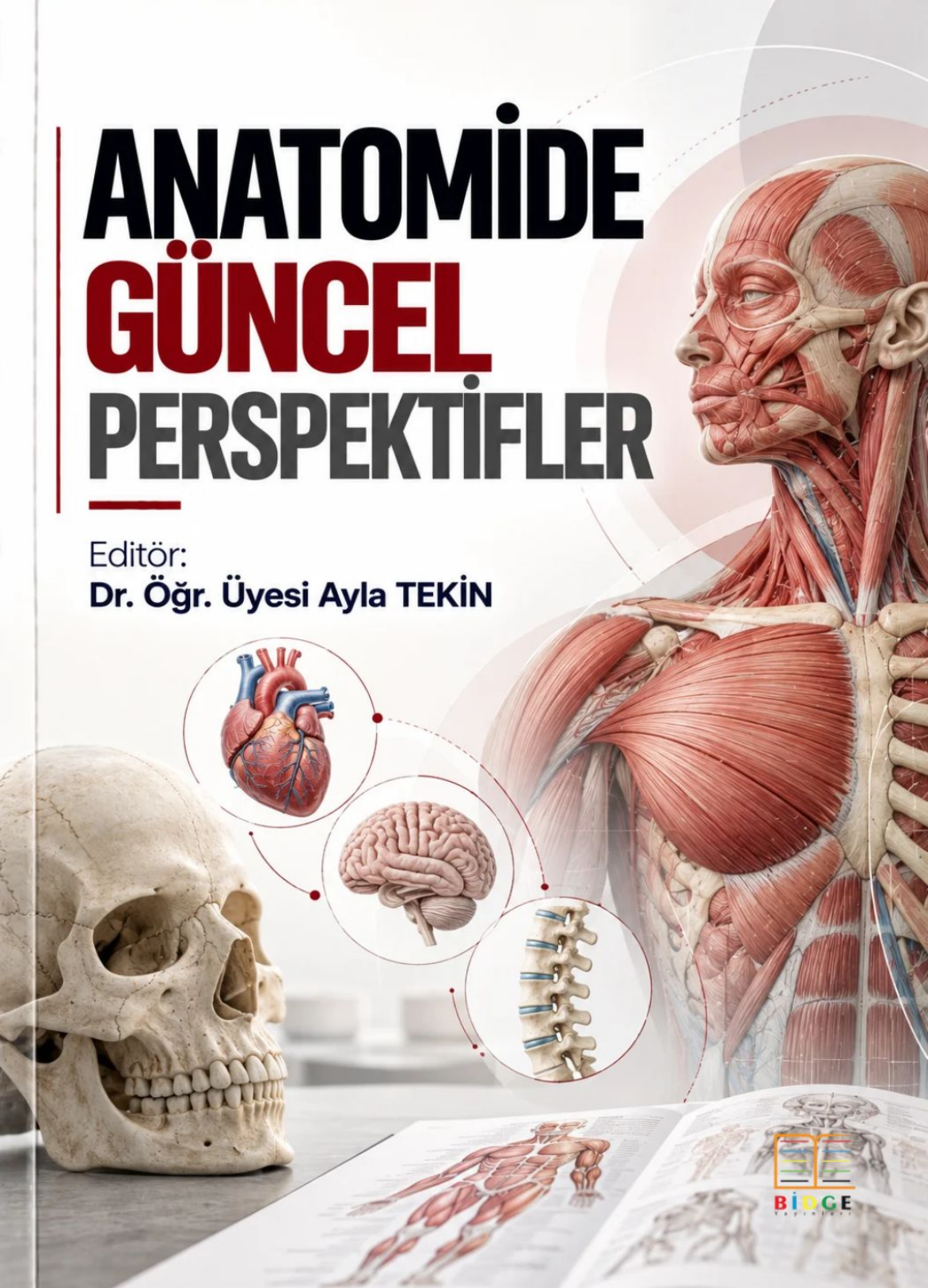
ANATOMİDE GÜNCEL PERSPEKTİFLER

Editör:
Dr. Öğr. Üyesi Ayla TEKİN



BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Anatomide Güncel Perspektifler

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Ayla TEKİN

ISBN: 978-625-5474-39-1

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

ÖNSÖZ

Değerli Okuyucular,

Anatomi, insan vücudunun yapısal organizasyonunu anlamamızı sağlayan, temel ve klinik tıp bilimlerinin vazgeçilmez disiplinlerinden biridir. Bilimsel ve teknolojik gelişmeler, anatomi alanındaki araştırmalara yeni bakış açıları kazandırırken, anatomik bilginin farklı disiplinlerle olan etkileşimini de giderek artırmaktadır.

"Anatomide Güncel Perspektifler" adlı bu kitap, anatominin farklı alanlarına ilişkin güncel bilgi ve yaklaşımları bir araya getirerek bilimsel literatüre katkı sunmak amacıyla hazırlanmıştır. Farklı konuları ele alan bölümlerin, araştırmacılara, akademisyenlere ve sağlık bilimleri alanındaki öğrencilere yararlı bir kaynak oluşturması hedeflenmiştir.

Kitabın hazırlanmasında bilgi ve deneyimlerini paylaşarak katkı sağlayan tüm bölüm yazarlarına teşekkür eder, eserin anatomi alanındaki bilimsel çalışmalara katkı sağlamasını dilerim.

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Ayla TEKİN

İÇİNDEKİLER

LEONARDO DA VİNCİ'NİN KADAVRA İNCELEMELERİ: ANATOMİK GÖZLEM, DİSEKSİYON VE GÖRSELLEŞTİRME 1
NAZLI GÜLRİZ ÇERİ, BURAK AYYILDIZ

İNSAN HAREKET TERMİNOLOJİSİ: ANATOMİK ADLANDIRMA, BİYOMEKANİK ÖLÇÜM VE DİSİPLİNLER ARASI KULLANIM 11
NAZLI GÜLRİZ ÇERİ, BURAK AYYILDIZ

AYAK ANATOMİSİ VE BİYOMEKANİĞİ 21
BEHİYE SARIYILDIZ, ENGİN TAŞTABAN

KADIN ÜREME SİSTEMİ KLİNİK ANATOMİSİ 52
OĞUZHAN HARMANDAOĞLU, OĞUZHAN ÖZTÜRK

ERKEK ÜREME SİSTEMİ VE KLİNİK ANATOMİSİ 68
OĞUZHAN ÖZTÜRK, OĞUZHAN HARMANDAOĞLU

İNSAN TESTİSİNİN ANATOMİSİ VE SPERMATOGENEZİN YAPISAL TEMELLERİ 88
AYŞE GİZEM ŞAHMELİKOĞLU, GİZEM SAKALLI

KARACİĞER, SAFRA KESESİ, PANKREAS VE DALAĞIN EMBRİYOLOJİSİ VE KLİNİK ANATOMİSİ 109
GİZEM SAKALLI, BEHİYE SARIYILDIZ

ANATOMICAL FOUNDATIONS AND CLINICAL LOCALIZATION OF CROSSED BRAINSTEM SYNDROMES 136
DAMLA ŞAHİN

LEONARDO DA VİNCİ'NİN KADAVRA İNCELEMELERİ: ANATOMİK GÖZLEM, DİSEKSİYON VE GÖRSELLEŞTİRME

NAZLI GÜLRİZ ÇERİ[1]

BURAK AYYILDIZ[2]

GİRİŞ

Leonardo da Vinci (1452–1519), insan bedenini görme, anlama ve anlatma çabasını sanat ile bilim arasında buluşturan Rönesans'ın en dikkat çekici isimlerinden biridir. Onun insanı tanıma merakı, resimde görünür kıldığı bedenin sınırlarını aşarak bu bedenin iç yapısına, hareketine ve işleyişine yönelmiştir (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021). Ressamlığının kazandırdığı gözlem ve çizim becerileri; mühendislik, mekanik ve doğa araştırmalarına duyduğu ilgiyle birleşmiş, anatomik çalışmalarına çok yönlü bir nitelik kazandırmıştır (Wolach & Wolach, 2021). İnsan bedenini oluşturan yapıların birbirleriyle ilişkilerini araştırması, Leonardo'nun anatomik çizimlerini aynı zamanda yaşamın nasıl işlediğini anlamaya yönelik bir düşünsel çabanın kayıtları hâline getirmiştir (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021). Bu çalışmalarda sanatçının ayrıntıya duyarlılığı ile araştırmacının açıklama arayışı yan yana görülebilmektedir (Wolach & Wolach, 2021).

[1] Doç. Dr., Adnan Menderes Üniversitesi, Tıp Fakültesi Anatomi Ana Bilim Dalı, Orcid: 0000-0001-5486-1824

[2] Adnan Menderes Üniversitesi, Tıp Fakültesi Anatomi Ana Bilim Dalı, Orcid: 0009-0009-6272-784X

Leonardo'nun anatomik merakı, insan bedeninin sanatsal temsilinin önem kazandığı ve kadavra diseksiyonlarının Kuzey İtalya'da giderek yaygınlaştığı bir ortamda gelişmiştir (Carroll, 2025). Verrocchio'nun atölyesindeki sanat eğitimi, insan figürünü incelemesine zemin hazırlarken, Galenos, İbn Sînâ ve Mondino de' Liuzzi gibi yazarların eserleri de anatomik düşüncesini besleyen kaynaklar arasında yer almıştır (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021). İnsan ve hayvan bedenleri üzerinde yürüttüğü incelemeler, bu birikimi doğrudan gözlemleriyle birlikte değerlendirmesine olanak sağlamıştır (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021). Böylece Leonardo'nun araştırmalarında sanatsal deneyim, önceki anatomik bilgi ve diseksiyonla edinilen bulgular birbirini etkileyen unsurlar olarak bir araya gelmiştir (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021).

Bu araştırma sürecinde kadavra, Leonardo'nun bedenin görünmeyen yapılarıyla karşılaşmasını sağlayan temel çalışma materyallerinden biri olmuştur. İncelemeleri kas-iskelet sistemiyle sınırlı kalmamış; kalp ve damarlar, sinir sistemi ve üreme organları gibi farklı yapılara uzanmıştır (Wolach & Wolach, 2021). Aynı yapıyı farklı yönlerden çizmesi, kesitler kullanması ve görsellerini açıklayıcı notlarla desteklemesi, anatomik ilişkileri anlaşılır biçimde kaydetme çabasını yansıtmaktadır (Wolach & Wolach, 2021). Bununla birlikte, özellikle üreme anatomisi çizimlerinde insan ve hayvan diseksiyonlarından elde edilen bilgilerin geleneksel kabullerle birleşmesi, bazı yapıların hatalı yorumlanmasına neden olmuştur (Carroll, 2025). Leonardo'nun anatomik çalışmalarının tarihsel değeri, bu nedenle başarılı gözlemleri ve özgün anlatım yöntemleriyle birlikte, içinde geliştiği bilgi ortamı ve uygulama koşulları dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Bu kitap bölümünün amacı, Leonardo da Vinci'nin kadavra incelemelerine yaklaşımını tarihsel bağlamı içinde ele alarak diseksiyon, anatomik gözlem, görsel kayıt ve işlevsel yorum arasındaki ilişkileri incelemektir. Bu doğrultuda kadavraya erişim ve çalışma koşulları, insan ve hayvan diseksiyonlarının araştırmalarındaki yeri, anatomik yapıların çizim yoluyla ifade edilmesi ve seçilmiş organ sistemlerine ilişkin gözlemleri değerlendirilecektir. Ayrıca Leonardo'nun anatomik

gözlemleri ve görselleştirme yöntemleri günümüz anatomik bilgisi ışığında incelenerek, çalışmalarının anatomik yapıların anlaşılması ve temsil edilmesi bakımından taşıdığı değer ortaya konulacaktır. Bu değerlendirmede, çalışmalarının sonraki dönemlerdeki tarihsel etkisi ile bugün onlara atfedilen bilimsel ve eğitsel değer birbirinden ayrılacak; başarıları ve sınırlılıkları birlikte ele alınacaktır.

Sanatsal İlgiden Anatomik Araştırmaya

Leonardo'nun anatomik araştırmalarına uzanan yol, insan figürünü dikkatle incelemeyi gerektiren sanat eğitimiyle şekillenmiştir. Andrea del Verrocchio'nun Floransa'daki atölyesinde edindiği çizim ve uygulama deneyimi, bedenin görünür biçimlerini tanıması için önemli bir zemin oluşturmuştur (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021). Dönemin sanatçı eğitiminde temel anatomi bilgisi, deri ve kasların oluşturduğu yüzey biçimlerini gerçeğe uygun biçimde yansıtabilmek açısından değer taşımaktaydı (Schuez & Alt, 2022). Leonardo'nun ilgisi ise zamanla bedenin dış görünüşünden, bu görünüşü meydana getiren yapıların birbirleriyle ilişkilerine ve işleyişine doğru genişlemiştir (Carroll, 2025; Schuez & Alt, 2022).

Bu genişleyen merakın somut örneklerinden biri, 1489 tarihli kafatası çizimleridir. Leonardo bu çalışmalarda kafatasını farklı kesitlerle açarak iç boşlukları, dişleri ve çevredeki kemik yapıları görünür hâle getirmiştir (Schuez & Alt, 2022). Yüzün dış biçiminin ötesine geçen bu incelemeler, insan başının iç düzenini araştırma çabasını ortaya koymaktadır (Schuez & Alt, 2022). Böylece sanatsal temsil için önem taşıyan bir bölge, aynı zamanda anatomik ilişkilerin sorgulandığı bir araştırma alanına dönüşmüştür.

Leonardo için çizim, yalnızca inceleme sonunda ortaya çıkan bir ürün değil, bilgiyi edinmenin ve düzenlemenin de bir yoluydu. Anatomik metinlerden okuduklarını eskizlere dönüştürmesi, çizimi anlamayı kolaylaştıran bir düşünme aracı olarak kullandığını göstermektedir (Schuez & Alt, 2022). Diseksiyonlarda karşılaştığı yapıları görsel kayıtlarla işlemesi de bu yaklaşımın başka bir yönünü oluşturmuştur (Schuez & Alt, 2022). Bununla birlikte, araştırmalarında doğrudan

gözlem kadar geçmişten aktarılan açıklamalar da etkili olmuş; Galenos ve İbn Sînâ'nın görüşleri özellikle erken anatomik çalışmalarında iz bırakmıştır (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021).

Sanatsal ilginin anatomik araştırmaya dönüşmesi, Leonardo'nun diğer uğraşlarıyla da beslenmiştir. Mekanik ve doğa olaylarına yönelik ilgisi, bedenin hareketini ve organların işleyişini açıklama çabalarına eşlik etmiş; insan bedeni ile doğa arasında kurduğu benzetmeler düşüncesinde önemli bir yer tutmuştur (Wolach & Wolach, 2021). Araştırmalarının kalp, sinir sistemi ve üreme organlarına uzanması, insan figürünü doğru çizme hedefini aşan bir merakı yansıtmaktadır (Carroll, 2025; Wolach & Wolach, 2021). Bu süreçte sanatı ile anatomik araştırmaları birbirinden kopmamış; gözlem, çizim ve açıklama arayışı çalışmalarında birlikte gelişmiştir (Wolach & Wolach, 2021).

Kadavraya Erişim ve Diseksiyonun Çalışma Koşulları

Leonardo'nun yaşadığı dönemde insan bedenini incelemek, kadavraya ulaşmayı ve belirli kurallar içinde çalışmayı gerektiriyordu. Rönesans İtalya'sında bedenler, ölüm nedenini araştırmak ve anatomi öğretmek amacıyla açılabiliyordu; ancak bu uygulamaların kabulü, incelemenin amacı ve cenaze gelenekleriyle yakından ilişkiliydi (Park, 1994). Üniversitelerdeki diseksiyonlarda yerel yönetimlerin sağladığı, idam edilmiş kişilere ait bedenler kullanılabiliyor; incelemeler belirli zamanlarda ve sınırlı sayıda gerçekleştiriliyordu (Park, 1994). Dolayısıyla diseksiyona izin verilmesi, kadavraya serbestçe ulaşılabildiği anlamına gelmiyordu. Anatomik araştırmalar, bedenlerin sağlanmasını mümkün kılan kurumsal olanaklara bağlıydı (Brenna, 2022; Park, 1994).

Leonardo'nun hastaneler ve hekimlerle kurduğu ilişkiler, bu koşullar içinde yürüttüğü araştırmaların önemli bir parçasını oluşturmuştur. Floransa'daki Santa Maria Nuova Hastanesi'nde yaptığı incelemeler ve Pavia'da Marcantonio della Torre ile çalışması, anatomik araştırmalarının tıp çevreleriyle bağlantısını göstermektedir (Carroll, 2025). Dönemin bazı üniversite diseksiyonlarında anatomik metni

okuyan öğretici ile bedeni açan görevliler farklı kişilerdi (Brenna, 2022). Leonardo ise organ ve beden bölümleri üzerinde bizzat çalışmış, gözlemlerini çizim ve notlarla kaydetmiştir (Schuez & Alt, 2022). Kendi bildirimine göre yaklaşık otuz insan kadavrasını diseke etmiş olması, bu araştırmalara ayırdığı emeğin kapsamı hakkında fikir vermektedir (Schuez & Alt, 2022).

Kadavraya ulaşmak, incelemenin tamamlanabilmesi için tek başına yeterli değildi; dokular bozulmadan çalışmayı bitirmek de gerekiyordu. Dokuları uzun süre diseksiyona uygun durumda tutacak güvenilir yöntemlerin bulunmaması, inceleme için kullanılabilecek süreyi sınırlıyordu (Brenna, 2022). Bu nedenle diseksiyonlar birbirini izleyen gün ve geceler boyunca sürebiliyor, inceleme sırası organların bozulma hızına göre belirlenebiliyordu (Brenna, 2022). Daha hızlı çürüyen organları içeren karın boşluğuna öncelik verilmesi ve çalışmaların kış aylarında yapılması, bu zaman baskısını azaltmaya yönelik uygulamalardı (Carroll, 2025). Ancak soğuk hava bile dokuların bozulmasını bütünüyle engelleyemiyordu (Carroll, 2025).

Bu koşullarda çalışmak, teknik becerinin yanında, ölümün ve bedenin bozulmasının yarattığı duygusal güçlüklerle yüzleşmeyi de gerektiriyordu. Leonardo, notlarında parçalanmış ve derisi kaldırılmış bedenlerle gece saatlerinde çalışmanın yaratabileceği ürpertiye değinmiştir (Carroll, 2025). Aynı notlarda, bu koşullara dayanabilmenin yanı sıra, görülen yapıları doğru biçimde çizebilmek için gerekli beceriyi de vurgulamıştır (Carroll, 2025). Güç çalışma koşullarına rağmen ayrıntılı incelemelerini sürdürmesi ve gözlemlerini çizimlerle kaydetmesi, anatomik araştırmalarına verdiği önemi göstermektedir (Carroll, 2025; Schuez & Alt, 2022).

Çalışmaların kapsamını belirleyen bir başka etken ise ulaşılabilen kadavraların çeşitliliğiydi. Özellikle kadın üreme organlarına ait bazı çizimlerdeki ayrıntı eksikliklerinin, kadın kadavralarına sınırlı erişim ve elverişsiz diseksiyon koşullarıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Carroll, 2025). Kesin bir neden olarak kabul edilemese de bu olasılık, çizimlerdeki eksikliklerin çalışma olanaklarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla Leonardo'nun anatomik

çalışmalarını anlamak için gözlem ve çizim becerisinin yanında, hangi bedenleri inceleyebildiğini, dokuların durumunu ve incelemeye ayırabildiği süreyi de dikkate almak gerekir.

Diseksiyondan Görsel Kayda: Anatomik Araştırma Yöntemi

Diseksiyon sırasında görülen yapıların kaydedilmesi, kısa sürede bozulabilen dokulardan edinilen bilginin korunmasını sağlıyordu. Leonardo için çizim, bu bilginin kaydı olmanın yanında, anatomik ilişkileri anlamanın ve açıklamanın da bir yoluydu (Schuez & Alt, 2022). Kemik, eklem ve kasları hem ayrı ayrı hem de birbirleriyle ilişkileri içinde incelemiş; aynı yapıyı farklı yönlerden göstererek biçiminin daha iyi anlaşılmasını amaçlamıştır (Tsafrir & Ohry, 2001). Böylece tek bir görünüşte birbirini örten ya da seçilemeyen yapılar, farklı çizimler birlikte incelendiğinde daha anlaşılır hâle gelmiştir.

Bu yaklaşımın önemli araçlarından biri kesit kullanımıydı. Leonardo'nun 1489 tarihli kafatası çalışmalarında, dış yüzey ile kesilerek açılmış iç yapı yan yana gösterilmiştir. Bu çizimlerde kafatası boşluğu, burun çevresindeki sinüsler ve diş kökleri gibi dışarıdan görülemeyen yapılar arasındaki ilişkiler izlenebilmektedir (Schuez & Alt, 2022). Bir başka yöntem olan ayrıştırılmış görünümde ise parçalar birbirinden uzaklaştırılarak gösterilmiş, böylece normalde temas eden yüzeylerin ve birleşme noktalarının anlaşılması kolaylaştırılmıştır (Tsafrir & Ohry, 2001). Yapıların katmanlar hâlinde açılması da bu görsel anlatımın bir parçasıdır. Örneğin fetüs çizimlerinde uterus ve çevresindeki zarların açılmış biçimde gösterilmesi, içerideki yapıları görünür kılmak için kullanılmıştır (Carroll, 2025).

Çizimlere eşlik eden notlar da yalnızca yapıların adlarını belirtmekle sınırlı değildi. Leonardo, gözlemlediği biçimlerin ne işe yaradığını ve hareketle nasıl ilişkili olduğunu açıklamaya çalışmıştır (Schuez & Alt, 2022). Dişler üzerine 1508 tarihli notlarında, dişlerin biçimini ve çiğneme kuvvetini çene eklemine olan uzaklıklarıyla birlikte değerlendirmiştir. Bu ilişkiyi göstermek için kullandığı basit çizgiler ve noktalar, anatomik görünümü mekanik bir açıklamaya dönüştürme

çabasını yansıtmaktadır (Schuez & Alt, 2022). Dolayısıyla notlar ve çizimler birlikte okunduğunda, görülen yapıların yanında Leonardo'nun bu yapılara ilişkin yorumları da ortaya çıkmaktadır.

Bedenin içindeki boşlukların biçimini anlamak için çizimin yanında fiziksel modellerden de yararlanmıştır. Sığır beyninin ventriküllerine erimiş mum enjekte ederek bu boşlukların kalıbını elde etmesi, doğrudan görülmesi güç bir yapıyı üç boyutlu olarak inceleme olanağı sağlamıştır (Schuez & Alt, 2022). Bu işlemde boşluğun kendisi, çevresindeki dokudan ayrılarak değerlendirilebilen somut bir biçime dönüştürülmüştür. Böylece diseksiyonla açığa çıkarılan yapıların çizilmesine, iç boşlukların kalıp yoluyla gösterilmesi de eklenmiştir (Schuez & Alt, 2022).

Modelleme düşüncesi, kalpteki kan akışını açıklama çabasında da görülmektedir. Leonardo'nun notlarında, aort kökü ve kapak bölgesini temsil eden cam bir düzenek hazırlanması ve içinden su ile bitki tohumları geçirilerek akışın izlenmesi tarif edilmektedir (Gharib et al., 2002). Burada amaç, saydam bir model içinde hareketi görünür kılmak ve akışın kapak çevresindeki biçimle ilişkisini araştırmaktır.

Leonardo'nun Anatomik Mirası: Günümüz Anatomi Eğitimine Bir Bakış

Günümüz yöntemleriyle karşılaştırıldığında, Leonardo'nun çalışmalarının dikkat çekici yönü yapıyı farklı açılardan gösterme, iç boşlukları modelleme ve hareketi görünür hâle getirme çabasıdır. Bu yaklaşım, modern anatomik görselleştirmenin üç boyutlu ilişkileri anlaşılır kılma amacıyla benzerlik taşımaktadır (Tsafrir & Ohry, 2001). Ayrıca Leonardo'nun çizimine göre hazırlanan bir aort modelinde, modern akış görüntüleme yöntemleriyle elde edilen örüntülerin onun çizdiği girdaplarla belirgin benzerlikler gösterdiği bildirilmiştir (Gharib et al., 2002). Bu bulgu, belirli çizimlerinin açıklayıcı değerini destekler; ancak bütün anatomik yorumlarının doğrulandığı anlamına gelmez. Buradaki yakınlık, görünmeyen yapı ve hareketleri anlaşılır bir temsile dönüştürme çabasında aranmalıdır.

Bu görselleştirme çabasının arkasında, anatomik biçimi işlevle birlikte anlama isteği bulunmaktadır. Leonardo'nun notlarında yapıların görünümü, hareket ve kuvvetle ilişkileri üzerinden de ele alınmıştır (Schuez & Alt, 2022). Günümüz açısından bu yaklaşımın değeri, anatomik ayrıntılardan bedenin işleyişine ilişkin sorular üretmesidir. Bir yapının nasıl göründüğünü kaydetmek, onun nasıl çalışabileceğini araştırmanın başlangıcı hâline gelmiştir (Gharib et al., 2002; Schuez & Alt, 2022). Bununla birlikte, biçimden hareketle yapılan bir açıklamanın doğruluğu ayrıca sınanmalıdır. Leonardo'nun çalışmalarına bugünden bakıldığında, gözlemlerinin isabeti ile bunlardan çıkardığı sonuçların doğruluğunu ayrı değerlendirmek, başarısını daha açık biçimde ortaya koyar.

Çizim ve notların birlikte kullanılması da bu çalışmaların günümüzdeki değerini artırmaktadır. Bu kayıtlar, Leonardo'nun hangi ayrıntıları gördüğünü ve bunları nasıl yorumladığını birlikte incelememize olanak tanır (Schuez & Alt, 2022). Aort akışına ilişkin çizimlerinin yüzyıllar sonra deneysel bir modelle karşılaştırılabilmesi, ayrıntılı görsel kaydın yeniden değerlendirmeye açık bir bilgi taşıyabildiğini göstermektedir (Gharib et al., 2002). Bu açıdan onun çalışmalarının önemi, ulaştığı sonuçlarla birlikte, sorularını ve açıklamalarını sonraki incelemelere açık bırakmış olmasında da görülebilir.

Bu özellikler, anatomi eğitimi açısından da anlamlı bir bağlantı kurmaktadır. Günümüzde çizimle öğrenme, öğrencinin anatomik bilgiyi düzenlemesine ve yapılar arasındaki ilişkileri nasıl anladığını ortaya koymasına yardımcı olabilecek bir yöntem olarak ele alınmaktadır (Amin, 2020). Üç boyutlu görselleştirme araçları da benzer biçimde, bedenin konum ve derinlik ilişkilerinin anlaşılmasını desteklemeyi amaçlamaktadır; ancak eğitimde sağladıkları yarar kullanılan yönteme ve araştırmanın koşullarına göre değişmektedir (Triepels et al., 2020). Leonardo'nun yaklaşımıyla kurulabilecek ortaklık, öğrenenin anatomik yapıyı dikkatle incelemesi ve gördükleri arasında ilişki kurmasıdır. Bu nedenle onun çalışmalarının eğitimdeki yeri değerlendirilirken, çizimlerin

görsel etkileyiciliği kadar hangi anatomik soruyu açıklamaya çalıştıkları da önem taşır.

Sonuç

Leonardo da Vinci'nin anatomi çalışmaları, insan bedenini anlama merakının sanat, gözlem ve araştırmayla buluştuğu önemli bir tarihsel örnektir. Kadavraya erişimin ve dokuların korunmasının getirdiği güçlükler içinde yürüttüğü diseksiyonları, ayrıntılı çizimler ve notlarla kaydetmiş; bedenin yapısını işleyişiyle birlikte açıklamaya çalışmıştır. Çalışmalarında döneminin düşüncelerini yansıtan hatalar bulunsa da bazı gözlemlerinin günümüz bilgisiyle örtüşmesi, incelemelerinin değerini ortaya koymaktadır.

Leonardo'nun anatomik mirası, doğru tanımladığı yapıların yanında, insan bedenine yönelttiği sorularda ve bu soruları araştırmak için geliştirdiği yöntemlerde yaşamaktadır. Gözlemi çizime, çizimi açıklamaya dönüştürme çabası, çalışmalarını bugün de anlamlı kılmaktadır. Onun defterleri, dönemin olanakları içinde bedenin bilinmeyen yönlerini anlamaya çalışan bir insanın merakını, emeğini ve bilgi arayışını günümüze taşımaktadır.

KAYNAKÇA

Amin, A. (2020). ‘Drawing’ to learn anatomy: Exploring the theoretical underpinning and conditions favouring drawing based learning. *Journal of the Pakistan Medical Association, 70*(11), 2017–2022. https://doi.org/10.5455/JPMA.34788

Brenna, C. T. A. (2022). Bygone theatres of events: A history of human anatomy and dissection. *The Anatomical Record, 305*(4), 788–802. https://doi.org/10.1002/ar.24764

Carroll, M. (2025). The renaissance of reproductive science: Leonardo da Vinci’s anatomical contributions. *Reproductive Sciences, 32*(3), 575–599. https://doi.org/10.1007/s43032-024-01772-9

Gharib, M., Kremers, D., Koochesfahani, M. M., & Kemp, M. (2002). Leonardo’s vision of flow visualization. *Experiments in Fluids, 33*, 219–223. https://doi.org/10.1007/s00348-002-0478-8

Park, K. (1994). The criminal and the saintly body: Autopsy and dissection in Renaissance Italy. *Renaissance Quarterly, 47*(1), 1–33. https://doi.org/10.2307/2863109

Schuez, I., & Alt, K. W. (2022). Leonardo da Vinci and dental anatomy. *Journal of Anatomy, 240*(2), 183–196. https://doi.org/10.1111/joa.13561

Triepels, C. P. R., Smeets, C. F. A., Notten, K. J. B., Kruitwagen, R. F. P. M., Futterer, J. J., Vergeldt, T. F. M., & Van Kuijk, S. M. J. (2020). Does three-dimensional anatomy improve student understanding? *Clinical Anatomy, 33*(1), 25–33. https://doi.org/10.1002/ca.23405

Tsafrir, J., & Ohry, A. (2001). Medical illustration: From caves to cyberspace. *Health Information & Libraries Journal, 18*(2), 99–109. https://doi.org/10.1046/j.1471-1842.2001.d01-16.x

Wolach, B., & Wolach, O. (2021). Science, anatomy, and art: Revisiting Leonardo da Vinci, pioneer of modern anatomy. *The Israel Medical Association Journal, 23*(10), 676–680.

BÖLÜM 2

İNSAN HAREKET TERMİNOLOJİSİ: ANATOMİK ADLANDIRMA, BİYOMEKANİK ÖLÇÜM VE DİSİPLİNLER ARASI KULLANIM

NAZLI GÜLRİZ ÇERİ[1]

BURAK AYYILDIZ[2]

GİRİŞ

Anatomik terminoloji, anatomik yapıların tanımlanmasını ve bu yapılara ilişkin bilginin aktarılmasını sağlayarak tıp ve sağlık bilimlerinde ortak bir iletişim dilinin oluşmasına katkıda bulunur. Bununla birlikte, tarihsel süreçte aynı anatomik yapı için farklı adların kullanılması, ortak bir adlandırma sistemine duyulan gereksinimi artırmıştır (Sakai, 2007; Whitmore, 1999). Anatomik terminolojinin kurumsal standardizasyonundaki önemli dönüm noktalarından biri, Anatomische Gesellschaft tarafından 1895'te Basel'de kabul edilen Basiliensia Nomina Anatomica (BNA) olmuştur. Bunu, 1935'te Jenaiensia Nomina Anatomica (JNA) ve 1955'te uluslararası kabul gören Parisiensia Nomina Anatomica (PNA) izlemiştir. Sonraki yıllarda yapılan revizyonlar, anatomik adlandırmanın geliştirilmesine katkı sağlamış ancak farklı terimlerin kullanımı bütünüyle ortadan kalkmamıştır (Kachlik et al., 2008). International Federation of Associations of Anatomists

[1] Doç. Dr., Adnan Menderes Üniversitesi, Tıp Fakültesi Anatomi Ana Bilim Dalı, Orcid: 0000-0001-5486-1824

[2] Adnan Menderes Üniversitesi, Tıp Fakültesi Anatomi Ana Bilim Dalı, Orcid: 0009-0009-6272-784X

(IFAA) bünyesinde oluşturulan Federative Committee on Anatomical Terminology (FCAT) tarafından hazırlanan ve 1998'de yayımlanan Terminologia Anatomica (TA), uluslararası anatomik adlandırmanın gelişiminde önemli bir aşama oluşturmuştur. Latince terimleri İngilizce karşılıklarıyla birlikte sunan TA, anatomik yapıların adlandırılmasında ortak bir referans sağlamayı amaçlamıştır (Whitmore, 1999). Bununla birlikte TA, bütün eşanlamlıları dışlayan bir liste değildir; bazı alternatif adları korurken tercih edilen kullanımları da belirtmektedir (Kachlik et al., 2008). Standardizasyon süreci sonraki yıllarda devam etmiş ve 2019 tarihli ikinci baskı, Terminologia Anatomica 2 (TA2), IFAA tarafından 2020'de kabul edilmiştir. Anatomik bilgi birikiminin ve klinik gereksinimlerin gelişmesi, terminolojinin güncellenmesini gerektirmeye devam etmektedir (Chmielewski, 2024).

Anatomik yapıların adlandırılmasında ortak bir sistemin bulunması, insan hareketlerinin tanımlanması ve ölçülmesindeki bütün belirsizlikleri kendiliğinden ortadan kaldırmamaktadır. Bu bağlamda, hareket adlarının anlamları ile hareketin hangi eklem, segment veya referans sistemi üzerinden değerlendirildiği birlikte ele alınmalıdır. Greiner'in ayak hareketlerine ilişkin araştırması, biyomekanik, klinik anatomi ve podiatri alanlarında pronasyon–supinasyon ve inversiyon–eversiyon terimlerinin farklı, bazı durumlarda birbiriyle çelişen tanımlarla kullanılabildiğini göstermiştir (Greiner, 2007). Aynı yazarın daha sonraki kongre sunumu, tek bir eklemin hareketi ile bütün ayağın hareketinin aynı terimlerle ifade edilmesinin oluşturabileceği belirsizliklere dikkat çekmiştir (Greiner, 2013). Bu nedenle, hareket terminolojisindeki kullanım farklılıkları değerlendirilirken terimin kapsamı ve hareketin tanımlandığı anatomik düzey açıkça belirtilmelidir. Biyomekanik ölçümlerde ortak raporlama ilkelerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. International Society of Biomechanics'in (ISB) omuz, dirsek, el bileği ve el için

önerdiği eklem koordinat sistemleri, hareketlerin tanımlanması ve araştırma sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini artırmaya yönelik standardizasyon çabalarına örnek oluşturmaktadır (Wu et al., 2005). Hareket terminolojisinin bir başka boyutu olan motor beceri literatüründe ise Logan ve arkadaşları, temel motor beceri kavramının kullanımını ve tanımlarını inceleyerek araştırmalarda açık, işlemsel tanımların, beceri kategorilerinin ve somut örneklerin belirtilmesini önermiştir (Logan et al., 2018). Dolayısıyla eklem hareketlerinin adlandırılması, kinematik ölçümlerin raporlanması ve motor becerilerin sınıflandırılması, birbiriyle ilişkili ancak farklı açıklama düzeyleri gerektiren konular olarak değerlendirilmelidir.

Bu bölümün amacı, insan hareketlerinin tanımlanmasında kullanılan terimleri anatomik ve biyomekanik bağlamlarıyla incelemek, disiplinler arasındaki kullanım farklılıklarını literatürden örneklerle değerlendirmek ve eğitim, araştırma ve klinik iletişimde açık ve tutarlı bir terminoloji kullanımına yönelik öneriler sunmaktır.

Terminologia Anatomica'ya Göre Hareket Terminolojisi

Terminologia Anatomica (TA), anatomik yapıların adlarının yanı sıra yön, düzlem ve hareket bildiren terimleri de içeren uluslararası bir adlandırma sistemidir. TA'nın 1998 tarihli baskısında flexio, extensio, abductio, adductio, rotatio interna, rotatio externa, pronatio ve supinatio gibi hareket adları yer almaktadır (Federative Committee on Anatomical Terminology, 1998; Greiner, 2013). Bu terimlerin ortak bir terminoloji içerisinde sunulması, anatomi eğitiminde ve bilimsel iletişimde adlandırma birliğine katkı sağlamaktadır (Whitmore, 1999). Bununla birlikte, hareket adlarının standart bir listede bulunması ile bu hareketlerin farklı eklemlerdeki kinematik özelliklerinin ve ölçüm yöntemlerinin ayrıntılı biçimde tanımlanması birbirinden ayrı değerlendirilmelidir. TA'nın sağladığı adlandırma çerçevesi,

hareket analizinde kullanılan koordinat sistemlerinin ve ölçüm protokollerinin yerini tutmamaktadır (Greiner, 2013; Wu et al., 2005).

TA'nın dilbilimsel yapısı değerlendirilirken, hareket sistemiyle ilişkili anatomik yapıların adları ile doğrudan hareket bildiren terimler arasında ayrım yapılması gerekir. Esersoy ve Unur, TA'nın 1998 tarihli baskısının hareket sistemiyle ilişkili bölümlerindeki 2.282 terimi inceleyerek bu terimlerde bulunan sıfatları köken, derece ve biçim açısından değerlendirmiştir. Araştırmada, Latince kökenli sıfatların Grekçe kökenli sıfatlardan daha fazla olduğu; biçim bakımından iki şekilli sıfatların daha yaygın olduğu bildirilmiştir. Derece bakımından ise yalın dereceli (positivus) sıfatların daha yaygın olduğu, karşılaştırma derecesindeki sıfatların tekrar sıklığının yüksek olduğu belirtilmiştir (Esersoy & Unur, 2020). Bu bulgular, incelenen anatomik adlandırmaların dilbilimsel özelliklerini açıklamakta; hareket terimlerinin biyomekanik tanımlarının standardizasyonunu doğrudan değerlendirmemektedir.

TA'nın düzenlenmesinde terimlerin anatomik sistemler ve alt başlıklar altında sıralanması ve kodlarla tanımlanması da önem taşımaktadır (Kachlik et al., 2008). Örneğin, 1998 tarihli baskıda flexio terimi A03.0.00.058 koduyla gösterilmektedir (Federative Committee on Anatomical Terminology, 1998). Kodların terim adları ve dil karşılıklarıyla birlikte kullanılması, dijital ortamlarda ilgili kaydın açık biçimde tanımlanmasını destekleyebilir. Ancak kodlama tek başına kavramsal belirsizlikleri gidermez. Hareketin hangi eklem veya segment için kullanıldığının ve hangi referans sistemine göre değerlendirildiğinin ayrıca belirtilmesi gerekir (Greiner, 2013; Wu et al., 2005). Bu nedenle hareket terminolojisinin aktarımında, standart terim adlarının anatomik bağlam ve ölçüm yaklaşımıyla birlikte sunulması uygun olacaktır.

Farklı Disiplinler, Farklı Yaklaşımlar

İnsan hareketinin incelenmesinde kullanılan terminoloji, araştırmanın amacına ve değerlendirilen anatomik düzeye göre farklı düzeylerde ayrıntı gerektirmektedir. Anatomik adlandırma, hareketin ve ilgili yapıların ortak terimlerle ifade edilmesini sağlarken; kinematik değerlendirme, hareketin hangi segmentler arasında, hangi eksenler ve referans sistemi temelinde ölçüldüğünün belirtilmesini gerektirir. Bu nedenle biyomekanik araştırmalarda TA'nın sağladığı adlandırma çerçevesi, eklem koordinat sistemleri ve ölçüm yöntemlerine ilişkin tanımlarla tamamlanmalıdır (Greiner, 2013; Wu et al., 2002, 2005).

Bu gereksinim, hareket analizine yönelik uluslararası standardizasyon çalışmalarının bulunmadığı anlamına gelmemektedir. International Society of Biomechanics'in ayak bileği, kalça ve omurga ile omuz, dirsek, el bileği ve el için yayımladığı öneriler, eklem hareketlerinin ortak referans sistemleriyle raporlanmasını amaçlamaktadır (Wu et al., 2002, 2005). Bununla birlikte, kullanılan hareket teriminin anatomik kapsamının ve ölçülen değişkenin açıkça belirtilmesi önemini korumaktadır. Aynı terimin farklı anatomik düzeyler veya ölçüm yaklaşımları için kullanılması, araştırma sonuçlarının yorumlanmasını güçleştirebilir (Greiner, 2007, 2013).

Lumbopelvik Ritim: Hareket Adından Segmentler Arası Koordinasyona

Lumbopelvik ritim, gövdenin öne eğilmesi ve başlangıç konumuna dönmesi sırasında lomber omurga ile pelvis hareketlerinin birlikte değerlendirilmesini ifade eder. Bu kavram, tek bir hareket yönünü adlandırmanın ötesinde, iki bölgenin toplam harekete göreli katkılarını ve hareket boyunca gösterdikleri koordinasyonu ele alır. Vazirian ve arkadaşlarının derlemesi, lumbopelvik ritmin yaş, cinsiyet ve bel ağrısı gibi katılımcı

özelliklerinin yanı sıra hareket hızı, dış yük ve kas yorgunluğu gibi görev koşullarına göre değişebildiğini göstermektedir (Vazirian et al., 2016).

Dolayısıyla "gövde fleksiyonu" ile "lumbopelvik ritim" birbirinin yerine kullanılabilecek iki hareket adı olarak değerlendirilmemelidir. İlki hareketin yönünü belirtirken, ikincisi bu hareketin farklı bölgeler arasındaki dağılımını ve koordinasyonunu inceleyen işlevsel bir kavramdır. Araştırmalarda lumbopelvik ritmin nasıl hesaplandığının ve hangi hareket evresinin değerlendirildiğinin açıklanması, bulguların karşılaştırılabilmesi açısından önem taşımaktadır (Vazirian et al., 2016).

Ayak Pronasyonu: Terimin Kapsamı ve Ölçülen Değişken

Ayak pronasyonu ve supinasyonu, hareket terminolojisindeki kullanım farklılıklarını gösteren örnekler arasındadır. Greiner, ayak hareketlerini inceleyen çalışmalarda pronasyon–supinasyon ve inversiyon–eversiyon terimlerinin farklı ve kimi durumlarda birbiriyle çelişen tanımlarla kullanıldığını bildirmiştir (Greiner, 2007). Bu nedenle, bir çalışmada "pronasyon" ifadesinin kullanılması, değerlendirilen eklem veya segment ile ölçüm yöntemini tek başına açıklamamaktadır.

Mousavi ve arkadaşlarının yürüyüş ve koşu biçiminin yeniden eğitilmesine ilişkin sistematik derlemesinde, ayak pronasyonuyla ilişkili değerlendirmeler arasında arka ayak eversiyonu, pronasyon ölçümleri ve ayak arkına ilişkin değişkenler yer almaktadır (Mousavi et al., 2024). Bu değişkenler birbiriyle ilişkili olmakla birlikte, aynı anatomik veya işlevsel özelliğin eşdeğer ölçümleri olarak kabul edilmemelidir. Fujishita ve arkadaşları ise arka ayak hizalanmasını bacak-topuk açısıyla sınıflandırmış; yürüyüş sırasında plantar basıncı ayakkabı içi basınç ölçüm sistemiyle, hareket parametrelerini de giyilebilir ataletsel

sensörle değerlendirmiştir (Fujishita et al., 2023). Bu örnek, statik hizalanma, dinamik hareket ve yük dağılımının ayrı değişkenler olarak tanımlanması gerektiğini göstermektedir.

Bu bağlamda arka ayak eversiyonu, ayak pronasyonu ve plantar basınç dağılımı gibi ifadeler kullanılırken, ölçülen anatomik özellik ve kullanılan yöntem açıkça belirtilmelidir. Yalnızca bir açı veya basınç değerine dayanarak ayağın bütün segmentlerinin hareketi hakkında doğrudan çıkarım yapılmasından kaçınılmalıdır.

Terminolojik Açıklık İçin Öneriler

Bu örnekler doğrultusunda, insan hareketini konu alan eğitim materyallerinde ve bilimsel yayınlarda hareket adıyla birlikte ilgili eklem veya segmentin belirtilmesi; nicel ölçümlerde ise referans pozisyonunun, koordinat sisteminin, anatomik referans noktalarının ve hesaplama yönteminin açıklanması önerilebilir. Statik duruş ile dinamik hareket ölçümleri birbirinden ayrılmalı; lumbopelvik ritim gibi işlevsel kavramlar, kullanılan değerlendirme yaklaşımıyla birlikte tanımlanmalıdır. Ayrıca esas alınan TA baskısının ve yararlanılan biyomekanik raporlama önerilerinin belirtilmesi, terminolojik izlenebilirliği destekleyebilir. Böyle bir yaklaşım, anatomik adlandırma ile disipline özgü ölçüm dilinin birlikte ve tutarlı kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç

İnsan hareketlerinin açık ve tutarlı biçimde tanımlanması, anatomik adlandırmanın yanı sıra biyomekanik modellerin, ölçüm yöntemlerinin ve klinik kullanım bağlamının birlikte değerlendirilmesini gerektiren disiplinler arası bir konudur. Terminologia Anatomica, ortak anatomik dilin oluşturulmasında temel bir referans sunarken, hareketlerin nicel olarak değerlendirilmesi koordinat sistemlerinin, referans pozisyonlarının ve ölçüm protokollerinin ayrıca belirtilmesini gerektirir. Bu nedenle anatomik terminoloji ile biyomekanik raporlama

standartlarının birbirini tamamlayacak biçimde kullanılması önem taşımaktadır.

Bölümde ele alınan örnekler, aynı hareket adının kullanılmasının ölçülen değişkenlerin her zaman aynı olduğu anlamına gelmediğini göstermektedir. Eğitim materyallerinde, bilimsel yayınlarda ve klinik değerlendirmelerde ilgili eklem veya segmentin, terimin kullanım kapsamının ve ölçüm yaklaşımının açıkça belirtilmesi, kavramsal belirsizliklerin azaltılmasına ve bulguların karşılaştırılabilirliğine katkı sağlayabilir. Bu doğrultuda, IFAA bünyesinde anatomik terminoloji çalışmalarını yürüten FIPAT ile ISB gibi ilgili kuruluşlar arasında iş birliğinin geliştirilmesi önerilebilir. Böyle bir yaklaşımın temel hedefi, anatomik adlandırma ile disipline özgü hareket tanımlarını uyumlu hâle getirerek eğitim, araştırma ve klinik iletişimde anlaşılabilirliği güçlendirmek olmalıdır.

KAYNAKÇA

Chmielewski, P. P. (2024). Exploring the uncharted: Missing anatomical names in the Terminologia Anatomica. *Clinical Anatomy, 37*(2), 193–200. https://doi.org/10.1002/ca.24109

Esersoy, S., & Unur, E. (2020). Terminologia Anatomica'da yer alan hareket sistemi ile ilgili terimlerde bulunan sıfatların incelenmesi. *Sağlık Bilimleri Dergisi, 29*(3), 192–204. https://doi.org/10.34108/eujhs.774399

Federative Committee on Anatomical Terminology. (1998). *Terminologia anatomica: International anatomical terminology*. Thieme.

Fujishita, H., Ikuta, Y., Maeda, N., Komiya, M., Morikawa, M., Arima, S., Sakamitsu, T., Obayashi, H., Fukuhara, K., Ushio, K., & Adachi, N. (2023). Effects of rearfoot eversion on foot

plantar pressure and spatiotemporal gait parameters in adolescent athletes. *Healthcare, 11*(13), Article 1842. https://doi.org/10.3390/healthcare11131842

Greiner, T. M. (2007). The jargon of pedal movements. *Foot & Ankle International, 28*(1), 109–125. https://doi.org/10.3113/FAI.2007.0020

Greiner, T. M. (2013). Terms that move us: Striding through the intersection of anatomy and biomechanics [Conference abstract]. *The FASEB Journal, 27*(S1), 747.8. https://doi.org/10.1096/fasebj.27.1_supplement.747.8

Kachlik, D., Baca, V., Bozdechova, I., Cech, P., & Musil, V. (2008). Anatomical terminology and nomenclature: Past, present and highlights. *Surgical and Radiologic Anatomy, 30*(6), 459–466. https://doi.org/10.1007/s00276-008-0357-y

Logan, S. W., Ross, S. M., Chee, K., Stodden, D. F., & Robinson, L. E. (2018). Fundamental motor skills: A systematic review of terminology. *Journal of Sports Sciences, 36*(7), 781–796. https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1340660

Mousavi, S. H., Khorramroo, F., & Jafarnezhadgero, A. (2024). Gait retraining targeting foot pronation: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE, 19*(3), Article e0298646. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298646

Sakai, T. (2007). Historical evolution of anatomical terminology from ancient to modern. *Anatomical Science International, 82*(2), 65–81. https://doi.org/10.1111/j.1447-073X.2007.00180.x

Vazirian, M., Van Dillen, L. R., & Bazrgari, B. (2016). Lumbopelvic rhythm in the sagittal plane: A review of the effects of participants and task characteristics. *International*

Musculoskeletal Medicine, 38(2), 51–58. https://doi.org/10.1080/17536146.2016.1241525

Whitmore, I. (1999). Terminologia anatomica: New terminology for the new anatomist. *The Anatomical Record, 257*(2), 50–53. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0185(19990415)257:2<50::AID-AR4>3.0.CO;2-W

Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., Rosenbaum, D., Whittle, M., D'Lima, D. D., Cristofolini, L., Witte, H., Schmid, O., & Stokes, I. (2002). ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—Part I: Ankle, hip, and spine. *Journal of Biomechanics, 35*(4), 543–548. https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00222-6

Wu, G., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J., Makhsous, M., Van Roy, P., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A. R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F. W., & Buchholz, B. (2005). ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics, 38*(5), 981–992. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042

BÖLÜM 3

AYAK ANATOMİSİ VE BİYOMEKANİĞİ

BEHİYE SARIYILDIZ[1]
ENGİN TAŞTABAN[2]

Giriş

Ayak, ayakta durma ve yürüme sırasında vücut ağırlığını taşıyan, yükü zemine aktaran ve zemine uyum sağlayan bir yapıdır. Kemikler, eklemler, bağlar ve kasların koordineli çalışması, hareketlilik ile stabilitenin birlikte sürdürülmesini sağlar (Brockett & Chapman, 2016). Bu bölümde ayağın embriyolojik gelişimi ve anatomik yapıları ele alınmakta; bu yapıların ayak arkları, yük aktarımı ve yürüme sırasındaki biyomekanik işlevlerle ilişkileri açıklanmaktadır. Anatomik yapıların adlandırılmasında Terminologia Anatomica'nın ikinci baskısındaki Latince terimler esas alınmıştır (Federative International Programme for Anatomical Terminology [FIPAT], 2019).

[1] Öğr. Gör. Dr., Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Tıp Fakültesi, Anatomi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-5509-8533
[2] Doç. Dr., Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Tıp Fakültesi, Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-9094-2904

Ayağın Embriyolojik Gelişimi

Alt ekstremite tomurcukları, embriyonik dönemin dördüncü haftasının sonu ile beşinci haftasının başlangıcında belirir. Tomurcuklar, ektodermle örtülü mezenkimal bir çekirdekten oluşur. Ekstremitenin iskelet ve bağ dokuları lateral plak mezoderminin somatik tabakasından, iskelet kasları ise somitlerden göç eden öncül hücrelerden gelişir. Tomurcuğun distal ucundaki apikal ektodermal sırt, ekstremitenin büyümesini düzenler (Gilbert, 2000; Buckingham et al., 2003). Altıncı hafta civarında distal bölüm genişleyip yassılaşarak ayak plağını oluşturur. Gelişimin ilerleyen aşamalarında parmaklar arasındaki dokunun programlı hücre ölümüyle azalması, parmakların birbirinden ayrılmasını sağlar. Alt ekstremitenin mediale dönmesiyle hallux medialde, ekstansör kas grubu ise bacağın önünde konumlanır (Betts et al., 2013).

Mezenkimal hücrelerin yoğunlaşıp farklılaşmasıyla oluşan kıkırdak modeller, endokondral kemikleşme yoluyla kemik dokuya dönüşür. Gelecekteki sinovyal eklem bölgelerinde interzon adı verilen hücresel alanlar oluşur. Bu alanların ve çevre dokuların farklılaşması, eklem bileşenlerinin gelişimine katkı sağlar. Kavitasyon, yani eklem boşluğunun oluşmasıyla, karşılıklı eklem yüzleri birbirinden ayrılır (Rux et al., 2019). Kemikleşme ve iskelet gelişimi doğumdan sonra da sürdüğünden, çocuk ayağının değerlendirilmesinde yaşa bağlı gelişim özellikleri dikkate alınmalıdır (Betts et al., 2013).

Ayağın Genel Düzeni ve Kemikleri

Ayak iskeleti, ossa sesamoidea pedis ve aksesuar kemikler dışında, ossa tarsi grubunda yedi kemik, beş os metatarsi ve on dört phalanx pedis olmak üzere toplam yirmi altı kemikten oluşur. Bölgesel olarak arka ayak, orta ayak ve ön ayak şeklinde incelenir. Arka ayakta os tali ve calcaneus; orta ayakta os naviculare, os

cuboideum ve üç os cuneiforme; ön ayakta ise ossa metatarsi ve phalanges pedis bulunur (Drake et al., 2009).

Ossa Tarsi

Os tali; corpus ossis tali, collum ossis tali ve caput ossis tali bölümlerinden oluşur. Corpus ossis tali'nin superior bölümündeki trochlea ossis tali, tibia ve fibula'nın oluşturduğu articulatio talocruralis yuvasına yerleşir. İnferior yüzündeki facies articulares calcaneae, calcaneus ile; caput ossis tali ise os naviculare ile eklemleşir. Os tali'ye doğrudan kas veya tendon tutunmaz. Geniş kıkırdak örtüsü ve damarların kemiğe girdiği alanların sınırlılığı nedeniyle özellikle yer değiştirmiş kırıklarda kanlanması bozulabilir (Schwartz et al., 2020).

Calcaneus, ayağın en büyük kemiğidir ve topuğun kemik temelini oluşturur. Os tali ve os cuboideum ile eklemleşir. Medial yüzündeki sustentaculum tali'nin inferiorunda bulunan sulcus tendinis flexoris longi hallucis calcanei'den flexor longus hallucis tendonu geçer. Posterior yüzüne tendo calcaneus, processus medialis tuberis calcanei'ye ise aponeurosis plantaris tutunur. Lateral yüzündeki trochlea fibularis'in superiorundan musculus fibularis brevis, inferiorundan musculus fibularis longus tendonu geçer (Gupton et al., 2023).

Os naviculare, caput ossis tali ile üç os cuneiforme arasında yer alır. Konkav posterior yüzü caput ossis tali ile, anterior yüzü ise ossa cuneiformia ile eklemleşir. Medialindeki tuberositas ossis navicularis, musculus tibialis posterior tendonunun başlıca tutunma bölgelerindendir (Prapto & Dreyer, 2023).

Os cuboideum, orta ayağın lateralinde bulunur. Posterior yüzü calcaneus ile, anterior yüzü dördüncü ve beşinci ossa metatarsi ile, medial yüzü ise os cuneiforme laterale ile eklemleşir. Os naviculare ile bağlantısı bireysel farklılık gösterir. Plantar yüzündeki

sulcus tendinis musculi fibularis longi ossis cuboidei'den musculus fibularis longus tendonu geçer (Drake et al., 2009; Elsevier, t.y.-b).

Os cuneiforme mediale, os cuneiforme intermedium ve os cuneiforme laterale, os naviculare'nin anteriorunda yer alır. Distalde başlıca sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü ossa metatarsi ile eklemleşirler. Os cuneiforme intermedium'un komşularına göre daha kısa olması, ikinci os metatarsi'nin basis bölümünün bu kemikler arasındaki yuvaya yerleşmesini sağlar. Bu yerleşim, articulationes tarsometatarsales bölgesinin stabilitesini destekler. Ossa cuneiformia'nın kama biçimi de ayağın transvers arkının yapısına katkıda bulunur (Drake et al., 2009).

Ossa Metatarsi

Ossa metatarsi, medialden laterale doğru birden beşe kadar numaralandırılır. Her os metatarsi; basis ossis metatarsi, corpus ossis metatarsi ve caput ossis metatarsi bölümlerinden oluşur. Basis bölümleri ossa tarsi ile, caput bölümleri ise phalanges proximales pedis ile eklemleşir. Os primum metatarsi diğerlerine göre daha kısa ve kalın, ikinci os metatarsi ise genellikle en uzundur. İkinci os metatarsi'nin basis bölümünün ossa cuneiformia arasındaki yuvaya yerleşmesi, bu bölgenin kemiksel stabilitesini artırır. Tuberositas ossis quinti metatarsi'ye musculus fibularis brevis tendonu tutunur (Drake et al., 2009; Lezak et al., 2026). Os primum metatarsi, os cuneiforme mediale ve aralarındaki tarsometatarsal eklem, birlikte birinci ışın olarak adlandırılan işlevsel birimi oluşturur (Fraser et al., 2016).

Phalanges Pedis

Phalanges pedis, hallux'ta phalanx proximalis pedis ve phalanx distalis pedis; diğer parmaklarda ise phalanx proximalis pedis, phalanx media pedis ve phalanx distalis pedis olarak adlandırılır. Böylece her ayakta toplam on dört phalanx bulunur. Phalanges proximales pedis'in basis bölümleri, capita ossium

metatarsi ile; aynı parmağın komşu phalanges bölümleri ise birbirleriyle eklemleşir. Phalanges distales pedis'in genişleyen uçları, parmak uçlarına kemik desteği sağlar (Betts et al., 2013).

Ossa Sesamoidea Pedis

Caput ossis primi metatarsi'nin plantar tarafında, flexor brevis hallucis'in medial ve lateral tendonları içinde iki os sesamoideum bulunur. Bu kemikler caput ossis primi metatarsi ile eklemleşir; aralarından flexor longus hallucis tendonu geçer. Ossa sesamoidea pedis, yükün dağıtılmasına, flexor longus hallucis tendonunun korunmasına ve flexor brevis hallucis'in mekanik etkinliğine katkı sağlar. Ossa sesamoidea pedis gelişimsel olarak iki veya daha fazla parçalı olabilir. Bu görünümün kırıkla karıştırılmaması için gelişimsel varyasyon ile kırık arasındaki ayrım dikkate alınmalıdır (Dedmond et al., 2006).

Articulationes Pedis ve Ligamenta

Articulatio Talocruralis

Articulatio talocruralis, tibia ve fibula'nın distal uçları ile os tali arasında oluşan sinovyal menteşe tipi eklemdir. Facies articularis inferior tibiae ile malleolus medialis ve malleolus lateralis, trochlea ossis tali'yi çevreleyen bir eklem yuvası oluşturur. Malleolus lateralis, malleolus medialis'e göre daha distalde ve posteriorda yer alır. Eklem yüzleri hiyalin kıkırdakla örtülüdür. Capsula articularis, medial ve lateral ligamenta ile güçlendirilir (Drake et al., 2009).

Eklemin başlıca hareketleri dorsifleksiyon ve plantar fleksiyondur. Hareket ekseninin oblik yerleşimi nedeniyle bu hareketlere küçük dönme bileşenleri de eşlik eder. Trochlea ossis tali'nin daha geniş olan anterior bölümü, dorsifleksiyon sırasında eklem yuvasına yerleşerek kemiksel stabiliteyi artırır. Plantar fleksiyonda bu kemiksel kısıtlama görece azalır. Her iki konumda da

ligamenta ve kas-tendon yapıları eklemin stabilitesini destekler (Brockett & Chapman, 2016).

Ligamentum collaterale mediale, ligamentum deltoideum olarak da adlandırılır. Malleolus medialis'ten os tali, calcaneus, os naviculare ve ligamentum calcaneonaviculare plantare kompleksine uzanır. Yüzeyel ve derin tabakalardan oluşur. Derin tabakada talotibial lifler bulunur; ligament demetlerinin varlığı ve belirginliği bireysel farklılık gösterebilir. Bu kompleks, aşırı eversiyonu ve os tali'nin dış rotasyonunu sınırlandırarak eklemin medial stabilitesini destekler (Golanó et al., 2010).

Ligamentum collaterale laterale üç ligamentten oluşur. Ligamentum talofibulare anterius, malleolus lateralis'in anterior kenarından os tali'ye uzanır ve os tali'nin öne yer değiştirmesini sınırlar. Plantar fleksiyonla birlikte gerçekleşen inversiyon yaralanmalarında sık etkilenir. Ligamentum calcaneofibulare, malleolus lateralis'ten calcaneus'un lateral yüzüne uzanarak hem articulatio talocruralis hem de articulatio subtalaris'in stabilitesine katkı sağlar. Ligamentum talofibulare posterius, malleolus lateralis'in medial yüzündeki fossa malleoli lateralis'ten os tali'nin posterolateral bölümüne uzanır ve dorsifleksiyonda gerilir (Golanó et al., 2010).

Syndesmosis tibiofibularis, tibia ile fibula'nın distal uçları arasındaki fibröz bağlantıdır. Ligamentum tibiofibulare anterius, ligamentum tibiofibulare posterius ve interosseöz ligament tarafından desteklenir. Ligamentum tibiofibulare posterius'un derin bölümü, ligamentum tibiofibulare transversum olarak da adlandırılır. Bu yapılar, tibia ile fibula arasındaki ilişkiyi ve articulatio talocruralis yuvasının stabilitesini korurken eklem hareketlerine eşlik eden küçük fizyolojik hareketlere izin verir (Golanó et al., 2010; Brockett & Chapman, 2016).

Articulatio Subtalaris ve Articulatio Talocalcaneonavicularis

Articulatio subtalaris, dar anatomik anlamıyla os tali ve calcaneus'un posterior eklem yüzleri arasında oluşur. Os tali'nin konkav facies articularis calcanea posterior'u, calcaneus'un konveks facies articularis talaris posterior'u ile eklemleşir. Os tali ile calcaneus'un facies articulares anteriores ve mediae olarak adlandırılan eklem yüzleri ise articulatio talocalcaneonavicularis'e katılır. Bu iki eklem bölgesi, canalis tarsi ve sinus tarsi ile birbirinden ayrılır. Ligamentum talocalcaneum interosseum, ligamentum talocalcaneum anterius ve ligamentum calcaneofibulare, bölgenin stabilitesini destekler (Bartoníček et al., 2018).

Articulatio talocalcaneonavicularis'te caput ossis tali; os naviculare'nin posterior yüzü, calcaneus'un facies articularis talaris anterior ve facies articularis talaris media yüzleri ile ligamentum calcaneonaviculare plantare kompleksinin oluşturduğu yuvaya yerleşir. Ligamentum calcaneonaviculare plantare kompleksi, caput ossis tali'yi plantar ve medialden destekleyerek pars medialis arcus longitudinalis pedis'in korunmasına katkı sağlar. Ligamentum talonaviculare ve ligamentum bifurcatum'un calcaneonaviculare bölümü de bu bölgeyi destekler (Bartoníček et al., 2018; Walter et al., 2019).

Articulatio Transversa Tarsi (Chopart Kompleksi)

Articulatio transversa tarsi, klinikte Chopart kompleksi olarak da adlandırılır. Medialde articulatio talocalcaneonavicularis'in talonaviküler bölümü, lateralde articulatio calcaneocuboidea'dan oluşur. Articulatio calcaneocuboidea'nın eyer biçimindeki yüzleri, sınırlı kayma ve dönme hareketlerine izin verir. Bu iki eklem işlevsel olarak birlikte çalışır; ancak ortak bir kapsül veya eklem boşluğu içinde bulunmaz (Drake et al., 2009; Walter et al., 2019).

Ligamentum bifurcatum, calcaneus'tan başlayıp os naviculare ve os cuboideum'a uzanan iki kola ayrılır. Articulatio calcaneocuboidea, ligamentum calcaneocuboideum dorsale ile plantar taraftaki ligamentum plantare longum ve ligamentum calcaneocuboideum plantare tarafından desteklenir. Ligamentum plantare longum, calcaneus'tan os cuboideum'a ve ossa metatarsi'nin basis bölümlerine uzanır. Yüzeyel lifleri, musculus fibularis longus tendonunun geçtiği kanalın fibröz çatısını oluşturur. Daha derinde yer alan ligamentum calcaneocuboideum plantare, calcaneus ile os cuboideum'un plantar yüzleri arasında uzanır (Drake et al., 2009; Edama et al., 2021).

Articulatio subtalaris ve articulatio transversa tarsi'nin koordineli hareketleri, ayağın zemine uyum sağlamasına ve yükü aktarmasına yardımcı olur (Brockett & Chapman, 2016).

Orta Ayağın Diğer Eklemleri

Articulatio cuneonavicularis, os naviculare ile üç os cuneiforme arasında oluşan düz tip sinovyal eklemdir. Ligamenta cuneonavicularia dorsalia ve ligamenta cuneonavicularia plantaria ile desteklenir ve sınırlı kayma hareketlerine izin verir. Articulationes intercuneiformes, komşu ossa cuneiformia arasında; articulatio cuneocuboidea ise os cuneiforme laterale ile os cuboideum arasında bulunur. Bu eklemler dorsal, plantar ve interosseöz ligamenta ile güçlendirilir. Os naviculare ile os cuboideum arasındaki bağlantı genellikle fibrözdür; bazı bireylerde articulatio cuboideonavicularis biçiminde sinovyal eklemleşme görülebilir (Drake et al., 2009).

Articulationes Tarsometatarsales ve Articulationes Intermetatarseae

Articulationes tarsometatarsales, ossa cuneiformia ve os cuboideum ile ossa metatarsi'nin basis bölümleri arasında oluşur. Birinci os metatarsi, os cuneiforme mediale ile; ikinci başlıca os

cuneiforme intermedium ile; üçüncü os cuneiforme laterale ile; dördüncü ve beşinci ise os cuboideum ile eklemleşir. İkinci os metatarsi'nin basis bölümünün ossa cuneiformia arasındaki yuvaya yerleşmesi, bölgenin kemiksel stabilitesini artırır (Drake et al., 2009).

Lisfranc eklem kompleksi olarak da adlandırılan bu bölge, ligamenta tarsometatarsea dorsalia, ligamenta tarsometatarsea plantaria ve ligamenta cuneometatarsea interossea ile desteklenir. Ligamenta cuneometatarsea interossea'nın güçlü bir bileşeni olan Lisfranc ligamenti, os cuneiforme mediale'nin lateral yüzü ile ikinci os metatarsi'nin basis bölümünün medial yüzü arasında uzanır. Dördüncü ve beşinci articulationes tarsometatarsales, ilk üçüne göre daha hareketlidir. Bu hareketlilik, ayağın zemine uyum sağlamasına yardımcı olur (Yan et al., 2021).

Articulationes intermetatarseae, ikinci–beşinci ossa metatarsi'nin komşu basis bölümleri arasında bulunan küçük, düz tip sinovyal eklemlerdir. Ligamenta metatarsea dorsalia, ligamenta metatarsea plantaria ve ligamenta metatarsea interossea ile desteklenirler. Eklem boşlukları, komşu articulationes tarsometatarsales'in eklem boşluklarıyla devamlılık gösterebilir (Drake et al., 2009).

Articulationes Metatarsophalangeae

Articulationes metatarsophalangeae, capita ossium metatarsi ile phalanges proximales pedis'in basis bölümleri arasında oluşan elipsoid tip sinovyal eklemlerdir. Başlıca fleksiyon ve ekstansiyon, daha sınırlı olarak da abduksiyon ve adduksiyon hareketlerine izin verirler. Birinci metatarsophalangeal eklem, ossa sesamoidea pedis'i içeren plantar destek kompleksiyle diğerlerinden ayrılır. Hallux'un bu eklemdeki ekstansiyonu, yürümenin itiş evresinde önemlidir (Drake et al., 2009; Brockett & Chapman, 2016).

Capsulae articulares, yanlarda ligamenta metatarsophalangea collateralia, dorsalde ise ekstansör tendonların uzantılarıyla desteklenir. İkinci–beşinci eklemlerin plantar tarafında fibrokıkırdak yapısındaki plantar plaklar bulunur. Birinci eklemde ise ossa sesamoidea pedis ve bunlarla bağlantılı ligamenta, daha özelleşmiş bir plantar destek kompleksi oluşturur. Ligamenta collateralia'nın esas lifleri, phalanx proximalis pedis'in basis bölümüne; aksesuar lifleri ise plantar destek yapılarına tutunur. Plantar destek yapıları, aşırı ekstansiyonu sınırlandırır. Ligamentum metatarseum transversum profundum, komşu eklemlerin plantar destek yapılarını birbirine bağlar (Drake et al., 2009; Elsevier, t.y.-a).

Articulationes Interphalangeae Pedis

Articulationes interphalangeae pedis, aynı parmağın komşu phalanges bölümleri arasında oluşan sinovyal menteşe tipi eklemlerdir. Hallux'ta tek bir articulatio interphalangea hallucis; diğer parmaklarda ise articulationes interphalangeae proximales pedis ve articulationes interphalangeae distales pedis bulunur. Bu eklemler fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerine izin verir. Capsulae articulares, yanlarda ligamenta interphalangea collateralia pedis, plantarda ligamenta interphalangea plantaria, dorsalde ise ekstansör tendonların uzantılarıyla desteklenir (Drake et al., 2009).

Fasciae, Retinacula ve Vaginae Tendinum

Fascia dorsalis pedis, fascia cruris ile devamlılık gösteren ince bir tabakadır. Plantar fasya ise medial, santral ve lateral bölümlere ayrılır. Kalın santral bölüm, aponeurosis plantaris olarak adlandırılır. Processus medialis tuberis calcanei'den başlayıp distalde parmaklara yönelen beş banda ayrılır. Plantar plaklar, vaginae fibrosae digitorum pedis ve çevre bağ dokusuyla bağlantı kurarak arcus longitudinalis pedis'in pasif desteğine katılır (Drake et al., 2009; Chen et al., 2014).

Plantar fasyadan derine uzanan septumlar, tabandaki yapıların medial, santral ve lateral bölümler hâlinde düzenlenmesine yardımcı olur. Musculi interossei pedis, ossa metatarsi arasında daha derinde yer alır. Bu genel anatomik ayrım, klinikte kullanılan kompartman sınıflandırmalarının tamamını karşılamaz (Drake et al., 2009).

Retinacula, tendonları kemiğe yakın tutan derin fasya kalınlaşmalarıdır. Retinaculum extensorium superius tali, articulatio talocruralis'in proksimalinde tibia ile fibula arasında uzanır. Retinaculum extensorium inferius tali, calcaneus'un lateral bölümünden başlayıp medial tarafa uzanan dallara ayrılır. Retinaculum fibulare superius ve retinaculum fibulare inferius, musculus fibularis longus ve musculus fibularis brevis tendonlarını yerlerinde tutar. Malleolus medialis ile calcaneus arasında uzanan retinaculum flexorium tali ise tarsal tünelin çatısını oluşturur (Drake et al., 2009).

Tarsal Tünel

Tarsal tünel, malleolus medialis'in posteriorunda bulunan osteofibröz bir geçittir. Çatısını retinaculum flexorium tali, kemik tabanını ise distal tibia, os tali ve calcaneus'un medial yüzleri oluşturur. İçinden önden arkaya sırasıyla musculus tibialis posterior tendonu, flexor longus digitorum tendonu, arteria tibialis posterior ve eşlik eden venae, nervus tibialis ve flexor longus hallucis tendonu geçer. Nervus tibialis'in nervus plantaris medialis ve nervus plantaris lateralis'e ayrılma düzeyi bireysel farklılık gösterir. Sinirin veya dallarının bu bölgede basıya uğraması, tarsal tünel sendromunun anatomik temelini oluşturur (Harej et al., 2023).

Vaginae Tendinum

Vaginae synoviales tendinum, tendonların çevre dokular üzerinde kaymasını kolaylaştırır ve hareket sırasında sürtünmeyi azaltır. Articulatio talocruralis'in anteriorunda extensor longus

digitorum ve musculus fibularis tertius tendonları ortak bir sinovyal kılıf içinde seyreder. Musculus tibialis anterior ve extensor longus hallucis tendonlarının kılıfları ayrıdır. Posteromedialdeki musculus tibialis posterior, flexor longus digitorum ve flexor longus hallucis tendonları da ayrı sinovyal kılıflarla çevrilidir. Musculus fibularis longus ve musculus fibularis brevis tendonlarının malleolus lateralis posteriorundaki ortak sinovyal kılıfı, vagina communis tendinum musculorum fibularium olarak adlandırılır ve distalde ayrı kılıflara ayrılır (Standring, 2008; Drake et al., 2009).

Vaginae fibrosae digitorum pedis, parmakların plantar tarafında fleksör tendonları phalanges pedis'e yakın tutar. Böylece fleksiyon sırasında tendonların kemikten uzaklaşmasını sınırlar (Drake et al., 2009).

Ayak Arkları ve Destek Mekanizmaları

Ossa pedis, arcus longitudinalis pedis ile proksimal ve distal transvers arkları oluşturur. Arkların korunması; kemiklerin biçimi ve yerleşimi, ligamenta, aponeurosis plantaris ve kas-tendon birimlerinin birlikte çalışmasına bağlıdır (Drake et al., 2009).

Pars medialis arcus longitudinalis pedis; calcaneus, os tali, os naviculare, üç os cuneiforme ve ilk üç os metatarsi'den oluşur. Lateral bölüme göre daha yüksek ve esnektir. Caput ossis tali, arkın kilit taşı olarak değerlendirilir ve ligamentum calcaneonaviculare plantare kompleksi tarafından desteklenir. Aponeurosis plantaris pasif desteğe, musculus tibialis posterior ve plantar intrinsik kaslar ise aktif desteğe katkı sağlar (Drake et al., 2009; Kelly et al., 2014).

Pars lateralis arcus longitudinalis pedis; calcaneus, os cuboideum ve dördüncü–beşinci ossa metatarsi'den oluşur. Medial bölüme göre daha alçak ve görece daha az esnektir. Ligamentum plantare longum, ligamentum calcaneocuboideum plantare ve aponeurosis plantaris, arkın pasif desteğini sağlar. Kas-tendon

yapıları da yüklenme sırasında arkın şekil değişiminin kontrolüne katılır (Drake et al., 2009).

Arcus transversus proximalis pedis, özellikle os cuboideum, ossa cuneiformia ve ossa metatarsi'nin basis bölümleri düzeyinde belirginleşir. Arcus transversus distalis pedis ise ön ayaktaki transvers düzenlenmeyi ifade eder. Kemiklerin biçimi ve aralarındaki ligamenta bu düzeni destekler; musculus fibularis longus ve musculus tibialis posterior tendonları da desteğe katılır. Transvers kavis, ayağın şekil değişikliğine karşı mekanik direncine katkıda bulunur (Drake et al., 2009; Venkadesan et al., 2020).

Arklar, yük altında şekil değiştirir. Bu değişimin miktarı, pasif dokuların elastik özellikleri ve kas aktivitesiyle düzenlenir. Böylece ayağın zemine uyumu ve yükün dağılımı desteklenir (Kelly et al., 2014).

Ayağın Temel Hareketleri

Ayak ve ayak bileği hareketleri üç düzlemde değerlendirilir. Sagittal düzlemde dorsifleksiyon, ayağın sırtının bacağın ön yüzüne yaklaşmasıdır. Plantar fleksiyon ise ayağın ters yönde hareket etmesidir. Bu hareketler başlıca articulatio talocruralis'te gerçekleşir. Frontal düzlemde inversiyon, ayak tabanının mediale; eversiyon ise laterale yönelmesidir. Transvers düzlemde abduksiyon ön ayağın laterale, adduksiyon ise mediale yönelmesini ifade eder (Brockett & Chapman, 2016).

Yük taşımayan ayakta pronasyon; dorsifleksiyon, eversiyon ve abduksiyonun birlikte gerçekleşmesidir. Supinasyon ise plantar fleksiyon, inversiyon ve adduksiyonun birleşimidir. Yük taşıma sırasında os tali ve bacağın hareketleri de bu ilişkiye katılır. Bu nedenle pronasyon ve supinasyon, yalnızca inversiyon–eversiyon hareketleri olarak değil, arka ayak, orta ayak ve bacak arasındaki ilişkili hareketlerle birlikte değerlendirilmelidir (Brockett & Chapman, 2016; Fraser et al., 2016).

Ayağın Kasları

Ayağın kasları, ekstrinsik ve intrinsik olmak üzere iki grupta incelenir. Ekstrinsik kaslar bacakta başlar ve tendonlarıyla ayağa uzanır. İntrinsik kasların başlangıç ve tutunma yerleri ise ayak içindedir. Bu kaslar birlikte ayak ve parmak hareketlerini sağlar, arkları destekler ve yüklenme sırasında hareketin kontrolüne katılır (Drake et al., 2009).

Ekstrinsik Kaslar: Anterior Grup

Compartimentum anterius cruris'te musculus tibialis anterior, extensor longus hallucis, extensor longus digitorum ve musculus fibularis tertius bulunur. Bu kaslar nervus fibularis profundus tarafından innerve edilir. Başlıca arteriyel beslenmeleri arteria tibialis anterior'dan sağlanır (Drake et al., 2009).

Musculus tibialis anterior, condylus lateralis tibiae ve tibia'nın proksimal lateral yüzü ile membrana interossea cruris'ten başlar. Tendonu os cuneiforme mediale ile basis ossis primi metatarsi'ye tutunur. Ayağa dorsifleksiyon ve inversiyon yaptırır. Salınım evresinde ayağın yerden yeterince yükselmesine yardımcı olur. Topukla ilk temasın ardından ise eksantrik kasılarak ayağın plantar fleksiyonunu ve ön ayağın zemine indirilmesini kontrol eder (Drake et al., 2009; Brockett & Chapman, 2016).

Extensor longus hallucis, fibula'nın orta bölümündeki medial yüz ve membrana interossea cruris'ten başlar. Tendonu, hallux'un phalanx distalis pedis'inin basis bölümünün dorsal yüzüne tutunur. Hallux'a ekstansiyon yaptırır ve articulatio talocruralis'te dorsifleksiyona yardımcı olur (Standring, 2008).

Extensor longus digitorum, condylus lateralis tibiae, fibula'nın proksimal medial yüzü ve membrana interossea cruris'ten başlar. Dört tendonu, ikinci–beşinci parmakların aponeurosis extensoria pedis yapılarına katılarak phalanges mediae pedis ve

phalanges distales pedis'e ulaşır. Bu parmaklara ekstansiyon yaptırır ve articulatio talocruralis'te dorsifleksiyona yardımcı olur (Standring, 2008).

Musculus fibularis tertius, fibula'nın distal bölümünden ve membrana interossea cruris'ten başlar. Tendonu, basis ossis quinti metatarsi'nin dorsal yüzüne tutunur. Dorsifleksiyon ve eversiyona yardımcı olur. Bu kas bazı bireylerde bulunmayabilir (Standring, 2008).

Lateral Grup

Musculus fibularis longus ve musculus fibularis brevis, nervus fibularis superficialis tarafından innerve edilir. Ayağa eversiyon yaptırır ve plantar fleksiyona yardımcı olurlar. Musculus fibularis longus, caput fibulae ve fibula'nın proksimal lateral yüzünden başlar. Tendonu, malleolus lateralis'in posteriorundan ve os cuboideum'un plantar oluğundan geçerek os cuneiforme mediale ile basis ossis primi metatarsi'ye tutunur. Musculus fibularis brevis, fibula'nın lateral yüzünün distal bölümünden başlar; tendonu tuberositas ossis quinti metatarsi'ye tutunur. Malleolus lateralis'in posteriorunda musculus fibularis brevis tendonu, musculus fibularis longus tendonunun anteriorunda seyreder (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Posterior Yüzeyel Grup

Musculus gastrocnemius ve musculus soleus, birlikte musculus triceps surae'yi oluşturur. Musculus gastrocnemius, condylus medialis femoris ve condylus lateralis femoris çevresinden; musculus soleus ise caput fibulae ve fibula'nın proksimal posterior yüzü ile linea musculi solei ve margo medialis tibiae'den başlar. Tendonları birleşerek tendo calcaneus'u oluşturur ve calcaneus'un posterior yüzüne tutunur. Güçlü plantar fleksörler olarak duruş kontrolünde ve yürümenin itiş evresinde görev alırlar. Musculus gastrocnemius, articulatio genus'u da geçtiğinden diz

fleksiyonuna yardımcı olur (Drake et al., 2009; Brockett & Chapman, 2016).

Musculus plantaris, femur'un lateral suprakondiler bölgesinden başlayan küçük bir kastır. Uzun tendonu genellikle calcaneus'a uzanır; distal tutunma yeri bireysel farklılık gösterir. Diz fleksiyonu ve articulatio talocruralis'te plantar fleksiyona zayıf katkı sağlar. Posterior yüzeyel gruptaki bu üç kas, nervus tibialis tarafından innerve edilir (Standring, 2008).

Posterior Derin Grup

Pars profunda compartimenti posterioris cruris'teki kaslardan musculus tibialis posterior, flexor longus digitorum ve flexor longus hallucis ayağa uzanır. Üçü de nervus tibialis tarafından innerve edilir (Drake et al., 2009).

Musculus tibialis posterior, tibia ve fibula'nın posterior yüzleri ile membrana interossea cruris'ten başlar. Malleolus medialis'in posteriorundan geçen tendonu, başlıca tuberositas ossis navicularis'e tutunur. Tendon uzantıları ossa cuneiformia, os cuboideum ve ikinci–dördüncü ossa metatarsi'nin basis bölümlerine yayılır; bu uzantıların dağılımı bireysel farklılık gösterebilir. Kas, inversiyon ve plantar fleksiyon yaptırır; pars medialis arcus longitudinalis pedis'in aktif desteğine de katılır (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Flexor longus digitorum, tibia'nın posterior yüzünde linea musculi solei'nin inferiorundan başlar. Dört tendonu, ikinci–beşinci parmakların phalanges distales pedis bölümlerinin basis kısımlarındaki plantar yüzlere tutunur. Bu parmaklara fleksiyon yaptırır ve articulatio talocruralis'te plantar fleksiyona yardımcı olur (Standring, 2008).

Flexor longus hallucis, fibula'nın posterior yüzünün distal üçte ikisi ve membrana interossea cruris'ten başlar. Tendonu,

hallux'un phalanx distalis pedis'inin basis bölümünün plantar yüzüne tutunur. Hallux'a fleksiyon yaptırır ve articulatio talocruralis'te plantar fleksiyona yardımcı olur (Standring, 2008).

Ayağın İntrinsik Kasları

İntrinsik kaslar, parmak hareketlerine, eklem stabilitesine ve ayak arklarının aktif desteğine katılır. Ayak sırtında kısa ekstansör kaslar bulunur. Plantar taraftaki kaslar ise yüzeyelden derine doğru dört tabakada incelenir (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Ayak Sırtındaki Kaslar

Extensor brevis digitorum ve extensor brevis hallucis, calcaneus'un dorsolateral bölümünden başlar. Her iki kas da nervus fibularis profundus tarafından innerve edilir. Extensor brevis digitorum'un üç tendonu, ikinci–dördüncü parmakların uzun ekstansör tendonlarına ve aponeurosis extensoria pedis yapılarına katılır. Kas, bu parmakların ekstansiyonuna yardımcı olur. Extensor brevis hallucis tendonu ise hallux'un phalanx proximalis pedis'inin basis bölümünün dorsal yüzüne tutunur. Kas, hallux'un metatarsophalangeal ekleminde ekstansiyon yaptırır (Drake et al., 2009).

Plantar Kasların Birinci Tabakası

Birinci tabakada medialden laterale abductor hallucis, flexor brevis digitorum ve abductor digiti minimi pedis bulunur. Bu kaslar calcaneus ve çevresindeki bağ dokularından başlar (Standring, 2008).

Abductor hallucis, hallux'un phalanx proximalis pedis'inin basis bölümünün medial tarafına tutunur. Hallux'a abduksiyon ve metatarsophalangeal fleksiyon yaptırır. Nervus plantaris medialis tarafından innerve edilir (Standring, 2008).

Flexor brevis digitorum'un dört tendonu, ikinci–beşinci parmakların phalanges mediae pedis bölümlerine tutunur. Her tendon, flexor longus digitorum tendonunun geçmesine izin veren iki kola ayrılır. Kas, articulationes interphalangeae proximales pedis'te fleksiyon yaptırır. Nervus plantaris medialis tarafından innerve edilir (Standring, 2008).

Abductor digiti minimi pedis, beşinci parmağın phalanx proximalis pedis'inin basis bölümünün lateral tarafına tutunur. Bu parmağa abduksiyon ve metatarsophalangeal fleksiyon yaptırır. Nervus plantaris lateralis tarafından innerve edilir (Standring, 2008).

Plantar Kasların İkinci Tabakası

İkinci tabakada musculus quadratus plantae, musculi lumbricales pedis ve uzun parmak fleksörlerinin tendonları bulunur. Musculus quadratus plantae, calcaneus'tan medial ve lateral olmak üzere iki başla başlar ve flexor longus digitorum tendonuna tutunur. Bu tendonun oblik çekişini dengeleyerek parmak fleksiyonuna yardımcı olur. Nervus plantaris lateralis tarafından innerve edilir (Drake et al., 2009).

Musculi lumbricales pedis'i oluşturan dört kas, flexor longus digitorum tendonlarından başlar. Tendonları, ikinci–beşinci parmakların medial tarafındaki aponeurosis extensoria pedis yapılarına tutunur. Bu kaslar metatarsophalangeal fleksiyon ve interphalangeal ekstansiyona katkı sağlar. Birinci lumbrikal kas nervus plantaris medialis, diğer üç lumbrikal kas ise nervus plantaris lateralis tarafından innerve edilir (Drake et al., 2009).

Plantar Kasların Üçüncü Tabakası

Üçüncü tabakada flexor brevis hallucis, adductor hallucis ve flexor digiti minimi pedis bulunur (Standring, 2008).

Flexor brevis hallucis, os cuboideum ve os cuneiforme laterale'nin plantar yüzleri ile musculus tibialis posterior

tendonunun uzantılarından başlar. Ossa sesamoidea pedis'i içeren iki tendonu, hallux'un phalanx proximalis pedis'inin basis bölümünün medial ve lateral taraflarına tutunur. Kas, hallux'un metatarsophalangeal ekleminde fleksiyon yaptırır. Başlıca innervasyonu nervus plantaris medialis tarafından sağlanır (Standring, 2008).

Adductor hallucis, caput obliquum ve caput transversum olmak üzere iki baştan oluşur. Caput obliquum, ikinci–dördüncü ossa metatarsi'nin basis bölümleri ve musculus fibularis longus tendon kılıfından; caput transversum ise üçüncü–beşinci articulationes metatarsophalangeae'nin plantar ligamentleri ve ligamentum metatarseum transversum profundum'dan başlar. İki baş, hallux'un phalanx proximalis pedis'inin basis bölümünün lateral tarafına tutunur. Kas, hallux'a adduksiyon yaptırır ve transvers arkı destekler. Nervus plantaris lateralis'in derin dalı tarafından innerve edilir (Standring, 2008).

Flexor digiti minimi pedis, basis ossis quinti metatarsi'den başlar ve beşinci parmağın phalanx proximalis pedis'inin basis bölümüne tutunur. Bu parmağın metatarsophalangeal ekleminde fleksiyon yaptırır. Nervus plantaris lateralis tarafından innerve edilir (Standring, 2008).

Plantar Kasların Dördüncü Tabakası

Dördüncü tabakada dört kastan oluşan musculi interossei dorsales pedis ile üç kastan oluşan musculi interossei plantares pedis bulunur. Bu kaslar ossa metatarsi'den başlar; phalanges proximales pedis'in basis bölümlerine ve aponeurosis extensoria pedis yapılarına tutunur (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Parmakların abduksiyon ve adduksiyon hareketleri, ikinci parmağın uzun ekseni esas alınarak tanımlanır. Musculi interossei dorsales pedis, ikinci–dördüncü parmaklara abduksiyon; musculi interossei plantares pedis ise üçüncü–beşinci parmaklara adduksiyon

yaptırır. Her iki grup, metatarsophalangeal fleksiyon ve interphalangeal ekstansiyona da yardımcı olur. Başlıca innervasyonları nervus plantaris lateralis tarafından sağlanır (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Musculus fibularis longus tendonunun tabandaki seyri ve musculus tibialis posterior tendonunun derin plantar tutunma uzantıları da bu tabakayla birlikte değerlendirilir (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Arteriae Pedis

Ayağın arteriyel beslenmesi, arteria tibialis anterior'un devamı olan arteria dorsalis pedis ile arteria tibialis posterior'un medial ve lateral plantar dallarından sağlanır. Arteria dorsalis pedis, extensor longus hallucis tendonunun lateralinde ilerleyerek birinci intermetatarsal aralığa ulaşır. Arteria tarsea lateralis, arteriae tarseae mediales, arteria arcuata ve birinci arteria metatarsea dorsalis başlıca dallarıdır. Arteria plantaris profunda, birinci musculus interosseus dorsalis pedis'in iki başı arasından tabana geçerek arcus plantaris'in oluşumuna katılır. Arteria arcuata'dan genellikle ikinci–dördüncü arteriae metatarseae dorsales çıkar. Arterlerin varlığı ve dallanma düzeni bireysel farklılık gösterebilir (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Arteria plantaris medialis, abductor hallucis'in derininde ilerleyerek ayağın medial bölümünü besler. Genellikle daha büyük olan arteria plantaris lateralis, flexor brevis digitorum ile musculus quadratus plantae arasında basis ossis quinti metatarsi'ye doğru ilerler. Ardından mediale dönerek arcus plantaris'i oluşturur ve arteria dorsalis pedis'in dalı olan arteria plantaris profunda ile birleşir. Arktan çıkan arteriae metatarseae plantares, parmaklara yönelen dijital dalların oluşumuna katılır. Rami perforantes, dorsal ve plantar arteriyel dolaşımı birbirine bağlar (Standring, 2008).

Venae Pedis

Ayağın yüzeyel ve derin venöz sistemleri birbirleriyle bağlantılıdır. Venae digitales dorsales pedis ve venae metatarseae dorsales pedis, arcus venosus dorsalis pedis'e katılır. Arkın medial tarafı, vena marginalis medialis pedis üzerinden vena saphena magna'ya; lateral tarafı ise vena marginalis lateralis pedis üzerinden vena saphena parva'ya devam eder. Vena saphena magna, malleolus medialis'in anteriorundan; vena saphena parva ise malleolus lateralis'in posteriorundan geçer (Drake et al., 2009).

Derin venler, ilgili arterlere eşlik eder. Rete venosum plantare'den gelen kan, venae plantares mediales ve venae plantares laterales aracılığıyla venae tibiales posteriores'e taşınır. Venae dorsales pedis ise venae tibiales anteriores'e drene olur. Perforan venler, yüzeyel ve derin venöz sistemleri birbirine bağlar (Standring, 2008).

Ayağın Lenfatik Drenajı

Yüzeyel lenfatiklerin çoğu, vena saphena magna'nın seyri boyunca ilerleyerek nodi inguinales superficiales'e ulaşır. Ayağın lateral bölümü ve regio calcanea'nın posterolateralinden çıkan lenfatiklerin bir bölümü, vena saphena parva'ya eşlik ederek nodi poplitei'ye drene olur. Derin lenfatikler, derin damarları izleyerek başlıca nodi poplitei'ye, ardından nodi inguinales profundi ve iliak lenf düğümlerine ulaşır. Bu yollar arasındaki bağlantılar ve bireysel farklılıklar nedeniyle drenaj bölgelerinin sınırları kesin değildir (Standring, 2008).

Nervi Pedis

Ayağın innervasyonu; nervus tibialis'in plantar ve calcaneal dalları, nervus fibularis superficialis, nervus fibularis profundus, nervus suralis ve nervus saphenus tarafından sağlanır. Nervus plantaris medialis ve nervus plantaris lateralis, tabanın duyusunu ve

plantar intrinsik kasların motor innervasyonunu üstlenir. Nervus fibularis profundus ise dorsum pedis'teki kısa ekstansör kasları innerve eder (Drake et al., 2009).

Nervus Tibialis ve Plantar Dalları

Nervus tibialis, arteria tibialis posterior ve eşlik eden venae ile birlikte malleolus medialis'in posteriorundan tarsal tünele girer ve nervus plantaris medialis ile nervus plantaris lateralis'e ayrılır. Rami calcanei mediales nervi tibialis, topuğun medial ve plantar bölgelerinin duyusunu sağlar. Bu dalların kökeni ve nervus tibialis'in terminal dallara ayrılma düzeyi bireysel farklılık gösterebilir (Standring, 2008).

Nervus plantaris medialis, abductor hallucis'in derininden geçer. Tabanın medial bölümünün, ilk üç parmağın ve dördüncü parmağın medial yarısının plantar yüzlerinin duyusunu sağlar. Dijital dalları, ilgili parmak uçlarına ve tırnak yatağı çevresine de ulaşır. Abductor hallucis, flexor brevis digitorum, flexor brevis hallucis ve birinci musculus lumbricalis pedis'e motor dallar verir (Drake et al., 2009).

Nervus plantaris lateralis, flexor brevis digitorum ile musculus quadratus plantae arasında ilerler ve yüzeyel–derin dallara ayrılır. Tabanın lateral bölümünün, beşinci parmağın ve dördüncü parmağın lateral yarısının plantar yüzlerinin duyusunu sağlar. Nervus plantaris medialis'in innerve ettiği kaslar dışındaki plantar intrinsik kasların başlıca motor siniridir (Standring, 2008).

Nervus Fibularis Superficialis ve Nervus Fibularis Profundus

Nervus fibularis superficialis, distal bacakta fascia cruris'i delerek yüzeyelleşir ve dorsum pedis derisinin büyük bölümüne dağılır. Nervus fibularis profundus, arteria tibialis anterior ve eşlik eden venae ile birlikte retinaculum extensorium superius tali ve retinaculum extensorium inferius tali'nin altından geçer. Extensor

brevis digitorum ve extensor brevis hallucis'i innerve eder. Başlıca deri duyusu alanı, birinci dorsal parmak aralığı ile birinci ve ikinci parmakların bu aralığa bakan yüzleridir. Musculi interossei dorsales pedis grubundaki ilk iki kasa ek motor dallar verebilir (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Nervus Suralis ve Nervus Saphenus

Nervus suralis, çoğunlukla nervus tibialis ve nervus fibularis communis'ten gelen dalların birleşmesiyle oluşur. Malleolus lateralis'in posteriorundan geçerek margo lateralis pedis ve beşinci parmağın lateral yüzünün duyusunu sağlar (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Nervus saphenus, nervus femoralis'in duyusal dalıdır. Vena saphena magna'nın seyri boyunca ilerleyerek malleolus medialis çevresi ve ayağın medial kenarına dağılır. Sinirlerin deri üzerindeki duyusal dağılım sınırları, aralarındaki bağlantılar ve bireysel farklılıklar nedeniyle değişebilir (Drake et al., 2009; Standring, 2008).

Ayak Biyomekaniği

Ayak, yük taşıma, zemine uyum, denge ve ilerleme sırasında kuvvet aktarımı gibi işlevleri birlikte yerine getirir. Bu işlevler; eklem hareketleri, kas aktivitesi, bağlar, aponeurosis plantaris ve diğer yumuşak dokuların etkileşimine dayanır (Brockett & Chapman, 2016).

Yük Aktarımı ve Plantar Yumuşak Dokular

Yer tepki kuvveti, duruş evresi boyunca ayağın farklı bölgelerinde değişen yüklenmeler oluşturur. Plantar basıncın dağılımı; ayak yapısı, yürüme biçimi, ayakkabı ve zemin özelliklerinden etkilenir. Plantar deri, fibröz bağlantılarla alttaki dokulara tutunur. Topuk ve capita ossium metatarsi'nin altındaki yağ

yastıkları, yükün dağıtılmasına yardımcı olur (Brockett & Chapman, 2016).

Topuk yastığı, fibröz septalarla ayrılmış yüzeyel küçük ve derin büyük bölmelerden oluşur. Bu tabakaların mekanik özellikleri farklıdır. Derin tabaka yük altında daha fazla şekil değiştirirken yüzeyel tabaka şekil değişikliğine karşı daha yüksek direnç gösterir (Hsu et al., 2007).

Ayak Bileği ve Arka Ayağın Mekanik İşlevi

Articulatio talocruralis'teki hareketler, duruş evresinde tibia'nın ayak üzerinde ilerlemesine ve salınım evresinde ayağın yerden yeterince yükselmesine olanak sağlar. Articulatio subtalaris, arka ayağın üç düzlemli hareketlerine ve zemine uyumuna katılır. Yük taşıma sırasında os tali ve tibia'nın hareketleri de bu ilişkiye dâhil olur. Bu nedenle pronasyon ve supinasyon, yalnızca topuğun inversiyon ve eversiyon hareketleriyle açıklanamaz (Brockett & Chapman, 2016).

Orta Ayak ve Ön Ayağın Mekanik İşlevi

Articulatio talocalcaneonavicularis'in talonaviküler bölümü ve articulatio calcaneocuboidea, articulatio subtalaris ile birlikte ayağın hareketini ve kuvvet aktarımını düzenler. Geleneksel orta ayak kilitlenmesi modeli, itiş sırasında ayağın mekanik sertliğinin artmasını açıklamak için kullanılmıştır. Bununla birlikte canlı bireylerde yapılan ölçümler, itiş sırasında da orta ayak ve articulatio subtalaris'te belirgin hareket bulunduğunu göstermektedir. Bu bulgular, etkin kuvvet aktarımı için eklemlerin tamamen hareketsizleşmesi gerektiği yorumunu desteklememektedir (Behling et al., 2024).

Articulationes tarsometatarsales bölgesinde, ikinci os metatarsi'nin basis bölümünün ossa cuneiformia arasındaki yerleşimi ve Lisfranc ligamenti stabiliteyi destekler. Daha hareketli

olan dördüncü ve beşinci articulationes tarsometatarsales, ayağın zemine uyumuna yardımcı olur. Articulationes metatarsophalangeae'nin ekstansiyonu ise duruş evresinin sonunda vücudun ön ayak üzerinden ilerlemesine olanak verir (Fraser et al., 2016).

Yürüme Döngüsünde Ayağın İşlevi

Yürüme döngüsü, bir ayağın zeminle ilk temasından aynı ayağın bir sonraki ilk temasına kadar geçen süredir. Duruş evresinde ayak zeminle temas ederek yük taşır; salınım evresinde ise zeminden ayrılarak sonraki adıma hazırlanır. Tipik yürüyüşte topukla ilk teması izleyen plantar fleksiyon, dorsifleksör kasların eksantrik aktivitesiyle kontrol edilir. Tibia ayak üzerinde ilerlerken plantar fleksör kaslar, bu ilerlemeyi ve ayak bileğindeki dorsifleksiyonu kontrol eder. Duruş evresinin son bölümünde topuk yükselir ve yük ön ayağa aktarılır. Salınım sırasında dorsifleksör kaslar, ayağın yerden yeterince yükselmesine yardımcı olur (Brockett & Chapman, 2016; Fraser et al., 2016).

Arkların Dinamik Davranışı ve Çıkrık Mekanizması

Ayak arklarının yük altındaki şekil değişimi, ligamenta ve aponeurosis plantaris'in pasif direnci ile kasların aktif desteği tarafından düzenlenir (Kelly et al., 2014). Çıkrık mekanizmasında articulationes metatarsophalangeae'nin ekstansiyonu, aponeurosis plantaris'in capita ossium metatarsi çevresinde sarılarak gerilmesine neden olur. Bu mekanizma, topuk ile ön ayak arasındaki mesafenin azalmasına ve arcus longitudinalis pedis'in yükselmesine katkı sağlar (Chen et al., 2014).

Aponeurosis plantaris'in uzunluğu, yüklenme sırasında değişebilir. Koşu sırasında yapılan ölçümler, aponeurosis plantaris'in esneyebilmesinin parmak ekstansiyonu ile arkın şekil değişimi arasındaki ilişkiyi etkilediğini göstermektedir. Bu nedenle

çıkrık mekanizması, arkın dinamik davranışını açıklayan tek mekanizma olarak değerlendirilmemelidir (Welte et al., 2021).

Kasların Dinamik Kontrolü

Musculus tibialis posterior, pars medialis arcus longitudinalis pedis'in desteğine ve arka ayak hareketlerinin kontrolüne katılır. Musculus fibularis longus, birinci ışının plantar fleksiyonunu ve itiş sırasında medial ön ayağın zeminle temasını destekler. Musculus fibularis brevis ise eversiyona ve lateral stabiliteye katkı sağlar (Fraser et al., 2016).

Plantar intrinsik kaslar, yük altında arkın şekil değişimini sınırlandırabilecek kuvvet üretir. Ayağın dinamik kontrolü, bu kasların ekstrinsik kaslar ve pasif destek yapılarıyla koordineli çalışmasına dayanır (Kelly et al., 2014).

Sonuç

Ayağın yük taşıma, zemine uyum ve ilerleme işlevleri, kemik ve eklem yapıları ile ligamenta, aponeurosis plantaris ve kas-tendon birimlerinin birlikte çalışmasına dayanır. Eklem hareketliliği ve stabilite arasındaki denge, ayağın yürüme boyunca değişen mekanik gereksinimlere uyumunu sağlar. Bu nedenle anatomik yapıların tek tek özelliklerinin yanı sıra birbirleriyle ilişkilerinin ve biyomekanik rollerinin de değerlendirilmesi gerekir. Embriyolojik gelişimden erişkin anatomisine uzanan bu bütüncül yaklaşım, normal ayak işlevinin, bireysel farklılıkların ve işlev kayıplarının anlaşılmasına temel oluşturur.

Kaynakça

Bartoníček, J., Rammelt, S., & Naňka, O. (2018). Anatomy of the subtalar joint. *Foot and Ankle Clinics*, *23*(3), 315–340. https://doi.org/10.1016/j.fcl.2018.04.001

Behling, A.-V., Welte, L., Kelly, L., & Rainbow, M. J. (2024). Human in vivo midtarsal and subtalar joint kinematics during walking, running and hopping. *Journal of the Royal Society Interface*, *21*(214), Article 20240074. https://doi.org/10.1098/rsif.2024.0074

Betts, J. G., Young, K. A., Wise, J. A., Johnson, E., Poe, B., Kruse, D. H., Korol, O., Johnson, J. E., Womble, M., & DeSaix, P. (2013). *Anatomy and physiology*. OpenStax. https://openstax.org/details/books/anatomy-and-physiology

Brockett, C. L., & Chapman, G. J. (2016). Biomechanics of the ankle. *Orthopaedics and Trauma*, *30*(3), 232–238. https://doi.org/10.1016/j.mporth.2016.04.015

Buckingham, M., Bajard, L., Chang, T., Daubas, P., Hadchouel, J., Meilhac, S., Montarras, D., Rocancourt, D., & Relaix, F. (2003). The formation of skeletal muscle: From somite to limb. *Journal of Anatomy*, *202*(1), 59–68. https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2003.00139.x

Chen, D. W., Li, B., Aubeeluck, A., Yang, Y. F., Huang, Y. G., Zhou, J. Q., & Yu, G. R. (2014). Anatomy and biomechanical properties of the plantar aponeurosis: A cadaveric study. *PLOS ONE*, *9*(1), Article e84347. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084347

Dedmond, B. T., Cory, J. W., & McBryde, A., Jr. (2006). The hallucal sesamoid complex. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, *14*(13), 745–753. https://doi.org/10.5435/00124635-200612000-00006

Drake, R. L., Vogl, A. W., & Mitchell, A. W. M. (2009). *Gray's anatomy for students (2nd ed.)*. Churchill Livingstone/Elsevier.

Edama, M., Takabayashi, T., Yokota, H., Hrabayashi, R., Sekine, C., & Kageyama, I. (2021). Morphological characteristics of the plantar calcaneocuboid ligaments. *Journal of Foot and Ankle Research*, *14*, Article 3. https://doi.org/10.1186/s13047-020-00443-7

Elsevier. (t.y.-a). *Collateral metatarsophalangeal ligaments*. Complete Anatomy. 11 Ekim 2026 tarihinde https://www.elsevier.com/resources/anatomy/connective-tissue/connective-tissue-of-lower-limb/collateral-metatarsophalangeal-ligaments/21806 adresinden erişildi.

Elsevier. (t.y.-b). *Cuboid bone*. Complete Anatomy. 11 Ekim 2026 tarihinde https://www.elsevier.com/resources/anatomy/skeletal-system/appendicular-skeleton/cuboid-bone/18696 adresinden erişildi.

Federative International Programme for Anatomical Terminology. (2019). *Terminologia anatomica* (2nd ed.). https://FIPAT.library.dal.ca

Fraser, J. J., Feger, M. A., & Hertel, J. (2016). Midfoot and forefoot involvement in lateral ankle sprains and chronic ankle instability. Part 1: Anatomy and biomechanics. *International Journal of Sports Physical Therapy*, *11*(6), 992–1005. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5095951/

Gilbert, S. F. (2000). *Developmental biology (6th ed.)*. Sinauer Associates. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK9983/

Golanó, P., Vega, J., de Leeuw, P. A. J., Malagelada, F., Manzanares, M. C., Götzens, V., & van Dijk, C. N. (2010). Anatomy of the ankle ligaments: A pictorial essay. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *18*(5), 557–569. https://doi.org/10.1007/s00167-010-1100-x

Gupton, M., Özdemir, M., & Terreberry, R. R. (2023). *Anatomy, bony pelvis and lower limb: Calcaneus*. In StatPearls. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK519544/

Harej, N., Salapura, V., Cvetko, E., & Snoj, Ž. (2023). Sonographic assessment of the tarsal tunnel compared to cadaveric findings: A pictorial study. *Journal of Ultrasonography*, *23*(94), e144–e150. https://doi.org/10.15557/jou.2023.0023

Hsu, C.-C., Tsai, W.-C., Wang, C.-L., Pao, S.-H., Shau, Y.-W., & Chuan, Y.-S. (2007). Microchambers and macrochambers in heel pads: Are they functionally different? *Journal of Applied Physiology*, *102*(6), 2227–2231. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01137.2006

Kelly, L. A., Cresswell, A. G., Racinais, S., Whiteley, R., & Lichtwark, G. (2014). Intrinsic foot muscles have the capacity to control deformation of the longitudinal arch. *Journal of the Royal Society Interface*, *11*(93), Article 20131188. https://doi.org/10.1098/rsif.2013.1188

Lezak, B., La Rose, J., & Massel, D. H. (2026). *Anatomy, bony pelvis and lower limb: Metatarsal bones*. In StatPearls. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549872/

Prapto, D., & Dreyer, M. A. (2023). *Anatomy, bony pelvis and lower limb: Navicular bone*. In StatPearls. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547675/

Rux, D., Decker, R. S., Koyama, E., & Pacifici, M. (2019). Joints in the appendicular skeleton: Developmental mechanisms and evolutionary influences. *Current Topics in Developmental Biology*, *133*, 119–151. https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2018.11.002

Schwartz, A. M., Runge, W. O., Hsu, A. R., & Bariteau, J. T. (2020). Fractures of the talus: Current concepts. *Foot & Ankle Orthopaedics*, *5*(1), Article 2473011419900766. https://doi.org/10.1177/2473011419900766

Standring, S. (Ed.). (2008). *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice (40th ed.)*. Churchill Livingstone/Elsevier.

Venkadesan, M., Yawar, A., Eng, C. M., Dias, M. A., Singh, D. K., Tommasini, S. M., Haims, A. H., Bandi, M. M., & Mandre, S. (2020). Stiffness of the human foot and evolution of the transverse arch. *Nature*, *579*, 97–100. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2053-y

Walter, W. R., Hirschmann, A., Alaia, E. F., Tafur, M., & Rosenberg, Z. S. (2019). Normal anatomy and traumatic injury of the midtarsal (Chopart) joint complex: An imaging primer. *RadioGraphics*, *39*(1), 136–152. https://doi.org/10.1148/rg.2019180102

Welte, L., Kelly, L. A., Kessler, S. E., Lieberman, D. E., D'Andrea, S. E., Lichtwark, G. A., & Rainbow, M. J. (2021). The extensibility of the plantar fascia influences the windlass mechanism during human running. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *288*(1943), Article 20202095. https://doi.org/10.1098/rspb.2020.2095

Yan, A., Chen, S. R., Ma, X., Shi, Z., & Hogan, M. (2021). Updates on Lisfranc complex injuries. *Foot & Ankle Orthopaedics*, *6*(1), Article 2473011420982275. https://doi.org/10.1177/2473011420982275

BÖLÜM 4

KADIN ÜREME SİSTEMİ VE KLİNİK ANATOMİSİ

OĞUZHAN HARMANDAOĞLU[1], OĞUZHAN ÖZTÜRK[2]

Giriş

İnsan neslinin devamlılığı, üreme işlevinin gerçekleşmesi ile sağlanır. Bu işlevin gerçekleştirilmesini sağlayan organ ve yapılardan oluşan sistem, üreme sistemi (systema genitale) olarak adlandırılır. Üreme sistemi, anatomik ve işlevsel özellikleri bakımından kadın üreme sistemi ve erkek üreme sistemi olmak üzere ikiye ayrılır. Kadın üreme sistemi (systema genitale femininum); kadın iç üreme organları (organa genitalia feminina interna) ve kadın

[1] Öğr. Gör. Dr., Kastamonu Üniversitesi Çatalzeytin Meslek Yüksekokulu,Terapi ve Rehabilitasyon, Orcid: 0000-0002-4991-5696
[2] Öğr. Gör. Dr., Kastamonu Üniversitesi Çatalzeytin Meslek Yüksekokulu,Terapi ve Rehabilitasyon, Orcid: 0000-0001-7518-0331

dış üreme organları (organa genitalia feminina externa) olmak üzere iki bölümde incelenir. Kadın iç üreme organları; ovarium, tuba uterina, uterus ve vagina'dan oluşur. Kadın dış üreme organları; mons pubis, labium majus pudendi, labium minus pudendi, vestibulum vaginae, clitoris, bulbus vestibuli, glandulae vestibulares majores ve glandulae vestibulares minores'den oluşur. Bu yapıların tümü vulva olarak adlandırılır (Arifoğlu, 2021).

1. KADIN İÇ ÜREME ORGANLARI

1.1. Ovarium

Erkekte testisin (**testis**) kadın üreme sistemindeki karşılığı ovarium**'**dur. Ovariumlar, pelvis boşluğunda fossa ovarica içerisinde yerleşir. Kadında sağda ve solda olmak üzere iki adet ovarium bulunur. Ovariumlar, dişi gamet hücresi olan ovumun gelişimini ve olgunlaşmasını sağlar; ayrıca başlıca östrojen ve progesteron hormonlarının üretiminde ve salgılanmasında rol oynar. Ovarium yaklaşık 4 cm uzunluğunda, 2 cm genişliğinde ve 1 cm kalınlığındadır**.** Ovariumun komşulukları arasında posteriorunda ureter**,** superiorunda ise a. iliaca externa bulunur. Ovarium; facies medialis ve facies lateralis olmak üzere iki yüz, extremitas tubaria ve extremitas uterina olmak üzere iki uç ile margo liber ve margo mesovaricus olmak üzere iki kenar içerir (Acer, N., 2024).

Sağ ve sol ovariumun arteriyel beslenmesi, aorta abdominalis'in lateral yüzünden çıkan a. ovarica tarafından sağlanır. Venöz drenajı, plexus venosus ovaricus aracılığıyla

gerçekleşir. V. ovarica dextra**,** v. cava inferior'a; v. ovarica sinistra ise v. renalis sinistra'ya drene olur. Ovariumun lenfatik drenajı, nodi lymphoidei lumbales'e, özellikle nodi lymphoidei paraaortici'ye gerçekleşir. Otonom innervasyonu plexus ovaricus ve plexus uterovaginalis aracılığıyla sağlanır. Ovariuma ulaşan sempatik lifler başlıca nn. splanchnici lumbales ve plexus aorticus abdominalis üzerinden; parasempatik lifler ise n. vagus aracılığıyla taşınır (Yılmaz vd., 2022).

Klinik Bilgi

- Over kistleri özellikle follikül ve corpus luteum kistleri sık görülen benign oluşumlardır ve kistlerin büyümesi pelvik bölgede ağrıya sebep olabilir (Mobeen & Apostol, 2020)**.**

- Over torsiyonu: Overin genellikle tuba uterina ile beraber kendisini destekleyen ligamentler (özellikle ligamentum suspensorium ovarii) etrafında dönmesi sonucu venöz dolaşımın ve ileriki aşamalarda arteriyel dolaşımın bozulmasına yol açar. En önemli bulgu şiddetli başlayan pelvik ağrıdır (Huang vd., 2017).

- Over kanseri: Jinekolojik kansere bağlı ölümlerin en yaygın olanıdır. Belirtisi, menopoz sonrası kadınlarda birkaç ay süren karın ağrısı ve şişkinliktir. Çoğu bireyde ileri evrede teşhis edilir (Jayson vd., 2014)**.**

1.2. Tuba Uterina

Tuba uterinalar Fallop tüpleri olarak adlandırılır. Tuba uterinalar, mesosalpinx adı verilen yapı içerisinde konumlanmıştır. Tuba uterinalar dört kısımda incelenir.

Infundibulum tubae uterinae: Çevresinde fimbriae tubae uterinae adı verilen saçaklı yapılar yer alır. Bu yapılardan fimbria ovarica adı verilen yapı, diğerlerinden farklı olarak daha uzundur ve ovulasyon sırasında oositleri tutarak tuba uterinalaya doğru yönlendirir.

Ampulla tubae uterinae**:** Tuba uterinanın en geniş ve en uzun kısmıdır. Döllenme genellikle burada gerçekleşir.

Isthmus tubae uterinae**:** Ampulla ile uterus arasında yer alan, çapı en dar kısımdır ve uterus ile birleşerek sonlanır.

Pars uterina: Tuba uterinanın uterus duvarı içerisinde devam eden en kısa bölümüdür. Ostium uterinum tubae uterinae aracılığıyla uterusa açılır (Anne M. R. Agur & Arthur F. Dalley, 2020).

Klinik Bilgi

- Ektopik gebeliğin en yaygın yeri tuba uterinadır ve en sık ampulla parçasında görülür (Dick vd., 2025)**.**
- Salpenjit ve pelvik inflamatuvar hastalık; tuba uterina ve diğer üst genital sistem yapılarının enfeksiyonudur (Holmes vd., 1980).

1.3. Uterus

Uterus, anteriorunda mesane ve posteriorunda rectum bulunan, kalın kas duvarına sahip boşluklu bir organdır. Abdominal bölümü tuba uterinalar ile, pelvik bölümü ise vagina ile birleşir. Gebelik döneminde hacmi değişirken doğum sonrasında tekrar eski haline döner. Anatomik olarak uterus; fundus, corpus, isthmus ve cervix uteri olmak üzere dört bölümde incelenir (Arıncı & Elhan, 2014).

Fundus uteri, tuba uterinaların uterusa açıldığı yerlerin üst kısmında yer alan uterus bölümüdür.

Corpus uteri, uterusun yaklaşık üçte ikisini kapsayan gövde kısmıdır. Uterus gövdesinin anterior yüzü vesica urinaria, posterior yüzü ise colon sigmoideum ile komşudur.

Isthmus uteri, uterusun corpus uteri ile cervix uteri arasında yer alan yaklaşık 1 cm uzunluğundaki bölümüdür.

Cervix uteri, uterusun yaklaşık üçte birlik alt kısmını oluşturur. Bu yapı içerisinde canalis cervicis uteri adı verilen bir kanal bulunur. Canalis cervicis uteri, cavitas uteri ile ostium uteri internum, vagina ile ise ostium uteri aracılığıyla bağlantı kurar. Portio vaginalis, cervix uteri'nin vagina içerisinde kalan bölümüdür (Yılmaz vd., 2022). Uterus; m. levator ani, lig. latum uteri, lig. teres uteri, lig. cardinale, lig. pubocervicale ve lig. rectouterinum tarafından desteklenir (Arifoğlu, 2021). Bu yapılardan m. levator ani, lig. transversum cervicis (lig. cardinale, Mackenrodt bağı), lig. pubocervicale ve lig. sacrocervicale uterusun desteklenmesinde rol oynar. Lig. latum uteri ve lig. teres uteri

gevşek bağ dokusundan oluşmaları nedeniyle uterusun taşınmasında doğrudan destekleyici bir rol üstlenmez. Uterusun şekli ve pozisyonu, yaşamın çeşitli dönemlerinde değişkenlik gösterir. Uterusun cervix uteri ve corpus uteri bölümleri arasında, açıklığı öne ve aşağıya bakan, yaklaşık 100–170°'lik antefleksiyon açısı bulunur. Uterus ile vagina arasında ise açıklığı öne bakan, yaklaşık 90–110°'lik anteversiyon açısı bulunur. Uterusun arteriyel beslenmesini a. uterina ve a. ovarica sağlar. Venöz drenajı plexus venosus uterinus aracılığıyla vv. uterinae'ye, buradan da vv. uterinae aracılığıyla v. iliaca interna'ya gerçekleşir. Uterusun sempatik innervasyonu plexus hypogastricus inferior ve plexus uterovaginalis aracılığıyla, parasempatik innervasyonu ise S2–S4 spinal segmentlerinden çıkan nn. splanchnici pelvici aracılığıyla sağlanır (Acer, N., 2024). Uterus duvarı, dıştan içe doğru perimetrium (tunica serosa), myometrium (tunica muscularis) ve endometrium (tunica mucosa) olmak üzere üç katmandan meydana gelir. Ovulasyon döneminde döllenme gerçekleşirse, döllenmiş ovum endometriuma tutunarak gebelik başlar. Döllenmenin gerçekleşmemesi durumunda ise endometriumun fonksiyonel tabakası, kan ve doku parçalarıyla birlikte uterus kasılmaları sonucunda vagina yoluyla dışarı atılır. Bu olaya menstruasyon denir. Gebelik döneminde belirgin şekilde büyüyen uterus, doğum sonrasında involüsyon adı verilen süreçle büyük ölçüde gebelik öncesi boyutlarına geri döner (Arifoğlu, 2021).

Klinik Bilgi

- Pelvik organ prolapsusu: Uterus, vajinanın ön ve arka duvarlarının normal konumundan aşağıya doğru yer değiştirmesine denir. Lig. cardinale, lig. uterosacrale, lig. pubocervicale yapılarının bütünlüğünün bozulması patogenezde etkilidir. Sistosel; mesanenin vajinae ön duvarına doğru, rektosel;rektumun vajinae arka duvarına doğru bombeleşmesidir. Uterusun aşağıya doğru yer değiştirmesi uterin prolapsus denir (Hoare vd., 2025).
- Serviks uterinin malign tümörü sonucu serviks kanseri meydana gelir. Tümör dağılım gösterdiğinde komşu pelvik yapılara ve lenf sistemlerine yayılır (Stjernholm-Vladic vd., 2004).
- Uterusta en sık karşılaşılan benign tümör leiomyomadır. Leiomyomaların büyüklüğü gebelik döneminde artış gösterirken menopoz sonrasında genellikle küçülür (Dick vd., 2025).
- Endometrial dokunun uterus dışında yer almasına endometriozis denir (Alimi vd., t.y.).
- Nabothian kistleri: Canalis cervicis uteri'nin mukozasında yer alan glandulae cervicales bezlerinin kanallarının tıkanması sonucu oluşur.
- En çok görülen jinekolojik malign tümör endometrial karsinomdur.
- İsthmus uterideki yumuşama erken gebelik belirtisi olabilir (Hasan O., 2005).

1.4. Vagina

Vagina, yukarıda cervix uteri ile aşağıda vulva arasında uzanan, kadın üreme sisteminin cinsel birleşme organıdır. Aynı zamanda menstruasyon kanının dışarı atıldığı ve doğum sırasında fetüsün geçtiği kanal olarak görev yapar. Vaginal sekresyonlar, başta cervix uteri olmak üzere genital sistemdeki çeşitli bez ve yapılardan kaynaklanır. Vaginanın normal ortamı asidiktir ve bu özellik, bakteriyel mikroorganizmaların yerleşmesini ve çoğalmasını sınırlandırmada rol oynar. Vaginanın alt ucundaki açıklığa ostium vaginae adı verilir. Hymen, ostium vaginae çevresinde yer alan ve vestibulum vaginae ile vagina arasındaki geçiş bölgesinde bulunan mukozal bir kıvrımdır. Vagina ile cervix uteri'nin vaginal bölümü arasında fornix vaginae adı verilen boşluk bulunur. Fornix vaginae; fornix anterior, fornix posterior ve fornix lateralis olmak üzere bölümlere ayrılır. Bu bölümler arasında fornix posterior daha derindir. Vaginanın arteriyel beslenmesi başlıca a. vaginalis tarafından sağlanır. Venöz drenajı ise plexus venosus vaginalis aracılığıyla gerçekleşir (Acer, N., 2024; Yılmaz vd., 2022).

Klinik Bilgi

- M. bulbospongiosus ile m. transversus perinei superficialis ve m. transversus perinei profundus kaslarında meydana gelen istem dışı kasılmaların vajinal penetrasyonu engellemesi vajinismus olarak tanımlanır (Reissing vd., 2004).
- Vajinit: Vajinanın mukoza yapısında meydana gelen inflamasyondur (Gold & Vadakekut, 2026).

2. KADIN DIŞ GENİTAL ORGANLARI

Vulvayı oluşturan kadın dış genital yapılar arasında mons pubis, labium majus pudendi, labium minus pudendi, vestibulum vaginae, clitoris, bulbus vestibuli ile glandulae vestibulares majores ve glandulae vestibulares minores yer alır (Yılmaz vd., 2022).

2.1. Mons pubis

Mons pubis, pubis'in anteriorunda yer alan, deri altı yağ dokusunun oluşturduğu kabarıklıktır. Mons pubis, kadında ters üçgen şeklinde olup pubik kıllarla kaplıdır. (Arifoğlu, 2021).

2.2. Labium majus pudendi

Labium majus pudendi, mons pubis ile perineum arasında uzanan ve yaklaşık 8 cm uzunluğunda, 2–2,5 cm yüksekliğinde olan bir dış genital yapıdır. Erkekteki scrotum ile homolog kabul edilir. Commissura labiorum anterior**,** labium majus pudendi'lerin ön uçlarının birleşmesiyle oluşur. Arka uçlar ise birleşmeyerek deriye tutunur ve bu yapıya commissura labiorum posterior denir. Labium majus pudendi'lerin arasında rima pudendi adı verilen aralık bulunur ve bu aralık içerisinde labium minus pudendi yer alır. Posterior tarafta, anüs ile birleşme yerindeki yaklaşık 3 cm'lik bölümde perineum yer alır. Sulcus genitofemoralis, labium majus pudendi'lerin dış tarafında bulunan oluğun adıdır (Acer, N., 2024).

2.3. Labium minus pudendi

Labium minus pudendi, vestibulum vaginae'nin her iki tarafında, labium majus pudendi'lerin medialinde yer alan ve erkekteki penisi örten derinin karşılığı olan yapıdır. Labium minus pudendi ile labium majus pudendi arasında yer alan oluk sulcus nympholabialis, labium minus pudendi ile hymen arasındaki oluk ise sulcus nymphohymenalis olarak adlandırılır. Dış yüzünde kıl ve ter bezleri bulunmazken yağ bezleri bulunur (Arifoğlu, 2021).

2.4. Vestibulum vaginae

Vestibulum vaginae, iki labium minus pudendi arasında bulunan boşluk şeklindeki anatomik bölgedir. Bu bölgeye ostium vaginae ve ostium urethrae externum ile birlikte glandula vestibularis major (Bartholin bezi) ve glandulae vestibulares minores (Skene bezleri, paraüretral bezler) kanalları açılır (Acer, N., 2024).

2.5. Clitoris

Clitoris, labium minus pudendi'lerin birleşme yerinde, vulvanın üst ucunda yer alan, erektil yapıya sahip ve erkekteki penisin karşılığı olan bir organdır. Üç kısımda incelenir. Konik şekilli serbest ucuna glans clitoridis, gövde kısmına corpus clitoridis, pelviste ramus ischiopubicus'a tutunan kısmına ise crus clitoridis denir. Clitoris, ısı, basınç ve dokunmaya karşı duyarlıdır (Yılmaz vd., 2022).

2.6. Bulbus vestibuli

Bulbus vestibuli, ostium vaginae'nin iki yanında bulunan ve yaklaşık 2,5–3 cm uzunluğa sahip çift taraflı bir yapıdır. Erkekteki corpus spongiosum penisin posterior bölümüne homologdur (Arıncı & Elhan, 2014).

2.7. Gl. vestibulares majores (Bartholin bezi)

Glandulae vestibulares majores, ostium vaginae'nin her iki yanında bulunan çift taraflı bezlerdir ve erkekteki glandulae bulbourethrales ile homolog kabul edilir. Cinsel uyarılma ile salgıladıkları mukus, kanalları aracılığıyla sulcus nymphohymenalis'e açılır (Hasan O., 2005).

Klinik Bilgi

- Bartholin kisti: Gl. vestibulares majores'in kanalının tıkanması sonucu bezde meydana gelen enfeksiyondur (Lee vd., 2015).

2.8. Gl. vestibulares minores

Glandulae vestibulares minores, vestibulum vaginae'nin duvarında yer alan ve erkekteki prostat bezinin karşılığı olan yapılardır. Mukus salgılayarak vestibulum vaginae'nin ıslak kalmasını sağlar (Özbağ Davut, 2023).

Vulvanın arteriyel beslenmesi a. pudenda interna (rr. labiales posteriores, a. bulbi vestibuli, a. dorsalis clitoridis ve a. profunda clitoridis) ve aa. pudendae externae tarafından sağlanır. Venöz drenajı ise vv. pudendae externae ve vv. pudendae internae aracılığıyla gerçekleşir. Lenfatik drenajı nodi lymphoidei inguinales superficiales'e gerçekleşir.

Vulvanın duyusal innervasyonu başlıca n. genitofemoralis, n. ilioinguinalis, n. cutaneus femoris posterior ve n. pudendus aracılığıyla sağlanır (Yılmaz vd., 2022).

Kaynakça

Acer, N. (2024). Sağlık Bilimleri İçin Temel Anatomi. İstanbul Tıp Kitapevi.

Alimi, Y., Iwanaga, J., Loukas, M., & Tubbs, R. S. (t.y.) (2018). The Clinical Anatomy of Endometriosis: A Review. Cureus, 10(9), e3361. https://doi.org/10.7759/cureus.3361

Anne M. R. Agur & Arthur F. Dalley. (2020). Moore Temel Klinik Anatomisi. Nobel Tıp Kitabevleri.

Arıncı, K., & Elhan, A. (2014). Anatomi 1. Cilt. Kemikler, Eklemler, Kaslar, İç organlar. Güneş Tıp Kitabevleri.

Arifoğlu, Y. (2021). Her Yönüyle ANATOMİ. İstanbul Tıp Kitabevi

Dick, E. A., Blanco, A., De La Hoz Polo, M., & Basilico, R. (2025). ESR Essentials: Gynaecological causes of acute pelvic pain in women: a primer for emergent evaluation—practice recommendations by the European Society of Emergency Radiology. European Radiology, 35(11), 6682-6695. https://doi.org/10.1007/s00330-025-11539-8

Gold, J. M., & Vadakekut, E. S. (2026). Physiology, Vaginal Structure and Function. In: StatPearls. StatPearls Publishing. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK545147/

Hasan O. (2005). Ozan Anatomi. Nobel Tıp Kitabevleri.

Hoare, B. S., Mikes, B. A., & Khan, Y. S. (2025). Anatomy, Abdomen and Pelvis: Female Internal Genitals.In: StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK554601/

Holmes, K. K., Eschenbach, D. A., & Knapp, J. S. (1980). Salpingitis: Overview of etiology and epidemiology. American Journal of Obstetrics and Gynecology, International Symposium on Pelvic Inflammatory Disease, 138 (7, Part 2), 893-900. https://doi.org/10.1016/0002-9378(80)91078-9

Huang, C., Hong, M.-K., & Ding, D.-C. (2017). A review of ovary torsion. Tzu-Chi Medical Journal, 29(3), 143-147. https://doi.org/10.4103/tcmj.tcmj_55_17

Jayson, G. C., Kohn, E. C., Kitchener, H. C., & Ledermann, J. A. (2014). Ovarian cancer. The Lancet, 384(9951), 1376-1388. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62146-7

Lee, M. Y., Dalpiaz, A., Schwamb, R., Miao, Y., Waltzer, W., & Khan, A. (2015). Clinical Pathology of Bartholin's Glands: A Review of the Literature. Current Urology, 8(1), 22-25. https://doi.org/10.1159/000365683

Mobeen, S., & Apostol, R. (2020). Ovarian cyst. https://europepmc.org/article/nbk/nbk560541

Özbağ Davut. (2023). "'İnsan'" Anatomi. İstanbul Tıp Kitapevi.

Reissing, E. D., Binik, Y. M., Khalifé, S., Cohen, D., & Amsel, R. (2004). Vaginal Spasm, Pain, and Behavior: An Empirical Investigation of the Diagnosis of Vaginismus. Archives of Sexual Behavior, 33(1), 5-17. https://doi.org/10.1023/B:ASEB.0000007458.32852.c8

Stjernholm-Vladic, Y., Stygar, D., Mansson, C., Masironi, B., Akerberg, S., Wang, H., Ekman-Ordeberg, G., & Sahlin, L. (2004). Factors involved in the inflammatory events of cervical ripening in humans. Reproductive Biology and Endocrinology, 2(1), 74. https://doi.org/10.1186/1477-7827-2-74

Yılmaz, M. T., Aydın Kabakçı, A. D., & Akın Saygın, D. (2022). Adım Adım Anatomi. İstanbul Tıp Kitabevleri.

BÖLÜM 5

ERKEK ÜREME SİSTEMİ ve KLİNİK ANATOMİSİ

OĞUZHAN ÖZTÜRK[1], OĞUZHAN HARMANDAOĞLU[2]

Giriş

Erkek üreme sistemi anatomik yerleşimlerine göre **dış genital organlar** (organa genitalia masculina externa) ve **iç genital organlar** (organa genitalia masculina interna) olmak üzere iki ana grupta incelenir(Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Dış genital organlar pelvis tabanının ve arcus pubicus'un alt tarafında, vücut dışına doğru uzanır. İç genital organlar ise pelvis boşluğu içerisinde veya gelişimsel süreçte karın boşluğundan skrotuma göç etmiş yapılar halinde konumlanır(Arıncı & Elhan, 2014; Waschke vd., 2016).

Dış Genital Organlar: Penis, Scrotum ve Urethra masculina (pars spongiosa bölümü).

İç Genital Organlar: Testis, Epididymis, Ductus deferens, Funiculus spermaticus, Vesicula seminalis, Ductus ejaculatorius,

[1] Öğr. Gör. Dr., Kastamonu Üniversitesi Çatalzeytin Meslek Yüksekokulu,Terapi ve Rehabilitasyon, Orcid: 0000-0001-7518-0331
[2] Öğr. Gör. Dr., Kastamonu Üniversitesi Çatalzeytin Meslek Yüksekokulu,Terapi ve Rehabilitasyon, Orcid: 0000-0002-4991-5696

Prostata ve Glandula bulbourethralis.İç Genital Organlar: Testis, Epididymis, Ductus deferens, Funiculus spermaticus, Vesicula seminalis, Ductus ejaculatorius, Prostata ve Glandula bulbourethralis.

1. DIŞ GENİTAL ORGANLAR (ORGANA GENITALIA MASCULINA EXTERNA)

1.1. Penis

Erkek çiftleşme organı ve idrarın dışarı atılmasında görevli olan penis normal durumlarda 8-10 cm uzunluğa ve 3 cm çapa sahiptir. Ereksiyon esnasında organın hem boyunda hem de eninde belirgin bir artış meydana gelmektedir (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Penis; **corpus penis** ve **radix penis** olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Corpus penis; çiftleşmeyi sağlayan ve penisin symphysis pubica'dan glans penise kadar serbestçe uzanan gövde bölümüdür. Radix penis ise perineumda yer alan, kemik ve zarsı yapılara tutunmuş hareketsiz kök kısmıdır(Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Corpus penis'in anatomik pozisyonda öne ve yukarı bakan yüzüne **dorsum penis**, arka-alt yüzüne ise **facies urethralis** adı verilir. Normal durumlarda silindirik bir form gösteren gövde, ereksiyon sırasında kenarları küntleşmiş bir üçgen prizma görünümü kazanır. Penis; dıştan deri ve fasyalarla kuşatılmış üç adet erektil silindirik gövdeden (iki adet corpus cavernosum penis ve bir adet corpus spongiosum penis) meydana gelir(Yiee & Baskin, 2010).

Penis derisi; oldukça ince, esnek ve koyu renge sahiptir. Deri altı fasyalarına gevşek bir bağ dokusu ile yapıştığı için kolayca hareket etmektedir. Penis gövdesinde deri altı yağ dokusu yer almaz. Bu nedenle kişinin kilo alıp vermesi penis boyutunda değişikliğe yol açmaz (Arıncı & Elhan, 2014).

Deri, glans penis'te katlanma yaparak **preputium penis**'i (sünnet derisi) meydana getirir. Preputium, ostium urethrae externum'un hemen arkasında frenulum preputii adında küçük bir plika oluşturur. Bu yapı glans penis'in arka yüzünde ve sagital yönde ostium urethrae externum'dan collum glandis'e doğru seyreder. Glans penis'i oluşturan deride kıl follikülü bulunmaz iken duyusal sinir uçları ve küçük papillalar yer alır. Penis derisinde yağ bezleri bulunmaz ancak collum penis ve preputium penis'in iç tarafında küçük sebase bezler (**gll. preputiales / Tyson bezleri**) vardır. Bu bezler özel kokulu yağlı salgılar yaparlar (Waschke vd., 2016; Yiee & Baskin, 2010).

Klinik bilgi:

• Preputium penis'in geriye çekilmesini engelleyen aşırı darlıklar, idrar yapmayı zorlaştırarak enfeksiyon gelişimine zemin hazırlayabilir. Böyle bir tabloda prepusyumun sirkumsizyon (sünnet) operasyonuyla çıkarılması gerekir (Waschke vd., 2016).

Corpora cavernosa penis; sağda ve solda uzanan iki adet silindirik erektil yapıdır. Tunica albuginea ile sarılmıştır ve ortada fibröz **septum corporum cavernosorum** ile birbirinden ayrılır. Os coxae'nın ramus ischiopubicus'una tutunarak başlar, penis ucuna doğru ilerler ve glans penis'in arka yüzündeki fossada sonlanırlar. Bu yapılar, kavern (caverna) adı verilen ve içleri kanla dolabilen süngerimsi alanlara sahiptir. Penis eksenine dik olarak yerleşim gösterirler ve perifere doğru gittikçe küçülürler. Kavernler kan ile dolduğunda aralarından geçen venleri sıkıştırarak bir müddet venöz dönüşe engel olur. Bu mekanizma ile ereksiyon meydana gelir. İki kavernöz cismin üst yüzünde oluşan sığ boyuna oluğa sulcus dorsalis denir ve burada v. dorsalis profunda penis seyreder(Arıncı & Elhan, 2014; Brooks, 2007).

Corpus spongiosum penis; iki kavernöz gövdenin alt tarafındaki olukta yer alan süngerimsi erektil bir yapıdır. Kavernöz

boşlukları penis eksenine paralel olarak uzanmaktadır. Bu yapıyı saran tunica albuginea esnek, beyaz ve ince bir yapıya sahip olduğundan, corpora cavernosa düzeyinde bir sertlik oluşturmaz (içinden geçen üretranın kapanmaması sağlanır). Daha geniş olan başlangıç kısmına **bulbus penis** denir. Ayrıca penisin uç tarafında genişleyerek **glans penis**'i meydana getirir; glans penis içerisindeki üretranın genişlemiş bölümüne ise **fossa navicularis** adı verilir. Glans penisin tepesinde urethranın dışa açıldığı delik olan **ostium urethrae externum** yer alır(Brooks, 2007; Sam & LaGrange, 2023; Waschke vd., 2016).

Radix penis, erkek dış genital organının perineum bölgesinde kemik ve zarsı yapılara tutunan, hareketsiz taban bölümüdür. Bu oluşum; çift taraflı crura penis, bulbus penis ve bu yapıları örten çizgili kaslardan meydana gelir. Crura penis'lerin üzerini m. ischiocavernosus, bulbus penis'in üzerini ise m. bulbospongiosus çevreler (Arıncı, 2020; Arıncı & Elhan, 2014).

M. ischiocavernosus, cruraları komprese ederek venöz dönüşü kısıtlar ve böylelikle ereksiyon halinin sürdürülmesine katkı sağlar; aynı zamanda sertleşmiş durumdaki penisi stabilize eder.

M. bulbospongiosus ise bulbus dokusunu sıkıştırarak kanın öne doğru iletilmesini destekler ve miksiyonun bitiminde üretrada kalan idrarın tamamen tahliye edilmesinde rol oynar (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Penis'in Fascia ve Bağları

Penis anatomisinde fascia penis superficialis ve fascia penis profunda olmak üzere iki ana fasiyal katman bulunur.

Fascia penis superficialis (dartos tabakası); scrotum'daki yüzeyel fasyanın bir uzantısıdır. Altındaki fascia penis profunda'ya gevşek bir bağ dokusu aracılığıyla tutunduğu için penis derisinin

serbestçe hareket edebilmesine olanak tanır(Arıncı & Elhan, 2014; Sam & LaGrange, 2023; Yiee & Baskin, 2010).

Fascia penis profunda (Buck fasyası); tunica albuginea ile fascia penis superficialis arasında konumlanır, corpus penis'i kılıf gibi kuşatarak distale doğru glans penis sınırına kadar erişir. Bu tabaka, m. bulbospongiosus ve m. ischiocavernosus'un ön bölümünde yüzeyel ve derin olmak üzere iki yaprağa ayrılır. Yüzeyel yaprak (fascia perinei superficialis) söz konusu kas gruplarının üzerini örterken, derin yaprak penisin asıl derin fasyası (Buck fasyası) şeklinde devam eder. Bu fasyal yapıdan içe doğru uzanan fibröz bölmeler; corpus spongiosum penis ve corpora cavernosa penis etrafında bağımsız kompartıman kılıfları oluşturur (Sam & LaGrange, 2023; Waschke vd., 2016; Yiee & Baskin, 2010).

Klinik bilgi:

• Sağlam bir fibröz kılıf niteliğindeki fascia penis profunda (Buck fasyası); erektil gövdelerde meydana gelen apse, hematom veya idrar ekstravazasyonunu sınırlandırarak klinik açıdan belirgin kompartıman içi kitlelere yol açar. Ancak üretra rüptürlerinde idrar, yüzeyel ve derin fasyalar arasındaki gevşek plana sızarak skrotumdaki eşdeğer fasyal aralığa doğru yayılım gösterebilir (Waschke vd., 2016).

Lig. fundiforme penis; karın ön duvarında yer alan tela subcutanea'nın kalınlaşmış derin yaprağının aşağıya doğru uzantısıdır. Linea alba'dan köken alır ve penis'i iki taraftan askı gibi sarar(Waschke vd., 2016).

Lig. suspensorium penis; lig. fundiforme penis'in altında yer alır ve symphysis pubica'ya yapışır ve ereksiyon açısını stabilize eder(Waschke vd., 2016).

Arterleri: Penis dokusu temelde a. pudenda interna'nın uç dalları ile yüzeyel planda a. femoralis kaynaklı damarlardan beslenir (Arifoğlu, 2021; Brooks, 2007).

• Deri ve Yüzeyel Dokular: A. femoralis'in dalları olan aa. pudendae externae (superficialis ve profunda) tarafından beslenir.

• Erektil Gövdeler ve Derin Yapılar (a. pudenda interna dalları):

• Dorsalis penis: Fasyanın (Buck) derininde seyreder; glans penis, preputium ve corpus cavernosum liflerini besler.

• Profunda penis: Her iki corpus cavernosum'un merkezine girerek boylu boyunca ilerler. Kavernöz boşluklara açılan kıvrıntılı arteriyolleri (aa. helicinae) vererek ereksiyonun asıl vasküler kaynağını oluşturur.

• Bulbi penis: Bulbus penis'i ve içinden geçen pars spongiosa'yı besler.

• Urethralis: Urethra masculina ve çevre spongioz dokuyu besler.

Venleri: Yüzeyel ve derin olmak üzere iki ana sistem üzerinden drene olur (Arifoğlu, 2021; Yiee & Baskin, 2010).

• V. dorsalis superficialis penis: Deri ve yüzeyel fasyanın venöz kanını toplar; v. saphena magna veya doğrudan v. femoralis'e dökülür.

• V. dorsalis profunda penis: Buck fasyasının altında, glans ve corpora cavernosa'nın derin venöz kanını toplar. Ligamentum suspensorium penis'in altından geçip pelvis boşluğuna girerek plexus venosus prostaticus'a (Santorini pleksusu) ve oradan v. iliaca interna'ya dökülür.

• Crus ve Bulbus Venleri: Doğrudan v. pudenda interna'ya drene olurlar.

Lenf Drenajı

• Deri ve Preputium: Nodi lymphatici inguinales superficiales (yüzeyel inguinal lenf düğümleri) grubuna drene olur.

• Glans Penis ve Distal Üretra: Nodi lymphatici inguinales profundi ve kısmen nodi lymphatici iliaci externi gruplarına ulaşır.

• Corpora Cavernosa ve Corpus Spongiosum: Primer olarak nodi lymphatici iliaci interni ve nodi lymphatici iliaci externi zincirlerine drene olur (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Sinirleri

• Somatik (Motor ve Duyu): N. pudendus'un uç dalı olan n. dorsalis penis; glans penis, preputium ve gövde derisinin yoğun duyusunu alır. Motor lifler ise m. ischiocavernosus ve m. bulbospongiosus'u inerve eden n. perinealis dallarıdır.

• Otonomik: Plexus hypogastricus inferior'dan köken alan nn. cavernosi penis vasıtasıyla sağlanır:

• Parasempatikler (S2-S4): Nn. splanchnici pelvici kaynaklıdır; aa. helicinae'lerde vazodilatasyona yol açarak ereksiyonu başlatır ve sürdürür.

• Sempatikler (T11-L2): Plexus hypogastricus kaynaklıdır; ejakülasyon sırasında düz kasların kasılmasını, vazokonstrüksiyonu ve detümesansı (ereksiyonun sonlanmasını / sönmeyi) sağlar (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Klinik bilgi:

• Penis kırığı, penis travmalarında nispeten nadir görülen bir bulgudur ve ereksiyon halindeki penisin travma veya lateral bükülmesinden kaynaklanan tunika albuginea'nın yırtılması olarak tanımlanır. Zorlayıcı cinsel ilişki en yaygın nedendir; diğer daha az yaygın nedenler arasında mastürbasyon sırasında yaralanmalar,

yatakta ereksiyon halindeyken dönme ve diğer künt/penetran travmalar yer alır(Reddy vd., 2014).

• Peyronie hastalığı, tunika albuginea içinde lifli, elastik olmayan plak oluşumuna yol açan idiyopatik bir inflamatuar durumdur. Klinik olarak, hastalar en sık penis deformitesi (%52) ve/veya penis kısalması ile başvururlar; diğer semptomlar arasında penis ağrısı veya palpe edilebilir anormallik bulunur(Kalokairinou vd., 2012).

1.2. Scrotum

Testisler, epididymis, ductus deferens ve funiculus spermaticus'un alt kısımlarını içine alan bir torba şeklindeki yapıdır. Median eksende iki yarıma ayrılır. Bu ayrım yerlerini belirleyen ve dış taraftan gözüken birleşme yeri raphe scorti, bu yapı arkada raphe perinei önde ise raphe penis olarak devam eder. İç kısımda bağ dokusundan oluşan bölme septum scorti'dir (Arıncı & Elhan, 2014; Garcia & Sajjad, 2023).

Scrotum dıştan içeri doğru sırası ile;

• Deri

• Tunica dartos

• Fascia spermatica externa

• Fascia cremasterica ve m. cremaster

• Fascia spermatica interna

• Periorchium tabakalarından oluşmaktadır.

Scrotum derisi, vücudun diğer bölgelerine kıyasla daha ince bir yapıya ve belirgin bir pigmentasyona sahiptir; bu durum bölgenin genel ten rengine göre daha koyu görünmesine neden olur. Yağ dokusu (adipöz doku) barındırmayan bu deri alanı; ter bezleri ile yağ bezleri (sebase bezler) açısından oldukça zengindir. Derinin hemen

altında uzanan **tunica dartos** katmanında, istemsiz çalışan düz kas liflerinden oluşan m. dartos yer alır. Bu kas lifleri; yüksek çevre sıcaklığında ve ileri yaşlarda gevşek kalarak scrotumun sarkmasına yol açarken, soğuk ortamlarda ve genç bireylerde kasılarak scrotum cildinin kırışık bir görünüm kazanmasını ve testislerin gövdeye doğru daha sıkı sarılmasını sağlar (Arıncı & Elhan, 2014; Waschke vd., 2016).

Fascia spermatica externa; m. obliquus externus abdominis'in aponeurozunu örten derin fasyanın devamıdır(Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Fascia cremasterica ve m. cremaster; m. obliquus internus abdominis'e ait istemli kas liflerinin fasyasıyla beraber aşağıya doğru uzanması sonucu meydana gelir. Bu kas liflerinin kasılması, testisi yukarı yönde çekerek karın duvarına yaklaştırır. Uyluğun üst-medial yüz derisi hafifçe çizilip uyarıldığında, m. cremaster'in kasılarak aynı taraftaki testisi yukarı çekmesi durumuna kremaster refleksi adı verilir. Bu refleks arkının afferent (duysal) bacağını n. genitofemoralis'in ramus femoralis'i, efferent (motor) bacağını ise aynı sinirin ramus genitalis'i oluşturur (Arıncı & Elhan, 2014; Ellis & Mahadevan, 2014).

Fascia spermatica interna; karın ön duvarındaki fascia transversalis'in aşağıya doğru devamı niteliğindedir. Bu tabaka dış yüzeyi ile fascia cremasterica'ya sıkıca yapışırken, iç yüzeyi ile periorchium'a (tunica vaginalis testis'in lamina parietalis'i) gevşek bir bağ dokusu aracılığıyla tutunur (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Periorchium (Tunica vaginalis testis'in lamina parietalis'i); scrotumun en derin tabakasını teşkil eden bu yapı, parietal peritonun embriyolojik bir uzantısıdır. Bu seröz yaprak cavum vaginale'yi (seröz boşluğu) dış taraftan çevrelerken; aynı

boşluğun iç sınırını ise doğrudan testisi örten epiorchium (lamina visceralis) oluşturur(Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

2. İÇ GENİTAL ORGANLAR (ORGANA GENITALIA MASCULINA INTERNA)

2.1.Testis (Orchis)

Ovoid (yumurta) biçimindeki testisler sağlı sollu olarak funiculus spermaticus ile scrotum boşluğu içerisinde asılı olarak bulunur. Yaklaşık 4-5 cm uzunluğa, 3 cm genişliğe ve 10-15 gr ağırlığa sahiptir. Anatomik olarak; facies medialis ve facies lateralis olmak üzere iki yüzü, margo anterior ve margo posterior olmak üzere iki kenarı, extremitas superior ve extremitas inferior şeklinde adlandırılan iki ucu bulunur. Dıştan içe doğru; seröz yapılı lamina visceralis (epiorchium), fibröz yapılı tunica albuginea ve vasküler ağdan zengin tunica vasculosa olmak üzere üç ayrı kılıf ile sarılmıştır (Ellis & Mahadevan, 2014).

Fetal gelişim sırasında testisler, karın boşluğunda fascia transversalis ile parietal periton arasında retroperitoneal olarak gelişir. Doğum öncesi dönemde gubernaculum testis adlı fibröz kordonun eşliğinde canalis inguinalis'ten geçerek skrotum boşluğuna iner. Bu esnada testisler, karın ön duvarına ait musküler ve fasyal tabakaları da önlerine katarak kendilerini saran skrotal kılıflara dönüştürür(Arıncı & Elhan, 2014; Waschke vd., 2016).

Testisin arka kenarına (margo posterior) epididymis tutunur; bu bölgede fibröz kapsül kalınlaşarak mediastinum testis'i meydana getirir. Testisin damar ve sinirleri buraya girip çıkar (Arıncı & Elhan, 2014).

Testisleri saran sağlam bağ dokusu olan tunica albuginea tarafından sarılmışlardır. Tunica albuginea'dan içeriye doğru uzanan fibröz bölmeler (septula testis), testis parankimini sayıları yaklaşık 200 ila 300 arasında değişen lobuli testis adı verilen odacıklara

ayırır. Her bir lobül içerisinde kıvrıntılı bir seyir izleyen 1 ila 4 adet tubuli seminiferi contorti yer alır; bu tübüllerin tek bir testisteki toplam sayısı 400 ila 600'ü bulur. Boyları yaklaşık 70–80 cm'ye ulaşan söz konusu kıvrıntılı tübüller, mediastinum testis'e doğru yaklaştıkça düzleşip birbirleriyle birleşerek sayıları 20–30 kadar olan tubuli seminiferi recti'leri oluşturur(Arıncı & Elhan, 2014; Ellis & Mahadevan, 2014).

Tubuli seminiferi recti'ler mediastinum testis içerisindeki fibröz bağ dokusunda arka-yukarı yönde ilerleyip birbiriyle anastomozlaşarak rete testis ağını meydana getirir. Bu ağ yapısının üst bölümünden çıkan ve sayıları 12 ila 15 arasında değişen ductuli efferentes testis'ler, nihayetinde tek bir kıvrıntılı kanal olan ductus epididymidis'e açılır(Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Klinik bilgi:

• Testis hidroseli, tunika vaginalis'in parietal ve visseral katmanları arasında aşırı seröz sıvı birikimi ile karakterize edilen ve skrotal şişliğe neden olan yaygın bir benign durumdur. Etiyolojisine göre hidrosel, genel olarak idiyopatik veya enfeksiyon, travma, cerrahi veya malignite gibi tanımlanabilir bir nedene bağlı sekonder olarak ortaya çıkmaktadır (Dagur vd., 2017).

• Testis kanseri, erkeklerdeki malignitelerin yaklaşık %1-1,5'ini oluşturur ve ağırlıklı olarak farklı biyolojik ve klinik özelliklere sahip heterojen bir neoplazm grubunu kapsayan germ hücreli tümörlerden oluşur (Barbu vd., 2026).

• Kriptorşizm (inmemiş testis); testisin skrotuma iniş sürecini tamamlayamaması sonucu retroperitoneal alan, canalis inguinalis veya skrotum girişinde kalarak skrotum içerisinde palpe edilememesiyle karakterize, erkek çocuklarda en sık görülen konjenital genital anomalilerden biridir. Kriptorşizmin 1 yaş civarındaki genel görülme sıklığı yaklaşık %1'dir. Testis torsiyonu ise çocuk ürolojisinde sık karşılaşılan bir akut skrotal acil tablodur

ve yıllık görülme sıklığı 100.000 erkek çocukta yaklaşık 3,8'dir. Kriptorşid testiküler torsiyon olguları, tüm testiküler torsiyon vakalarının %5–15'ini teşkil etmektedir. Testis torsiyonu; funiculus spermaticus'un kendi ekseni etrafında dönmesi neticesinde testisi besleyen damarların tıkanmasına ve kan akımının aniden kesilmesine yol açar. Torsiyon acil cerrahi müdahale ile düzeltilmezse, parankimde iskemik hasar ve doku nekrozu olasılığı belirgin biçimde artar. Dolayısıyla testis torsiyonuna bağlı semptomların başlangıcından itibaren organı kurtarmak için en kritik zaman aralığı 4 ila 8 saattir. Semptomların başlangıcından sonraki ilk 6 saat içinde cerrahi detorsiyon yoluyla testisin kurtarılma oranı %90–100 arasında seyrederken, 24 saatin ardından bu oran %10'un altına düşmektedir (Chen vd., 2022).

2.2. Epididymis

Testislerin margo posterior'u boyunca uzanan epididymis, morfolojik olarak yaklaşık 4 cm uzunluğunda görünmekle birlikte açıldığında 6 metreye erişen oldukça kıvrıntılı tek bir kanaldan (ductus epididymidis) meydana gelir. Anatomik açıdan caput, corpus ve cauda epididymidis olmak üzere üç bölüme ayrılır; organın üst bölümü daha geniş bir yapı sergilerken distale doğru gidildikçe lümen ve çap belirgin biçimde daralır. Testiste üretilen spermatozoa burada depolanarak fonksiyonel motilite ve olgunlaşma sürecini tamamlar; gerektiğinde ise buradan ductus deferens'e aktarılır(Arıncı & Elhan, 2014; Sullivan vd., 2019).

2.3. Ductus deferens

Cauda epididymidis'in devamı niteliğinde olan ductus deferens; yaklaşık 35–40 cm uzunluğunda, 3 mm kalınlığında ve spermatozoa iletiminden sorumlu musküler bir kanaldır. Başlangıçta kıvrıntılı bir yol izlerken distale doğru düzleşir. Topografik seyrine göre pars scrotalis, pars funicularis, pars inguinalis ve pars pelvica

olmak üzere dört bölüme ayrılır (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Canalis inguinalis'ten geçip anulus inguinalis profundus vasıtasıyla karın boşluğuna giren ductus deferens, a. ve v. epigastrica inferior'un medialinden kavis çizerek a. iliaca externa'ların üzerinden atlar ve pelvis boşluğuna yönelir. Pelvis yan duvarında parietal peritonun altında ilerlerken a. ve v. obturatoria ile n. obturatorius'u çaprazlar. Ardından vesica urinaria'nın arkasına doğru ilerlerken ureter'in üstünden geçerek mediale yönelir. Vesicula seminalis'in medial kenarı boyunca her iki tarafın ductus deferens'i birbirine yaklaşır ve terminal segmentinde genişleyerek ampulla ductus deferentis şeklinde genişleme gösterir. Prostata doğru gidildikçe incelen kanal, **vesicula seminalis**'in boşaltım kanalı olan **ductus excretorius** ile dar açıyla birleşerek **ductus ejaculatorius**'u oluşturur ve urethra'nın pars prostatica'sına açılarak sonlanır. Funiculus spermaticus içerisinde ilerleyen ductus deferens güçlü kas yapısından dolayı palpasyonla kordon benzeri sert bir yapı olarak hissedilir (Arıncı & Elhan, 2014; Waschke vd., 2016).

2.4. Funiculus spermaticus

Anulus inguinalis profundus ile testis'in arka kenarı arasında uzanan funiculus spermaticus; ductus deferens ile testise ait damar, sinir ve lenfatiklerin kılıflar ile sarılması sonucu meydana gelen silindirik bir kordondur. Canalis inguinalis içerisinde oblik bir seyir gösteren kordon, anulus inguinalis superficialis'ten çıktıktan sonra skrotum içerisinde vertikal konuma geçer. Sol testisin daha aşağıda yer almasına bağlı olarak sağ kordon sol taraftakine oranla daha kısadır; ortalama 15–20 cm uzunluğunda ve yaklaşık bir kurşun kalem kalınlığındadır (Arıncı & Elhan, 2014; Waschke vd., 2016).

Funiculus Spermaticus'un Kılıfları

Karın ön duvarı tabakalarının fıtıklaşarak aşağı inmesiyle oluşan kordon kılıfları dıştan içe doğru üç tabakadan meydana gelir (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021):

1. Fascia spermatica externa (m. obliquus externus abdominis aponörozunun devamı)

2. Fascia cremasterica ve m. cremaster (m. obliquus internus abdominis ve fasyasının devamı)

3. Fascia spermatica interna (fascia transversalis'in devamı)

Funiculus Spermaticus'un İçeriği

Kordonu saran fasyal kılıflar içerisinde şu anatomik oluşumlar yer alır (Waschke vd., 2016):

1. Ductus deferens ve ona eşlik eden a. ductus deferentis (a. umbilicalis veya a. vesicalis inferior dalı) ile venleri

2. Aorta abdominalis'ten köken alan a. testicularis ve eşlik eden geniş venöz ağ olan plexus pampiniformis (v. testicularis)

3. A. ve v. cremasterica (a. epigastrica inferior'un dalı)

4. N. genitofemoralis'in ramus genitalis'i (m. cremaster'in motor innervasyonu)

5. Testis ve epididimden çıkarak lumbosakral/para-aortik lenf düğümlerine ulaşan lenf damarları (vasa lymphatica)

6. Sempatik ve visseral afferent lifleri taşıyan otonom pleksuslar (plexus testicularis ve plexus deferentialis)

7. Fetal periton uzantısının fibröz kalıntısı (vestigium processus vaginalis)

Funiculus Spermaticus ile Birlikte Seyreden Dış Yapılar:

N. ilioinguinalis: Canalis inguinalis içerisinde funiculus spermaticus'un ön-alt komşuluğunda ilerler; ancak kordonu çevreleyen fasyal kılıfların (fascia spermatica externa) dışında yer alır (Arıncı & Elhan, 2014; Waschke vd., 2016).

Klinik bilgi:

• Kasık fıtığı operasyonunda canalis inguinalis'i çok daraltmamaya dikkat etmek gerekir. Aksi takdirde a. testicularis sıkışır ve kısırlık oluşabilir.

• Ductus deferens canalis inguinalis'e girmeden önce kolay ulaşılabilir olduğu için kısırlaştırmada iki taraftan devre dışı bırakılır (vazektomi).

2.5. Erkek genital organlarının eklenti bezleri

Bu bezler vesicula seminalis, prostata ve glandula bulbourethralis olmak üzere üç ana anatomik yapıdan oluşur.

2.5.1. Vesicula Seminalis (Glandula Vesiculosa)

Vesica urinaria'nın arka-alt yüzü (fundus vesicae) ile rectum arasında konumlanan bir çift eklenti bezidir. Morfolojik olarak yaklaşık 5 cm uzunluğa, 2,5 cm genişliğe sahip olup kranialde daha genişken kaudale doğru gidildikçe incelir. Organ esasen kendi üzerine yoğun kıvrımlar yapmış, açıldığında 10–15 cm boyuna ulaşan kör sonlanan tübüler bir kanaldan meydana gelir. Bu kıvrıntılı tübül dıştan sağlam bir fibromusküler kapsül ile sarıldığı için dış bakıda yüzeyel girinti ve çıkıntıları belirgin olarak seçilmez.

Seminal plazmanın yaklaşık %60'ını salgılayan bez, fruktozdan zengin ve bazik özellik taşıyan bir sekresyon üretir. Bu alkali içerik, vagina'nın asidik ortamını nötralize ederek spermatozoa'nın motilitesini ve canlılığını daha uzun süre muhafaza etmesine yardımcı olur. Bezin alt ucundaki boşaltım kanalı olan

ductus excretorius, ampulla ductus deferentis ile dar bir açıyla birleşerek ductus ejaculatorius'u oluşturur.

2.5.2. Prostata (Prostat Bezi)

Erkek genital sistemine ait en büyük tek eklenti bezi olan prostata; ortalama 3 cm yüksekliğe, 4 cm transvers genişliğe ve 2 cm anteroposterior kalınlığa sahiptir. Mesane boynunun hemen altına yerleşmiş olup yukarıdaki tabanına basis prostatae, aşağıda diaphragma urogenitale'ye oturan tepesine ise apex prostatae denir. Prostatın; facies anterior, facies posterior ve sağ-sol facies inferolateralis şeklinde adlandırılan dört anatomik yüzü bulunur. Arka yüzündeki hafif bir dikey sulkus ile lobus dexter ve lobus sinister olarak iki ana loba ayrılır; bu iki lobun arasında ve üretranın arkasında ise lobus medius konumlanır (Arıncı & Elhan, 2014; Waschke vd., 2016).

Urethra masculina'nın pars prostatica bölümü prostat dokusunda dikey olarak seyreder. Colliculus seminalis'in her iki yanındaki oluklara (sinus prostaticus), bezi oluşturan tubuloalveolar bezciklere ait 30 ila 50 adet boşaltım kanalı (ductuli prostatici) açılır. Bu bezlerin sekresyonu, ejakülat hacminin yaklaşık %15–30'luk kısmını meydana getiren alkali ve seröz bir sıvıdır(Arifoğlu, 2021; Waschke vd., 2016).

Prostatın McNeal zon sınıflamasına göre klinik öneme sahip yapısal bölgeleri şunlardır (Waschke vd., 2016):

• Periferik Bölge (PZ - Glandüler dokunun %70'i): Bezin posterior ve posterolateral kısımlarını bir manto gibi kuşatır; prostat kanserlerinin ve prostatit olgularının en sık geliştiği sahadır.

• Merkezi Bölge (CZ - Glandüler dokunun %25'i): Ductus ejaculatorius'ları çevreleyerek prostat tabanından colliculus seminalis seviyesine kadar uzanan konik segmenttir.

• Transisyonel (Geçiş) Bölge (TZ - Glandüler dokunun %5'i): Proksimal üretranın her iki lateralinde yer alır; benign prostat hiperplazisinin (BPH) primer olarak kaynaklandığı klinik odaktır.

• Periüretral Bölge: Preprostatik sfinkter çevresinde, üretranın lümenine bitişik çok dar bir glandüler şerittir.

• Anterior Fibromusküler Stroma: Üretranın ön yüzünü kaplayan, salgı bezi içermeyen fibromusküler koruyucu alandır.

Klinik bilgi:

• Prostat karsinomu, erkek popülasyonunda en sık rastlanan malign tümörler arasında yer alır. Olguların büyük bir kısmı bezin periferik zonundan (dış bölgesinden) köken aldığından üretral bası bulguları geç evrelerde ortaya çıkar ve klinik olarak geç semptom verir. Prostat ile rektum arasında yalnızca ince bir fibröz bariyer olan fascia rectoprostatica (Denonvilliers fasyası) bulunduğu için şüpheli kitleler rektal tuşe esnasında kolaylıkla palpe edilebilir. Bu anatomik yakınlık dolayısıyla dijital rektal muayene, 50 yaş üzerindeki tüm erkeklerin rutin fizik muayenesinin temel bileşenlerinden biri kabul edilir (Mertsoylu & Sedef, 2023).

• Benign prostat hiperplazisi (BPH) olarak da bilinen prostat adenomu, bezin glandüler ve stromal elemanlarının iyi huylu büyümesidir. Bu patolojide organ ağırlığı 100 gramın üzerine çıkabilir ve 70 yaş üstü erkeklerin büyük bir kısmında değişken derecelerde klinik yansıma bulur. Adenomatöz proliferasyon doğrudan üretrayı çevreleyen transisyonel zondan başladığı için hastalarda obstrüktif ve irritatif miksiyon şikâyetleri erken dönemde kendini gösterir (Mertsoylu & Sedef, 2023; Waschke vd., 2016).

2.5.3. Glandula Bulbourethralis (Cowper Bezi)

Spatium profundum perinei içerisinde, m. sphincter urethrae externus lifleri arasına gömülü halde bulunan bir çift eklenti bezidir. Bezelye büyüklüğünde ve yaklaşık 1 cm çapında olan bu bezler, pars

membranacea urethrae'nin hemen posterolateralinde konumlanır. Her iki bezden çıkan yaklaşık 2,5–3 cm uzunluğundaki boşaltım kanalları (ductus glandulae bulbourethralis), perineal membranı delerek aşağı iner ve urethra masculina'nın pars spongiosa bölümünün başlangıç kısmına açılır (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Salgıladığı berrak, mukoid ve alkali nitelikteki pre-ejakülat sıvısı; üretral lümende kalan asidik idrar kalıntılarını nötralize ederek üretrayı kayganlaştırır ve spermatozoa geçişi için uygun ortamı hazırlar (Arıncı & Elhan, 2014; Arifoğlu, 2021).

Kaynakça

Arıncı, K., & Elhan, A. (2014). Anatomi: Kemikler, eklemler, kaslar, iç organlar. Güneş Tıp Kitabevleri.

Arifoğlu, Y. (2021). Her Yönüyle ANATOMİ 3. BASKI.

Barbu, L. A., Mogoantă, S. S., Cercelaru, L., Marinaș, M. C., Mărgăritescu, N. D., Popescu, M., ... & Țenea Cojan, T. S. (2026). Spermatocytic Tumor Arising in a Cryptorchid Testis: A Case Report and Narrative Review. Journal of Clinical Medicine, 15(17), 6797.

Brooks, J. D. (2007). Anatomy of the lower urinary tract and male genitalia. Campbell-walsh urology.

Chen, P., Yang, Z., Chen, N., Liu, L., Su, J., Sun, M., & Li, S. (2022). Diagnosis and treatment of cryptorchid testicular torsion in children: a 12-year retrospective study. Frontiers in pediatrics, 10, 968997.

Dagur, G., Gandhi, J., Suh, Y., Weissbart, S., Sheynkin, Y. R., Smith, N. L., ... & Khan, S. A. (2017). Classifying hydroceles of the pelvis and groin: an overview of etiology, secondary complications, evaluation, and management. Current urology, 10(1), 1-14.

Ellis, H., & Mahadevan, V. (2014). Scrotum, testis and epididymis. Surgery (Oxford), 32, e9-e16.

Garcia, R. A., & Sajjad, H. (2023). Anatomy, abdomen and pelvis, scrotum. In StatPearls [internet]. StatPearls Publishing.

Kalokairinou, K., Konstantinidis, C., Domazou, M., Kalogeropoulos, T., Kosmidis, P., & Gekas, A. (2012). US imaging in Peyronie's disease. Journal of clinical imaging science, 2, 63.

Reddy, S. K., Shaik, A. B., & Sreenivas, K. (2014). Penile injuries: A 10-year experience. Canadian Urological Association Journal, 8(9-10), E626.Mertsoylu, H., & Sedef, A. M. (2023). Prostat Kanseri. Akademisyen Kitabevi, Ankara.

Sam, P., & LaGrange, C. A. (2023). Anatomy, abdomen and pelvis, penis. In StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing.

Sullivan, R., Légaré, C., Lamontagne-Proulx, J., Breton, S., & Soulet, D. (2019). Revisiting structure/functions of the human epididymis. Andrology, 7(5), 748-757.

Waschke, J., Böckers, T. M., & Paulsen, F. (2016). Sobotta Anatomi Konu Kitabı. Sobotta Anatomi Konu Kitabı.

Yiee, J. H., & Baskin, L. S. (2010). Penile embryology and anatomy. The Scientific World Journal, 10(1), 1174-1179.

BÖLÜM 6

İNSAN TESTİSİNİN ANATOMİSİ VE SPERMATOGENEZİN YAPISAL TEMELLERİ

AYŞE GİZEM ŞAHMELİKOĞLU[1]
GİZEM SAKALLI[2]

Giriş

Testisler, skrotum içerisinde bulunan ve spermatozoon üretimi ile androjen sentezini gerçekleştiren çift organlardır. Spermatozoonların gelişimi seminifer tübüllerde gerçekleşirken testosteron, tübüller arasındaki interstisyel dokuda yer alan Leydig hücreleri tarafından üretilir. Sertoli hücreleri ise germ hücrelerinin gelişimini destekleyerek spermatogenezin düzenlenmesine katkıda bulunur. Bu işlevlerin sürdürülmesi, testisin tübüler ve interstisyel bileşenlerinin birlikte çalışmasına bağlıdır (O'Donnell & Smith, 2026).

Bu bölümde insan testisinin makroskopik anatomisi ve histolojik organizasyonu, spermatogenezin yapısal temelleriyle birlikte ele alınmaktadır. Organın yerleşimi, örtüleri, damarları,

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Temel Tıp Bilimleri Bölümü, Anatomi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0003-3761-9491, aysegizempolat@gmail.com
[2] Dr., Bağımsız araştırmacı, Anatomi, Aydın, Türkiye, ORCID: 0000-0003-3435-386X, gizem.sakalli7@gmail.com

lenfatik drenajı ve innervasyonunun ardından seminifer epitel, peritübüler bölge ve interstisyel doku incelenmektedir. Böylece testisin anatomik düzeni ile germ hücrelerinin geliştiği mikroçevre arasındaki ilişkinin açıklanması amaçlanmaktadır.

Testisin Yerleşimi ve Dış Anatomisi

Testisler, penis kökünün aşağısında ve arkasında bulunan skrotum içerisinde yer alan çift organlardır. Skrotal septum, sağ ve sol testisin bulunduğu kompartımanları birbirinden ayırır. Her testis üst tarafta funiculus spermaticus ile asılı dururken alt tarafta gubernaculum'un kalıntısı olan skrotal ligament aracılığıyla skrotuma bağlanır. İki testis genellikle aynı seviyede bulunmaz; sol testis çoğunlukla sağ testisten daha aşağıda yer alır (Tiwana & Leslie, 2023).

Oval biçimli testisin dış anatomisi; medial ve lateral yüzler, anterior ve posterior kenarlar ile üst ve alt kutuplar üzerinden tanımlanır. Bu yüzey özellikleri, organın skrotum içerisindeki yöneliminin ve epididymis ile komşuluklarının açıklanmasını kolaylaştırır. Özellikle posterior kenar, epididymis ile ilişkisi nedeniyle anterior kenardan farklı bir anatomik düzen gösterir (Ghannouchi et al., 2024).

Erişkin testisi için yaklaşık 5 × 3 × 2 cm boyutları bildirilmektedir. Bu ölçüler, organın büyüklüğünü tanımlamak için kullanılan yaklaşık değerlerdir. Epididymis testisin posterior kenarı boyunca uzanır; caput epididymidis üst kutup üzerinde yer alırken corpus epididymidis posterior kesim boyunca devam eder ve cauda epididymidis alt kutup yakınında bulunur. Bu komşulukların bilinmesi, testis parankimi ile testis dışındaki yapıların anatomik olarak ayırt edilmesinde önem taşır (Kühn et al., 2016).

Testisin posterolateral bölümü ile corpus epididymidis arasında sinus epididymidis adı verilen bir girinti bulunur. Bu nedenle epididymis, testisin bütün posterior yüzüne kesintisiz

biçimde yapışmış bir yapı olarak değerlendirilmemelidir. Tunica vaginalis'in testis ve epididymis çevresindeki uzanımı, bu bölgedeki seröz ilişkilerin anlaşılmasını sağlar (Tiwana & Leslie, 2023).

Testis ile epididymis arasındaki bağlantı, dış komşuluğun yanı sıra kanal devamlılığıyla da kurulur. Testis içindeki rete testis'ten çıkan ductuli efferentes, spermatozoonları epididymis kanalına iletir. Yoğun biçimde kıvrılmış ductus epididymidis, organın baş, gövde ve kuyruk bölümleri boyunca devam ederek cauda epididymidis'te ductus deferens'e geçer. Böylece testiste üretilen hücrelerin, olgunlaşma ve iletim yollarına aktarılmasını sağlayan anatomik devamlılık oluşur (O'Donnell & Smith, 2026).

Testisin Örtüleri ve İç Organizasyonu

Tunica Vaginalis ve Testiküler Kapsül

Testisin seröz örtüsü olan tunica vaginalis, parietal ve visseral yapraklardan oluşan, mezotelle döşeli bir kesedir. Embriyolojik olarak processus vaginalis ile ilişkilidir; bu yapının üst bölümünün kapanması, testis çevresindeki seröz kesenin abdominal boşluktan ayrılmasını sağlar (Garriga et al., 2009). Visseral yaprak testis yüzeyini örterken parietal yaprak skrotal duvarın iç tarafını döşer. Yapraklar arasında normalde az miktarda sıvı bulunur. Testis ve epididymis çevresindeki bu seröz düzen, organların birbirleriyle ve skrotal duvarla ilişkilerinin anlaşılmasında önemlidir (Kühn et al., 2016).

Visseral yaprağın derininde bulunan tunica albuginea, testisi çevreleyen yoğun fibröz bağ dokusu kapsülüdür. Bu tabaka, seröz örtüden farklı olarak testis parankiminin çevresinde dayanıklı bir sınır oluşturur ve iç bölmelere uzanan bağ dokusuyla devamlılık gösterir. Kapsülün iç tarafındaki damardan zengin tabaka tunica vasculosa olarak adlandırılır. Böylece testisin çevresinde seröz örtü, fibröz kapsül ve iç vasküler tabaka birbirinden ayırt edilebilir (University of Leeds, n.d.).

Mediastinum Testis ve Lobüler Düzen

Tunica albuginea, testisin posterior kesiminde kalınlaşarak organın içine uzanan mediastinum testis'i oluşturur. Kapsül ile mediastinum arasında uzanan bağ dokusu septumları, testis parankimini lobüllere böler. Septumların oluşturduğu sınırlar tam değildir; bu nedenle lobüller birbirinden bütünüyle yalıtılmış kompartımanlar olarak değerlendirilmemelidir. Lobüllerin içerisinde kıvrımlı seminifer tübüller bulunur; tübüller arasındaki interstisyel doku ise bu tübüler düzeni tamamlar (O'Donnell & Smith, 2026).

Testis İçi Kanal Sistemi ve Efferent Kanallar

Seminifer tübüller, spermatozoonların geliştiği epitelin yanı sıra üretilen hücrelerin testis dışına taşındığı kanal sisteminin başlangıcını oluşturur. Kıvrımlı tübüllerin terminal bölümleri tubuli recti ile devam eder ve mediastinum testis içerisindeki rete testis'e açılır. Rete testis, birbiriyle bağlantılı kanallardan oluşan bir ağdır. Bu ağdan çıkan ductuli efferentes, testis içindeki kanal sistemi ile ductus epididymidis arasındaki bağlantıyı kurar (O'Donnell & Smith, 2026).

Ductuli efferentes'in epiteli, silyalı prizmatik hücreler ile silyasız kübik hücrelerin bir arada bulunmasıyla karakterizedir. Hücre yüksekliklerindeki farklılık, kanal lümeninin histolojik kesitlerde dalgalı görünmesine neden olur. Silyasız hücreler testis kaynaklı sıvının geri emilmesiyle, silyalı hücreler ise lümen içeriğinin hareketiyle ilişkilidir. Dolayısıyla seminifer tübüllerden epididymis kanalına geçiş, yalnızca anatomik bir bağlantı değil, epitel özelliklerinin ve lümen içeriğinin değiştiği bir geçiş bölgesidir (Gocht et al., 2025).

Testisin Damarları

Arteriyel Beslenme

Testisin arteriyel beslenmesinde a. testicularis temel damardır. Arter, aorta abdominalis'in renal arterlerin aşağısında kalan bölümünden köken alır ve funiculus spermaticus içerisinde testise ulaşır. Funiculus spermaticus'un diğer arteriyel bileşenleri arasında ductus deferens'e eşlik eden a. ductus deferentis ile a. epigastrica inferior'dan ayrılan a. cremasterica bulunur. Bu damarların kökenlerinin ve birbirleriyle ilişkilerinin bilinmesi, inguinal bölge ve funiculus spermaticus anatomisinin değerlendirilmesinde önem taşır (Karbasian et al., 2022).

Testisin parankim içindeki damar dağılımı, lobüler organizasyonuyla yakın ilişki gösterir. İnsan testisinde seri kesitler ve üç boyutlu rekonstrüksiyonla yapılan incelemelerde, sentripetal arterlerden ayrılan rekürren arterlerin testiküler lobüllerin merkezî ekseni boyunca ilerlediği gösterilmiştir. Bu arterlerden çıkan segmental dallar, lobülün uzun eksenine dik yönde uzanan parankim bölgelerini besler. Oluşan mikrovasküler ağın bazı bölümleri Leydig hücreleriyle çevriliyken bazı bölümleri seminifer tübüllerin duvarlarıyla yakın komşuluk gösterir. Böylece damar organizasyonu, testisin tübüler ve interstisyel bileşenlerinin yerleşimiyle birlikte değerlendirilmesi gereken bir yapı oluşturur (Ergün et al., 1994).

Venöz Drenaj

Testisin venöz drenajı, birbiriyle bağlantılı venlerden oluşan plexus pampiniformis aracılığıyla gerçekleşir (Wishahi, 1991). Funiculus spermaticus içerisinde bulunan bu venöz ağın drenajında sağ ve sol taraf arasında farklılık vardır. Sağ v. testicularis doğrudan v. cava inferior'a açılırken sol v. testicularis, v. renalis sinistra'ya dökülür. Böylece testislerin venöz kanı, sağda doğrudan, solda ise

renal ven aracılığıyla sistemik dolaşıma katılır (Karbasian et al., 2022).

Lenfatik Drenaj

Testisin lenfatik drenajı, skrotal duvarın lenfatik drenajından farklıdır. Testise ait lenf yolları retroperitoneal bölgedeki lumbar lenf düğümlerine yönelirken skrotal duvarın lenfi yüzeyel inguinal lenf düğümlerine taşınır. Bu farklılık, testisin embriyolojik gelişim sırasında karın bölgesinden skrotuma inmesi ve bu süreçte damarları ile lenfatik bağlantılarını beraberinde taşımasıyla ilişkilidir (Garcia & Sajjad, 2023).

Testis ile retroperitoneal lenf düğümleri arasındaki bağlantı, insanlarda gerçekleştirilen lenfosintigrafik incelemelerle de gösterilmiştir. Yeh ve arkadaşları, testise uygulanan radyofarmasötiğin retroperitoneal lenf düğümlerine ulaştığını ve funiculus spermaticus boyunca paraaortik lenf düğümleriyle bağlantının görüntülenebildiğini bildirmiştir. Bu bulgular, testisin lenfatik drenajının skrotal yerleşimine rağmen abdominal bölgedeki bağlantılarını koruduğunu desteklemektedir (Yeh et al., 1986).

Damar Düzeni ve Testiküler Isı Düzenlenmesi

Testisin skrotum içerisindeki yerleşimi, spermatogenezin vücut merkez sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta sürdürülmesine katkı sağlar. Bu sıcaklık farkının korunmasında skrotal yüzeyden gerçekleşen ısı kaybı ile testiküler arter ve plexus pampiniformis arasındaki ısı alışverişi birlikte rol oynar. Testise gelen daha sıcak arteriyel kan ile testisten dönen daha serin venöz kanın yakın komşuluğu, karşı akım mekanizmasıyla ısı aktarılmasını mümkün kılar. Böylece arteriyel kanın testis parankimine ulaşmadan önce soğumasına katkıda bulunulur (De Toni et al., 2023).

Testiküler ısı düzenlenmesinin işlevsel önemi, insanlarda gerçekleştirilen kontrollü ısı maruziyeti çalışmalarında da

görülmektedir. Garolla ve arkadaşlarının normal semen parametrelerine sahip 10 gönüllüyü izlediği çalışmada, üç aylık tekrarlayan sauna maruziyetinin ardından sperm sayısı ve hareketliliğinde azalma; kromatin paketlenmesi ve mitokondri işlevinde değişiklikler saptanmıştır. Bildirilen değişikliklerin maruziyetin sonlandırılmasından altı ay sonraki değerlendirmede geri döndüğü gösterilmiştir. Bu bulgular, testisin uygun sıcaklık ortamının korunmasının önemini desteklemekle birlikte, küçük bir örneklemde ve belirli bir maruziyet düzeninde elde edildiğinden bütün ısı maruziyetlerine genellenmemelidir (Garolla et al., 2013).

Testisin İnnervasyonu

Testisin otonom innervasyonunda, testiküler arterlere eşlik eden sinir ağları önemli bir yer tutar. Erkek kadavralarında yapılan anatomik incelemelerde, plexus aorticus'tan ayrılan dalların testiküler arterler çevresindeki plexus spermaticus'a katıldığı gösterilmiştir. Aynı çalışmada plexus aorticus'un lumbar splanknik sinirlerden ve bazı örneklerde aortikorenal ve üst mezenterik ganglionlardan gelen bağlantılarla beslendiği saptanmıştır. Bu anatomik düzen, testise yönelen otonom sinirlerin abdominal sinir ağları ve damarlarla yakın ilişkisini ortaya koymaktadır (Beveridge et al., 2015).

Testis içerisindeki sinir liflerinin dağılımı, damarlar ve hücresel yapılarla ilişkileri üzerinden de incelenmiştir. Yaşları 21–32 arasında değişen 15 donörden alınan 30 testisin değerlendirildiği immünohistokimyasal çalışmada, PGP 9.5 ile işaretlenen sinir lifleri özellikle Leydig hücre grupları, kan damarları ve seminifer tübüllerle yakın ilişkili bulunmuştur. Nöropeptid Y içeren liflerin ise büyük ölçüde damar çevresinde yerleştiği gösterilmiştir. Bu bulgular, genç erişkin insan testisinde sinir liflerinin interstisyel ve perivasküler dağılımını ortaya koymakla birlikte, işlevsel etkilerinin

yalnızca morfolojik bulgularla kesinleştirilemeyeceği dikkate alınmalıdır (Gong et al., 2009).

Testisin Histolojik Organizasyonu

Seminifer Epitel ve Peritübüler Doku

Seminifer tübüllerin duvarı, germ hücrelerinin geliştiği seminifer epitel ile onu dıştan çevreleyen peritübüler dokudan oluşur. Epitelde spermatogonyumlar, primer ve sekonder spermatositler ile farklılaşmakta olan spermatidler, Sertoli hücrelerinin sitoplazmik girintileri ve uzantılarıyla yakın ilişki içerisinde bulunur. Bu hücresel düzenin dışında yer alan peritübüler bölge ise seminifer tübül ile çevresindeki interstisyel doku arasındaki sınırı oluşturur. Dolayısıyla tübülün histolojik değerlendirilmesinde epiteldeki germ hücresi toplulukları ve dış duvarın yapısı birlikte incelenmelidir (Holstein et al., 2003).

Seminifer epitelin dışında bulunan peritübüler bölge, tübüler ve interstisyel kompartımanlar arasında yer alır. Erişkin insanda bu bölge, birkaç tabaka hâlinde düzenlenmiş ince ve uzun peritübüler hücreler ile hücre dışı matriksten oluşur; ayrıca az sayıda kapiller, sinir lifleri ve bağışıklık hücreleri içerir. Düz kas özellikleri gösteren peritübüler hücreler, yalnızca tübül duvarının yapısal bileşenleri değildir. İnsan hücre kültürlerinden elde edilen veriler, bu hücrelerin spermatogenezi destekleyen mikroçevreye, bağışıklıkla ilişkili süreçlere ve testiküler mikrodolaşımın düzenlenmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir (Mayerhofer, 2025).

İnterstisyel Doku ve Leydig Hücreleri

Seminifer tübüller arasındaki interstisyel doku; kan damarları, lenfatik kapillerler, makrofajlar, mast hücreleri ve Leydig hücrelerini içeren gevşek bağ dokusundan oluşur. İnsan testisinde Leydig hücreleri tek tek veya küçük gruplar hâlinde bulunabilir. Bu hücrelerin sitoplazmasında gelişmiş düz endoplazmik retikulum ve

tübüler kristalı mitokondriler yer alır. Steroid sentezleyen hücrelere özgü bu organel düzenine ek olarak insan Leydig hücrelerinde Reinke kristalleri görülebilir; ancak bu yapıların işlevi tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır (Kerr, 1991).

Leydig hücrelerinin başlıca endokrin işlevi testosteron sentezidir. Erişkinde luteinizan hormonun (LH) hücre yüzeyindeki reseptörlerine bağlanması, hücre içi siklik adenozin monofosfat (cAMP) aracılı sinyal yolunu etkinleştirir. Bu uyarı, steroid sentezinin başlangıç maddesi olan kolesterolün mitokondriye taşınmasını artırır. Kolesterol, iç mitokondri zarındaki CYP11A1 enzimi aracılığıyla pregnenolona dönüştürülür; sonraki enzimatik basamaklar sonucunda testosteron oluşur. Böylece Leydig hücrelerinin mitokondri ve düz endoplazmik retikulumdan zengin yapısı, steroid sentezindeki görevleriyle doğrudan ilişkilidir (Zirkin & Papadopoulos, 2018).

Sertoli Hücreleri ve Kan-Testis Bariyeri

Sertoli hücreleri, seminifer epitelin bazal laminası üzerine yerleşen ve lümene doğru uzanan destek hücreleridir. Bazal bölgede bulunan çekirdeklerinin girintili konturu ve belirgin çekirdekçikleri, bu hücrelerin morfolojik olarak tanınmasına yardımcı olur. Sitoplazmik uzantıları, farklı gelişim basamaklarındaki germ hücreleri arasında ilerleyerek bu hücrelerle yakın ilişkiler kurar. Bu nedenle Sertoli hücresinin biçimi, yalnızca çekirdeğin konumu üzerinden değil, germ hücreleriyle oluşturduğu üç boyutlu ilişki içerisinde değerlendirilmelidir (O'Donnell & Smith, 2026).

Sertoli hücreleri, germ hücreleriyle yakın yapısal ilişkiler kurarak seminifer epitelin organizasyonuna katılır. Germ hücrelerinin gelişimi için gerekli desteğin sağlanması, hücreler arası bağlantıların düzenlenmesi ve yerel sinyallerin iletilmesi bu hücrelerin temel görevleri arasındadır. Sertoli hücreleri ile germ hücreleri arasındaki ilişki karşılıklıdır; gelişmekte olan germ

hücrelerinden gelen sinyaller de Sertoli hücrelerinin özelliklerini etkiler. Dolayısıyla spermatogenezin sürdürülmesi, bu iki hücre topluluğu arasındaki yapısal ve işlevsel iş birliğine bağlıdır (Griswold, 2018).

Komşu Sertoli hücreleri arasında, seminifer epitelin bazal laminasına yakın bölgede bulunan bağlantı kompleksleri kan-testis bariyerinin yapısal temelini oluşturur. Sıkı bağlantıların önemli bir bileşen olduğu bu bariyer, seminifer epiteli bazal ve adluminal kompartımanlara ayırarak hücreler arasından madde geçişini sınırlar. Böylece mayotik ve postmayotik germ hücrelerinin geliştiği adluminal bölgenin kendine özgü mikroçevresinin korunmasına katkı sağlar. Bariyer durağan bir yapı değildir; gelişen germ hücrelerinin bazal kompartımandan adluminal kompartımana geçişi sırasında Sertoli hücreleri arasındaki bağlantılar yeniden düzenlenir (Mruk & Cheng, 2015).

Spermatogenez

Spermatogenez, spermatogonyumların birbirini izleyen çoğalma ve farklılaşma basamaklarından geçerek spermatozoonlara dönüştüğü süreçtir. Bu süreç; spermatogonyumların mitotik çoğalmasını, spermatositlerin mayotik bölünmelerini ve oluşan spermatidlerin spermiyogenez yoluyla biçimsel farklılaşmasını kapsar. Farklılaşan hücrelerin seminifer tübül lümenine bırakılması ise spermiasyon olarak adlandırılır. Sürecin düzenli biçimde yürütülmesi, germ hücreleri ile somatik hücreler arasındaki etkileşimlerin yanı sıra hormonal, parakrin ve genetik düzenleyicilere bağlıdır (Neto et al., 2016).

Spermatogoniyal Evre

Spermatogoniyal evrede, germ hücresi topluluğunun devamlılığını sağlayan kendini yenileme ile spermatozoon üretimine yönelen farklılaşma süreçleri arasında denge kurulur. İnsan spermatogonyumları klasik histolojik değerlendirmede

çekirdeklerinin boyanma özelliklerine göre koyu A (A dark, Ad), açık A (A pale, Ap) ve B tipleriyle tanımlanır (Kerr, 1991). Bununla birlikte, morfolojik sınıflandırma bu hücrelerin moleküler çeşitliliğini bütünüyle yansıtmaz. Erişkin insan testisinde yapılan tek hücreli RNA dizileme çalışmaları, spermatogonyumlar arasında farklı transkripsiyonel durumların bulunduğunu göstermiştir. Bu nedenle morfolojik hücre tipleri ile moleküler olarak tanımlanan hücre durumları bire bir eşdeğer kabul edilmemelidir (Guo et al., 2018).

Germ hücrelerinin gelişimindeki bir diğer yapısal özellik, hücreler arasında sitoplazmik köprülerin bulunmasıdır. Spermatogonyumların bölünmelerinde sitoplazmik ayrılmanın tamamlanmaması sonucunda oluşan yavru hücreler, bu köprüler aracılığıyla bağlantılı kalabilir. Bağlantılar spermatosit evreleri boyunca sürer ve spermatid gelişiminin ileri basamaklarında çözülür. Böylece aynı hücreden köken alan germ hücreleri, birbirinden bütünüyle bağımsız hücreler yerine bağlantılı bir topluluk oluşturur. Bu klonal düzenin, germ hücrelerinin eş zamanlı gelişimine katkı sağladığı düşünülmektedir (Holstein et al., 2003).

Mayotik Evre

Mayoz, germ hücrelerinin kromozom takımı sayısının diploidden haploide indirgenmesini sağlayan, birbirini izleyen iki bölünmeden oluşur. Mayoz I öncesinde DNA eşlenir; profaz I sırasında homolog kromozomlar eşleşir ve aralarında genetik materyal değişiminin gerçekleştiği rekombinasyon süreci yürütülür. Rekombinasyon sonucunda oluşan krossing-over bağlantıları, homolog kromozomların ilk mayotik bölünmede doğru biçimde ayrılmasına katkıda bulunur. Böylece mayoz, kromozom sayısının azaltılmasının yanı sıra genetik çeşitliliğin oluşmasında da rol oynar (Gray & Cohen, 2016).

DNA eşlenmesini tamamlamış insan primer spermatositi, 46 kromozom ve 4C DNA içeriğine sahiptir (2n, 4C). Mayoz I sırasında homolog kromozomların ayrılmasıyla oluşan iki sekonder spermatositin her biri, iki kardeş kromatitten oluşan 23 kromozom taşır (n, 2C). Arada yeniden DNA eşlenmesi gerçekleşmeden başlayan mayoz II'de kardeş kromatitler ayrılır ve her biri 23 kromozom ile 1C DNA içeren haploid spermatidler oluşur. Dolayısıyla bölünmeleri tamamlayan bir primer spermatositten dört spermatid meydana gelir. Bu hücreler henüz spermatozoonun biçimsel özelliklerini kazanmamıştır; sonraki spermiyogenez evresinde farklılaşmalarını sürdürürler (Alberts et al., 2002).

Spermiyogenez ve Spermiasyon

Spermiyogenez, mayoz sonucunda oluşan haploid spermatidlerin yeni bir hücre bölünmesi geçirmeden spermatozoonun yapısal özelliklerini kazandığı farklılaşma sürecidir. Bu süreçte akrozom gelişir, çekirdek yoğunlaşarak biçim değiştirir ve flagellumun temelini oluşturan aksonem ile ona eşlik eden yapılar düzenlenir. Çekirdek kromatininin yeniden yapılanması sırasında histonların yerini önce geçiş proteinleri, ardından büyük ölçüde protaminler alır. Böylece genetik materyal daha yoğun biçimde paketlenirken hücrenin baş ve kuyruk bölgeleri belirginleşir (O'Donnell, 2014).

Spermiasyon, farklılaşmanın son aşamasındaki spermatidlerin Sertoli hücreleriyle bağlantılarının yeniden düzenlenmesi ve seminifer tübül lümenine bırakılması sürecidir. Bu sırada hücrenin kalan sitoplazması yeniden biçimlendirilir, fazla sitoplazma uzaklaştırılır ve Sertoli hücresi ile spermatid arasındaki özel tutunma yapıları çözülür. Dolayısıyla spermiasyon, yalnızca hücrenin epitelden ayrıldığı son anı değil, bu ayrılmayı hazırlayan birbiriyle ilişkili yapısal değişiklikleri de kapsar. Lümene salınma,

hücrelerin epididymis'e geçişinden önce gerçekleşir (O'Donnell et al., 2011).

Spermatozoonun Yapısal Özellikleri

Spermatozoon, genetik materyalin taşınmasına ve hücrenin hareketine özelleşmiş bölümlerden oluşur. Baş bölgesinde yoğun biçimde paketlenmiş haploid çekirdek ile çekirdeğin ön kısmını örten akrozom bulunur. Akrozom, spermiyogenez sırasında gelişen ve döllenme sürecinde görev alan enzimleri içeren zarla çevrili bir yapıdır. Baş ile flagellum arasındaki bağlantı bölgesi, bu iki bölümün yapısal bütünlüğünü sağlar (Alberts et al., 2002).

Flagellumun organizasyonu; bağlantı parçası, orta parça, esas parça ve son parça üzerinden incelenir. Orta parçada aksonemin çevresinde dış yoğun lifler ve mitokondriyal kılıf bulunur. Orta parça ile esas parça arasındaki sınırı annulus oluşturur. Esas parçanın proksimal bölümünde dış yoğun lifler ve fibröz kılıf aksoneme eşlik ederken distal bölümünde dış yoğun lifler sonlanır. Son parçada ise bu yardımcı kılıflar bulunmaz. Flagellum boyunca görülen bu bölgesel farklılıklar, hareketi sağlayan hücresel yapının yalnızca tek tip bir mikrotübül demetinden oluşmadığını gösterir (Pereira & Sousa, 2023).

Testis Sonrası Olgunlaşma ile İlişkisi

Spermatozoonların testiste yapısal özelliklerini kazanması, işlevsel olgunlaşmalarının tamamlandığı anlamına gelmez. Seminifer epitelden salınan hücreler, epididymis boyunca ilerlerken lümendeki mikroçevreyle etkileşerek hareket ve döllenmeyle ilişkili özellikler kazanır. Epididymal epitelin salgılama ve emilim faaliyetleri, bu olgunlaşmayı destekleyen bölgesel ortamların oluşmasını sağlar. Olgunlaşan spermatozoonların ejakülasyon öncesinde depolanmasında ise özellikle cauda epididymidis görev alır (Zhou et al., 2018).

Epididymal olgunlaşma ile kapasitasyon birbirinden farklı süreçlerdir. Kapasitasyon, ejakülasyon sonrasında kadın üreme yollarında veya uygun laboratuvar koşullarında gerçekleşebilen ve spermatozoonun döllenmeye hazırlanmasını sağlayan işlevsel değişiklikler bütünüdür. Bu süreçte hücre zarının özellikleri, iyon dengesi ve hücre içi sinyal yolları yeniden düzenlenir. Dolayısıyla testisteki spermiyogenez ve spermiasyon, epididymis'teki olgunlaşma ve kapasitasyon, erkek gametinin gelişiminde birbirini tamamlayan ancak farklı anatomik ortamlarda gerçekleşen basamaklar olarak değerlendirilmelidir (Puga Molina et al., 2018).

Seminifer Epitelin Döngüsel Organizasyonu

Seminifer epitelde farklı gelişim basamaklarındaki germ hücreleri, belirli hücresel birliktelikler oluşturur. Tübülün belirli bir bölgesinde bu birlikteliklerin zaman içerisinde birbirini izleyerek yeniden ortaya çıkması, seminifer epitel döngüsü olarak tanımlanır. Bu döngü, tek bir germ hücresinin bütün gelişim süreciyle aynı değildir; aynı bölgede bulunan farklı hücre kuşaklarının birlikte değişimini ifade eder. Bu nedenle spermatogenezin değerlendirilmesinde hücrelerin tek tek tanınmasının yanı sıra hangi gelişim basamaklarının birlikte bulunduğunun belirlenmesi de önemlidir (Amann, 2008).

İnsan seminifer tübüllerinde farklı hücresel birliktelikler aynı enine kesitin farklı bölgelerinde görülebilir. Bu görünüm, spermatogenezin düzensiz olduğu anlamına gelmez; germ hücrelerinin tübül içerisindeki mekânsal organizasyonunu yansıtır. İnsan seminifer epitelinin ultrastrüktürel ve topografik değerlendirmeleri, hücrelerin gelişim basamaklarının düzenli bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Dolayısıyla tek bir tübül kesitindeki bütün epitelin aynı gelişim evresini temsil ettiği varsayılmamalıdır (Kerr, 1991).

Klinik Anatomi ile İlişkiler

Testisin örtüleri ve funiculus spermaticus ile ilişkisi, testis torsiyonunun anatomik temelini anlamada önemlidir. Funiculus spermaticus'un kendi ekseni etrafında dönmesi, testisin dolaşımını bozarak iskemiye yol açabilir. Tunica vaginalis'in testis ve epididymis çevresindeki tutunma düzeninin değiştiği çan tokmağı deformitesi, testisin kese içerisinde daha serbest hareket etmesine ve intravajinal torsiyona yatkınlık oluşturur. Bu örnek, organın yalnızca damar yapısının değil, skrotum içerisindeki hareketliliğini sınırlayan anatomik ilişkilerin de işlevin korunmasında önemli olduğunu göstermektedir (Laher et al., 2020).

Venöz drenajın klinik açıdan önemli örneklerinden biri, plexus pampiniformis venlerinin genişlemesiyle karakterize varikoseldir (Karbasian et al., 2022). Varikoselin testis işlevleri üzerindeki etkileri tek bir mekanizmayla açıklanamamaktadır. Skrotal sıcaklık artışı, oksidatif stres ve hipoksi, sperm üretimi ve niteliğindeki bozulmayla ilişkilendirilen olası mekanizmalar arasındadır. Bununla birlikte, varikoseli bulunan her erkekte aynı düzeyde işlev kaybı veya infertilite gelişmez. Dolayısıyla venöz yapıdaki değişiklikler ile üreme işlevi arasındaki ilişki, bireysel farklılıklar dikkate alınarak değerlendirilmelidir (Su et al., 2021).

Sonuç

İnsan testisinin anatomik ve histolojik organizasyonu, spermatozoon üretimi ile endokrin işlevlerin birlikte sürdürülmesini sağlayan yapısal bir bütünlük oluşturur. Organın örtüleri ve iç kanal sistemi, seminifer tübüllerin yerleşimini ve üretilen hücrelerin iletim yollarını belirlerken damarları, lenfatik bağlantıları ve innervasyonu çevre dokularla ilişkisini kurar. Seminifer epitel, peritübüler bölge ve interstisyel doku arasındaki etkileşimler ise germ hücrelerinin geliştiği mikroçevrenin temelini oluşturur.

Spermatogenez boyunca gerçekleşen mitotik çoğalma, mayotik bölünmeler ve spermiyogenez, bu doku organizasyonu içerisinde birbirini tamamlayan basamaklardır. Testisteki yapısal farklılaşmayı epididymal olgunlaşma ve ardından kapasitasyonun izlemesi, spermatozoonun biçimsel gelişimi ile döllenmeye yönelik işlevsel hazırlığının farklı süreçler olduğunu gösterir. Bu nedenle insan testisinin değerlendirilmesinde makroskopik anatomi, hücresel yapı ve üreme işlevi birlikte ele alınmalıdır. Böyle bir yaklaşım, normal yapının anlaşılmasının yanı sıra torsiyon ve varikosel gibi klinik durumların anatomik temellerinin yorumlanmasına da katkı sağlar.

Kaynakça/References

Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2002). *Molecular biology of the cell* (4th ed.). Garland Science. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK21054/

Amann, R. P. (2008). The cycle of the seminiferous epithelium in humans: a need to revisit? *Journal of Andrology, 29*(5), 469–487. https://doi.org/10.2164/jandrol.107.004655

Beveridge, T. S., Johnson, M., Power, A., Power, N. E., & Allman, B. L. (2015). Anatomy of the nerves and ganglia of the aortic plexus in males. *Journal of Anatomy, 226*(1), 93–103. https://doi.org/10.1111/joa.12251

De Toni, L., Finocchi, F., Jawich, K., & Ferlin, A. (2023). Global warming and testis function: A challenging crosstalk in an equally challenging environmental scenario. *Frontiers in Cell and Developmental Biology, 10*, 1104326. https://doi.org/10.3389/fcell.2022.1104326

Ergün, S., Stingl, J., & Holstein, A. F. (1994). Segmental angioarchitecture of the testicular lobule in man. *Andrologia, 26*(3), 143–150. https://doi.org/10.1111/j.1439-0272.1994.tb00778.x

Garcia, R. A., & Sajjad, H. (2023). Anatomy, abdomen and pelvis, scrotum. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549893/

Garolla, A., Torino, M., Sartini, B., Cosci, I., Patassini, C., Carraro, U., & Foresta, C. (2013). Seminal and molecular evidence that sauna exposure affects human spermatogenesis. *Human Reproduction, 28*(4), 877–885. https://doi.org/10.1093/humrep/det020

Garriga, V., Serrano, A., Marin, A., Medrano, S., Roson, N., & Pruna, X. (2009). US of the tunica vaginalis testis: anatomic relationships and pathologic conditions. *RadioGraphics, 29*(7), 2017–2032. https://doi.org/10.1148/rg.297095040

Ghannouchi, S.-E., Dahmane, R., Boc, A., Salah Jarrar, M., & Mougou Zrelli, S. (2024). *General anatomy: Introduction to clinical practice*. Založba Univerze v Ljubljani. https://doi.org/10.55295/9789612973971

Gocht, A., Merseburger, A. S., Ergün, S., & Roesch, M. C. (2025). The ductal network in the human testis and epididymis: What belongs to which? *Clinical Anatomy, 38*(8), 809–815. https://doi.org/10.1002/ca.24248

Gong, Y. G., Feng, M. M., Hu, X. N., Wang, Y. Q., Gu, M., Zhang, W., & Ge, R. S. (2009). Peptidergic not monoaminergic fibers profusely innervate the young adult human testis. *Journal of Anatomy, 214*(3), 330–338. https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2008.01038.x

Gray, S., & Cohen, P. E. (2016). Control of meiotic crossovers: from double-strand break formation to designation. *Annual Review of Genetics, 50*(1), 175–210. https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120215-035111

Griswold, M. D. (2018). 50 years of spermatogenesis: Sertoli cells and their interactions with germ cells. *Biology of Reproduction, 99*(1), 87–100. https://doi.org/10.1093/biolre/ioy027

Guo, J., Grow, E. J., Mlcochova, H., Maher, G. J., Lindskog, C., Nie, X., Guo, Y., Takei, Y., Yun, J., Cai, L., Kim, R., Carrell, D. T., Goriely, A., Hotaling, J. M., & Cairns, B. R. (2018). The adult human testis transcriptional cell atlas. *Cell Research, 28*(12), 1141–1157. https://doi.org/10.1038/s41422-018-0099-2

Holstein, A.-F., Schulze, W., & Davidoff, M. (2003). Understanding spermatogenesis is a prerequisite for treatment. *Reproductive Biology and Endocrinology, 1*, Article 107. https://doi.org/10.1186/1477-7827-1-107

Karbasian, N., Segaran, N., Solomon, N., Pellerito, J. S., Katz, D. S., Moshiri, M., & Revzin, M. V. (2022). Pathologic conditions at imaging of the spermatic cord. *RadioGraphics, 42*(3), 741–758. https://doi.org/10.1148/rg.210161

Kerr, J. B. (1991). Ultrastructure of the seminiferous epithelium and intertubular tissue of the human testis. *Journal of Electron Microscopy Technique, 19*(2), 215–240. https://doi.org/10.1002/jemt.1060190208

Kühn, A. L., Scortegagna, E., Nowitzki, K. M., & Kim, Y. H. (2016). Ultrasonography of the scrotum in adults. *Ultrasonography, 35*(3), 180–197. https://doi.org/10.14366/usg.15075

Laher, A., Ragavan, S., Mehta, P., & Adam, A. (2020). Testicular torsion in the emergency room: a review of detection and management strategies. *Open Access Emergency Medicine, 12*, 237–246. https://doi.org/10.2147/OAEM.S236767

Mayerhofer, A. (2025). Human testicular peritubular cells: novel insights into an underestimated testicular somatic cell. *Reproduction, 169*(6), e250040. https://doi.org/10.1530/REP-25-0040

Mruk, D. D., & Cheng, C. Y. (2015). The mammalian blood-testis barrier: its biology and regulation. *Endocrine Reviews, 36*(5), 564–591. https://doi.org/10.1210/er.2014-1101

Neto, F. T. L., Bach, P. V., Najari, B. B., Li, P. S., & Goldstein, M. (2016). Spermatogenesis in humans and its affecting factors. *Seminars in Cell & Developmental Biology, 59*, 10–26. https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2016.04.009

O'Donnell, L. (2014). Mechanisms of spermiogenesis and spermiation and how they are disturbed. *Spermatogenesis, 4*(2), e979623. https://doi.org/10.4161/21565562.2014.979623

O'Donnell, L., Nicholls, P. K., O'Bryan, M. K., McLachlan, R. I., & Stanton, P. G. (2011). Spermiation: The process of sperm release. *Spermatogenesis, 1*(1), 14–35. https://doi.org/10.4161/spmg.1.1.14525

O'Donnell, L., & Smith, L. B. (2026). Endocrinology of the Testis and Spermatogenesis. In *Endotext*. MDText.com, Inc. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279031/

Pereira, R., & Sousa, M. (2023). Morphological and molecular bases of male infertility: a closer look at sperm flagellum. *Genes, 14*(2), 383. https://doi.org/10.3390/genes14020383

Puga Molina, L. C., Luque, G. M., Balestrini, P. A., Marín-Briggiler, C. I., Romarowski, A., & Buffone, M. G. (2018). Molecular basis of human sperm capacitation. *Frontiers in Cell and Developmental Biology, 6*, 72. https://doi.org/10.3389/fcell.2018.00072

Su, J. S., Farber, N. J., & Vij, S. C. (2021). Pathophysiology and treatment options of varicocele: an overview. *Andrologia, 53*(1), e13576. https://doi.org/10.1111/and.13576

Tiwana, M. S., & Leslie, S. W. (2023). Anatomy, abdomen and pelvis: Testes. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470201/

University of Leeds. (n.d.). *Testis*. The Histology Guide. Retrieved October 20, 2026, from https://histology.leeds.ac.uk/home/male/testis/

Wishahi, M. M. (1991). Anatomy of the venous drainage of the human testis: Testicular vein cast, microdissection and radiographic demonstration. A new anatomical concept. *European Urology, 20*(2), 154–160. https://doi.org/10.1159/000471687

Yeh, S. D., Morse, M. J., Grando, R., Kleinert, E. L., & Whitmore, W. F., Jr. (1986). Lymphoscintigraphic studies of lymphatic drainage from the testes. *Clinical Nuclear Medicine, 11*(12), 823–827. https://doi.org/10.1097/00003072-198612000-00004

Zhou, W., De Iuliis, G. N., Dun, M. D., & Nixon, B. (2018). Characteristics of the epididymal luminal environment responsible for sperm maturation and storage. *Frontiers in Endocrinology, 9*, 59. https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00059

Zirkin, B. R., & Papadopoulos, V. (2018). Leydig cells: formation, function, and regulation. *Biology of Reproduction, 99*(1), 101–111. https://doi.org/10.1093/biolre/ioy059

BÖLÜM 7

KARACİĞER SAFRA KESESİ PANKREAS VE DALAĞIN EMBRİYOLOJİSİ VE KLİNİK ANATOMİSİ

GİZEM SAKALLI[1]
BEHİYE SARIYILDIZ[2]

Giriş

Üst karın bölgesindeki organlar, birbirine yakın yerleşmelerine rağmen farklı görevleri üstlenir. Karaciğer metabolik dengeyi sürdürür ve safra üretir; safra kesesi bu salgıyı depolayıp yoğunlaştırır; pankreas sindirim enzimleri ile metabolizmayı düzenleyen hormonları salgılar. Dalak ise sindirim kanalının bir parçası olmaksızın kanın süzülmesine ve bağışıklık yanıtına katılır. Bu organları birlikte incelemek, özellikle portal dolaşımın ve safra-pankreas kanallarının oluşturduğu anatomik ilişkileri anlamayı kolaylaştırır (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Embriyolojik gelişim, erişkin anatomisindeki yerleşimi ve varyasyonları açıklayan bir başlangıç noktasıdır. Karaciğer, safra

[1] Dr., Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Anatomi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0003-3435-386X

[2] Öğr. Gör. Dr., Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Anatomi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-5509-8533

yolları ve pankreasın epitel bileşenleri ön bağırsak endodermiyle ilişkiliyken dalak dorsal mezogastriumdaki mezenşimden gelişir. Bu bölümde her organın gelişimi, makroskopik yapısı, damar ve sinir ilişkileri ile temel mikroanatomisi birlikte ele alınmaktadır. Klinik bağlantılar, bu bilgilerin muayene, görüntüleme ve cerrahi anatomi açısından taşıdığı önemi göstermek amacıyla sunulmaktadır (Standring, 2008).

Karaciğer

Karaciğerin embriyolojik gelişimi

Karaciğerin gelişimi, embriyonik dönemin dördüncü haftasında ön bağırsağın kaudal bölgesinin ventral duvarında belirginleşen hepatik divertikül ile başlar. Bu endodermal çıkıntı septum transversumun mezenşimine doğru büyür. Hepatik divertikülün kranial bölümü karaciğer parankiminin ve ilgili safra kanallarının gelişimine katılırken kaudal bölüm safra kesesi ve ductus cysticus ile ilişkili taslağı oluşturur. Divertikülün bağırsakla bağlantısı ise gelişen ekstrahepatik safra yolunun temelini oluşturur (Ando, 2010; Roskams & Desmet, 2008).

Gelişen karaciğerde hepatoblastlardan hepatositler ve intrahepatik safra yollarının epitel hücreleri farklılaşır. Portal ven dalları çevresindeki epitelin oluşturduğu duktal plak, yeniden düzenlenerek intrahepatik safra kanallarına dönüşür. Bu süreçte epitel ile çevresindeki mezenşim arasındaki etkileşim önemlidir. Duktal plağın yeniden şekillenmesindeki bozukluklar, bazı doğumsal safra yolu hastalıklarının yapısal temelini oluşturur. Böylece karaciğerin gelişimi, yalnızca parankimin büyümesini değil, damarlarla ilişkili kanal sisteminin kurulmasını da içerir (Roskams & Desmet, 2008).

Karaciğer fetal dönemde önemli bir hematopoetik organdır. Doğumdan sonra bu işlev büyük ölçüde kemik iliğine aktarılır. Fetal

dolaşımın erişkin anatomisinde bıraktığı izler de önemlidir: sol umbilikal venin kapanması ligamentum teres hepatis'i, ductus venosus'un kapanması ligamentum venosum'u oluşturur. Ventral mezenterin karaciğerin büyümesiyle ayrılan bölümleri ise ligamentum falciforme hepatis ve omentum minus'un gelişimine katılır (Standring, 2008).

Karaciğer taslağının gelişimi, endoderm ile komşu mezenşimin karşılıklı etkileşimine dayanır. Deneysel embriyoloji çalışmaları, kardiyojenik mezodermden gelen FGF ve septum transversumdan gelen BMP sinyallerinin hepatik farklılaşmaya katıldığını göstermiştir. Bu bulgular organın gelişimini yalnızca bir çıkıntının büyümesi olarak değil, çevre dokularla birlikte yürüyen bir farklılaşma süreci olarak açıklar; deney hayvanlarına ait gelişim günleri insan haftalarıyla doğrudan eşleştirilmemelidir (Zorn, 2008).

Yerleşim ve dış yapı

Karaciğer (hepar), karın boşluğunun sağ üst bölümünde, diyaframın hemen altında bulunan büyük bir parankimatöz organdır. Büyük kısmı sağ hipokondriyak ve epigastrik bölgelerde yer alır; sol lobun uzanımı sol hipokondriyak bölgeye ulaşabilir. Erişkinde ağırlığı genellikle yaklaşık 1,2-1,8 kg arasındadır. Organın boyutu ve alt kenarının düzeyi; yaş, vücut yapısı, solunum evresi ve vücut pozisyonuna göre değişir. Bu nedenle yüzey anatomisindeki sınırlar kesin ve değişmez çizgiler olarak değerlendirilmemelidir (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Karaciğerin diyafragmatik yüzü (facies diaphragmatica) geniş ve dışbükeydir; üst, ön ve sağ taraflarda diyaframın biçimine uyum gösterir. Visseral yüzü (facies visceralis) ise aşağıya ve arkaya yönelir. Bu yüzde mide, duodenum, sağ böbrek, sağ böbreküstü bezi ve kolonun sağ fleksurasıyla ilişkili izler bulunur. Safra kesesi de visseral yüzdeki fossa vesicae biliaris içinde yerleşir. Ön-alt taraftaki

keskin kenar, iki ana yüz arasındaki belirgin sınırı oluşturur (Standring, 2008).

Visseral yüzdeki oluklar ve porta hepatis birlikte H harfine benzeyen bir düzen oluşturur. Sol tarafta ligamentum teres hepatis ve ligamentum venosum'un yerleştiği yarıklar; sağ tarafta safra kesesi çukuru ve vena cava inferior oluğu bulunur. H'nin enine parçasına karşılık gelen porta hepatis, portal ven ve hepatik arter dallarının giriş, hepatik kanalların ise çıkış bölgesidir. Hepatik venler bu kapıdan geçmez; karaciğerin arka-üst kısmında vena cava inferior'a açılır (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Periton ilişkileri ve bağlar

Karaciğerin büyük bölümü visseral peritonla örtülüdür. Area nuda, porta hepatis ve safra kesesinin karaciğerle temas ettiği alan gibi bölgelerde örtü kesintiye uğrar. Area nuda'da karaciğer ile diyafram arasında doğrudan bağ dokusu ilişkisi vardır. Bu özellik, karaciğerin genel olarak intraperitoneal bir organ olarak tanımlanmasıyla birlikte değerlendirilmelidir (Standring, 2008).

Ligamentum falciforme hepatis, karaciğeri karın ön duvarına ve diyaframa bağlayan çift yapraklı bir periton kıvrımıdır. Serbest alt kenarında ligamentum teres hepatis bulunur. Ligamentum coronarium hepatis'in yaprakları area nuda'yı sınırlar; yanlarda birleşerek sağ ve sol triangüler bağları oluşturur. Omentum minus, karaciğerden midenin küçük kurvaturuna ve duodenumun başlangıcına uzanır. Bunun hepatoduodenal bölümünde safra yolu sağda, a. hepatica propria solda ve v. portae hepatis arkada yer alır. Bu yerleşimin varyasyon gösterebileceği unutulmamalıdır (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Karaciğerin konumunun korunması tek bir bağa bağlı değildir. Hepatik venlerin vena cava inferior ile bağlantısı, diyafram ve çevre organlarla ilişkiler, periton bağları ve karın içi basınç birlikte katkı sağlar. Organ solunum sırasında diyaframla birlikte

hareket eder. Bu nedenle palpasyon ve görüntülemede solunum evresinin dikkate alınması gerekir (Standring, 2008).

Anatomik loblar ve işlevsel segmentasyon

Yüzey anatomisinde sağ, sol, kaudat ve kuadrat loblar tanımlanır. Diyafragmatik yüzde ligamentum falciforme, sağ ve sol anatomik lobları ayırır. Visseral yüzde porta hepatis'in önündeki alan kuadrat, arkasındaki alan kaudat lobdur. Bu dış sınırlar, karaciğerin damar ve safra yolu dağılımına dayanan işlevsel bölünmesiyle tamamen örtüşmez (Standring, 2008).

İşlevsel sağ ve sol karaciğerin ayrımı, safra kesesi çukurundan vena cava inferior'a uzanan ve orta hepatik venle ilişkili olan düzleme dayanır. Couinaud sınıflamasında karaciğer sekiz segmente ayrılır. Her segmentin portal ven, hepatik arter ve safra yolu dalları bulunur; ana hepatik venler ise çoğunlukla segmentler veya sektörler arasındaki düzlemlerde seyreder. Bu düzen, hastalıklı dokunun anatomik segment sınırları gözetilerek çıkarılabilmesine temel oluşturur (Standring, 2008).

Tablo 1. Couinaud sınıflamasında karaciğer segmentleri

Segment	İşlevsel bölge	Temel yerleşim
I	Kaudat bölüm	Kaudat lob
II	Sol lateral bölüm	Üst bölüm
III	Sol lateral bölüm	Alt bölüm
IVa / IVb	Sol medial bölüm	Üst / alt bölüm
V	Sağ anterior bölüm	Alt bölüm
VI	Sağ posterior bölüm	Alt bölüm
VII	Sağ posterior bölüm	Üst bölüm
VIII	Sağ anterior bölüm	Üst bölüm

Kaynak: Standring (2008), karaciğerin segmental anatomisinden özetlenmiştir.

Kaudat lob, segment I'e karşılık gelir ve her iki portal sistemden dal alabilir. Venöz kanının önemli bir bölümü kısa venlerle doğrudan vena cava inferior'a boşalır. Segment IV, dış görünümde sağ tarafta bulunabilen kuadrat lobu da kapsamasına rağmen işlevsel sol karaciğerin parçasıdır. Bu iki örnek, anatomik lob adları ile işlevsel segmentlerin neden ayrı değerlendirilmesi gerektiğini gösterir (Standring, 2008).

Damarlar lenfatik drenaj ve innervasyon

Karaciğerin kanlanması çift kaynaklıdır. Portal ven, sindirim sistemi ve ilişkili organlardan gelen besin maddelerince zengin kanı taşır; hepatik arter ise oksijenli arteriyel kanı getirir. Kan akımının yaklaşık dörtte üçü portal venden, dörtte biri hepatik arterden sağlanır. Bu oranlar kanın hacimsel katkısını gösterir ve oksijen katkısıyla aynı anlamı taşımaz. V. portae hepatis, genellikle pankreas boynunun arkasında v. mesenterica superior ile v. splenica'nın birleşmesiyle oluşur ve porta hepatis'te sağ ve sol dallarına ayrılır (Standring, 2008).

A. hepatica communis çoğunlukla truncus coeliacus'tan çıkar ve a. gastroduodenalis'i verdikten sonra a. hepatica propria olarak devam eder. Sağ ve sol hepatik dallar karaciğerin ilgili bölgelerine dağılır; a. cystica genellikle sağ hepatik arterden köken alır. Bununla birlikte hepatik arterlerin çıkış ve seyir varyasyonları sıktır. Örneğin sağ hepatik arter a. mesenterica superior'dan, sol hepatik arter a. gastrica sinistra'dan köken alabilir. Bu damarlar, normal damarın yerini alan ya da ona eklenen dallar olarak bulunabilir (Standring, 2008).

Sinüzoidlerden geçen kan santral venlere, ardından daha büyük toplayıcı venlere ve hepatik venlere ulaşır. Sağ, orta ve sol hepatik venler vena cava inferior'a açılır. Portal yapılar segment içine girerken hepatik venlerin farklı düzlemlerde seyretmesi, damarların

görüntülemede ayırt edilmesi ve rezeksiyon planlaması bakımından önemlidir (Standring, 2008).

Karaciğerin lenfatik drenajı yüzeysel ve derin ağlarla gerçekleşir. Lenfin önemli kısmı porta hepatis'teki hepatik lenf düğümlerine, ardından çölyak düğümlere yönelir. Hepatik venlere eşlik eden başka yollar ise diyaframın vena cava açıklığı çevresindeki ve daha yukarıdaki lenfatik yapılara ulaşır. Dolayısıyla karaciğerin lenfatik bağlantıları yalnızca karın içindeki düğümlerle sınırlı değildir (Standring, 2008).

Otonom sinirler, çölyak pleksusla ilişkili plexus hepaticus aracılığıyla karaciğere ulaşır. Sempatik lifler damar tonusu ve metabolik yanıtlarla, vagal parasempatik lifler ise organın otonom düzenlenmesiyle ilişkilidir. Kapsülün gerilmesi veya çevre peritonun etkilenmesi ağrıya yol açabilir. Diyaframın santral bölümündeki parietal peritonun irritasyonu, n. phrenicus'un duyusal bağlantıları nedeniyle sağ omuzda yansıyan ağrı oluşturabilir (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Hepatik damar varyasyonları

Hepatik arter varyasyonlarında damarın kökeni kadar normal arterin bulunup bulunmadığı da önemlidir. Normal dalın yerine geçen arter ile mevcut dala eklenen aksesuar arter aynı anatomik düzeni ifade etmez. Hiatt ve arkadaşlarının 1.000 olguluk serisinde klasik arter düzeni 757 olguda görülmüştür. Varyasyonların tanımlanması, özellikle hepatoduodenal bağ ve pankreas çevresindeki diseksiyonda dokunun hangi damar tarafından beslendiğinin anlaşılmasını sağlar (Hiatt et al., 1994).

Portal ven de her zaman tek bir sağ ve sol dala ayrılmaz. Üçlü dallanma veya sağ posterior dalın erken ayrılması gibi düzenler, segmentlere ulaşan portal akımın yolunu değiştirir. Bu nedenle damar varyasyonları yalnızca isimlendirilmemeli; hangi segmentle bağlantılı oldukları da gösterilmelidir. Kesitsel görüntüler ve üç

boyutlu rekonstrüksiyonlar bu ilişkilerin birlikte değerlendirilmesine katkı sağlar (Covey et al., 2004; Marcinkevičiūtė et al., 2026).

Mikroanatomi ve yapının işlevle ilişkisi

Karaciğer ince bir fibröz kapsülle çevrilidir. Portal alanlarda bağ dokusu, portal ven ve hepatik arter dalları ile safra kanallarına eşlik eder. Hepatositler, erişkin karaciğerinde çoğunlukla tek hücre kalınlığındaki plaklar halinde düzenlenir. Bu plaklar arasındaki sinüzoidler, portal ve arteriyel kanın bir araya geldiği özel damar kanallarıdır. Sinüzoid endoteli ile hepatositler arasındaki Disse aralığı, kan plazmasıyla hücreler arasındaki madde alışverişinin gerçekleştiği bölgedir (Standring, 2008).

Klasik karaciğer lobülünün merkezinde santral ven, çevresinde ise portal alanlar yer alır. Portal triad; portal ven dalı, hepatik arter dalı ve safra kanalı kesitlerinden oluşur. Aynı alanda lenf damarları ve sinirler de bulunabilir. Kan lobül çevresinden santral vene doğru ilerlerken safra, komşu hepatositlerin yüzeyleri arasında oluşan kanaliküllerden portal alanlardaki safra kanallarına doğru taşınır. Böylece kan ve safra akımlarının yönleri birbirinin tersidir (Standring, 2008).

Karaciğer asinüsü, dokuyu kanlanma ilişkisine göre değerlendiren işlevsel bir modeldir. Portal kan girişine en yakın bölge zon 1, santral venlere yakın bölge zon 3, aradaki bölge zon 2 olarak adlandırılır. Bu bölgesel farklılıklar oksijenlenme ve metabolik etkinlik açısından önem taşır. Portal lobül modeli ise ortak bir safra kanalına boşalan dokuyu esas alarak ekzokrin işlevi vurgular (Standring, 2008).

Hepatositlere ek olarak sinüzoidal endotel hücreleri, Kupffer hücreleri, hepatik yıldızsı hücreler ve kolanjiyositler karaciğerin yapısına katılır. Kupffer hücreleri yerleşik makrofajlardır ve sinüzoidlerden geçen materyalin uzaklaştırılmasına katkı sağlar. Disse aralığındaki yıldızsı hücreler vitamin A depolanması ve hücre

dışı matriksin düzenlenmesinde rol oynar; hasarda etkinleşmeleri fibrozisle ilişkilidir. Bu hücre grupları, karaciğerin metabolik, savunmaya yönelik ve onarıcı işlevlerinin aynı dokuda birlikte yürütülmesini sağlar (Standring, 2008).

Hücresel çeşitlilik ve bölgesel düzen

Lobülün bütün hepatositleri aynı işlevsel özellikleri taşımaz. İnsan karaciğerine ait tek hücre çalışmalarında hepatosit ve endotel hücrelerinin bölgesel gen ifade farklılıkları gösterilmiştir. Bu bulgular, klasik asinüs modelindeki zonların keskin sınırlarla ayrılmış bağımsız birimler yerine bir gradyan içinde değerlendirilmesini destekler. Hücresel haritalar, ışık mikroskobunda benzer görünen hücrelerin moleküler özelliklerinin farklı olabileceğini de ortaya koyar (Aizarani et al., 2019).

Karaciğerin immün hücreleri de tek bir topluluk oluşturmaz. İnsan dokusunda yapılan çalışmalar, intrahepatik makrofajlar arasında farklı transkripsiyonel özellikler saptamıştır. Böylece Kupffer hücresi başlığı altında verilen genel tanım, organın bütün makrofaj çeşitliliğini karşılamaz. Bu çeşitlilik sinüzoidal dolaşımın yalnızca metabolik madde alışverişine değil, kanla gelen uyaranların değerlendirilmesine de katıldığını gösterir (MacParland et al., 2018).

Klinik anatomi

Karaciğerin zengin damar ağı travma veya cerrahi girişimlerde ciddi kanama olasılığını açıklar. Hepatoduodenal bağdaki portal ven ve hepatik arterin birlikte kontrol edilmesi, karaciğere gelen kan akımını geçici olarak azaltabilir; ancak hepatik venlerden kaynaklanan kanamayı doğrudan durdurmaz. Segmental anatominin bilinmesi, damar ve safra yolu varyasyonlarının ameliyat öncesinde değerlendirilmesiyle birlikte anlam kazanır (Standring, 2008).

Portal hipertansiyonda portal ve sistemik venöz dolaşımlar arasındaki bağlantılar genişleyebilir. Özofagusun alt bölümü, rektal venöz ağlar ve paraumbilikal venler bu ilişkilerin görülebildiği alanlardır. Karaciğerin rejenerasyon kapasitesi yüksek olsa da kronik hasara eşlik eden fibrozis, normal lobüler düzeni ve kan akımını bozabilir. Bu nedenle doku miktarının artması ile normal yapının yeniden kurulması aynı durum değildir (Standring, 2008).

Safra kesesi ve safra yolları

Safra sisteminin embriyolojik gelişimi

Safra kesesi ve ductus cysticus, hepatik divertikülün kaudal bölümünden gelişir. Hepatik divertikülün bağırsakla bağlantısının uzaması ve çevre yapıların yer değiştirmesi ekstrahepatik safra yolunun erişkin seyrini biçimlendirir. Duodenumun dönüşüyle safra yolunun bağırsak duvarındaki açılma yeri de konum değiştirir. İntrahepatik yollar ise portal damarların çevresindeki duktal plağın yeniden düzenlenmesiyle gelişir. Bu iki kanal sisteminin gelişimi birbirine bağlıdır; erişkinde karaciğerden duodenuma uzanan kesintisiz bir safra yolu oluşur (Ando, 2010; Roskams & Desmet, 2008).

Safra kesesinin yerleşimi ve bölümleri

Safra kesesi (vesica biliaris), karaciğerin visseral yüzünde sağ lob ile kuadrat lob arasındaki çukurda yerleşen armut biçimli bir organdır. Genellikle 7-10 cm uzunluğundadır ve yaklaşık 30-50 mL safra depolayabilir. Boyutları doluluk durumuna göre değişir. Karaciğerle temas eden yüzü bağ dokusuyla organ yatağına tutunurken serbest yüzü çoğunlukla peritonla örtülüdür (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Fundus, corpus ve collum olmak üzere üç bölümde incelenir. Fundus, karaciğerin alt kenarını aşabilen yuvarlak uçtur ve yüzeyde sağ dokuzuncu kosta kıkırdağı çevresine karşılık gelir. Corpus, safra

kesesi çukuruna oturur; alt yüzü duodenum ve kolonun sağ fleksurasıyla ilişkilidir. Collum, kıvrılarak ductus cysticus'a devam eder. Boyun ve infundibulum bölgesinin biçimi değişkendir; Hartmann kesesi olarak adlandırılan genişleme her bireyde aynı belirginlikte bulunmaz (Standring, 2008).

İntrahepatik ve ekstrahepatik kanallar

Hepatositlerin oluşturduğu safra önce kanaliküllere, ardından Hering kanalları ve küçük interlobüler kanallara geçer. Daha büyük intrahepatik kanallar birleşerek sağ ve sol hepatik kanalları oluşturur. Bu kanallar porta hepatis çevresinde birleşip ductus hepaticus communis'i meydana getirir. Ductus cysticus'un bu kanala katılmasıyla ductus choledochus oluşur (Standring, 2008).

Ductus cysticus, safra kesesiyle ana safra yolu arasındaki bağlantıyı sağlar; safranın hem keseye girişine hem de keseden çıkışına izin verir. Mukozasındaki spiral kıvrımlar Heister kıvrımları olarak bilinir. Bunları, akımı yalnızca tek yöne yönelten gerçek kapakçıklar olarak düşünmek doğru değildir. Kanalın uzunluğu, birleşme düzeyi ve ana safra yoluna göre seyri değişebilir (Standring, 2008).

Ductus choledochus, hepatoduodenal bağ içinde aşağı ilerler; duodenumun ilk bölümünün arkasından geçer ve pankreas başıyla yakın ilişki kurar. Distal bölümü çoğunlukla pankreas dokusu içinde veya arka yüzündeki bir olukta seyreder. Genellikle ana pankreas kanalıyla birleşerek ampulla hepatopancreatica'yı oluşturur ve duodenumun inen bölümündeki papilla duodeni major'a açılır. İki kanalın ayrı açılması da mümkündür. Terminal bölgedeki düz kas düzeni, safra ve pankreas salgısının duodenuma geçişini kontrol eder (Standring, 2008).

Damarlar lenfatik drenaj ve innervasyon

Safra kesesinin başlıca arteri a. cystica'dır ve çoğunlukla sağ hepatik arterden çıkar. Damarın kökeni, sayısı ve safra yollarına göre konumu değişebilir. Venöz kan, küçük venlerle doğrudan karaciğer içindeki portal dallara veya sistik venler üzerinden portal sisteme boşalır. Safra yollarının duvarı ise hepatik, sistik ve gastroduodenal kaynaklardan gelen küçük damarların oluşturduğu ağlarla beslenir (Standring, 2008).

Lenf damarları sistik ve hepatik lenf düğümlerine, ardından çölyak düğümlere yönelir. Otonom sinir lifleri hepatik pleksus aracılığıyla gelir; sempatik ve vagal parasempatik bileşenler içerir. Visseral ağrı epigastrik bölgede hissedilebilirken komşu parietal peritonun etkilenmesi ağrının sağ üst kadranda belirginleşmesine neden olur. Diyafram peritonunun irritasyonu sağ omuza yansıyabilir (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Duvar yapısı ve safra akımının düzenlenmesi

Safra kesesi mukozası, apikal mikrovillusları bulunan tek katlı prizmatik epitelle döşelidir. Epitelin altında lamina propria yer alır; bağırsak duvarından farklı olarak belirgin bir muscularis mucosae ve submukoza tabakası bulunmaz. Düz kas demetleri düzensiz yönlerde uzanır. Dış yüz, karaciğerle temas eden bölgede adventisya, serbest bölgelerde serozayla örtülüdür. Mukoza kıvrımları dolulukla azalır; bunlar bağırsak villuslarıyla eşdeğer yapılar değildir (Standring, 2008).

Safra kesesi safra üretmez; karaciğerde üretilen safrayı depolar ve su-elektrolit emilimiyle yoğunlaştırır. Besinlerin, özellikle yağların duodenuma ulaşması kolesistokinin salınmasını uyarır. Safra kesesinin kasılması ve terminal sfinkter düzeninin gevşemesi, safranın duodenuma geçişini kolaylaştırır. Böylece kese, kanallar ve duodenum arasında işlevsel bir bütünlük kurulur (Standring, 2008).

Varyasyonlar ve klinik anatomi

Safra kesesinin kıvrımlı fundusu, farklı yerleşimi, nadiren çift olması veya yokluğu görülebilen anatomik farklılıklardır. Ductus cysticus'un kısa olması, düşük düzeyde birleşmesi veya ana hepatik kanalla uzun süre paralel seyretmesi cerrahi açıdan önemlidir. Sağ hepatik kanal ve sektörel dallardaki değişiklikler de safra yollarının yalnızca beklenen görünüm üzerinden tanımlanmasını güçleştirebilir (Standring, 2008).

Hepatosistik üçgenin sınırlarını ductus cysticus, ductus hepaticus communis ve karaciğerin alt yüzü oluşturur. Bu alan, üst sınırı sistik arter olarak tanımlanan özgün Calot üçgeniyle aynı değildir. Safra kesesi cerrahisinde güvenli anatomik tanımlama, üçgenin temizlenmesi, kesenin alt bölümünün karaciğer yatağından ayrılması ve keseye giren iki yapının görülmesini gerektiren kritik güvenlik görünümüyle desteklenir. Bu yaklaşım, kanal ve arterlerin yalnızca konumlarına bakılarak yanlış tanınması riskini azaltmayı amaçlar (Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons [SAGES], 2020).

Sistik kanalın ana hepatik kanala katıldığı yüz ve düzey, kanalın uzunluğundan bağımsız olarak değerlendirilmelidir. Kanalın medialden birleşmesi veya ana kanalla paralel seyretmesi, iki yapının kısa bir görüntüde tek kanal gibi algılanmasına neden olabilir. MR kolanjiyopankreatografi bu ilişkileri girişim öncesinde göstermeye yardımcı olur; üst üste binen kanalların farklı düzlemlerde izlenmesi anatomik yorumun önemli bir parçasıdır (Sarawagi et al., 2016).

Safra taşı yalnızca safra kesesinin anatomisini ilgilendirmez. Taşın ductus cysticus'u tıkaması kesenin boşalmasını, ductus choledochus'a geçmesi ise karaciğerden duodenuma safra akımını etkiler. Distal safra yolu ile pankreas kanalının yakın ilişkisi, aynı

bölgedeki bir tıkanıklığın pankreası da etkileyebilmesini açıklar (Standring, 2008).

Pankreas

Pankreasın embriyolojik gelişimi

Pankreas, duodenumla ilişkili dorsal ve ventral endodermal tomurcuklardan gelişir. Ventral tomurcuk safra yolu taslağına yakın yerleşir. Duodenumun dönüşü sırasında ventral tomurcuk arkaya doğru yer değiştirerek dorsal tomurcuğa yaklaşır ve gelişimin yaklaşık yedinci haftasında iki taslak birleşir. Ventral taslak pankreas başının alt-arka bölümünü ve processus uncinatus'u; dorsal taslak ise başın geri kalanını, boyun, gövde ve kuyruğu oluşturur (Standring, 2008).

Ana pankreas kanalı, ventral tomurcuğun kanalı ile dorsal kanalın gövde ve kuyruğu boşaltan bölümlerinin birleşmesiyle oluşur. Dorsal kanalın duodenuma yakın kalan bölümü aksesuar kanal olarak devam edebilir. Epitelyal taslakların dallanması, ekzokrin asinüslerin, kanal epitelinin ve endokrin hücrelerin gelişimini sağlar. İnsan embriyosu çalışmalarında PDX1, SOX9 ve NEUROG3 gibi düzenleyicilerin farklı gelişim evreleriyle ilişkisi gösterilmiştir. Ancak insan gelişimindeki zamanlama ve hücresel farklılaşma, deney hayvanlarındaki süreçle tamamen özdeş kabul edilmemelidir (Jennings et al., 2013).

Ekzokrin ve endokrin dokuların aynı epitel taslağından gelişmesi, erişkinde aynı salgı yolunu kullanacakları anlamına gelmez. Asiner ve kanal hücreleri lümenle ilişkilerini sürdürürken endokrin hücreler adacıklar halinde düzenlenir ve kapillerlerle yakın ilişki kurar. Gelişim sırasında oluşan bu ayrışma, pankreasın iki farklı salgı biçiminin morfolojik temelidir (Gittes, 2009; Pandol, 2010).

Yerleşim ve bölümler

Pankreas, midenin arkasında duodenumdan dalak hilumuna doğru enine uzanan karma işlevli bir bezdir. Erişkinde çoğunlukla 12-15 cm uzunluğundadır. Büyük bölümü sekonder retroperitoneal yerleşimlidir; kuyruk kısmı splenorenal bağ yaprakları arasında uzanır. Baş, boyun, gövde ve kuyruk olarak incelenen bölümleri arasında keskin dış sınırlar bulunmaz; bu ayrım öncelikle komşuluklara dayanır (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Pankreas başı duodenumun C biçimli kıvrımı içine yerleşir. Arka yüzü vena cava inferior ve sağ renal damarlarla ilişkilidir. Koledok, başın arka yüzündeki olukta veya parankim içinde seyreder. Başın alt kısmından uzanan processus uncinatus, üst mezenterik damarların arkasına doğru ilerler. Bu yakın ilişkiler pankreas başı hastalıklarının safra akımını, duodenum geçişini ve bölgesel damarları birlikte etkileyebilmesini açıklar (Standring, 2008).

Boyun, baş ile gövde arasındaki kısa bölümdür. Arkasında üst mezenterik ve splenik venlerin birleşmesiyle portal ven oluşur. Gövdenin ön yüzü bursa omentalis aracılığıyla mideden ayrılır; arka tarafında aorta, sol renal damarlar, sol böbreküstü bezi ve sol böbrekle ilişkiler bulunur. Splenik ven gövdenin arkasında, splenik arter ise üst kenarı boyunca seyreder. Kuyruk dalak hilumuna yaklaşır; bu nedenle dalak damarlarının diseksiyonunda pankreas kuyruğu zarar görebilir (Standring, 2008).

Pankreas kanalları

Ductus pancreaticus, kuyruktan başa doğru ilerlerken lobüllerden gelen küçük kanalları toplar. Baş bölgesinde çoğunlukla koledokla birleşerek büyük duodenal papillaya açılır. Ductus pancreaticus accessorius ise mevcut olduğunda başın bir bölümünü boşaltır ve papilla duodeni minor'a açılabilir. Ana ve aksesuar

kanalların birbirleriyle bağlantısı ve duodenal açıklıkları değişkenlik gösterir (Standring, 2008).

Kanal sistemi, pankreas salgısının taşınmasını sağlayan pasif bir boru ağı değildir. Küçük kanal hücreleri, asiner salgıya su ve bikarbonat ekler. Böylece enzimlerin bağırsak lümenine taşınması ve mide asidinin nötralizasyonuna katkı sağlanır. Kanalın daralması veya tıkanması, salgı akımını ve bez içindeki basınç ilişkilerini etkiler (Standring, 2008).

Damarlar lenfatik drenaj ve innervasyon

Pankreasın arterleri truncus coeliacus ve a. mesenterica superior sistemlerinden gelir. Baş ve duodenum arasındaki superior pankreatikoduodenal dallar gastroduodenal arterden, inferior pankreatikoduodenal dallar ise üst mezenterik arterden köken alır. Ön ve arka arkadlar bu iki sistemi birbirine bağlar. Gövde ve kuyruk başlıca splenik arterin pankreatik dallarıyla beslenir; dorsal ve büyük pankreatik arterler bu ağın önemli bileşenleridir (Standring, 2008).

Venöz kan portal sisteme boşalır. Baş bölgesinin venleri üst mezenterik veya portal venle, gövde ve kuyruğun venleri çoğunlukla splenik venle bağlantılıdır. Lenf damarları pankreas çevresindeki ve pankreatikosplenik düğümlere, ardından çölyak ve üst mezenterik düğüm gruplarına yönelir. Birden fazla lenfatik yolun bulunması, organın farklı bölgelerindeki hastalıkların yayılım ilişkilerini anlamada önemlidir (Standring, 2008).

Pankreasın otonom innervasyonu çölyak ve üst mezenterik pleksuslarla ilişkili sempatik lifler ile vagal parasempatik liflerden oluşur. Sinirler damarlar boyunca beze ulaşır ve bez içindeki küçük gangliyonlarla bağlantı kurar. Bu ağ, hem ekzokrin salgının hem de endokrin yanıtın düzenlenmesine katılır. Visseral ağrı üst karın bölgesinde hissedilebilir ve organın derin yerleşimi nedeniyle sırta yayılabilir (Standring, 2008).

Kanal epitelinin salgıya katkısı

Pankreas kanal epitelinin apikal ve bazolateral yüzlerinde bulunan taşıma sistemleri, su ve bikarbonat salgısını birlikte düzenler. Apikal CFTR ve klorür–bikarbonat değişimi bu süreçte önemlidir. Kanal hücresinin polaritesi, salgının interstisyuma değil lümene yönelmesini sağlar. Bu nedenle kanal duvarı, enzimleri duodenuma ileten yapının yanı sıra salgının hacmini ve iyon bileşimini belirleyen işlevsel bir epiteldir (Lee et al., 2012).

Ekzokrin yapı

Pankreasın büyük bölümünü seröz asinüsler oluşturur. Asiner hücrelerin bazal kısmındaki granüllü endoplazmik retikulum protein senteziyle, apikal zimojen granülleri ise salgı ürünlerinin depolanmasıyla ilişkilidir. Asinüs lümeninde görülen sentroasiner hücreler küçük kanal sisteminin başlangıcını oluşturur. Pankreasta tükürük bezlerindeki gibi çizgili kanallar bulunmaz; salgı interkale ve daha büyük kanallar aracılığıyla ana kanal sistemine taşınır (Standring, 2008).

Ekzokrin salgı protein, yağ ve karbonhidrat sindiriminde görev alan enzimleri içerir. Proteolitik enzimlerin önemli bölümü inaktif öncüller halinde salgılanır. Bu düzen, enzimlerin bez dokusuna zarar vermesini sınırlar. Asiner yapının kanal sistemiyle birlikte değerlendirilmesi, pankreasın neden hem enzim üreten hem de sıvı-bikarbonat salgısını düzenleyen bir organ olduğunu açıklar (Pandol, 2010; Standring, 2008).

Endokrin yapı ve hücresel çeşitlilik

Endokrin pankreas, ekzokrin doku içine dağılmış Langerhans adacıklarından oluşur. Adacıklar zengin kapiller ağlarıyla hormonlarını doğrudan kana verir. Başlıca hücreler insülin salgılayan beta, glukagon salgılayan alfa, somatostatin salgılayan delta ve pankreatik polipeptit salgılayan PP hücreleridir. Hücrelerin

oranı ve adacıkların büyüklüğü, dağılımı ve biçimi değişkenlik gösterebilir (Standring, 2008).

İnsan adacıklarının düzeni, beta hücrelerinin merkezde ve diğer hücrelerin çevrede bulunduğu tek bir şemayla açıklanamaz. İnsan dokusuna dayalı çalışmalarda alfa, beta ve delta hücrelerinin adacık içinde birbirleriyle karışık yerleşebildiği ve farklı hücre gruplarının kapillerlerle yakın ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bu yapı, hücreler arasındaki parakrin iletişimin anatomik zeminini oluşturur. Dolayısıyla hayvan modellerinden elde edilen adacık şemaları insan pankreasına doğrudan aktarılmamalıdır (Cabrera et al., 2006).

Hücresel çeşitlilik, alfa ve beta hücrelerinin oranından daha geniş bir kavramdır. Tek hücre transkriptom çalışmaları endokrin, asiner, kanal, stromal ve damar hücrelerini farklı moleküler profillerle ayırt etmiş; aynı hücre sınıfı içinde de çeşitlilik göstermiştir. İnsan pankreasında REG3A ifade eden bir asiner alt grup tanımlanmıştır. Bununla birlikte moleküler kümeler, doku içindeki konumu ayrıca gösterilmeden yeni ve kesin anatomik birimler olarak kabul edilmemelidir (Baron et al., 2016; Muraro et al., 2016).

Ekzokrin ve endokrin bileşenler ayrı salgı yollarına sahip olmakla birlikte aynı damar, sinir ve bağ dokusu ortamını paylaşır. Asiner salgı kanallarla duodenuma taşınırken adacık hormonları dolaşıma katılır. Organın ikili işlevi, farklı hücre gruplarının aynı parankim içinde bir arada bulunmasına dayanır (Standring, 2008).

Gelişimsel varyasyonlar ve klinik anatomi

Pancreas divisum, dorsal ve ventral kanal sistemlerinin birleşmemesi veya yetersiz birleşmesiyle ilişkilidir. Bu durumda bezin büyük bölümünün salgısı dorsal kanal üzerinden küçük duodenal papillaya yönelir. Anüler pankreasta pankreas dokusu duodenumun çevresini kısmen veya tamamen sarar ve daralmaya yol açabilir. Ektopik pankreas dokusu ise ana organla doğrudan

anatomik bağlantısı olmadan, örneğin mide veya duodenum duvarında bulunabilir. Bu varyasyonların klinik etkisi aynı değildir; varlıkları her zaman belirti oluşturdukları anlamına gelmez (Standring, 2008).

Pankreas başındaki bir kitle, koledokla yakınlığı nedeniyle safra akımını bozabilir. Kuyruk bölgesindeki lezyonlarda bu ilişki bulunmadığından klinik görünüm farklı olabilir. Portal ven, üst mezenterik damarlar ve splenik damarlarla olan komşuluklar, cerrahi değerlendirmede belirleyicidir. Dalak hilumuna yakın küçük bir nodülün aksesuar dalak olabileceğinin bilinmesi de pankreas kuyruğundaki bir kitlenin yorumlanmasında önem taşır (Standring, 2008; Buijtendijk et al., 2023).

Dalak

Dalağın embriyolojik gelişimi

Dalak, diğer üç organın epitel taslaklarından farklı olarak dorsal mezogastriumdaki mezenşimden gelişir. İnsan embriyosunda taslak yaklaşık beşinci hafta çevresinde belirginleşir. Midenin dönmesi ve dorsal mezogastriumun büyümesi, dalağın sol üst karın bölgesindeki yerleşimini ve çevresindeki periton bağlantılarını şekillendirir. Bu gelişimsel ilişkiler, erişkinde mide ile dalak arasındaki gastrosplenik bağın ve dalak ile arka karın duvarı arasındaki splenorenal bağın anatomisini açıklamaya yardımcı olur (Standring, 2008; Buijtendijk et al., 2023).

Dalağın yüzey çentiklerini yalnızca kaynaşmamış embriyonik lobların kalıntıları olarak açıklayan yaklaşım dikkatle değerlendirilmelidir. İnsan embriyolarını, fetüsleri ve erişkinleri karşılaştıran bir çalışma, çok odaklı veya lobüle bir başlangıç için kanıt bulmamış; yüzey biçiminin gelişim evreleri boyunca değişken olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, yerleşik açıklamanın yeniden değerlendirilmesini gerektirir; ancak tek bir çalışmayı bütün

varyasyonların kesin gelişim mekanizması olarak sunmak da uygun değildir (Buijtendijk et al., 2023).

Yerleşim dış yapı ve komşuluklar

Dalak (splen), sol hipokondriyak bölgede mide fundusu ile diyafram arasında yer alır. Uzun ekseni yaklaşık onuncu kaburgaya paraleldir ve genellikle dokuzuncu-on birinci kaburgaların derininde bulunur. Erişkinde yaklaşık 12 cm uzunluğunda ve ortalama 150 g ağırlığındadır; boyut ve ağırlık geniş bireysel değişkenlik gösterir. Normal büyüklükteki dalak çoğunlukla kostal yayın altında kaldığı için palpasyonda hissedilmez (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Diyafragmatik yüzü düzgün ve dışbükeydir. Diyafram, bu yüzü sol akciğerin alt bölümü, plevra ve kaburgalardan ayırır. Visseral yüzde mide, sol böbrek, kolonun sol fleksurası ve pankreas kuyruğuyla ilişkili alanlar bulunur. Hilum splenicum, splenik damarların geçtiği bölgedir. Üst kenardaki çentikler ve organın genel biçimi değişebilir; yüzey farklılıkları tek başına hastalık göstergesi değildir (Standring, 2008; Buijtendijk et al., 2023).

Periton ilişkileri ve bağlar

Dalak hilum bölgesi dışında büyük ölçüde peritonla örtülüdür. Ligamentum gastrosplenicum, mide büyük kurvaturu ile dalak arasında uzanır; kısa gastrik damarları ve sol gastro-omental damarları taşır. Ligamentum splenorenale ise dalağı sol böbrek önündeki arka karın duvarıyla ilişkilendirir. Splenik damarlar ve pankreas kuyruğu bu bağın yaprakları arasında bulunur (Standring, 2008).

Ligamentum phrenicocolicum, doğrudan dalağa tutunmasa da kolonun sol fleksurası üzerinde oluşturduğu destekle dalağın alt kutbuyla ilişkili bir zemin sağlar. Bağların ve çevre dokuların gelişimi veya gevşekliği, organın hareketliliğini etkileyebilir.

Dalağın anatomisi bu nedenle yalnızca kendi yüzleriyle değil, mide, kolon, böbrek ve pankreasla oluşturduğu bağlantılarla birlikte değerlendirilmelidir (Standring, 2008).

Damarlar lenfatik drenaj ve innervasyon

A. splenica, truncus coeliacus'un önemli bir dalıdır. Pankreasın üst kenarı boyunca kıvrımlı bir seyir izler ve hiluma yaklaşırken terminal dallara ayrılır. Bu dalların dağılımı dalakta segmental bir damar düzeni oluşturur. Segmentler arasındaki arteriyel bağlantıların sınırlı olması, damar tıkanıklığında bölgesel infarkt gelişebilmesini açıklar. Terminal dalların sayısı ve hiluma göre yerleşimi bireyler arasında farklılık gösterir (Standring, 2008).

V. splenica, hilumdan çıkan venlerin birleşmesiyle oluşur ve pankreasın arkasında sağa doğru ilerler. Pankreas boynunun arkasında üst mezenterik venle birleşerek portal veni oluşturur. Böylece dalak ve pankreasın venöz kanı karaciğerle doğrudan bağlantılı bir sisteme katılır. Hilumdaki venler ile pankreas kuyruğunun yakınlığı, dalağa yönelik girişimlerde önemlidir (Standring, 2008).

Lenf damarları hilumdan çıkarak splenik damarlarla birlikte pankreatikosplenik ve çölyak lenf düğümlerine yönelir. Lenf düğümlerinden farklı olarak dalağın parankimine lenf taşıyan afferent lenfatik damarlar yoktur; bağışıklık gözetimi büyük ölçüde kanla gelen antijenler üzerinden gerçekleşir. Sinir lifleri splenik pleksus aracılığıyla ve arter çevresinde organa ulaşır. Başlıca sempatik lifler damar tonusuyla ilişkilidir (Standring, 2008).

Kırmızı pulpa beyaz pulpa ve mikrodolaşım

Dalak bağ dokusundan oluşan bir kapsülle çevrilidir. Kapsülden içeri uzanan trabeküller damar ve sinirlere eşlik eder. Parankim beyaz ve kırmızı pulpa olarak düzenlenir. Beyaz pulpada santral arteriyolleri çevreleyen periarteriyoler lenfoid kılıflar T

lenfositlerden zengindir; lenfoid folliküller ise ağırlıklı olarak B lenfositlerini içerir. Antijenik uyarıyla germinal merkezler gelişebilir (Standring, 2008).

Kırmızı pulpa, splenik kordonlar ve venöz sinüslerden oluşur. Kordonlarda retiküler ağ, kan hücreleri ve makrofajlar bulunur. Sinüslerin uzunlamasına uzanan endotel hücreleri arasındaki dar aralıklardan geçiş, eritrositlerin esnekliğini ve yapısal bütünlüğünü sınayan bir düzen oluşturur. Yaşlanmış veya hasarlanmış eritrositlerin uzaklaştırılması ve içerdikleri demirin yeniden kullanıma kazandırılması bu ortamla ilişkilidir (Standring, 2008).

Splenik mikrodolaşımda kanın önemli bir bölümü terminal kapillerlerden kordonların retiküler ortamına çıkar; ardından sinüs duvarındaki aralıklardan venöz dolaşıma döner. Açık dolaşım olarak adlandırılan bu düzen, kanın süzülmesine olanak verir. Beyaz ve kırmızı pulpa arasındaki geçiş bölgesi ise kanla taşınan antijenlerin bağışıklık hücreleriyle karşılaşmasına katkı sağlar. Böylece dalağın kanı süzme ve bağışıklık işlevleri birbirini tamamlar (Standring, 2008).

İnsan dalağına özgü mikroanatomi

İnsan dalağındaki follikül çevresi düzen, kemirgenlerdeki belirgin marjinal zonla bütünüyle örtüşmez. İnsan folliküllerinde germinal merkez, manto ve yüzeyel bölge ayırt edilebilir; kırmızı pulpada kılıflı kapillerler de bulunur. Bu nedenle deney hayvanlarına ait şemalar insan histolojisi için doğrudan kullanılmamalıdır (Steiniger, 2015).

Üç boyutlu insan dalak modellerinde kapillerlerin açık uçları gösterilmiş, kapillerlerle sinüs veya venüller arasında doğrudan bağlantı saptanmamıştır. Bu çalışma tamamen açık mikrodolaşım görüşünü desteklemektedir. Kanın retiküler dokuya çıkması,

makrofajlarla temasın ve eritrositlerin süzülmesinin yapısal temelini oluşturur (Steiniger et al., 2022).

Varyasyonlar ve klinik anatomi

Aksesuar dalak, ana dalaktan ayrı bulunan splenik doku odağıdır. Dalak hilumu çevresinde, gastrosplenik bağda veya pankreas kuyruğuna yakın alanlarda görülebilir. Görüntülemede lenf düğümü veya pankreas kitlesiyle karışabilmesi nedeniyle tanınması önemlidir. Doğumsal aksesuar dalak ile travma ya da cerrahi sonrasında splenik dokunun başka bölgelere yerleşmesiyle oluşan splenozis aynı durum değildir (Standring, 2008; Buijtendijk et al., 2023).

Dalak damarlarından zengin ve kırılgan bir organdır. Kaburgaların sağladığı korumaya rağmen travmada yaralanabilir ve belirgin kanamaya neden olabilir. Sol diyafram peritonunun irritasyonu sol omuzda yansıyan ağrı oluşturabilir. Splenektomi sırasında hilum damarları kadar pankreas kuyruğunun konumu da gözetilmelidir (Arıncı & Elhan, 2014; Standring, 2008).

Dalak dokusunun kaybı yalnızca kanın süzülmesini değil, kanla taşınan antijenlere verilen bağışıklık yanıtını da etkiler. Özellikle kapsüllü bakterilere karşı savunmadaki rolü, organın mümkün olduğunda korunmasının anatomik ve işlevsel önemini ortaya koyar. Karaciğer, safra yolları ve pankreasla birlikte değerlendirildiğinde dalak, üst karın bölgesindeki damar ve bağ dokusu ilişkilerinin yanı sıra bu bölgenin bağışıklık işlevini de tamamlar (Standring, 2008).

Kaynakça

Aizarani, N., Saviano, A., Sagar, Mailly, L., Durand, S., Herman, J. S., Pessaux, P., Baumert, T. F., & Grün, D. (2019). A human liver cell atlas reveals heterogeneity and epithelial progenitors. *Nature, 572*(7768), 199–204. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1373-2

Ando, H. (2010). Embryology of the biliary tract. *Digestive Surgery, 27*(2), 87–89. https://doi.org/10.1159/000286463

Arıncı, K., & Elhan, A. (2014). *Anatomi*. Güneş Tıp Kitabevleri.

Baron, M., Veres, A., Wolock, S. L., Faust, A. L., Gaujoux, R., Vetere, A., Ryu, J. H., Wagner, B. K., Shen-Orr, S. S., Klein, A. M., Melton, D. A., & Yanai, I. (2016). A single-cell transcriptomic map of the human and mouse pancreas reveals inter- and intra-cell population structure. *Cell Systems, 3*(4), 346–360.e4. https://doi.org/10.1016/j.cels.2016.08.011

Buijtendijk, M. F. J., Peters, J. J., Visser, S. C., van Tongeren, F. H. J. M., Dawood, Y., Lobé, N. H. J., van den Hoff, M. J. B., Oostra, R.-J., & de Bakker, B. S. (2023). Morphological variations of the human spleen: No evidence for a multifocal or lobulated developmental origin. *The British Journal of Radiology, 96*(1145), Article 20220744. https://doi.org/10.1259/bjr.20220744

Cabrera, O., Berman, D. M., Kenyon, N. S., Ricordi, C., Berggren, P.-O., & Caicedo, A. (2006). The unique cytoarchitecture of human pancreatic islets has implications for islet cell function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103*(7), 2334–2339. https://doi.org/10.1073/pnas.0510790103

Covey, A. M., Brody, L. A., Getrajdman, G. I., Sofocleous, C. T., & Brown, K. T. (2004). Incidence, patterns, and clinical relevance of variant portal vein anatomy. *American Journal of Roentgenology, 183*(4), 1055–1064. https://doi.org/10.2214/ajr.183.4.1831055

Gittes, G. K. (2009). Developmental biology of the pancreas: A comprehensive review. *Developmental Biology, 326*(1), 4–35. https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2008.10.024

Hiatt, J. R., Gabbay, J., & Busuttil, R. W. (1994). Surgical anatomy of the hepatic arteries in 1000 cases. *Annals of Surgery, 220*(1), 50–52. https://doi.org/10.1097/00000658-199407000-00008

Jennings, R. E., Berry, A. A., Kirkwood-Wilson, R., Roberts, N. A., Hearn, T., Salisbury, R. J., Blaylock, J., Hanley, K. P., & Hanley, N. A. (2013). Development of the human pancreas from foregut to endocrine commitment. *Diabetes, 62*(10), 3514–3522. https://doi.org/10.2337/db12-1479

Lee, M. G., Ohana, E., Park, H. W., Yang, D., & Muallem, S. (2012). Molecular mechanism of pancreatic and salivary gland fluid and HCO3− secretion. *Physiological Reviews, 92*(1), 39–74. https://doi.org/10.1152/physrev.00011.2011

MacParland, S. A., Liu, J. C., Ma, X.-Z., Innes, B. T., Bartczak, A. M., Gage, B. K., Manuel, J., Khuu, N., Echeverri, J., Linares, I., Gupta, R., Cheng, M. L., Liu, L. Y., Camat, D., Chung, S. W., Seliga, R. K., Shao, Z., Lee, E., Ogawa, S., … McGilvray, I. D. (2018). Single cell RNA sequencing of human liver reveals distinct intrahepatic macrophage populations. *Nature Communications, 9*, Article 4383. https://doi.org/10.1038/s41467-018-06318-7

Marcinkevičiūtė, K., Šilinskaitė, U., Lukšaitė-Lukštė, R., & Kvietkauskas, M. (2026). Radiology for surgeons: Liver anatomy. *Frontiers in Surgery, 13*, Article 1743615. https://doi.org/10.3389/fsurg.2026.1743615

Muraro, M. J., Dharmadhikari, G., Grün, D., Groen, N., Dielen, T., Jansen, E., van Gurp, L., Engelse, M. A., Carlotti, F., de Koning, E. J. P., & van Oudenaarden, A. (2016). A single-cell transcriptome atlas of the human pancreas. *Cell Systems, 3*(4), 385–394.e3. https://doi.org/10.1016/j.cels.2016.09.002

Pandol, S. J. (2010). *The exocrine pancreas*. Morgan & Claypool Life Sciences. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK54128/

Roskams, T., & Desmet, V. (2008). Embryology of extra- and intrahepatic bile ducts, the ductal plate. *The Anatomical Record, 291*(6), 628–635. https://doi.org/10.1002/ar.20710

Sarawagi, R., Sundar, S., Gupta, S. K., & Raghuwanshi, S. (2016). Anatomical variations of cystic ducts in magnetic resonance cholangiopancreatography and clinical implications. *Radiology Research and Practice, 2016*, Article 3021484. https://doi.org/10.1155/2016/3021484

Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons (2020). *Safe cholecystectomy multi-society practice guideline and state of the art consensus conference on prevention of bile duct injury during cholecystectomy*. https://www.sages.org/publications/guidelines/safe-cholecystectomy-multi-society-practice-guideline/

Standring, S. (Ed.) (2008). *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice* (40th ed.). Churchill Livingstone Elsevier.

Steiniger, B. S. (2015). Human spleen microanatomy: Why mice do not suffice. *Immunology, 145*(3), 334–346. https://doi.org/10.1111/imm.12469

Steiniger, B. S., Pfeffer, H., Gaffling, S., & Lobachev, O. (2022). The human splenic microcirculation is entirely open as shown by 3D models in virtual reality. *Scientific Reports, 12*, Article 16487. https://doi.org/10.1038/s41598-022-19885-z

Zorn, A. M. (2008). Liver development. In *StemBook*. Harvard Stem Cell Institute. https://doi.org/10.3824/stembook.1.25.1

BÖLÜM 8

ANATOMICAL FOUNDATIONS AND CLINICAL LOCALIZATION OF CROSSED BRAINSTEM SYNDROMES

DAMLA ŞAHİN[1]

Introduction

The brainstem is the most anatomically and functionally dense region of the central nervous system (CNS), and the most critical from a clinical perspective (Arıncı & Elhan, 2014). Although it accounts for only approximately 2.6% of total brain weight, structures supporting vital functions coexist within this limited volume (Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018). All descending and ascending pathways connecting the cerebral cortex with the medulla spinalis must traverse the brainstem (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). In addition to this gateway function, the brainstem houses the cranial nerve nuclei, vital autonomic reflex control centers (respiration, cardiovascular regulation, and swallowing), and the reticular activating system that maintains consciousness (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Splittgerber, 2019). Consequently, millimetric parenchymal damage in the

[1] Lecturer, Dr., Bandırma Onyedi Eylül University,Department of Anatomy, Orcid: 0000-0003-4031-8315

brainstem can produce dramatic, multisystem, life-threatening neurological presentations compared with much larger lesions in the cerebral hemispheres (Arıncı & Elhan, 2014).

The millimetric proximity of these structures within the brainstem parenchyma produces a highly characteristic clinical presentation following unilateral focal damage, such as vascular occlusions, tumors, or demyelinating plaques: crossed (alternating) brainstem syndromes (Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018).

This chapter examines the anatomical foundations of crossed brainstem syndromes and their application to clinical localization. It follows the organization of cranial nerve nuclei, the course and decussation of major pathways, and the relationship between ipsilateral cranial nerve findings and contralateral body deficits. The aim is to connect bedside findings with the rostrocaudal level and medial-lateral position of a lesion before considering individual named syndromes.

General Anatomical and Functional Organization of the Brainstem

Along its vertical axis, the brainstem consists of three main segments: the mesencephalon, pons, and medulla oblongata (bulbus) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). As emphasized in Splittgerber's Clinical Neuroanatomy, the pons is approximately 2.5 cm long (Splittgerber, 2019). As Hasan Ozan states in Ozan Anatomi, the medulla oblongata (bulbus) accounts for only 0.5% of CNS weight, the pons for 1.3%, and the mesencephalon for a much smaller proportion (Ozan, 2014). Despite this small mass, the subarachnoid cisterns surrounding the brainstem (particularly the cisterna interpeduncularis, prepontine cistern, cisterna pontocerebellaris, and posterior (magna) and lateral cerebellomedullary cisterns), together with the course of the cranial nerves passing through them, provide

vital anatomical landmarks for identifying clinical compression caused by intracranial masses or vascular dilatations (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018). Throughout these segments, the following four functional groups exhibit extremely close anatomical relationships within a narrow parenchymal area (Moore et al., 2018; Haines & Mihailoff, 2018):

Cranial Nerve Nuclei and Fibers: The nuclei of cranial nerves III through XII and the intra-axial fibers originating from them (Arıncı & Elhan, 2014).

Ascending and Descending Pathways: The tractus corticospinalis lateralis and anterior and fibrae corticonucleares, which provide skeletal muscle motor control; the lemniscus medialis system, which carries deep sensation (proprioception, vibration, and discriminative touch); and the anterolateral system (ALS), which transmits pain, temperature, and crude touch (Arıncı & Elhan, 2014; Splittgerber, 2019).

Cerebellar Connections: The pedunculus cerebellaris superior, medius, and inferior, which connect the brainstem with the cerebellum, and their associated nuclei (e.g., the nucleus ruber, inferior olivary complex, and pontine nuclei) (Arıncı & Elhan, 2014).

Autonomic and Reticular Structures: The reticular formation nuclei containing the cardiovascular and respiratory centers, the ascending reticular activating system (ARAS) regulating consciousness, and the sympathetic pathways descending from the hypothalamus to the spinal cord (hypothalamospinal fibers) (Arıncı & Elhan, 2014; Splittgerber, 2019; Moore et al., 2018).

General Vascular Organization

All brainstem segments (mesencephalon, pons, and medulla oblongata) receive their blood supply from the **vertebrobasilar**

arterial system, which constitutes the posterior circulation (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018; Salerno et al., 2022) (Table 1). Understanding the brainstem's perfusion pattern is fundamental to understanding, pathophysiologically, why crossed syndromes present with specific clinical patterns and sharply defined boundaries (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). At all three brainstem levels, vascular distribution is generally divided into two main groups: medial (paramedian) perforating branches and lateral (short and long circumferential) branches (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022; Haines & Mihailoff, 2018).

Table 1. Brainstem levels and their general vascular supply.

Brainstem level	**Vascular territory**	**Principal arterial supply**
Mesencephalon (midbrain)	Paramedian	Posterior cerebral artery (PCA), P1 segment, and posterior communicating artery penetrating branches
Mesencephalon (midbrain)	Lateral/dorsal	Superior cerebellar artery (SCA) and quadrigeminal branches
Pons	Paramedian	Basilar artery paramedian perforating branches
Pons	Lateral	Basilar artery short and long circumferential branches and anterior inferior cerebellar artery (AICA)
Medulla oblongata (bulbus)	Paramedian	Anterior spinal artery (ASA) and vertebral artery branches
Medulla oblongata (bulbus)	Lateral	Posterior inferior cerebellar artery (PICA) and lateral vertebral artery branches
Medulla oblongata (bulbus)	Dorsal (caudal)	Posterior spinal artery (PSA)

Rostrocaudal Organization of Cranial Nerve Nuclei

Understanding exactly which syndrome develops in a brainstem lesion and its location along the vertical and horizontal axes requires thorough anatomical knowledge of the brainstem's internal morphology and the course of its pathways (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Shepherd & Hoch, 2022). The first and most important step in understanding this anatomical foundation is to grasp the rostrocaudal arrangement and functional columns of the cranial nerve nuclei(Arıncı & Elhan, 2014).

Functional Nuclear Columns and Rostrocaudal Distribution

The cranial nerve nuclei are not randomly distributed throughout the brainstem; they follow the vertical extensions of the embryological columns established during development (somatic motor, pharyngeal/branchial motor, parasympathetic efferent, general sensory, special sensory, and visceral sensory) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). The three vertical levels of the brainstem (mesencephalon, pons, and medulla oblongata) house their own characteristic groups of cranial nerve nuclei (Arıncı & Elhan, 2014; Haines, 2012; Moore et al., 2018).

Identifying the affected cranial nerve provides the most sensitive clinical landmark for determining the vertical (rostrocaudal) level of the lesion (Arıncı & Elhan, 2014) (Table 2).

Table 2. Rostrocaudal distribution of cranial nerves in the brainstem.

Brainstem level	**Cranial nerve**	**Principal function**
Mesencephalon (midbrain)	CN III (N. oculomotorius)	Extraocular motor and parasympathetic functions
Mesencephalon (midbrain)	CN IV (N. trochlearis)	Motor innervation of M. obliquus superior
Pons	CN V (N. trigeminus)	Mastication and facial sensation

Brainstem level	Cranial nerve	Principal function
Pons	CN VI (N. abducens)	Motor innervation of M. rectus lateralis
Pons	CN VII (N. facialis)	Facial expression, tears, saliva, and taste
Pons	CN VIII (N. vestibulocochlearis)	Balance and hearing
Medulla oblongata (bulbus)	CN IX (N. glossopharyngeus)	Swallowing, parotid secretion, and taste
Medulla oblongata (bulbus)	CN X (N. vagus)	Laryngeal/pharyngeal motor and parasympathetic functions
Medulla oblongata (bulbus)*	CN XI (N. accessorius)*	Motor innervation of M. trapezius and M. sternocleidomastoideus
Medulla oblongata (bulbus)	CN XII (N. hypoglossus)	Motor innervation of tongue muscles

** In current publications, the motor nucleus of CN XI (spinal accessory nucleus) is located in the upper cervical spinal cord (Haines & Mihailoff, 2018; Ozan, 2014; Splittgerber, 2019). It receives no fiber contribution from the medulla; however, because it exits the skull through the foramen jugulare together with the bulbar nerves (CN IX and X), and its clinical syndromes are directly associated with bulbar pathologies, it is practically classified in this group (Splittgerber, 2019).*

Mesencephalon (Midbrain) Nuclei

The levelsof mesencephalon contains the somatic motor column nuclei controlling eye movements and the autonomic centers governing pupillary reflexes (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014):

N. Oculomotorius (CN III) Nuclear Complex: Located near the midline within the periaqueductal gray matter ventral to the aqueductus mesencephali (cerebri), in the rostral mesencephalic

tegmentum (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Splittgerber, 2019). This complex consists of two main components:

Nucleus nervi oculomotorii (Somatic Motor / GSE): Sends somatic motor fibers innervating the m. rectus superior, m. rectus inferior, m. rectus medialis, m. obliquus inferior, and m. levator palpebrae superioris (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

Nucleus accessorius nervi oculomotorii /Edinger-Westphal Nucleus (General Visceral Efferent / GVE - Parasympathetic): The source of preganglionic parasympathetic fibers providing pupillary constriction (miosis) and lens accommodation (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018). These fibers travel within the oculomotor nerve and synapse in the ganglion ciliare in the orbit (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018).

Clinical Anatomical Information: After the root fibers of the n. oculomotorius emerge from the ventral mesencephalon into the cisterna interpeduncularis, they pass between the a. cerebri posterior and a. superior cerebelli (SCA) (vascular fork) (Moore et al., 2018). Aneurysms in these arteries, particularly at the a. basilaris bifurcation or in the a. communicans posterior, directly compress the nerve fibers, causing ipsilateral eye movement palsy and abnormalities of miosis/mydriasis (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Ozan, 2014).

N. Trochlearis (CN IV) Nucleus: The nucleus nervi trochlearis is a small, ovoid general somatic efferent (GSE) nucleus located in the caudal mesencephalic tegmentum at the level of the colliculus inferior, immediately dorsal to the fasciculus longitudinalis medialis (MLF) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). This nucleus: Belongs to the only cranial nerve whose fibers leave the brainstem through the **dorsal (posterior) surface** (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Moore et al., 2018).

Immediately before leaving the brainstem, fibers emerging from the nucleus exit by **crossing to the opposite side** within the velum medullare superior (decussatio nervorum trochlearium) a*nd innervate the contra*lateral m. obliquus superior (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018). Consequently, an intraparenchymal n. trochlearis lesion causes contralateral eye movement impairment, whereas a peripheral nerve lesion causes ipsilateral impairment (inability to direct the eye inward and downward) (Moore et al., 2018).

Pontine Nuclei

The pons houses key nuclei responsible for facial sensory and motor control and horizontal eye movements (Arıncı & Elhan, 2014):

N. Trigeminus (CN V) Nuclear Complex: The trigeminal system, which has the most extensive nuclear column among the cranial nerves, is represented in the pons by two important nuclei (Arıncı & Elhan, 2014):

*Nucleus motorius nervi trigemini (Special Visceral Efferent / SVE): L*ocated deep in the midpontine tegmentum, it sends motor fibers innervating the muscles of mastication derived from the first pharyngeal arch (m. masseter, m. temporalis, and m. pterygoideus medialis and lateralis)(Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

*Nucleus principalis nervi trigemini (General Somatic Afferent / GSA): Loc*ated immediately dorsolateral to the motor nucleus (Splittgerber, 2019). It receives fine, discriminative touch and pressure sensations from the face (the functional analogue of the dorsal column nuclei in the posterior horn of the spinal cord) (Splittgerber, 2019). (Note: The nucleus mesencephalicus nervi trigemini, which receives proprioceptive sensation within the trigeminal system, extends into the mesencephalon (Arıncı & Elhan, 2014; Splittgerber, 2019), whereas the nucleus spinalis nervi

trigemini, which receives pain and temperature sensation, extends as a caudal column into the medulla oblongata and upper cervical spinal cord (Arıncı & Elhan, 2014; Splittgerber, 2019; Moore et al., 2018).) As Snell notes, the substantia gelatinosa layer in the posterior gray horn of the spinal cord shows uninterrupted anatomical continuity with the inferior end of the nucleus spinalis nervi trigemini in the medulla above (Splittgerber, 2019).

N. Abducens (CN VI) Nucleus: The nucleus nervi abducentis is a GSE nucleus located near the midline in the caudal pontine tegmentum, immediately beneath the floor of the fourth ventricle (fossa rhomboidea) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Snell, 2019). Motor fibers emerging from this nucleus traverse the pontine parenchyma ventrally, exit at the pontomedullary junction, and innervate the m. rectus lateralis, which abducts the eye (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

N. Facialis (CN VII) Nucleus: The nucleus nervi facialis is an SVE nucleus located in the ventrolateral tegmentum of the caudal pons (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018).It innervates the muscles of facial expression derived from the second pharyngeal arch (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). Fibers emerging from the nucleus follow an interesting course: they first travel dorsomedially and loop around the abducens nucleus (this loop is called the internal genu and forms the colliculus facialis prominence in the fossa rhomboidea), then turn ventrolaterally to leave the brainstem (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). In addition, parasympathetic (GVE) fibers stimulating the lacrimal and submandibular/sublingual glands originate from the nucleus salivatorius superior in this region(Arıncı & Elhan, 2014).

N. Vestibulocochlearis (CN VIII) Nuclei: Special somatic afferent (SSA) nuclei located at the most lateral aspect of the pontomedullary junction (Arıncı & Elhan, 2014):

Nuclei vestibulares (Superior and Medial in the Pons; Lateral and Inferior in the Medulla): Integration centers for maintaining balance and posture and coordinating eye movements with head movements (vestibulo-ocular reflex) (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018).

*Nuclei cochleares (Anterior and Posterior):*The first brainstem relay station of the auditory pathways destined for the auditory cortex in the lobus temporalis (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018).

Medulla Oblongata Nuclei

In addition to vital autonomic centers, the medulla contains the motor and sensory nuclei of the lower cranial nerves (CN IX-XII) (Arıncı & Elhan, 2014):

N. Glossopharyngeus (CN IX) and N. Vagus (CN X) Nuclear Groups: These two mixed nerves share common nuclear columns in the medulla (Arıncı & Elhan, 2014):

Nucleus Ambiguus (SVE): A diffusely arranged motor nucleus located deep in the ventrolateral medullary tegmentum (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). It controls swallowing and voice production (phonation) by sending motor fibers innervating the striated muscles of the pharynx and larynx (derivatives of arches III and IV) through CN IX and CN X (Arıncı & Elhan, 2014).

*Nucleus posterior nervi vagi (GVE-Parasympathetic): Lo*cated in the floor of the fourth ventricle, immediately lateral to the hypoglossal nucleus, it forms the trigonum nervi vagi prominence in the fossa rhomboidea (Arıncı & Elhan, 2014; Splittgerber, 2019). It is the primary source of preganglionic vagal parasympathetic fibers to the thoracic and abdominal organs (Arıncı & Elhan, 2014).

Nucleus Solitarius (Special/General Visceral Afferent-SVA/GVA): A long sensory column receiving taste sensation (SVA

from the CN VII chorda tympani, CN IX, and CN X) and visceral sensory inputs from the cardiovascular/respiratory systems (baroreceptor and chemoreceptor - GVA)(Arıncı & Elhan, 2014).

N. Accessorius (CN XI)-Nucleus spinalis nervi accessorii: Although known as the eleventh cranial nerve, the motor neurons innervating the trapezius and sternocleidomastoid muscles are not located directly in the medulla; they occupy the lateral motor column of the anterior gray horn in the upper cervical spinal cord (C1-C5 segments) (nucleus spinalis nervi accessorii) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). Fibers emerging here ascend vertically and enter the cranium through the foramen magnum, then join the vagal fibers at the medullary level and leave the cranium through the jugular foramen (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

N. Hypoglossus (CN XII) Nucleus: The nucleus nervi hypoglossi is a long GSE nucleus located ventromedially (immediately beside the midline) in the tegmentum of the rostral medulla (Arıncı & Elhan, 2014; Splittgerber, 2019). It forms the trigonum nervi hypoglossi prominence in the fossa rhomboidea (Arıncı & Elhan, 2014). It sends somatic motor fibers innervating all intrinsic and extrinsic muscles of the tongue (except the m. palatoglossus) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). These fibers leave the medulla ventrally as cranial nerve roots through the sulcus preolivaris between the oliva and pyramis(Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

Major Brainstem Pathways in Clinical Localization

Accurately localizing the clinical presentation and intraparenchymal position of crossed brainstem syndromes requires knowledge of the anatomical course, vertical arrangement, and decussation levels of the long motor and sensory pathways traversing the brainstem (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018). The major pathways involved in understanding crossed syndromes

and most frequently damaged in clinical practice are as follows (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018):

Tractus Corticospinalis (Pyramidal Tract)

Function: Provides conscious and voluntary motor control of skeletal muscles, particularly coordinating fine, skilled motor movements of the distal extremity muscles (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018).

Location in the Brainstem: Follows a ventral (anterior) course (Arıncı & Elhan, 2014). In the mesencephalon, it occupies the middle three-fifths of the crus cerebri (Arıncı & Elhan, 2014). In the pons, it extends as scattered longitudinal bundles between the pontine nuclei and fibrae pontocerebellares in the basis pontis (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018). In the medulla oblongata, it reconverges to form the pyramis, a thick, vertical white matter column (Arıncı & Elhan, 2014).

Decussation Level: At the boundary between the medulla oblongata and spinal cord (cervicomedullary junction), at the level of the foramen magnum, approximately 85-90% of the fibers cross to form the decussatio pyramidum (motor decussation) and descend in the spinal cord as the tractus corticospinalis lateralis (Arıncı & Elhan, 2014). The remaining 10-15% continue without crossing in the anterior column as the tractus corticospinalis anterior(Arıncı & Elhan, 2014).

Lesion Findings: Unilateral brainstem lesions above the motor decussation produce contralateral spastic hemiplegia/hemiparesis, a positive Babinski sign, increased deep tendon reflexes (hyperreflexia), and spasticity (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

Corticonuclear (Corticobulbar) Pathways

Corticonuclear (corticobulbar) fibers provide motor control to cranial nerve nuclei, including VII, IX, X, and XII (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022). Damage to these descending fibers must be distinguished from direct damage to a cranial nerve nucleus or its intra-axial root fibers.

Unilateral damage to crossed corticonuclear fibers supplying facial motor neurons that innervate the lower face produces contralateral lower facial paralysis (central facial palsy). The upper face is spared because it receives bilateral cortical innervation, and forehead creases remain normal (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Damage to the contralateral corticonuclear fibers innervating the genioglossus causes the protruded tongue to deviate toward the weak contralateral side, away from the brainstem lesion (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022). These supranuclear findings differ from the ipsilateral tongue weakness associated with direct hypoglossal nuclear or root-fiber damage.

Lemniscus Medialis (ML)

Function: Carries conscious proprioception (position and joint posture sense), vibration, and discriminative (fine/two-point) touch sensations from the trunk and extremities to the thalamus (VPL) (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018).

Location in the Brainstem: In the medulla oblongata, it is arranged along a sagittal (vertical) axis in the most medial part of the tegmentum, immediately behind the pyramids (the "homunculus stands upright") (Arıncı & Elhan, 2014). As it ascends through the pons, it assumes a horizontal (transverse) orientation (the "homunculus liesdown") (Arıncı & Elhan, 2014). In the mesencephalon, the space occupied by the nucleus ruber displaces it

into an oblique dorsolateral and posterolateral position (Arıncı & Elhan, 2014).

Note: The classic analogy of a "little person standing upright and lying on their side," used to describe the somatotopic rotations of the lemniscus medialis as it ascends through the brainstem, refers entirely to the somatosensory (somatic sensory) homunculus. This pathway, which carries conscious proprioception, vibration, and two-point discrimination (fine touch) from the periphery to the ventral posterolateral (VPL) nucleus of the thalamus, forms the basis of the sensory projection areas in the primary somatosensory cortex (gyrus postcentralis / Brodmann areas 3, 1, and 2). Accordingly, this metaphorical figure, "standing upright" in the sagittal (vertical) plane at the medullary level because the leg fibers lie most ventrally, and "lying on its side" at the pontine level as it rotates into the transverse (horizontal) axis and the leg fibers shift laterally, should not be confused with the motor homunculus of the tractus corticospinalis originating from the gyrus precentralis (Haines, 2012). This knowledge of somatosensory somatotopy offers clinicians invaluable localization capability at the bedside, particularly for identifying which extremity will develop sensory loss in partial vascular lesions of the brainstem.

Decussation Level: The axons of second-order sensory neurons emerging from the nucleus gracilis (legs) and nucleus cuneatus (arms) in the caudal medulla (fibrae arcuatae internae) curve anteriorly and medially to form the sensory decussation (decussatio lemniscorum) at the midline (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

Lesion Findings: Unilateral brainstem lesions above the sensory decussation cause contralateral loss of position sense, vibration, and two-point discriminative touch (Arıncı & Elhan, 2014).

Tractus Spinothalamicus (Anterolateral System - ALS)

Function: Transmits pain, temperature (hot/cold), and crude (poorly localized) touch sensations from the trunk and extremities to the thalamus (VPL) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019).

Location in the Brainstem: Follows a remarkably constant, circumferential course within the ventrolateral/lateral tegmentum throughout the brainstem (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Haines, 2012). In the mesencephalon, it becomes immediately adjacent to the lateral side of the lemniscus medialis (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018).

Decussation Level: Long before reaching the brainstem, this pathway has already crossed to the opposite side through the commissura alba anterior of the spinal cord at its entry segment (or 1-2 segments above) (Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018; Splittgerber, 2019). Therefore, ALS fibers in the brainstem belong entirely to the opposite side (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

Lesion Findings: A unilateral brainstem lesion produces contralateral loss of pain and temperature sensation (analgesia and thermoanesthesia) in the trunk and extremities (body) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019).

Trigeminothalamic Pathways and the Spinal Trigeminal System

Function: Carries pain, temperature, and crude touch sensations from the contralateral half of the face, oral cavity, and cranial structures to the ventral posteromedial (VPM) nucleus, the somatotopic relay station in the thalamus (Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018; Blumenfeld, 2022).

Location in the Brainstem: Ascends deep within the brainstem tegmentum, closely adjacent to the lemniscus medialis

and anterolateral system (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Haines, 2012).

Decussation Level: Second-order sensory fibers emerging from the tractus spinalis nervi trigemini in the medulla oblongata (particularly the pars caudalis), which receives facial pain and temperature sensation, immediately cross within the brainstem to form the ventral trigeminothalamic tract (Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018; Blumenfeld, 2022).

Lesion Findings: Unilateral intraparenchymal brainstem damage may cause contralateral loss of pain and temperature sensation in one half of the face (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

(Critical Difference: The nucleus spinalis nervi trigemini, which carries the primary facial pain and temperaturefibers that have not yet crossed, is located laterally; its damage causes pain and temperature loss in the ***ipsilateral face*** *(Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019). This explains thecrossed sensory loss in Wallenberg syndrome: ipsilateral in the face and contralateral in the body.)*

Fasciculus Longitudinalis Medialis (MLF)

Function: Coordinates horizontal conjugate eye movements, governing the simultaneous action of the n. abducens (m. rectus lateralis) and contralateral n. oculomotorius (m. rectus medialis) during horizontal gaze (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). It also conveys the vestibulo-ocular reflex (VOR), which maintains eye position in response to head movements (Arıncı & Elhan, 2014; Splittgerber, 2019).

Location in the Brainstem: A small, densely myelinated fiber bundle extending vertically on both sides of the midline, ventromedially throughout the brainstem, immediately ventral to the

ventricular floor or aqueductus cerebri(Arıncı & Elhan, 2014; Haines, 2012; Moore et al., 2018).

Decussation Level: Internuclear neurons in the abducens nucleus immediately cross into the MLF and ascend to the subgroup of the contralateral oculomotor nucleus supplying the m. rectus medialis (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Lesion Findings: Produces internuclear ophthalmoplegia (INO) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019). The eye on the side of gaze exhibits nystagmus during abduction, while the opposite eye cannot adduct (look inward) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019).

Spinocerebellar Pathways and Cerebellar Peduncles

Function: Maintains movement coordination, posture, and tone by carrying unconscious proprioceptive and locomotor somatic information from the trunk and extremities to the cerebellum(Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Splittgerber, 2019).

Location in the Brainstem: The tractus spinocerebellaris posterior and tractus cuneocerebellaris enter the cerebellum as a thick bundle along the dorsolateral surface of the medulla, forming the restiform body (pedunculus cerebellaris inferior) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Haines, 2012). The tractus spinocerebellaris anterior ascends laterally at the pontine level and enters the cerebellum through the pedunculus cerebellaris superior (brachium conjunctivum) (Haines & Mihailoff, 2018; Moore et al., 2018).

Decussation Level: The tractus spinocerebellaris posterior does not cross (it is entirely ipsilateral) (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Splittgerber, 2019).The tractus spinocerebellaris anterior crosses in the spinal cord, then crosses again at the pedunculus cerebellaris superior as it enters the cerebellum, thus undergoing a

"double crossing" (Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018; Splittgerber, 2019). Therefore, all cerebellar inputs terminate in the cerebellar hemisphere on the same side of the body from which they originated(Arıncı & Elhan, 2014).

Lesion Findings: Cerebellar findings ipsilateral to the lesion: ataxia, a wide-based gait, impaired coordination, dysmetria, and dysdiadochokinesia (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Ozan, 2014).

Descending Sympathetic Fibers

Function: Provides the sympathetic innervation controlling eyelid smooth muscle tone (m. tarsalis superior), pupillary dilatation (m. dilator pupillae), and facial sweating (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Moore et al., 2018).

Location in the Brainstem: Descends through the lateral/posterolateral tegmentum, in extrem*ely close proximity to the anterolateral*system and nucleus/tractus spinalis nervi trigemini (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Haines, 2012).

Decussation Level: Descends continuously without crossing (ipsilaterally) from the hypothalamus to the intermediolateral horn of the upper thoracic spinal cord (T1-T2)(Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018; Splittgerber, 2019).

Lesion Findings: Ipsilateral Horner syndrome: mild ptosis (drooping eyelid), miosis (pupillary constriction/anisocoria), and anhidrosis (loss of facial sweating)(Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019).

The relationships between pathway function, decussation level, and the side of the resulting deficit are summarized in Table 3 (Arıncı & Elhan, 2014; Haines, 2012; Haines & Mihailoff, 2018; Splittgerber, 2019).

Table 3. Major pathways, their functions, decussation levels, and lesion findings.

Pathway	*Function*	*Decussation*	*Lesion findings*
Corticospinal tract	Voluntary skeletal muscle control	Pyramidal decussation in the caudal medulla	Contralateral spastic hemiparesis or hemiplegia above the decussation
Corticonuclear fibers	Motor control of cranial nerve nuclei	Crossed input to the lower facial muscles and genioglossus	Contralateral lower facial weakness or tongue deviation with damage to the relevant crossed fibers
Medial lemniscus	Conscious proprioception, vibration, and discriminative touch	Internal arcuate fibers cross in the caudal medulla	Contralateral loss of these sensory modalities above the decussation
Anterolateral system	Body pain, temperature, and crude touch	Anterior white commissure of the spinal cord	Contralateral body pain and temperature loss
Spinal trigeminal system	Facial pain and temperature input	Primary fibers descend ipsilaterally before synapsing	Ipsilateral facial pain and temperature loss
Ventral trigeminothalamic tract	Facial sensory transmission to the VPM	Second-order fibers cross within the brainstem	Contralateral facial pain and temperature loss
Medial longitudinal fasciculus	Coordination of horizontal conjugate gaze	Abducens internuclear neurons cross into the opposite MLF	Internuclear ophthalmoplegia with impaired ipsilateral adduction
Spinocerebellar pathways	Unconscious proprioception and movement coordination	Posterior pathway uncrossed; anterior pathway double crossed	Ipsilateral ataxia, dysmetria, and dysdiadochokinesia
Descending sympathetic fibers	Eyelid tone, pupillary dilatation, and facial sweating	Uncrossed descent from the hypothalamus	Ipsilateral Horner syndrome

Mechanism of Crossed Neurological Findings

The concept of a crossed syndrome describes the manifestations of lesion-induced damage in two different anatomical planes (Arıncı & Elhan, 2014; Haines & Mihailoff, 2018):

Ipsilateral (Same-Side) Findings: Because cranial nerve nuclei or their emerging root fibers are directly damaged within the brainstem before crossing to the opposite side (decussating), cranial nerve palsies are always observed in the facial and head structures ipsilateral to the lesion (Arıncı & Elhan, 2014).

Contralateral (Opposite-Side) Findings: The long motor pathways to the body (tractus corticospinalis) have not yet decussated at the brainstem level; therefore, brainstem damage interrupts signals to the opposite side of the body. Sensory pathways from the body (anterolateral system), however, ascend after crossing before reaching the brainstem (Arıncı & Elhan, 2014). Thus, unilateral brainstem damage affecting these fibers causes motor (hemiplegia/hemiparesis) or sensory (hemianesthesia) loss in the trunk and extremities contralateral to the lesion (Arıncı & Elhan, 2014).

In clinical neurology, this mechanism provides a golden rule of localization (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Ozan, 2014):

Ipsilateral cranial nerve finding + Contralateral extremity/trunk finding -> Brainstem Lesion

The combination of an ipsilateral cranial nerve palsy, such as impaired eye abduction or paralysis of one half of the face, with contralateral weakness or sensory loss provides a key clinical pattern for localizing a lesion to the brainstem (Arıncı & Elhan, 2014; Schneider et al., 2023). Understanding which fibers have already

crossed and which have not is central to interpreting the side of each finding.

Anatomical Explanation Through an Example Lesion

To understand how a crossed finding (alternating deficit) develops, consider a concrete clinical scenario:**a unilateral focal lesion in the left ventral mesencephalon (midbrain)**(Splittgerber, 2019; Blumenfeld, 2022).

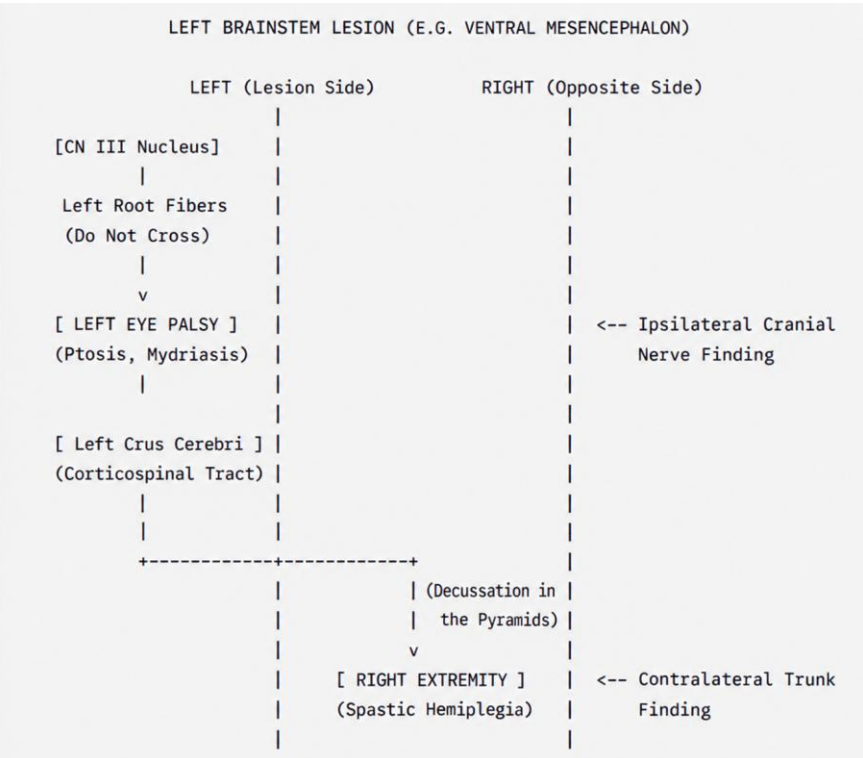
This focal lesion damages two principal structures within the mesencephalic parenchyma(Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022):

Left n. oculomotorius (CN III) root fibers (fascicles): These fibers emerge from the left nucleus nervi oculomotorii and leave the mesencephalon ventrally on their own side, without having crossed (Moore et al., 2018). Because the lesion destroys these fibers on the left, **a complete third cranial nerve palsy occurs ipsilateral to the lesion (in the left eye)** (ptosis, pupillary dilatation, and outward/downward deviation of the eye) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Descending tractus corticospinalis within the left crus cerebri: These motor fibers originate in the left cerebral cortex and descend through the left crus cerebri (Arıncı & Elhan, 2014). They have not yet crossed; however, farther down, at the motor decussation (decussatio pyramidum) at the medulla-spinal cord boundary, they will **cross to the right and innervate the skeletal muscles of the right half of the body** (Arıncı & Elhan, 2014). Because the left mesencephalic lesion affects these as-yet-uncrossed fibers, the clinical presentation is **spastic hemiplegia (loss of strength) on the opposite side of the body (right extremities and trunk)** (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Consequently, the crossed clinical presentation is: **Left brainstem lesion -> Cranial nerve palsy in the left eye (ipsilateral finding) + Paralysis of the right half of the body (contralateral finding)** (Figure 1).

Figure 1. Formation of crossed findings in a left ventral mesencephalic lesion.



From Clinical Findings to Lesion Localization

Before becoming immersed in the complex nomenclature of brainstem lesion syndromes, clinicians can use logical principles to establish localization in two simple geometric dimensions (vertical and horizontal) (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018). This reasoning helps define lesion boundaries with millimetric precision (Arıncı & Elhan, 2014).

Rostrocaudal (Vertical) Localization

Localization in the vertical dimension is based directly on identifying the affected cranial nerve (Arıncı & Elhan, 2014). Each brainstem segment is the exit site of its characteristic cranial nerves (Arıncı & Elhan, 2014):

- Mesencephalon: Findings involving the n. oculomotorius (CN III) and n. trochlearis (CN IV) indicate this level(Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018).
- Pons: Findings involving the n. trigeminus (CN V), n. abducens (CN VI), n. facialis (CN VII), and n. vestibulocochlearis (CN VIII) establish pontine pathology (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).
- Medulla Oblongata (Bulbus): Findings involving the n. glossopharyngeus (CN IX), n. vagus (CN X), n. accessorius (CN XI), and n. hypoglossus (CN XII) indicate medullary localization (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). Clinical–radiological assessment of medial medullary infarction also uses rostrocaudal and ventrodorsal lesion classification, providing a clinical application of these anatomical axes (Sezgin et al., 2024).

Medial-Lateral (Horizontal) Localization and the Rule of 4

Functionally, a horizontal section of the brainstem is divided into two main vascular and anatomical territories: a medial (paramedian) group and a lateral (circumferential) group (Arıncı & Elhan,2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022). The Rule of 4, frequently used in neurology to facilitate clinical localization and popularized by Gates, categorizes brainstem structures as follows:

Four Principal Medial (Paramedian) Structures (Beginning with M):

Motor Tract (tractus corticospinalis): Damage causes contralateral spastic hemiparesis/hemiplegia (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

Medial Lemniscus (lemniscus medialis): Damage causes contralateral loss of deep sensation (proprioception and vibration) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Medial Longitudinal Fasciculus (MLF/fasciculus longitudinalis medialis): Damage causes ipsilateral internuclear ophthalmoplegia (inability to adduct the eye during horizontal gaze and nystagmus) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Motor Cranial Nerve Nuclei: Among the twelve cranial nerves, those designated somatic motor and numbered as multiples of three, the nuclei of cranial nerves **III, IV, VI, and XII**, lie medially near the midline (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). Damage causes the corresponding motor nerve palsy ipsilateral to the lesion (Arıncı &Elhan, 2014; Moore et al., 2018).

Four Principal Lateral (Circumferential) Structures (Beginning with S):

Spinothalamic Tract (Anterolateral System - ALS): Damage causes contralateral loss of pain and temperature sensation in the body (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Sensory Trigeminal (Nucleus spinalis nervi trigeminiand Tractus spinalis nervi trigemini): Damage causes loss of pain and temperature sensation in the face ipsilateral to the lesion (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Splittgerber, 2019).

Spinocerebellar Pathways and Cerebellar Peduncles (tractus spinocerebellaris and pedunculus cerebellaris): Damage produces cerebellar ataxia and impaired coordination ipsilateral to the lesion (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Haines, 2012).

Sympathetic Pathway (Descending Sympathetic Fibers): Damage causes Horner syndrome (ptosis, miosis, and anhidrosis) ipsilateral to the lesion (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Knowledge of these two principal columns in clinical localization allows the combination of the patient's cranial and systemic manifestations to identify the precise brainstem location of the lesion (e.g., medial pons or lateral medulla) within seconds (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018; Blumenfeld, 2022).

Table 4 brings together the major medial and lateral structures used in this localization framework (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Table 4. Medial and lateral brainstem structures and their principal lesion findings.

Territory	*Structure*	*Principal lesion finding*
Medial (M)	Motor tract (corticospinal tract)	Contralateral spastic hemiparesis or hemiplegia
Medial (M)	Medial lemniscus	Contralateral proprioceptive and vibration loss
Medial (M)	Medial longitudinal fasciculus	Ipsilateral internuclear ophthalmoplegia
Medial (M)	Motor cranial nerve nuclei	Palsy of the corresponding cranial nerve
Lateral (S)	Spinothalamic tract	Contralateral body pain and temperature loss
Lateral (S)	Sensory trigeminal nucleus and tract	Ipsilateral facial pain and temperature loss
Lateral (S)	Spinocerebellar pathways and cerebellar peduncles	Ipsilateral cerebellar ataxia and impaired coordination
Lateral (S)	Sympathetic pathway	Ipsilateral Horner syndrome

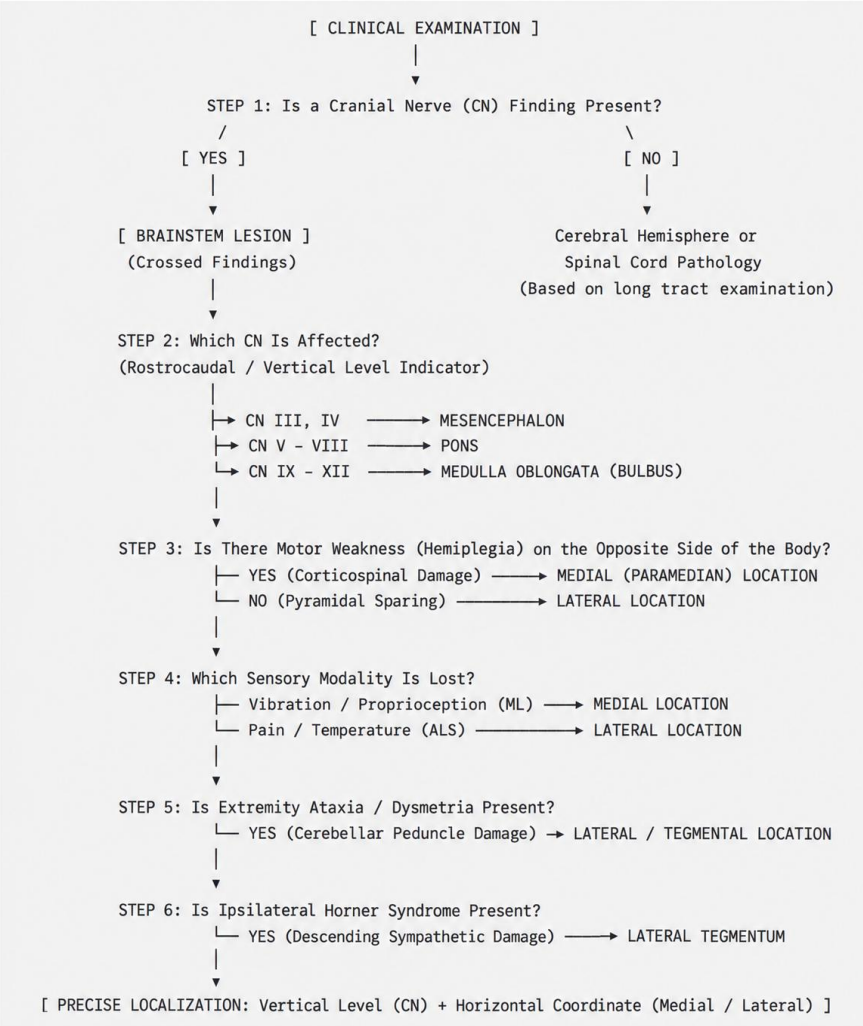
Stepwise Localization Algorithm

When assessing brainstem syndromes in clinical neurology, the most practical approach is to apply a logical, stepwise

localization algorithm based on the neurological deficits identified during bedside examination rather than memorize complex eponyms (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). This algorithm allows the vertical (rostrocaudal) and horizontal (medial-lateral) boundaries of the lesion to be identified at a millimetric level(Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

The following flowchart illustrates how clinical examination findings lead to the precise coordinates of a brainstem lesion (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022) (Figure 2):

Figure 2. A stepwise algorithm for localizing brainstem lesions from clinical findings.



Clinical Interpretation of the Algorithm

Steps 1 and 2 (Vertical Level Indicators): A cranial nerve finding establishes the vertical (rostrocaudal) level (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). For example, unilateral ptosis and pupillary dilatation accompanying diplopia (CN III) definitively

indicate a mesencephalic lesion;peripheral facial palsy (CN VII) or restricted horizontal abduction (CN VI) indicates a pontine lesion; difficulty swallowing (dysphagia), hoarseness (dysphonia) (CN IX and X), or tongue atrophy/deviation (CN XII) indicates a medullary lesion (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Steps 3 and 4 (Horizontal Territory Indicators):

Medial (Paramedian) Column: If a cranial nerve finding is accompanied by marked contralateral motor weakness (hemiplegia/hemiparesis), the lesion is ventral/medial, because transverse sections show the descending corticospinal motor fibers entirely within the medial basilar territory (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). Contralateral loss of vibration and proprioception (deep sensation) also confirms involvement of the medial ascending course of the lemniscus medialis (Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Lateral (Circumferential) Column: If motor strength is entirely preserved (motor sparing), the lesion is definitively in the lateral parenchyma, because the corticospinal motor tract is not located in the lateral brainstem (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022). In this situation, contralateral trunk pain and temperature loss indicates damage to the laterally situated anterolateral system (ALS)(Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019).

Step 5 (Cerebellar Coordination Assessment): Extremity ataxia, dysmetria, dysdiadochokinesia, and nystagmus confirm damage in the lateral tegmental regions to the SCP in the mesencephalon (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022), MCP in the pons (Blumenfeld, 2022), and ICP in the medulla (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Step 6 (Sympathetic System Assessment): Horner syndrome, characterized by ipsilateral facial ptosis, miosis, and anhidrosis, reinforces lateral localization by demonstrating

interruption of the hypothalamospinal sympathetic fibers descending through the lateral tegmentum (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Splittgerber, 2019).

Classic Eponyms and the Importance of Anatomical Localization

The classic eponyms used to describe brainstem syndromes in clinical neurology (Weber, Benedikt, Wallenberg, Millard-Gubler, etc.) are part of neurology's historical clinical heritage (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014). The following important observations should be made regarding their role in modern medical education and clinical practice:

Value in Neuroanatomy Education: Eponyms provide medical students with invaluable mental maps and educational models for understanding the cross-sectional anatomical relationships between cranial nerve nuclei and long motor and sensory pathways within a limited area (Arıncı & Elhan, 2014; Ozan, 2014).

Rarity of the "Complete Syndrome" in Actual Patients: In real clinical cases, the "classic complete syndromes" described in textbooks (e.g., a complete Benedikt or Foville syndrome with every manifestation) are exceptionally rare (Arıncı & Elhan, 2014). Most patients present with "partial" or "overlapping" syndrome variants (Arıncı & Elhan, 2014).

Vascular Variations and Lesion Size: The diameters, branching angles, and collateral networks of the penetrating arteries supplying the brainstem exhibit substantial anatomical variation between individuals (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Vlašković et al., 2022). Moreover, the millimetric intraparenchymal extent of a pathology (e.g., an ischemic stroke or hemorrhagic focus) can completely alter the clinical presentation (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). For example, extension of a lateral medullary

lesion only 1-2 mm toward the medial pyramid adds contralateral hemiplegia to the motor-sparing Wallenberg presentation, transforming it into Babinski-Nageotte syndrome (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Modern Imaging Technology: High-resolution magnetic resonance imaging (particularly DWI-MRI and T2-weighted MR sections) can now identify the precise location of brainstem damage at a millimetric level (Arıncı& Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). Consequently, attempts to attach an artificial eponymous label to a patient's presentation are diagnostically insufficient (Blumenfeld, 2022; Arıncı & Elhan, 2014). Advanced MRI techniques can improve visualization of brainstem nuclei and tracts (Shepherd & Hoch, 2022); a pilot study combining in vivo 7-T MRI with ex vivo imaging and histology demonstrated selected structures, including the oculomotor nucleus and medial longitudinal fasciculus, that are difficult to delineate with conventional imaging (Donatelli et al., 2023).

The objective when assessing brainstem syndromes is to anatomically localize the lesion by identifying the affected nuclei and tracts from clinical findings, rather than to find the syndrome's name (memorize an eponym) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Conclusion

Crossed (alternating) brainstem syndromes are among the most elegant, logically satisfying, and rational examples of localization in clinical neurology (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022). Understanding their underlying pathophysiology requires mastery of the three-dimensional anatomical architecture of the nervous system(Ozan, 2014; Blumenfeld, 2022).

The essence of these clinical correlations rests on two fundamental dimensions (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018):

Vertical (Rostrocaudal) Dimension: Identifying the affected cranial nerve palsy accurately determines the vertical level of the lesion (mesencephalon, pons, or medulla oblongata) (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022).

Horizontal (Medial-Lateral) Dimension: The modality of the body's motor and sensory deficits (hemiplegia, vibration/position loss, or pain and temperature loss) establishes whether the lesion lies in the medial or lateral parenchyma (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018; Blumenfeld, 2022).

Integrating bedside neurological findings with cross-sectional neuroanatomy allows the clinician to relate cranial nerve deficits to the vertical level of a lesion and motor, sensory, cerebellar, and autonomic findings to its horizontal position. This framework also supports identification of the likely vascular territory involved (Arıncı & Elhan, 2014; Moore et al., 2018; Blumenfeld, 2022; Salerno et al., 2022).

Modern MR imaging can confirm and refine clinical-anatomical localization. The anatomical reasoning that precedes imaging remains central to evaluating brainstem lesions, particularly in acute stroke assessment and emergency care (Arıncı & Elhan, 2014; Blumenfeld, 2022; Ahmed et al., 2023; Schneider et al., 2023).

References

Ahmed, R. A., Dmytriw, A. A., Regenhardt, R. W., Leslie-Mazwi, T. M., & Hirsch, J. A. (2023). Posterior circulation cerebral infarction: A review of clinical, imaging features, management, and outcomes. *European Journal of Radiology Open, 11*, Article 100523. https://doi.org/10.1016/j.ejro.2023.100523

Arıncı, K., & Elhan, A. (2014). *Anatomi* (5th ed., Vol. 2). Güneş Tıp Kitabevleri.

Blumenfeld, H. (2022). *Neuroanatomy through clinical cases* (3rd ed.). Oxford University Press.

Donatelli, G., Emmi, A., Costagli, M., Cecchi, P., Macchi, V., Biagi, L., Lancione, M., Tosetti, M., Porzionato, A., De Caro, R., & Cosottini, M. (2023). Brainstem anatomy with 7-T MRI: In vivo assessment and ex vivo comparison. *European Radiology Experimental, 7*, Article 71. https://doi.org/10.1186/s41747-023-00389-y

Haines, D. E. (2012). *Neuroanatomy: An atlas of structures, sections, and systems* (8th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.

Haines, D. E., & Mihailoff, G. A. (2018). *Fundamental neuroscience for basic and clinical applications* (5th ed.). Elsevier.

Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. R. (2018). *Clinically oriented anatomy* (8th ed.). Wolters Kluwer.

Ozan, H. (2014). *Ozan anatomi* (3rd ed.). Klinisyen Tıp Kitabevleri.

Salerno, A., Strambo, D., Nannoni, S., Dunet, V., & Michel, P. (2022). Patterns of ischemic posterior circulation strokes: A clinical, anatomical, and radiological review. *International Journal of Stroke, 17*(7), 714–722. https://doi.org/10.1177/17474930211046758

Schneider, A. M., Neuhaus, A. A., Hadley, G., Balami, J. S., Harston, G. W., DeLuca, G. C., & Buchan, A. M. (2023). Posterior circulation ischaemic stroke diagnosis and management. *Clinical Medicine, 23*(3), 219–227. https://doi.org/10.7861/clinmed.2022-0499

Sezgin, M., Aliyeva, G., Ekizoğlu, E., Yeşilot, N., & Çoban, O. (2024). Medial medullary infarction: Clinical, radiological findings and long-term prognosis. *Acta Neurologica Belgica, 124*(3), 813–820. https://doi.org/10.1007/s13760-023-02427-3

Shepherd, T. M., & Hoch, M. J. (2022). MRI-visible anatomy of the brainstem. *Neuroimaging Clinics of North America, 32*(3), 553–564. https://doi.org/10.1016/j.nic.2022.04.003

Splittgerber, R. (2019). *Snell's clinical neuroanatomy* (8th ed.). Wolters Kluwer.

Vlašković, T., Georgievski Brkić, B., Stević, Z., Vukićević, M., Đurović, O., Kostić, D., Stanisavljević, N., Marinković, I., Kapor, S., & Marinković, S. (2022). Anatomic and MRI bases for pontine infarctions with patients presentation. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases, 31*(8), Article 106613. https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2022.106613


BİDGE