

SİSTEMATİK NÖROANATOMİ: YAPI VE ORGANİZASYON

Editör:
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Furkan Öztürk



BİDGE Yayınları

Sistemantik Nöroanatomi: Yapı ve Organizasyon

Editör: DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA FURKAN ÖZTÜRK

ISBN: 978-625-8821-76-5

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-08-05

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



İÇİNDEKİLER

Sinir Sisteminin Genel Organizasyonu	1
<i>BEDRETTİN ÇİNPOLAT</i>	
Medulla Spinalis ve İnen-Çıkan Sinir Yolları	23
<i>AHMET TURAN URHAN</i>	
Beyin Sapı (Truncus Encephali)	55
<i>SEFA SÖNMEZ</i>	
Serebellum ve Bazal Ganglionlar	75
<i>MUSTAFA FURKAN ÖZTÜRK</i>	
Diensefalon ve Serebral Korteks	133
<i>MURAT KORKMAZ</i>	
Ventriküler Sistem, Beyin Omurilik Sıvısı ve Dolaşım	166
<i>MERVE NUR ÖZGEN SÖNMEZ</i>	

BÖLÜM 1

SİNİR SİSTEMİNİN GENEL ORGANİZASYONU

Bedrettin ÇİNPOLAT¹

GİRİŞ

Sinir sistemi, insan vücudunun en karmaşık ve yüksek düzeyde organize olmuş kontrol ve iletişim ağıdır. Organizmanın iç ve dış çevresinden gelen uyarıların spesifik reseptörler aracılığıyla algılanması, bu bilgilerin merkezi yapılar tarafından hızlı ve bütüncül biçimde değerlendirilmesi ve uygun yanıtların oluşturulması sinir sisteminin temel işlevini oluşturur (Hall & Hall, 2020). Bu süreçler sayesinde sinir sistemi, yalnızca homeostazın sürdürülmesinde değil, aynı zamanda organizmanın sürekli değişen çevre koşullarına hızlı ve etkin biçimde uyum sağlamasında da belirleyici rol oynar. Ayrıca, davranış, öğrenme, hafıza ve bilinç gibi yüksek düzeyli bilişsel fonksiyonların alt yapısını oluşturur.

Anatomik açıdan sinir sistemi, merkezi sinir sistemi (MSS) ve periferik sinir sistemi (PSS) olmak üzere iki ana bölümde incelenir. MSS; beyin ve omurilikten oluşarak duyuusal bilgilerin işlenmesi, entegrasyonu ve motor yanıtların planlanmasından

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Dişçilik Hizmetleri Bölümü, Tokat, Türkiye, bedrettincinpolat@gop.edu.tr, Orcid: 0000-0002-3325-1522

sorumludur. PSS ise kranial ve spinal sinirler aracılığıyla MSS ile vücudun diğer bölümleri arasında bağlantı kurar. Bu sistem, duyuşal bilgileri merkeze taşıyan afferent lifler ve motor yanıtları efektör organlara ileten efferent lifler sayesinde çift yönlü bir iletişim ağı oluşturur (Martini et al., 2015; Moore et al., 2023; Splittgerber, 2019).

Sinir sisteminin organizasyonu yalnızca anatomik bir ayırım ile sınırlı değildir; aynı zamanda fonksiyonel açıdan da özelleşmiş bir bütünlük gösterir. Bu bağlamda sistem, somatik ve otonom sinir sistemi olarak iki ana fonksiyonel bölüme ayrılır. Somatik sinir sistemi, istemli kas hareketlerinin kontrolünü ve bilinçli duyuşal algıyı sağlarken; otonom sinir sistemi iç organların istemsiz faaliyetlerini düzenler. Otonom sistemin sempatik ve parasempatik alt bölümleri, organizmanın iç dengesini koruyacak şekilde karşıt ancak tamamlayıcı etkiler gösterir (Kandel et al., 2021; Martini et al., 2015; Vanderah & Gould 2020). Bu denge, özellikle stres, dinlenme ve metabolik düzenleme süreçlerinde kritik öneme sahiptir.

Sinir sisteminin mikroskobik organizasyonu, temel fonksiyonel birim olan nöronlar ile destekleyici hücre grubu olan glia hücreleri arasındaki karmaşık etkileşime dayanır. Nöronlar, özel iletim ağları sayesinde elektriksel ve kimyasal sinyaller aracılığıyla yüksek hızda ve özgüllükte bilgi iletimi sağlarken; glia hücreleri nöronların yapısal bütünlüğünü koruyan, metabolik ihtiyaçlarını karşılayan ve sinaptik çevreyi düzenleyen destek hücreleri olarak sistemin işlevselliğine katkıda bulunur. Nöron–glia etkileşimine dayanan ve sinaptik iletişim ile nörotransmitter salınımı üzerinden işleyen bu hücresel organizasyon, yalnızca etkin sinyal iletimini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda sinir sisteminin adaptif ve düzenleyici kapasitesi ile bilgi işleme, nöroplastisite, öğrenme ve hafıza gibi yüksek düzeyli fonksiyonların biyolojik temelini de

oluşturur (Kandel et al., 2021, Martini et al., 2015; Splittgerber, 2019)

Sonuç olarak sinir sisteminin genel organizasyonu, makroskobik anatomik yapılardan hücresel ve moleküler düzeydeki etkileşimlere kadar uzanan çok katmanlı ve entegre bir yapı sergiler. Bu organizasyon, hem yaşamsal fonksiyonların sürdürülmesini hem de karmaşık davranışsal ve bilişsel süreçlerin ortaya çıkmasını mümkün kılar. Sinir sisteminin bu bütüncül yapısının anlaşılması, normal fizyolojik mekanizmaların açıklanmasının yanı sıra nörolojik hastalıkların patofizyolojisinin kavranması açısından da temel bir öneme sahiptir (Moore et al., 2023; Splittgerber, 2019).

2. SİNİR SİSTEMİNİN HÜCRESEL TEMELLERİ

2.1. Sinir Sisteminin Embriyolojik Gelişimi

Sinir sisteminin tüm yapıları embriyolojik olarak ektoderm tabakasından köken alır. Embriyonik gelişimin üçüncü haftasında, notokordun (chorda dorsalis) indükleyici etkisi altında dorsal ektoderm kalınlaşarak nöral plak (lamina neuralis) olarak adlandırılan yapıyı oluşturur. Nöral plağın lateral kenarları zamanla yükselerek nöral kıvrımları (cristae neurales) meydana getirirken, bu kıvrımlar arasında kalan orta hat çöküntüsü nöral oluk (sulcus neuralis) olarak adlandırılır. Gelişimin ilerleyen evrelerinde nöral kıvrımlar orta hatta birleşerek, servikal bölgeden başlayıp kranial ve kaudal yönlerde devam eden bir kapanma süreci sonucunda nöral tüpü (tubus neuralis) oluşturur. Merkezi sinir sisteminin temel primordiyumu olan nöral tüpten beyin ve omurilik gelişir (Pansky, 1982; Sadler, 2015).

Nöral tüpün lateral duvarları farklılaşarak fonksiyonel açıdan iki önemli bölge oluşturur. Dorsal yerleşimli lamina alaris, duyuusal fonksiyonlarla ilişkili nöronal yapıların gelişimine kaynaklık ederken; ventral yerleşimli lamina basalis, motor fonksiyonlarla ilişkili nöronal yapıların gelişimini sağlar. Nöral tüpün dorsolateral

bölgesinden ayrılan nöral krest hücreleri (crista neuralis) ise embriyogenez sırasında geniş bir migrasyon göstererek spinal ve kranial sinir ganglionları başta olmak üzere periferik sinir sisteminin çok sayıda yapısını oluşturur (Arıncı & Elhan, 2025; Martini et al., 2015; Sadler, 2015).

Embriyonik yaşamın dördüncü haftasında nöral tüpün kranial bölümü (pars cranialis) üç primer beyin vezikülüne farklılaşır. Bunlar önden arkaya doğru prosencephalon (ön beyin), mesencephalon (orta beyin) ve rhombencephalon (arka beyin) olarak adlandırılır. Daha sonraki gelişim evrelerinde bu primer veziküllerden beynin tüm anatomik bölümleri meydana gelir ve bu yapıların bütünü ensefalon (encephalon) olarak tanımlanır. Nöral tüpün kaudal bölümü (pars spinalis) ise medulla spinalis (omurilik) gelişimini oluşturur (Arıncı & Elhan, 2025; Martini et al., 2015; Sadler, 2015).

Sinir sisteminin histogenezi sırasında başlangıçta benzer özellikler gösteren nöroepitelyal hücreler farklılaşarak iki temel hücre grubunu meydana getirir: nöronlar ve Glia Hücreleri (nöroglia). Nöronlar, uyarıların alınması, iletilmesi, entegrasyonu ve uygun yanıtın oluşturulmasından sorumlu özelleşmiş hücrelerdir. Nöroglia hücreleri ise nöronlara mekanik destek sağlama, metabolik ihtiyaçlarını karşılama, iyonik dengeyi sürdürme, miyelin oluşturma ve hücrel artıkların uzaklaştırılması gibi görevler üstlenir. Sayıca nöronlardan yaklaşık 5–10 kat daha fazla olan nöroglial hücreler, sinir sisteminin yapısal bütünlüğünün korunması ve normal fonksiyonlarının sürdürülmesinde kritik öneme sahiptir. Sinir dokusu ayrıca, beyin yüzeyini örten ve damarlarla birlikte parankim içine uzanan pia mater kaynaklı bağ dokusu elemanlarını da içerir (Arıncı & Elhan, 2025; Martini et al., 2015; Pansky, 1982).

Sinir sisteminin fonksiyonel olgunlaşmasında temel rol oynayan süreçlerden biri miyelinizasyondur. Miyelin kılıf oluşumu fetal yaşamın ikinci ayında başlar; alt motor nöron liflerinde yaklaşık

beşinci fetal ayda belirginleşirken, üst motor nöronlara ait kortikospinal liflerde miyelinizasyon doğum sonrası dönemde devam ederek genellikle 1–2 yaşlarında belirgin düzeye ulaşır. Sinir liflerinin büyük çoğunluğu yaşamın ilk yıllarında miyelin kılıfını kazanmasına rağmen, bazı liflerde miyelinizasyon süreci genç erişkin döneme kadar devam edebilmektedir. Genel bir kural olarak, merkezi sinir sisteminin filogenetik açıdan daha eski bölümlerine ait yollar daha erken, daha yeni gelişen bölümlere ait yollar ise daha geç miyelinleşir. Miyelin kılıfın varlığı, aksiyon potansiyellerinin tuzlu sıçrayıcı (saltatuar) iletim mekanizmasıyla iletilmesini sağlayarak sinir impulslarının iletim hızını önemli ölçüde artırır. Bu nedenle miyelinli sinir lifleri impulsları daha hızlı iletirken, miyelinsiz liflerde iletim hızı daha düşüktür (Arıncı & Elhan, 2025; Arifoğlu, 2021; Ozan, 2014; Sadler, 2015).

2.2. Nöronlar

Nöronlar, sinir sisteminin temel yapısal ve fonksiyonel birimleridir. Elektriksel olarak uyarılabilen bu özelleşmiş hücreler, sinir impulslarını oluşturma, iletme ve işleme yetenekleri sayesinde organizmanın iç ve dış çevresinden gelen bilgilerin değerlendirilmesini sağlar. Sinir sistemi içerisindeki iletişim ağının temel elemanları olan nöronlar, duyuusal bilgilerin alınması, işlenmesi ve uygun yanıtların oluşturulmasında kritik rol oynar. Bu sayede vücut ile merkezi sinir sistemi arasında hızlı ve etkili bir iletişim kurulabilir (Arıncı & Elhan, 2025; Purves et al., 2018; Kandel et al., 2021).

Bir nöron temel olarak hücre gövdesi (soma veya perikaryon), dendritler ve akson olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Hücre gövdesi, çekirdek ve organelleri içeren metabolik merkezdir ve hücrenin yaşamsal faaliyetlerinin sürdürülmesinden sorumludur. Hücre gövdesinde yoğun granüllü endoplazmik retikulum kümeleri olan Nissl cisimcikleri bulunur ve bunlar protein

sentezinde önemli görev üstlenir. Dendritler, diğer nöronlardan veya duyu reseptörlerinden gelen uyarıları alarak hücre gövdesine ileten kısa ve çok sayıda uzantılardır. Akson ise genellikle tek, uzun ve ince bir uzantı olup hücre gövdesinde oluşan sinir impulslarını diğer nöronlara, kas hücrelerine veya bezlere taşır. Dendrit ve aksonlar genel olarak sinir lifi veya neurit olarak adlandırılır (Arifoğlu, 2021; Mescher, 2021; Ozan, 2014; Standring, 2020).

Aksonlar, iletim hızını artıran özel kılıflarla çevrili olabilir. Bunların en önemlisi miyelin kılıftır. Miyelin, lipid bakımından zengin yapısı sayesinde aksonun elektriksel olarak yalıtılmasını sağlar ve impulsların sıçrayıcı (saltatorik) iletimle çok daha hızlı taşınmasına olanak verir. Merkezi sinir sisteminde miyelin kılıf oligodendrositler tarafından oluşturulurken, periferik sinir sisteminde bu görevi Schwann hücreleri üstlenir. Schwann hücreleri yalnızca miyelin oluşumunda değil, aynı zamanda sinir liflerinin beslenmesi ve hasar sonrası rejenerasyonunda da önemli rol oynar. Otonom sinir sisteminin bazı postganglionik liflerinde ise miyelin kılıf bulunmaz ve bu lifler yalnızca Schwann hücreleri tarafından çevrelenir (Arıncı & Elhan, 2025; Arifoğlu, 2021; Hall & Hall, 2020; Purves et al., 2018).

Nöronların hücre gövdeleri merkezi ve periferik sinir sisteminin farklı bölgelerinde yer alır. Merkezi sinir sisteminde nöron gövdeleri beyin korteksinde, beyin çekirdeklerinde ve omuriliğin gri cevherinde bulunurken, periferik sinir sisteminde ganglionlar içerisinde yer alırlar. Aksonların bir araya gelmesiyle oluşan sinir lifi demetleri merkezi sinir sisteminde traktus (tractus), periferik sinir sisteminde ise sinir (nervus) olarak adlandırılır. Bu yapılar sinir sisteminin farklı bölgeleri arasında bilgi iletimini sağlayan iletişim yollarını oluşturur (Arıncı & Elhan, 2025; Arifoğlu, 2021; Standring, 2020).

Nöronlar yapısal özelliklerine göre unipolar (psödounipolar), bipolar ve multipolar olmak üzere üç temel gruba ayrılır.

Psödounipolar nöronlarda hücre gövdesinden çıkan tek uzantı kısa bir mesafe sonra periferik ve santral olmak üzere iki dala ayrılır. Bu tip nöronlar özellikle spinal ganglionlarda ve bazı kranial sinirlerin duyu ganglionlarında bulunur. Bipolar nöronlar bir dendrit ve bir aksona sahiptir; retina, vestibüler ganglion ve koklear ganglion gibi özel duyu organlarında yer alırlar. Multipolar nöronlar ise bir akson ve çok sayıda dendritten oluşur ve merkezi sinir sistemindeki nöronların büyük çoğunluğunu meydana getirir. Motor nöronlar ve birçok interneuron bu gruba örnek olarak verilebilir (Arıncı & Elhan, 2025; Bear et al., 2016; Kandel et al., 2021).

Nöronlar akson uzunluklarına göre de sınıflandırılabilir. Uzun aksonlu nöronlar Golgi Tip I nöronlar olarak adlandırılır ve aksonları merkezi sinir sisteminin farklı bölgelerine veya periferik yapılara kadar uzanabilir. Kısa aksonlu Golgi Tip II nöronlar ise genellikle bulundukları bölge içerisinde bağlantılar kurarak lokal iletişimi sağlarlar. Bu sınıflandırma, nöronların sinir sistemi içerisindeki işlevsel organizasyonunun anlaşılmasına katkı sağlar (Arıncı & Elhan, 2025; Mescher, 2021).

Fonksiyonel açıdan nöronlar duyuşal (afferent), motor (efferent) ve ara nöronlar (interneuronlar) olmak üzere üç grupta incelenir. Duyuşal nöronlar reseptörlerden aldıkları bilgileri merkezi sinir sistemine taşır ve çevreden gelen uyarıların algılanmasını sağlar. Motor nöronlar ise merkezi sinir sisteminden çıkan komutları kaslara, bezlere ve diğer efektör organlara ileterek uygun yanıtların oluşturulmasını sağlar. Ara nöronlar yalnızca merkezi sinir sistemi içerisinde bulunur ve duyuşal nöronlarla motor nöronlar arasında bağlantı kurarak bilgilerin analiz edilmesi, yorumlanması ve entegrasyonunda görev alır. İnsan sinir sistemindeki nöronların büyük çoğunluğunu interneuronlar oluşturur (Arıncı & Elhan, 2025; Purves et al., 2018; Bear et al., 2016).

Nöronların en önemli fizyolojik özellikleri uyarılabilirlik ve iletkenliktir. Uyarılabilirlik, nöronların uygun bir uyarı karşısında

aksiyon potansiyeli oluşturabilme yeteneğini ifade ederken; iletkenlik, oluşan impulsların akson boyunca iletilmesini ifade eder. Bu özellikler sayesinde sinir sistemi boyunca bilgilerin hızlı bir şekilde taşınması, değerlendirilmesi ve organizmanın çevresel değerikliklere uygun yanıtlar verebilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca nöronlar arasındaki iletişim sinaps adı verilen özel bağlantı bölgelerinde gerçekteşir ve bu iletişim nörotransmitterler aracılığıyla sağlanır. Böylece sinir sistemi karmaşık bilgi işleme süreçlerini etkin bir şekilde yerine getirebilir (Kandel et al., 2021; Hall & Hall, 2020).

2.3. Glia Hücreleri

Sinir sistemi, temel olarak nöronlar ve glia hücreleri olmak üzere iki ana hücre grubundan oluşur. Nöronlar elektriksel uyarıların iletilmesinden sorumlu iken, glia hücreleri sinir dokusunun yapısal bütünlüğünü koruyan, nöronların beslenmesini sağlayan ve sinir sisteminin normal işleyişine katkıda bulunan yardımcı hücrelerdir. Uzun yıllar boyunca yalnızca destekleyici hücreler olarak değerlendirilen glialar, günümüzde yapılan araştırmalar sonucunda sinaptik iletişim, sinirsel gelişim, bağışıklık yanıtları ve nörolojik düzenleme süreçlerinde aktif görev alan hücreler olarak kabul edilmektedir (Arıncı & Elhan, 2025; Purves et al., 2018; Kandel et al., 2021).

Glia hücreleri, sinir sistemindeki hücrelerin büyük bir kısmını oluşturur ve nöronların yaşamlarını sürdürebilmeleri için gerekli mikroçevrenin korunmasında önemli rol oynar. Bu hücreler iyon dengesinin sağlanması, nörotransmitterlerin ortamdan uzaklaştırılması, sinir liflerinin yalıtılması ve hasar sonrası doku onarımı gibi birçok yaşamsal fonksiyonu yerine getirir. Ayrıca embriyolojik gelişim sırasında sinir sisteminin şekillenmesine ve nöronların doğru hedeflere yönlendirilmesine de katkı sağlarlar (Bear et al., 2016; Hall & Hall, 2020).

Merkezi sinir sisteminde (MSS) bulunan başlıca glia hücreleri astrositler, oligodendrositler, mikrogliya ve ependim hücreleridir. Astrositler yıldız şeklindeki yapılarıyla dikkat çeker ve MSS'nin en yaygın glia hücrelerini oluşturur. Nöronlara metabolik destek sağlayan bu hücreler, ekstraselüler sıvıdaki iyon dengesinin korunmasına yardımcı olur, nörotransmitterlerin geri alınmasını sağlar ve sinaptik aktivitenin düzenlenmesinde görev alır. Ayrıca kapiller damarlarla yakın ilişki kurarak kan-beyin bariyerinin oluşumuna ve sürdürülmesine katkıda bulunurlar. Bu özellikleri sayesinde merkezi sinir sisteminin kimyasal dengesinin korunmasında önemli rol oynarlar (Purves et al., 2018; Kandel et al., 2021).

Oligodendrositler, merkezi sinir sistemindeki aksonların etrafını saran miyelin kılıfın oluşumundan sorumludur. Miyelin, sinir impulslarının daha hızlı ve etkin iletilmesini sağlayan yağdan zengin bir yalıtım tabakasıdır. Bir oligodendrosit aynı anda birden fazla akson segmentini miyelinle kaplayabilir. Miyelin kılıfın zarar görmesi veya kaybı, sinir iletim hızının azalmasına neden olur ve özellikle demiyelinizan hastalıklarda önemli klinik sonuçlar ortaya çıkar (Bear et al., 2016; Hall & Hall, 2020).

Mikrogliya hücreleri merkezi sinir sisteminin savunma ve bağışıklık hücreleri olarak görev yapar. Embriyolojik kökenleri diğer glia hücrelerinden farklıdır ve monosit-makrofaj sistemiyle ilişkilidir. Normal koşullarda çevreyi sürekli olarak izleyen mikroglialar, enfeksiyon, travma veya hücresel hasar durumlarında aktive olur. Aktive olduklarında fagositoz yaparak ölü hücreleri, mikroorganizmaları ve hücresel artıkları uzaklaştırırlar. Ayrıca çeşitli sitokinler salgılayarak inflamatuvar yanıtın düzenlenmesine katkıda bulunurlar (Kandel et al., 2021; Mescher, 2021).

Ependim hücreleri ise beynin ventriküllerini ve medulla spinalisin merkezi kanalını döşeyen özel glia hücreleridir. Bu hücrelerin bir kısmı koroid pleksusu oluşturarak beyin omurilik

sıvısının (BOS) üretiminde görev alır. Yüzeylerinde bulunan siller yardımıyla BOS'un ventriküler sistem içerisinde dolaşımına katkıda bulunurlar. Böylece merkezi sinir sisteminin korunması, beslenmesi ve atık maddelerin uzaklaştırılması süreçlerinde önemli rol oynarlar (Mescher, 2021; Stranding, 2020).

Periferik sinir sisteminde (PSS) bulunan başlıca glia hücreleri Schwann hücreleri ve satelit hücrelerdir. Schwann hücreleri, periferik sinir liflerinin etrafında miyelin kılıf oluşturarak impuls iletim hızını artırır. Merkezi sinir sistemindeki oligodendrositlerden farklı olarak her Schwann hücresi yalnızca tek bir akson segmentini miyelinleştirir. Ayrıca periferik sinir yaralanmalarından sonra akson rejenerasyonunu desteklemeleri nedeniyle sinir onarımında önemli bir role sahiptirler (Purves et al., 2018; Hall & Hall, 2020).

Satelit hücreler ise periferik ganglionlarda bulunan nöron gövdelerinin çevresini sarar. Bu hücreler nöronların metabolik ihtiyaçlarının karşılanmasına yardımcı olur, iyon ve besin dengesini düzenler ve nöronları mekanik ve kimyasal etkilere karşı korur. Böylece ganglionlardaki sinir hücrelerinin sağlıklı işlevlerini sürdürebilmelerine katkı sağlarlar (Mescher, 2021).

Nöronlar ve glia hücreleri arasında sürekli ve dinamik bir etkileşim bulunmaktadır. Glialar yalnızca destekleyici hücreler olmayıp sinaptik iletimin düzenlenmesi, öğrenme ve hafıza mekanizmalarının desteklenmesi, sinir sistemi gelişiminin yönlendirilmesi ve hasar sonrası iyileşme süreçlerinin kontrol edilmesinde aktif görev üstlenirler. Bu nedenle glia hücreleri, sinir sisteminin normal fonksiyonlarının sürdürülmesi ve nörolojik hastalıkların anlaşılması açısından büyük önem taşımaktadır (Bear et al., 2016; Kandel et al., 2021).

3. SİNİR SİSTEMİNİN ANATOMİK ORGANİZASYONU

Sinir sistemi, organizmanın iç ve dış çevreden gelen uyarınları algılamasını, işlemlerini ve uygun yanıtlar oluşturmalarını sağlayan karmaşık bir kontrol ve iletişim ağıdır. Tüm organ ve sistemlerin koordineli çalışmasını sağlayan bu sistem; anatomik olarak vücuttaki yapısal konumuna, yerleşim yerine ve kemik korumasına göre merkezi (santral) sinir sistemi ve çevresel (periferik) sinir sistemi olmak üzere iki ana bölüme ayrılırken, fizyolojik açıdan ise kontrol ettiği yapıların özelliklerine ve işlevlerine dayanarak somatik sinir sistemi ve otonom sinir sistemi olmak üzere iki bölümde incelenmektedir (Arıncı & Elhan, 2025; Arifoğlu, 2021; Mescher, 2021; Ozan, 2014).

3.1. Merkezi Sinir Sistemi (MSS)

Merkezi sinir sistemi, beyin ve omurilikten oluşur. Sinir sisteminin kontrol ve değerlendirme merkezi olarak görev yapan bu yapı, vücudun çeşitli bölgelerinden gelen duyuşsal bilgileri analiz eder, yorumlar ve uygun motor yanıtların oluşturulmasını sağlar. Beyin; bilinç, öğrenme, hafıza, düşünme, duyuşların değerlendirilmesi ve istemli hareketlerin kontrolü gibi yüksek fonksiyonlardan sorumludur. Omurilik ise beyin ile periferik yapılar arasında bilgi iletimini sağlayan temel yol olmasının yanı sıra birçok refleks aktivitenin de merkezini oluşturur (Standring, 2020; Kandel et al., 2021).

Merkezi sinir sistemi (MSS), organizmanın homeostatik dengesini sürdüren, iç ve dış çevre yollarından gelen karmaşık veri akışlarını entegre eden, işleyen ve uygun motor ya da sekreteruar yanıtları koordine eden ana işlem merkezidir (Hall & Hall, 2020).

Anatomik olarak tümüyle aksiyal iskelet yapılarının sağladığı kemik koruması altında bulunan bu sistem; cavitas cranii (kafatası boşluğu) içinde yer alan encephalon (beyin) ile canalis

vertebralis (omurga kanalı) boyunca uzanan medulla spinalisten (omurilik) meydana gelmektedir (Arifoğlu, 2021; Ozan, 2014).

Encephalon: Cerebrum (büyük beyin), cerebellum (beyincik) ve truncus encephali (beyin sapı) olmak üzere üç temel anatomik bölgeye ayrılır. Cerebrum, yüksek bilişsel fonksiyonların, dil işleme süreçlerinin, hafızanın, duygusal yanıtların ve istemli motor hareketlerin planlandığı ve yürütüldüğü üst merkezdir. Cerebellum ise motor hareketlerin zamanlamasını, hassasiyetini ve kas tonusu ile vücut dengesinin koordinasyonunu sağlar. Truncus encephali; bulbus (omurilik soğanı), pons (köprü) ve mesencephalon (orta beyin) yapılarından oluşarak solunum, dolaşım, yutma ve kalp atım hızı gibi vital otonomik fonksiyonların regülasyonunda birincil derecede rol oynar (Arıncı & Elhan, 2025; Arifoğlu, 2021; Mescher, 2021; Ozan, 2014).

Medulla Spinalis: Foramen magnum seviyesinden başlayıp lomber omurlar düzeyine kadar uzanan silindirik bir sinir dokusu sütunudur. Omurilik, periferden gelen somatosensoriyel bilgilerin beyne iletilmesinde ve beyinden çıkan motor emirlerin efektör organlara ulaştırılmasında çift yönlü ana sinyal güzergâhı olarak işlev görür. Ayrıca, beyin doğrudan katılımı olmadan gerçekleşen ani ve koruyucu segmenter refleks arklarının (örneğin gerilme refleksi) anatomik yerleşimini barındırır (Arifoğlu, 2021; Mescher, 2021; Ozan, 2014; Purves et al., 2018; Vanderah & Gould 2020).

Merkezi sinir sisteminin bu hassas elemanları, dıştan içe doğru dura mater, arachnoidea mater ve pia mater olarak adlandırılan üç katmanlı bağ doku kökenli meninks zarları tarafından sarılmıştır. Subaraknoid mesafede devridaim eden beyin omurilik sıvısı (BOS), merkezi sinir sistemine hem mekanik bir yastıklama (hidrostatik koruma) sağlar hem de nöronal mikrodokunun metabolik atıklarının uzaklaştırılmasına ve homeostazın sürdürülmesine yardımcı olur (Hall & Hall, 2020; Vanderah & Gould 2020).

Yapısal kesitlerde belirginleşen gri cevher (substantia grisea) temel olarak nöron gövdeleri, dendritler ve miyelinsiz aksonları barındırırken; beyaz cevher (substantia alba) bilgiyi farklı merkezler arasında hızla ileten miyelinli lif yollarından (traktus) oluşmaktadır (Mescher, 2021; Ozan, 2014; Purves et al., 2018).

3.2. Periferik Sinir Sistemi (PSS)

Çevresel sinir sistemi (ÇSS), merkezi sinir sisteminin sınırları dışında kalan ve koruyucu bir kemik kılıfı bulunmayan tüm nöral yapıları kapsamaktadır (Purves et al., 2018). Bu sistem, MSS ile vücudun uzak organları, ekstremiteleri, duyuşal reseptörleri ve bezleri arasında çift yönlü veri akışını kesintisiz olarak sağlayan bir iletişim ağıdır (Hall & Hall, 2021).

ÇSS'nin temel anatomik bileşenleri; sinir kökleri, periferik sinir lifleri (akson demetleri) ve MSS'nin dışında konumlanmış nöron gövdesi kümeleri olan ganglionlardır.

Kafa Sinirleri (Nervi Craniales): Doğrudan beynin bulbus, pons ve mesencephalon adı verilen bölümlerinden köken alan

- I. Nn. olfactorii
- II. N. opticus
- III. N. oculomotorius
- IV. N. trochlearis
- V. N. trigeminus
- VI. N. abducens
- VII. N. facialis
- VIII. N. vestibulocochlearis
- IX. N. glossopharyngeus
- X. N. vagus

XI. N. accessorius

XII. N. hypoglossus

olmak üzere 12 çift sinirden oluşur. Bu sinirler başta baş ve boyun bölgesi olmak üzere, özel duyuların (görme, işitme, koku, tat) iletilmesinden, yüz kaslarının motor kontrolünden ve nervus vagus (CN X) aracılığıyla torakal ve abdominal organların parasempatik innervasyonundan sorumludur (Arifoğlu, 2021; Ozan, 2014; Purves et al., 2018; Vanderah & Gould 2020).

Omurilik Sinirleri (Nervi Spinales): Omurilik boyunca simetrik segmentler halinde sağ ve sol taraftan çıkan

8 adet nervi cervicales

12 adet nervi thoracici

5 adet nervi lumbales

5 adet nervi sacrales

1 adet nervus coccygeus

olmak üzere 31 çift karma sinirden meydana gelir. Her bir spinal sinir, duyusal lifleri taşıyan bir arka kök (radix posterior) ile motor lifleri taşıyan bir ön kökün (radix anterior) birleşmesiyle oluşur. Bu sinirler, gövde ve ekstremitelerin duyusal girdilerini toplar ve buralardaki iskelet kaslarının motor kontrolünü sağlar (Ozan, 2014; Vanderah & Gould 2020).

Ganglionlar: Fonksiyonel özelliklerine göre duyu ganglionları (örneğin arka kök ganglionları) ve otonom sinir sistemi ganglionları (sempatik ve parasempatik düğümler) olmak üzere ikiye ayrılır. Ganglionlar, periferdeki sinirsel sinyallerin MSS'ye aktarılmadan önce veya organlara iletilirken sinaptik geçiş yaptığı ya da toplandığı hücresel istasyonlardır (Mescher, 2021; Purves et al., 2018).

ÇSS lifleri, endonörium, perinörium ve epinörium adı verilen özel bağ doku kılıfları ile sarılarak mekanik etkilere karşı dirençli hale getirilir. Liflerin sinyal iletim hızı, etraflarını saran Schwann hücrelerinin oluşturduğu miyelin kılıfının varlığına ve kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösterir; bu durum organizmanın uyarılara milisaniyeler düzeyinde hızlı yanıtlar verebilmesinin temelini oluşturur (Hall & Hall, 2021; Mescher, 2021).

Sonuç olarak sinir sisteminin anatomik ve fizyolojik açıdan sınıflandırılması, sinirsel yapıların organizasyonunu ve işlevlerini anlamada temel bir yaklaşım sunmaktadır. Merkezi ve periferik sinir sistemi yapısal bütünlüğü oluştururken, somatik ve otonom sinir sistemi organizmanın istemli ve istemsiz faaliyetlerinin düzenlenmesini sağlayarak yaşamın sürdürülebilmesinde kritik rol oynar.

4. GRİ VE BEYAZ MADDE

Merkezi sinir sistemi, işlevsel ve yapısal özellikleri bakımından gri madde (substantia grisea) ve beyaz madde (substantia alba) olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bu iki yapı, sinir sisteminin bilgi işleme ve iletim fonksiyonlarının yerine getirilmesinde birbirini tamamlayıcı görevler üstlenir. Gri madde, nöron hücre gövdeleri, dendritler, sinapslar, myelinsiz aksonlar, nöroglia hücreleri ve zengin bir kapiller damar ağı içerirken; beyaz madde esas olarak myelinli aksonlardan, glia hücrelerinden ve kan damarlarından meydana gelir. Sinir sisteminin işlevsel organizasyonu, gri maddenin bilgi işleme ve entegrasyon görevleri ile beyaz maddenin ileti ve bağlantı sağlama fonksiyonları üzerine kurulmuştur (Blumenfeld, 2021; Standring, 2020).

4.1. Gri madde (Substantia grisea)

Gri madde, sinirsel bilgilerin işlendiği ve değerlendirildiği temel merkezdir. Nöron hücre gövdelerinin yoğun olarak bulunması nedeniyle gri renkte görülen bu yapı, duyu bilgilerinin algılanması,

motor cevapların oluşturulması, refleks aktivitelerinin düzenlenmesi ve bilişsel süreçlerin yürütülmesinde önemli rol oynar. Özellikle serebral korteks düzeyinde yer alan gri madde; bilinç, öğrenme, hafıza, dil, dikkat ve karar verme gibi yüksek düzey nörolojik fonksiyonların anatomik temelini oluşturur. Bunun yanında bazal çekirdekler, talamus ve hipotalamus gibi derin beyin yapıları da gri maddeden oluşan önemli merkezlerdir. Bu bölgelerde bulunan nöronlar arasında kurulan yoğun sinaptik bağlantılar, merkezi sinir sisteminin karmaşık bilgi işleme kapasitesinin temelini meydana getirir (Splittgerber, 2019; Purves et al., 2018).

Gri maddenin organizasyonu merkezi sinir sisteminin farklı bölümlerinde değişiklik göstermektedir. Beyinde gri madde çoğunlukla dışta yer alarak serebral ve serebellar korteksi oluştururken, beyaz madde daha derinde bulunmaktadır. Buna karşılık medulla spinalis'te gri madde merkezde yer almakta ve enine kesitlerde H harfi ya da kelebek görünümü sergilemektedir. Bu farklı yerleşim düzeni, embriyolojik gelişim sırasında meydana gelen nöronal göç süreçleri ile ilişkilidir. Beyin korteksindeki çok katmanlı gri madde organizasyonu, farklı işlevlere sahip kortikal alanların gelişmesine olanak sağlamış ve insanın bilişsel kapasitesinin artmasında önemli rol oynamıştır (Moore et al., 2023; Standring, 2020).

4.2. Beyaz madde (Substantia alba)

Beyaz madde ise merkezi sinir sisteminin farklı bölgeleri arasında iletişimi sağlayan iletim yollarından oluşmaktadır. Beyaz rengini, aksonları çevreleyen ve yüksek lipid içeriğine sahip olan myelin kılıftan alır. Myelin, sinir impulslarının hızlı ve etkin bir şekilde iletilmesini sağlayarak sinir sistemi fonksiyonlarının koordinasyonunda kritik öneme sahiptir. Beyaz madde içerisinde bulunan aksonlar, belirli fonksiyonlara sahip demetler hâlinde organize olur ve traktus olarak adlandırılır. Bu traktuslar aracılığıyla

duyu bilgileri periferden merkezi yapılara taşınırken, motor komutlar da üst merkezlerden efektör organlara iletilir (Blumenfeld, 2021; Standring, 2020).

Beyaz madde lifleri genel olarak assosiasyon, komissüral ve projeksiyon lifleri olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir. Assosiasyon lifleri aynı hemisfer içerisindeki farklı kortikal alanlar arasında bağlantı kurarken, komissüral lifler sağ ve sol hemisferler arasında bilgi alışverişini sağlar. Bu grubun en büyük örneğini corpus callosum oluşturmaktadır. Projeksiyon lifleri ise serebral korteks ile beyin sapı, serebellum ve medulla spinalis gibi alt merkezler arasındaki bağlantıyı sağlar. Böylece merkezi sinir sisteminin farklı seviyeleri arasında bütünlük bir iletişim ağı meydana gelir (Splittgerber, 2019; Standring, 2020).

Gri ve beyaz madde birbirinden anatomik olarak farklı yapılar olmasına rağmen fonksiyonel açıdan ayrılmaz bir bütünlük içerisinde. Gri madde, gelen bilgileri analiz ederek uygun yanıtların oluşturulmasını sağlarken; beyaz madde bu bilgilerin merkezi sinir sisteminin farklı bölgeleri arasında iletilmesini mümkün kılar. Bu nedenle herhangi birinde meydana gelen patolojik değişiklikler sinir sistemi fonksiyonlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin gri maddeyi etkileyen nörodejeneratif hastalıklar bilişsel ve motor fonksiyon kayıplarına yol açarken, beyaz maddeyi etkileyen demiyelinizan hastalıklar sinir ileti hızının azalmasına ve nörolojik işlev bozukluklarına neden olmaktadır. Dolayısıyla merkezi sinir sisteminin normal işleyişi, gri ve beyaz maddenin yapısal bütünlüğünün korunmasına bağlıdır (Blumenfeld, 2021; Purves at al., 2018;).

5. TEMEL TERMİNOLOJİ

Sinir sisteminin organizasyonunu anlayabilmek için öncelikle bu sistemde kullanılan temel anatomik ve fizyolojik terminolojinin bilinmesi gerekmektedir. Sinir sistemine ait yapıların

tanımlanmasında kullanılan terimler, anatomik yerleşim, fonksiyon ve bağlantı özelliklerine göre şekillenmiştir. Bu terminoloji, sinir sisteminin farklı bölümleri arasındaki ilişkilerin anlaşılmasını kolaylaştırmakta ve bilimsel iletişimde ortak bir dil oluşturmaktadır.

Sinir sistemi içerisinde bilgi taşıyan lifler fonksiyonlarına göre afferent ve efferent olarak adlandırılır. Afferent lifler duyuusal bilgileri periferden merkezi sinir sistemine taşıyan "getiren" liflerdir. Efferent lifler ise merkezi sinir sisteminden çıkan motor veya otonom impulsları efektör organlara ileten "götüren" liflerdir.

Merkezi sinir sisteminde iki taraf arasındaki bağlantıyı sağlayan lif topluluklarına commissura adı verilir. Belirli yapılar arasında bağlantı kuran sinir dalları ise communicans olarak isimlendirilir. Sinir sistemindeki anatomik oluşumların tanımlanmasında sık kullanılan terimlerden biri olan cornu, boynuz şeklindeki çıkıntıları ifade ederken; colliculus tepecik veya kabarıntı şeklindeki yapıları tanımlamak için kullanılmaktadır.

Nöroanatominin yön bildiren terimleri arasında cranialis, baş veya kafa yönünü; caudalis, kuyruk ya da alt kısmı; rostralis ise özellikle beyin anatomisinde ön veya gaga yönünü ifade eder. Merkezi sinir sisteminde sinir yollarının orta hattı çaprazlayarak karşı tarafa geçmesine decussatio adı verilir. Birçok duyu ve motor yolun seyri sırasında çaprazlaşma göstermesi nedeniyle bu terim klinik nöroanatomide büyük önem taşımaktadır.

Sinir sisteminin temel yapısal elemanlarından biri olan sinir lifleri fibra olarak adlandırılır. Benzer fonksiyona sahip liflerin oluşturduğu daha büyük demetler tractus, daha küçük demetler ise fasciculus olarak isimlendirilir. Beyin sapında bulunan yassı ve şerit şeklindeki lif toplulukları için ise sıklıkla lemniscus terimi kullanılmaktadır. Omurilik beyaz cevherindeki daha büyük lif toplulukları ise funiculus olarak adlandırılır.

Nöron gövdelerinin oluşturduğu topluluklar bulundukları yere göre farklı isimler alır. Merkezi sinir sistemi içerisinde yer alan nöron kümelerine nucleus (çekirdek) denirken, periferik sinir sistemindeki nöron gövdesi toplulukları ganglion olarak adlandırılır.

Sinir sisteminde yön ilişkileri tanımlanırken ipsilateral ve kontralateral kavramları kullanılır. İpsilateral, incelenen yapının veya bulgunun lezyonla aynı tarafta bulunduğunu ifade ederken; kontralateral, karşı tarafta bulunduğunu belirtir. Özellikle motor ve duyu yollarının çaprazlaşması nedeniyle nörolojik muayenede bu terimler sıkça kullanılmaktadır.

Sinir hücresinin gövde kısmına soma adı verilir. Vücudun gövde ve ekstremiteleriyle ilişkili yapılar ise somatik olarak tanımlanır. Merkezi sinir sisteminin nöron gövdelerinden zengin bölgeleri substantia grisea (gri cevher), myelinli sinir liflerinden zengin bölgeleri ise substantia alba (beyaz cevher) olarak isimlendirilir.

Orta beyin ve beyin sapı anatomisinde kullanılan tectum ve tegmentum terimleri sırasıyla "çatı" ve "örtü" anlamına gelir. Bu yapılar beyin sapının fonksiyonel organizasyonunda önemli anatomik bölgeleri ifade eder.

Nörolojide sinir sistemi hastalıklarına bağlı motor ve duyu kayıplarını tanımlayan çeşitli klinik terimler bulunmaktadır. Paresis, kas gücünde azalma veya hafif derecede felci ifade ederken; paralysis (plegia) tam felci tanımlar. Felçlerin dağılımına göre kullanılan terimler arasında bir ekstremitenin felci için monoplegia, her iki alt ekstremitenin felci için paraplegia, vücudun bir yarısının felci için hemiplegia, dört ekstremitenin felci için ise quadriplegia (tetraplegia) yer almaktadır. Bir üst ekstremita ile karşı taraf alt ekstremitenin felci durumuna hemiplegia cruciata adı verilir (Arıncı & Elhan, 2025; Ozan, 2014).

Bu temel terminoloji, sinir sisteminin anatomik organizasyonunun, sinir yollarının ve nörolojik hastalıkların anlaşılmasında ortak bir bilimsel dil oluşturmakta ve nöroanatomi eğitiminde önemli bir temel sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

Arıncı, K., & Elhan, A. (2025). *Anatomi*, 8. Baskı. 2. Cilt. Güneş Tıp Kitabevleri.

Arifoğlu, Y. (2021). *Her Yönüyle Anatomi*, 3. Baskı. İstanbul Tıp Kitabevleri.

Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2016). *Neuroscience: Exploring the brain* (4th ed.). Wolters Kluwer.

Blumenfeld, H. (2021). *Neuroanatomy through clinical cases* (3rd ed.). Oxford University Press.

Hall, J. E., & Hall, M. E. (2020). *Guyton and Hall textbook of medical physiology* (14th ed.). Elsevier.

Kandel, E. R., Koester, J. D., Mack, S. H., & Siegelbaum, S. A. (2021). *Principles of neural science* (6th ed.). McGraw Hill.

Martini, FH., Timmons, MJ., & Tallitsch, RB. (2015). *Human anatomy*, 8th ed. Pearson Education.

Mescher, A. L. (2021). *Junqueira's basic histology: Text and atlas* (16th ed.). McGraw-Hill Education.

Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. R. (2023). *Moore's Clinically oriented anatomy* (9th ed.). Wolters Kluwer.

Ozan, H. (2014). *Ozan Anatomi*, 3. Baskı. Klinisyen Tıp Kitabevleri.

Pansky, B. (1982). *Review of Medical Embryology development of the Limbs* Mecomillan Publishing Co, inc. New York.

Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A. S., Mooney, R., Platt,

M. L., & White, L. E. (2018). *Neuroscience* (6th ed.). Oxford University Press.

Sadler, TW. (2015). *Langman's Medical Embryology*. Wolters Kluwer Health.

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

Standring, S. (Ed.). (2020). *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice* (42nd ed.). London, UK: Elsevier.

Vanderah, T. D., & Gould, D. J. (2020). *The human brain: An introduction to its functional anatomy* (8th ed.). Elsevier.

BÖLÜM 2

MEDULLA SPİNALİS VE İNEN-ÇIKAN SINİR YOLLARI

Ahmet Turan URHAN¹

Medulla Spinalis Embriyolojisi

Medulla spinalisin embriyolojik gelişimi, erken embriyonik dönemde başlayan ve merkezi sinir sisteminin temel organizasyonunu oluşturan karmaşık bir süreçtir. Omurilik, nöromesodermal progenitör olarak adlandırılan ve hem nöral hem mezodermal farklılaşma potansiyeline sahip hücrelerden köken alır (Saade & Martí, 2025). Gastrulasyon sürecinde epiblast hücrelerinden nöral plak gelişir ve bunu takiben nöral plak hücreleri proliferasyon göstererek psödostratifiye nöroepitelyal bir yapı oluşturur (Saade & Martí, 2025; Zeng et al., 2023). Daha sonra nöral plakanın kıvrılması ve orta hatta birleşmesi ile nöral tüp meydana gelir. Bu yapı, beyin ve medulla spinalisin temel taslağını oluşturur.

Spinal kord gelişimi primer ve sekonder nörolasyon olmak üzere iki temel mekanizma ile gerçekleşmektedir. Primer nörolasyon sırasında nöral plak dorsal orta hatta kapanarak nöral tüpü oluşturur

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Artova Meslek Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Tokat, Türkiye, ahmetturan.urhan@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1178-2998

ve spinal kordun yaklaşık S1–S2 seviyesine kadar olan bölümü gelişir (Colas & Schoenwolf, 2001). Bu süreçte başlangıçta amniyotik boşlukla bağlantılı olan rostral ve kaudal nöral poruslar zamanla kapanır. Sekonder nörülasyon ise daha kaudal segmentlerin gelişiminden sorumludur. Bu aşamada kaudal hücre kitlesi proliferasyon göstererek medüller kord adı verilen yapıyı oluşturur; ardından kavitasyon ve epitelizasyon süreçleri ile sekonder nöral tüp gelişir (Colas & Schoenwolf, 2001; Saade & Martí, 2025; Santos et al., 2024). Sekonder nörülasyon özellikle konus medullaris ve filum terminale oluşumunda önemli rol oynamaktadır.

Gelişmekte olan medulla spinalis, dorsoventral ve rostrokaudal eksen boyunca belirli hücresel alanlara ayrılarak organize olur. Bu organizasyon, Sonic hedgehog (SHH) ve bone morphogenetic protein (BMP) gibi morfojenlerin oluşturduğu sinyal gradyanları tarafından düzenlenmektedir (Iyer & Ashton, 2022; Sagner & Briscoe, 2019). Dorsal nöral tüpten öncelikle nöral krest hücreleri gelişmekte, daha sonra dorsal internöronlar ve roof plate yapıları oluşmaktadır (Iyer & Ashton, 2022; Santos et al., 2024). Ventral bölgede ise notokord ve floor plate kaynaklı SHH sinyalleri motor nöron gelişimini yönlendirmekte ve glial hücre farklılaşmasında önemli rol oynamaktadır (K. Yu, McGlynn, & Matise, 2013).

Embriyolojik gelişim sürecinde önce nörogenez, ardından gliogenez gerçekleşmektedir. Nöral progenitör hücrelerden motor nöronlar, inhibitör ve eksitatör internöronlar, astrositler, oligodendrosit öncül hücreleri ve endodermal hücreler gelişmektedir (Y. Yu et al., 2025; Zhang et al., 2021). Güncel tek hücre analizleri, insan spinal kord gelişiminin türlere özgü özellikler taşıdığını ve progenitör hücrelerin zamanla sessiz faza geçerek farklılaşma süreçlerinin sıkı biçimde kontrol edildiğini göstermiştir (Li et al., 2023; Y. Yu et al., 2025; Zhang et al., 2021). Ayrıca gliogenezin başlangıcında EGFR pozitif radyal glial hücrelerin ortaya çıktığı ve

bu hücrelerin Delta–Notch ile EGFR sinyal yolları aracılığıyla çevre hücrelerle etkileşim halinde olduğu bildirilmektedir (Zhang et al., 2021).

Son yıllarda geliştirilen insan pluripotent kök hücre temelli spinal kord organoid modelleri, medulla spinalis gelişiminin deneysel olarak incelenmesine önemli katkılar sağlamıştır. Bu modeller, nöral tüp oluşumu, dorsoventral paternleme ve nöron-glia farklılaşmasını büyük ölçüde taklit edebilmekte ve özellikle nöral tüp defektlerinin patogenezinin araştırılmasında kullanılmaktadır (Gribaudo et al., 2024; Lee et al., 2022; Shi et al., 2024).

2. MEDULLA SPİNALİS ANATOMİSİ

Medulla spinalis, merkezi sinir sisteminin canalis vertebralis içerisinde yer alan bölümünü oluşturur ve kraniyalde medulla oblongata ile devamlılık gösterir. Vertebral kanalın yaklaşık üst iki-üçlük kısmında bulunan bu yapı, erişkinlerde ortalama 40–50 cm uzunluğunda, yaklaşık 1 cm çapında ve 30 gram ağırlığındadır. Kaudal ucu konik biçimde sonlanmakta olup erkeklerde genellikle L1–L2, kadınlarda ise L2 vertebra düzeyinde sonlanmaktadır. Bu farklılığın vertebral kolon gelişimindeki cinsiyete bağlı değişikliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Medulla spinalisin distal konik bölümü conus medullaris olarak adlandırılır. İntrauterin yaşamın üçüncü ayına kadar vertebral kanal boyunca uzanan medulla spinalis, vertebral kolonun sinir dokusuna göre daha hızlı büyümesi nedeniyle gelişim sürecinde relatif olarak yukarı çekilmektedir. Bu nedenle yenidoğanlarda conus medullaris çoğunlukla üçüncü lumbal vertebra düzeyinde bulunmaktadır. Conus medullarisin distalinden filum terminale adı verilen ince fibröz yapı devam eder. Yaklaşık 20 cm uzunluğundaki bu yapının dural kese içerisinde kalan üst bölümü filum terminale internum, dura mater dışında kalan distal bölümü ise filum terminale

externum olarak isimlendirilir. Filum terminale externum, dura mater ile birleşerek birinci koksigeal vertebranın dorsal yüzüne tutunur. Filum terminalenin temel yapısını proksimal bölümde pia materin devamı niteliğindeki yoğun bağ dokusu oluştururken, distal bölümde bu yapıya dura mater lifleri katılmaktadır. Ayrıca medulla spinalisin merkezinde yer alan canalis centralis, filum terminale içerisinde yaklaşık 5–6 cm boyunca devam etmektedir (Arıncı, 2006; Cumhuriyet et al., 2007).

Medulla spinalis, meninges olarak adlandırılan üç katlı bağ dokusu zarı ile çevrilidir. Bu zarlar dıştan içe doğru dura mater spinalis, arachnoidea mater spinalis ve pia mater spinalis olarak sıralanmaktadır. Meningeal yapılar, medulla spinalisin korunması ve desteklenmesinde önemli görev üstlenmektedir. Dura mater spinalis ile vertebral kanalın periosteumu arasında spatium epidurale yer alır. Bu aralık içerisinde plexus venosus vertebralis internus ve gevşek areolar bağ dokusu bulunmaktadır. Epidural aralık, özellikle epidural anestezi uygulamalarında klinik açıdan önem taşımaktadır. Arachnoidea mater ile pia mater arasında bulunan spatium subarachnoideum ise beyin omurilik sıvısı (BOS) içermektedir. BOS; merkezi sinir sisteminin mekanik travmalara karşı korunması, metabolik dengenin sürdürülmesi ve desteklenmesinde görev almaktadır. Spinal meninksler ve ilişkili boşluklar kraniyal meningeal yapılar ile devamlılık göstermektedir (Arifoğlu, 2024; Ozan, 2005).

Medulla spinalis, merkezi sinir sisteminin temel iletim ve entegrasyon merkezlerinden biridir. Periferden gelen duysal impulslar medulla spinalis aracılığıyla üst merkezlere iletilirken, istemli hareketleri kontrol eden motor impulslar da yine medulla spinalis üzerinden iskelet kaslarına taşınmaktadır. Ayrıca sempatik ve parasempatik liflerin geçiş yolu olarak görev yaparak birçok organın otonom innervasyonunun düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle medulla spinalis; duysal iletim, motor

kontrol ve otonom fonksiyonların koordinasyonunda kritik öneme sahip bir yapıdır (Cumhur et al., 2007; Ozan, 2005).

2.1. Medulla Spinalis'in Dış Görünüşü

Medulla spinalis düzgün silindirik bir yapıda olmayıp ön-arka yönde hafif basık bir morfoloji göstermektedir. Üst ve alt ekstremitelerin innervasyonundan sorumlu afferent ve efferent sinir liflerine ait nöron gövdelerinin yoğun olarak bulunması nedeniyle belirli bölgelerde genişlemeler meydana gelmektedir. Bu genişlemeler intumescentia cervicalis ve intumescentia lumbosacralis olarak adlandırılır. Intumescentia cervicalis, üst ekstremitenin innervasyonu ile ilişkili olup yaklaşık üçüncü servikal vertebra ile ikinci torakal vertebra seviyeleri arasında uzanır. Bu bölge ağırlıklı olarak C4–T1 medulla spinalis segmentlerini içermektedir. Alt ekstremitenin innervasyonundan sorumlu olan ikinci genişleme ise intumescentia lumbosacralis olarak isimlendirilir. Bu genişleme yaklaşık dokuzuncu torakal vertebra ile birinci lumbal vertebra seviyeleri arasında yer almakta olup L2–S3 medulla spinalis segmentlerini kapsamaktadır. Bu bölgelerde gri cevher miktarının artmış olması, ekstremit motor ve duysal innervasyon gereksinimi ile ilişkilidir (Arifoğlu, 2024; Ozan, 2005).

2.2. Medulla Spinalis'in Yarık ve Olukları

Fissura mediana anterior ve sulcus medianus posterior, medulla spinalisi sağ ve sol olmak üzere iki simetrik yarıya ayıran başlıca anatomik yapılardır. Ön yüzde longitudinal seyreden derin oluğa fissura mediana anterior, arka yüzde bulunan daha yüzeysel oluğa ise sulcus medianus posterior adı verilmektedir. Fissura mediana anterior yaklaşık 3 mm derinliğinde olup kaudal yönde daha belirgin hale gelir. Bu fissürün derin kısmında, medulla spinalisin iki yarısındaki beyaz cevheri birleştiren commissura alba anterior yer almaktadır. Sulcus medianus posteriorun derininde ise

canalis centralise kadar uzanan septum medianum posterior bulunmaktadır. Bu septum, funiculus posterioru sağ ve sol olmak üzere iki bölüme ayırmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Medulla spinalisin lateral yüzlerinde longitudinal uzanım gösteren başka oluklar da bulunmaktadır. Ön kök liflerinin çıkış yaptığı oluklar sulcus anterolateralis, arka kök liflerinin giriş yaptığı oluklar ise sulcus posterolateralis olarak adlandırılır. Bu bölgeler spinal sinir köklerinin giriş ve çıkış alanlarını oluşturmaları nedeniyle anatomik ve klinik açıdan önemlidir. Servikal bölgenin tamamında ve üst torakal segmentlerde, sulcus medianus posterior ile sulcus posterolateralis arasında sulcus intermedius posterior yer almaktadır. Bu oluk, posterior funiculusu fasciculus gracilis ve fasciculus cuneatus olmak üzere iki demete ayırır. Medialde bulunan fasciculus gracilis alt vücut bölgelerinden, lateralde yer alan fasciculus cuneatus ise üst vücut bölgelerinden gelen ince dokunma, vibrasyon ve proprioseptif duyuları taşımaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

2.3. Medulla Spinalis'in Segmentleri

Medulla spinalis toplam 33 segmentten oluşmaktadır. Bu segmentlerin 8'i servikal, 12'si torakal, 5'i lumbal, 5'i sakral ve 3'ü koksigeal bölgededir. Ancak son iki koksigeal segmentin rudimenter olması nedeniyle yalnızca bir çift koksigeal spinal sinir bulunmaktadır. Böylece medulla spinalisten toplam 31 çift spinal sinir çıkmaktadır. Spinal sinirler; 8 çift servikal, 12 çift torakal, 5 çift lumbal, 5 çift sakral ve 1 çift koksigeal sinir olarak sınıflandırılır. Servikal bölgede spinal sinirlerin çıkışı diğer bölgelerden farklıdır. Birinci servikal spinal sinir atlas ile os occipitale arasından, sekizinci servikal spinal sinir ise yedinci servikal vertebra ile birinci torakal vertebra arasından geçmektedir. Sekizinci servikal sinirden sonraki spinal sinirler ise numaralarına karşılık gelen vertebraların altındaki

foramen intervertebralelerden çıkmaktadır (Arifoğlu, 2024; Ozan, 2005).

Spinal sinirler, radix anterior ile radix posteriorun birleşmesi sonucu oluşur. Ön kök motor ve otonom lifleri taşıırken, arka kök ağırlıklı olarak duysal liflerden oluşmaktadır. Arka kök üzerinde ganglion spinale bulunur ve iki kökün birleşmesi bu ganglionun distalinde gerçekleşir. Spinal sinirler foramen intervertebraleden çıktıktan sonra ramus anterior ve ramus posterior olmak üzere iki ana dala ayrılır. Ramus posteriorlar sırt kasları ile derinin innervasyonunu sağlarken, ramus anteriorlar daha geniş dağılım göstermektedir. Torakal bölgede ön dallar segmental özelliklerini koruyarak interkostal sinirleri oluştururken, diğer bölgelerdeki ön dallar birleşerek servikal, brakiyal, lumbal ve sakral pleksusları meydana getirir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Embriyolojik dönemde medulla spinalis vertebral kanal boyunca uzanmakta ve spinal sinir kökleri horizontal seyir göstermektedir. Gelişimin ilerleyen dönemlerinde vertebral kolonun spinal korda göre daha hızlı büyümesi sonucunda medulla spinalis relatif olarak kraniyal yönde yer değiştirir. Bu nedenle erişkinlerde spinal kordun alt ucu vertebral kanalın distalinden daha yukarı seviyede sonlanmaktadır. Spinal sinirler ise kendi segmentlerine ait foramen intervertebralelerden çıkmaya devam ettiğinden, özellikle alt segmentlere ait kökler vertebral kanal içerisinde inferior yönde uzanım göstermektedir. Filum terminale çevresinde demet halinde bulunan bu uzun sinir kökleri makroskopik olarak at kuyruğuna benzediği için cauda equina olarak adlandırılmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

2.4. Spinal Sinirlerin Kökleri

Medulla spinalisin sulcus anterolateralis ve sulcus posterolateralis bölgelerinde bulunan ince sinir lifleri fila radicularia olarak adlandırılır. Bu lifler canalis vertebralis içerisinde birleşerek

ön tarafta radix anterioru, arka tarafta ise radix posterioru oluşturur. Ön ve arka kökler, ilgili segment düzeyindeki foramen intervertebralede birleşerek spinal siniri meydana getirir. Spinal sinirler kısa bir seyir sonrasında ramus anterior ve ramus posterior olmak üzere iki ana dala ayrılarak periferik yapılara dağılır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Radix anterior, sulcus anterolateralisten çıkan düzensiz lif demetlerinden oluşur. Bu kök; columna anterior ve columna lateralisde bulunan motor ve otonom nöronların aksonlarını içerdiğinden temel olarak efferent liflerden meydana gelir. Motor impulsların iskelet kasları ve diğer efektör organlara iletilmesini sağlar. Radix posterior ise sulcus posterolateralisten medulla spinalise giren duysal liflerden oluşmaktadır. Bu lifler ganglion spinalede bulunan psödounipolar nöronların santral uzantılarıdır. Deri, kas, tendon ve eklemlerden gelen duysal impulslar bu yol aracılığıyla medulla spinalise taşınır. Duysal lifler miyelinli ve miyelinsiz olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Ganglion spinale, duysal nöronların hücre gövdelerini içeren oval biçimli bir gangliondur ve radix posterior üzerinde yer alır. Psödounipolar nöronların periferik uzantıları çevreden gelen duyu impulslarını alırken, santral uzantıları medulla spinalise girerek impulsları üst merkezlere iletmektedir. Bu nedenle ganglion spinale, spinal afferent sistemin temel anatomik yapılarından biridir (Arifoğlu, 2024; Ozan, 2005).

Spinal sinirler ile truncus sympathicus arasındaki bağlantılar rami communicantes aracılığıyla sağlanır. Bu bağlantılar, miyelinli liflerden oluşan ramus communicans albus ile miyelinsiz liflerden oluşan ramus communicans griseus arasında meydana gelir. Ramus communicans albus, preganglionik sempatik lifleri truncus sympathicusa taşır. Bu lifler sempatik ganglionlarda sinaps yaptıktan sonra oluşan postganglionik lifler ramus communicans griseus aracılığıyla yeniden spinal sinirlere katılır. Böylece damar düz

kasları, kıl kökü kasları ve ter bezleri gibi yapılara sempatik innervasyon sağlanarak damar tonusu, terleme ve pilomotor aktivite düzenlenir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

2.5. Medulla Spianalis'in İç Yapısı

Medulla spinalis, yapısal ve fonksiyonel özellikleri bakımından gri cevher (substantia grisea) ve beyaz cevher (substantia alba) olmak üzere iki temel bölümden oluşmaktadır. İç kısımda yer alan substantia grisea, ağırlıklı olarak nöron hücre gövdeleri, miyelinsiz sinir lifleri ve nöroglial yapılardan meydana gelirken; dış kısımda bulunan substantia alba esas olarak miyelinli sinir liflerinden oluşmaktadır (Arıncı, 2006; RS, 2019; Standring, 2021).

Gri cevher, fonksiyonel özelliklerine göre organize olmuş nöron toplulukları ve hücre sütunları içermektedir. Bu bölgede bulunan nöron grupları nucleus olarak adlandırılmakta olup motor, duysal ve otonom fonksiyonların düzenlenmesinde görev almaktadır. Beyaz cevher ise merkezi sinir sistemi içerisinde impuls iletimini sağlayan çıkan ve inen sinir yollarını içermektedir. Bu yollar tractus olarak isimlendirilirken, belirli lif toplulukları fasciculus adı verilen demetler şeklinde organize olmaktadır. Böylece medulla spinalis, hem refleks aktivitelerin düzenlenmesinde hem de perifer ile üst merkezler arasındaki sinirsel iletimin sağlanmasında temel rol üstlenmektedir (Arıncı, 2006; Standring, 2021).

Gri Cevher (Substantia Grisea)

Substantia grisea, medulla spinalisin merkezinde yer almakta olup transvers kesitlerde karakteristik olarak “H” harfi veya kelebek görünümünde izlenmektedir. Sağ ve sol gri cevher kitleleri, orta hatta bulunan commissura grisea aracılığıyla birbirine bağlanır. Commissura griseanın merkezinde ependim hücreleri ile döşeli canalis centralis yer almaktadır. Canalis centralisin ön kısmındaki

bölüm commissura grisea anterior, arka kısmındaki bölüm ise commissura grisea posterior olarak adlandırılır (Arifoğlu, 2024; Cumhuriyet et al., 2007; Standring, 2021).

Gri cevher boyunca longitudinal uzanım gösteren sütun şeklindeki yapılar columna olarak isimlendirilir. Bunlar; önde columna anterior, arkada columna posterior ve lateralde columna lateralis şeklinde düzenlenmiştir. Transvers kesitlerde bu bölgeler sırasıyla cornu anterior, cornu posterior ve cornu laterale olarak tanımlanmaktadır (Arifoğlu, 2024; Cumhuriyet et al., 2007).

Gri cevherin miktarı ve şekli medulla spinalisin farklı segmentlerinde değişiklik göstermektedir. Özellikle intumescentia cervicalis ve intumescentia lumbosacralis bölgelerinde gri cevher miktarı belirgin olarak artmıştır. Bunun nedeni, üst ve alt ekstremitelerin innervasyonundan sorumlu somatomotor nöronların ve duysal internöronların bu bölgelerde yoğun bulunmasıdır. Torakal segmentlerde ise gri cevher daha az gelişmiştir. Gri cevherin beyaz cevhere oranının en fazla olduğu bölüm conus medullaristir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Cumhuriyet et al., 2007).

Gri Cevherde Bulunan Hücreler

Gri cevherin temel yapısını multipolar nöronlar, dendritler, yoğun sinir ağı ve zengin vasküler yapılar oluşturmaktadır. Nissl boyası ile boyanan medulla spinalis kesitlerinde, nöron hücre gövdelerinin belirli gruplar halinde organize olduğu görülmektedir. Bu hücre gruplarının bazıları medulla spinalis boyunca devamlılık gösterirken, bazıları yalnızca belirli segmentlerde bulunmaktadır.

Gri cevherdeki nöronlar fonksiyonel özelliklerine göre radiküler hücreler, funiküler hücreler ve iç hücreler olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir (Arifoğlu, 2024; Ozan, 2005). Radiküler hücreler, gri cevherde bulunan en büyük multipolar nöronlardır. Aksonları radix anterior aracılığıyla medulla spinalisi terk ederek efferent lifleri oluşturur. Özellikle columna anterior ve columna

lateralis bölgelerinde yer alırlar. Fonksiyonlarına göre somatomotor, visceromotor ve sekretomotor olarak sınıflandırılırlar. Somatomotor nöronlar iskelet kaslarını, visceromotor nöronlar düz kasları, sekretomotor lifler ise bezleri innerve etmektedir. Bu hücreler tüm segmentlerde bulunmakla birlikte servikal ve lumbosakral genişlemelerde daha yoğun izlenmektedir. Funiküler hücreler de büyük multipolar nöronlardan oluşur. Aksonları beyaz cevhere geçerek çıkan ve inen dallara ayrılır. Uzun lifler farklı segmentlerle bağlantı kurarken, kısa lifler komşu segmentlerle ilişki sağlar. Bu hücreler segmentler arası iletişimde önemli rol oynar. İç hücreler ise kısa aksonlu internöronlardır ve aksonları tamamen gri cevher içerisinde seyretmektedir. Bu hücreler aynı veya farklı segmentlerdeki nöronlar arasında bağlantı kurar. Fonksiyonel olarak kommissural, assosiasyon ve projeksiyon hücreleri şeklinde sınıflandırılır. Kommissural hücreler sağ ve sol yarılar arasında bağlantı sağlarken, assosiasyon hücreleri aynı taraftaki nöronları birbirine bağlar. Projeksiyon hücreleri ise farklı segmentler arasındaki iletişimi düzenler (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Gri cevherin şekli segmentlere göre değişiklik göstermektedir. Servikal bölgede cornu anterior belirgin genişlik gösterirken, torakal segmentlerde cornu laterale daha belirgindir. Lumbal bölgede ise özellikle alt ekstremité innervasyonuna bağlı olarak cornu anterior ve cornu posterior genişlemiştir (Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Substantia Grisea'nın Laminer Organizasyonu

Medulla spinalisin gri cevheri, farklı morfolojik ve fonksiyonel özelliklere sahip nöron gruplarından oluşmaktadır. Nöronların sınıflandırılması büyük ölçüde Nissl boyama özelliklerine dayanmakta olup benzer nöron grupları Rexed laminaları adı verilen tabakalar halinde organize olmaktadır. Rexed

tarafından tanımlanan bu sistemde gri cevher, arka boynuzdan ön boynuza uzanan ve Romen rakamları ile numaralandırılan on laminadan meydana gelmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005)

Lamina I, ağrı ve ısı duyusunun iletiminde görev alan nucleus marginalisi içermektedir. Lamina II ise ağrı duyusunun modülasyonunda önemli rol oynayan substantia gelatinosa bölgesini oluşturmaktadır. Lamina III ve IV'te bulunan nucleus proprius, duysal impulsların işlenmesinde görev almaktadır. Lamina V ve VI'ya proprioseptif afferent lifler ile motor ve duyu kortekslerinden gelen inen lifler ulaşmaktadır. Bu bölgeler somatik duyu bilgilerinin entegrasyonunda önemlidir. Lamina VII'de nucleus intermediolateralis, nucleus intermediomedialis ve nucleus thoracicus gibi otonom ve proprioseptif fonksiyonlarla ilişkili çekirdekler bulunmaktadır. Lamina VIII, üst merkezlerden gelen inen yolların aksonları ile sinaps yapan internöronları içermektedir. Lamina IX ise iskelet kaslarının innervasyonundan sorumlu somatomotor nöronların bulunduğu bölgedir. Lamina X, canalis centralis çevresinde yer almakta olup bazı afferent liflerin sinaps yaptığı alanı oluşturmaktadır. Rexed laminaları, medulla spinalisin fonksiyonel organizasyonunun anlaşılmasında temel anatomik sınıflama sistemlerinden biridir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Formatio Reticularis

Servikal bölgede cornu laterale ile cornu posterior arasında bulunan gri cevher, beyaz cevher içerisine doğru ağsı uzantılar göndermektedir. Bu ağ şeklindeki yapı formatio reticularis olarak adlandırılır. Formatio reticularis, kraniyal yönde bulbus, pons ve mesencephalondaki aynı isimli yapılar ile devamlılık göstermektedir. Merkezi sinir sisteminin farklı merkezleri arasında bağlantı kurulmasında görev alan bu yapı; motor aktivite, duysal

iletim ve otonom fonksiyonların düzenlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Cumhur et al., 2007; Ozan, 2005).

Canalis Centralis

Canalis centralis, medulla spinalisin tüm uzunluğu boyunca uzanan ince bir kanal sistemidir. Kraniyal yönde beynin dördüncü ventrikülü ile devamlılık göstermektedir. Kaudal yönde ise filum terminale içerisinde yaklaşık 5–6 cm kadar devam etmektedir. Conus medullaris düzeyinde yaklaşık 8–10 mm genişleme gösteren bölüm ventriculus terminalis olarak adlandırılmaktadır. Ependim hücreleri ile döşeli olan canalis centralis, beyin omurilik sıvısı (BOS) içermekte olup merkezi sinir sistemi içerisindeki sıvı dolaşımının bir parçasını oluşturmaktadır (Cumhur et al., 2007; Ozan, 2005).

Beyaz Cevher (Substantia Alba)

Substantia alba; miyelinli ve miyelinsiz sinir lifleri, nöroglial hücreler ve kan damarlarından oluşmaktadır. Beyaz görünümünü büyük ölçüde miyelinli liflerden almaktadır. Bu liflerin çoğu longitudinal seyir göstererek merkezi sinir sisteminin farklı merkezleri arasında bağlantı sağlamaktadır. Gri cevheri çevreleyen substantia alba üç ana bölüme ayrılmaktadır. Fissura mediana anterior ile sulcus anterolateralis arasında kalan bölüm funiculus anterior, sulcus anterolateralis ile sulcus posterolateralis arasındaki bölüm funiculus lateralis ve sulcus posterolateralis ile sulcus medianus posterior arasındaki bölüm ise funiculus posterior olarak adlandırılır. Funiculus posterior, servikal ve üst torakal segmentlerde sulcus intermedius posterior tarafından iki demete ayrılır. Medialde fasciculus gracilis, lateralde ise fasciculus cuneatus bulunmaktadır. Bu yollar özellikle propriosepsiyon, vibrasyon ve diskriminatif dokunma duyularının iletiminde görev yapmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Beyaz cevher içerisindeki benzer kökenli ve aynı fonksiyona sahip lifler bir araya gelerek tractus adı verilen demetleri oluşturur.

Bu yollar çıkan ve inen traktuslar olarak sınıflandırılır. Çıkan yollar duysal impulsları periferden üst merkezlere taşırken, inen yollar beyinden kaynaklanan motor impulsları medulla spinalise iletmektedir. Funiculus anterior ve funiculus lateralis hem çıkan hem de inen yolları içerirken, funiculus posterior esas olarak çıkan duysal yolları barındırmaktadır (Arıncı, 2006; Cumhur et al., 2007).

Spinal Refleksler

Refleks, belirli bir uyarıya karşı oluşan istemsiz ve hızlı yanıt olarak tanımlanmaktadır. Spinal reflekslerde oluşan duysal impulslar serebral kortekse ulaşmadan medulla spinalis düzeyinde değerlendirilmekte ve uygun motor yanıt oluşturulmaktadır. Bu refleksler; kas, eklem ve deri gibi yapılarda bulunan reseptörlerden alınan uyarıların medulla spinalis içerisinde işlenmesi sonucunda meydana gelir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Bir spinal refleksin oluşabilmesi için öncelikle periferik reseptörlerin uyarıyı algılaması gerekmektedir. Oluşan duysal impulslar afferent lifler aracılığıyla medulla spinalise taşınır ve burada motor nöronlarla bağlantı kurulur. Daha sonra motor nöronlardan çıkan efferent impulslar efektör organlara ulaşarak refleks yanıtı oluşturur. Bu refleks arkı; reseptör, afferent nöron, refleks merkezi, efferent nöron ve efektör organ olmak üzere temel bileşenlerden oluşmaktadır. Ganglion spinaleda bulunan duyu nöronlarının santral uzantıları, cornu anteriordaki motor nöronlarla doğrudan sinaps yapıyorsa bu refleks tipi monosinaptik refleks olarak adlandırılır. Duyu nöronu ile motor nöron arasında bir veya daha fazla internöron bulunması durumunda ise polisinyaptik reflekslerden söz edilir. Monosinaptik refleksler daha hızlı yanıt oluştururken, polisinyaptik refleksler daha kompleks refleks aktivitelerin meydana gelmesini sağlamaktadır (Arıncı, 2006; Cumhur et al., 2007).

Beyaz Cevherin Laminasyonu

Medulla spinalisin gelişimi sırasında yeni oluşan sinir lifleri, daha önce gelişmiş liflerin dış kısmına eklenerek organize olmaktadır. Bu nedenle aynı fonksiyona ve benzer kökene sahip lifler belirli tabakalar halinde düzenlenir. Beyaz cevherdeki bu somatotopik organizasyon, çıkan ve inen yolların anatomik yerleşimi ile klinik bulguların değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Funiculus posterior içerisinde yükselen liflerde belirgin bir somatotopik dizilim bulunmaktadır. Medial yerleşimli lifler alt vücut bölgelerinden, lateral yerleşimli lifler ise üst vücut bölgelerinden gelen duyuları taşımaktadır. Bu nedenle posterior kordonun medial kısmındaki lezyonlar alt ekstremité, lateral kısmındaki lezyonlar ise üst ekstremité duyularını etkilemektedir. Bu sistem tractus spinobulbaris içerisinde değerlendirilmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Tractus spinothalamicus liflerinde de benzer bir organizasyon bulunmaktadır. Yüzeyel lifler alt vücut bölgelerine, derin lifler ise üst vücut bölgelerine ait duysal impulsları taşımaktadır. Bu nedenle anterolateral sistemdeki yüzeyel lezyonlar alt, derin lezyonlar ise üst ekstremité duyularında kayba yol açmaktadır.

Bulbus düzeyinde çapraz yapan tractus corticospinalis liflerinde de somatotopik düzen korunmaktadır. Yüzeyel lifler alt ekstremitelere, derin lifler ise üst vücut bölgelerine ait motor impulsları taşımaktadır. Medulla spinalisteki en uzun lifler conus medullaristen başlayarak yukarı uzanan lifler olup sulcus medianus posterior yakınında yer almaktadır.

Afferent yollarla taşınan duysal impulsların bir bölümü serebral kortekse ulaşarak bilinçli duyu algısını oluştururken, bir

kısmı medulla spinalis ve beyin sapındaki ara nöronlar aracılığıyla refleks aktivitelerin oluşumuna katılmaktadır.

Basınç, kaba dokunma, ağrı ve ısı duyuları eksteroseptif duyular olup temel olarak tractus spinothalamicus sistemi ile taşınmaktadır. İç organlardan gelen duyular interoseptif duyular olarak adlandırılırken, kas, tendon, bağ ve eklem kapsüllerinden gelen pozisyon duyuları proprioseptif duyuları oluşturmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

3. AFFERENT (İNEN) VE EFFERENT (ÇIKAN) YOLLAR

3.1. Afferent (İnen) Yollar

Medulla spinaliste bulunan afferent yollar, periferden alınan duysal impulsların üst merkezlere iletilmesini sağlamaktadır. Taşınan duyunun özelliğine göre farklı traktuslar görev yapmaktadır. Basınç ve kaba dokunma duyuları ağırlıklı olarak tractus spinothalamicus anterior aracılığıyla funiculus anteriorda taşınırken, ağrı ve ısı duyuları başlıca tractus spinothalamicus lateralis ile tractus spinoreticularis üzerinden funiculus lateralis içerisinde iletilmektedir.

Şuurlu proprioepsiyon, vibrasyon ve diskriminatif dokunma duyuları posterior kordon sistemi aracılığıyla taşınmaktadır. Bu sistem, funiculus posterior içerisinde yer alan fasciculus gracilis ve fasciculus cuneatustan oluşmaktadır. Fasciculus gracilis alt vücut bölgelerinden, fasciculus cuneatus ise üst vücut bölgelerinden gelen duyuları üst merkezlere iletmektedir.

Kas, tendon ve eklemlerden kaynaklanan şuursuz proprioseptif impulslar ise cerebelluma taşınmaktadır. Alt ekstremiteye ait duyular tractus spinocerebellaris anterior ve posterior aracılığıyla, üst ekstremiteye ait duyular ise tractus cuneocerebellaris yoluyla cerebelluma ulaşmaktadır. Bu yollar

hareket koordinasyonu, postür ve denge kontrolünde önemli rol üstlenmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tüm duysal lifler medulla spinalise radix posterior aracılığıyla girmekte olup birinci nöron gövdeleri ganglion spinaleda bulunmaktadır. Bilinçli olarak algılanan duyuların büyük bölümü thalamustaki nucleus ventralis posterolateralis üzerinden serebral kortekse iletilmektedir. Buna karşılık cerebelluma ulaşan şuursuz proprioseptif impulslar, kasların koordineli çalışmasının düzenlenmesine katkı sağlamaktadır.

Mesencephalondaki colliculus superiora ulaşan impulslar görsel reflekslerle ilişkili iken, formatio reticularise ulaşan impulslar ağrı algısı, uyanıklık ve refleks aktivitelerin düzenlenmesinde rol oynamaktadır. Ağrı duyusunun iletiminde özellikle tractus spinothalamicus lateralis, tractus spinoreticularis ve tractus spinotectalis görev almaktadır. Bulbus düzeyinde tractus spinotectalis ile tractus spinothalamicus anterior ve lateralis birlikte lemniscus spinalisi oluşturmaktadır.

Tractus spinothalamicus, tractus spinotectalis, tractus spinoolivaris ve tractus spinocerebellaris anterior lifleri medulla spinalise girdikten sonra çoğunlukla commissura alba anterior aracılığıyla karşı tarafa geçmektedir. Buna karşın tractus spinoreticularis liflerinin büyük bölümü ipsilateral seyretmektedir. Tractus spinocerebellaris posterior lifleri ise nucleus thoracicus sinaps yaptıktan sonra çapraz yapmadan aynı taraf funiculus lateralisinde yükselerek pedunculus cerebellaris inferior aracılığıyla cerebelluma ulaşmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Tractus Spinothalamicus Anterior

Tractus spinothalamicus anterior, funiculus anterior içerisinde fissura mediana anteriorun her iki yanında yer almakta olup basınç ve kaba dokunma duyularının iletiminden sorumludur. Birinci nöronlar ganglion spinaleda bulunur. Psödounipolar

nöronların santral uzantıları radix posterior aracılığıyla medulla spinalise girdikten sonra tractus dorsolateralis içerisinde kısa mesafe ilerler ve substantia gelatinosada sinaps yapar. İkinci nöronların aksonları commissura alba anterior aracılığıyla karşı tarafa geçerek funiculus anterior içerisinde yükselir ve thalamustaki nucleus ventralis posterolateraliste sonlanır. Buradan başlayan üçüncü nöronlar capsula interna ve corona radiata aracılığıyla primer somatosensoriyel kortekse ulaşmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006). Tractus spinothalamicus anterior liflerinde somatotopik organizasyon bulunmaktadır. Alt segmentlerden gelen lifler lateralde, üst segmentlerden gelen lifler ise medialde yer alır. Bu traktusun lezyonlarında belirgin duyu kaybı her zaman oluşmayabilir; çünkü basınç ve dokunma duyuları posterior kordon sistemi aracılığıyla da taşınabilmektedir. Bulbus düzeyinde tractus spinothalamicus anterior, tractus spinothalamicus lateralis ve tractus spinotectalis ile birlikte lemniscus spinalisi oluşturmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Cumhuriyet et al., 2007).

Tractus Spinothalamicus Lateralis

Tractus spinothalamicus lateralis, ağrı ve ısı duyularını üst merkezlere taşıyan temel çıkan yollardan biridir. Funiculus lateralis içerisinde yer almakta olup tractus spinocerebellaris anteriorun medialinde bulunmaktadır. Isı duyusunu taşıyan lifler ağrı liflerinin lateralinde yer almakta ve belirgin bir somatotopik organizasyon göstermektedir. Birinci nöronlar ganglion spinaleda bulunur. Santral uzantılar medulla spinalise girdikten sonra substantia gelatinosada sinaps yapar. İkinci nöronların aksonları commissura alba anterior aracılığıyla karşı tarafa geçerek funiculus lateralis içerisinde yükselir ve thalamusa ulaşır. Buradan başlayan üçüncü nöronlar somatosensoriyel kortekse projekte olmaktadır. Bu traktusta medial lifler üst vücut bölgelerine, lateral lifler ise alt vücut bölgelerine ait duyuları taşımaktadır. Bu somatotopik düzen klinik açıdan önemlidir ve medulla spinalis lezyonlarının lokalizasyonunda yol göstericidir.

Tractus spinothalamicus lateralisin tek taraflı lezyonlarında, lezyon seviyesinin altında ve karşı tarafta ağrı ile ısı duyusu kaybı ortaya çıkmaktadır. Bu durum, liflerin medulla spinalis düzeyinde karşı tarafa çapraz yapması ile ilişkilidir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Tractus Spinocerebellaris Anterior

Tractus spinocerebellaris anterior, alt ekstremitelerden gelen şuursuz proprioseptif duyuların cerebelluma iletilmesini sağlayan çıkan bir yoldur. Birinci nöronlar ganglion spinaleda bulunmakta olup santral uzantıları radix posterior aracılığıyla medulla spinalise girerek nucleus thoracicus sinaps yapmaktadır. İkinci nöronların aksonlarının büyük bölümü karşı tarafa çapraz yaparak funiculus lateralis içerisinde yükselir. Lifler bulbus, pons ve mesencephalonu geçtikten sonra pedunculus cerebellaris superior aracılığıyla cerebelluma ulaşır. Medulla spinalis düzeyinde çapraz yapan bazı liflerin cerebellum seviyesinde tekrar karşı tarafa geçmesi nedeniyle impulslar sonuçta başlangıç aldıkları tarafın cerebellar hemisferine iletilmektedir. Bu yol özellikle hareket koordinasyonu ve postüral kontrolün düzenlenmesinde önemlidir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Cumhuriyet et al., 2007).

Tractus Spinocerebellaris Posterior

Tractus spinocerebellaris posterior, alt ekstremitelerdeki kas, tendon ve eklemlerden gelen şuursuz proprioseptif duyuları cerebelluma taşıyan diğer önemli yoldur. Birinci nöronlar ganglion spinaleda yer almakta olup santral uzantıları medulla spinalise girdikten sonra nucleus thoracicus sinaps yapmaktadır. Buradan başlayan ikinci nöron lifleri çapraz yapmadan aynı tarafın funiculus lateralisinde yükselir ve pedunculus cerebellaris inferior aracılığıyla cerebelluma ulaşır. Bu yol, proprioseptif bilgilerin cerebelluma hızlı iletilmesini sağlayarak postür ve hareket koordinasyonuna katkıda bulunmaktadır. Alt ekstremitelerden gelen şuurlu proprioseptif

duyular ise posterior kordon sistemi aracılığıyla taşınmaktadır. Bu lifler bulbus düzeyinde nucleus gracilis yakınındaki nucleus Z'de sinaps yaptıktan sonra lemniscus medialis sistemi üzerinden thalamusa ve somatosensoriyel kortekse ulaşarak bilinçli proprioseptif algının oluşmasını sağlar (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Cumhuriyet et al., 2007).

Tractus Spinotectalis

Tractus spinotectalis, anterolateral sistem içerisinde yer alan ve tractus spinothalamicus lateralisin anteriorunda bulunan çıkan bir yoldur. Birinci nöronlar ganglion spinalede bulunur. Santral uzantılar medulla spinalise girdikten sonra büyük oranda karşı tarafa geçerek anterolateral bölgede yükselir. Bulbus düzeyinde tractus spinothalamicus anterior ve lateralis ile birlikte lemniscus spinalisi oluşturur ve lifler mesencephalondaki colliculus superiorda sonlanır. Bu yolun özellikle spinovisual refleksler ile ani ağrılı ve termal uyarılara karşı gelişen refleks baş-göz hareketlerinin düzenlenmesinde rol oynadığı düşünülmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Cumhuriyet et al., 2007).

Tractus Spinoreticularis

Tractus spinoreticularis, ağrı duyusunun iletiminde görev alan önemli çıkan yollardan biridir. Birinci nöronlar ganglion spinalede yer alır. Santral uzantıların büyük bölümü ipsilateral olarak yükselirken, bir kısmı commissura alba anterior aracılığıyla karşı tarafa geçmektedir. Lifler anterolateral sistem içerisinde yükselerek bulbus, pons ve mesencephalondaki formatio reticularis çekirdeklerinde sonlanır. Bu yol özellikle ağrının emosyonel, otonomik ve uyanıklık ile ilişkili bileşenlerinin düzenlenmesinde rol oynamaktadır. Ağrı duyusu üst merkezlere başlıca tractus spinothalamicus lateralis, tractus spinoreticularis ve tractus spinotectalis aracılığıyla iletilmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Cumhuriyet et al., 2007).

Tractus Spinoolivaris Anterior ve Posterior

Tractus spinoolivaris anterior ve posterior, deri, yüzeysel kaslar ve tendonlardan gelen propioseptif impulsların cerebelluma iletilmesinde görev alan yollardır. Birinci nöronlar ganglion spinaleda bulunur. Santral uzantılar medulla spinalise girdikten sonra çoğunlukla commissura alba anterior aracılığıyla karşı tarafa geçerek bulbus düzeyine yükselir. Lifler nucleus olivaris accessorius posterior ve nucleus olivaris accessorius medialis içerisinde sinaps yaptıktan sonra pedunculus cerebellaris inferior aracılığıyla cerebelluma ulaşır ve tractus olivocerebellaris oluşturur. Bazı liflerin yeniden çapraz yaptığı bildirilmekte olup, böylece propioseptif impulsların başlangıç aldıkları tarafın cerebellar hemisferine iletiildiği düşünülmektedir. Bu yollar hareket koordinasyonu ve motor kontrolün düzenlenmesinde görev almaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Fasciculus Gracilis ve Fasciculus Cuneatus (Tractus Spinobulbaris)

Fasciculus gracilis ve fasciculus cuneatus, funiculus posterior içerisinde yer alan önemli çıkan duysal yollardır ve birlikte tractus spinobulbaris sistemi olarak değerlendirilmektedir. Fasciculus gracilis medialde, fasciculus cuneatus ise lateralde bulunmaktadır. Fasciculus gracilis medulla spinalisin tüm segmentleri boyunca devam ederken, fasciculus cuneatus genellikle altıncı torakal segmentin üzerindeki spinal segmentlerden gelen lifleri içermektedir. Bu yollar; kas, tendon, bağ ve eklem kapsüllerinden gelen şuurlu propioseptif duyular ile vibrasyon ve diskriminatif dokunma duyularını taşımaktadır. Fasciculus gracilis daha çok alt ekstremit ve alt gövdeye ait duyuları iletirken, fasciculus cuneatus üst ekstremit ve üst gövdeye ait duyuların taşınmasından sorumludur. Bu yolların birinci nöronları ganglion spinaleda bulunur. Santral uzantılar medulla spinalise girdikten

sonra çapraz yapmadan funiculus posterior içerisinde yükselir ve bulbus düzeyinde nucleus gracilis ile nucleus cuneatus içerisinde sonlanır. Buradan başlayan ikinci nöron lifleri çapraz yaparak lemniscus medialis sistemine katılır ve thalamusa ulaşır. Daha sonra üçüncü nöronlar aracılığıyla somatosensoriyel kortekse projekte olur. şuursuz proprioseptif duyular ise bu sistemden farklı olarak tractus spinocerebellaris yolları ile cerebelluma taşınmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

3.2. EFFERENT (İNEN) YOLLAR

İnen yollar, genel olarak pyramidal ve extrapyramidal sistem olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Bu yolların büyük bölümü serebral korteksten köken alırken, daha küçük bir kısmı mesencephalon, pons ve bulbus gibi beyin sapı yapılarından başlamaktadır. İnen yollar temel olarak iskelet kaslarının istemli hareketleri, motor koordinasyonu ve kas tonusunun düzenlenmesinde görev almaktadır. Bu sistemler genel somatik efferent sistem içerisinde değerlendirilmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tractus Corticospinalis

Tractus corticospinalis, istemli motor hareketlerin kontrolünden sorumlu en önemli pyramidal yoldur. Yolun birinci nöronları frontal ve parietal loblarda yer alan primer ve sekonder motor korteks alanlarındaki pyramidal hücrelerdir. Bu hücrelerin aksonları başlangıçta corona radiata içerisinde dağınık şekilde seyrettikten sonra capsula internanın crus posteriusundan geçer. Burada gövde kaslarına ait lifler daha anterior, alt ekstremiteye ait lifler ise daha posterior yerleşim göstermektedir. Lifler daha sonra mesencephalondaki crus cerebri, pons ve bulbus boyunca ilerler. Bulbusun alt kısmında liflerin büyük bölümü karşı tarafa çapraz yapar ve bu bölge decussatio pyramidorum olarak adlandırılır. Çapraz yapan lifler funiculus lateralis içerisinde tractus

corticospinalis lateralis olarak aşağı iner. Çapraz yapmayan liflerin bir bölümü tractus corticospinalis anterioru oluştururken, küçük bir kısmı ipsilateral olarak seyretmektedir.

Tractus corticospinalis lateralis, funiculus lateralis içerisinde cornu posteriorun anterolateralinde yer almakta ve medulla spinalisin tüm segmentleri boyunca uzanmaktadır. Lifler sonlanacakları segmentlerde doğrudan veya internöronlar aracılığıyla cornu anteriordaki motor nöronlarla sinaps yapar. Doğrudan bağlantılar özellikle distal ekstremitelerin ince motor hareketlerinde, internöron aracılı bağlantılar ise gövde ve proksimal kasların kontrolünde önemlidir. Bu sistem sayesinde sağ serebral hemisfer vücudun sol yarısını, sol hemisfer ise sağ yarısını kontrol etmektedir.

Kortikospinal lifler seyirleri boyunca nucleus caudatus, nucleus lentiformis, nucleus ruber, nucleus olivaris inferior ve formatio reticularis gibi merkezlerle bağlantı kurmaktadır. Ayrıca bu yol içerisinde somatotopik organizasyon bulunmakta olup yüzeyel lifler alt, derin lifler ise st vücut bölgelerine ait impulsları taşımaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tractus Corticospinalis Anterior

Tractus corticospinalis anterior, fissura mediana anteriorun her iki yanında yer alan ve özellikle gövde kaslarının motor kontrolünde görev yapan pyramidal bir yoldur. Liflerin yaklaşık %8'i bulbus düzeyinde çapraz yapmadan aşağı iner ve sonlanacağı segment düzeyinde commissura alba anterior aracılığıyla karşı tarafa geçer. Daha sonra çoğunlukla internöronlar aracılığıyla cornu anteriordaki motor nöronlarla sinaps yapmaktadır. Bu yol özellikle boyun ve st torakal bölgedeki kasların kontrolünde görev almaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Beyin Korteksindeki Motor Alanlar

Motor fonksiyonların düzenlenmesinde serebral korteksin belirli bölgeleri görev yapmaktadır. Primer motor korteks, gyrus precentralis ve lobulus paracentraliste yer almakta olup Brodmann'ın 4. alanına karşılık gelmektedir. Bu bölgedeki somatotopik organizasyon motor homunculus olarak tanımlanır. Baş, yüz ve üst ekstremiteler lateral bölgede; alt ekstremiteler ise medial yüzde temsil edilmektedir. Sekonder motor alanlar Brodmann'ın 6., 8., 44. ve 45. alanlarını kapsamaktadır. Premotor korteks ve suplementer motor alan hareketlerin planlanması, organizasyonu ve koordinasyonunda önemli rol oynamaktadır. Primer motor korteks ise özellikle distal ekstremitelerin ince ve beceri gerektiren hareketlerinin kontrolünden sorumludur (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tractus Corticonuclearis

Primer ve sekonder motor korteks alanlarından köken alarak beyin sapındaki kranial sinir motor çekirdeklerine ulaşan lifler tractus corticonuclearis olarak adlandırılmaktadır. Bu yol özellikle Brodmann'ın 4., 6. ve 8. alanlarından kaynaklanmaktadır. Sekizinci alandan çıkan lifler, göz hareketlerini kontrol eden nervus oculomotorius, nervus trochlearis ve nervus abducens çekirdekleri ile bağlantı kurmaktadır. Ayrıca colliculus superior ve nucleus pretectalis ile ilişkili lifler göz hareketlerine ait refleks mekanizmalarda görev almaktadır. Somatosensoriyel korteksten çıkan bazı lifler ise nucleus gracilis, nucleus cuneatus, nucleus pontis nervi trigemini ve nucleus solitarius gibi duysal çekirdeklerle bağlantı kurmaktadır. Primer motor korteks, sekonder motor alanlar, somatosensoriyel korteks ve formatio reticularis arasında yoğun bağlantılar bulunmaktadır. Özellikle nervus trigeminus, nervus facialis, nervus vagus, nervus accessorius ve nervus hypoglossusun

motor çekirdekleri kortikal motor alanlardan doğrudan lif almaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tractus Vestibulospinalis

Tractus vestibulospinalis, funiculus anterior içerisinde yer alan ve medulla spinalisin tüm segmentleri boyunca uzanan önemli extrapyramidal yollardan biridir. Yolun birinci nöronları medulla oblongatada bulunan nucleus vestibularis lateralis içerisinde yer almaktadır. Bu çekirdek iç kulak ve cerebellumdan gelen impulsları alarak postür ve denge mekanizmalarının düzenlenmesine katkı sağlamaktadır. Nucleus vestibularis lateralisden çıkan lifler çapraz yapmadan ipsilateral olarak aşağı iner ve medulla spinaliste motor nöronlarla doğrudan veya internöronlar aracılığıyla bağlantı kurar. Bu yol özellikle kas tonusunun düzenlenmesi, postürün korunması ve denge kontrolünde görev yapmakta, ekstansör kasların aktivitesini kolaylaştırmaktadır. Nucleus vestibularis medialisden çıkan lifler ise fasciculus longitudinalis medialis içerisinde seyrederek medulla spinalis düzeyinde fasciculus sulcomarginalisi oluşturmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tractus Reticulospinalis

Tractus reticulospinalis, formatio reticularisten köken alan extrapyramidal motor yolların genel adıdır ve tractus pontoreticulospinalis ile tractus bulboreticulospinalis olmak üzere iki bölümde incelenmektedir. Pons kaynaklı liflerin büyük kısmı ipsilateral olarak aşağı inerken, küçük bir bölümü sonlanacağı segmentte karşı tarafa geçmektedir. Bu lifler internöronlar aracılığıyla cornu anteriordaki motor nöronlarla bağlantı kurar. Bazı liflerin nervus phrenicus ve nervi intercostales çekirdeklerinde sonlanması nedeniyle solunum fonksiyonlarının düzenlenmesine katkı sağladığı düşünülmektedir. Bulbus kaynaklı lifler ise funiculus lateralis içerisinde seyretmekte ve çoğunlukla sonlanacakları segment düzeyinde çapraz yapmaktadır. Tractus reticulospinalis

yolları; istemli hareketlerin düzenlenmesi, postüral reflekslerin kontrolü, kas tonusunun ayarlanması ve yürüme gibi karmaşık motor aktivitelerin koordinasyonunda önemli rol oynamaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tractus Tectospinalis

Tractus tectospinalis, funiculus anterior içerisinde seyreden extrapyramidal motor yollardan biridir. Bu yolun lifleri mesencephalonda bulunan colliculus superiordan köken alır. Lifler kısa bir seyir sonrasında karşı tarafa çapraz yapar ve bu çaprazlaşma decussatio tegmentalis dorsalis ya da Meynert çaprazı olarak adlandırılır. Yol özellikle üst servikal medulla spinalis segmentlerinde sonlanmaktadır. Tractus tectospinalis; görsel ve işitsel uyaranlara karşı baş ile boynun refleks hareketlerinin düzenlenmesinde görev almaktadır. Özellikle ani seslere yönelme veya hareketli bir objenin göz ve baş hareketleriyle takip edilmesi gibi refleks aktivitelerde rol oynadığı kabul edilmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006; Ozan, 2005).

Tractus Olivospinalis

Tractus olivospinalis, medulla oblongatada bulunan nucleus olivaris inferiordan köken alan liflerden oluşmaktadır. Bu yolun lifleri özellikle servikal medulla spinalis segmentlerinde bulunan ön boynuz motor nöronları ile bağlantı kurmaktadır. Fonksiyonunun tam olarak açıklığa kavuşmadığı bildirilmekle birlikte motor koordinasyon ve kas tonusunun düzenlenmesinde rol oynadığı düşünülmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Tractus Rubrospinalis

Tractus rubrospinalis, funiculus lateralis içerisinde yer alan önemli extrapyramidal motor yollardan biridir. Bu yol mesencephalonda bulunan nucleus ruberden başlar. Buradan çıkan lifler kısa süre içerisinde karşı tarafa çapraz yapar ve bu çaprazlaşma

decussatio tegmentalis ventralis ya da Forel aprazı olarak adlandırılır. Çapraz yapan lifler medulla spinalis boyunca ilerleyerek doğrudan ya da internöronlar aracılığıyla ön boynuz motor nöronları ile bağlantı kurmaktadır. Tractus rubrospinalis özellikle fleksör kasların aktivitesini kolaylaştırıcı etki göstermekte ve istemli hareketlerin koordinasyonunda görev almaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Funiculus Posterior'daki İnen Yollar

Funiculus posterior içerisinde yalnızca çıkan duysal yollar değil, kısa inen lif demetleri de bulunmaktadır. Posterior kordon sistemine giren afferent lifler uzun çıkan ve kısa inen dallara ayrılmaktadır. Uzun çıkan lifler fasciculus gracilis ve fasciculus cuneatusu oluştururken, kısa inen lifler medulla spinalisin belirli segmentlerinde küçük demetler halinde izlenmektedir. Torakal bölgede fasciculus gracilis ile fasciculus cuneatus arasında yer alan inen lifler kesitlerde virgöl şeklinde görünüm oluşturur ve bu nedenle Fasciculus interfascicularis ya da Schultz'un virgöl demeti olarak adlandırılır. Alt torakal bölgede bulunan benzer lif demetleri ise Fasciculus septomarginalis olarak isimlendirilmektedir. Fasciculus septomarginalis, alt torakal segmentlerde oval görünüm göstermesi nedeniyle Flechsig'in oval alanı olarak tanımlanırken, sakral bölgede üçgenimsi görünüm kazanması nedeniyle Philippe-Gombault üçgeni olarak da adlandırılmaktadır. Bu kısa inen liflerin segmentler arası refleks bağlantılar ve spinal koordinasyonda rol oynadığı düşünülmektedir (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

İntersegmental Lifler

İntersegmental lifler, medulla spinalisin farklı segmentleri arasında bağlantı kurulmasını sağlayan kısa çıkan ve inen lif demetleridir. Bu lifler funiculus anterior, funiculus lateralis ve funiculus posterior içerisinde, gri cevhere yakın bölgelerde yer almaktadır. Columna anterior ve columna posterior çevresinde

yoğunlaşan bu lifler beyaz cevher içerisinde kısa mesafeli bağlantılar oluşturarak segmentler arası iletişimi sağlamaktadır. Bu lifler spinal reflekslerin koordinasyonunda önemli rol oynamaktadır. Özellikle bir segmentte oluşan impulsların komşu segmentlere iletilmesine katkı sağlayarak intersegmental refleks mekanizmalarının oluşumuna katılırlar. Medulla spinalis segmentlerini birbirine bağlamaları nedeniyle bu lifler tractus spinospinalis olarak da adlandırılmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Fasciculus Sulcomarginalis

Fasciculus sulcomarginalis, fasciculus longitudinalis medialisin medulla spinalis içerisindeki devamı olarak kabul edilmektedir. Özellikle servikal segmentlerde belirgin olan bu yapı, fissura mediana anteriorun her iki yanında uzanmaktadır. Fonksiyonel açıdan fasciculus proprius anterior ile benzer özellik göstermektedir. Bu yol, beyin ile medulla spinalis arasında bağlantı kurarak özellikle görme ve denge ile ilişkili refleks hareketlerin koordinasyonunda görev almaktadır. Baş, boyun ve üst ekstremiteler kaslarının uyumlu refleks hareketlerinin düzenlenmesine katkı sağlamaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

Fasciculus Longitudinalis Medialis

Fasciculus longitudinalis medialis, beyin sapı ile medulla spinalis boyunca uzanan önemli bir bağlantı sistemidir. Bu yol nucleus interstitialis, colliculus superior, formatio reticularis pontis ve nucleus vestibularis medialis gibi merkezlerden lifler almaktadır. Beyin sapında özellikle nervus oculomotorius, nervus trochlearis, nervus abducens, nervus facialis ve nervus hypoglossusun çekirdekleri arasında bağlantılar kurmaktadır. Medulla spinaliste fasciculus sulcomarginalis olarak devam eden bu sistem; göz, baş, boyun ve üst ekstremitelerin koordineli hareketlerinin sağlanmasında önemli rol oynamaktadır. Özellikle vestibüler ve

görsel uyaranlara karşı gelişen refleks hareketlerin düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır (Arifoğlu, 2024; Arıncı, 2006).

KAYNAKÇA

Arifoğlu, Y. (2024). Her Yönüyle Anatomi (4. baskı).

Arıncı, K. (2006). *Anatomi 2. cilt: Dolaşım sistemi, periferik sinir sistemi, merkezi sinir sistemi, duyu organları*: Güneş kitapevi.

Colas, J. F., & Schoenwolf, G. C. (2001). Towards a cellular and molecular understanding of neurulation. *Developmental dynamics: an official publication of the American Association of Anatomists*, 221(2), 117-145.

Cumhur, M., Sargon, M. F., Sürücü, H. S., İlgi, S., Sancak, B., Taner, D., . . . Mürvet, T. (2007). *Fonksiyonel nöroanatomi*: ODTÜ Geliştirme Vakfı.

Gribaudo, S., Robert, R., van Sambeek, B., Mirdass, C., Lyubimova, A., Bouhali, K., . . . Nedelec, S. (2024). Self-organizing models of human trunk organogenesis recapitulate spinal cord and spine co-morphogenesis. *Nature biotechnology*, 42(8), 1243-1253.

Iyer, N. R., & Ashton, R. S. (2022). Bioengineering the human spinal cord. *Frontiers in cell and developmental biology*, 10, 942742.

Lee, J.-H., Shin, H., Shaker, M. R., Kim, H. J., Park, S.-H., Kim, J. H., . . . Kwak, T. H. (2022). Production of human spinal-cord organoids recapitulating neural-tube morphogenesis. *Nature Biomedical Engineering*, 6(4), 435-448.

Li, X., Andrusivova, Z., Czarnewski, P., Langseth, C. M., Andersson, A., Liu, Y., . . . Hu, L. (2023). Profiling spatiotemporal gene expression of the developing human spinal cord and implications for ependymoma origin. *Nature neuroscience*, 26(5), 891-901.

Ozan, H. (2005). 2. baskı. *Ankara, Türkiye, Klinisyen Tıp Kitabevleri*, 194-195.

RS, S. (2019). Snell's Clinical Neuroanatomy. (Splittgerber R, ed.). In: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins.

Saade, M., & Martí, E. (2025). Early spinal cord development: from neural tube formation to neurogenesis. *Nature Reviews Neuroscience*, 26(4), 195-213.

Sagner, A., & Briscoe, J. (2019). Establishing neuronal diversity in the spinal cord: a time and a place. *Development*, 146(22).

Santos, C., Marshall, A. R., Murray, A., Metcalfe, K., Narayan, P., de Castro, S. C., . . . Copp, A. J. (2024). Spinal neural tube formation and tail development in human embryos. *Elife*, 12, RP88584.

Shi, Y., Huang, L., Dong, H., Yang, M., Ding, W., Zhou, X., . . . Wang, M. (2024). Decoding the spatiotemporal regulation of transcription factors during human spinal cord development. *Cell research*, 34(3), 193-213.

Standring, S. (2021). *Gray's Anatomy E-Book: Gray's Anatomy E-Book*: Elsevier Health Sciences.

Yu, K., McGlynn, S., & Matise, M. P. (2013). Floor plate-derived sonic hedgehog regulates glial and ependymal cell fates in the developing spinal cord. *Development*, 140(7), 1594-1604.

Yu, Y., Pan, M., Cai, Q., Feng, Z., Cai, B., Lin, K., . . . Ma, Y. (2025). Spatiotemporal dynamics of neuron differentiation and migration in the developing human spinal cord. *Journal of Genetics and Genomics*.

Zeng, B., Liu, Z., Lu, Y., Zhong, S., Qin, S., Huang, L., . . . Shi, Y. (2023). The single-cell and spatial transcriptional landscape of human gastrulation and early brain development. *Cell stem cell*, 30(6), 851-866. e857.

Zhang, Q., Wu, X., Fan, Y., Jiang, P., Zhao, Y., Yang, Y., . . .
Han, J. (2021). Single-cell analysis reveals dynamic changes of
neural cells in developing human spinal cord. *The EMBO Reports*,
22(11), EMBR202152728.

BÖLÜM 3

BEYİN SAPI (TRUNCUS ENCEPHALI)

Sefa SÖNMEZ¹

Giriş

Truncus encephali, diğer adıyla beyin sapı, merkezi sinir sisteminde medulla spinalis ile diencephalon arasında yer alan ve yapısal ile işlevsel açıdan hayati öneme sahip bölümdür. Beyin ile medulla spinalis arasında köprü görevi kurar. Çok sayıda kraniyal sinir çekirdeği ile inen ve çıkan sinir yollarını içeren beyin sapı; motor, duyuşal, otonomik ve yaşamsal refleks fonksiyonlarının düzenlenmesinde kritik rol oynar. Anatomik olarak aşağıdan yukarıya doğru medulla oblongata (bulbus), pons ve mesencephalon olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.

1-) MEDULLA OBLONGATA (BULBUS)

Medulla oblongata, beyin sapının en alt bölümünü oluşturur ve canlının yaşamsal fonksiyonlarının düzenlenmesinde kritik rol oynar. Solunum ritminin düzenlenmesi, kardiyovasküler kontrol, kan basıncının regülasyonu ve refleks aktivitelerin

¹ Arş. Gör. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tıp Fakültesi Anatomi Anabilim Dalı.sefa.sonmez@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5532-9856

koordinasyonunda temel merkezleri içerir. Ayrıca öksürme, aksırma, yutma ve kusma refleks merkezleri de bu bölgede yer almaktadır.

Medulla Oblongata'nın Dış Yapısı

Medulla oblongata'nın anatomik olarak konumu, medulla spinalis'in hemen üstünde, pons'un altında ve cerebellum'un ise önünde yer almaktadır. Pedunculus cerebellaris inferior aracılığıyla cerebellum ile bağlantı kurar. Medulla oblongata'nın medulla spinalis ile olan alt sınırını, kafa tabanında foramen magnum hizasından geçen transvers bir çizgi oluşturur. Yumuşak dokuda ise decussatio pyramidum seviyesi esas alınır. Bu bölgede beyinden gelen liflerin yaklaşık %90'ı karşı tarafa çapraz yaparak geçer ve motor iletimin kontralateral organizasyonunu sağlar. Bulbus'un üst sınırı ise sulcus bulbopontinus ile, arka yüzde ise ventriculus quartus'un recessus lateralis çıkıntılarını birleştiren hayali çizgi ile belirlenir.

Medulla oblongata'nın ön, yan ve arka olmak üzere dört yüzü bulunmaktadır. Ön yüzde, medulla spinalis'te bulunan fissura mediana anterior'un devamı niteliğinde olan oluk yine aynı isimle, fissura mediana anterior olarak adlandırılır. Bu oluğun sulcus bulbopontinus ile birleştiği noktada foramen caecum yer alır. Fissura mediana anterior'un her iki yanında, başlıca tractus corticospinalis lifleri tarafından oluşturulan longitudinal kabartılar pyramis bulbi olarak isimlendirilir. Pyramis bulbi'ler aşağıya doğru incelenerek birbirleriyle çaprazlaşır ve decussatio pyramidum'u oluşturur. Pyramis bulbi'lerin lateralinde sulcus anterolateralis'ler yer alır. Bu olukların da lateralinde bulunan belirgin oval kabartı oliva (zeytin çekirdeği) olarak adlandırılır ve içerisinde nucleus olivaris inferior bulunur. Oliva'nın medialindeki sulcus anterolateralis'ten nervus hypoglossus (XII) kökleri çıkarken, oliva'nın arkasında yer alan sulcus retroolivaris'ten ise sırasıyla nervus glossopharyngeus (IX), nervus vagus (X) ve nervus accessorius'un (XI) kranial kökü beyin

sapını terk eder. Medulla oblongata ile pons arasındaki sınırı oluşturan sulcus bulbopontinus'tan ise nervus abducens (VI), nervus facialis (VII) ve nervus vestibulocochlearis (VIII) beyin sapından çıkar.

Medulla oblongata'nın arka yüzü üst ve alt olmak üzere iki bölümde incelenir. Üst bölüm, fossa rhomboidea'nın inferior üçgenini oluşturarak ventriculus quartus'un tabanına katılır. Alt bölüm ise medulla spinalis'in kalınlaşarak devam eden kısmı niteliğindedir. Bu bölümün orta hattında, medulla spinalis'teki sulcus medianus posterior'un devamı olan aynı isimli oluk yer alır. Bunun lateralinde sulcus intermedius posterior, daha dışta ise sulcus posterolateralis bulunur. Sulcus medianus posterior ile sulcus intermedius posterior arasında, fasciculus gracilis liflerinin sonlandığı nucleus gracilis'in kabartısı tuberculum gracile yer alır. Sulcus intermedius posterior ile sulcus posterolateralis arasında, fasciculus cuneatus'un liflerinin sonlandığı nucleus cuneatus'un kabartısı tuberculum cuneatum bulunur. Bu çekirdekler, duyuşal iletilerin önemli bileşenlerinden olan tractus spinobulbaris liflerinin sonlandığı merkezlerdir.

Medulla Oblongata'nın İç Yapısı

Medulla oblongata'nın iç yapısı medulla spinalis'te olduğu gibi temel olarak substantia grisea (gri madde) ve substantia alba (beyaz madde) olmak üzere iki ana bileşenden meydana gelir. Gri madde, duyu ve motor fonksiyonların düzenlenmesinde görev alan nöronların çekirdeklerini oluştururken; beyaz madde, bu çekirdekler arasında ve merkezi sinir sisteminin diğer bölgeleriyle bağlantıları sağlayan aksonlardan oluşur. Bu aksonlar, fonksiyonel sinir yolları halinde organize olarak hem yukarı (afferent) hem de aşağı (efferent) yönde bilgi iletimini sağlar ve böylece medulla oblongata'nın temel iletim ve düzenleme işlevlerine katkı sağlar.

Medulla Oblongata İçerisinde Yer Alan Çekirdekler

1. **Nucleus gracilis (Goll çekirdeği):** Nucleus gracilis medulla oblongata'nın dorsal bölümünde yer alan ve vücudun alt yarısından (T₆ seviyesinin altı) gelen bilinçli propriosepsiyon, vibrasyon ve ince dokunma duyularının taşıyan fasciculus gracilis'e ait liflerin ikinci nöronlarının yer aldığı çekirdektir.
2. **Nucleus cuneatus (Burdach çekirdeği):** Nucleus cuneatus gövdenin üst kısmı (C₁-T₇ segmentler arası) ile üst ekstremitelerden gelen ince dokunma, vibrasyon ve bilinçli propriosepsiyon duyularının iletiminde görev alan fasciculus cuneatus liflerine ait ikinci nöronların bulunduğu çekirdektir.
3. **Nucleus cuneatus accessorius:** C₁-T₁ segmentlerinden gelen bilinçsiz proprioseptif duyuları taşıyan liflerin ikinci nöronlarını içerir. Bu çekirdekteki nöronların aksonları tractus cuneocerebellaris'i oluşturarak gövdenin üst bölümü ve üst ekstremitelerden gelen derin duyu bilgilerini beyinciğe ileterek postürün düzenlenmesi ve hareket koordinasyonunun sağlanmasında önemli rol oynar.
4. **Nuclei reticulares:** Bu çekirdek grubu beyin sapının tüm bölümlerinde bulunur. Uyku, uyanıklık, motor kontrol ve hayati fonksiyonların (solunum-dolaşım) düzenlenmesinde merkezî rol oynar.
5. **Nuclei olivares inferiores:** Oliva'nın hemen altında yer alır. Histolojik kesitlerde kıvrımlı yapısı nedeniyle dantel benzeri bir görünüm sergiler ve bu nedenle oliva düzeyinden geçen kesitlerde bulbus'un en karakteristik morfolojik oluşumlarından birini

oluşturur. İstemli kas hareketlerinin koordinasyonunda cerebellum ile birlikte görev alır.

6. **Nucleus arcuatus:** Pyramis bulbi'nin hemen önünde yer alan bu çekirdek, kemoreseptör özelliği nedeniyle solunum ritmi ve hızının düzenlenmesinde önemli rol oynar.
7. **Nucleus spinalis nervi trigemini:** Medulla oblongata'nın dış yüzeyinde bulunan tuberculum trigeminale'nin içerisinde yer alır. Yaklaşık C₃ segmentten başlayıp pons'a kadar uzanır. Baş ve yüz bölgesinden gelen ağrı ve ısı duyularının ikinci nöronlarının bulunduğu çekirdektir. Birinci nöronlar ise nervus trigeminus (V), nervus facialis (VII), nervus glossopharyngeus (IX) ve nervus vagus'un (X) ganglionlarında bulunur.
8. **Nucleus ambiguus:** Nervus glossopharyngeus, nervus vagus ve nervus accessorius'un (XI) kranial parçasına ait ortak motor çekirdek olan nucleus ambiguus'tan çıkan özel visseral efferent lifler, ilgili kranyal sinirler aracılığıyla m. tensor veli palatini dışında damak kaslarını, yutak, gırtlak ve özofagusun üst bölümündeki çizgili kasları innerve eder. Bu kas gruplarının koordineli çalışması; konuşma, yutma ve solunum fonksiyonlarının düzenli şekilde yürütölmesi açısından büyük önem taşır. Ayrıca bu çekirdek, kardiyovasküler sistem ile ilişkili presinaptik parasempatik lifler de içerdiğinden kalp hızının düzenlenmesinde de rol oynar.
9. **Nucleus tractus solitarius:** Bu çekirdek, nervus facialis, nervus glossopharyngeus ve nervus vagus'un ortak duyu çekirdeğidir. Organlardan gelen genel

visseral afferent lifler ile dilden tat duyusunu taşıyan özel visseral afferent lifler burada sonlanır. Fonksiyonel açıdan incelendiğinde üst ve alt olmak üzere iki bölümden oluşur. Üst bölümde tat duyusuna ait ikinci nöronlar yer alırken, alt bölüm kardiyovasküler, solunum ve gastrointestinal sistem fonksiyonlarının refleks kontrolünde görev alır.

10. **Nucleus salivatorius inferior:** Nervus glossopharyngeus'un parasempatik çekirdeğidir. Buradan çıkan preganglionik parasempatik lifler, ganglion oticum'da sinaps yaptıktan sonra n. auriculotemporalis aracılığıyla glandula parotidea, glandulae palatinae ve nazofarinks mukozasında bulunan bezlerin sekresyonunu sağlar.
11. **Nucleus dorsalis nervi vagi:** Dördüncü ventrikülün tabanında yer alır. Nervus vagus'a ait parasempatik preganglionik nöronları içerir. Bulbus'un arka yüzünde trigonum nervi vagi olarak adlandırılan üçgensel kabarıklığın yapar. Bu çekirdekten köken alan genel visseral efferent lifler, kalp kası, düz kaslar ve visseral bezlerin parasempatik innervasyonunu gerçekleştirir; ayrıca flexura coli sinistra'ya kadar olan sindirim kanalının parasempatik innervasyonunda rol oynar.
12. **Nucleus nervi hypoglossi:** Nervus hypoglossus'un (XII) motor çekirdeğidir. Bulbus'un arka yüzünde trigonum nervi hypoglossi denilen üçgen şeklindeki kabartıyı oluşturur. Bu çekirdekten köken alan lifler, m. palatoglossus hariç dilin intrinsik ve ekstrinsik kaslarını innerve ederek dil hareketlerinin motor kontrolünü gerçekleştirir.

13. **Nuclei vestibulares:** İç kulaktaki denge organlarından gelen bilgileri işleyen, vücut dengesi, göz hareketleri ve postürün düzenlenmesinde rol alan kompleks çekirdek grubu'dur. Bu grup; nucleus vestibularis medialis, nucleus vestibularis lateralis, nucleus vestibularis superior ve nucleus vestibularis inferior olmak üzere dört çekirdekten oluşur. Anatomik olarak ponsun kaudal bölümü ile medulla oblongata'nın rostral kısmının birleşim yerinde, dördüncü ventrikülün tabanında yerleşim gösterirler. Bu çekirdeklerden çıkan efferent lifler medulla spinalis, cerebellum ve göz kaslarını kontrol eden çekirdeklere gider.
14. **Nuclei cochleares:** İşitme ile doğrudan ilişkili olan ve beyin sapında pons ile medulla oblongata sınırında, pedunculus cerebellaris inferior'un ön kısmı ile recessus lateralis seviyesinde yerleşim gösterirler. Nucleus cochlearis anterior ve nucleus cochlearis posterior olmak üzere iki çekirdekten oluşur. Nucleus cochlearis içerisinde işitme yolunun ikinci nöronları bulunur. İşitsel bilgiler, iç kulakta yer alan organum spirale tarafından algılanır ve n. cochlearis aracılığıyla beyin sapındaki nuclei cochleares'lere iletilir. Buradan çıkan lifler, işitme yolunun üst merkezlerine ilerleyerek başta lobus temporalis'te Brodmann'ın 41 ve 42 nolu sahalarına ulaşır. İşitmenin algılanması, yön tayini, sesin şiddeti ve frekansların değerlendirilmesinde son derece önemli rol oynarlar.

Medulla Oblongata ile Cerebellum Arasında Uzanan Afferent-Efferent Yollar

1. Tractus spinocerebellaris posterior
2. Tractus vestibulocerebellaris
3. Tractus reticulocerebellaris
4. Tractus cuneocerebellaris
5. Tractus olivocerebellaris
6. Tractus cerebelloolivaris
7. Tractus cerebellovestibularis
8. Tractus cerebelloreticularis

Medulla Oblongata'nın Kanlanması

Medulla oblongata'nın arteriyel vaskülarizasyonu a. vertebralis (a. subclavia'nın dalı), a. spinalis anterior (a.vertebralis'in dalı), a. spinalis posterior (a. vertebralis'in dalı), a. basilaris (a. vertebralis'in dalı) ve a. inferior posterior cerebelli (a. vertebralis'in dalı) tarafından gerçekleştirilir. Venöz dolaşım ise v. vertebralis, v. spinalis anterior ve v. spinalis posterior aracılığı ile beyin venöz sinüslerine, bir kısmı ise v. jugularis interna'ya drene olur.

2-) PONS

Pons, beyin sapının orta bölümünü oluşturan ve merkezi sinir sisteminde önemli iletim ve koordinasyon işlevlerine sahip beyin sapının bir parçasıdır. İçerdiği çekirdekler ve iletim yolları sayesinde motor ve duysal impulsların iletilmesinde, ayrıca denge, postür ve istemli hareketlerin koordinasyonunda önemli rol oynar. Anatomik olarak mesencephalon ile medulla oblongata arasında köprü görevi görür. Arkasında cerebellum bulunur. Sulcus bulbopontinus ile

medulla oblongata'dan, sulcus pontocruralis ile mesencephalon'dan ayrılır. Arka yüzünde fossa rhomboidea'nın üst parçası yer alır.

Pons'un Dış Yapısı

Pons'un ön yüzünün orta hattında sulcus basilaris yer alır. Bu oluk içerisinde a. basilaris seyrederek A. basilaris, seyri boyunca pons ve cerebellum'un kanlanmasını sağlayan dallar verir. Sulcus basilaris'in her iki yanında yer alan kabarıntılar eminentia pyramidalis olarak adlandırılır ve buradan kortikospinal lifler uzanır. Ayrıca bu yüzde fibrae pontis transversae adında enine seyreden lifler pons'un arka yüzüne doğru uzanarak pedunculus cerebellaris medius'u oluşturur. Pons'un anterolateralis'inde bilateral olarak nervus trigeminus'un radix motoria ve radix sensoria kökleri yer alır. Pons'un arka yüzü, ventriculus quartus'un tabanını oluşturan fossa rhomboidea'nın üst yarısına katılır. Fossa rhomboidea'nın orta hattında sulcus medianus yer alır. Sulcus medianus'un her iki yanında bulunan kabarıntılar eminentia medialis olarak adlandırılır ve bu yapı lateralde sulcus limitans ile sınırlandırılır. Eminentia medialis'in alt bölümünde, colliculus facialis bulunur. Sulcus limitans'in lateralinde ise vestibüler çekirdeklerin oluşturduğu area vestibularis yer almaktadır.

Pons'un İç Yapısı

Pons, kesitsel olarak incelendiğinde pars basilaris pontis ve tegmentum pontis olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Önde yer alan pars basilaris pontis ile arka bölümde bulunan tegmentum pontis, corpus trapezoideum tarafından birbirinden ayrılır. Corpus trapezoideum düzeyinde işitme yollarına ait lifler çapraz yapar. Pars basilaris pontis içerisinde kortikal iletim yolları ile bunların arasında dağılmış halde bulunan nuclei pontis'ler yer alır. Nuclei pontis'ler, serebral korteks ile cerebellum arasındaki bağlantının sağlanmasında önemli bir ara istasyon görevi üstlenir. Tegmentum pontis'te ise

retiküler formasyon, kraniyal sinir çekirdekleri ile çeşitli duyu ve motor (afferent-efferent) iletim yolları bulunur.

Pons'ta Yer Alan Çekirdekler

1. **Nucleus olivaris superior:** Pons'un alt kısmında yer alan bu çekirdek, işitme yollarında her iki kulaktan gelen duyuların ilk kez karşılaştığı yerdir. Sesler arası zaman ve şiddet farklarını değerlendirerek sesin geldiği yönün belirlenmesinde önemli rol oynar.
2. **Nuclei reticulares:** Tegmentum pontis'te yer alan retiküler formasyon çekirdekleridir. Uyanıklık, dikkat, bilinç, motor kontrol ve otonom işlevlerin düzenlenmesinde merkezi rol oynarlar.
3. **Nuclei pontis:** Pars basilaris pontis'te yer alır. Primer motor korteksten gelen kortikopontin lifler bu çekirdeklerde sinaps yapar. Nuclei pontis'lerden çıkan pontoserebellar lifler ise karşı tarafa çapraz yaparak pedunculus cerebellaris medius aracılığıyla cerebelluma ulaşır. Motor korteksten gelen bilgilerin cerebelluma aktarılmasını sağlayarak hareketin planlanması, başlatılması ve koordinasyonunda önemli rol oynarlar.
4. **Locus caeruleus:** Pons'un arka-yan kısmında yer alır. Merkezi sinir sisteminde noradrenalin üreten nöronların en büyük kaynağıdır. Bilişsel ve davranışsal komutlarda görev alır.
5. **Nuclei lemnisci lateralis:** Pons'ta işitsel yolların önemli bir bileşeni olarak görev yapar ve işitme ile ilgili impulsların beyin sapından üst merkezlere iletilmesinde ara istasyon işlevi görür. Sesin

zamanlaması ve frekans özelliklerinin ayırt edilmesine katkı sağlarlar.

6. **Nucleus tegmentalis posterior:** Pons ile mesencephalon'un birleşiminde yer alır. Miksiyonun merkezi kontrolünde görev alır. Bu çekirdeğin uyarılması, mesanenin kasılmasını tetikleyerek idrar boşaltım sürecinin başlamasına katkı sağlar ve miksiyon refleksinin düzenlenmesinde önemli bir rol üstlenir.
7. **Nucleus motorius nervi trigemini:** Pons'un üst seviyesinde, fossa rhomboidea'nın derininde yerleşim gösterir. Nervus trigeminus'un V₃ (Nervus mandibularis) aracılığı ile çiğneme kaslarını (m. masseter, m. temporalis, m. pterygoideus lateralis, m. pterygoideus medialis) uyarır. Ayrıca m. mylohyoideus ve m. digastricus'un venter anterior'u gibi bazı yutma ve konuşma ile ilişkili kaslarında motor innervasyonunu gerçekleştirir.
8. **Nucleus mesencephalicus nervi trigemini:** Pons'un üst seviyelerinden mesencephalon'nun colliculus superior'una kadar uzanır. Genel somatik afferent lifler içerir. Diş ve çiğneme kaslarından gelen proprioseptif duyuları alır. Özellikle çiğneme kuvvetinin düzenlenmesi ve koordinasyonu gibi reflekslerin kontrolünde önemli rol oynar.
9. **Nucleus principalis nervi trigemini:** Pons'un üst seviyelerinde, nucleus motorius nervi trigemini'nin posterolateralinde yer alan bu duyu çekirdeği, baş ve yüz bölgesinden gelen dokunma ve basınç duyularıyla ilişkili genel somatik afferent nöronlar içerir. Nervus trigeminus'un duyuusal dallarından

gelen primer duyusal birinci nöronların hücre gövdeleri ganglion trigeminale’de bulunur ve bu lifler nucleus principalis nervi trigemini’de yer alan ikinci nöronlarla sinaps yapar. Çekirdekten çıkan aksonlar, lemniscus trigeminalis adıyla yükselerek üçüncü nöronların bulunduğu thalamus’un nucleus ventralis posteromedialis (VPM) bölgesinde sinaps yapar. Buradan çıkan lifler ise korteksin ilgili duyu alanına ulaşır.

10. **Nucleus nervi abducentis:** Pons’un alt bölümünde, dördüncü ventrikül tabanında yer alan bu motor çekirdek, nervus abducens’e ait genel somatik efferent liflerin kaynağını oluşturur. Çekirdekten çıkan lifler nervus abducens aracılığıyla m. rectus lateralis kasını innerve eder. Ayrıca fasciculus longitudinalis medialis (FLM) üzerinden nervus oculomotorius (III), nervus trochlearis (IV) ve nervus vestibulocochlearis (VIII) ile bağlantı kurarak göz hareketlerinin düzenlenmesine katkı sağlar.
11. **Nucleus nervi facialis:** Pons’un alt seviyelerinde yerleşim gösterir. Çekirdekten çıkan özel visseral efferent lifler yüz-mimik kaslarını, m. stylohyoideus ve m. digastricus’un venter posterior’unu innerve eder.
12. **Nucleus salivatorius superior:** Bu çekirdeğin üst bölümü nucleus lacrimalis olarak adlandırılır. Nervus facialis’in parasempatik çekirdeğidir. Çekirdekten çıkan genel visseral efferent lifler, nervus facialis aracılığıyla glandula lacrimalis, glandula submandibularis ve glandula sublingualis’in sekresyonunu sağlar.

13. **Nuclei cochleares:** Pons'un alt seviyelerinde, sulcus bulbopontinus birleşiminde yer alır. İşitme ile ilgili 2. nöronların bulunduğu çekirdektir. Sesin frekans, yoğunluk ve yönüne dair bilgilerin işlenmesi ile ilgilidir.
14. **Nuclei vestibulares:** Fossa rhomboidea'nın area vestibularis'inde yer alır. İç kulaktan gelen denge ile ilgili duyuşal impulsları alır. Postürün kontrolü, oküler reflekslerin düzenlenmesi ve cerebellum ile birlikte denge-kas tonusunun koordinasyonunda önemli görevler üstlenir.

Pons'tan Geçen Afferent-Efferent Yollar

1. Fibrae corticospinales (İstemli motor hareketler)
2. Fibrae corticonucleares (Baş ve yüz bölgesi kaslarının motor hareketleri)
3. Fibrae corticoreticulares (İnce motor hareketler, postür ve kas tonusu)
4. Fibrae pontis transversae (Beyin ile cerebellum arasında koordinasyon)
5. Lemniscus lateralis (İşitme ile ilgili)
6. Lemniscus medialis (Dokunma, basınç ve proprioepsiyon duyuları ile ilgili)
7. Lemniscus spinalis (Ağrı, sıcaklık ve kaba dokunma duyuları ile ilgili)
8. Fasciculus longitudinalis medialis (FLM) (Göz hareketlerinin koordinasyonu)
9. Tractus tectospinalis (Ani ışık ve ses uyarılarına karşı refleks baş hareketleri)

Pons'un Kanlanması

Pons'un beslenmesi, aa. pontis (a. basilaris'in dalı), a. inferior anterior cerebelli (a. basilaris'in dalı) ve a. superior cerebelli (a. basilaris'in dalı) tarafından gerçekleştirilir. Venöz dolaşım ise vv. pontis'ler v. petrosa'ya buradan'da sinus petrosus superior'a drene olur.

3-) MESENCEPHALON

Mesencephalon (orta beyin), beyin sapının en üst bölümünü oluşturan ve yaklaşık 1,5-2 cm uzunluğundaki en kısa bölümdür. Pons'un üstünde, diencephalon'un ise alt tarafında yer alır ve pedunculus cerebellaris superior aracılığıyla cerebellum'a bağlanır. Nervus oculomotorius ve nervus trochlearis aracılığıyla göz hareketlerinin kontrolünde, görsel ve işitsel impulsların işlenmesinde, substantia nigra ve nucleus ruber aracılığıyla ise motor fonksiyonların düzenlenmesinde rol oynayan önemli bir merkezdir.

Mesecephalon'un Dış Yapısı

Pons ile mesencephalon arasındaki sınır ön yüzde sulcus pontocruralis, arkada ise nervus trochlearis'in çıkış seviyesi ile belirlenir. Ön yüzde, orta hattın her iki yanında yer alan kalın lif demetlerine pedunculus cerebri (crus cerebri) adı verilir. Bu yapı, beyinden gelen kortikospinal, kortikobulber ve kortikopontin lifleri taşıyarak serebral korteks ile beyin sapı, cerebellum ve medulla spinalis arasındaki motor bağlantının devamlılığında görev alır. İki pedunculus cerebri arasında yer alan çukur fossa interpeduncularis olarak adlandırılır. Bu çukurun tabanında substantia perforata posterior adında delikli bir oluşum yer almaktadır.

Nervus oculomotorius, fossa interpeduncularis'ten çıkarak aynı taraftaki pedunculus cerebri'nin medialinden ilerler ve sklera'ya tutunan kasların büyük bölümünün motor innervasyonunu gerçekleştirir. Nervus trochlearis ise colliculus inferior'lar

seviyesinde arka yüzden çıkar ve beyin sapını arka yüzden terk eden tek kraniyal sinirdir. Nervus trochlearis m. obliquus superior'u innerve eder. Mesencephalon'un arka yüzü tectum mesencephali olarak adlandırılır ve burada corpus quadrigemina'yı oluşturan dört belirgin kabartı yer alır. Üstte bulunan çift yapı colliculus superior, altta bulunan çift yapı ise colliculus inferior olarak isimlendirilir. Colliculus superior'lar görsel refleksler, baş ve göz hareketlerinin görsel uyaranlara yönlendirilmesi ile ilişkiliyken; colliculus inferior'lar işitsel impulsların iletimi ve refleks düzeyde işlenmesinde görev alır.

Mesencephalon'un İç Yapısı

Mesencephalon kesitsel olarak incelendiğinde, önde crus cerebri, arkada ise tegmentum mesencephali olmak üzere iki ana bölümden oluştuğu görülür. Crus cerebri'nin arkasında substantia nigra yer alır. Bu yapı, ekstrapiramidal sistemin önemli bir parçasıdır ve motor kontrolün sağlanmasında rol oynar. Substantia nigra ile aqueductus cerebri arasında kalan bölge ise tegmentum mesencephali olarak isimlendirilir. Tegmentum mesencephali'de nucleus ruber, nucleus reticularis, nervus oculomotorius, nervus trochlearis'in çekirdekleri ile bazı duyu ve motor yollar bulunur. Tectum mesencephali aqueductus cerebri'nin arkasında kalan bölümdür. Bu bölümde colliculus superior, colliculus inferior ve area pretectalis yer alır.

Mesencephalon'da Yer Alan Çekirdekler

1. **Substantia Nigra:** Bu çekirdek, crus cerebri ile tegmentum arasında yer alır. Hareketlerin kontrolü, ödül mekanizması ve öğrenmede kritik rol oynayan koyu renkli bir çekirdektir. Dopamin üreten nöronların başlıca merkezidir ve bu bölgedeki nöron kayıpları Parkinson hastalığına yol açar. Pars compacta ve pars reticularis olmak üzere iki

bölümünden oluşur. Pars compacta, yoğun olarak dopaminerjik nöronlar içerir ve burada ki nöronlar dopamin sentezler. Pars reticularis ise ağırlıklı olarak GABA-erjik nöronlardan oluşur.

2. **Nucleus Ruber:** Nucleus ruber (kırmızı çekirdek), tegmentum'un medialinde, motor koordinasyon, kas tonusu ve postür'ün kontrolünden sorumlu oval şekilli, çift taraflı bir yapıdır. Yapı, zengin vaskülarizasyonu ve nöron sitoplazmasındaki demir pigmentleri nedeniyle taze kesitlerde kırmızı renkte görülür. Ekstrapiramidal sistem ve cerebellum ile bağlantıları bulunur.
3. **Retiküler Formasyon Çekirdekleri:** Retiküler formasyon, medulla oblongata'dan mesencephalon'a kadar beyin sapının her bölümünde yer alan, karmaşık bir nöron ağıdır. Bu çekirdekler; uyku-uyanıklık döngüsünü, otonomik fonksiyonları, dikkat, solunum ve motor reflekslerin modülasyonunu düzenleyen merkezi kontrol istasyonlarından biridir. Nucleus tegmentalis, pedunculo pontinus, nucleus cuneiformis, nucleus subcuneiformis ve nucleus interpeduncularis'lerden oluşur.
4. **Nucleus Pretectalis:** Mesencephalon ile prosencephalon birleşiminde aqueductus cerebri'nin önünde yer alır. Başlıca görevi pupilla ışık refleksi, optokinetik refleksler ve somatosensoriyel duyuların iletilmesini sağlamaktır.
5. **Nucleus nervi oculomotorii:** Nervus oculomotorius'un motor çekirdeğidir. Colliculus superiorlar seviyesinde, aqueductus cerebri'nin ön

tarafında yer alır. Çekirdekten çıkan motor lifler, beyin sapını terk ederek fissura orbitalis superior'dan geçip orbita içerisine girer. Sklera'ya tutunan m. rectus superior, m. rectus medialis, m. rectus inferior, m. obliquus inferior ve m. levator palpebrae superior'u kaslarının motor innervasyonunu gerçekleştirir.

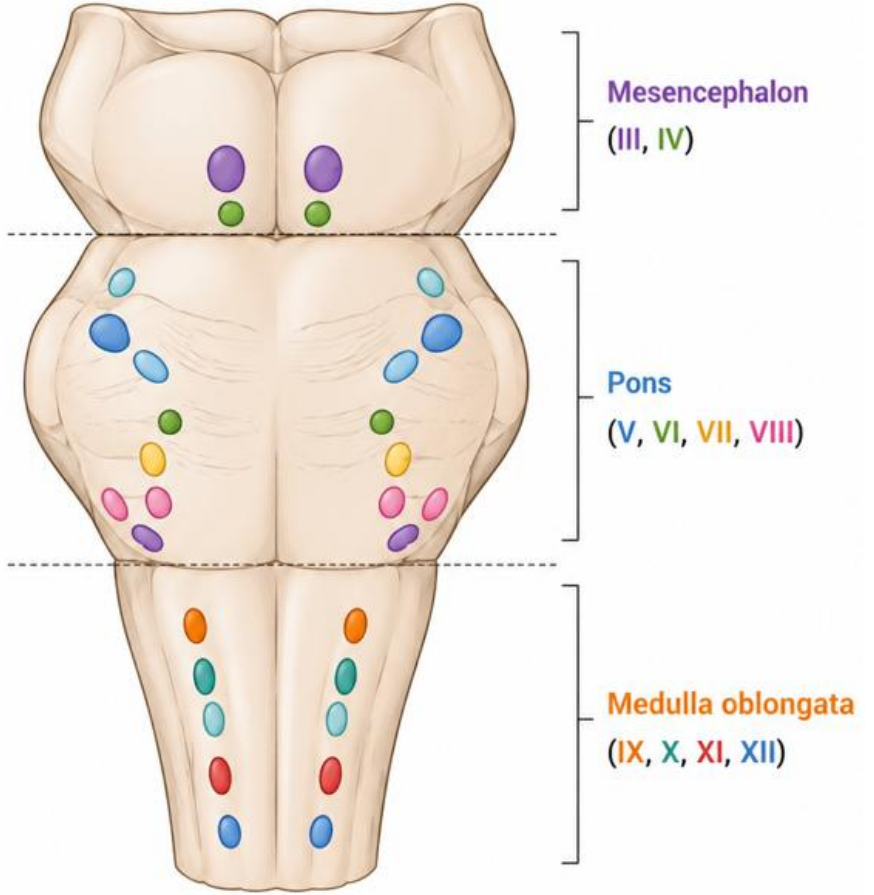
6. **Nucleus oculomotorius accessorius (Edinger-Westphal çekirdeği):** Mesencephalon'da yer alan bu yapı, nervus oculomotorius'un parasempatik çekirdeğidir. Nervus oculomotorius içerisinde seyreden parasempatik lifler ganglion ciliare'de sinaps yapar. Buradan çıkan postganglionik lifler, m. sphincter pupillae ve m. ciliaris'i innerve ederek pupilla ışık refleksi ile akomodasyon fonksiyonunun gerçekleşmesinde görev alır.
7. **Nucleus nervi trochlearis:** Mesencephalon'un arka yüzünde, colliculus inferior'lar seviyesinde yer alır. Nervus trochlearis'in motor çekirdeğidir. Beyin sapının arka yüzünden çıktıktan sonra orbitaya ulaşan lifler, m. obliquus superior kasını innerve eder.
8. **Nucleus mesencephalicus nervi trigemini:** Tegmentum mesencephali'de, substantia grisea centralis'in lateralinde yer alır. Çiğneme kasları, dişler, diş eti, sert damak ve çene eklemine, basınç ve proprioseptif duyusunun birinci nöronlarını içerir. Özellikle çiğneme kuvvetinin ayarlanmasında önemli rol oynar. Merkezi sinir sistemi içerisinde birinci nöronların bulunduğu tek çekirdektir.

Mesencephalon'dan Geçen Afferent-Efferent Yollar

1. Fibrae corticospinales
2. Fibrae corticonucleares
3. Fibrae corticopontinae
4. Lemniscus spinalis
5. Lemniscus lateralis
6. Lemniscus medialis
7. Fasciculus longitudinalis posterior
8. Tractus tectospinalis
9. Tractus tectonuclearis
10. Tractus rubrospinalis
11. Tractus rubroreticularis
12. Fasciculus longitudinalis medialis (FLM)

Mesencephalon'un Kanlanması

Mesencephalon'un beslenmesi başlıca a. cerebri posterior (a. basilaris'in dalı), a. superior cerebelli (a. basilaris'in dalı) ve a. basilaris (a. vertebralis'in dalı) tarafından sağlanır. Venöz kan ise v. petrosa, v. basalis ve v. magna cerebri tarafından toplanır.



Şekil 1. Beyin Sapında Kraniyal Sinir Çekirdeklerin Yerleşimi

KAYNAKÇA

1. Arıncı, K., & Elhan, A. (2020). Anatomi, 2. Cilt: Dolaşım Sistemi, Periferik Sinir Sistemi, Merkezi Sinir Sistemi, Duyu Organları (7. baskı). Ankara: Güneş Tıp Ltd Şti.
2. Arifoğlu, Y. (2024). Her Yönüyle Anatomi (4. baskı). İstanbul: İstanbul Medikal Sağlık ve Yayıncılık Hiz. Tic. Ltd. Şti.
3. Taner, D., Cumhuri, M., Sargon, MF., (2008) et al. Fonksiyonel nöroanatomi. ODTÜ Geliştirme Vakfı.
4. Standring, S. (2008). Gray's Anatomy, The Anatomical Basis of Clinical Practice. 40. Baskı, Churchill Livingstone Elsevier, Londra.
5. Ozan, H. (2014). Ozan Anatomi. 3. Baskı. Klinisyen Tıp Kitapevleri, 498-506, Ankara.
6. Erzurumlu, R., Sengul, G., Ulupinar, E. (2024). Human Neuroanatomy. Elsevier.
7. Kim, JS (2003). Medial medullary infarction. Neurology.687-694.
8. Sciacca, S., Lynch, J., Davagnanam, I., & Barker, R. (2019). Midbrain, pons, and medulla: anatomy and syndromes. Radiographics, 1110–1125.
9. Gibson, A. R., Horn, K. M., & Pong, M. (2023). Nucleus reticularis tegmenti pontis: a bridge between the basal ganglia and cerebellum for movement control. Experimental Brain Research, 1271–1287.
10. Gökmen, F.G. (2003). Sistematik Anatomi. 1. Baskı. İzmir Güven Kitabevi, İzmir.

BÖLÜM 4

SEREBELLUM ANATOMİSİ VE BAZAL GANGLİONLAR

Mustafa Furkan ÖZTÜRK¹

SEREBELLUM GELİŞİMİNİN EMBRİYOLOJİK TEMELLERİ

Latince kökenli olan ve "küçük beyin" anlamını taşıyan beyincik (cerebellum) terimi, literatürde ilk kez 16. yüzyılın başlarında kullanılmaya başlanmıştır. İsmi­nin çağrıştırdığı mütevazı yapının aksine beyincik, son derece karmaşık organizasyonu, gelişmiş nöral devreleri ve sinir sistemi içerisindeki çok yönlü işlevleriyle dikkat çekmektedir. Özellikle son yıllarda motor kontrolün ötesinde bilişsel, duygusal ve davranışsal süreçlerde de önemli roller üstlendiğinin ortaya konulması, beyinciği çağdaş nörobilim araştırmalarının en ilgi çekici çalışma alanlarından biri hâline getirmiştir (1).

Beyincik (cerebellum), merkezi sinir sisteminin gelişmiş ve işlevsel açıdan en karmaşık yapılarından biridir. Uzun yıllar yalnızca istemli hareketlerin koordinasyonu, kas tonusunun düzenlenmesi ve denge kontrolü ile ilişkilendirilmiş olsa da, günümüzde yürütücü

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Artova Meslek Yüksekokulu, mustafafurkan.ozturk@gop.edu.tr

işlevler, öğrenme, bellek, dil ve duygusal süreçlerde de önemli roller üstlendiği kabul edilmektedir (2, 3). Bu nedenle beyinciğin embriyolojik gelişiminin ayrıntılı olarak ortaya konulması, yalnızca normal nörogelişim süreçlerinin anlaşılması için değil, aynı zamanda doğumsal anomalilerin ve nörogelişimsel hastalıkların patofizyolojisinin açıklanabilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır(4). Embriyogenez sırasında gerçekleşen hücresel farklılaşma, nöronal göç ve moleküler sinyal mekanizmalarının aydınlatılması, beyinciğin normal organizasyonu ile gelişimsel bozuklukları arasındaki ilişkinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır (4, 5).

Merkezi sinir sistemi gelişiminin ilk basamağını embriyonik dönemde oluşan nöral tüp oluşturur. Nöral tüp geliştikçe belirli bölgelerden salgılanan morfojenler ve diğer düzenleyici sinyal molekülleri, hücrelerin proliferasyonunu, farklılaşmasını ve bölgesel kimlik kazanmasını kontrol ederek beynin farklı bölümlerinin oluşmasını sağlar. Bu süreçte primer beyin veziküllerinden biri olan rombensefalon, ardışık segmentler hâlinde organize olan rombomerlere ayrılır. Bu segmentlerden rombomer 1 (r1), beyinciğin gelişimsel kökenini oluşturan temel embriyolojik alan olarak kabul edilmektedir(4-6).

Beyincik gelişiminin düzenlenmesinde kritik rol oynayan yapılardan biri de orta beyin ile arka beynin birleşim noktasında bulunan isthmik organizatör bölgesidir. Bu bölge, özellikle Fibroblast Growth Factor-8 (FGF8) başta olmak üzere birçok gelişimsel sinyal molekülünü salgılayarak çevre dokuların farklılaşmasını yönlendirir. Oluşturduğu morfojen gradyanları sayesinde gen ekspresyonunun zamansal ve mekânsal düzenlenmesini sağlayan FGF8, r1'in beyincik dokusuna dönüşmesinde temel belirleyici faktörlerden biri olarak görev yapmaktadır (4, 5).

r1 bölgesinden köken alan bir diğer önemli embriyolojik yapı rombik dudak (Rhombic Lip; RL)'tır. Özellikle Atoh1 transkripsiyon faktörünün kontrolünde gelişen bu bölge, beyincik granül hücrelerinin öncülleri ile pontin çekirdek nöronları gibi glutamaterjik nöron popülasyonlarının oluşumunda temel kaynak görevi görmektedir (4-8).

Buna karşılık, ventriküler zon (Ventricular Zone; VZ) beyinciğin inhibitör nöronlarının gelişiminden sorumlu başlıca proliferatif alandır. Dördüncü ventrikül boyunca uzanan ve Ptf1a ekspresyonu ile karakterize edilen bu bölge, Purkinje hücreleri başta olmak üzere GABAerjik internöronların gelişimini sağlar. Aynı zamanda bu hücreler, rombik dudaktan köken alan nöronların olgunlaşmasını ve yaşamını sürdürebilmesi için gerekli trofik desteğin sağlanmasında da önemli rol oynamaktadır (4-8).

Embriyolojik gelişimde rol alan bir diğer yapı olan çatı plağı (Roof Plate; RP) ise nöroepitelin dorsal kısmından gelişmektedir. RP, yalnızca ventriküler zon hücrelerinin çoğalmasını ve farklılaşmasını destekleyen sinyallerin üretildiği bir merkez değil, aynı zamanda rombik dudanın oluşumu ve organizasyonunun düzenlenmesinde de etkin rol oynayan önemli bir gelişim alanıdır (4-9)

Sonuç olarak beyinciğin normal gelişimi; rombomer 1, isthmik organizatör, rombik dudak, ventriküler zon ve çatı plağı arasında gerçekleşen koordineli hücresel etkileşimlerin ve bunları yöneten karmaşık moleküler sinyal ağlarının uyumlu çalışmasına bağlıdır. Bu gelişimsel süreçlerin herhangi bir basamağında meydana gelen genetik veya çevresel kökenli bozukluklar, hücre proliferasyonu, göçü ve farklılaşmasını olumsuz etkileyerek beyinciğin yapısal organizasyonunda anomalilere neden olabilir. Bunun sonucunda ise çeşitli serebellar malformasyonlar ortaya çıkmakta ve bireylerde motor, bilişsel ve nöropsikiyatrik işlevleri etkileyen geniş bir klinik tablo gelişebilmektedir (4-9).

SEREBELLUM ANATOMİSİ

Cerebellum (Beyincik)

Cerebellum (beyincik), merkezi sinir sisteminin posterior kranial fossada yer alan ve embriyolojik olarak metencephalonun dorsal bölümünden gelişen önemli bir beyin yapısıdır. Toplam beyin hacminin yaklaşık %10'unu oluşturmaya rağmen, merkezi sinir sistemindeki nöronların büyük çoğunluğunu barındırması nedeniyle bilgi işleme kapasitesi son derece yüksektir. Serebellum, hareketlerin koordinasyonu ve denge mekanizmalarının düzenlenmesindeki temel rolüyle uzun yıllardır bilinmesine karşın, son yıllarda yapılan anatomik, elektrofizyolojik ve fonksiyonel nörogörüntüleme çalışmaları bu yapının motor fonksiyonların ötesinde bilişsel süreçler, dil, dikkat, öğrenme, bellek ve emosyonel düzenleme gibi çok sayıda yüksek kortikal fonksiyona da katkıda bulunduğunu göstermiştir. Serebral korteks, beyin sapı, vestibüler sistem, omurilik ve limbik yapılarla kurduğu yoğun bağlantılar sayesinde cerebellum, merkezi sinir sisteminde motor ve nonmotor bilgilerin bütünleştirildiği önemli bir entegrasyon merkezi olarak kabul edilmektedir (10).

Cerebellum'un Fonksiyonu

Cerebellum istemli hareketlerin başlatılmasından sorumlu bir merkez değildir. Temel görevi, serebral korteks tarafından planlanan motor aktivitelerin uygun zamanlama, kuvvet ve yön özellikleriyle gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Motor korteksten gelen hareket planı ile periferden kaslar, tendonlar, eklemler ve vestibüler sistem aracılığıyla taşınan duysal geri bildirim bilgileri sürekli olarak karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda oluşan hata sinyalleri hızla değerlendirilerek üst motor merkezlerine düzeltici uyarılar gönderilir. Böylece hareketler daha akıcı, koordineli ve hedefe yönelik hâle gelir (11).

Cerebellumun en önemli fonksiyonlarından biri agonist ve antagonist kas grupları arasındaki kasılma sırasını düzenlemektir. Bir hareket sırasında agonist kasların uygun zamanda kasılması kadar antagonist kasların doğru zamanda gevşemesi de hareketin doğruluğu açısından büyük önem taşır. Beyincik bu kas grupları arasındaki zamanlamayı sürekli kontrol ederek gereksiz kas aktivitesini önler ve enerji tüketimini azaltır. Aynı zamanda sinerjist kasların koordineli çalışmasını sağlayarak kompleks hareketlerin uyum içerisinde gerçekleştirilmesine katkıda bulunur (10).

Kas tonusunun fizyolojik sınırlar içerisinde korunması da cerebellumun temel görevlerinden biridir. Özellikle gamma motor nöron sistemi üzerinden omurilik refleks mekanizmalarını dolaylı olarak etkileyerek istirahat hâlindeki kas gerginliğinin korunmasına yardımcı olur. Böylece postürün devamlılığı sağlanırken istemli hareketler sırasında stabilite korunur. Cerebellar lezyonlarda görülen hipotoni ve postür bozukluklarının temel nedeni bu düzenleyici mekanizmanın kaybıdır. Postür ve denge kontrolü cerebellumun en önemli fonksiyonel özelliklerinden biridir. Vestibüler sistem, görsel sistem ve proprioseptif reseptörlerden gelen bilgiler sürekli olarak değerlendirilir ve vücudun ağırlık merkezi çevresel koşullara uygun şekilde düzenlenir. Özellikle ayakta durma, yürüme, yön değiştirme ve ani postür değişiklikleri sırasında ortaya çıkan denge bozuklukları cerebellum tarafından hızla kompanse edilir. Bu sayede birey çevresel değişikliklere rağmen dengesini koruyabilir(10, 12).

Göz hareketlerinin koordinasyonu da cerebellumun önemli görevleri arasında yer alır. Vestibüloöklüler reflekslerin düzenlenmesi, sakkadik göz hareketlerinin doğruluğu, düzgün takip hareketleri (smooth pursuit) ve baş hareketleri sırasında görsel stabilitenin korunması vestibulocerebellumun katkısıyla gerçekleşir. Bu nedenle serebellar patolojilerde sıklıkla nistagmus, sakkadik dismetri ve okülomotor koordinasyon bozuklukları gözlenmektedir(13, 14).

Motor öğrenme (motor learning), cerebellumun en dikkat çekici fonksiyonlarından biridir. Tekrarlayan hareketler sırasında oluşan performans hataları değerlendirilerek sinaptik bağlantılarda uzun süreli değişiklikler meydana gelir. Özellikle Purkinje hücreleri ile tırmanıcı lifler (climbing fibers) arasındaki sinaptik plastisite, yeni motor becerilerin kazanılmasında temel mekanizmalardan biri olarak kabul edilmektedir. Bisiklet sürme, müzik aleti çalma, yazı yazma veya cerrahi becerilerin geliştirilmesi gibi öğrenilmiş motor davranışlar cerebellar plastisitenin en belirgin örneklerini oluşturur. İnce motor hareketlerin koordinasyonu özellikle lateral serebellar hemisferlerin kontrolü altındadır. El parmaklarıyla gerçekleştirilen hassas hareketler, konuşma sırasında artikülasyon kaslarının senkronizasyonu ve karmaşık motor sekansların planlanması sırasında cerebellum serebral korteks ile sürekli bilgi alışverişi içerisinde. Bu nedenle serebellar lezyonlarda dismetri, disdiadokokinezi, intansiyon tremoru ve konuşma bozuklukları gibi ince motor kontrol kaybını gösteren bulgular ortaya çıkar(10, 15).

Son yıllarda gerçekleştirilen fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme ve bağlantısallık analizleri, cerebellumun bilişsel süreçlerde de aktif rol aldığını göstermiştir. Özellikle posterior serebellar hemisferlerin prefrontal korteks, posterior parietal korteks ve limbik sistem ile kurduğu bağlantılar; dikkat, çalışma belleği, yürütücü işlevler, dil işleme, problem çözme ve emosyonel düzenleme gibi fonksiyonlara katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle cerebellar hasar yalnızca motor bozukluklara değil, aynı zamanda bilişsel ve davranışsal değişikliklere de yol açabilmektedir. Bu klinik tablo günümüzde Cerebellar Cognitive Affective Syndrome (CCAS) olarak tanımlanmaktadır(10, 14).

Fonksiyonel açıdan değerlendirildiğinde cerebellum, istemli hareketlerin doğru kuvvette, uygun zamanda ve hedefe yönelik olarak gerçekleştirilmesini sağlayan; denge, postür, kas tonusu, motor öğrenme ve bilişsel süreçleri bütünleştiren merkezi bir

düzenleyici sistemdir. Motor komutları doğrudan oluşturmaz; bunun yerine serebral korteks tarafından planlanan hareketleri sürekli denetleyerek hata düzeltme mekanizması oluşturur. Bu özelliği sayesinde cerebellum, insan hareket sisteminin hassasiyetini ve sürekliliğini sağlayan en önemli yapılardan biri olarak kabul edilmektedir (11).

Kompleks bir harekette kas gruplarının koordinasyonu

İstemli bir hareketin başarılı şekilde gerçekleştirilebilmesi için farklı kas gruplarının belirli bir sıra ve uyum içinde çalışması gerekir. Bu süreçte cerebellum, kaslar arasındaki koordinasyonu sağlayan temel düzenleyici merkezlerden biridir.

Agonist kaslar; Hareketin başlatılmasını ve temel motor aktivitenin oluşturulmasını sağlar.

Antagonist kaslar; Gerektiğinde gevşeyerek veya kontrollü kasılarak hareketin hızını ve sonlanmasını düzenler.

Sinerjist kaslar; Ana harekete destek verir, eklem stabilitesini artırır ve hareketin verimliliğini sağlar.

Fiksator kaslar; Proksimal segmentleri sabitleyerek distal segmentlerin kontrollü hareket etmesine olanak tanır.

Cerebellum; Tüm bu kas gruplarının aktivasyon sırası, kasılma şiddeti ve zamanlamasını düzenleyerek koordineli hareketin gerçekleşmesini sağlar (11).

Cerebellum'un Filogenetik Olarak Fonksiyonel Bölümleri

Embriyolojik gelişim, anatomik organizasyon, afferent-efferent bağlantılar ve üstlendiği görevler dikkate alındığında cerebellum, filogenetik açıdan üç temel fonksiyonel bölüme ayrılır: vestibulocerebellum (archicerebellum), spinocerebellum (paleocerebellum) ve cerebrocerebellum (neocerebellum). Bu sınıflandırma yalnızca evrimsel gelişimi yansıtmakla kalmaz, aynı

zamanda serebellar bölgelerin anatomik yerleşimleri, bağlantıları ve klinik fonksiyonları hakkında da önemli bilgiler sunar. Her bir bölüm, merkezi sinir sisteminin farklı bölgeleriyle özgün bağlantılar kurarak belirli motor ve bilişsel işlevlerin düzenlenmesine katkıda bulunur. Bu nedenle cerebellumun fonksiyonel organizasyonunun anlaşılması, serebellar hastalıkların klinik bulgularının yorumlanması açısından büyük önem taşımaktadır (10, 11).

Vestibulocerebellum (Archicerebellum)

Vestibulocerebellum, cerebellumun filogenetik olarak en eski bölümüdür ve temel olarak lobus flocculonodularis ile vermisin nodulus kısmından oluşur. Bu bölüm, omurgalıların evrimsel gelişimi sırasında ilk ortaya çıkan serebellar yapı olması nedeniyle archicerebellum olarak adlandırılmaktadır. Başlıca afferent bağlantılarını vestibüler reseptörlerden, vestibüler sinirden ve vestibüler çekirdeklerden alırken, efferent liflerini yeniden vestibüler çekirdeklere gönderir. Böylece vestibüler sistem ile cerebellum arasında sürekli çalışan çift yönlü bir bilgi alışverişi sağlanır (14).

Vestibulocerebellumun temel görevi, vücudun uzaydaki konumunu değerlendirmek ve dengeyi sağlamaktır. Baş hareketleri sırasında iç kulaktaki vestibüler reseptörlerden gelen bilgiler, görsel sistemden ve servikal proprioseptörlerden gelen verilerle birlikte değerlendirilerek postürün korunmasına yönelik düzeltici motor cevaplar oluşturulur. Bu sistem sayesinde birey yürürken, koşarken veya yön değiştirirken ağırlık merkezini koruyabilir (13).

Vestibulocerebellum aynı zamanda göz hareketlerinin koordinasyonunda da önemli rol oynar. Özellikle vestibülo-oküler refleksin düzenlenmesi, sakkadik göz hareketlerinin doğruluğu ve hareketli cisimlerin düzgün takip edilmesi bu bölgenin kontrolü altındadır. Başın ani hareketleri sırasında retina üzerinde görüntünün sabit tutulması vestibulocerebellum sayesinde mümkün olur. Bu

bölgenin lezyonlarında hastalarda belirgin denge kaybı ortaya çıkar. Geniş tabanlı yürüme, gövde ataksisi, ayakta durmakta güçlük, vestibüler nistagmus ve göz hareketlerinde koordinasyon bozuklukları en sık görülen klinik bulgulardır. Özellikle gözler açıkken dahi dengenin korunamaması vestibulocerebellar disfonksiyon için karakteristik bir bulgudur (11).

Spinocerebellum (Paleocerebellum)

Spinocerebellum, filogenetik olarak cerebellumun ikinci gelişen bölümüdür ve temel olarak vermis ile hemisferlerin medial (intermediyer) bölgelerini kapsar. Anatomik olarak büyük ölçüde lobus anterior ile posterior lobun vermal ve paravermal alanlarını içerir. Omurilikten gelen proprioseptif bilgilerin yoğun olarak bu bölgeye ulaşması nedeniyle spinocerebellum adı verilmiştir. Bu bölümün en önemli afferent lifleri posterior ve anterior spinocerebellar yollar, cuneocerebellar lifler, trigeminocerebellar lifler ve reticulocerebellar bağlantılardır. Böylece kas içicikleri, Golgi tendon organları, eklem reseptörleri ve deri mekanoreseptörlerinden gelen proprioseptif bilgiler sürekli olarak değerlendirilir(10, 14).

Spinocerebellumun temel görevi, gövde ve ekstremiteler kaslarının hareketlerini gerçek zamanlı olarak izlemek ve hareket sırasında oluşan hataları düzeltmektir. Motor korteksten gelen planlanan hareket ile omurilikten gelen gerçek hareket bilgisi karşılaştırılarak gerekli düzeltmeler yapılır. Böylece hareket sırasında ortaya çıkan küçük sapmalar hızlı biçimde düzeltilir ve hareket akıcılığı korunur.

Bu bölge özellikle yürüme, ayakta durma, postürün korunması, kas tonusunun düzenlenmesi ve proksimal ekstremiteler hareketlerinin koordinasyonunda görev alır. Ayrıca agonist ve antagonist kas gruplarının senkronizasyonu ile istemli hareketlerin sürekliliği de spinocerebellum tarafından düzenlenmektedir.

Spinocerebellar lezyonlarda en sık görülen klinik bulgular arasında yürüyüş ataksisi, gövde dengesizliği, hipotoni, dismetri, rebound fenomeni ve kas koordinasyon bozukluğu yer alır. Özellikle hastaların geniş tabanlı yürümleri ve ani yön değişikliklerinde dengesizlik yaşamaları dikkat çekicidir (10, 11, 14).

Cerebrocerebellum (Neocerebellum)

Cerebrocerebellum, cerebellumun filogenetik olarak en yeni gelişen bölümüdür ve serebellar hemisferlerin geniş lateral kısımlarını oluşturur. Bu nedenle neocerebellum olarak da adlandırılır. Anatomik olarak büyük ölçüde lobus posteriorun lateral hemisferlerini kapsar.

Bu bölümün en önemli afferent bağlantıları serebral korteksten başlar. Frontal, parietal, temporal ve oksipital kortekslerden çıkan corticopontin lifler pontin çekirdeklerde sinaps yaptıktan sonra karşı tarafa geçerek pedunculus cerebellaris medius aracılığıyla cerebrocerebelluma ulaşır. Böylece serebral kortekste planlanan istemli hareketler cerebelluma iletilmiş olur.

Cerebrocerebellumun temel görevi, istemli hareketlerin planlanması, zamanlanması ve hassas koordinasyonudur. Özellikle el parmaklarıyla gerçekleştirilen ince motor aktiviteler, konuşma kaslarının koordinasyonu, yazı yazma, müzik aleti çalma ve karmaşık motor beceriler sırasında bu bölge yoğun olarak aktive olur(16, 17).

Motor öğrenme süreçlerinde de cerebrocerebellum önemli rol oynar. Tekrarlayan hareketler sırasında oluşan performans hataları değerlendirilerek Purkinje hücreleri düzeyinde sinaptik plastisite gelişir. Bu mekanizma sayesinde hareketler giderek daha hızlı, daha doğru ve daha ekonomik hâle gelir.

Son yıllarda yapılan fonksiyonel görüntüleme çalışmaları, lateral serebellar hemisferlerin yalnızca motor fonksiyonlarda değil;

dikkat, çalışma belleği, yürütücü işlevler, dil, planlama, soyut düşünme ve sosyal biliş gibi yüksek kortikal fonksiyonlarda da görev aldığını göstermiştir. Özellikle prefrontal korteks ile oluşturduğu serebello-talamo-kortikal döngüler, cerebellumun bilişsel süreçlerdeki önemini ortaya koymaktadır.

Bu bölgenin lezyonlarında belirgin ince motor koordinasyon bozukluğu gelişir. Hastalarda intansiyon tremoru, dismetri, disdiadokokinezi, parçalı hareket (decomposition of movement) ve ataksik dizartri görülebilir. Ayrıca bilişsel fonksiyonların etkilenmesine bağlı olarak dikkat eksikliği, yürütücü işlev bozukluğu ve duygusal değişikliklerin görüldüğü Cerebellar Cognitive Affective Syndrome (CCAS) gelişebilir (10, 11, 18).

Cerebellum'un Anatomik Bölümleri ve Dış Yapısı

Cerebellum, makroskobik olarak belirgin anatomik sınırlarla birbirinden ayrılan loblar, lobüller, fissürler ve orta hat yapılarından oluşan oldukça düzenli bir organizasyona sahiptir. Serebral korteksten farklı olarak serebellar korteks, ince ve birbirine paralel uzanan çok sayıdaki yaprak benzeri kıvrımlar (folia cerebelli) ile karakterizedir. Bu kıvrımlar, serebellumun yüzey alanını önemli ölçüde artırırken kortikal nöronların daha yoğun yerleşmesine olanak sağlar. Folialar arasında yer alan oluklar fissura cerebelli olarak adlandırılır ve bazıları yalnızca komşu foliaları birbirinden ayırırken, bazıları cerebellumu büyük anatomik bölümlere ayıracak kadar derindir.

Makroskobik olarak cerebellum; iki serebellar hemisfer ve bunları orta hatta birbirine bağlayan vermis olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Vermis, özellikle aksiyel kasların kontrolü ve postürün düzenlenmesi ile ilişkili iken, hemisferler ekstremiteler hareketleri, motor planlama ve ince motor koordinasyonda daha belirgin rol oynar. Sağ ve sol hemisferler, vermis aracılığıyla

fonksiyonel bir bütünlük oluşturur ve derin serebellar çekirdekler üzerinden merkezi sinir sisteminin diğer bölümleriyle iletişim kurar.

Serebellumun üst yüzü (*facies superior*) hafif konveks bir görünüm gösterir ve tentorium cerebelli ile serebrumun oksipital loblarından ayrılır. Alt yüz (*facies inferior*) ise daha düzensizdir ve orta hatta *vallecula cerebelli* adı verilen derin bir oluk içerir. *Vallecula* içerisinde *vermis inferior* bölümü yer alır. Her iki hemisfer arasında bulunan bu yapı, *inferior vermal* oluşumların değerlendirilmesinde önemli bir anatomik referans noktasıdır.

Dış yüzeydeki en önemli anatomik sınırlar *fissura prima*, *fissura horizontalis* ve *fissura posterolateralis* tarafından oluşturulur. *Fissura prima*, cerebellumu lobus anterior ve lobus posterior olmak üzere iki ana loba ayıran en belirgin oluşun adıdır. *Fissura posterolateralis*, posterior lob ile lobus *flocculonodularis* arasındaki sınırı oluşturur. *Fissura horizontalis* ise serebellumun çevresini yatay olarak dolaşan derin bir oluşun adıdır ve üst ile alt yüzün ayırt edilmesinde önemli bir anatomik işaret olarak kabul edilir(11, 16, 18).

Bu anatomik organizasyona göre cerebellum üç ana loba ayrılır:

Lobus anterior

Lobus posterior

Lobus *flocculonodularis*

Bu loblar yalnızca morfolojik bir sınıflandırmayı ifade etmez; aynı zamanda farklı afferent ve efferent bağlantılar ile belirli fonksiyonel özellikler gösterir.

Lobus anterior

Lobus anterior, cerebellumun filogenetik olarak daha eski bölümlerinden biridir ve *fissura prima*'nın önünde yer alır. Vermiste

lingula, lobulus centralis ve culmen; hemisferlerde ise bunlara karşılık gelen ala lobuli centralis ile lobulus quadrangularis anterior bu loba dahildir. Anterior lob, özellikle omurilikten gelen proprioseptif bilgilerin işlenmesinde görev alır ve postürün korunması, kas tonusunun düzenlenmesi ile yürüme sırasında gövde ve alt ekstremité hareketlerinin koordinasyonunda önemli rol oynar.

Lobus posterior

Fissura prima ile fissura posterolateralis arasında kalan bölüm lobus posterior olarak adlandırılır ve cerebellumun hacim olarak en geniş kısmını oluşturur. Vermiste sırasıyla declive, folium vermis, tuber vermis, pyramis ve uvula yer alırken; hemisferlerde bunların karşılığı olarak lobulus simplex, lobulus semilunaris superior, lobulus semilunaris inferior, lobulus biventer ve tonsilla cerebelli bulunur. Bu lob, özellikle istemli hareketlerin planlanması, ince motor koordinasyon, motor öğrenme ve serebral korteks ile olan geniş bağlantıları nedeniyle bilişsel süreçlerin düzenlenmesinde önemli görevler üstlenir.

Lobus flocculonodularis

Cerebellumun en küçük lobu olan lobus flocculonodularis, vermiste nodulus, hemisferlerde ise flocculus tarafından oluşturulur. Fissura posterolateralis ile posterior lobdan ayrılır. Vestibüler çekirdeklerle yoğun bağlantılar kurması nedeniyle denge, postür ve göz hareketlerinin düzenlenmesinde temel rol oynar. Filogenetik olarak en eski cerebellar yapı olması nedeniyle archicerebellum olarak da adlandırılır.

Vermis

Vermis, sağ ve sol serebellar hemisferleri orta hatta birleştiren dar ancak fonksiyonel açıdan son derece önemli bir yapıdır. Üstten alta doğru dokuz anatomik bölümden oluşur ve her bölümün hemisferlerde karşılık gelen bir lobülü bulunmaktadır.

Lingula

Lingula, vermisin en rostral bölümüdür ve superior medüller veluma komşu olarak yerleşmiştir. Küçük yapısına rağmen anterior lobun başlangıcını oluşturur. Hemisferlerde belirgin bir karşılığı bulunmamakla birlikte ala lobuli centralis ile fonksiyonel devamlılık gösterir.

Lobulus centralis

Lingulanın hemen posteriorunda bulunan lobulus centralis, anterior lobun önemli bileşenlerinden biridir. Her iki tarafta ala lobuli centralis ile devam eder. Gövde postürü ve proksimal kasların koordinasyonunda görev alan spinocerebellar sistem içerisinde değerlendirilmektedir.

Culmen

Culmen, vermisin superior yüzündeki en belirgin kabarıklığı oluşturur. Hemisferlerde lobulus quadrangularis ile devamlılık gösterir. Anterior lobun en geniş bölümünü oluşturan culmen, özellikle alt ekstremité hareketlerinin koordinasyonu ve kas tonusunun düzenlenmesinde önemli rol oynar.

Declive

Fissura prima'nın hemen arkasında yer alan declive, posterior lobun başlangıcını oluşturur. Adını eğimli görünümünden alan bu yapı, hemisferlerde lobulus simplex ile devam eder. Cerebrocerebellar bağlantılar açısından önemli bir bölge olup istemli hareketlerin planlanmasına katkıda bulunur.

Folium vermis

Declive'nin inferiorunda bulunan folium vermis, ince yaprak benzeri görünümü nedeniyle bu isimle adlandırılmıştır. Hemisferlerde lobulus semilunaris superior ile devamlılık gösterir.

İnce motor koordinasyon ve hareketlerin zamanlamasında görev alan posterior lobun önemli bileşenlerinden biridir.

Tuber vermis

Folium vermisin altında yer alan tuber vermis, hemisferlerde lobulus semilunaris inferior ile ilişkilidir. Posterior lobun orta bölümünü oluşturan bu yapı, serebral korteks ile kurduğu bağlantılar sayesinde motor planlama ve motor öğrenme süreçlerine katkıda bulunur.

Pyramis

Pyramis, vermisin alt bölümünde yer alan piramit şeklindeki oluşumdur. Hemisferlerde lobulus biventer ile devam eder. Özellikle gövde postürünün sürdürülmesi ve yürüyüş sırasında kas aktivitesinin koordinasyonunda rol oynadığı düşünülmektedir.

Uvula

Uvula, pyramisin inferiorunda yer alan oval şekilli vermal yapıdır. Hemisferlerde tonsilla cerebelli ile anatomik devamlılık gösterir. Vestibüler sistemle olan bağlantıları nedeniyle denge mekanizmalarının düzenlenmesine katkıda bulunur.

Nodulus

Nodulus, vermisin en kaudal bölümüdür ve flocculus ile birlikte lobus flocculonodularis'i oluşturur. Vestibüler çekirdeklerle doğrudan bağlantı kurarak baş hareketleri sırasında gözlerin sabitlenmesi ve postüral dengenin korunmasında temel görev üstlenir(11, 16).

Cerebellumun anatomik bölümleri ve hemisferik karşılıkları

Lob	Vermis oluşumu	Hemisferdeki karşılığı	Başlıca fonksiyonel ilişki
Lobus anterior	Lingula	Belirgin hemisferik karşılığı yok	Aksiyel postürün düzenlenmesi
	Lobulus centralis	Ala lobuli centralis	Gövde koordinasyonu
	Culmen	Lobulus quadrangularis	Proksimal ekstremité hareketleri ve kas tonusu
Lobus posterior	Declive	Lobulus simplex	Motor planlama
	Folium vermis	Lobulus semilunaris superior	İnce motor koordinasyon
	Tuber vermis	Lobulus semilunaris inferior	Motor öğrenme ve hareket kontrolü
	Pyramis	Lobulus biventer	Yürüme ve postür
	Uvula	Tonsilla cerebelli	Vestibüler entegrasyon
Lobus flocculonodularis	Nodulus	Flocculus	Denge, vestibülooküler refleks ve göz hareketleri

Cerebellum'un İç Yapısı

Cerebellum, diğer merkezi sinir sistemi yapılarında olduğu gibi dışta gri cevher (substantia grisea) ve içte beyaz cevher (substantia alba) olmak üzere iki temel bölümden oluşmaktadır. Dışta yer alan serebellar korteks bilgi işleme merkezi olarak görev yaparken, iç bölümde bulunan beyaz cevher afferent ve efferent liflerin geçişini sağlayan iletim yollarını içerir. Beyaz cevher içerisinde ayrıca cerebellumun temel çıkış merkezleri olan derin serebellar çekirdekler yer almaktadır.

Median sagittal kesitte beyaz cevherin dallanarak oluşturduğu karakteristik görünüm arbor vitae cerebelli (hayat ağacı) olarak adlandırılır. Bu görünüm, korteksten derin çekirdeklere ve serebellar pedinküllere uzanan yoğun sinir liflerinin makroskobik yansımasıdır. Arbor vitae yalnızca anatomik açıdan ayırt edici bir özellik olmayıp, serebellumun bilgi işleme organizasyonunun da önemli bir göstergesidir.

Serebellar korteks, histolojik olarak oldukça düzenli bir yapıya sahiptir ve üç tabakadan oluşur. Bu katmanlar dıştan içe doğru moleküler tabaka (stratum moleculare), Purkinje hücre tabakası (stratum ganglionare) ve granüler tabaka (stratum granulosum) olarak sıralanır. Korteksin bu düzenli organizasyonu, serebellumun tüm bölgelerinde büyük ölçüde benzerlik göstermesi nedeniyle "üniform kortikal yapı" olarak tanımlanmaktadır (10, 11).

Moleküler tabaka

Moleküler tabaka serebellar korteksin en dış katmanını oluşturur. Bu tabaka, Purkinje hücrelerinin geniş dendritik ağaçlarını, granül hücre aksonlarının oluşturduğu paralel lifleri ve inhibitör ara nöronlar olan stellat ile basket hücrelerini içerir. Paralel lifler Purkinje hücre dendritleri boyunca uzun mesafeler kat ederek çok sayıda sinaptik bağlantı oluşturur. Bu organizasyon cerebellumun yüksek bilgi işleme kapasitesinin temelini oluşturur(11).

Purkinje hücre tabakası

Moleküler ve granüler tabakalar arasında tek sıra halinde dizilen Purkinje hücreleri, serebellar korteksin en karakteristik nöronlarıdır. Geniş dendritik arborizasyonları moleküler tabaka içerisine uzanırken aksonları derin serebellar çekirdeklere yönelir. Purkinje hücreleri GABAerjik inhibitör nöronlar olup serebellar korteksin tek çıkış yolunu oluştururlar. Dolayısıyla serebellumdan

ıkan tüm kortikal bilgiler Purkinje hücreleri aracılığıyla derin çekirdeklere iletilmektedir.

Bu hücreler iki temel afferent sistemden uyarı alır. Bunlardan biri inferior olivary çekirdekten gelen tırmanıcı lifler (climbing fibers), diğeri ise granül hücre aksonlarının oluşturduğu **paralel lifler (parallel fibers)**dir. Tırmanıcı lifler güçlü ve özgül uyarılar oluştururken, paralel lifler çok sayıda fakat daha zayıf sinaptik bağlantılar kurar. Bu iki sistem arasındaki etkileşim serebellar plastisite ve motor öğrenmenin temel mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir (11, 16).

Granüler tabaka

Granüler tabaka serebellar korteksin en iç katmanıdır ve merkezi sinir sistemindeki en yoğun nöronal popülasyonlardan birini içerir. Bu tabakanın temel hücreleri granül hücreleri olup sayıları milyarlarca ile ifade edilmektedir. Granül hücrelerinin aksonları moleküler tabakaya yükselerek T şeklinde ikiye ayrılır ve paralel lifleri oluşturur.

Granüler tabakada ayrıca Golgi hücreleri, Lugaro hücreleri ve unipolar brush hücreleri gibi ara nöronlar da bulunur. Bu hücreler granül hücre aktivitesini düzenleyerek serebellar kortekste inhibitör geri besleme mekanizmalarının oluşmasını sağlar(10, 11).

Beyaz cevher

Korteksin altında yer alan beyaz cevher, cerebelluma gelen ve cerebellumdan çıkan milyonlarca miyelinli sinir lifini içerir. Bu liflerin büyük bölümü serebellar pednkller aracılığıyla beyin sapına bağlanmaktadır. Beyaz cevher içerisinde ayrıca serebellumun temel çıkış merkezlerini oluşturan derin çekirdekler yer alır. Korteksten gelen Purkinje hücre aksonları bu çekirdeklerde sonlanır ve daha sonra talamus, nucleus ruber, vestibüler çekirdekler ve retiküler formasyon gibi merkezlere projeksiyon gönderir.

İç yapının bu katmanlı organizasyonu, cerebellumun farklı kaynaklardan gelen bilgileri eş zamanlı olarak işleyebilmesini sağlar. Periferik proprioseptif uyarılar, vestibüler sistemden gelen bilgiler ve serebral korteksten iletilen motor planlar aynı kortikal devre içerisinde değerlendirilerek hareketlerin doğruluğu ve zamanlaması sürekli olarak optimize edilir (11, 19).

Derin Cerebellar Çekirdekler (Nuclei Cerebelli)

Cerebellumun fonksiyonel organizasyonunda serebellar korteks kadar önemli olan bir diğer yapı grubu, beyaz cevher içerisinde yer alan derin cerebellar çekirdeklerdir (nuclei cerebelli). Bu çekirdekler, serebellar korteksin temel çıkış istasyonlarını oluşturur ve Purkinje hücrelerinden gelen inhibitör sinyalleri beyin sapı ile diensefalonun çeşitli merkezlerine iletir. Başka bir ifadeyle, serebellumda işlenen bilgilerin merkezi sinir sisteminin diğer bölümlerine aktarılmasını sağlayan ana çıkış merkezleri bu çekirdeklerdir.

Derin cerebellar çekirdekler median hattan laterale doğru sırasıyla nucleus fastigii, nucleus globosus, nucleus emboliformis ve nucleus dentatus olarak adlandırılır. Nucleus globosus ile nucleus emboliformis birlikte nucleus interpositus olarak da tanımlanmaktadır. Bu çekirdeklerin her biri serebellumun belirli kortikal bölgeleriyle bağlantı kurmakta ve farklı motor ya da bilişsel fonksiyonların düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır.

Makroskobik olarak bu çekirdekler, serebellar beyaz cevher içerisinde gömülü durumda bulunur. Histolojik olarak büyük multipolar nöronlardan oluşurlar ve Purkinje hücrelerinden gelen GABAerjik inhibitör uyarılar ile mossy ve climbing liflerden gelen eksitator uyarılar arasında sürekli bir denge sağlarlar. Böylece serebellumdan çıkan motor bilgiler uygun şiddette ve doğru zamanda hedef merkezlere iletilmektedir(11, 14).

Nucleus Fastigii

Nucleus fastigii, derin cerebellar çekirdeklerin en medialinde yer alır ve adını dördüncü ventrikülün tavanını oluşturan fastigium bölgesine yakın yerleşiminden alır. Anatomik olarak vermis ile yakın ilişki içerisinde olup ve başlıca afferent liflerini vermisin Purkinje hücrelerinden alır.

Bu çekirdeğin en önemli efferent bağlantıları vestibüler çekirdekler ile retiküler formasyona yöneliktir. Ayrıca inferior cerebellar pedinkül aracılığıyla beyin sapındaki çeşitli motor merkezlerle de bağlantı kurar. Vestibüler çekirdeklere ulaşan lifler vestibülospinal yolları etkileyerek postür ve denge kontrolünün düzenlenmesine katkıda bulunur.

Fonksiyonel açıdan nucleus fastigii, gövde kaslarının koordinasyonu, postürün korunması, denge mekanizmalarının sürdürülmesi ve göz hareketlerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Özellikle ayakta durma ve yürüme sırasında gövdenin orta hatta dengede tutulması büyük ölçüde bu çekirdeğin etkinliğine bağlıdır.

Nucleus fastigii lezyonlarında gövde ataksisi, denge kaybı, geniş tabanlı yürüyüş, postür bozukluğu ve vestibüler sistem bulguları ortaya çıkabilir. İki taraflı lezyonlarda hastalar otururken dahi dengelerini korumakta güçlük çekebilirler (11, 18).

Nucleus Globosus

Nucleus globosus, nucleus fastigii ile nucleus emboliformis arasında yer alan küçük ve küresel görünüşlü çekirdeklerden oluşur. Çoğu kaynakta birkaç küçük çekirdek halinde tanımlanmasına rağmen fonksiyonel açıdan tek bir yapı olarak değerlendirilmektedir.

Başlıca afferent bağlantıları spinocerebellumun paravermal korteksinden gelir. Efferent lifleri ise büyük oranda superior

cerebellar pedinkül aracılığıyla karşı taraftaki nucleus ruber ve talamusa ulaşmaktadır.

Nucleus globosus özellikle ekstremitelerin devam eden hareketlerinin düzeltilmesinde görev alır. Hareket sırasında ortaya çıkan küçük koordinasyon hatalarının düzeltilmesi ve agonist-antagonist kas aktivitesinin senkronizasyonu bu çekirdeğin temel fonksiyonları arasında yer alır (10, 11).

Nucleus Emboliformis

Nucleus emboliformis, nucleus globosusun lateralinde yer alan kama şeklindeki çekirdektir. Fonksiyonel ve anatomik özellikleri nedeniyle nucleus globosus ile birlikte nucleus interpositus adı altında değerlendirilmektedir.

Bu çekirdek de ağırlıklı olarak spinocerebellumdan bilgi alır. Superior cerebellar pedinkül aracılığıyla nucleus ruber, talamus ve motor korteks ile bağlantı kurarak istemli hareketlerin ince ayarını sağlar.

Özellikle distal ekstremiteler hareketlerinin koordinasyonu, kas aktivitesinin zamanlaması ve motor performansın düzeltilmesi nucleus emboliformisin temel görevleri arasında yer almaktadır.

Bu çekirdeğin hasarında dismetri, disdiadokokinezi, intansiyon tremoru ve hedefe yönelik hareketlerde belirgin koordinasyon bozukluğu gelişmektedir(10, 16).

Nucleus Dentatus

Nucleus dentatus, derin cerebellar çekirdeklerin en büyüğü ve filogenetik olarak en yeni gelişenidir. Dış görünümü girintili çıkıntılı olduğundan "dentatus" (dişli çekirdek) adını almıştır. Serebellar hemisferlerin derin beyaz cevheri içerisinde yer alır ve lateral serebellar korteks ile yoğun bağlantılar kurar.

Nucleus dentatusun başlıca afferent lifleri cerebrocerebellumdan gelir. Efferent lifleri ise büyük ölçüde superior cerebellar pedinkül aracılığıyla karşı tarafa geçerek nucleus ruber, ventrolateral talamus ve oradan motor ile premotor kortekse ulaşır. Böylece serebellum ile serebral korteks arasında önemli bir geri bildirim döngüsü oluşturulur.

Fonksiyonel olarak nucleus dentatus, istemli hareketlerin planlanması, karmaşık motor aktivitelerin organizasyonu ve ince motor becerilerin geliştirilmesinde görev yapar. Yazı yazma, piyano çalma, cerrahi manipülasyonlar ve konuşma sırasında gerekli olan hassas kas koordinasyonu büyük ölçüde bu çekirdeğin katkısıyla gerçekleşmektedir.

Son yıllarda yapılan fonksiyonel görüntüleme çalışmaları nucleus dentatusun yalnızca motor sistem ile ilişkili olmadığını, aynı zamanda prefrontal korteks ve posterior parietal korteks ile oluşturduğu bağlantılar sayesinde dikkat, çalışma belleği, yürütücü işlevler ve dil gibi bilişsel süreçlerde de rol aldığını göstermektedir.

Nucleus dentatus lezyonlarında istemli hareketlerde belirgin koordinasyon kaybı, intansiyon tremoru, dismetri, hareketlerin parçalanması (decomposition of movement), konuşma bozukluğu ve motor öğrenme kapasitesinde azalma ortaya çıkmaktadır (10, 11).

Cerebellum'un Input ve Output'ları

Cerebellum, merkezi sinir sisteminin hemen hemen tüm motor merkezleriyle karşılıklı bağlantılar kuran, çok sayıda afferent ve efferent yol içeren karmaşık bir sinir ağına sahiptir. Serebellar korteks, periferden ve supraspinal merkezlerden gelen bilgileri sürekli olarak değerlendirir; bu bilgileri derin serebellar çekirdeklerde bütünleştirerek yeniden merkezi sinir sisteminin ilgili bölgelerine gönderir. Böylece hareketlerin planlanması, koordinasyonu, zamanlaması ve düzeltilmesi gerçek zamanlı olarak sağlanır.

Fonksiyonel açıdan cerebellumun afferent sistemi, hareket hakkında bilgi sağlayan duyuşal girdiler ile serebral kortekste planlanan motor komutların kopyalarını taşır. Efferent sistem ise bu bilgilerin değerlendirilmesi sonucunda oluşan düzenleyici sinyalleri talamus, beyin sapı ve omuriliğe ileterek motor aktivitenin hassas şekilde kontrol edilmesini sağlar. Serebellumun bilgi işleme mekanizması, korteks, derin serebellar çekirdekler ve serebellar pedinküller arasında kurulan çok yönlü devreler sayesinde gerçekleşmektedir (10, 11).

Afferent Sistem

Serebelluma ulaşan afferent liflerin büyük çoğunluğu mossy (yosunsu) lifler ve climbing (tırmanıcı) lifler olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir. Bu iki lif sistemi, serebellar korteks içerisinde farklı sinaptik organizasyonlara sahip olup bilgi işleme süreçlerinde birbirini tamamlayıcı görevler üstlenmektedir (11).

Mossy Lifler

Mossy lifler, serebelluma ulaşan afferent liflerin büyük çoğunluğunu oluşturur. Bu lifler; pontin çekirdekler, vestibüler çekirdekler, retiküler formasyon, omurilik ve trigeminal çekirdeklerden kaynaklanır. Serebellar kortekse ulaştıktan sonra doğrudan Purkinje hücreleriyle sinaps yapmazlar. Bunun yerine granüler tabakada bulunan granül hücreleriyle sinaptik bağlantılar oluştururlar.

Granül hücrelerinin aksonları moleküler tabakaya yükselerek ikiye ayrılır ve paralel lifleri (parallel fibers) meydana getirir. Paralel lifler, uzun mesafeler boyunca çok sayıda Purkinje hücresinin dendritleriyle temas ederek geniş bir bilgi dağılımı sağlar. Böylece tek bir mossy liften gelen bilgi, çok sayıda Purkinje hücresine iletilerek serebellar kortekste yaygın bir sinaptik ağ oluşturulur.

Mossy lifler, hareketin planlanması ve mevcut postür hakkında sürekli bilgi taşıyan temel afferent sistemdir. Bu nedenle motor koordinasyonun gerçek zamanlı düzenlenmesinde büyük önem taşırlar (11).

Climbing Lifler

Climbing liflerin tamamına yakını inferior olivary nucleus kaynaklıdır. Her Purkinje hücresi yalnızca bir climbing lif tarafından innerve edilmesine rağmen, bu tek lif Purkinje hücresinin dendritleri boyunca yüzlerce sinaps oluşturur. Bu nedenle climbing liflerin oluşturduğu uyarı oldukça güçlüdür.

Motor öğrenme açısından climbing lifler özel öneme sahiptir. Hareket sırasında meydana gelen hata sinyalleri inferior olivary çekirdeğe ulaşır ve buradan climbing lifler aracılığıyla Purkinje hücrelerine iletilir. Bu mekanizma sayesinde sinaptik plastisite gelişir ve tekrar eden hareketler giderek daha doğru şekilde gerçekleştirilmeye başlanır.

Uzun süreli depresyon (Long-Term Depression; LTD) mekanizmasının özellikle climbing lif–Purkinje hücresi sinapslarında gerçekleştiği gösterilmiş olup motor öğrenmenin hücresel temelini oluşturmaktadır (10, 11).

Purkinje Hücreleri

Purkinje hücreleri serebellar korteksin tek efferent nöronlarıdır. Bu hücreler hem paralel liflerden hem de climbing liflerden bilgi alır. Aldıkları tüm bilgileri bütünleştirerek GABAerjik inhibitör aksonları aracılığıyla derin serebellar çekirdeklere gönderirler.

Purkinje hücrelerinin spontan aktivite göstermesi, serebellar çekirdeklerin sürekli belirli bir inhibisyon altında tutulmasını sağlar. Hareket sırasında bu inhibisyonun derecesi değişerek serebellar çıkışın hassas biçimde ayarlanmasına olanak tanır.

Bu düzenleyici mekanizma sayesinde cerebellum, hareketleri doğrudan başlatmaksızın motor sistem üzerinde ince ayar görevi üstlenmektedir (11).

Derin Cerebellar Çekirdekler

Derin serebellar çekirdekler, serebellumun gerçek çıkış merkezlerini oluşturur. Mossy ve climbing liflerden doğrudan eksitator uyarılar alırken, Purkinje hücrelerinden inhibitör sinyaller alırlar. Bu iki sistem arasındaki denge sonucunda oluşan çıkış sinyalleri serebellumun diğer beyin bölgeleri üzerindeki düzenleyici etkisini belirlemektedir.

Bu organizasyon sayesinde cerebellum, hem periferden gelen proprioseptif bilgileri hem de serebral korteksten gelen motor planları karşılaştırarak en uygun motor cevabı oluşturur (10).

Efferent Sistem

Serebellumdan çıkan liflerin büyük bölümü derin serebellar çekirdeklerden başlar. Bu lifler başlıca superior cerebellar pedinkül aracılığıyla beyin sapına ve talamusa ulaşmaktadır.

Nucleus dentatus kaynaklı lifler ventrolateral talamusta sonlanır ve buradan primer motor korteks, premotor korteks ile suplementer motor alana projekte olur. Böylece serebellum istemli hareketlerin planlanmasına katkıda bulunur.

Nucleus interpositus kaynaklı lifler büyük ölçüde nucleus ruber ulaşarak rubrospinal sistem üzerinde etkili olur.

Nucleus fastigii ise vestibüler çekirdekler ve retiküler formasyona projeksiyon göndererek vestibülospinal ve retikülospinal yollar aracılığıyla postür ile denge mekanizmalarını düzenler(10, 11).

Cerebellar Bilgi İşleme Döngüsü

Serebellumun çalışma prensibi bir geri bildirim sistemi şeklindedir. Hareket başlamadan önce serebral korteksten gelen motor plan pontin çekirdekler aracılığıyla cerebelluma iletilir. Aynı anda omurilikten ve vestibüler sistemden gelen proprioseptif bilgiler mevcut hareket hakkında bilgi sağlar. Cerebellar korteks bu iki bilgi kaynağını karşılaştırır ve ortaya çıkan farklılıkları derin serebellar çekirdekler aracılığıyla motor merkezlere geri gönderir.

Bu mekanizma sayesinde;
hareketlerin doğruluğu artar,
gereksiz kas aktivitesi önlenir,
enerji tüketimi azalır,
hareketler daha akıcı hâle gelir,
yeni motor beceriler öğrenilebilir.

Dolayısıyla cerebellum, motor sistem içerisinde gerçek zamanlı çalışan biyolojik bir "hata düzeltme ve optimizasyon merkezi" olarak görev yapmaktadır (10, 11).

Pedunculi Cerebellares

Cerebellum, merkezi sinir sisteminin diğer bölümleriyle doğrudan anatomik bağlantı kuran izole bir yapı değildir. Beyin sapı ile olan iletişimi, pedunculi cerebellares adı verilen üç çift kalın beyaz cevher demeti aracılığıyla sağlanır. Bu bağlantılar; cerebelluma ulaşan afferent bilgilerin iletilmesi, serebellumda işlenen bilgilerin ilgili motor merkezlere aktarılması ve serebellar fonksiyonların bütünlüğünün korunması açısından temel öneme sahiptir.

Her serebellar pedinkül, embriyolojik gelişim sürecinde farklı beyin sapı bölümleriyle ilişki kuracak şekilde organize

olmuştur. Üst pedinkül ağırlıklı olarak mezensefalon ile, orta pedinkül pons ile, alt pedinkül ise medulla oblongata ve omurilik ile bağlantı sağlar. Bununla birlikte her pedinkül yalnızca anatomik bir bağlantı yolu olmayıp, belirli fonksiyonel sistemlerin taşıyıcısıdır.

Makroskopik olarak pedinküller serebellumun ön yüzünden çıkarak beyin sapına doğru uzanır. İçerdikleri liflerin büyük çoğunluğu miyelinli aksonlardan oluştuğu için kesitlerde beyaz cevher görünümündedir. Liflerin büyük kısmı afferent karakter taşımakla birlikte, cerebellumdan çıkan önemli efferent yollar da bu demetler içerisinde yer almaktadır (10, 13).

Pedunculus Cerebellaris Superior

Pedunculus cerebellaris superior (brachium conjunctivum), cerebellumu mezensefalona bağlayan en küçük fakat fonksiyonel açıdan en önemli serebellar pedinküldür. Başlıca görevi, cerebellumda işlenen bilgilerin üst motor merkezlerine iletilmesini sağlamaktır. Bu nedenle superior pedinkül, cerebellumun temel efferent çıkış yolu olarak kabul edilmektedir.

Superior pedinkülün liflerinin büyük bölümü nucleus dentatus ve nucleus interpositus kaynaklıdır. Bu lifler mezensefalon düzeyinde karşı tarafa çapraz yaparak (decussatio pedunculorum cerebellarium superiorum) ventrolateral talamusa ve nucleus rubere ulaşır. Talamusta sinaps yapan lifler daha sonra primer motor korteks, premotor korteks ve suplementer motor alana projekte olur. Böylece cerebellum tarafından düzenlenen motor bilgiler serebral kortekse geri iletilmiş olur.

Superior pedinkül yalnızca efferent lifler içermez. Ventral (anterior) spinoserebellar trakt ve rostral spinoserebellar trakt gibi bazı proprioseptif yollar da cerebelluma bu pedinkül aracılığıyla ulaşır. Bu nedenle hem çıkış hem de sınırlı sayıda giriş lifini taşıyan karma bir bağlantı demeti olarak değerlendirilmektedir.

Fonksiyonel açıdan superior pedinkül; istemli hareketlerin planlanması, hareketlerin zamanlaması, ekstremiteler koordinasyonu ve motor öğrenme süreçlerinde önemli rol oynar. Bu pedinkülün hasarında ipsilateral ekstremiteler ataksisi, dismetri, intansiyon tremoru ve ince motor becerilerde belirgin bozulma ortaya çıkmaktadır(10, 11).

Pedunculus Cerebellaris Medius

Pedunculus cerebellaris medius (brachium pontis), üç serebellar pedinkül içerisinde en kalın olanıdır. Tamamına yakını afferent liflerden oluşur ve cerebellumu pons ile birleştirir.

Bu pedinkülün temel lif grubunu pontocerebellar lifler oluşturur. Serebral korteksin frontal, parietal, temporal ve oksipital bölgelerinden çıkan corticopontin lifler önce ipsilateral pontin çekirdeklere ulaşır. Burada sinaps yaptıktan sonra karşı tarafa geçen pontocerebellar lifler pedunculus cerebellaris medius aracılığıyla cerebellar hemisferlere girer.

Bu bağlantı sayesinde serebral kortekste planlanan istemli hareketler, henüz uygulanmadan önce cerebelluma bildirilmiş olur. Böylece cerebellum hareket başlamadan gerekli hesaplamaları yapabilir ve oluşabilecek koordinasyon hatalarını önceden öngörebilir.

Pedunculus cerebellaris medius, özellikle cerebrocerebellum ile yakın ilişki içerisinde. Bu nedenle ince motor hareketlerin planlanması, istemli ekstremiteler hareketlerinin organizasyonu ve karmaşık motor davranışların öğrenilmesinde önemli rol üstlenmektedir.

Pontin infarktlar veya orta pedinkülü tutan demiyelinizan hastalıklarda hastalarda belirgin ipsilateral ekstremiteler ataksisi, koordinasyon bozukluğu ve istemli hareketlerde düzensizlik ortaya çıkabilir (11, 14).

Pedunculus Cerebellaris Inferior

Pedunculus cerebellaris inferior (corpus restiforme ve juxtarestiforme), cerebellumu medulla oblongata ile bağlayan karma yapıda bir pedinküldür. Hem afferent hem de efferent lifler içermesi nedeniyle serebellumun en kompleks bağlantı yolunu oluşturur.

Pedinkülün büyük bölümünü oluşturan corpus restiforme, omurilik ve beyin sapından gelen afferent lifleri taşıırken; juxtarestiform body daha çok vestibüler çekirdeklerle olan karşılıklı bağlantılarda görev alır.

Pedunculus cerebellaris inferior içerisinden geçen başlıca afferent yollar şunlardır:

Posterior spinocerebellar trakt

Cuneocerebellar trakt

Olivocerebellar lifler

Vestibulocerebellar lifler

Reticulocerebellar lifler

Trigeminocerebellar lifler

Bu yollar sayesinde propioseptif bilgi, vestibüler uyarılar, kas tonusu ile ilgili veriler ve motor öğrenmede görev alan hata sinyalleri cerebelluma ulaşmaktadır.

Inferior pedinkül aynı zamanda nucleus fastigiiden çıkan efferent lifleri de taşır. Bu lifler vestibüler çekirdeklere ve retiküler formasyona ulaşarak postür, denge ve göz hareketlerinin düzenlenmesine katkıda bulunur.

Fonksiyonel olarak inferior pedinkül, vücudun mevcut durumu hakkında cerebelluma sürekli bilgi sağlayan temel giriş kapısıdır. Bu nedenle denge, postür ve yürüyüş sırasında gerekli olan

proprioseptif geri bildirim büyük ölçüde bu pedinkül aracılığıyla taşınmaktadır.

Bu yapının lezyonlarında gövde ataksisi, yürüme bozukluğu, hipotoni, nistagmus ve denge kaybı ön plandadır (10, 11).

Pedunculi Cerebellares'in Fonksiyonel Organizasyonu

Üç serebellar pedinkül birlikte değerlendirildiğinde, cerebellumun merkezi sinir sistemiyle çift yönlü iletişimini sağlayan entegre bir ağ oluşturdıkları görülmektedir. Orta pedinkül serebral korteksten gelen motor planları cerebelluma taşırken, inferior pedinkül periferden gelen proprioseptif ve vestibüler bilgileri iletmektedir. Superior pedinkül ise cerebellumda işlenen bilgileri talamus ve motor kortekse geri göndererek istemli hareketlerin hassas biçimde düzenlenmesini sağlar.

Bu organizasyon sayesinde cerebellum, planlanan hareket ile gerçekleşen hareket arasındaki farklılıkları sürekli olarak karşılaştırır ve oluşan hata sinyallerini milisaniyeler içerisinde düzelterek motor performansın en üst düzeye ulaşmasına katkıda bulunur. Hareketlerin akıcılığı, ritmi, zamanlaması ve doğruluğu büyük ölçüde bu bağlantı sisteminin bütünlüğüne bağlıdır(10, 11).

Beyinciğin Damarları

Cerebellum, merkezi sinir sisteminin metabolik aktivitesi en yüksek yapılarından biri olup, fonksiyonlarını sürdürebilmesi için zengin ve sürekli bir kan akımına ihtiyaç duyar. İstemli hareketlerin koordinasyonu, denge, postür ve motor öğrenme gibi karmaşık görevleri yerine getirebilmesi, yeterli serebral perfüzyonun sağlanmasına bağlıdır. Bu nedenle cerebellar dolaşımın bozulması, kısa sürede belirgin nörolojik bulguların ortaya çıkmasına neden olabilir.

Cerebellumun arteriyel kanlanması temel olarak vertebrobaziler sistem tarafından sağlanmaktadır. Vertebral

arterlerin birleşmesiyle oluşan arteria basilaris, cerebelluma ulaşan ana arterlerin büyük bölümünü verir. Arteria basilaris ile vertebral arterlerden köken alan üç çift arter, serebellumun hemen tüm kortikal ve derin yapılarını beslemektedir. Bunlar;

Arteria cerebelli superior (SCA)

Arteria cerebelli anterior inferior (AICA)

Arteria cerebelli posterior inferior (PICA)

olarak adlandırılmaktadır.

Bu arterler arasında belirli bölgelerde anastomozlar bulunsa da her arterin ağırlıklı olarak beslediği anatomik alanlar bulunmaktadır. Klinik uygulamada serebellar infarktların lokalizasyonu çoğunlukla bu vasküler dağılıma göre değerlendirilmektedir (10-12).

Arteria Cerebelli Superior (SCA)

Arteria cerebelli superior, genellikle arteria basilarisin terminal bifurkasyonuna yakın bölümünden köken alır. Oluşumundan sonra laterale doğru ilerleyerek mezensefalonun çevresini dolaşır ve trochlear sinir ile yakın komşuluk gösterir. Daha sonra cerebellumun superior yüzüne ulaşarak çok sayıda kortikal dala ayrılır.

SCA'nın beslediği başlıca yapılar şunlardır:

Superior vermis

Lobus anteriorun büyük bölümü

Superior yüzün önemli kısmı

Lobulus simplex

Superior semilunar lobül

Derin beyaz cevherin üst bölümü

Nucleus dentatusun önemli kısmı

Superior cerebellar pedinkülün büyük bölümü

SCA ayrıca rostral pons ve kaudal mezensefalonun belirli bölgelerine de ince perforan dallar verir.

SCA tıkanıklığında en sık görülen klinik bulgular ipsilateral ekstremitate ataksisi, dismetri, disdiadokokinezi, intansiyon tremoru ve konuşma bozukluğudur. Lezyon superior pedinkülü de etkiliyorsa belirgin koordinasyon bozukluğu gelişebilir (11).

Arteria Cerebelli Anterior Inferior (AICA)

Arteria cerebelli anterior inferior, çoğunlukla arteria basilarisin alt yarısından köken alır. Laterale doğru ilerleyerek ponsun ön-alt yüzünü dolaşır ve cerebellopontin açığı bölgesine ulaşır. Bu nedenle fasiyal sinir (VII) ve vestibulokoklear sinir (VIII) ile yakın anatomik ilişki içerisindedir.

AICA'nın beslediği başlıca yapılar şunlardır:

Cerebellumun anteroinferior yüzü

Flocculusun büyük bölümü

Orta cerebellar pedinkül

Ponsun lateral alt kısmı

Vestibüler ve koklear çekirdeklerin bir bölümü

Bazı bireylerde arteria labirinthi (internal auditory artery) doğrudan AICA'dan köken almaktadır. Bu nedenle AICA infarktlarında yalnızca serebellar belirtiler değil, işitme ve vestibüler sistem bulguları da ortaya çıkabilmektedir.

Klinik olarak AICA sendromunda;

Vertigo

Bulantı

Kusma

Nistagmus

İşitme kaybı

Fasiyal paralizi

Ipsilateral ataksi

Duyu bozuklukları birlikte görülebilir(11).

Arteria Cerebelli Posterior Inferior (PICA)

Arteria cerebelli posterior inferior, vertebral arterin en büyük dalıdır ve cerebellumun en geniş sulama alanına sahip arteridir. Vertebral arterden çıktıktan sonra medulla oblongatanın çevresini dolaşarak cerebellumun inferior yüzüne ulaşır.

PICA'nın beslediği başlıca yapılar şunlardır:

İnferior vermis

Tonsilla cerebelli

Uvula

Pyramis

Biventer lobül

İnferior semilunar lobülün büyük kısmı

Nodusun bir bölümü

İnferior cerebellar pedinkülün önemli kısmı

Medulla oblongatanın dorsolateral bölgesi

PICA'nın suladığı alanlar denge ve postürün düzenlenmesinde önemli rol oynayan yapıları içerdiğinden, bu arterin tıkanıklığında belirgin vestibüler bulgular ortaya çıkmaktadır.

PICA'nın en önemli klinik özelliği, lateral medüller (Wallenberg) sendromunun en sık nedenlerinden biri olmasıdır. Bu tabloda;

Şiddetli vertigo

Bulantı ve kusma

Nistagmus

İpsilateral Horner sendromu

Disfaji

Disfoni

İpsilateral yüz duyusu kaybı

Kontralateral gövde ve ekstremitelerde ağrı-sıcaklık duyusu kaybı

İpsilateral serebellar ataksi birlikte görülebilir (10).

Venöz Drenaj

Cerebellumun venöz drenajı, yüzeysel ve derin venler aracılığıyla gerçekleştirilir. Kortikal venler öncelikle yüzeysel serebellar venlere açılır. Daha sonra bu venler çeşitli dural venöz sinüslere boşalır.

Başlıca venöz drenaj yolları şunlardır:

Vena cerebelli superior

Vena cerebelli inferior

Vena precentralis cerebelli

Bu venler;

Sinus rectus

Sinus transversus

Sinus petrosus superior

Sinus occipitalis gibi dural venöz sinüslere açılarak serebellar venöz dolaşımı tamamlar.

Derin beyaz cevher ve derin cerebellar çekirdeklerden gelen venöz kan ise derin serebellar venler aracılığıyla yüzeysel venöz sisteme katılır (10, 11).

Klinik Anatomi ve Klinik Korelasyon

Cerebellum lezyonları, kas kuvvetinden çok hareketlerin koordinasyonunu etkiler. Bu nedenle serebellar hastalıklarda temel klinik bulgular; ataksi, denge bozukluğu, istemli hareketlerde koordinasyon kaybı ve göz hareketlerindeki düzensizliklerdir. Klinik belirtilerin tipi, lezyonun yerleştiği fonksiyonel bölgeye göre değişiklik gösterir. Vestibulocerebellumun etkilenmesi daha çok denge ve okülomotor bozukluklara, spinocerebellumun hasarı gövde ve yürüyüş ataksisine, cerebrocerebellum lezyonları ise ince motor hareketlerde bozulma ve motor planlama kusurlarına neden olur.

Serebellar lezyonların en karakteristik bulgusu ataksidir. Ataksi; istemli hareketlerin koordinasyonunun bozulması, geniş tabanlı yürüyüş, denge kaybı ve hedefe yönelik hareketlerde düzensizlik ile karakterizedir. Ekstremit ataksisi özellikle serebellar hemisfer lezyonlarında görülürken, vermis lezyonlarında gövde ataksisi ön plandadır.

Serebellar disfonksiyonun diğer önemli bulguları arasında dismetri, disdiadokokinezi, intansiyon tremoru, hipotoni, rebound fenomeni, nistagmus ve ataksik dizatri yer alır. Dismetri, hedefe yönelik hareketlerin doğru mesafede sonlandırılmaması; disdiadokokinezi ise hızlı ardışık karşıt hareketlerin yapılamaması olarak tanımlanır. İntansiyon tremoru hareket sırasında belirginleşirken, hipotoni kas tonusunda azalma ile karakterizedir. Vestibulocerebellumun etkilenmesi nistagmusa ve denge

bozukluğuna yol açabilirken, konuşma kaslarının koordinasyonunun bozulması ataksik dizartriye neden olur.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, cerebellumun yalnızca motor fonksiyonlarla sınırlı olmadığını göstermiştir. Özellikle posterior serebellar hemisferlerin prefrontal korteks ve limbik sistem ile olan bağlantıları sayesinde dikkat, yürütücü işlevler, dil ve duygusal düzenleme süreçlerine katkıda bulunduğu bilinmektedir. Bu bölgelerin hasarında Cerebellar Cognitive Affective Syndrome (CCAS) olarak tanımlanan bilişsel ve davranışsal bozukluklar gelişebilmektedir.

Posterior kranial fossada gelişen kitle lezyonları, serebellar ödem veya geniş serebellar infarktlar sonucunda tonsilla cerebelli foramen magnumdan aşağı doğru yer değiştirebilir. Tonsiller herniasyon olarak adlandırılan bu durum, medulla oblongata üzerine bası oluşturarak yaşamı tehdit eden nörolojik tablolara neden olabileceğinden nöroşirürjik acil olarak kabul edilir. Ayrıca Arnold–Chiari malformasyonu, serebellar tonsillerin doğumsal olarak foramen magnum seviyesinin altına yer değiştirmesiyle karakterize olup denge bozukluğu, baş ağrısı ve çeşitli nörolojik semptomlarla seyredebilir(14, 18).

BASAL ÇEKİRDEKLER

İnsanlarda istemli hareketlerin oluşumu yalnızca primer motor korteks ve piramidal yol aracılığıyla gerçekleşmez. Hareketlerin planlanması, başlatılması, uygun şiddette sürdürülmesi ve sonlandırılması sırasında serebral korteks, basal çekirdekler, cerebellum ve beyin sapı arasında karmaşık bir etkileşim bulunmaktadır. Bu yapıların koordineli çalışması sayesinde hareketler akıcı, amaçlı ve çevresel koşullara uyumlu biçimde gerçekleştirilebilir.

Geçmişte motor sistem; piramidal sistem ve ekstrapiramidal sistem olmak üzere iki ayrı bölüm halinde değerlendirilmiştir.

Piramidal sistemin istemli hareketlerin doğrudan yürütülmesinden, ekstrapiramidal sistemin ise istemsiz motor düzenlemeden sorumlu olduğu kabul edilmiştir. Ancak nöroanatomi ve nörofizyoloji alanındaki güncel çalışmalar, bu iki sistem arasında kesin anatomik bir ayırım bulunmadığını ve motor kontrolün birbirleriyle yoğun bağlantılar kuran çok sayıda nöral ağ tarafından gerçekleştirildiğini göstermiştir. Buna rağmen "ekstrapiramidal sistem" terimi, klinik uygulamalarda ve eğitim amaçlı kaynaklarda hâlen yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ekstrapiramidal sistem; basal çekirdekler başta olmak üzere substantia nigra, nucleus subthalamicus, nucleus ruber, vestibüler çekirdekler, retiküler formasyon ve bunlarla ilişkili inen motor yolları kapsayan fonksiyonel bir organizasyondur. Bu sistem, doğrudan alt motor nöronları uyarmaktan çok motor korteksin aktivitesini düzenleyerek istemli hareketlerin kalitesini artırır. Böylece gereksiz kas aktivasyonu baskılanırken, hedefe yönelik uygun motor programların seçilmesi ve yürütülmesi sağlanır.

Basal çekirdekler, ekstrapiramidal sistemin en önemli bileşenini oluşturur. Serebral korteks, talamus, substantia nigra, nucleus subthalamicus ve beyin sapındaki diğer motor merkezlerle karşılıklı bağlantılar kurarak motor kontrolün düzenlenmesinde merkezi rol oynarlar. Bu bağlantılar sayesinde hareketlerin başlatılması, uygun motor programın seçilmesi, istenmeyen hareketlerin inhibisyonu ve öğrenilmiş motor davranışların otomatik hâle getirilmesi mümkün olur.

Motor fonksiyonların yanı sıra basal çekirdeklerin bilişsel ve emosyonel süreçlerde de görev aldığı bilinmektedir. Prefrontal korteks, limbik sistem ve orbitofrontal korteks ile kurdukları bağlantılar sayesinde karar verme, ödül mekanizmaları, motivasyon, alışkanlık gelişimi ve bazı yürütücü işlevlerin düzenlenmesine katkıda bulunurlar. Bu nedenle basal çekirdekleri etkileyen

hastalıklarda yalnızca motor belirtiler değil, bilişsel ve davranışsal değişiklikler de ortaya çıkabilmektedir.

Ekstrapiramidal sistemin en önemli özelliği, öğrenilmiş hareketlerin otomatik olarak yürütülmesini sağlamasıdır. Yazı yazma, yürüyüş, bisiklete binme, dans etme, müzik aleti çalma veya klavye kullanma gibi başlangıçta bilinçli dikkat gerektiren hareketler, tekrarlar sonucunda büyük ölçüde basal çekirdeklerin kontrolüne geçerek daha az bilişsel çabayla gerçekleştirilebilir. Böylece birey aynı anda farklı bilişsel görevleri yerine getirirken karmaşık motor aktiviteleri de sürdürebilmektedir.

Basal çekirdeklerin fonksiyonlarının bozulması çeşitli hiperkinetik ve hipokinetik hareket bozukluklarına yol açmaktadır. Parkinson hastalığında hareketlerin başlatılması güçleşirken istemsiz tremor ve rijidite gelişmektedir. Huntington hastalığında koreik hareketler ön plana çıkarken, nucleus subthalamicus lezyonlarında hemiballismus, distoni ve çeşitli diskineziler görülebilmektedir. Bu nedenle basal çekirdekler yalnızca nöroanatominin değil, nöroloji ve nöroşirürjinin de temel çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır(10, 11, 18, 20).

Basal Çekirdekler (Nuclei Basales)

Basal çekirdekler (nuclei basales), serebral hemisferlerin derin beyaz cevheri içerisinde yer alan ve gri cevherden oluşan nöron topluluklarıdır. Bu çekirdekler, istemli hareketlerin düzenlenmesinde merkezi rol oynayan ekstrapiramidal sistemin temel bileşenleridir. Anatomik olarak telensefalonda yer almalarına rağmen, fonksiyonel açıdan diencephalon ve mezensefalondaki bazı çekirdeklerle birlikte bütünleşik devreler oluştururlar. Bu nedenle günümüzde basal çekirdekler, yalnızca anatomik bir yapı grubu değil, kortiko-basal gangliyon-talamo-kortikal döngüler içerisinde görev yapan fonksiyonel bir ağ olarak değerlendirilmektedir.

Geçmişte bu yapılar için basal ganglionlar (basal ganglia) terimi kullanılmıştır. Ancak "ganglion" terimi periferik sinir sistemindeki nöron topluluklarını ifade ettiğinden, merkezi sinir sistemi içerisinde bulunan bu yapılar için anatomik açıdan doğru terminoloji **basal çekirdekler (nuclei basales)**dir. Buna rağmen özellikle klinik nöroloji ve uluslararası literatürde "basal ganglia" terimi yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir.

Basal çekirdekler, serebral korteksten gelen bilgileri doğrudan omuriliğe iletmez. Bunun yerine korteks, talamus, substantia nigra, nucleus subthalamicus ve beyin sapındaki diğer motor merkezlerden gelen bilgileri işleyerek uygun motor programların seçilmesini ve gereksiz motor aktivitelerin baskılanmasını sağlar. Böylece hareketlerin başlatılması, sürdürülmesi ve sonlandırılması sırasında motor korteksin aktivitesi sürekli olarak düzenlenmiş olur.

Motor fonksiyonların yanı sıra basal çekirdekler; öğrenme, alışkanlık gelişimi, ödül mekanizmaları, motivasyon, emosyonel davranışlar ve yürütücü bilişsel işlevlerde de görev almaktadır. Limbik sistem ve prefrontal korteks ile kurdukları bağlantılar sayesinde davranışların planlanması, karar verme süreçleri ve motor öğrenmenin pekiştirilmesine katkıda bulunurlar. Bu nedenle basal çekirdek hastalıklarında yalnızca hareket bozuklukları değil, bilişsel ve psikiyatrik belirtiler de görülebilmektedir.

Basal çekirdekler birbirleriyle yoğun afferent ve efferent bağlantılar kurarak paralel çalışan çok sayıda devre oluştururlar. Bu devrelerin temel nörotransmitterleri glutamat, GABA ve dopamindir. Glutamaterjik yollar çoğunlukla eksitator etki gösterirken, GABAerjik bağlantılar inhibitör özellik taşır. Dopamin ise substantia nigra pars compactadan salınarak motor devrelerin aktivitesini düzenleyen en önemli nöromodulatorlerden biridir. Dopaminerjik iletimin bozulması Parkinson hastalığının temel patofizyolojik mekanizmasını oluşturmaktadır.

Güncel sınıflamaya göre basal çekirdek sistemi beş ana yapıdan oluşmaktadır: nucleus caudatus, putamen, globus pallidus, nucleus subthalamicus ve substantia nigra. Bu yapılardan nucleus caudatus ile putamen birlikte striatumu, putamen ile globus pallidus ise nucleus lentiformisi oluşturur. Fonksiyonel açıdan striatum, kortikal bilgilerin basal çekirdeklere giriş yaptığı temel bölgeyi oluştururken, globus pallidus özellikle iç segmenti aracılığıyla talamusa gönderilen motor çıktının önemli kısmını sağlar. Nucleus subthalamicus ve substantia nigra ise bu devrelerin düzenlenmesinde kritik rol oynayan yardımcı çekirdeklerdir.

Son yıllarda gelişen görüntüleme yöntemleri ve nörofizyolojik çalışmalar, basal çekirdeklerin birbirinden bağımsız çalışan çekirdekler olmadığını; motor, okülomotor, limbik ve bilişsel fonksiyonlara yönelik paralel kortiko-striato-talamo-kortikal döngüler içerisinde görev yaptığını ortaya koymuştur. Bu nedenle günümüzde basal çekirdekler, hareketlerin yalnızca başlatılmasını değil, aynı zamanda motor davranışların seçimi, otomatikleşmesi ve çevresel koşullara uygun şekilde düzenlenmesini sağlayan dinamik bir kontrol sistemi olarak kabul edilmektedir(10, 11, 18).

Basal Çekirdekleri Oluşturan Yapılar

Basal çekirdekler, serebral hemisferlerin derin beyaz cevheri içerisinde yer alan ve fonksiyonel olarak birbirleriyle bağlantılı gri cevher kitlelerinden oluşur. Anatomik konumları, embriyolojik kökenleri ve bağlantıları bakımından farklı özellikler göstermelerine rağmen, motor kontrolün düzenlenmesinde ortak görev üstlenirler. Bu çekirdekler, serebral korteksten gelen bilgileri işleyerek talamus aracılığıyla yeniden kortekse ileten kapalı devreler oluşturur. Böylece istemli hareketlerin planlanması, başlatılması, koordinasyonu ve sonlandırılması hassas biçimde düzenlenir.

Geçmişte basal çekirdeklerin sınıflandırılmasında yalnızca anatomik yerleşim esas alınırken, günümüzde fonksiyonel

bağlantılar ve nörokimyasal özellikler de dikkate alınmaktadır. Bu nedenle modern sınıflandırmada nucleus subthalamicus ve substantia nigra da basal çekirdek sisteminin ayrılmaz bileşenleri olarak kabul edilmektedir(11, 17).

Güncel anatomik sınıflamaya göre basal çekirdek sistemi aşağıdaki yapılardan oluşmaktadır:

Nucleus caudatus

Putamen

Globus pallidus

Nucleus subthalamicus

Substantia nigra

Bu çekirdeklerin her biri motor devre içerisinde farklı görevler üstlenmektedir. Nucleus caudatus ve putamen, serebral korteksten gelen bilgilerin sisteme giriş yaptığı temel yapılardır. Bu iki yapı birlikte striatumu oluşturur ve motor programların seçilmesinde önemli rol oynar. Globus pallidus ise özellikle iç segmenti aracılığıyla basal çekirdeklerin ana çıkış çekirdeğini oluşturur ve talamusa inhibitör sinyaller gönderir. Nucleus subthalamicus, eksitator glutamaterjik bağlantılarıyla globus pallidusun aktivitesini düzenlerken, substantia nigra dopaminerjik projeksiyonları sayesinde striatal aktiviteyi modüle ederek hareketlerin normal şekilde gerçekleşmesini sağlar.

Fonksiyonel açıdan değerlendirildiğinde bu çekirdekler tek başlarına değil, korteks, talamus ve beyin sapı ile birlikte çalışan geniş nöronal ağların parçalarıdır. Bu ağların herhangi bir bölümünde meydana gelen bozukluk, hareketlerin yavaşlaması, istemsiz hareketlerin ortaya çıkması veya motor koordinasyonun bozulması ile sonuçlanabilir (11, 14).

Basal çekirdeklerin güncel anatomik sınıflaması

Temel çekirdek	Oluşturduğu yapı / Diğer isimleri	Temel özelliği
Nucleus caudatus	Striatum (Putamen ile birlikte)	Kortikal afferentlerin önemli giriş noktası
Putamen	Striatum ve nucleus lentiformisin parçası	Motor kontrol ve öğrenilmiş hareketlerin düzenlenmesi
Globus pallidus	Nucleus lentiformisin medial bölümü	Basal çekirdeklerin temel çıkış çekirdeği
Nucleus subthalamicus	Subtalamik çekirdek	İndirekt motor yolun eksitator bileşeni
Substantia nigra	Pars compacta ve pars reticulata	Dopaminerjik modülasyon ve motor devrelerin düzenlenmesi

Basal çekirdeklerle ilişkili anatomik terimler

Terim	Oluşumu
Striatum (Neostriatum)	Nucleus caudatus + Putamen
Nucleus lentiformis	Putamen + Globus pallidus
Corpus striatum	Nucleus caudatus + Putamen + Globus pallidus
Paleostriatum	Globus pallidus
Dorsal striatum	Nucleus caudatus + Putamen
Ventral striatum	Nucleus accumbens + Tuberculum olfactorium

Nucleus caudatus

Nucleus caudatus, telensefalonun derin beyaz cevheri içerisinde yer alan ve C harfine benzeyen uzun, kıvrımlı bir gri cevher kitlesidir. Lateral ventrikülün dış duvarını takip eden bu çekirdek, ön tarafta genişleyen bir baş (caput), orta bölümde uzanan gövde (corpus) ve temporal loba doğru kıvrılan kuyruk (cauda) olmak üzere üç anatomik bölümden oluşur. Morfolojik yapısı nedeniyle lateral ventrikülün şeklini büyük ölçüde yansıtır.

Nucleus caudatusun ön bölümü frontal lob düzeyinde bulunur ve caput nuclei caudati olarak adlandırılır. Bu bölüm, capsula internanın ön kolunun medialinde yer alırken lateralinde putamen bulunmaktadır. Posteriora doğru ilerledikçe çekirdek incelerken corpus nuclei caudatini oluşturur ve talamusun

süperolateralinde uzanır. En arka bölüm olan cauda nuclei caudati ise temporal lob içerisinde inferiora devam ederek corpus amygdaloideum komşuluğunda sonlanır.

Nucleus caudatus, serebral korteksin özellikle prefrontal, premotor ve asosiasyon alanlarından yoğun glutamaterjik afferentler alır. Ayrıca substantia nigra pars compactadan gelen dopaminerjik lifler ile talamustan gelen projeksiyonlar da bu çekirdeğin aktivitesini düzenler. Bu bağlantılar sayesinde motor planlama, istemli hareketlerin başlatılması, göz hareketlerinin kontrolü, öğrenme süreçleri ve yürütücü bilişsel işlevlerde önemli rol oynar.

Fonksiyonel olarak nucleus caudatus, putamen ile birlikte striatumu oluşturarak basal çekirdek sisteminin en önemli giriş kapısını meydana getirir. Korteksten gelen motor bilgiler burada işlenir ve uygun motor programların seçilmesi için globus pallidus ile substantia nigra yönünde iletilir. Bunun yanı sıra limbik sistem ve prefrontal korteks ile kurduğu bağlantılar nedeniyle motivasyon, ödül mekanizmaları ve alışkanlık oluşumunda da görev aldığı kabul edilmektedir(10, 11, 14).

Putamen

Putamen, basal çekirdeklerin en büyük yapılarından biri olup nucleus lentiformisin lateral bölümünü oluşturur. Makroskopik olarak yuvarlak ve dışbükey bir görünüm sergileyen bu çekirdek, lateralde capsula externa, mediyalde ise globus pallidus ile komşuluk gösterir. Putamen ile globus pallidus arasında lamina medullaris lateralis adı verilen ince beyaz cevher tabakası yer alır. Dış yüzü insular korteksten capsula externa ve claustrum aracılığıyla ayrılmaktadır.

Embriyolojik olarak nucleus caudatus ile aynı kökenden gelişen putamen, birlikte striatumu (neostriatum) oluşturur. Bu nedenle her iki yapı benzer hücresel organizasyona, nörotransmitter özelliklerine ve afferent bağlantılara sahiptir. Putamenin büyük

bölümünü orta büyüklükte dikenli (medium spiny) GABAerjik nöronlar oluşturur. Bu nöronlar basal çekirdeklerin temel inhibitör devrelerinin önemli elemanlarıdır.

Putamen, başta primer motor korteks, premotor korteks ve somatosensoriyel korteks olmak üzere serebral korteksin çok sayıda alanından yoğun glutamaterjik afferentler alır. Ayrıca substantia nigra pars compactadan gelen dopaminerjik lifler ile talamusun intralaminar çekirdeklerinden gelen projeksiyonlar da putamenin fonksiyonel aktivitesini düzenler. İşlenen bilgiler daha sonra globus pallidus ve substantia nigra pars reticulataya iletilerek motor döngüye katılır.

Fonksiyonel olarak putamen, özellikle gövde ve ekstremitelere ait istemli hareketlerin düzenlenmesinde görev yapar. Hareketlerin başlatılması, uygun motor programın seçilmesi, gereksiz motor aktivitelerin baskılanması ve öğrenilmiş motor becerilerin otomatik hâle getirilmesinde önemli rol oynar. Tekrarlayan motor aktivitelerin zaman içerisinde bilinçli kontrolden bağımsız olarak gerçekleştirilmesi büyük ölçüde putamenin oluşturduğu motor devrelerle ilişkilidir.

Putamen lezyonlarında hareketlerin akıcılığı bozulabilir, istemsiz hareketler ortaya çıkabilir ve motor öğrenme süreçleri etkilenebilir. Parkinson hastalığında dopaminerjik uyarının azalması putamenin fonksiyonunu belirgin şekilde değiştirirken, Huntington hastalığında özellikle putamendeki GABAerjik nöronların dejenerasyonu hiperkinetik hareket bozukluklarının gelişmesine katkıda bulunur(10, 11).

Globus Pallidus

Globus pallidus, nucleus lentiformisin medial bölümünü oluşturan ve basal çekirdeklerin en önemli çıkış çekirdeği olarak kabul edilen gri cevher kitlesidir. İçerdiği yoğun miyelinli lifler

nedeniyle putamene göre daha açık renkte görünür ve bu nedenle "soluk küre" anlamına gelen globus pallidus adı verilmiştir.

Anatomik olarak lateralde putamen, mediyalde ise capsula interna ile komşudur. Putamenden lamina medullaris lateralis, kendi iç segmentleri ise lamina medullaris medialis tarafından ayrılır. Bu anatomik düzenlenme sonucunda globus pallidus iki bölüme ayrılır:

Globus pallidus externus (GPe)

Globus pallidus internus (GPi)

Bu iki segment anatomik olarak benzer görünse de fonksiyonel görevleri belirgin şekilde farklıdır(11).

Globus pallidus externus (GPe)

Dış segment, basal çekirdeklerin indirekt motor yolunun önemli bileşenlerinden biridir. Başlıca inhibitör (GABAerjik) nöronlardan oluşur ve striatumdan gelen lifleri nucleus subthalamicus ile birlikte değerlendirerek motor aktivitenin düzenlenmesine katkıda bulunur. Özellikle gereksiz hareketlerin baskılanması ve istemli hareketlerin uygun şekilde seçilmesinde önemli rol oynar(11).

Globus pallidus internus (GPi)

İç segment, basal çekirdeklerin temel çıkış çekirdeğini oluşturur. GPi'den çıkan GABAerjik liflerin büyük bölümü talamusun ventral anterior (VA) ve ventral lateral (VL) çekirdeklerinde sonlanır. Buradan motor bilgiler tekrar serebral kortekse iletilerek hareketlerin yürütülmesi sağlanır.

GPi'nin talamus üzerine uyguladığı sürekli inhibitör etki, istenmeyen motor aktivitelerin baskılanmasını sağlar. Hareket başlatılacağı zaman striatumdan gelen inhibitör sinyaller GPi'nin aktivitesini azaltır ve talamus üzerindeki baskı kalkarak motor korteks uyarılır. Böylece istemli hareket başlatılmış olur.

Globus pallidus ayrıca ansa lenticularis, fasciculus lenticularis ve fasciculus thalamicus gibi önemli beyaz cevher yolları aracılığıyla talamus ile bağlantı kurmaktadır. Bu yollar motor döngünün en önemli çıkış liflerini oluşturur.

Fonksiyonel açıdan globus pallidus; kas tonusunun düzenlenmesi, istemli hareketlerin akıcı şekilde gerçekleştirilmesi, postürün korunması ve hareket amplitüdünün kontrol edilmesinde kritik rol oynar. GPI'nin aşırı inhibitör aktivitesi hipokinetik tabloların gelişmesine, aktivitesinin azalması ise hiperkinetik hareket bozukluklarının ortaya çıkmasına neden olabilir(11).

Nucleus Subthalamicus

Nucleus subthalamicus (Luys çekirdeği), subthalamus bölgesinde yer alan küçük ancak fonksiyonel açıdan son derece önemli bir gri cevher kitlesidir. Anatomik olarak talamusun hemen inferiorunda, capsula internanın medialinde ve substantia nigranın superiorunda bulunur.

Diğer basal çekirdeklerden farklı olarak nucleus subthalamicusun nöronları ağırlıklı olarak glutamaterjiktir ve eksitator etki gösterir. Bu özelliği sayesinde özellikle globus pallidus internusu uyatarak indirekt motor yolun temel düzenleyicilerinden biri hâline gelir.

Nucleus subthalamicus, globus pallidus externustan inhibitör lifler alırken, başlıca efferentlerini globus pallidus internus ve substantia nigra pars reticulataya gönderir. Bu bağlantılar sayesinde istemsiz hareketlerin baskılanması ve hareketlerin uygun şiddette gerçekleştirilmesi sağlanır.

Bu çekirdeğin klinik önemi oldukça büyüktür. Tek taraflı lezyonlarında karşı vücut yarısında ani, geniş amplitüdlü ve kontrol edilemeyen savrulma hareketleri ile karakterize hemiballismus gelişir. Ayrıca Parkinson hastalığında derin beyin stimülasyonu

(Deep Brain Stimulation, DBS) uygulamalarında en sık hedeflenen yapılardan biridir(11).

Substantia Nigra

Substantia nigra, mezensefalonun ventral bölümünde yer alan ve bazal çekirdek sisteminin en önemli bileşenlerinden biri olan pigmentli bir çekirdektir. İçerdiği nöronlarda bulunan nöromelanin pigmenti nedeniyle makroskopik incelemelerde koyu renkli bir görünüm sergiler ve bu özelliğinden dolayı "siyah madde" olarak adlandırılır. Anatomik olarak crus cerebri ile tegmentum mesencephali arasında uzanır ve rostrokaudal yönde mezensefalon boyunca devam eder.

Fonksiyonel ve histolojik özelliklerine göre substantia nigra iki ana bölüme ayrılır:

Pars compacta (SNc)

Pars reticulata (SNr)

Bu iki bölüm farklı hücresel organizasyona, nörokimyasal özelliklere ve bağlantılara sahiptir(11).

Pars Compacta

Pars compacta, yoğun nöromelanin içeren dopaminerjik nöronlardan oluşur. Bu hücreler, bazal çekirdek sisteminin en önemli dopamin kaynağını oluşturur. Aksonları başta striatum olmak üzere nucleus caudatus ve putamene uzanarak nigrostriatal yolu meydana getirir.

Dopamin, striatumdaki iki temel motor yolu farklı biçimde etkiler. D1 reseptörleri üzerinden doğrudan motor yolu uyarırken, D2 reseptörleri aracılığıyla indirekt yolu inhibe eder. Böylece istemli hareketlerin başlatılması kolaylaşır ve gereksiz motor inhibisyon ortadan kaldırılır. Bu denge, normal motor fonksiyonların sürdürülmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Parkinson hastalığında pars compactadaki dopaminergic nöronların ilerleyici dejenerasyonu sonucunda striatuma ulaşan dopamin miktarı azalır. Bunun sonucunda bradikinezi, rijidite, istirahat tremoru ve postüral instabilite gibi klasik Parkinson bulguları ortaya çıkar(11).

Pars Reticulata

Pars reticulata, daha çok GABAergic nöronlardan oluşur ve fonksiyonel açıdan globus pallidus internus'a benzer özellik gösterir. Bu nedenle bazal çekirdeklerin önemli çıkış merkezlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Bu bölümden çıkan lifler talamus, superior colliculus ve beyin sapındaki çeşitli motor merkezlere ulaşır. Özellikle sakkadik göz hareketlerinin düzenlenmesi, baş ve göz koordinasyonunun sağlanması ile istemli hareketlerin kontrolünde önemli rol oynar(11).

Bazal Çekirdeklerin Genel Fonksiyonları

Bazal çekirdekler istemli hareketleri doğrudan başlatmaz veya omuriliğe motor lif göndermez. Bunun yerine serebral kortekste oluşturulan motor programları değerlendirerek en uygun hareket modelinin seçilmesini sağlar. Bu yönüyle bazal çekirdekler, motor sistem içerisinde bir "hareket düzenleyici" ve "motor filtre" görevi üstlenir.

En önemli fonksiyonlarından biri, istenen hareketlerin kolaylaştırılması ve istenmeyen hareketlerin baskılanmasıdır. Günlük yaşamda aynı anda çok sayıda motor program oluşmasına rağmen yalnızca gerekli olan hareketlerin gerçekleştirilmesi bazal çekirdeklerin inhibitör kontrolü sayesinde mümkün olmaktadır.

Bazal çekirdekler ayrıca hareketlerin başlangıç zamanının belirlenmesi ve uygun motor programın seçilmesinde görev alır. Hareket başlamadan önce serebral korteksten gelen bilgiler değerlendirilir ve çevresel koşullara en uygun motor cevap

oluşturulur. Böylece hareketler daha akıcı, ritmik ve koordineli hâle gelir.

Motor ğrenme süreçlerinde de bazal çekirdeklerin önemli katkısı bulunmaktadır. Tekrarlanan hareketler zamanla otomatikleşerek daha az bilinçli dikkat gerektirir. Yazı yazma, klavye kullanma, bisiklet sürme, yüzme veya müzik aleti çalma gibi beceriler bu mekanizma sayesinde alışkanlık hâline gelir.

Kas tonusunun düzenlenmesi bazal çekirdeklerin diğerk önemli görevlerinden biridir. Kortikospinal ve beyin sapı kaynaklı motor sistemler üzerinde oluşturdukları dolaylı etkiler sayesinde kas aktivitesi fizyolojik sınırlar içerisinde tutulur. Bu düzenleme bozulduğunda rijidite veya istemsiz hareketler ortaya çıkabilir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar bazal çekirdeklerin yalnızca motor sistemle sınırlı olmadığını göstermiştir. Prefrontal korteks, orbitofrontal korteks ve limbik sistem ile oluşturdukları döngüler sayesinde dikkat, yürütücü işlevler, karar verme, motivasyon, ödül mekanizmaları ve davranış kontrolü üzerinde de etkili oldukları kabul edilmektedir.

Bazal çekirdeklerin başlıca fonksiyonları şu şekilde özetlenebilir:

İstemli hareketlerin başlatılmasına katkı sağlamak

Uygun motor programı seçmek

Gereksiz motor aktiviteleri baskılamak

Hareketlerin akıcılığını ve ritmini düzenlemek

Kas tonusunun korunmasına katkıda bulunmak

Motor ğrenme ve alışkanlık gelişimini desteklemek

Okülomotor hareketlerin koordinasyonuna katılmak

Bilişsel ve limbik fonksiyonların düzenlenmesine katkıda bulunmak

Bazal Çekirdekler Arasındaki Beyaz Cevher Kitleleri

Bazal çekirdekler yalnızca gri cevher yapılarından oluşmaz; bu çekirdekler arasında uzanan beyaz cevher demetleri de anatomik organizasyonun önemli bileşenleridir. Bu lif demetleri, çekirdeklerin birbirleriyle ve serebral korteks ile bağlantı kurmasını sağlar.

Capsula interna, bazal çekirdekler açısından en önemli beyaz cevher oluşumudur. Nucleus caudatus ile nucleus lentiformis arasında yer alır ve kortikospinal, kortikobulber, talamokortikal ve kortikotalamik liflerin büyük bölümünü içerir. İç kapsülün ön kolu nucleus caudatus ile putamen arasında, arka kolu ise talamus ile globus pallidus arasında uzanır.

Capsula externa, putamen ile claustrum arasında yer alan ince bir beyaz cevher tabakasıdır. Bunun lateralinde claustrum, daha dışta ise capsula extrema ve insular korteks bulunur. Bu yapılar bazal çekirdeklerin çevresindeki anatomik ilişkilerin anlaşılması açısından önemlidir.

Globus pallidustan çıkan lifler ise ansa lenticularis, fasciculus lenticularis ve fasciculus thalamicus gibi beyaz cevher demetleri aracılığıyla talamusa ulaşır. Bu yollar bazal çekirdeklerin temel efferent sistemini oluşturur ve motor bilgilerin serebral kortekse geri iletilmesini sağlar(10, 11, 18).

Basal Çekirdeklerin Afferent ve Efferent Bağlantıları

Basal çekirdekler, merkezi sinir sisteminin en karmaşık bağlantı ağlarından birini oluşturur. Korteks, talamus, substantia nigra, nucleus subthalamicus ve beyin sapı arasındaki karşılıklı bağlantılar sayesinde motor, bilişsel ve limbik fonksiyonların düzenlenmesine katkıda bulunurlar. Bu bağlantılar tek yönlü olmayıp, sürekli geri bildirim sağlayan kapalı devreler (reentrant

circuits) şeklinde organize olmuştur. Böylece serebral kortekste planlanan hareketler basal çekirdeklerde değerlendirilir, uygun motor program seçilir ve sonuç yeniden talamus aracılığıyla kortekse iletilir.

Fonksiyonel açıdan basal çekirdek devreleri üç temel grupta incelenebilir:

Motor devre

Okülomotor devre

Assosiyatif (bilişsel) ve limbik devre

Motor devre istemli hareketlerin kontrolünden sorumluyken, okülomotor devre sakkadik göz hareketlerini düzenler. Assosiyatif ve limbik devreler ise yürütücü işlevler, motivasyon, öğrenme ve emosyonel davranışların düzenlenmesinde görev yapmaktadır(18).

Afferent Bağlantılar

Basal çekirdeklere ulaşan afferent liflerin büyük çoğunluğu serebral korteksten gelir. Primer motor korteks, premotor korteks, suplementer motor alan, primer somatosensoriyel korteks ve prefrontal korteksten çıkan glutamaterjik lifler doğrudan striatuma ulaşır. Bu kortikostriatal yol, basal çekirdeklerin en önemli giriş sistemidir.

Korteks dışında talamusun intralaminar çekirdeklerinden gelen projeksiyonlar da striatuma ulaşarak motor ve duyuusal bilgilerin bütünleştirilmesine katkıda bulunur. Ayrıca substantia nigra pars compactadan gelen dopaminerjik lifler striatumun aktivitesini düzenler. Dopamin, D1 ve D2 reseptörleri üzerinden doğrudan ve indirekt yolları farklı biçimde etkileyerek motor fonksiyonların dengeli şekilde sürdürülmesini sağlar.

Bazal çekirdeklere ulaşan başlıca afferent yollar şunlardır:

Kortikostriatal lifler

Talamostriatal lifler

Nigrostriatal lifler

Subthalamostriatal bağlantılar

Raphe çekirdeklerinden serotonerjik lifler

Locus coeruleustan noradrenerjik lifler

Bu çok yönlü afferent sistem sayesinde basal çekirdekler yalnızca motor bilgileri değil, bilişsel ve emosyonel bilgileri de değerlendirebilmektedir(18).

Efferent Bağlantılar

Basal çekirdeklerin temel çıkış merkezleri globus pallidus internus (GPi) ve **substantia nigra pars reticulata (SNr)**'dir. Bu yapılardan çıkan GABAerjik inhibitör lifler başta talamus olmak üzere beyin sapındaki çeşitli motor merkezlere ulaşmaktadır.

GPi'den çıkan liflerin büyük bölümü ansa lenticularis ve fasciculus lenticularis aracılığıyla birleşerek fasciculus thalamicusu oluşturur. Bu lifler talamusun ventral anterior (VA) ve ventral lateral (VL) çekirdeklerinde sonlanır. Buradan çıkan talamokortikal projeksiyonlar motor korteks, premotor korteks ve supleментар motor alanı uyararak istemli hareketlerin gerçekleştirilmesini sağlar.

Substantia nigra pars reticulata ise özellikle superior colliculus ve beyin sapındaki okülomotor merkezlere projeksiyon göndererek sakkadik göz hareketlerinin kontrolüne katkıda bulunur.

Globus pallidus internus ve substantia nigra pars reticulatadan çıkan efferent yollar, bazal çekirdeklerin motor sistem üzerindeki inhibitör kontrolünü oluşturur. Bu sistem sayesinde gereksiz motor programlar baskılanırken, yalnızca uygun hareketlerin gerçekleştirilmesine izin verilir(11, 18).

Doğrudan ve Dolaylı Motor Yol

Bazal çekirdeklerin motor fonksiyonları iki temel devre aracılığıyla gerçekleştirilir: doğrudan (direkt) yol ve dolaylı (indirekt) yol.

Doğrudan Yol

Doğrudan yol, istemli hareketlerin başlatılmasını kolaylaştıran devredir. Motor korteksten gelen eksitator uyarılar striatumu aktive eder. Striatumdan çıkan inhibitör lifler globus pallidus internusu baskılar. GPi'nin talamus üzerindeki inhibitör etkisi azalınca talamus motor korteksi daha güçlü uyarır ve hareket başlatılır.

Bu yolun temel etkisi hareketi kolaylaştırmaktır.

Dolaylı Yol

Dolaylı yol, istenmeyen hareketlerin baskılanmasını sağlar. Kortikal uyarılar striatumu aktive ettikten sonra globus pallidus externus inhibe edilir. Bunun sonucunda nucleus subthalamicus üzerindeki baskı kalkar ve bu çekirdek globus pallidus internusu uyarır. GPi'nin talamus üzerindeki inhibitör etkisi artar ve motor korteksin uyarılması azalır.

Bu yolun temel görevi gereksiz motor aktivitelerin engellenmesidir.

Normal motor fonksiyon, doğrudan ve dolaylı yollar arasındaki hassas denge sayesinde gerçekleşmektedir. Bu dengenin bozulması Parkinson hastalığı, Huntington hastalığı ve distoni gibi hareket bozukluklarının gelişmesine neden olur(11, 18).

Bazal Çekirdeklerin Kanlanması

Bazal çekirdeklerin arteriyel beslenmesi büyük ölçüde a. cerebri media (MCA), a. cerebri anterior (ACA) ve a. choroidea anterior tarafından sağlanmaktadır. Bu arterlerden ayrılan ince

lentikülostriat arterler, kapsüler ve bazal çekirdek bölgelerinin en önemli perforan dallarını oluşturur.

Nucleus caudatusun başı ağırlıklı olarak ACA'nın Heubner rekürren arteri ile beslenirken, gövde ve kuyruğu MCA'nın perforan dalları tarafından vaskülarize edilir. Putamen ve globus pallidusun büyük bölümü MCA'dan çıkan lateral lentikülostriat arterlerden kan alır. Globus pallidusun medial bölümü ile capsula internanın posterior bölümü ise çoğunlukla a. choroidea anterior tarafından beslenir.

Nucleus subthalamicus, posterior serebral arterin (PCA) perforan dalları ile posterior kommunikan arterin küçük dallarından kan alırken, substantia nigra başlıca posterior serebral arter ve baziler arterin paramedian dalları tarafından beslenmektedir.

Bu perforan arterler son arter (end artery) özelliği gösterdiğinden tıkanmaları durumunda kollateral dolaşım yetersiz kalabilir ve küçük çaplı olmasına rağmen belirgin nörolojik defisitlere neden olan laküner infarktlar gelişebilir. Özellikle lentikülostriat arterlerin hipertansiyona bağlı hasarı, bazal çekirdek ve iç kapsül infarktlarının en sık nedenlerinden biridir(11, 18).

Klinik Anatomi ve Klinik Korelasyon

Basal çekirdeklerin fonksiyonlarının bozulması, istemli hareketlerin başlatılması, sürdürülmesi ve kontrolünde çeşitli bozukluklara neden olur. Bu hastalıklar genel olarak hipokinetik ve hiperkinetik hareket bozuklukları olarak iki grupta incelenir.

Parkinson hastalığı, substantia nigra pars compactadaki dopaminerjik nöronların ilerleyici dejenerasyonu sonucu gelişen en sık bazal çekirdek hastalığıdır. Dopamin eksikliğine bağlı olarak bradikinezi, istirahat tremoru, rijidite ve postüral instabilite ortaya çıkar.

Huntington hastalığı, striatumdaki özellikle GABAerjik nöronların dejenerasyonu ile karakterize kalıtsal bir nörodejeneratif hastalıktır. Hastalarda koreik istemsiz hareketler, bilişsel bozukluklar ve psikiyatrik belirtiler görülebilir.

Hemiballismus, çoğunlukla nucleus subthalamicusun tek taraflı lezyonuna bağlı gelişir ve karşı ekstremitelerde ani, geniş amplitüdlü savrulma hareketleri ile karakterizedir.

Distoni, kore ve atetoz gibi hiperkinetik hareket bozuklukları da bazal çekirdek devrelerindeki fonksiyon bozuklukları sonucunda gelişebilir. Bu hastalıklarda istemsiz kas kasılmaları ve anormal hareket paternleri görülmektedir.

İleri evre Parkinson hastalığında medikal tedaviye yeterli yanıt alınamayan olgularda Derin Beyin Stimülasyonu (Deep Brain Stimulation, DBS) uygulanabilmektedir. Bu yöntemde en sık nucleus subthalamicus veya globus pallidus internus hedeflenerek motor semptomların azaltılması amaçlanır.

Basal çekirdeklerin anatomik organizasyonu ve fonksiyonel bağlantılarının iyi bilinmesi; hareket bozukluklarının tanısı, nörogörüntüleme bulgularının yorumlanması ve nöroşirürjik girişimlerin planlanması açısından büyük önem taşımaktadır(11, 18).

KAYNAKÇA

1. Tamanini JVG, Hora R. A journey through the anatomy of the cerebellum. *Anat Rec (Hoboken)*. 2025;83(12):1-11.
2. Stoodley CJ. The cerebellum and neurodevelopmental disorders. *Cerebellum*. 2016;15(1):34-37.
3. Sathyanesan A, Zhou J, Scafidi J, Heck DH, Sillitoe RV, Gallo V. Emerging connections between cerebellar development, behaviour and complex brain disorders. *Nat Rev Neurosci*. 2019;20(5):298-313.
4. Hibi M, Shimizu T. Development of the cerebellum and cerebellar neural circuits. *Dev Neurobiol*. 2012;72(3):282-301.
5. Martinez S, Andreu A, Mecklenburg N, Echevarria D. Cellular and molecular basis of cerebellar development. *Front Neuroanat*. 2013;7:18.
6. Hashimoto M, Hibi M. Development and evolution of cerebellar neural circuits. *Dev Growth Differ*. 2012;54(3):373-389.
7. Wu SR, Butts JC, Caudill MS, et al. *Atoh1* drives the heterogeneity of pontine nuclei neurons and promotes their differentiation. *Sci Adv*. 2023;9.
8. Hoshino M, Nakamura S, Mori K, Kawauchi T, Terao M, Nishimura YV, et al. *Ptfla*, a bHLH transcriptional gene, defines GABAergic neuronal fates in cerebellum. *Neuron*. 2005;47(2):201-213.

9. Leto K, Arancillo M, Becker EBE, Buffo A, Chiang C, Ding B, et al. Consensus paper: cerebellar development. *Cerebellum*. 2016;15(6):789-828.
10. Ozan H. *Ozan Anatomi*. Ankara: Klinisyen Tıp Kitabevi; 2014.
11. Arifoğlu Y. *Her Yönüyle Nöroanatomi*. İstanbul: İstanbul Tıp Kitabevleri; 2022.
12. Standring S, editor. *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. 42nd ed. London: Elsevier; 2020.
13. Paulsen F, Waschke J. *Sobotta Anatomy Textbook*. English ed. Munich: Elsevier; 2018.
14. Blumenfeld H. *Neuroanatomy Through Clinical Cases*. 3rd ed. New York: Oxford University Press; 2022.
15. Nolte J. *The Human Brain: An Introduction to Its Functional Anatomy*. 8th ed. Philadelphia: Elsevier; 2021.
16. Crossman AR, Neary D. *Neuroanatomy: An Illustrated Colour Text*. 6th ed. Edinburgh: Elsevier; 2020.
17. Hansen JT. *Netter's Clinical Anatomy*. 4th ed. Philadelphia: Elsevier; 2019.
18. Snell RS. *Clinical Neuroanatomy*. 8th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2019.
19. Kandel ER, Koester JD, Mack SH, Siegelbaum SA, editors. *Principles of Neural Science*. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2021.

20. Waxman SG. Clinical Neuroanatomy. 28th ed. New York:
McGraw-Hill Education; 2025.

BÖLÜM 5

DIENSEFALON, LİMBİK SİSTEM ve SEREBRAL KORTEKS

Murat KORKMAZ¹

1. DIENSEFALON

Diensefalon, iki büyük yapıdan (talamus ve hipotalamus) ve iki daha küçük yapıdan (epitalamus ve subtalamus) oluşur. Talamus, serebral korteks ile geniş bağlantılara sahiptir ve telensefalona açılan bir geçit (gateway) görevi görür. Hipotalamus, limbik ön beyinden, beyin sapının çeşitli bölgelerinden ve visseral duyu kaynaklarından yoğun girdi alır; ayrıca nöroendokrin ve visseral otonom işlevlerin düzenlenmesinden sorumludur (Felten vd., 2016).

1.1. Talamus

Talamus, embriyolojik olarak ilkel prosensefalik vezikülün diensefalik bileşeninden türemiştir ve olgun diensefalonun en büyük bölümünü oluşturur (Katz ve Chandar, 2014). Mezensefalonun üzerinde yer alır ve bu sayede sinir liflerinin her yöne serebral kortekse bağlanmasına olanak tanır (Torricco ve Munokomi, 2023). Üçüncü ventrikül her iki talamusun medial sınırını, capsula interna

¹ Öğr. Gör., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Artova MYO, Çocuk Koruma ve Bakım Hizmetleri Prog., murat.korkmaz@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8440-195X

ise lateral sınırını oluşturur (Katz ve Chandar, 2014; Torrico ve Munokomi, 2023). Talamusların medial yüzleri massa intermedia aracılığıyla birbirine bağlanmıştır. Lateral yüzleri, capsula internanın posterior bölümüne komşudur (Mtui ve ark., 2020). Talamus çoğunlukla gri maddeden oluşsa da bazı beyaz madde alanları da mevcuttur. Dış ve iç medüller laminalar talamusun beyaz madde yapılarıdır. Dış medüller laminalar talamusun lateral yüzeyini kaplarken iç medüller laminalar talamik çekirdekleri anterior, medial ve lateral gruplara ayırır (Savage vd., 1997).

Talamus erken dönemde duyuşal bilgilerin bir aktarım istasyonu olarak düşünölse de güncel çalışmalar talamusun duyuşal girdileri alıp, bütünleştiren ve modüle eden bir merkez olarak işlev gördüğünü göstermektedir (Biesbroek vd., 2023). Medial genikulat nükleus ve lateral genikulat nükleus gibi talamik alanların görsel ve işitsel bilgiyi modüle ettiklerini gösteren çalışmalar mevcuttur (O'Connor vd., 2002; McAlonan vd., 2008). Ayrıca pulvinar ve mediodorsal çekirdeklerdeki lezyonlarda dikkat ve bellek fonksiyonlarına ilişkin bozulmalar rapor edilmiştir (Saalman ve Kastner, 2011; Baxter, 2013; Sandroff, 2022). Bu bulgular genel olarak, talamusun ekstroseptif ve introseptif duyumların bilinçli algılanması yoluyla sensorimotor entegrasyonu sağlamak, motor sistemi yönlendirmek ve üst kortikal işlevler için kortikokortikal iletişimi kolaylaştırmak amacıyla işlev gördüğünü düşündürmektedir (Mtui ve ark., 2020).

Talamus birkaç farklı hücre grubuna ya da “çekirdeğe” ayrılabilir. Bu çekirdeklerin her biri belirli bir tip afferent sinyalin (görsel, işitsel, somatosensoriyel, serebellar vb.) iletilmesiyle ilgilenir ve beynin aynı tarafındaki yapısal ve işlevsel olarak özğün bir kortikal alana ya da hücre grubuna projekte olur (Sherman ve Guillery, 2005). Talamus, anatomik olarak medial, lateral ve anterior olmak üzere üç çekirdek grubuna ayrılır. Bu gruplar, beyaz cevherden oluşan medüller lamineler tarafından birbirinden ayrılır.

Bu talamik çekirdeklerin büyük bir bölümü, serebral korteksin belirli bölgeleriyle karşılıklı bağlantılar kuran "spesifik" talamik çekirdeklerdir. Buna karşılık bazı çekirdekler, örneğin internal medüller lamina içerisinde yer alan intralaminar çekirdekler (özellikle centromedian ve parafascicular çekirdekler) ile talamusun dış kısmında kabuk benzeri bir yapı oluşturan retiküler çekirdek (nucleus reticularis thalami), serebral korteksle daha yaygın ve nonspesifik bağlantılar kurarlar (Felten vd., 2016).

Talamik çekirdekler fonksiyonel açıdan üç gruba ayrılır (Mtui ve ark., 2020):

Röle (spesifik) çekirdekler

Assosiasyon çekirdekleri

Non-spesifik çekirdekler

Röle çekirdekleri, yükselen yollar aracılığıyla spesifik duyuşal veya motor bilgileri alır ve bunları korteksin ayrı katmanlarına ve bölgelerine iletir. Röle çekirdekleri lateral genikulat kompleks (LGN), medial genikulat çekirdek (MGN), ventral posteromedial (VPM) ve posterolateral (VPL) çekirdekler, posterior çekirdek (PO), ventral lateral çekirdek (VL), ventral anterior çekirdek (VA) ve ventral medial çekirdek (VM) yapılarını içerir (Vertes vd., 2016).

Anterior çekirdek; biliş (özellikle bellek), duyuş ve yürütücü (davranışsal) kontrol süreçlerinde görev alır ve Papez devresinin bir bileşenidir.

Ventral posterior çekirdek (VP), medial lemniskus, spinal lemniskus ve trigeminal lemniskustan gelen lifleri alır. Bu çekirdek başlıca primer somatosensöriyel kortekse (SI) projekte olur; daha küçük bir projeksiyonu ise postsantral girusun alt kısmında bulunan ikinci somatik duyu alanına (SII) ulaşır. VP çekirdeği somatotopik olarak organize olmuştur. Yüz ve baş bölgesine ait kısmı ventral

posteromedial çekirdek (VPM), gövde ve ekstremitelere ait kısmı ise ventral posterolateral çekirdek (VPL) olarak adlandırılır. Modalite ayırımı hem VPM hem de VPL'de korunmuştur. Proprioseptif nöronlar daha anterior yerleşirken, dokunma ile ilişkili nöronlar daha posterior yer alır.

Spinotalamik yolun taşıdığı nosiseptif bilginin büyük bölümü VP çekirdeğine projekte olmaz; bunun yerine daha posterior yerleşimli çekirdeklere (ventromedial posterior çekirdek, ventral posterior inferior çekirdek ve talamusun anterior çekirdekleri) ulaşır.

Buna ek olarak VP çekirdeğinde, omuriliğin substantia gelatinosa bölgesinde ve spinal trigeminal çekirdekte bulunan antinosiseptif mekanizmaya benzer bir sistem bulunduğu ilişkin kanıt yoktur.

Bununla birlikte nedeni tam olarak açıklanamayan talamik ağrı sendromu, spinotalamik sistemi ve bu posterior talamik çekirdekleri etkileyen vasküler bir lezyon sonrasında gelişebilir. Bu durumda önce vücudun karşı tarafında tam duyu kaybı görülebilir; daha sonra ise kendiliğinden ortaya çıkan veya dokunma ile tetiklenen şiddetli ağrı atakları gelişebilir.

Medial genikulat çekirdek, işitsel yolun talamik çekirdeğidir. İnferior kollikulustan gelen inferior brakiyumu alır ve superior temporal girusta bulunan primer işitsel kortekse projekte olur.

Lateral genikulat çekirdek ise görme sisteminin temel talamik çekirdeğidir. Her iki retinadan optik traktus aracılığıyla bilgi alır ve oksipital lobdaki primer görme korteksine projekte olur.

Asosiasyon çekirdekleri, ana çekirdeklerden farklı olarak doğrudan duyuusal veya motor bilgi almayan ve temelde birincil sensörimotor kortekslere projeksiyon yapmayan, serebral korteksin asosiasyon alanları ve subkortikal bölgeler ile karşılıklı (resiprokal) bağlantılar kuran gruptur. Asosiasyon çekirdekleri, sensörimotor

korteksin 5. katmanındaki piramidal hücrelerden önemli girdiler alır ve bu bilgiyi korteksin asosiasyon alanlarına iletir. Bu çekirdekler, davranışsal hedeflere dayalı olarak farklı kortikal bölgeler arasındaki "bağlantısallığın" düzenlenmesinde kritik rol oynar. Amaç yönelimli kontrol, bilgilerin kortikal alanlara iletilmesinde seçiciliğin hem hızlı hem de doğru olmasını gerektirir. Böylece kortikal alanlardaki aktivite ve farklı kortikal alanlar ya da ağlar arasındaki bağlantılar düzenlenebilir. Talamusun asosiasyon çekirdekleri arasında mediodorsal çekirdek (MD), anterior çekirdekler, submedial çekirdek (SMT) ve lateral çekirdekler bulunur (Vertes vd., 2015; Mtui ve ark., 2020).

Bu çekirdeklerin işlevleri şunlardır:

Lateral dorsal çekirdek, anterior çekirdeğe benzer işlevlere sahiptir.

Dorsomedial çekirdeğin işlevleri arasında biliş, dikkatin yönlendirilmesi ve başka bir hedefe kaydırılması, duygudurumun düzenlenmesi ve koku alma yer alır.

Lateral posterior çekirdek ile pulvinar çekirdek birlikte tek bir çekirdek kompleksi oluşturur. Bu kompleks, ekstragenikulat görme yolunun bir parçası olarak görme alanının periferindeki ilgi çekici nesnelere dikkatin yönlendirilmesini sağlar ve dikkat dağıtıcı uyaranları baskılayarak uzaysal dikkatte kritik rol oynar.

Her ne kadar "nonspesifik çekirdekler" adı tam olarak uygun olmasa da bu çekirdekler aşağıdaki görevleri yerine getirir:

İntralaminar çekirdekler, beyaz cevherden oluşan internal medüller lamina içerisinde yer alır. Aldıkları girdiler ve yaptıkları projeksiyonlar aracılığıyla uyanıklığın (arousal), bilişsel işlevlerin, bazal gangliyonların düzenlenmesinin ve kortikal senkronizasyonun sürdürülmesinde kritik rol oynarlar.

Orta hat (midline) çekirdekleri, uyanıklık ve dikkat süreçlerinin bilişsel davranış üzerindeki etkilerine aracılık ederek duygusal ve bilişsel işlevlere katkıda bulunuyor gibi görünmektedir.

Talamik retiküler çekirdek (TRN), talamusun ön ve lateral yüzünü çevreleyen kalkan biçiminde bir yapıdır ve eksternal medüller lamina tarafından ana talamustan ayrılır. Tüm talamokortikal ve kortikotalamik projeksiyonlar TRN içerisinden geçer ve bu çekirdeğe kollateral uyarıcı dallar verir. TRN ise karşılık gelen talamik çekirdeklere geri projeksiyon yaparak bu talamik projeksiyon nöronlarının deşarj hızını inhibisyon yoluyla kontrol eder. TRN bütünüyle inhibitör GABAerjik nöronlardan oluşur. Başlıca girdileri çeşitli diğer talamik çekirdeklerden ve serebral korteksten gelirken, önemli afferent sistemler mezensefalik tegmentumdan, bazal ön beyinden ve korpus striatumdan girer. Efferent projeksiyonu tamamen alttaki talamik çekirdeklere ve mezensefalik tegmentuma geri yönlendirilmiştir (Katz ve Chandar, 2014; Mtui ve ark., 2020).

Talamus ile serebral korteks arasındaki karşılıklı bağlantılar dört talamik pedinkül aracılığıyla seyreder.

Anterior talamik pedinkül, iç kapsülün anterior bacağından geçerek prefrontal kortekse ve singulat girusa ulaşır.

Süperior talamik pedinkül, iç kapsülün posterior bacağından geçerek premotor kortekse, primer motor kortekse ve somatosensoriyel kortekse ulaşır.

Posterior talamik pedinkül, iç kapsülün posterior bacağından geçerek oksipital loba ve parietal ile temporal lobların posterior bölümlerine ulaşır.

İnferior talamik pedinkül ise lentiform çekirdeğin altından geçerek anterior temporal kortekse ve orbitofrontal kortekse ulaşır.

Bu dört talamik pedinkülün tamamı, yukarı doğru ilerleyerek corona radiata içerisinde devam eder (Mtui ve ark., 2020).

Talamus merkezi bir duyu aktarım istasyonu olmasına rağmen, talamus lezyonları paradoksal olarak çeşitli duyu dışı klinik paternlerle ortaya çıkabilir ve bu da tanısal sorunları karmaşıktır (Torrico ve Munokomi, 2023).

Talamusun kanlanması oldukça karmaşıktır ve büyük ölçüde penetran posterior serebral arter, posterior komunikan arter ve diğer komşu arterlerden kaynaklanır. Talamik çekirdekler, infarktlar ve diğer lezyonlar tarafından tek tek etkilenmekten ziyade, genellikle komşu bölgelerle birlikte hasar görür. Talamusun tek tarafını etkileyen lezyonlar, duysal çekirdekler tutulmadığı sürece kalıcı nörolojik bozukluklara nadiren yol açar (Felten vd., 2016).

Korsakoff sendromu, kronik ve aşırı alkol tüketimi ile değişmiş tiamin metabolizmasının birleşiminden kaynaklanan ciddi bir nörolojik bozukluktur (Rahmea vd., 2007; Kopelman vd., 2009). Esas olarak ciddi amneziye yol açar ve potansiyel olarak yürütücü işlev bozuklukları ve ataksi ile ilişkilidir. Mediodorsal çekirdeklerin atrofisi hem komplikasyonsuz alkol kullanım bozukluğu olan kişilerde hem de Korsakoff sendromlu hastalarda görülürken, anterior çekirdeklerin atrofisi sadece Korsakoff sendromlu hastalarda ortaya çıkmıştır. (Segobin vd., 2019; Tuladhar ve deLeeuw, 2019). Vasküler lezyonlar konumuna ve etkilediği çekirdeklere bağlı olarak bellek bozuklukları, bilinç düzeyinde azalma veya koma, afazi, hemiataksi, ağrı sendromu ve duyu kaybı dahil olmak üzere çok çeşitli semptomlara neden olabilir (Schmahmann, 2003). Dejerine-Roussy Sendromu (talamik ağrı sendromu), talamik inme sonrasında vücudun karşı tarafında kronik, şiddetli ağrı gelişmesiyle karakterize edilir (Ramachandran vd., 2007).

1.2. Hipotalamus

Hipotalamus, rostralde orta beyin ile lamina terminalis arasında, talamusun ventralinde yer alır ve üçüncü ventrikülü çevreler. Hipotalamus; rostrokaudal doğrultuda preoptik, anterior (veya supraoptik), tuberal ve mammiller (veya posterior) bölgelere, mediolateral doğrultuda ise periventriküler, medial ve lateral bölgelere ayrılır. Bu bölgeler, bazı belirgin çekirdeklerin yanı sıra belirli nörokimyasal özelliklere sahip alt çekirdekleri de içerir. Ayrıca, paraventriküler çekirdek (PVN) gibi belirgin çekirdeklerin yanı sıra anterior, posterior ve lateral bölgeler gibi daha yaygın merkezler, bölgeler veya alanlar da bulunmaktadır (Felten vd., 2016).

Hipotalamusun bölgelerini tanımlayan önemli noktalar arasında lamina terminalis, hipofiz bezi, mamiller cisimler ve superior hipotalamik sulkus bulunur. Hipotalamus, üçüncü ventrikül ve mamiller cisimleri çevreleyen 3 bölgeye ayrılmış, iki taraflı bir çekirdek topluluğudur. Hipotalamus beyinde merkezi bir konumdadır ve dorsal longitudinal fasikül yoluyla beyin sapına, medial ön beyin demeti yoluyla serebral kortekse, forniks yoluyla hipokampusa, stria terminalis yoluyla amigdalaya, mamillotalamik yol yoluyla talamusa, median eminens yoluyla hipofize ve retinohipotalamik yol yoluyla retinaya bağlanır (Bear vd., 2022).

Hipotalamus, hipofiz bezinin hemen üzerinde yer alır ve beyin hacminin yaklaşık %2'sini kaplar. Birçok hücre grubundan ve üçüncü ventrikül etrafında simetrik olan lif demetlerinden oluşur. Sagital kesitte, hipotalamus rostralde optik kiazma, lamina terminalis ve ön komissürden kaudalde serebral pedinkül ve interpedinküler fossaya kadar uzanır. Üçüncü ventrikül boşluğu orta hatta yer alır. Koronal kesitte, hipotalamusun iki simetrik duvarının her biri dört yüzeye ayrılabilir: talamus, subtalamus ve iç kapsül ile bitişik lateral bir yüzey (iç kapsül, hipotalamusu korpus striatumdan ayırır); endodimal hücrelerle kaplı, üçüncü ventrikül duvarına kadar

uzanan medial bir yüzey; Hipotalamusu talamusun merkezi kütlesinden ayıran hipotalamik sulkusa karşılık gelen üst bir yüzey ve üçüncü ventrikülün tabanıyla devamlılık gösteren bir alt yüzey. Hipotalamik tabanın dış yüzeyi *tuber cinereum*'a yol açar; bunun merkezi kısmı öne ve aşağıya doğru uzanarak huni benzeri bir çıkıntı olan infundibulum veya median eminens oluşturur. Infundibulum, arka hipofiz bezinin infundibular sapıyla doğrudan devamlılık gösterir ve ön hipofizin pars tuberalis'i ile birlikte hipofiz sapını oluşturur. Hipotalamus tabanının makroskopik morfolojisini tamamlayan diğer iki simetrik çıkıntı ise, hipotalamus duvarının en dış kısmına karşılık gelen lateral çıkıntılar ve postinfundibular çıkıntı ile simetrik mammiller cisimlerdir (Lechan ve Toni, 2016).

Periventriküler bölgedeki çekirdekler genellikle endokrin sistemi düzenlerken, medial ve lateral bölgelerdeki çekirdekler otonom ve somatik davranışı düzenler (Bear vd., 2022).

Hipofiz bezi, sfenoid kemiğin (sella turcica) orta kranial fossasının median kısmındaki bir girinti içinde yer alır ve manyetik rezonans görüntüleme ile radyolojik olarak kolayca ayırt edilebilen iki ana bileşenden, ön lobdan (adenohipofiz) ve arka lobdan (nörohipofiz) oluşur. Ön lob, *pars distalis*, *pars intermedia* ve *pars tuberalis* olmak üzere üç alt bölüm içerir. *Pars distalis*, ön hipofizin büyük kısmını oluşturur ve ön hipofiz hormonlarının periferik dolaşıma salgılanmasından sorumludur. İnsanlarda, tipik olarak folikülostellat (FS) hücrelerle çevrili farklı boyutlarda foliküller içerir (7). *Pars intermedia*, *pars distalis* ile arka hipofiz arasında yer alır ve orijinal Ratke kesesi yarığının kalıntılarını temsil eder (Embriyolojik Anatomi bölümüne bakınız). İnsanlarda körelmiş olarak kabul edilmesine rağmen, esas olarak çevresinde (yani marjinal bölgede) FS hücreleriyle zenginleştirilmiş foliküller içerir ve muhtemelen hipofiz kök hücrelerinin bir alt popülasyonu olarak işlev görür (8). *Pars tuberalis*, insan da dahil olmak üzere çoğu memeli türünde iyi tanımlanmıştır ve infundibular gövdeyi çevreler

(9). Sella tabanı veya lamina dura, sfenoid sinüse bitişiktir ve transsfenoidal yol ile hipofize doğrudan cerrahi erişim sağlar. Hipofiz bezinin diğer önemli sınırları, sempatik liflerle çevrili internal karotid arteri ve kraniyal sinirler III, IV, V (oftalmik ve maksiller dallar) ve VI'yı içeren lateral kavernöz sinüstdür . Optik kiazma, beyin omurilik sıvısı dolu suprasellar sistem ve hipofizin dural çatısı olan diyafragma sella ile hipofizden ayrılmış olarak üstte yer alır.

2. LİMBİK SİSTEM

Limbik sistem, genellikle talamusun lateralinde, serebral korteksin altında ve beyin sapının üstünde yer alan beyin yapılarının bir araya gelmesi olarak tanımlanır. 1878'de Paul Broca, bu genel bölgeye ilk kez "*limbik büyük lob*" adını vermiştir (Torricco ve Abdijadid, 2023). Daha sonra, 1949'da Amerikalı hekim ve nörobilimci Paul D. MacLean, buna limbik lob adını vermiştir (Pessoa ve Hof, 2015). Limbik sistemde yer alan yapılar, tarihsel süreç içerisinde birçok kez yeniden tanımlanmış olup, genel olarak serebral hemisfer ile beyin sapı arasında yer alan, talamusun lateralinde, serebral korteksin altında ve beyin sapının üstünde bulunan anatomik yapılar topluluğu olarak tanımlanmaktadır. Embriyolojik kökenleri, limbik sistemin şu anda tanımlanmış ana yapılarını birbirinden ayırabilir. Mezensefalik bileşenler, bölgede işlenen görsel, işitsel ve somatosensoriyel girdilerden oluşur. Diensefalik bileşenler hipotalamus, anterior talamik çekirdekler ve habenular komissürdür. Telensefalik bileşenler, kortikal ve subkortikal bölgeleri içerir; bunlar olfaktör bulbus, hipokampus, parahipokampal girus, forniks, mammiller cisim, septum pellucidum, amigdala, singulat girus, entorhinal kortekstir (Catani vd., 2013; Rajmohan ve Mohandas, 2007).

Limbik sistemin başlangıçta duyguların düzenlenmesinde yer alan tek nörolojik sistem olduğu öne sürülse de artık sadece

visseral, otonom süreçleri düzenleyen beynin bir parçası olarak kabul edilmektedir. Genel olarak, limbik sistem, mekansal hafıza, öğrenme, motivasyon, duygusal işleme ve sosyal işleme dahil olmak üzere bilişle ilgili çeşitli süreçlere yardımcı olur (Hariri vd., 2000).

Hipokampal formasyon ve onun temel çıkış yolu olan forniks, diensefalonun ön bölümüne doğru kıvrılarak uzanır ve anterior komissür ile ilişkili olarak septuma doğru uzanan prekomissüral, hipotalamusa doğru uzanan postkomissüral bağlantılar oluşturur. Amigdaloid çekirdekler çeşitli yollarla meydana getirir; bunlardan biri olan stria terminalis, C şeklinde bir seyir izleyerek diensefalonun etrafından hipotalamus ve bazal ön beyne uzanır. Olfaktör sistem, çeşitli limbik telensefalik yapılarla doğrudan bağlantı kuran ve talamusu bypass ederek telensefalonun kortikal ve subkortikal bölgelerine doğrudan projekte olan tek duyu sistemidir. Septal çekirdeklerden habenulaya uzanan bağlantılar (stria medullaris thalami), limbik ön beyin beyin sapına bağlar. Amigdaloid çekirdekler ve hipokampus, korteksin derininde yer alır (Felten vd., 2016).

2.1. Hippokampal Formasyon

Hipokampus, lateral ventrikülün temporal boynuzunun tabanını oluşturan, parahipokampal girusun derininde yer alan kıvrımlı bir gri cevher oluşumdur. Daha bütüncül bir bakış açısıyla, temporal lobun medial yüzeyine doğru katlanan, eğimli ve kıvrımlı bir kortikal tabaka olarak tanımlanabilir (Fogwe vd., 2023).

Hipokampal formasyon, dentat girus, subikulum ve hipokampüsten oluşur. Hipokampal formasyon, lateral ventrikülün temporal boynuzunun tabanında çıkıntı yapan belirgin bir C şeklinde yapıdır (Amaral & Lavenex, 2007). Makroskobik olarak hipokampal formasyon yaklaşık 5 cm uzunluğundadır ve baş (caput), gövde (corpus) ve kuyruk (cauda) olmak üzere üç anatomik bölüme ayrılır. Genişlemiş olan baş kısmı, pes hippocampi olarak adlandırılan iki

veya üç yüzeyel oluk içerir. Hipokampal formasyonun ön ucu amigdalaya komşu iken arka ucu korpus kallozumun spleniumuna kadar uzanır. Hipokampus başı, unkusun posterior yarısının bir bölümünü oluşturur ve unkal sulkus ile parahipokampal girustan ayrılır. Hipokampal formasyonun ventrikül yüzeyini örten alveus, ventrikül boşluğu içerisinde endim ile kaplıdır (Fogwe vd., 2023).

Hipokampal formasyonun temel afferent girdisi, ilişkisel neokortikal alanlarla karşılıklı bağlantılar kuran entorhinal korteksten gelir. Entorhinal korteks, farklı duyu modalitelerinden gelen yüksek düzeyde işlenmiş bilgiyi perforan yol aracılığıyla dentat girusun granül hücrelerine iletir. Granül hücrelerin aksonları olan yosunsu lifler CA3 bölgesindeki piramidal hücrelerde sonlanırken, CA3 piramidal nöronları Schaffer kollateralleri aracılığıyla CA1 bölgesine projeksiyon gönderir. CA1 bölgesinden çıkan lifler subikulumu ulaşır ve buradan yeniden entorhinal kortekse projekte olarak hipokampal formasyonun büyük ölçüde tek yönlü intrinsik devresini oluşturur (Schultz ve Engelhardt, 2014). Bunun yanı sıra hipokampal formasyon, başta septal çekirdeklerden kaynaklanan kolinerjik lifler olmak üzere noradrenerjik, dopaminerjik ve serotonerjik nöromodülatör girdiler de alır (Mtui ve ark., 2020).

Hipokampal formasyonun temel efferent yolu olan forniks, başlıca subikulum ve hipokampustan köken alır. Forniks, talamusun superiorunda seyrederek ilerler ve koroidal fissür ile koroid pleksus tarafından hipokampal formasyondan ayrılır (Fogwe vd., 2023). Forniks, subikulum ve hipokampüstən köken alan lifleri taşıyarak septal çekirdeklere, hipotalamusa, mammiller cisimlere ve talamusun anterior çekirdeğine projeksiyon gönderir. Bu bağlantılar, singulat korteks ile birlikte Papez devresini oluşturarak bellek konsolidasyonu ve limbik bilgi işlem süreçlerinde önemli rol oynar. Ayrıca hipokampal formasyon, entorhinal korteks aracılığıyla neokorteksin asosiasyon alanlarıyla da yoğun karşılıklı bağlantılar

kurar (Mtui ve ark., 2020). Hipokampal formasyonla ilişkili başlıca beyaz cevher yapıları alveus, fimbria, crus fornicis, forniks gövdesi (corpus fornicis) ve forniks kolumnasıdır. Fimbria, alveus liflerinin lateral ventrikülün temporal boynuzunun medial kenarı boyunca birleşmesiyle oluşur ve korpus kallozumun spleniumunun posteriorunda devam ederek aynı taraftaki crus fornicisi oluşturur (Fogwe vd., 2023).

Hipokampüs, medial temporal lobun anteriorunda deniz atı şeklini andıran yapıdır ve temel olarak Cornu Ammonis (CA) bölgeleri olarak adlandırılan dört alt bölgeden (CA1-CA4) oluşur. CA2 ve CA3, her iki tarafta dentat girusun hilusunu sınırlar. Hipokampüsün CA2 ve CA3 bölgeleri dentat girusun hilusunun iki yanında yer alırken, CA3 hipokampusun en geniş alt alanıdır ve dentat girusun granül hücrelerinden gelen lifleri proksimal dendritleri üzerinde alır. Hipokampus temel nöronlarını piramidal hücreler oluşturur (Fogwe vd., 2023; Mtui ve ark., 2020).

Dentat girus, hipokampal formasyonun temel bileşenlerinden biri olup, parahipokampal girusun üst yüzeyi boyunca uzanan, dar ve dişli görünümlü bir gri cevher şerididir (Laplane vd., 2013). Embriyolojik ve anatomik olarak hipokampal formasyonun arşikorteksini oluşturan yapılardan biridir ve hipokampus ile birlikte medial temporal lobun allokortikal yapısını meydana getirir. Dentat girus, gyrus fasciolaris'in devamı niteliğindedir ve posterior yönde Giacomini bandı (dentat girusun kuyruğu) olarak devam ederek unkus boyunca mediale uzanır. Giacomini bandı, unkusu anterior tarafta unkinat girus, posterior tarafta ise intralimbik girus olmak üzere iki bölüme ayırır. Dentat girus, hipokampal sulkus ile parahipokampal girustan, üzerini örten fimbria fornicis ise fimbridentat sulkus aracılığıyla dentat girustan ayrılır (Laplane vd., 2013; Patra vd., 2018; Parmar vd., 2018).

Dentat girus, hipokampal formasyona gelen kortikal bilgilerin ilk işlendiği bölgedir. Granül hücreler, entorhinal

korteksten köken alan ve perforan yol (perforant pathway) aracılığıyla gelen afferent lifleri alır. Bu bilgiler, granül hücrelerin aksonları olan yosunsu lifler (mossy fibers) aracılığıyla hipokampüsün CA3 bölgesindeki piramidal hücrelerin apikal dendritlerine iletilir. Böylece dentat girus, hipokampal intrinsik devrenin ilk basamağını oluşturur. Hipokampüsün piramidal hücrelerinden çıkan aksonlar ise alveusu meydana getirir; alveus fimbria ile devam eder ve daha sonra forniksi oluşturur. Forniks başta septal bölge olmak üzere çeşitli limbik yapılara projeksiyon gönderirken, septal bölgeden çıkan bazı lifler singulat girus aracılığıyla yeniden hipokampal formasyona ulaşır. Hipokampal formasyonun bu intrinsik bağlantı ağı, Papez devresinin temel bileşenlerinden birini oluşturur ve özellikle öğrenme, uzun süreli bellek konsolidasyonu, uzamsal navigasyon ve duygusal bilgilerin işlenmesinde kritik rol oynar (Chauhan vd., 2021).

Subikulum, parahipokampal girus içerisinde yer alan ve hipokampal formasyonun başlıca çıkış yapısını oluşturan bölgedir. Hipokampal alan CA1'den yoğun afferent girdi alır ve hipokampal formasyondan çıkan bilgilerin büyük bölümünü kortikal ve subkortikal hedeflere iletir (Witter vd., 1989; Amaral ve Lavenex, 2007; Evstratova vd., 2024).

2.2. Parahipokampal Girus

Parahipokampal girusun retrosplenial korteks, indusium griseum ve gyrus fasciolaris ile devamlılık gösterdiği kaudal geçiş bölgesinde, korteksin düzensiz organizasyona sahip bir bölgesi bulunur. Bu bölge, hipokampal formasyonun kaudal sınırını oluşturur ve başlıca CA1 alanı ile subikulumdan meydana gelir. Bu bölgede oblik yerleşimli iki küçük girus tanımlanmıştır. Bunlardan ilki olan fasciola cinerea, dentat girusun kaudal devamını; ikincisi olan gyrus fasciolaris ise CA3 alanının kaudal devamını temsil eder (Amaral ve Lavenex, 2007).

2.3. Singulat Korteks

Singulat korteks, korpuz kallozumun etrafını bir kemer gibi saran singulat girus ve singulat sulkusun üst ve alt sınırlarını çevreleyen kortikal gri maddeden oluşur ve her iki serebral yarımkürenin medial duvarında, korpuz kallozumun üstünde ve bitişiğinde yer alır. Singulat korteks, yolculuğu boyunca hiçbir noktada kortikal yüzeye ulaşmaz ve sağlıklı bir beyinde frontal, temporal, parietal ve oksipital loblar tarafından çevrelenmiştir (Stevens vd., 2011; Jumah ve Dossani, 2022).

Singulat korteks sitoarkitektonik organizasyon, ortak bağlantı örüntüsü ve benzer işlevler göz önüne alındığında anterior singulat korteks, midsingulat korteks, posterior singulat korteks ve retrosplenial korteks olmak üzere dört alt bölgeye ayrılır (Vogt, 2005). Singulat korteks somatik duyum, otonomik düzenleme, vestibüler fonksiyon, motor kontrol, ağrı algısı, duygusal işleme, görme ve hafıza dahil olmak üzere çok çeşitli süreçlerde rol oynamakla birlikte (Deng vd., 2026) anterior singulat korteks ve posterior singulat korteks limbik sistem için özellikle önemlidir. Anterior singulat korteks, rostral limbik sistemin bir parçası olup yürütücü işlevler, motor planlama, ağrı algısı, duygu düzenleme, mesane kontrolü, konuşma ve otonom yanıtların düzenlenmesi gibi çok sayıda bilişsel, duygusal ve otonom işlevde rol oynar. Posterior singulat korteks ise posterior parahipokampal girus ile birlikte görsel, işitsel ve uzamsal asosiasyon alanlarıyla yoğun bağlantılar kurarak bellek süreçleri, geçmiş deneyimlerin zihinde canlandırılması ve okuma gibi bilişsel işlevlere katkıda bulunur (Mtui ve ark., 2020).

2.4. Amigdala

Amigdala temporal lobda, unkus'un hemen altında yer alan badem şeklinde bir yapıdır. Amigdala, yapısı bakımından çeşitli ve karmaşıktır ve çok sayıda çekirdekten oluşur. Anatomik olarak,

amigdala, lateral ventrikülün temporal boynuzunun üstünde ve önünde, ayrıca kaudat çekirdeğin kuyru unun anteriorunda yer alır (Rajmohan ve Mohandas, 2007). Amigdala; afferent bağlantıları alan ve hedef yapılara projeksiyon gönderen kortikomedial ve bazolateral çekirdekler ile, başlıca beyin sapına efferent projeksiyonlar gönderen santral çekirdek olmak üzere üç ana çekirdek grubuna ayrılır (Felten vd., 2016).

Amigdala, hafıza oluşumunun yanı sıra duyguların ve davranışların kontrolünden sorumlu olan limbik sistemin bileşenlerinden biridir (Rajmohan ve Mohandas, 2007). Dış çevreden gelen duysal bilgilerin ve içsel durumların duysal olarak yorumlanmasında görev alır (Felten vd., 2016). Amigdalanın duysal davranışların düzenlenmesindeki temel rolü, Kl ver ve Bucy'nin rhesus maymunlarında gerçekleştirdiği deneylerle ortaya konmuştur. Medial temporal lobların bilateral olarak çıkarılmasını takiben hayvanlarda korku ve saldırganlık davranışlarının belirgin biçimde azalması, evcille me, hiperoralite ve hiperseksüalite gibi davranış değişiklikleri gözlenmiştir. Daha sonraki çalışmalar, bu duysal değişikliklerin yalnızca amigdalanın çıkarılmasıyla da ortaya  ıkabildi ini göstermiş ve böylece amigdalanın duysal davranışların, özellikle korku ile ilişkili tepkilerin düzenlenmesinde merkezi bir role sahip olduğu anlaşılmıştır (Purves vd., 2011). Özellikle korku ve kaçınma davranışlarıyla ilişkili olanlar başta olmak üzere, bireye özgü davranışsal ve duysal yanıtların oluşmasını sa lar (Felten vd., 2016).

Medial  ekirdek grubu, olfaktör bulbus ve primer olfaktör korteks ile yoğun karşılıklı bağlantılar kurar. İnsanlarda belirgin geli mi  olan bazolateral çekirdek grubu ise serebral korteksle, özellikle orbitofrontal ve medial prefrontal korteksle geniş bağlantılara sahiptir. Santral  ekirdek grubu başta hipotalamus ve beyin sapı olmak üzere, soliter çekirdek gibi visseral duyu merkezleriyle bağlantılar kurar. Bu bağlantılar sayesinde amigdala,

duyusal bilgiyi işleyen kortikal alanlar ile hipotalamus ve beyin sapındaki otonom ve davranışsal efektör sistemler arasında işlevsel bir ara istasyon görevi görür. Amigdala; görsel, somatosensoriyel, visseral ve işitsel bilgilerin yüksek düzeyde işlendiği kortikal alanlardan afferent girdi almasının yanı sıra, bazı talamik çekirdekler, olfaktör bulbus ve beyin sapındaki soliter çekirdekten de doğrudan duyusal girdi alır (Purves vd., 2011).

Amigdalanın başlıca efferent bağlantıları iki ana yol aracılığıyla gerçekleşir. Bunlardan ilki, stria terminalis yoluyla septal bölge ve hipotalamusa uzanan dorsal yoldur. İkincisi ise ventral amigdalofugal yol olup septal bölge, hipotalamus ve talamusun mediodorsal çekirdeğine projeksiyonlar gönderir (Rajmohan ve Mohandas, 2007).

3. SEREBRAL KORTEKS

Serebral korteks, serebral hemisferlerin en dış tabakasını oluşturan gri cevher yapısıdır ve milyarlarca nöronun hücre gövdesini içerir. Buna karşılık serebral hemisferlerin ve omuriliğin beyaz cevheri, büyük ölçüde bu nöronların miyelinli aksonlarından oluşur. Korteks yüzeyi, girus adı verilen kıvrımlar ile bu kıvrımları birbirinden ayıran sulkuslardan meydana gelen karakteristik bir yapıya sahiptir. Bu kıvrımlanma, geniş kortikal yüzey alanının kranial kavitenin sınırlı hacmine sığmasını sağlar (Stiles ve Jernigan, 2010).

Serebral hemisferlerin en belirgin olukları lateral sulkus (Sylvius fissürü), santral sulkus (Rolando sulkusu) ve parieto-oksipital sulkustur. Lateral sulkus temporal lobu frontal ve parietal loblardan ayırırken, santral sulkus frontal ve parietal loblar arasındaki sınırı oluşturur. Parieto-oksipital sulkus ise parietal ve oksipital lobları birbirinden ayırır. Hemisferin lateral yüzeyinde frontal, parietal, temporal ve oksipital lobların sınırları; lateral sulkusun posterior uzantısını izleyen hayali çizgi ile parieto-oksipital

sulkusun üst ucundan hemisferin alt kenarında yer alan preoksipital çentiğe uzanan ikinci hayali çizgi yardımıyla belirlenir. Lateral sulkusun operkulumları birbirinden ayrıldığında insular korteks (insula) görünür hâle gelir. Oksipital lobun medial yüzeyinde yer alan kalkarin sulkus ise kuneusu lingual girustan ayırır (Mtui ve ark., 2020; El-Baba ve Schury, 2023).

3.1. Frontal Lob

Frontal lobun lateral yüzeyi dört ana girustan oluşur. Bunlardan presentral girus, santral sulkusun hemen anteriorunda yer alır ve ona paralel uzanır. Presentral girus, primer motor korteksi (Brodmann alanı 4) içerir. Primer motor korteks, istemli hareketlerin yürütülmesinden sorumludur. Buradan köken alan kortikospinal trakt gövde ve ekstremitelerin istemli hareketlerini, kortikobulber trakt ise baş ve boyun kaslarının istemli hareketlerini kontrol eder. Presentral girusun anteriorunda prefrontal korteks yer alır. Prefrontal korteks; karar verme, akıl yürütme, kişiliğin dışavurumu, sosyal açıdan uygun davranışların sürdürülmesi ve diğer karmaşık bilişsel işlevlerde görev alması nedeniyle beynin en önemli yüksek düzeyli asosiyasyon kortekslerinden biri olarak kabul edilir. Presentral girusun rostralinde ve santral sulkusa paralel uzanan presentral sulkus bulunur. Presentral sulkustan anterior ve inferior yönde uzanan superior frontal sulkus ile inferior frontal sulkus, frontal lobun lateral yüzeyini superior frontal girus, middle frontal girus ve inferior frontal girus olmak üzere üç ana girusa ayırır (Bui ve Das, 2023).

Araştırmalar, dominant (sol) superior frontal girusun çalışma belleği ve uzaysal işlemelemeden sorumlu nöral ağın temel bileşenlerinden biri olduğunu göstermektedir. Buna karşılık dominant olmayan (sağ) superior frontal girusun dürtü kontrolünde rol oynadığı ve aktivasyonunun inhibitör kontrol ile motor

dürtüselliği modüle ettiği bildirilmiştir (du Boisgueheneuc vd., 2006; Hu vd., 2016).

Middle frontal girus, superior frontal girusun inferiorunda yer alır ve ondan superior frontal sulkus ile ayrılır. Dominant (sol) middle frontal girus okuryazarlığın gelişiminde önemli rol oynarken, dominant olmayan (sağ) middle frontal girus sayısal işleme ile ilişkilidir (Koyama vd., 2017). Middle frontal girusun kaudal bölümünde, presentral girusla birleşim bölgesinde frontal göz alanı (Brodmann alanı 8) bulunur. Frontal göz alanı, sakkadik göz hareketlerini; başka bir ifadeyle bakışın bir görsel sahnedeki farklı hedefler arasında hızla yönlendirilmesini sağlayan eşlenik göz hareketlerini kontrol eder (Termsarasab, 2015).

İnferior frontal girus, frontal lobun en inferior girusudur ve middle frontal girustan inferior frontal sulkus ile ayrılır. Dominant (sol) inferior frontal girusun kaudal bölümünde yer alan pars opercularis ve pars triangularis, konuşmanın motor üretiminden sorumlu Broca alanını (Brodmann alanları 44 ve 45) oluşturur (El-Baba ve Schury, 2023).

Frontotemporal demans (FTD) parietal ve oksipital lobları büyük ölçüde korurken frontal ve temporal korteksi etkileyen nörodejeneratif bir hastalıktır. FTD'nin karakteristik histopatolojik bulguları arasında yuvarlak tau proteini agregatları ile ubikuitinlenmiş TAR DNA-bağlayıcı protein 43 (TDP-43) birikimleri yer alır. FTD'nin klinik belirtileri, nörodejenerasyonun yerleşimine göre değişiklik göstermekle birlikte; belirgin kişilik değişiklikleri, sosyal davranışlarda disinhibisyon, afazi ve bazı olgularda motor nöron hastalığı ile birliktelik şeklinde ortaya çıkabilir. FTD'nin temel klinik spektrumu; davranışsal varyant frontotemporal demansı (bvFTD), akıcı olmayan/agrammatik varyant primer progresif afazi ve semantik varyant primer progresif afazi kapsar (El-Baba ve Schury, 2023).

3.2. Parietal Lob

Parietal lob, fonksiyonel özelliklerine göre anterior ve posterior olmak üzere iki bölüme ayrılır. Anterior bölümde, santral sulkusun hemen posteriorunda yer alan ve posterior sınırını postsantral sulkusun oluşturduğu postsantral girus bulunur. Postsantral girus, primer somatosensoriyel korteksi (Brodmann alanları 3, 1 ve 2) içerir. Primer somatosensoriyel korteks, talamustan gelen somatosensoriyel girdilerin büyük bölümünü alır ve dokunma, propriosepsiyon, vibrasyon, basınç, ağrı ve sıcaklık gibi temel somatik duyu bilgilerin işlenmesinden sorumludur. Posterior parietal lob, intraparietal sulkus tarafından superior parietal lobül ve inferior parietal lobül olmak üzere iki bölüme ayrılır. Superior parietal lobül, somatosensoriyel asosiyasyon korteksini (Brodmann alanları 5 ve 7) içerir ve özellikle duyu bilgilerinin bütünleştirilmesi ile istemli hareketlerin planlanması gibi üst düzey işlevlerde rol oynar. Inferior parietal lobül, supramarginal girus (Brodmann alanı 40) ile angular girustan (Brodmann alanı 39) oluşur. Supramarginal girus, lateral sulkusun posterior ucunu; angular girus ise superior temporal sulkusun posterior ucunu çevreler. Bu bölge, talamus ve kontralateral somatosensoriyel korteksten gelen somatosensoriyel girdileri görsel ve işitsel bilgiler gibi diğer duyu modaliteleriyle bütünleştirerek sensörimotor planlama, öğrenme, dil ve uzaysal biliş gibi üst düzey işlevlere katkıda bulunur (Berlucchi ve Vallar, 2018; Klingner ve Witte, 2018; Mtui ve ark., 2020).

3.3. Temporal Lob

Temporal lob, serebral hemisferlerin ikinci en büyük lobudur. Orta kranial fossayı doldurur; frontal lobun posteriorunda, parietal lobun inferiorunda yer alır ve lateral ile medial olmak üzere iki ana yüzeye sahiptir (Kiernan, 2012).

Temporal lobun lateral yüzeyinde superior temporal girus, middle temporal girus ve inferior temporal girus bulunur. Bu giruslar

superior temporal sulkus ve inferior temporal sulkus tarafından birbirinden ayrılır (Jawabri ve Sharma, 2023). Superior temporal girusun dorsal yüzeyi, lateral sulkusun derininde yer alır ve primer işitsel korteksi (Brodmann alanları 41 ve 42) içeren Heschl girusunu barındırır. Heschl girusu, seslerin frekansı, şiddeti ve tonunun işlenmesinden sorumludur (Nourski, 2017).

Heschl girusunun posteriorunda, dominant hemisferde superior temporal girusun posterior bölümünde yer alan Wernicke alanı (Brodmann alanı 22), yazılı ve sözlü dilin anlaşılmasında temel rol oynar. Bu bölgenin hasarı, konuşmanın akıcılığının büyük ölçüde korunduğu ancak dilin anlaşılmasının bozulduğu Wernicke (reseptif) afazisine neden olur (DeWitt ve Rauschecker, 2013; Javed vd., 2023). Superior temporal girusun lateral yüzeyi ise sekonder işitsel korteks ile ilişkilidir (Nourski, 2017).

Middle temporal girus, işitsel bilgilerin anlamlandırılması, önceden öğrenilmiş bilgilerin geri çağırılması ve semantik işlemlerde önemli rol oynar. Ayrıca semantik bellek, semantik geri getirme (semantic retrieval) ve semantik kontrol ağı (semantic control network) ile ilişkili olup sözcük ve seslere anlam yüklenmesine katkıda bulunur (Xu vd., 2015; Jawabri ve Sharma, 2023).

Inferior temporal girus, primer görsel korteksten temporal loba bilgi taşıyan ventral görsel yolun (ventral visual pathway) önemli bir bileşenidir. Bu nedenle görsel nesne tanıma, yüz algısı ve görsel bilginin içeriğinin belirlenmesinde önemli rol oynar (Conway, 2018).

Medial temporal lob; hipokampus, entorhinal korteks, perirhinal korteks ve parahipokampal korteks gibi anatomik ve işlevsel açıdan birbiriyle yakından ilişkili yapıları içerir. Bu yapılar, özellikle deklaratif belleğin oluşumu ve pekiştirilmesi için kritik öneme sahiptir (Clark, 2018).

3.4. Oksipital Lob

Oksipital lob, medial yüzeyde parieto-oksipital sulkus, lateral yüzeyde ise parieto-oksipital sulkusun üst ucundan hemisferin alt kenarında yer alan preoksipital çentiğe uzanan hayali bir çizgi ile parietal ve temporal loblardan ayrılır (Flores, 2002). Oksipital lobun medial yüzeyinin en belirgin anatomik oluşumu kalkarin sulkustur. Primer görsel korteks (V1; Brodmann alanı 17), kalkarin sulkusun üst ve alt kenarlarında yer alır ve lateral genikulat çekirdekten gelen kontralateral görme alanına ait görsel bilgiyi alır. Kalkarin sulkus, medial yüzeyi kuneus ve lingual girus olmak üzere iki bölüme ayırır. Lingual girusun inferiorunda ise temporal lobdan oksipital loba uzanan fusiform girus bulunur (Rehman ve Khalili, 2023).

Oksipital lob, beynin temel görsel işleme merkezidir. Primer görsel kortekse ulaşan bilgiler, çevresinde yer alan sekonder görsel korteks (V2, V3, V4 ve V5; Brodmann alanları 18 ve 19) tarafından daha ileri düzeyde işlenir. Görsel bilgi buradan dorsal ve ventral olmak üzere iki ana akış boyunca iletilir. Dorsal yol, görsel bilginin uzaysal özelliklerinin işlenmesinden sorumlu olup parietal loba projekte olur. Ventral yol ise nesne ve yüz tanıma gibi görsel tanıma süreçleriyle ilişkili olup temporal loba uzanır. Bu işlevleri sayesinde oksipital lob; görsel algı, görsel-uzaysal işleme, renk ayrımı ve görsel nesne tanıma süreçlerinde temel rol oynar (Rehman ve Khalili, 2023).

3.5. İnsula

İnsular korteks, serebral korteksin beşinci lobu olarak kabul edilir ve her iki hemisferde lateral sulkusun (Sylvius fissürü) derininde yer alır. Frontal, parietal ve temporal lobların oluşturduğu operkulumların altında bulunur ve bu operkulumlar ayrıldığında görünür hâle gelir. İnsula, insular santral sulkus tarafından anterior ve posterior bölümlere ayrılır ve çevresi periinsular (sirküler) sulkus

ile sınırlandırılır (Kortz ve Lillehei, 2023). Anterior insula, iki presentral sulkus ile birbirinden ayrılan üç kısa girustan (anterior, middle ve posterior) oluşurken; posterior insula, singüler postsantral sulkus ile ayrılan iki uzun girustan (anterior ve posterior) meydana gelir. Aksesuar girus, insulanın anterior yüzünde yer alırken; transvers girus, insulayı frontal lobun orbital yüzüne bağlar. İnsulanın anteroinferior apeksinde bulunan limen insulae, temporal lobun mezial yüzü, anterior perforan madde ve insulanın inferior noktası ile birleşim bölgesini oluşturur. Ayrıca orta serebral arter çoğunlukla bu düzeyde iki ana dala ayrılır (Kortz MW, Lillehei).

İnsula; tat duyusunun işlenmesi, somatosensoriyel ve visseromotor işlevler, otonom sinir sistemi düzenlenmesi, ağrı algısı, işitsel ve vestibüler işlevler ile birlikte duygu işleme, empati ve risk-ödül değerlendirmesi gibi çok sayıda bilişsel ve duygusal süreçte rol oynar (Uddin vd., 2017).

Serebral korteks disfonksiyonu; tümörler, travmalar, enfeksiyonlar, otoimmün hastalıklar ve serebrovasküler olaylar gibi çeşitli nedenlere bağlı olarak gelişebilir. Klinik bulgular, etkilenen kortikal loba göre farklılık gösterir. Bu nedenle her bir lobun lezyonunda kendine özgü nörolojik belirtiler ortaya çıkar.

Frontal lob lezyonları; flask hemipleji, kas güçsüzlüğü, apraksi, kişilik bozuklukları ve afazi ile kendini gösterebilir (Malloy PF, Richardson, 1994).

Parietal lob lezyonlarında astereognozi, afazi, apraksi ve duyu kaybı görülebilir (Klingner, C. M., & Witte, 2018).

Temporal lob lezyonları işitme kaybı, fonemik parafazi, işitsel halüsinasyonlar, bellek bozuklukları ve görsel halüsinasyonlara neden olabilir (Helmstaedter vd., 2018).

Oksipital lob lezyonları ise tam körlük veya renk görme bozukluğu gibi görme alanı defisitleri ile karakterizedir (Huff vd., 2023).

KAYNAKÇA

Amaral, D. G., & Lavenex, P. (2007). Hippocampal neuroanatomy. In P. Andersen, R. Morris, D. Amaral, T. Bliss, & J. O'Keefe (Eds.), *The hippocampus book* (pp. 37–114). Oxford University Press.

Baxter M. G. (2013). Mediodorsal thalamus and cognition in non-human primates. *Frontiers in systems neuroscience*, 7, 38. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2013.00038>

Bear MH, Reddy V, Bollu PC. Neuroanatomy, Hypothalamus. [Updated 2022 Oct 10]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK525993/>

Berlucchi, G., & Vallar, G. (2018). The history of the neurophysiology and neurology of the parietal lobe. *Handbook of clinical neurology*, 151, 3–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63622-5.00001-2>

Biesbroek, J. M., Verhagen, M. G., van der Stigchel, S., & Biessels, G. J. (2024). When the central integrator disintegrates: A review of the role of the thalamus in cognition and dementia. *Alzheimer's & dementia : the journal of the Alzheimer's Association*, 20(3), 2209–2222. <https://doi.org/10.1002/alz.13563>

Bui T, Das JM. Neuroanatomy, Cerebral Hemisphere. [Updated 2023 Jul 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549789/>

Catani, M., Dell'acqua, F., & Thiebaut de Schotten, M. (2013). A revised limbic system model for memory, emotion and behaviour. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 37(8), 1724–1737. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.07.001>

Chauhan P, Jethwa K, Rathawa A, et al. The Anatomy of the Hippocampus. In: Pluta R, editor. Cerebral Ischemia [Internet]. Brisbane (AU): Exon Publications; 2021 Nov 6. Chapter 2. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK575732/> doi: 10.36255/exonpublications.cerebralischemia.2021.hippocampus

Clark R. E. (2018). Current Topics Regarding the Function of the Medial Temporal Lobe Memory System. *Current topics in behavioral neurosciences*, 37, 13–42. https://doi.org/10.1007/7854_2017_481

Conway B. R. (2018). The Organization and Operation of Inferior Temporal Cortex. *Annual review of vision science*, 4, 381–402. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-091517-034202>

Deng, Q., Wang, M., Chen, G., Wang, X., Yan, Z., Yang, H., Yang, Y., Wang, M., Guo, M., Xiong, Z., Guan, N., Zhou, J., Guan, Y., Luan, G., Li, T., & Wang, J. (2026). Function of the Human Cingulate Cortex: A Brainnetome Atlas-Based Study via Cortical Electrical Stimulation in Patients With Epilepsy. *CNS neuroscience & therapeutics*, 32(1), e70768. <https://doi.org/10.1002/cns.70768>

DeWitt, I., & Rauschecker, J. P. (2013). Wernicke's area revisited: parallel streams and word processing. *Brain and language*, 127(2), 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.09.014>

du Boisgueheneuc, F., Levy, R., Volle, E., Seassau, M., Duffau, H., Kinkingnehun, S., Samson, Y., Zhang, S., & Dubois, B. (2006). Functions of the left superior frontal gyrus in humans: a lesion study. *Brain : a journal of neurology*, 129(Pt 12), 3315–3328. <https://doi.org/10.1093/brain/awl244>

Evstratova A, Diaz-Fernandez B, Lévesque M, et al. Role of the Subiculum in Focal Epilepsy. In: Noebels JL, Avoli M, Rogawski

MA, et al., editors. Jasper's Basic Mechanisms of the Epilepsies. 5th edition. New York: Oxford University Press; 2024. Chapter 10. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK609833/> doi: 10.1093/med/9780197549469.003.0010

Felten, D. L., O'Banion, M. K., & Maida, M. E. (2016). *Netter's atlas of neuroscience* (3rd ed.). Elsevier.

Flores L. P. (2002). Occipital lobe morphological anatomy: anatomical and surgical aspects. *Arquivos de neuro-psiquiatria*, 60(3-A), 566–571. <https://doi.org/10.1590/s0004-282x2002000400010>

Fogwe LA, Reddy V, Mesfin FB. Neuroanatomy, Hippocampus. [Updated 2023 Jul 20]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482171/>

Hariri, A. R., Bookheimer, S. Y., & Mazziotta, J. C. (2000). Modulating emotional responses: effects of a neocortical network on the limbic system. *Neuroreport*, 11(1), 43–48. <https://doi.org/10.1097/00001756-200001170-00009>

Hu, S., Ide, J. S., Zhang, S., & Li, C. R. (2016). The Right Superior Frontal Gyrus and Individual Variation in Proactive Control of Impulsive Response. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 36(50), 12688–12696. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1175-16.2016>

Javed K, Reddy V, Das JM, et al. Neuroanatomy, Wernicke Area. [Updated 2023 Jul 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK533001/>

Jawabri KH, Sharma S. Physiology, Cerebral Cortex Functions. [Updated 2023 Apr 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure

Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538496/>

Kiernan J. A. (2012). Anatomy of the temporal lobe. *Epilepsy research and treatment*, 2012, 176157.
<https://doi.org/10.1155/2012/176157>

Klingner, C. M., & Witte, O. W. (2018). Somatosensory deficits. *Handbook of clinical neurology*, 151, 185–206.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63622-5.00009-7>

Kopelman, M. D., Thomson, A. D., Guerrini, I., & Marshall, E. J. (2009). The Korsakoff syndrome: clinical aspects, psychology and treatment. *Alcohol and alcoholism (Oxford, Oxfordshire)*, 44(2), 148–154. <https://doi.org/10.1093/alcalc/agn118>

Kortz MW, Lillehei KO. İnsular Korteks. [Güncellendi 1 Mayıs 2023]. İçinde: StatPearls [İnternet]. Treasure Island (FL): StatPearls Yayıncılık; Ocak 2026-. Şuradan erişilebilir:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK570606/>

Koyama, M. S., O'Connor, D., Shehzad, Z., & Milham, M. P. (2017). Differential contributions of the middle frontal gyrus functional connectivity to literacy and numeracy. *Scientific reports*, 7(1), 17548. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17702-6>

Laplante, F., Mnie-Filali, O., & Sullivan, R. M. (2013). A neuroanatomical and neurochemical study of the indusium griseum and anterior hippocampal continuation: comparison with dentate gyrus. *Journal of chemical neuroanatomy*, 50-51, 39–47.
<https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2013.03.004>

Lechan RM, Toni R. Hipotalamus ve Hipofizin Fonksiyonel Anatomisi. [Güncellendi 28 Kasım 2016]. İçinde: Feingold KR, Adler RA, Ahmed SF, vd., editörler. Endotext [İnternet]. South Dartmouth (MA): MDText.com, Inc.; 2000-. Şuradan erişilebilir:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279126/>

McAlonan, K., Cavanaugh, J., & Wurtz, R. H. (2008). Guarding the gateway to cortex with attention in visual thalamus. *Nature*, 456(7220), 391–394. <https://doi.org/10.1038/nature07382>

Mtui, E., Gruener, G., & Dockery, P. (2020). *Fitzgerald's clinical neuroanatomy and neuroscience* (8. baskı). [Elsevier](#).

Nourski K. V. (2017). Auditory processing in the human cortex: An intracranial electrophysiology perspective. *Laryngoscope investigative otolaryngology*, 2(4), 147–156. <https://doi.org/10.1002/lio2.73>

O'Connor, D. H., Fukui, M. M., Pinsk, M. A., & Kastner, S. (2002). Attention modulates responses in the human lateral geniculate nucleus. *Nature neuroscience*, 5(11), 1203–1209. <https://doi.org/10.1038/nn957>

Parmar, S. K., Pruthi, N., Ravindranath, R., Ravindranath, Y., Somanna, S., & Philip, M. (2018). Anatomical Variations of the Temporomesial Structures in Normal Adult Brain - A Cadaveric Study. *Journal of neurosciences in rural practice*, 9(3), 317–325. https://doi.org/10.4103/jnrp.jnrp_73_18

Patra, D. P., Tewari, M. K., Sahni, D., & Mathuriya, S. N. (2018). Microsurgical Anatomy of Medial Temporal Lobe in North-West Indian Population: Cadaveric Brain Dissection. *Asian journal of neurosurgery*, 13(3), 674–680. <https://doi.org/10.4103/1793-5482.238077>

Pessoa, L., & Hof, P. R. (2015). From Paul Broca's great limbic lobe to the limbic system. *The Journal of comparative neurology*, 523(17), 2495–2500. <https://doi.org/10.1002/cne.23840>

Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, A.-S., McNamara, J. O., & White, L. E. (2011). *Neuroscience* (5th ed.). Sinauer Associates.

Rahmea, R., Moussa, R., Awada, A., Ibrahim, I., Ali, Y., Maarrawi, J., Rizk, T., Nohra, G., Okais, N., & Samaha, E. (2007). Acute Korsakoff-like amnestic syndrome resulting from left thalamic infarction following a right hippocampal hemorrhage. *AJNR. American journal of neuroradiology*, 28(4), 759–760.

Rajmohan, V., & Mohandas, E. (2007). The limbic system. *Indian journal of psychiatry*, 49(2), 132–139. <https://doi.org/10.4103/0019-5545.33264>

Ramachandran, V. S., McGeoch, P. D., & Williams, L. (2007). Can vestibular caloric stimulation be used to treat Dejerine-Roussy Syndrome?. *Medical hypotheses*, 69(3), 486–488. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2006.12.036>

Rehman A, Al Khalili Y. Neuroanatomy, Occipital Lobe. [Updated 2023 Jul 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544320/>

Saalmann, Y. B., & Kastner, S. (2011). Cognitive and perceptual functions of the visual thalamus. *Neuron*, 71(2), 209–223. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.06.027>

Sandroff, B. M., Motl, R. W., Román, C. A. F., Wylie, G. R., DeLuca, J., Cutter, G. R., Benedict, R. H. B., Dwyer, M. G., & Zivadinov, R. (2022). Thalamic atrophy moderates associations among aerobic fitness, cognitive processing speed, and walking endurance in persons with multiple sclerosis. *Journal of neurology*, 269(10), 5531–5540. <https://doi.org/10.1007/s00415-022-11205-9>

Savage, L. M., Sweet, A. J., Castillo, R., & Langlais, P. J. (1997). The effects of lesions to thalamic lateral internal medullary lamina and posterior nuclei on learning, memory and habituation in

the rat. *Behavioural brain research*, 82(2), 133–147.
[https://doi.org/10.1016/s0166-4328\(97\)80983-7](https://doi.org/10.1016/s0166-4328(97)80983-7)

Schmahmann J. D. (2003). Vascular syndromes of the thalamus. *Stroke*, 34(9), 2264–2278.
<https://doi.org/10.1161/01.STR.0000087786.38997.9E>

Schultz, C., & Engelhardt, M. (2014). Anatomy of the hippocampal formation. *Frontiers of neurology and neuroscience*, 34, 6–17. <https://doi.org/10.1159/000360925>

Segobin, S., Laniepe, A., Ritz, L., Lannuzel, C., Boudehent, C., Cabé, N., Urso, L., Vabret, F., Eustache, F., Beaunieux, H., & Pitel, A. L. (2019). Dissociating thalamic alterations in alcohol use disorder defines specificity of Korsakoff's syndrome. *Brain : a journal of neurology*, 142(5), 1458–1470.
<https://doi.org/10.1093/brain/awz056>

Sherman, S. M., & Guillery, R. W. (2005). *Exploring the thalamus and its role in cortical function* (2nd ed.). MIT Press.

Stevens, F. L., Hurley, R. A., & Taber, K. H. (2011). Anterior cingulate cortex: unique role in cognition and emotion. *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, 23(2), 121–125.
<https://doi.org/10.1176/jnp.23.2.jnp121>

Stiles, J., & Jernigan, T. L. (2010). The basics of brain development. *Neuropsychology review*, 20(4), 327–348.
<https://doi.org/10.1007/s11065-010-9148-4>

Termsarasab, P., Thammongkolchai, T., Rucker, J. C., & Frucht, S. J. (2015). The diagnostic value of saccades in movement disorder patients: a practical guide and review. *Journal of clinical movement disorders*, 2, 14. <https://doi.org/10.1186/s40734-015-0025-4>

Torrico TJ, Abdijadid S. Neuroanatomy, Limbic System. [Updated 2023 Jul 17]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island

(FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538491/>

Torricco TJ, Munakomi S. Neuroanatomy, Thalamus. [Updated 2023 Jul 24]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542184/>

Tuladhar, A. M., & de Leeuw, F. E. (2019). Thalamus: a key player in alcohol use disorder and Korsakoff's syndrome. *Brain : a journal of neurology*, 142(5), 1170–1172. <https://doi.org/10.1093/brain/awz096>

Uddin, L. Q., Nomi, J. S., Hébert-Seropian, B., Ghaziri, J., & Boucher, O. (2017). Structure and Function of the Human Insula. *Journal of clinical neurophysiology : official publication of the American Electroencephalographic Society*, 34(4), 300–306. <https://doi.org/10.1097/WNP.0000000000000377>

Vertes, R. P., Linley, S. B., & Hoover, W. B. (2015). Limbic circuitry of the midline thalamus. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 54, 89–107. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.01.014>

Vertes, R. P., Linley, S. B., Groenewegen, H. J., & Witter, M. P. (2015). Thalamus. In G. Paxinos (Ed.), *The rat nervous system* (4th ed., pp. 335–390). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374245-2.00016-4>

Vogt B. A. (2005). Pain and emotion interactions in subregions of the cingulate gyrus. *Nature reviews. Neuroscience*, 6(7), 533–544. <https://doi.org/10.1038/nrn1704>

Witter, M. P., Groenewegen, H. J., Da Silva, F. L., & Lohman, A. H. M. (1989). Functional organization of the extrinsic and intrinsic circuitry of the parahippocampal region. *Progress in neurobiology*, 33(3), 161-253.

Xu, J., Wang, J., Fan, L., Li, H., Zhang, W., Hu, Q., & Jiang, T. (2015). Tractography-based Parcellation of the Human Middle Temporal Gyrus. *Scientific reports*, 5, 18883. <https://doi.org/10.1038/srep18883>

Malloy, P. F., & Richardson, E. D. (1994). Assessment of frontal lobe functions. *The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*, 6(4), 399–410. <https://doi.org/10.1176/jnp.6.4.399>

Helmstaedter, C., Elger, C. E., & Vogt, V. L. (2018). Cognitive outcomes more than 5 years after temporal lobe epilepsy surgery: Remarkable functional recovery when seizures are controlled. *Seizure*, 62, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2018.09.023>

Huff, T., Mahabadi, N., & Tadi, P. (2023). Neuroanatomy, Visual Cortex. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.

Kortz MW, Lillehei KO. Insular Cortex. [Updated 2023 May 1]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK570606/>

BÖLÜM 6

VENTRİKÜLER SİSTEM, BEYİN OMURİLİK SIVISI VE DOLAŞIM

Merve Nur ÖZGEN SÖNMEZ¹

GİRİŞ

Merkezi sinir sistemi (MSS), yüksek metabolik aktiviteye sahip olması nedeniyle sürekli oksijen, glukoz ve iyon dengesine ihtiyaç duyar. Bu gereksinim, yalnızca arteriyel kan dolaşımı ile değil, aynı zamanda beyin omurilik sıvısı (BOS) ve venöz drenaj sistemlerinin entegre çalışmasıyla sağlanır. Günümüzde MSS, sadece nöral dokudan oluşan bir yapı değil; BOS, vasküler sistem ve interstisyel sıvıyı içeren dinamik bir “nörofluid sistem” olarak kabul edilmektedir (Iliff et al., 2012; Martin Kaag Rasmussen, Humberto Mestre, & Maiken Nedergaard, 2022).

BOS, ventriküler sistemde üretilen ve spatium subarachnoideum boyunca dolaşarak venöz sinüslerde sonlanan berrak bir sıvıdır. Bu sıvı mekanik koruma sağlamakla kalmaz, aynı zamanda metabolik atıkların uzaklaştırılması, nörokimyasal homeostazın sürdürülmesi ve intrakraniyal basınç regülasyonunda önemli rol oynar (Brinker, Stopa, Morrison, & Klinge, 2014).

¹ Arş. Gör. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Anatomi Anabilim Dalı. mervenur.ozgen@gop.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1134-5309

Serebrovasküler sistem ise beynin oksijen ve enerji ihtiyacını karşılayan arteriyel dolaşım ile atıkların uzaklaştırılmasını sağlayan venöz sistemden oluşur. Özellikle Willis poligonu, kollateral dolaşım sağlayarak beyin perfüzyonunun sürekliliğini garanti eder (Sá, Illa, & Guedes-Martins, 2026).

Bu üç sistem (ventriküler sistem, BOS ve vasküler yapı) birbirinden bağımsız değil, aksine fonksiyonel olarak entegre bir bütün oluşturur.

Beyin Ventriküllerinin Gelişimi

Embriyonik gelişimin erken dönemleri, MSS'nin morfolojik ve fonksiyonel temellerinin atıldığı kritik bir zaman dilimini temsil eder. Bu süreçte ventriküler sistem ve BOS, yalnızca yapısal oluşumun bir parçası değil, aynı zamanda nörogelişimsel olayların düzenlenmesinde aktif rol oynayan dinamik bileşenlerdir. İnsan embriyosunda nöral tüp oluşumu gebeliğin yaklaşık dördüncü haftasında başlar ve nöral plağın longitudinal ekseninde katlanarak kapanmasıyla gerçekleşir. Bu aşamada nöral tüp henüz tamamen kapalı bir sistem değildir; kranial ve kaudal uçlarda yer alan ön ve arka nöroporlar aracılığıyla amniyotik sıvı ile doğrudan bağlantı halindedir. Ancak bu açıklıkların kapanmasını takiben, tüp içinde sıvı ile dolu kapalı bir boşluk oluşur. Bu intraluminal sıvı, bileşimi tam olarak erişkin BOS ile aynı olmasa da, BOS'un erken gelişimsel formu olarak kabul edilmektedir (Chau et al., 2015; Lowery & Sive, 2009).

Nöral tüpün kapanmasıyla eş zamanlı olarak, hücresel düzeyde oldukça karmaşık ve koordineli süreçler devreye girer. Hücre proliferasyonu, hücre göçü ve programlı hücre ölümü (apoptoz) gibi mekanizmalar, özellikle kranial bölgede hızlanarak primer beyin keselerinin oluşumunu sağlar. Bu süreç sonucunda ön beyin (prosencephalon), orta beyin (mesencephalon) ve arka beyin (rhombencephalon) olmak üzere üç temel veziküler yapı meydana

gelir. Bu yapıların iç boşlukları, ilerleyen gelişim sürecinde ventriküler sistemin temelini oluşturacak şekilde farklılaşırken, nöral tüpün kaudal segmentindeki lümen medulla spinalis'in merkezi kanalına dönüşür (Bueno, Parvas, Nabiuni, & Miyan, 2020; Lowery & Sive, 2009). Dolayısıyla ventriküler sistem ve spinal kanal, embriyolojik olarak ortak bir lüminal yapıdan köken alır.

Erken embriyonik dönemde ventriküler sistem ile spinal kanal arasında geçici bir tıkanıklığın meydana geldiği ve bunun nörogelişim açısından önemli olduğu ileri sürülmektedir. Bu tıkanıklık, BOS benzeri sıvının serbest dolaşımını sınırlayarak ventriküler boşluk içerisinde basınç artışına neden olur. Artan intraluminal basınç, ventriküler yapıların genişlemesini destekleyen mekanik bir kuvvet oluşturarak beyin veziküllerinin morfolojik gelişimine katkıda bulunur (Lowery & Sive, 2009; Schoenwolf & Desmond, 1984). İnsan embriyolarında bu geçici obstrüksiyonun yaklaşık gebeliğin dördüncü haftasında ortaya çıktığı bildirilmiştir. Bu sürecin yalnızca mekanik değil, aynı zamanda biyokimyasal olarak da düzenlendiği düşünülmektedir. Özellikle hücre dışı kalsiyum iyonları, kalmodulin ve siklik adenozin monofosfat (cAMP) aracılı hücre içi sinyal yollarının, bu tıkanıklığın oluşumu ve sürdürülmesinde rol oynadığı gösterilmiştir (Desmond & Levitan, 2002). Bu durum, BOS'un erken dönemde yalnızca pasif bir sıvı olmadığını, aynı zamanda gelişimsel süreçleri etkileyen aktif bir biyolojik ortam olduğunu desteklemektedir.

MSS gelişimini sürdürdükçe ventriküler sistem de kademeli olarak erişkin morfolojisine yaklaşır. Embriyonik ön beyin ventrikülü, telensefalik genişleme ile birlikte lateral ventriküllere ve üçüncü ventriküle dönüşürken; orta beyin ventrikülü aqueductus cerebri (Sylvius kanalı) olarak daralır ve arka beyin ventrikülü dördüncü ventrikülü oluşturur (Lowery & Sive, 2009). Özellikle telensefalonun hızlı büyümesi, lateral ventriküllerin karakteristik C şeklindeki uzamış yapısının ortaya çıkmasında belirleyici rol oynar.

Gebeliğin ilerleyen dönemlerinde bu yapısal organizasyon giderek belirginleşir ve yaklaşık dokuzuncu fetal ayda ventriküler sistem erişkin beyne oldukça benzer bir morfolojik görünüm kazanır (Bjarkam, 2004).

Ventriküler sistem ile spatium subarachnoideum arasındaki anatomik bağlantıların oluşumu ise gelişimin daha geç evrelerinde gerçekleşir. Dördüncü ventrikülün orta hattında yer alan Magendie deliği genellikle fetal gelişimin dördüncü ayında ortaya çıkar. Buna karşılık, lateral açıklıklar olan Luschka delikleri daha geç, yaklaşık altıncı ayda veya sonrasında gelişir (Johal et al., 2017). Bu açıklıkların oluşmasıyla birlikte BOS'un ventriküler sistem dışına çıkarak spatium subarachnoideum'a geçişi mümkün hale gelir ve böylece BOS dolaşımı daha kompleks ve erişkin tipine benzer bir dinamik kazanır.

Beyin Omurilik Sıvısının Gelişimi

BOS bileşimi, embriyonik ve fetal dönemde sıkı bir şekilde düzenlenen dinamik bir süreç içerisinde şekillenir. Gelişimsel süreçte BOS, yetişkin BOS'una kıyasla belirgin şekilde daha yüksek protein konsantrasyonuna sahiptir. Doğum sonrası dönemde bu protein içeriği giderek azalır ve yaklaşık altıncı aya doğru erişkin düzeylerine yaklaşır. Bu farklılık, gelişmekte olan MSS'nin değişen fizyolojik gereksinimlerini karşılamaya yönelik adaptif bir özellik olarak değerlendirilmektedir. Embriyonik BOS'un özgün iyonik ve protein kompozisyonu, kan-BOS bariyerinin gelişimsel olarak henüz olgunlaşmamış olmasına ve bu süreçte giriş-çıkış mekanizmalarının farklı bir dengeye sahip olmasına bağlıdır (Saunders, Dziegielewska, Møllgård, & Habgood, 2018).

Nöroporların kapanmasının ardından BOS bileşimi amniyotik sıvıdan giderek ayrılmaya başlar ve daha spesifik bir intraventriküler mikroçevre oluşur. Erken dönemde hem amniyotik sıvıda hem de BOS'ta toplam protein düzeyi düşüş eğilimindeyken,

yaklaşık yedinci gebelik haftasında plexus choroideus'un gelişimi ile birlikte bu durum değişir. Bu aşamadan sonra BOS'taki protein içeriği artış gösterirken, amniyotik sıvıda azalma eğilimi devam eder. Embriyonik BOS yalnızca yapısal proteinleri değil, aynı zamanda nörogelişimde rol oynayan çeşitli sinyal moleküllerini de içerir. Örneğin, sonik hedgehog (Shh) gibi nörogenezde görevli sinyal proteinlerinin belirli gelişimsel zaman dilimlerinde BOS içerisinde pik düzeylere ulaştığı bildirilmiştir (Chau et al., 2015). Bu durum, BOS'un yalnızca pasif bir sıvı ortam olmadığını, aynı zamanda nöral hücre farklılaşmasını düzenleyen aktif bir biyokimyasal niş oluşturduğunu göstermektedir.

BOS'un gelişimsel süreçteki en önemli işlevlerinden biri, ventriküler sistem içinde oluşturduğu kolloid osmotik basınç gradyanı ile beyin gelişimini yönlendirmesidir. Yüksek protein ve proteoglikan içeriği, BOS ile amniyotik sıvı arasında belirgin bir ozmotik fark oluşturur. Bu fark, ventriküler boşluklara doğru sıvı hareketini destekleyerek beyin veziküllerinin genişlemesine katkıda bulunur. Bu ventriküler genişleme, nöroepitel hücreleri arasındaki sıkı bağlantılar tarafından stabilize edilir ve sıvının kontrolsüz şekilde nöral hücre dışı alana sızmasını engeller. BOS'un gelişimdeki bir diğer kritik rolü ise, büyüme faktörleri için kontrollü bir dağıtım ortamı oluşturmasıdır. Plexus choroideus'un gelişimiyle birlikte kapalı BOS boşluğu, sinyal moleküllerinin zamansal ve mekansal olarak düzenlenmiş şekilde dağıtılmasını sağlayarak MSS morfogenezinde önemli bir düzenleyici ortam haline gelir (Bueno et al., 2020; Lun, Monuki, & Lehtinen, 2015). Bu yönüyle BOS, yalnızca mekanik bir destek unsuru değil, aynı zamanda nörogelişimsel sinyalizasyonun temel bileşenlerinden biridir.

Ventriküler şişme (ventricular expansion), embriyonik beyin gelişiminin erken dönemlerinde kritik bir biyomekanik süreç olup, MSS'nin doğru morfolojik organizasyonu için gerekli intraluminal basıncın oluşmasını sağlar. Bu süreç, özellikle nöral tüpün kapalı bir

sıvı içeren sistem haline gelmesinden sonra belirgin hale gelir ve ventriküler boşluklar içerisindeki BOS basıncı ile doğrudan ilişkilidir. Deneysel çalışmalar, BOS hacminin veya basıncının azaltıldığı durumlarda kortikal genişlemenin ve nöral progenitör hücre proliferasyonunun belirgin şekilde baskılandığını göstermektedir. Bu durum, ventriküler sistem içerisindeki mekanik gerilimin nöral kök hücre davranışlarını düzenleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır (Desmond & Jacobson, 1977; Lowery & Sive, 2009).

Ventriküler şişmenin bozulduğu gelişimsel senaryolarda, yalnızca hücresel proliferasyon değil, aynı zamanda beyin veziküllerinin morfolojik genişlemesi de olumsuz etkilenmektedir. Özellikle nöropor kapanma süreçlerindeki aksaklıklar, BOS dinamiğinin bozulmasına ve intrakraniyal sıvı basıncının yeterli düzeyde oluşamamasına yol açarak anensefali gibi ağır nörogelişimsel anomalilerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu bulgular, BOS'un yalnızca pasif bir sıvı değil, aynı zamanda kraniyal gelişimin mekanik düzenleyicisi olduğunu desteklemektedir. Bununla birlikte BOS'un gelişimdeki rolü yalnızca mekanik destek ile sınırlı değildir; aynı zamanda nörogenez ve hücresel farklılaşmayı yönlendiren aktif bir biyokimyasal ortam işlevi de görmektedir. Plexus choroideus'un gelişimi ile birlikte ventriküler sistem, kapalı ve dinamik bir sıvı kompartımanı haline gelir. Bu yapı içerisinde BOS, büyüme faktörleri, morfogenerler ve sinyal proteinlerinin kontrollü bir şekilde dağıtıldığı özel bir mikroçevre oluşturur. Bu sayede nöral progenitör hücrelerin proliferasyonu, göçü ve farklılaşması hem zamansal hem de mekansal olarak hassas biçimde düzenlenir (Bueno et al., 2020; Chau et al., 2015).

Özellikle Shh, fibroblast büyüme faktörleri (FGF'ler) ve diğer morfogenetik sinyallerin BOS içerisindeki dağılımı, gelişmekte olan MSS'de bölgesel farklılaşmanın oluşmasında önemli rol oynar. Bu durum, BOS'un yalnızca metabolik bir taşıyıcı

sıvı olmadığını, aynı zamanda nörogelişimsel programlamayı yönlendiren bir sinyal iletim ortamı olduğunu göstermektedir. Ayrıca plexus choroideus'un oluşumu ile birlikte BOS bileşiminin daha seçici ve düzenlenmiş hale gelmesi, MSS morfogenezinin kritik evrelerinde hücresel davranışların hassas şekilde kontrol edilmesine olanak tanır.

Beyin Damar Yapısının Gelişimi

Embriyonik MSS'de vasküler gelişim, nöral dokunun artan metabolik gereksinimlerini karşılamak amacıyla erken dönemlerde başlar. İnsan embriyosunda ilk damar ilişkili beslenme, yaklaşık 3–4. haftalarda nöral tüp yüzeyini çevreleyen perinöral vasküler pleksus aracılığıyla gerçekleşir. Bu aşamada oksijen ve çözünmüş besin maddeleri, henüz gelişmemiş damar ağı yerine difüzyon mekanizmaları ile sinir dokusuna taşınır (O'rahilly & Möller, 1986; Ruhrberg & Bautch, 2013).

Gebeliğin yaklaşık 8. haftasında, perinöral vasküler pleksustan köken alan damar tomurcukları beyin parankimi içine doğru ilerleyerek intrensek vasküler ağın oluşumunu başlatır. Bu süreçte kapiller yapılar, glia limitans externa ile ilişkili bazal membranlar arasında ilerleyerek MSS'ye doğru invazyon gösterir. Glia limitans dış yüzeyi ile kapiller bazal membranının birleşmesi, damarların belirli bir kılavuz yapı içerisinde ilerlemesini sağlar ve bu yapı spatium subarachnoideum ile bağlantılı perivasküler alanların oluşumuna zemin hazırlar (Marín-Padilla, 2012; Tata, Ruhrberg, & Fantin, 2015).

Gelişen yüzeyel vasküler ağ, zamanla leptomeningeal damar sistemine dönüşerek beyin yüzeyinin kalıcı vaskülarizasyonunu oluşturur. Bu erken vasküler yapıların oluşumu, daha sonra derin beyin damar ağının gelişimi için temel bir şablon görevi görür.

İntrensek beyin damarlarının oluşumunda moleküler düzeyde en önemli düzenleyici faktörlerden biri vasküler endotelial

büyüme faktörü-A (VEGF-A)'dır. Nöroektoderm kökenli hücreler tarafından salgılanan VEGF-A, perinöral vasküler pleksustaki endotel hücrelerinde bulunan VEGFR2 reseptörlerini aktive ederek endotel hücre proliferasyonu ve tomurcuklanma anjiyogenezini başlatır. Bu mekanizma sonucunda damarlar nöral doku içine doğru ilerleyerek iç vasküler ağı oluşturur. Bunun yanı sıra Wnt sinyal yolu gibi çeşitli gelişimsel sinyal mekanizmaları da beyin damarlarının doğru organizasyonunda kritik rol oynar. Bu moleküler ağ, yalnızca damar oluşumunu değil aynı zamanda damarların bölgesel farklılaşmasını da düzenler. Embriyonik dönemde VEGF-A'nın başlıca kaynağı nöronlardır. Ancak vasküler ağın olgunlaşmasıyla birlikte glial hücreler, özellikle astrositler, VEGF-A üretiminde baskın rol üstlenmeye başlar. Bu değişim, damar gelişiminin erken proliferatif fazdan daha stabil bir bakım fazına geçişini temsil eder. Endotel hücreleri, perisitler, nöronlar ve astrositlerden oluşan nörovasküler ünite, beyin damar sisteminin hem gelişiminde hem de fonksiyonel bütünlüğünün sürdürülmesinde temel bir organizasyon birimi olarak görev yapar. Bu hücreler arası etkileşim ağı, embriyonik dönemde anjiyogenez yönlendirirken, doğum sonrası dönemde de serebral kan akımının düzenlenmesi ve damar bütünlüğünün korunmasında kritik rol oynar (Wälchli et al., 2015).

Beyin Ventrikülleri

MSS gelişimi sırasında nöral tüpün lümeni bölgesel olarak genişleyerek ventriküler sistemi oluşturur. Bu sistem, kraniyal bölgede farklılaşarak beyin ventriküllerini meydana getirirken, kaudal yönde medulla spinalis'in **canalis centralis**'i ile süreklilik gösterir. Böylece ventriküler sistem, beyin ve omurilik boyunca uzanan kesintisiz bir sıvı boşluğu ağı şeklinde organize olur (Margetis, Weisbrod, & Launico, 2026).

Beyin ventrikülleri, endim hücreleri ile döşeli olup BOS ile dolu, birbiriyle bağlantılı anatomik boşluklardır. Bu boşluklar

içerisinde yer alan ve pia mater ile ependimal hücrelerin katkısıyla gelişen **plexus choroideus**, BOS'un temel üretim kaynağını oluşturur. Plexus choroideus, özellikle lateral ventriküller, üçüncü ventrikül ve dördüncü ventrikül düzeyinde belirgin olup BOS sekresyonunda merkezi rol oynar (Margetis et al., 2026; Mashayekhi & Salehi, 2025).

Anatomik olarak ventriküler sistem dört ana bölümden oluşmaktadır: sağ ve sol lateral ventriküller, diencephalon içerisinde yer alan üçüncü ventrikül ve beyin sapı ile serebellum arasında konumlanan dördüncü ventrikül. Bu yapılar birbirleriyle bağlantılı olup BOS'un intraventriküler dolaşımını sağlar ve dördüncü ventrikül kaudal yönde medulla spinalis'in merkezi kanalı ile devam eder.

Klasik olarak tanımlanan bu dört ventriküle ek olarak, bazı kaynaklarda gelişimsel veya varyasyonel boşluklar olarak kabul edilen *cavum septi pellucidi*, *cavum vergae* ve *ventriculus terminalis* gibi yapılar da tanımlanmıştır. Ancak bu oluşumlar fonksiyonel ventriküler sistemin bir parçası olarak değil, daha çok gelişimsel kalıntılar veya potansiyel boşluklar olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak ventriküler sistem, BOS üretimi ve dolaşımının sağlanmasının yanı sıra, MSS'nin mekanik korunması ve metabolik dengesinin sürdürülmesinde önemli rol oynayan bütüncül bir yapıdır (Arifoğlu, 2019; Margetis et al., 2026; M. K. Rasmussen, H. Mestre, & M. Nedergaard, 2022).

Beyin Ventriculus'ları;

- I. ventrikül: Ventriculus lateralis dexter
- II. ventrikül: Ventriculus lateralis sinister
- III. ventrikül: Ventriculus tertius
- IV. ventrikül: Ventriculus quartus

V. ventrikül (cavum septi pellucidi)

VI. ventrikül (ventriculus psalterium = cavum psalterii = cavum verga)

VII. ventrikül (ventriculus terminalis)

I. ve II. Ventriküller (Ventriculi Laterales)

Lateral ventriküller serebral hemisferlerin içerisinde yer alan en büyük ventriküler yapılardır. Sağ lateral ventrikül **ventriculus lateralis dexter**, sol lateral ventrikül ise **ventriculus lateralis sinister** olarak isimlendirilir. Her biri frontal, temporal ve oksipital loblara uzanan boynuzlara sahiptir (Standring, 2021).

Anatomik Bölümleri

Lateral ventriküller dört ana bölümden oluşur:

1. Cornu Anterius (Frontal Boynuz)

Frontal lob içerisinde yer alır.

- Tavanını ve ön duvarını corpus callosum'un genu bölümü oluşturur.
- Medial duvarında septum pellucidum bulunur.
- Lateral duvarında nucleus caudatus'un caput kısmı yer almaktadır.
- Bu parçada "plexus choroideus yoktur" (Moore, 2023).

2. Pars Centralis (Corpus)

Parietal lob seviyesinde yer alır.

Tavanında corpus callosum'un truncus bölümü bulunur.

Medial tabanda fornix ve plexus choroideus görülmektedir.

Tabanın önemli kısmını thalamus oluşturur.

Bu parçada "plexus choroideus bulunur".

3. Cornu Posterius (Oksipital Boynuz)

Oksipital lob içerisine uzanır.

Medial duvarda önemli kabartı bulunmaktadır:

- Calcar avis

Bu yapı corpus callosum lifleri ve sulcus calcarinus ilişkisi nedeniyle oluşmaktadır (Snell, 2019).

- Bu parçada "plexus choroideus yoktur".

4. Cornu Inferius (Temporal Boynuz)

Temporal lob içine doğru uzanan en uzun bölümdür.

- Tavanında cauda nuclei caudati, tapetum ve stria terminalis yer alır.
- Tabanında hippocampus ve eminentia collateralis bulunmaktadır.
- Arkaya doğru trigonum collaterale ve calcar avis bulunur.
- Bu parçada "plexus choroideus bulunur".

Temporal boynuz limbik sistem yapılarıyla yakın ilişkidir ve epilepsi cerrahisinde önemli anatomik referans noktasıdır (Blumenfeld, 2021).

III. Ventrikül (Ventriculus Tertius)

Üçüncü ventrikül, her iki diencephalon arasında orta hatta yer alan dar ve yarık şeklindeki BOS boşluğudur. Embriyolojik olarak prosencephalon'un diensefalik bölümünden gelişmektedir. Üçüncü ventrikül anterior tarafta foramen interventriculare (Monro deliği) aracılığıyla lateral ventriküllerle bağlantı kurarken, posterior-inferior bölümde aqueductus cerebri (aqueductus mesencephali) aracılığıyla dördüncü ventriküle açılmaktadır (Moore, 2023; Standring, 2021). Ventrikül boşluğu ependim hücreleri ile döşelidir ve tavan kısmında bulunan plexus choroideus BOS üretimine katkı

sağlamaktadır. Anatomik olarak üçüncü ventrikül; ön, arka, üst, alt ve iki lateral duvar olmak üzere altı duvarlı bir yapı şeklinde değerlendirilmektedir.

Üçüncü ventrikülün ön duvarını inferior bölümde lamina terminalis oluştururken, superior kısımda columna fornicis ve commissura anterior yer almaktadır. Lamina terminalis embriyolojik olarak nöral tüpün rostral kapanma alanını temsil eden ince bir membranöz yapıdır. Commissura anterior ise iki serebral hemisfer arasında bağlantı kuran önemli komissüral liflerden meydana gelmektedir (Blumenfeld, 2021).

Arka duvar düzeyinde aqueductus cerebri'nin başlangıç bölümü, commissura posterior, recessus pinealis ve trigonum habenulae bulunmaktadır. Commissura posterior özellikle pupilla ışık refleksi yolları ile ilişkili sinir liflerini içermektedir. Recessus pinealis ise üçüncü ventrikülün epifiz bezi yönüne doğru uzanan küçük bir divertiküldür (Snell, 2019).

Lateral duvarların büyük kısmını superior bölümde thalamus, inferior bölümde ise hypothalamus oluşturmaktadır. Bu iki yapı arasında sulcus hypothalamicus adı verilen oluk bulunmaktadır. Sulcus hypothalamicus, önde foramen interventriculare'den başlayarak arkada aqueductus cerebri'ye kadar uzanır ve thalamik bölge ile hipotalamik bölge arasında anatomik sınır oluşturmaktadır (Standring, 2021).

Üçüncü ventrikülün tabanı esas olarak hypothalamik yapılar tarafından meydana getirilmektedir. Önden arkaya doğru sırasıyla chiasma opticum, infundibulum, tuber cinereum, corpus mamillare ve substantia perforata posterior yer almaktadır. Chiasma opticum optik sinir liflerinin çapraz yaptığı önemli bir anatomik merkezdir. Infundibulum hipofiz bezi ile bağlantıyı sağlayan sap kısmını oluştururken, tuber cinereum hipotalamusun gri cevher içeren

bölgesidir. Corpus mamillare limbik sistem ile ilişkili önemli çekirdek yapılarından biridir (Moore, 2023).

Üçüncü ventrikül midsagittal kesitlerde çeşitli çıkmazlar (recessus) göstermektedir. Bunlardan recessus supraopticus (recessus opticus), chiasma opticum ile lamina terminalis arasında yer almaktadır. Recessus infundibularis, ventrikül boşluğunun infundibulum içerisine doğru uzanan bölümüdür. Recessus pinealis ise epifiz bezi yönüne doğru uzanan posterior çıkmazı oluşturmaktadır. Ayrıca bazı kaynaklarda recessus suprapinealis de üçüncü ventrikülün anatomik uzantılarından biri olarak tanımlanmaktadır (Blumenfeld, 2021; Snell, 2019).

IV. Ventrikül (Ventriculus Quartus)

Dördüncü ventrikül, pons ve medulla oblongata ile cerebellum arasında yer alır. Şekli çadıra benzetilmekte olup tabanı fossa rhomboidea tarafından oluşturulmaktadır. Üst tarafta aqueductus mesencephali ile bağlantılı olan bu ventrikül, inferior bölümde canalis centralis medullae spinalis ile devam eder. BOS, dördüncü ventrikülden apertura mediana ventriculi (Magendie) ve aperturae laterales ventriculi (Luschka) aracılığıyla spatium subarachnoideuma'a geçmektedir.

V. Ventrikül (Cavum Septi Pellucidi)

Cavum septi pellucidi, septum pellucidum yaprakları arasında yer alan potansiyel bir boşluktur. Gerçek ventriküller sistemin parçası olmamakla birlikte tarihsel olarak “beşinci ventrikül” şeklinde tanımlanmıştır (Arifoğlu, 2019; Tubbs et al., 2011).

VI. Ventrikül (Cavum Vergae, Cavum Psalterii)

Cavum vergae, cavum septi pellucidi'nin posterior uzantısıdır ve corpus callosum ile fornix arasında yer alır. “Cavum

psalterii” veya “ventriculus psalterium” isimleriyle de bilinmektedir (Arifoğlu, 2019; Tubbs et al., 2011).

VII. Ventrikül: Ventriculus Terminalis

Ventriculus terminalis, medulla spinalisin conus medullaris bölümünde bulunan endependimal boşluktur. Embriyolojik dönemde belirgin olan bu yapı çoğu bireyde çocukluk döneminde kaybolmaktadır (Coleman, Zimmerman, & Rorke, 1995).

BOS Dolaşımı

BOS, MSS boşluklarını dolduran renksiz, berrak ve düşük protein içerikli fizyolojik bir sıvıdır. BOS; ventriküler sistem, spatium subarachnoideum ve medulla spinalisin merkezi canalis centralis’te bulunmaktadır. MSS’nin mekanik korunması, metabolik dengenin sağlanması ve intrakraniyal basıncın düzenlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Sakka, Coll, & Chazal, 2011). Erişkin bireylerde toplam BOS hacmi yaklaşık 90–150 mL arasında değişmektedir. Bu miktarın yaklaşık 25–35 mL’lik kısmı ventriküller içerisinde bulunurken geri kalan bölümü spatium subarachnoideum’da yer almaktadır. Yenidoğanlarda ise toplam BOS hacmi daha düşük olup yaklaşık 10–60 mL civarındadır. BOS sürekli üretilen ve emilen dinamik bir sıvıdır. Dakikada yaklaşık 0,35–0,40 mL, günlük ise ortalama 500–800 mL BOS üretildiği bildirilmektedir (Brinker et al., 2014). BOS’un yaklaşık %80–90’ı ventriküllerde bulunan plexus choroideus tarafından üretilmektedir. Plexus choroideus; damar yapıları, bağ dokusu ve modifiye endependim hücrelerinden oluşmaktadır. BOS üretimi aktif iyon transportu ve osmotik su geçişi mekanizmaları ile gerçekleşmektedir. BOS’un dansitesi yaklaşık 1.006–1.009 g/mL olup pH değeri ortalama 7.28–7.33 arasındadır (Snell, 2019). BOS dolaşımı belirli anatomik yollar üzerinden gerçekleşmektedir. BOS öncelikle lateral ventriküllerde üretilmekte, ardından foramen interventriculare aracılığıyla üçüncü ventriküle geçmektedir. Buradan aqueductus cerebri yoluyla

dördüncü ventriküle ulaşmakta, daha sonra apertura mediana ventriculi ve aperturae laterales ventriculi aracılığıyla spatium subarachnoideum'a geçmektedir. Subaraknoid aralıkta beyin ve medulla spinalis çevresinde dolaşan BOS, son olarak araknoid villuslar aracılığıyla dural venöz sinüslere emilmektedir. Özellikle sinus sagittalis superior BOS absorpsiyonunda önemli rol oynamaktadır (Standring, 2021). BOS'un ventriküller içerisindeki hareketi plexus choroideus damarlarındaki arteriyel pulsasyonlar ve ependim hücrelerinin siliyer hareketleri ile sağlanmaktadır. Subaraknoid boşluktaki dolaşım ise serebral arterlerin pulsasyonları ve solunum hareketleri ile desteklenmektedir. BOS'un esas absorpsiyon bölgesi olan villi arachnoideae'ler, dura mater içerisine uzanan araknoidal divertiküllerden oluşmaktadır. Bu yapılar toplu halde bulunduğu granulationes arachnoideae veya Pacchioni granülasyonları olarak isimlendirilmektedir (Moore, 2023).

BOS'un temel görevleri arasında MSS'yi travmalardan korumak, beynin efektif ağırlığını azaltmak, metabolik atıkların uzaklaştırılmasını sağlamak, kimyasal homeostazı sürdürmek ve intrakraniyal basıncı düzenlemek bulunmaktadır. Ayrıca BOS, çeşitli nörolojik hastalıkların tanısında biyokimyasal ve mikrobiyolojik incelemeler için önemli bir tanı materyalidir. BOS dolaşımındaki bozukluklar hidrosefali, intrakraniyal hipertansiyon ve nörolojik defisitler gibi ciddi klinik tablolara yol açabilmektedir (Arıncı & Elhan, 2020; Ozan, 2014).

Dural Venöz Sinüsler (Sinus Durae Matris)

Dural venöz sinüsler, dura mater'in periostal ve meningeal yapraklarının belirli bölgelerde birbirinden ayrılması sonucu oluşan endotelle döşeli venöz kanallardır. Bu yapılar klasik venlerden farklı olarak kapakçık içermezler ve duvarlarında düz kas tabakası bulunmaz. Dural sinüsler; beyin venlerinden gelen venöz kanın, BOS ve v. diploica, v. emissaria'ların drenajında görev almaktadır.

Ayrıca intrakraniyal venöz dolaşım ile ekstrakraniyal venöz sistem arasında önemli bağlantılar oluşturmaktadırlar (Standring, 2021).

Dural sinüslerin en büyüğü ***sinus sagittalis superior***'dur. Bu sinüs falx cerebri'nin üst kenarı boyunca önden arkaya doğru uzanmakta ve arkada confluens sinuum'a açılmaktadır. Sinüs boyunca oluşan genişlemelere *lacuna laterales* adı verilmekte olup özellikle araknoid granülasyonların yoğun olarak bulunduğu bölgeleri oluşturmaktadır. BOS'un önemli bir kısmı bu granülasyonlar aracılığıyla venöz sisteme geri emilmektedir (Moore ve ark., 2023). Falx cerebri'nin alt serbest kenarında yer alan ***sinus sagittalis inferior*** ise arkada sinus rectus ile birleşmektedir. ***Sinus rectus***, v.cerebri magna (Galen veni) ile sinus sagittalis inferior'un birleşmesi sonucunda oluşmakta ve tentorium cerebelli boyunca posterior yönde ilerleyerek confluens sinuum'a açılmaktadır.

Confluens sinuum, protuberantia occipitalis interna düzeyinde yer alan önemli venöz birleşim alanıdır. Genellikle sinus sagittalis superior sağ sinus transversus ile devam ederken, sinus rectus daha çok sol sinus transversus'a drene olmaktadır. Bu nedenle sağ vena jugularis interna çoğu bireyde daha geniş çaplıdır (Snell, 2019). Sağlı sollu bulunan ***sinus transversus***'lar sulcus sinus transversus içerisinde uzanmakta ve inferior yönde sinus sigmoideus ile devam etmektedir. "S" şeklindeki kıvrımlı seyri nedeniyle isimlendirilen ***sinus sigmoideus***, foramen jugulare düzeyinde v. jugularis interna'ya dönüşmektedir.

Fossa cranii posterior'da bulunan daha küçük sinüslerden biri ***sinus occipitalis***'tir. Falx cerebelli içerisinde yer alan bu sinüs, confluens sinuum ile bağlantılı olup ayrıca plexus venosus vertebralis internus ile iletişim göstermektedir. Bunun yanında foramen magnum çevresinde yer alan ***sinus marginalis***, plexus basilaris ve sinus occipitalis ile bağlantı kurarak intrakraniyal ve vertebral venöz sistemler arasında alternatif drenaj yolu oluşturmaktadır (Blumenfeld, 2021).

Kafa tabanı venöz drenajında önemli rol oynayan yapılardan biri ***sinus cavernosus***'tur. Os sphenoidale'nin corpus kısmının her iki yanında yer alan bu trabeküllü venöz yapı yaklaşık 2 cm uzunluğunda ve 1 cm genişliğindedir. Sinus cavernosus'un lateral duvarından sırasıyla n. oculomotorius, n. trochlearis, n. ophthalmicus ve n. maxillaris geçerken; sinus içerisinden n. abducens ile birlikte a. carotis interna ve etrafındaki sempatik plexus geçmektedir. Bu anatomik ilişki klinik açıdan büyük önem taşımaktadır. Özellikle kavernöz sinüs trombozu veya karotid-kavernöz fistüller multiple kraniyal sinir tutulumlarına neden olabilmektedir (Greenberg, 2020).

Sinus cavernosus'a v. ophthalmica superior ve inferior, v. centralis retinae, yüzeysel serebral venler ve ***sinus sphenoparietalis*** drene olmaktadır. Ayrıca plexus pterygoideus ve fasiyal venöz sistem ile bağlantıları nedeniyle yüz bölgesindeki enfeksiyonların intrakraniyal yayılımında önemli bir geçiş yolu oluşturmaktadır. Sinus cavernosus posterior yönde sinus petrosus superior ve sinus petrosus inferior aracılığıyla sırasıyla sinus transversus ve vena jugularis interna ile bağlantı kurmaktadır.

Temporal kemiğin petroz parçası boyunca uzanan ***sinus petrosus superior***, sinus cavernosus'u sinus transversus'a bağlarken; ***sinus petrosus inferior*** doğrudan vena jugularis interna'ya drene olmaktadır. Clivus üzerinde bulunan ***plexus basilaris*** ise iki taraflı petrosal sinüsler ile vertebral venöz plexuslar arasında bağlantı sağlayarak alternatif venöz dolaşım yollarının oluşmasına katkı sunmaktadır (Standring, 2021).

Dural venöz sinüsler yalnızca venöz drenaj açısından değil, BOS emilimi ve intrakraniyal basıncın düzenlenmesi açısından da büyük öneme sahiptir. Özellikle araknoid granülasyonlar aracılığıyla gerçekleşen BOS absorpsiyonu MSS homeostazının sürdürülmesinde temel mekanizmalardan biridir (Arifoğlu, 2019; Arıncı & Elhan, 2020; Ozan, 2014).

Circulus Arteriosus Cerebri (Willis Poligonu)

Circulus arteriosus cerebri, beynin alt yüzeyinde, diencephalon ve mesencephalon'un ventral kısmında yer alan ve anterior ile posterior dolaşım sistemlerini birbirine bağlayan önemli bir arteriyel anastomoz ağıdır. Bu yapı, karotis sistemi ile vertebrobaziler sistem arasında köprü oluşturarak serebral kan akımının sürekliliğini sağlar ve özellikle vasküler oklüzyon durumlarında kollateral dolaşım açısından kritik bir güvenlik mekanizması olarak görev yapar.

Willis poligonu temel olarak bir arteriyel halka şeklinde organize olmuştur ancak bireyler arasında anatomik bütünlüğü değişkenlik gösterebilir. Yapının ön kısmını sağ ve sol a. cerebri anteriores (ACA) ile bunları birbirine bağlayan a. communicans anterior oluşturur. Lateral kısımlarda a. carotis internaelerin terminal segmentleri yer alırken, posterior bölümde a. cerebri posteriorlar (PCA) ve bunları internal karotid sisteme bağlayan a. communicans posteriorlar bulunur. Bu kompleks yapı, beynin farklı bölgelerine alternatif kan akım yolları sunar.

Embriyolojik olarak Willis çemberi, fetal dönemde gelişen primer damar ağının remodelingi ile oluşur. Başlangıçta karotis ve vertebrobaziler sistemler birbirinden bağımsız iken, gelişim sürecinde anastomotik bağlantılar güçlenir ve erişkin tip dolaşım sistemi ortaya çıkar. Bu süreçte meydana gelen farklılıklar, erişkin dönemde sık görülen anatomik varyasyonların temelini oluşturur.

Fonksiyonel açıdan Willis poligonunun en önemli görevi, serebral perfüzyonun devamlılığını sağlamaktır. Özellikle bir ana arterde stenoz veya tıkanıklık geliştiğinde, bu halka üzerinden alternatif kan akımı sağlanarak iskemik hasarın şiddeti azaltılabilir. Ancak klinik çalışmalar, bu kompensatuvar mekanizmanın her bireyde yeterli olmadığını ve özellikle hipoplastik veya inkomplet

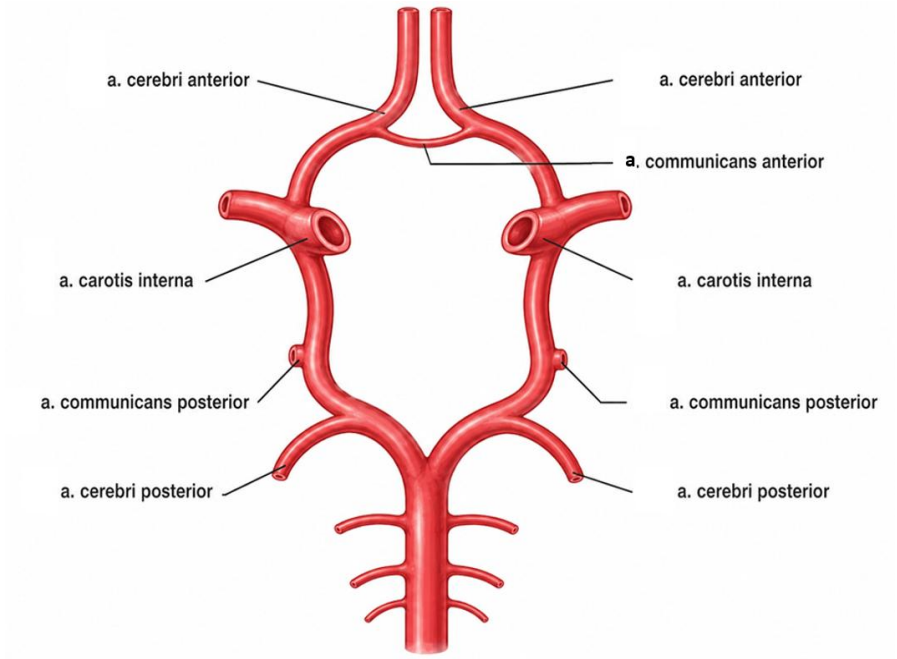
yapılar varlığında koruyucu etkinliğin sınırlı olabileceğini göstermektedir.

Klinik açıdan Willis poligonu en çok intrakraniyal anevrizmalar ile ilişkilidir. Özellikle a. communicans anterior ve posterior bölgeleri, hemodinamik stresin yüksek olduğu alanlar olduğu için anevrizma gelişimine yatkındır. Bunun yanında, serebrovasküler olayların değerlendirilmesinde ve nöroşirürjikal girişimlerin planlanmasında bu anatomik yapı büyük önem taşır. Günümüzde BT anjiyografi ve MR anjiyografi gibi görüntüleme yöntemleri ile Willis poligonunun anatomik varyasyonları ayrıntılı olarak değerlendirilebilmektedir.

Sonuç olarak circulus arteriosus cerebri, beynin dolaşım sisteminde kritik bir rol oynayan, kollateral kan akımını mümkün kılan ve klinik açıdan özellikle anevrizmalar ve iskemik olaylarla yakından ilişkili kompleks bir arteriyel yapıdır.

Willis Poligonu'nu oluşturan damarlar şunlardır:

- Aa. cerebri anteriores
- communicans anterior
- Aa. carotis internae
- Aa. communicans posteriores
- Aa. cerebri posteriores



Şekil 1. Circulus Arteriosus Cerebri (Willis Poligonu)

KAYNAKÇA

Arifoğlu, Y. (2019). Her Yönüyle Anatomi (2. baskı). İstanbul: İstanbul Tıp Kitabevleri.

Arıncı, K., & Elhan, A. (2020). Anatomi (2. baskı). Ankara: Güneş Tıp Kitabevleri.

Bjarkam, C. (2004). Neuroanatomi: Munksgaard.

Blumenfeld, H. (2021). Neuroanatomy Through Clinical Cases (3rd ed): Oxford University Press.

Brinker, T., Stopa, E., Morrison, J., & Klinge, P. (2014). A new look at cerebrospinal fluid circulation. Fluids and Barriers of the CNS, 11(1), 10.

Bueno, D., Parvas, M., Nabiuni, M., & Miyan, J. (2020). Embryonic cerebrospinal fluid formation and regulation. Paper presented at the Seminars in cell & developmental biology.

Chau, K. F., Springel, M. W., Broadbelt, K. G., Park, H.-y., Topal, S., Lun, M. P., . . . LaMantia, A. S. (2015). Progressive differentiation and instructive capacities of amniotic fluid and cerebrospinal fluid proteomes following neural tube closure. Developmental cell, 35(6), 789-802.

Coleman, L. T., Zimmerman, R. A., & Rorke, L. B. (1995). Ventriculus terminalis of the conus medullaris: MR findings in children. AJNR Am J Neuroradiol, 16(7), 1421-1426.

Desmond, M. E., & Jacobson, A. G. (1977). Embryonic brain enlargement requires cerebrospinal fluid pressure. Developmental Biology, 57(1), 188-198.

Desmond, M. E., & Levitan, M. L. (2002). Brain expansion in the chick embryo initiated by experimentally produced occlusion of the spinal neurocoel. The Anatomical Record: An Official

Publication of the American Association of Anatomists, 268(2), 147-159.

Iliff, J. J., Wang, M., Liao, Y., Plogg, B. A., Peng, W., Gundersen, G. A., . . . Goldman, S. A. (2012). A paravascular pathway facilitates CSF flow through the brain parenchyma and the clearance of interstitial solutes, including amyloid β . *Science translational medicine*, 4(147), 147ra111-147ra111.

Johal, J., Paulk, P. B., Oakes, P. C., Oskouian, R. J., Loukas, M., & Tubbs, R. S. (2017). A comprehensive review of the foramina of Luschka: history, anatomy, embryology, and surgery. *Child's Nervous System*, 33(9), 1459-1462.

Lowery, L. A., & Sive, H. (2009). Totally tubular: the mystery behind function and origin of the brain ventricular system. *Bioessays*, 31(4), 446-458.

Lun, M. P., Monuki, E. S., & Lehtinen, M. K. (2015). Development and functions of the choroid plexus–cerebrospinal fluid system. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(8), 445-457.

Margetis, K., Weisbrod, L. J., & Launico, M. V. (2026). *Neuroanatomy, Cerebrospinal Fluid StatPearls*. Treasure Island (FL) with ineligible companies. Disclosure: Luke Weisbrod declares no relevant financial relationships with ineligible companies. Disclosure: Marjorie Launico declares no relevant financial relationships with ineligible companies.: StatPearls Publishing

Marín-Padilla, M. (2012). The human brain intracerebral microvascular system: development and structure. *Frontiers in neuroanatomy*, 6, 38.

Mashayekhi, F., & Salehi, Z. (2025). The essential role of cerebrospinal fluid in the brain; a comprehensive review. *Rev Neurosci*, 36(5), 537-544. doi: 10.1515/revneuro-2024-0156

Moore, K., Dalley, AF., Agur, AMR. (2023). Clinically Oriented Anatomy (Vol. 9th ed.): Wolters Lower.

O'rahilly, R., & Möller, F. (1986). The meninges in human development. *Journal of Neuropathology & Experimental Neurology*, 45(5), 588-608.

Ozan, H. (2014). *Ozan Anatomi*. Ankara: Klinisyen Kitap Evleri.

Rasmussen, M. K., Mestre, H., & Nedergaard, M. (2022). Fluid transport in the brain. *Physiological reviews*, 102(2), 1025-1151.

Rasmussen, M. K., Mestre, H., & Nedergaard, M. (2022). Fluid transport in the brain. 102(2), 1025-1151. doi: 10.1152/physrev.00031.2020

Ruhrberg, C., & Bautch, V. L. (2013). Neurovascular development and links to disease. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 70(10), 1675-1684.

Sá, M. I., Illa, M., & Guedes-Martins, L. (2026). Doppler Assessment of the Fetal Brain Circulation. *Diagnostics*, 16(2), 214.

Sakka, L., Coll, G., & Chazal, J. (2011). Anatomy and physiology of cerebrospinal fluid. *Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis*, 128(6), 309-316. doi: 10.1016/j.anorl.2011.03.002

Saunders, N. R., Dziegielewska, K. M., Møllgård, K., & Habgood, M. D. (2018). Physiology and molecular biology of barrier mechanisms in the fetal and neonatal brain. *The Journal of physiology*, 596(23), 5723-5756.

Schoenwolf, G. C., & Desmond, M. E. (1984). Neural tube occlusion precedes rapid brain enlargement. *Journal of Experimental Zoology*, 230(3), 405-407.

Snell, R. (2019). *Clinical Neuroanatomy* (8th ed): Wolters Kluwer.

Standring, S. (2021). *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice* (41st ed.). Elsevier.

Tata, M., Ruhrberg, C., & Fantin, A. (2015). Vascularisation of the central nervous system. *Mechanisms of development*, 138, 26-36.

Tubbs, R. S., Krishnamurthy, S., Verma, K., Shoja, M. M., Loukas, M., Mortazavi, M. M., & Cohen-Gadol, A. A. (2011). Cavum velum interpositum, cavum septum pellucidum, and cavum vergae: a review. *Childs Nerv Syst*, 27(11), 1927-1930. doi: 10.1007/s00381-011-1457-2

Wälchli, T., Wacker, A., Frei, K., Regli, L., Schwab, M. E., Hoerstrup, S. P., . . . Engelhardt, B. (2015). Wiring the vascular network with neural cues: a CNS perspective. *Neuron*, 87(2), 271-296.

