değişimi yansıtabilir.

Adli antropolojide kraniyal ve postkraniyal landmarklar biyolojik profil, popülasyon karşılaştırması ve kimliklendirme araştırmalarında kullanılır. Bu modeller örnekleme özgüdür; bir popülasyonda elde edilen sınıflandırma sınırları başka bir popülasyona doğrudan taşınmamalıdır. Yaş, cinsiyet dağılımı, görüntüleme tekniği ve seküler değişim dış doğrulamada dikkate alınmalıdır. İki boyutlu radyografik ölçülerin kuru kemik veya üç boyutlu BT ölçüleriyle eşdeğer olduğu varsayılmamalıdır.

Fırsatçı (opportunistic) BT değerlendirmesinde klinik bir endikasyonla çekilmiş görüntülerden ek nicel bilgi elde edilir. Otomatik kas ve yağ dokusu ölçümleri, kemik mineral yoğunluğu ve vasküler kalsifikasyon göstergeleri BT arşivlerinde araştırılabilen değişkenlerdir (Pickhardt et al., 2021; Pickhardt, 2022). Bu göstergelerin klinik kullanımında algoritmanın doğruluğu kadar hedef popülasyon, eşik değerler, yanlış pozitif sonuçlar ve izlem süreci de dikkate alınmalıdır.

Bir ölçünün klinik sonuçla ilişkili bulunması, tek başına tarama amaçlı kullanımı doğrulamaz.

Popülasyon anatomisi ve yaşlanma araştırmalarında morphomics, organ ve doku değişiminin yaşam boyunca incelenmesine yardım edebilir. Uzunlamasına analizler, birey içi değişimi kesitsel yaş karşılaştırmalarından ayırır; ancak protokol ve cihaz değişiklikleri yıllar içinde sistematik sapma oluşturabilir. Çok merkezli harmonizasyon yöntemleri biyolojik sinyali korurken teknik varyasyonu azaltmayı hedeflemeli, merkez etkisini tamamen kaldırmanın gerçek popülasyon farklarını da silebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

14. SINIRLILIKLAR VE ARAŞTIRMA ÖNCELİKLERİ

Nicel anatomik görüntü analizinde teknik olarak kolay elde edilen her ölçünün biyolojik olarak geçerli olduğu varsayılmaz. Landmark görünürlüğü biyolojik karşılıklılığı, yüksek segmentasyon örtüşmesi türetilen ölçünün amaca uygunluğunu ve geniş arşiv hacmi seçim yanlılığının azlığını garanti etmez. Anatomik tanımların, referans standardın ve hata kaynaklarının açıkça değerlendirilmesi gerekir.

İlerideki araştırmalarda farklı merkez ve görüntüleme protokollerini kapsayan doğrulama örneklemeleri kullanılmalıdır. Nadir anatomik varyantlar ve patolojilerde hata dağılımının ayrıca incelenmesi yararlı olacaktır. Otomatik sistemlerde belirsizlik ölçüleri, hangi olguların insan incelemesine gönderileceğini belirleyecek biçimde değerlendirilebilir. Morphomic değişkenlerin yaş, cinsiyet ve beden boyutuna göre referans dağılımları ise örneklem seçimi açıkça tanımlanmış verilerden üretilmelidir. Federatif analiz, görüntüleri merkezler arasında aktarmadan model geliştirmeye imkân tanıyabilir; protokol ve etiket farklılıkları yine ayrıca ele alınmalıdır.

Landmark temelli morfometri ile tam hacim segmentasyonu birbirinin alternatifi değildir. Az sayıda anatomik nokta, yorumlanabilir ve düşük maliyetli bir temsil sağlayabilir. Yoğun yüzey veya hacim analizi, bölgesel değişimi daha ayrıntılı yakalar. Uygun temsil, araştırma sorusunun gerektirdiği en küçük yeterli veri yapısıdır. Bu yaklaşım, hesaplama yükünü ve çoklu deneme sorununu azaltırken anatomik yorumu korur.

15. SONUÇ

Tıbbi görüntülerde nicel anatomik analiz, landmark temelli ölçümleri, geleneksel ve geometrik morfometriyi, segmentasyonu ve morphomics uygulamalarını kapsar. Bu yaklaşımlar anatomik yapıları farklı ayrıntı düzeylerinde temsil eder; yöntem seçimi araştırma sorusuna ve görüntü kalitesine dayanmalıdır. Landmark ve segmentasyon sınırlarının operasyonel tanımları, görüntüleme koşulları, ölçüm hatası ve doğrulama sonuçları raporlanmadığında üretilen ölçülerin karşılaştırılabilirliği sınırlanır. Otomatik analiz geniş görüntü arşivlerinin işlenmesini kolaylaştırır da anatomik uygunluk ve hata değerlendirmesi gereksinimini ortadan kaldırmaz.

KAYNAKÇA

- Bardua, C., Felice, R. N., Watanabe, A., Fabre, A. C., & Goswami, A. (2019). A practical guide to sliding and surface semilandmarks in morphometric analyses. *Integrative Organismal Biology*, 1(1), obz016. <https://doi.org/10.1093/iob/obz016>
- Bedrikovetski, S., Seow, W., Kroon, H. M., Traeger, L., Moore, J. W., & Sammour, T. (2022). Artificial intelligence for body composition and sarcopenia evaluation on computed tomography: a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Radiology*, 149, 110218. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2022.110218>
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 1(8476), 307-310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric tools for landmark data: Geometry and biology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Borga, M. (2018). MRI adipose tissue and muscle composition analysis: a review of automation techniques. *The British Journal of Radiology*, 91(1089), 20180252. <https://doi.org/10.1259/bjr.20180252>
- Collins, G. S., Moons, K. G. M., Dhiman, P., Riley, R. D., Beam, A. L., Van Calster, B., ... Logullo, P. (2024). TRIPOD+AI statement: updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods. *BMJ*, 385, e078378. <https://doi.org/10.1136/bmj-2023-078378>
- Cruz-Jentoft, A. J., Bahat, G., Bauer, J., Boirie, Y., Bruyère, O., Cederholm, T., ... Zamboni, M. (2019). Sarcopenia:

- revised European consensus on definition and diagnosis. *Age and Ageing*, 48(1), 16-31. <https://doi.org/10.1093/ageing/afy169>
- Devine, J., Aponte, J. D., Katz, D. C., Liu, W., Lo Vercio, L. D., Forkert, N. D., ... Hallgrímsson, B. (2020). A registration and deep learning approach to automated landmark detection for geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 47(3), 246-259. <https://doi.org/10.1007/s11692-020-09508-8>
- Engelkes, K., Helfsgott, J., Hammel, J. U., Büsse, S., Kleinteich, T., Beerlink, A., ... Haas, A. (2019). Measurement error in μ CT-based three-dimensional geometric morphometrics introduced by surface generation and landmark data acquisition. *Journal of Anatomy*, 235(2), 357-378. <https://doi.org/10.1111/joa.12999>
- Englesbe, M. J., Lee, J. S., He, K., Fan, L., Schaubel, D. E., Sheetz, K. H., ... Wang, S. C. (2012). Analytic morphomics, core muscle size, and surgical outcomes. *Annals of Surgery*, 256(2), 255-261. <https://doi.org/10.1097/SLA.0b013e31826028b1>
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J. C., Pujol, S., ... Kikinis, R. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*, 30(9), 1323-1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- Fruciano, C. (2016). Measurement error in geometric morphometrics. *Development Genes and Evolution*, 226(3), 139-158. <https://doi.org/10.1007/s00427-016-0537-4>
- Gillies, R. J., Kinahan, P. E., & Hricak, H. (2016). Radiomics: images are more than pictures, they are data. *Radiology*,

- 278(2), 563-577.
<https://doi.org/10.1148/radiol.2015151169>
- Gunz, P., & Mitteroecker, P. (2013). Semilandmarks: a method for quantifying curves and surfaces. *Hystrix*, 24(1), 103-109. <https://doi.org/10.4404/hystrix-24.1-6292>
- Isensee, F., Jaeger, P. F., Kohl, S. A. A., Petersen, J., & Maier-Hein, K. H. (2021). nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation. *Nature Methods*, 18(2), 203-211. <https://doi.org/10.1038/s41592-020-01008-z>
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Kottner, J., Audigé, L., Brorson, S., Donner, A., Gajewski, B. J., Hróbjartsson, A., ... Streiner, D. L. (2011). Guidelines for Reporting Reliability and Agreement Studies (GRRAS) were proposed. *Journal of Clinical Epidemiology*, 64(1), 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2010.03.002>
- Lambin, P., Rios-Velazquez, E., Leijenaar, R., Carvalho, S., van Stiphout, R. G. P. M., Granton, P., ... Aerts, H. J. W. L. (2012). Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis. *European Journal of Cancer*, 48(4), 441-446. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2011.11.036>
- Linder, N., Denecke, T., & Busse, H. (2024). Body composition analysis by radiological imaging: methods, applications, and prospects. *RöFo*, 196(10), 1046-1054. <https://doi.org/10.1055/a-2263-1501>

- Lortie, J., Gage, G., Rush, B., Heymsfield, S. B., Szczykutowicz, T. P., & Kuchnia, A. J. (2022). The effect of computed tomography parameters on sarcopenia and myosteatosis assessment: a scoping review. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, 13(6), 2807-2819. <https://doi.org/10.1002/jcsm.13068>
- Mai, D. V. C., Drami, I., Pring, E. T., Gould, L. E., Lung, P., Popuri, K., ... Jenkins, J. T. (2023). A systematic review of automated segmentation of 3D computed-tomography scans for volumetric body composition analysis. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, 14(5), 1973-1986. <https://doi.org/10.1002/jcsm.13310>
- Maier-Hein, L., Reinke, A., Godau, P., Tizabi, M. D., Buettner, F., Christodoulou, E., ... Jäger, P. F. (2024). Metrics reloaded: recommendations for image analysis validation. *Nature Methods*, 21(2), 195-212. <https://doi.org/10.1038/s41592-023-02151-z>
- Mitteroecker, P., & Schaefer, K. (2022). Thirty years of geometric morphometrics: achievements, challenges, and the ongoing quest for biological meaningfulness. *American Journal of Biological Anthropology*, 178Suppl 74, 181-210. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24531>
- Mourtzakis, M., Prado, C. M. M., Lieffers, J. R., Reiman, T., McCargar, L. J., & Baracos, V. E. (2008). A practical and precise approach to quantification of body composition in cancer patients using computed tomography images acquired during routine care. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33(5), 997-1006. <https://doi.org/10.1139/H08-075>
- Mullie, L., & Afilalo, J. (2019). CoreSlicer: a web toolkit for analytic morphomics. *BMC Medical Imaging*, 19(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s12880-019-0316-6>

- National Electrical Manufacturers Association. (2026). DICOM PS3.3: Information object definitions (Section 10.7, Basic Pixel Spacing Calibration Macro). Retrieved October 8, 2026, from https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/htm/part03/sect_10.7.html
- Noothout, J. M. H., de Vos, B. D., Wolterink, J. M., Postma, E. M., Smeets, P. A. M., Takx, R. A. P., ... Isgum, I. (2020). Deep learning-based regression and classification for automatic landmark localization in medical images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 39(12), 4011-4022. <https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3009002>
- O'Regan, P. W., O'Regan, J. A., Maher, M. M., & Ryan, D. J. (2024). The emerging role and clinical applications of morphomics in diagnostic imaging. *Canadian Association of Radiologists Journal*, 75(4), 793-804. <https://doi.org/10.1177/08465371241242763>
- Pickhardt, P. J. (2022). Value-added opportunistic CT screening: state of the art. *Radiology*, 303(2), 241-254. <https://doi.org/10.1148/radiol.211561>
- Pickhardt, P. J., Graffy, P. M., Perez, A. A., Lubner, M. G., Elton, D. C., & Summers, R. M. (2021). Opportunistic screening at abdominal CT: use of automated body composition biomarkers for added cardiometabolic value. *RadioGraphics*, 41(2), 524-542. <https://doi.org/10.1148/rg.2021200056>
- Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., DeZonia, B. E., Walter, A. E., Arena, E. T., & Eliceiri, K. W. (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 18, 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>

- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., ... Cardona, A. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 676-682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Sounderajah, V., Guni, A., Liu, X., Collins, G. S., Karthikesalingam, A., Markar, S. R., ... Ashrafian, H. (2025). The STARD-AI reporting guideline for diagnostic accuracy studies using artificial intelligence. *Nat Med*, 31(10), 3283-3289. <https://doi.org/10.1038/s41591-025-03953-8>
- Taha, A. A., & Hanbury, A. (2015). Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: analysis, selection, and tool. *BMC Medical Imaging*, 15, 29. <https://doi.org/10.1186/s12880-015-0068-x>
- Tejani, A. S., Klontzas, M. E., Gatti, A. A., Mongan, J. T., Moy, L., Park, S. H., & Kahn, C. E. (2024). Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): 2024 Update. *Radiology: Artificial Intelligence*, 6(4), e240300. <https://doi.org/10.1148/ryai.240300>
- van Griethuysen, J. J. M., Fedorov, A., Parmar, C., Hosny, A., Aucoin, N., Narayan, V., ... Aerts, H. J. W. L. (2017). Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype. *Cancer Research*, 77(21), e104-e107. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-17-0339>
- Wasserthal, J., Breit, H. C., Meyer, M. T., Pradella, M., Hinck, D., Sauter, A. W., ... 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>
- Wärmländer, S. K. T. S., Garvin, H., Guyomarc'h, P., Petaros, A., & Sholts, S. B. (2019). Landmark typology in applied morphometrics studies: what's the point? *The Anatomical Record*, 302(7), 1144-1153. <https://doi.org/10.1002/ar.24005>
- Yoo, J. Y., & Choi, M. H. (2025). Effects of computed tomography technical parameters on body-composition analysis. *Korean Journal of Radiology*, 26(12), 1157-1171. <https://doi.org/10.3348/kjr.2025.1140>
- Yushkevich, P. A., Piven, J., Hazlett, H. C., Smith, R. G., Ho, S., Gee, J. C., & Gerig, G. (2006). User-guided 3D active contour segmentation of anatomical structures: significantly improved efficiency and reliability. *NeuroImage*, 31(3), 1116-1128. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.01.015>
- Zelditch, M. L., Swiderski, D. L., & Sheets, H. D. (2012). *Geometric morphometrics for biologists: A primer (2nd ed.)*. London, UK: Academic Press.
- Zhang, J., Liu, M., & Shen, D. (2017). Detecting anatomical landmarks from limited medical imaging data using two-stage task-oriented deep neural networks. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(10), 4753-4764. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2721106>
- Zwanenburg, A., Vallières, M., Abdalah, M. A., Aerts, H. J. W. L., Andrearczyk, V., Apte, A., ... Löck, S. (2020). The Image Biomarker Standardization Initiative: Standardized quantitative radiomics for high-throughput

image-based phenotyping. *Radiology*, 295(2), 328-338.
<https://doi.org/10.1148/radiol.2020191145>

ANATOMİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com