

FİZYOTERAPİ VE REHABİLİTASYON

ALANINDA ARAŞTIRMALAR
VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026



EDİTÖR

Prof. Dr. Betül TAŞPINAR
Prof. Dr. Ferruh TAŞPINAR

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Ekim 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-299-5

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

FİZYOTERAPİ VE REHABİLİTASYON ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026

EDİTÖR

**Prof. Dr. Betül TAŞPINAR
Prof. Dr. Ferruh TAŞPINAR**

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

KADMIYUM TOKSİSİTESİNİN SPİNAL DİSK PATOLOJİSİNDEKİ ROLÜ

Muhammed Safa ÇANKAYA 7

BÖLÜM 2

FLEKSÖR TENDON YARALANMALARI VE REHABİLİTASYONU

Hazal YAKUT ÖZDEMİR , Arda ÇAKIR , Ezgi ÜNÜVAR YÜKSEL 27

BÖLÜM 3

FLEKSÖR TENDON YARALANMALARI VE REHABİLİTASYONU

Muhammed Safa ÇANKAYA 47

BÖLÜM 4

ÇOCUKLARDA FİZİKSEL UYGUNLUĞUN DEĞERLENDİRİLMESİNDE DİJİTAL TEKNOLOJİLER, YAPAY ZEKÂ VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Meryem SEVİM 68

BÖLÜM 5

SPORCULARDA ÜST EKSTREMİTE FONKSİYONEL REHABİLİTASYONU

Hazal YAKUT ÖZDEMİR , Helin ÖNCEL , Ezgi ÜNÜVAR YÜKSEL 82

BÖLÜM 6

MUSKULOSKELETAL REHABİLİTASYONDA YAPAY ZEKA UYGULAMALARINA GÜNCEL BİR BAKIŞ

Arife KORKUT , Zeliha BAŞKURT 101

BÖLÜM 7

SARKOPENİDE ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

Nazlı Büşra CİĞERCİOĞLU 115

BÖLÜM 8

İNME SONRASI ÜST EKSTREMİTE REHABİLİTASYONUNDA KAUÇUK EL PARADİGMASI: YENİ BİR YAKLAŞIM OLARAK UYGUNLUĞU VE TEDAVİ PROTOKOLÜNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

Mehmet SÖNMEZ 128

BÖLÜM 9

SERVİKAL DİSK HERNİSİNDE KONSERVATİF TEDAVİ YAKLAŞIMLARI

Sümeyye AKBAŞ 145

BÖLÜM 1

KADMİYUM TOKSİSİTESİNİN SPİNAL DİSK PATOLOJİSİNDEKİ ROLÜ

Muhammed Safa ÇANKAYA¹

¹ Öğr. Gör. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Erzincan, Türkiye ORCID: 0000-0003-2016-4152

1. Giriş

Düşük sırt ağrısı (LBP), küresel hastalık yükünün önde gelen nedenlerinden biri olup, dünya nüfusunun %70'inden fazlası yaşamlarının çeşitli dönemlerinde LBP deneyimlemektedir (Liu ve ark., 2024; Foster ve ark., 2018; Hoy ve ark., 2014). LBP'nin birincil nedenlerinden birinin intervertebral disk dejenerasyonu (İVDD) olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir (Liu ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2021; Driscoll ve ark., 2014). İVDD, çok faktörlü bir patolojik süreç olup, dünya genelinde engellilikle geçirilen yılların önde gelen nedeni olarak öne çıkmaktadır (Liu ve ark., 2024). İntervertebral disk dejenerasyonunda (İVDD) meydana gelen başlıca moleküler değişiklikler arasında immün hücre infiltrasyonu, ekstrasellüler matriks (ECM) yıkımı ve intervertebral disk (İVD) hücrelerinin anormal apoptozu, senesansı ve apoptozu yer almaktadır (Liu ve ark., 2024; Cazzanelli ve Wuertz-Kozak, 2020).

Kronik tütün içimi, senesans indükleyici streslerin amplifikasyonuna katkıda bulunmakta, inflamatuvar ve katabolik fenotipleri göstermekte, disk mikroçevresini bozmakta ve İVDD'yi hızlandırmaktadır (Liu ve ark., 2024; Maher ve ark., 2017; Elmasry ve ark., 2015). Buna ek olarak, kadmiyum (Cd), sigara içiminin en önemli risk faktörlerinden biridir. Bununla birlikte, sigaranın İVDD üzerindeki zararlı sonuçlarının tam bir açıklaması henüz yapılamamıştır (Liu ve ark., 2024).

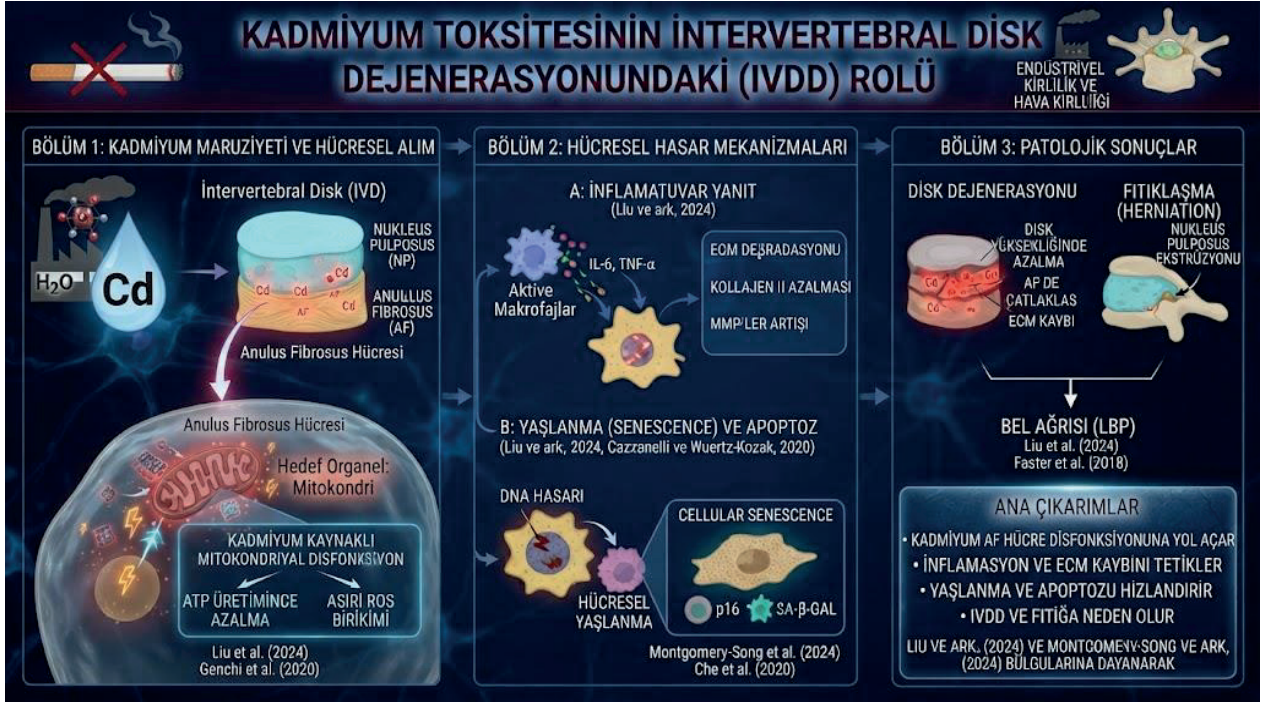
Kadmiyum, on yıldan fazla yarı ömre sahip, çevreyi kirleten toksik bir ağır metaldir (Bulut ve Yıldırım Doğan, 2018; Bulut, 2020; Liu ve ark., 2024; Schutte ve ark., 2008). İnsan Cd maruziyetinin ana kaynağı, sigara dumanının inhalasyonu veya Cd ile kontamine gıda ve suyun tüketimidir (Liu ve ark., 2024; Jarup ve Akesson, 2009). Cd maruziyetinin insanlar için zararlı olduğu ve kardiyovasküler hastalık, osteoporoz ve birçok kanser türü gibi çok çeşitli bozukluklara neden olduğu gösterilmiştir (Liu ve ark., 2024; Bernhard ve ark., 2005; Cosselman ve ark., 2015; Filippini ve ark., 2016; Galazyn-Sidorczuk ve ark., 2008; Nawrot ve ark., 2015; Genchi ve ark., 2020). Çalışmalar, Cd'nin hücre fonksiyonlarını etkileyebildiğini, örneğin kemik mezenkimal kök hücrelerinin (BMSC'ler) osteojenik farklılaşmasında apoptoz, nöronal hücrelerde DNA hasarı, osteoblastlarda apoptoz ve osteoklast farklılaşması gibi süreçleri etkileyebildiğini göstermiştir (Liu ve ark., 2024; Pi ve ark., 2019; Ma ve ark., 2021; Ou ve ark., 2021; Wu ve ark., 2019).

İntervertebral disk, merkezi bir nükleus pulposus (NP) ve onu çevreleyen annulus fibrosus (AF) dokusundan oluşur (Montgomery-Song ve ark., 2024; Lu ve ark., 2014; Upenieks ve ark., 2022). Annulus fibrosus (AF), İVD dokusunun önemli bir parçasıdır ve AF'nin yapısal

stabilitesi, İVDD'nin önlenmesi için kritik öneme sahiptir (Liu ve ark., 2024). AF hücre apoptozu üzerine birkaç çalışma olmasına rağmen, hücre senesansı üzerine çok az çalışma bulunmaktadır. İVD hücrelerinin senesansı, İVD dokusunun fonksiyonel ve yapısal stabilitesini etkilemektedir (Liu ve ark., 2024). Mitokondri gibi organeller, reaktif oksijen türleri (ROS) üretimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve Cd'nin ana hücre içi hedeflerinden biridir. Cd maruziyeti mitokondriyal disfonksiyona neden olarak ATP üretiminde azalma ve ROS'un aşırı birikmesine yol açmaktadır (Liu ve ark., 2024; Genchi ve ark., 2020).

Disk dejenerasyonu ile senesans arasındaki ilişki son yıllarda giderek daha fazla dikkat çekmektedir. İnsan fıtıklaşmış disk dokularında sağlıklı disklere kıyasla önemli ölçüde daha fazla senesans hücre bulunduğu tespit edilmiştir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Roberts ve ark., 2006). Benzer şekilde, yaşlanmış veya dejeneratif İVD'lerde daha fazla senesans hücre birikmektedir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Patil ve ark., 2019; Veroutis ve ark., 2021). Senesans programının kilit sürücüsü olarak tanımlanan p16'nın nakavt edildiği farelerde, İVDD'nin spesifik belirteçlerinde iyileşme gözlenmiştir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Che ve ark., 2020; Patil ve ark., 2019). Senolitik ilaçlarla tedavinin İVDD şiddetini azalttığı gösterilmiştir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Novais ve ark., 2021; Lim ve ark., 2022; Cherif ve ark., 2020). Bu veriler, hücre senesansın İVDD patofizyolojisinde rol oynadığını güçlü bir şekilde desteklemektedir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Patil ve ark., 2018; Silwal ve ark., 2023).

Bu bölümde, ağır metal toksisitesinin, özellikle kadmiyum maruziyetinin, disk dejenerasyonu ve bel fıtığı patogenezindeki rolü, AF hücreleri üzerindeki toksik etkiler, inflamatuvar yanıtlar, hücre senesansı ve apoptoz mekanizmaları çerçevesinde ele alınacaktır. Metin boyunca, Liu ve ark. (2024), Jing ve ark. (2020) ve Montgomery-Song ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmaların bulguları esas alınmış; bu çalışmaların atıf yaptığı ikincil kaynaklar, ilgili bağlamlarda dolaylı atıflarla belirtilmiştir. Kadmiyum toksisitesinin dejenerasyondaki rolü Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Kadmiyum hücresel hasara etkisi ve dejenerasyondaki rolü

2. Kadmiyum: Kaynakları, Maruziyet Yolları ve Toksikokinetiği

2.1. Kadmiyumun Kaynakları ve Çevresel Yayılımı

Su, toprak, hava ve gıda gibi çevresel ortamların kontaminasyonu tüm canlılar için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Liu ve ark., 2024; Shukla ve Singhal, 1984). Kadmiyum, endüstriyel süreçler, madencilik, sigara dumanı ve fosfatlı gübreler gibi çeşitli kaynaklardan çevreye salınmaktadır (Yıldırım Doğan ve Bulut, 2020, Bulut ve Yıldırım, 2025).

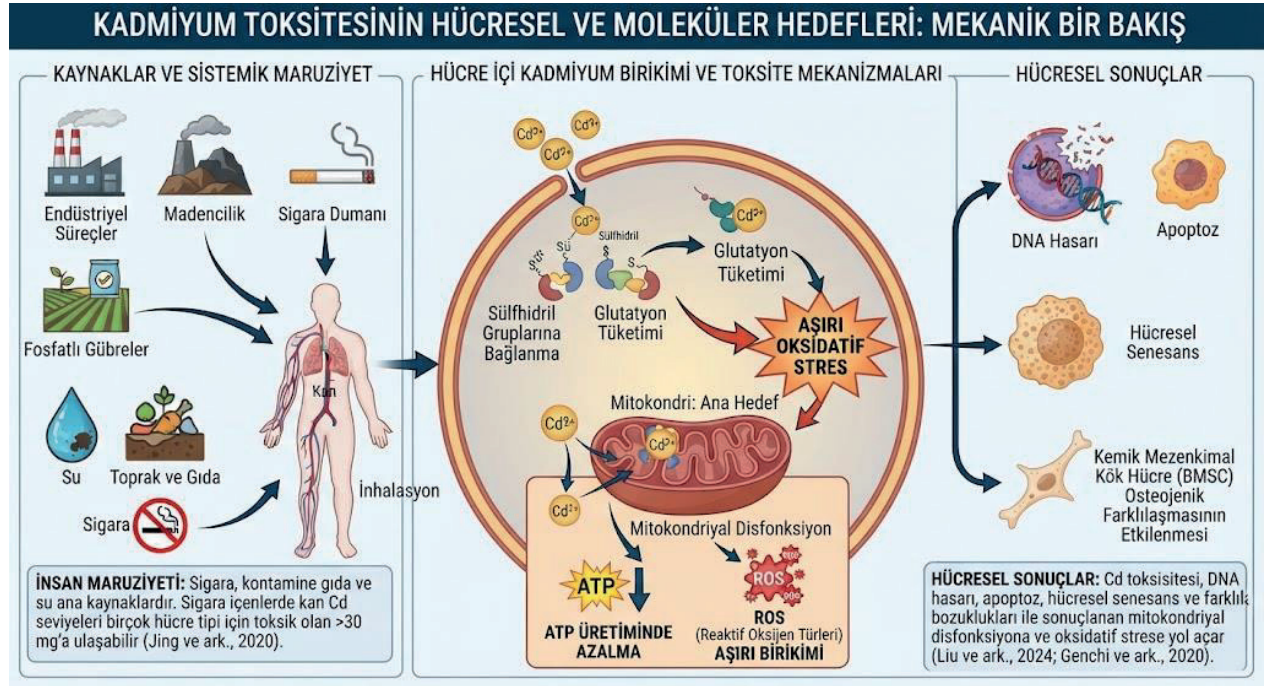
2.2. İnsan Maruziyet Yolları

İnsan Cd maruziyetinin ana kaynağı, sigara dumanının inhalasyonu veya Cd ile kontamine gıda ve suyun tüketimidir (Liu ve ark., 2024; Jarup ve Akesson, 2009). Sigara, Cd'nin en önemli risk faktörlerinden biridir ve sigara içenlerde Cd birikimi, sigaranın disk dejenerasyonu üzerindeki olumsuz etkilerine aracılık edebilir (Liu ve ark., 2024; Bernhard ve ark., 2005). Sigara içenlerde kan Cd konsantrasyonunun >30 mg olduğu bildirilmiştir ki bu seviye birçok hücre tipi için toksiktir (Jing ve ark., 2020; Ellis ve ark., 1979). Bu veriler, sigara içenlerde Cd birikiminin sistemik düzeyde toksik seviyelere ulaşabileceğini göstermektedir.

2.3. Kadmiyumun Hücresel ve Moleküler Hedefleri

Kadmiyum, hücre fonksiyonlarını çeşitli şekillerde etkileyebilmektedir. Çalışmalar, Cd'nin kemik mezenkimal kök hücrelerinin (BMSC'ler) osteojenik farklılaşmasında apoptoz, nöronal hücrelerde DNA hasarı, osteoblastlarda apoptoz ve osteoklast farklılaşması gibi süreçleri etkileyebildiğini göstermiştir (Liu ve ark., 2024; Pi ve ark., 2019; Ma ve ark., 2021; Ou ve ark., 2021; Wu ve ark., 2019). Cd, hücre içi veya hücre dışı aşırı stres veya hasara yol açarak hücre sel senesansa neden olmaktadır (Liu ve ark., 2024; Dodig ve ark., 2019).

Kadmiyum toksisitesinin önemli bir mekanizması, hücre içi redoks dengesinin bozulmasıdır. Cd, proteinlerin sülfhidril gruplarına bağlanarak ve glutasyonu tüketerek aşırı oksidatif strese neden olmaktadır (Jing ve ark., 2020; Jomova ve Valko, 2011). Mitokondri, Cd toksisitesinin ana hedeflerinden biri olarak görünmektedir (Liu ve ark., 2024; Jing ve ark., 2020; Cannino ve ark., 2009). Cd maruziyeti, mitokondriyal disfonksiyona yol açarak ATP üretiminde azalma ve ROS'un aşırı birikmesine neden olmaktadır (Liu ve ark., 2024; Genchi ve ark., 2020). Kadmiyumun alınış ve metabolizmadaki yayılımı Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Kadmiyum maruziyeti ve hasar yolları

3. İntervertebral Disk Dejenerasyonu ve Bel Fitiği Patogenezi

3.1. İntervertebral Diskin Yapısı ve Fonksiyonu

İntervertebral disk, merkezi bir nükleus pulposus (NP) ve onu çevreleyen annulus fibrosus (AF) dokusundan oluşur. AF, iç ve dış bölgelere ayrılabilir ve iç annulus, nükleus pulposus ile entegre durumdadır (Montgomery-Song ve ark., 2024; Lu ve ark., 2014; Upenieks ve ark., 2022). AF, disk dokusunun önemli bir parçasıdır ve AF'nin yapısal stabilitesi, İVDD'nin önlenmesi için kritik öneme sahiptir (Liu ve ark., 2024). AF'nin yapısal stabilitesi, disk dejenerasyonunun önlenmesi için hayati önem taşımaktadır ve aslında disk dejenerasyonundan çok önce AF'nin yapısal stabilitesi bozulmaktadır; bu, İVDD oluşumunu destekleyen önemli mekanizmalardan biridir (Jing ve ark., 2020; Hu ve ark., 2019).

3.2. Disk Dejenerasyonunun Moleküler Mekanizmaları

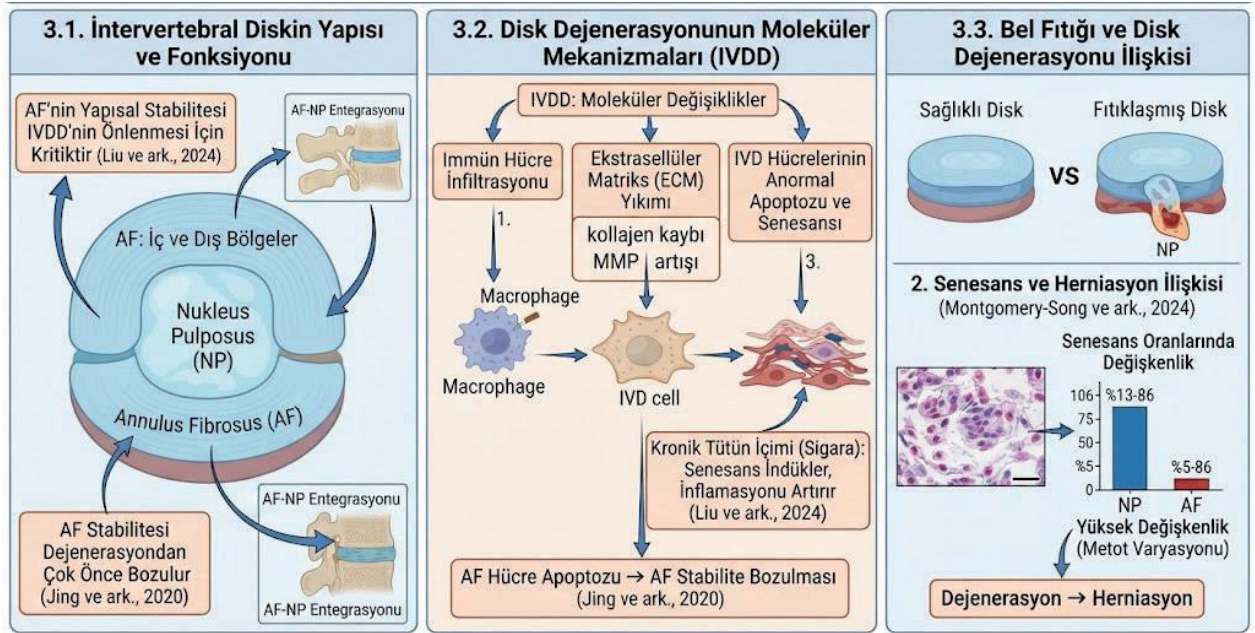
İVDD'de meydana gelen başlıca moleküler değişiklikler arasında immün hücre infiltrasyonu, ekstrasellüler matriks (ECM) yıkımı ve İVD hücrelerinin anormal apoptozu, senesansı ve apoptozu yer almaktadır (Liu ve ark., 2024; Cazzanelli ve Wuertz-Kozak, 2020). Kronik tütün içimi, senesans indükleyici streslerin amplifikasyonuna katkıda bulunmakta, inflamatuvar ve katabolik fenotipleri göstermekte, disk mikroçevresini bozmakta ve İVDD'yi hızlandırmaktadır (Liu ve ark., 2024; Maher ve ark., 2017; Elmasry ve ark., 2015).

AF hücrelerinin apoptozu, AF yapısal destabilizasyonunun önemli bir nedeni olarak kabul edilmektedir (Jing ve ark., 2020; Hu ve ark., 2019). Disk dejenerasyonundan çok önce, AF'nin yapısal stabilitesi bozulmaktadır ve bu, İVDD oluşumunu destekleyen önemli mekanizmalardan biridir (Jing ve ark., 2020; Hu ve ark., 2019).

3.3. Bel Fitiği ve Disk Dejenerasyonu İlişkisi

Bel fitiği, disk dejenerasyonunun ilerlemesiyle yakından ilişkilidir. İnsan fıtıklaştırmış disk dokularında, sağlıklı disklere kıyasla önemli ölçüde daha fazla senesans hücre bulunduğu tespit edilmiştir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Roberts ve ark., 2006). Bu, senesansın disk herniasyonu patogenezinde rol oynayabileceğini düşündürmektedir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Patil ve ark., 2018). İnsan İVD'sinde bildirilen senesans oranında yüksek düzeyde değişkenlik bulunmaktadır; NP'de %13-86 ve AF'de %5-86 arasında değişmektedir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Kim ve ark., 2009; Gruber ve ark., 2007; Gruber ve ark., 2009). Bu varyasyon muhtemelen senesans tanımlama yöntemini yansıtmaktadır

(Montgomery-Song ve ark., 2024). İntervertebral diskin yapısı, dejenerasyonu ve moleküler mekanizmalar Şekil 3’ de verilmiştir.



Şekil 3. İntervertebral diskin yapısı

4. Kadmiyumun Annulus Fibrosus Hücreleri Üzerindeki Toksik Etkileri

4.1. Hücre Canlılığı ve Proliferasyon Üzerine Etkileri

Kadmiyumun AF hücreleri üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalar, Cd'nin hücre canlılığı üzerinde konsantrasyona bağlı inhibitör etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Liu ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, yüksek Cd konsantrasyonlarının ($>10 \mu\text{M}$) AF hücre canlılığı üzerinde belirgin bir inhibitör etki gösterdiği, ancak $0-5 \mu\text{M}$ Cd konsantrasyonlarının 12 saat boyunca uygun bir inhibisyon sağladığı bulunmuştur. Benzer şekilde, Jing ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, AF hücrelerinin canlılığının artan Cd konsantrasyonu ve tedavi süresiyle birlikte azaldığı gösterilmiştir. Cd konsantrasyonu arttıkça AF hücrelerinin proliferasyon yeteneği de kademeli olarak azalmaktadır (Liu ve ark., 2024). EdU proliferasyon testi sonuçları, Cd konsantrasyonu arttıkça proliferasyon oranının anlamlı şekilde düştüğünü göstermiştir (Liu ve ark., 2024).

4.2. Apoptoz İndüksiyonu

Jing ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışma, Cd'nin AF hücrelerinde apoptozu indüklediğini ve bunun mitokondriyal yolağ aracılığıyla gerçekleştiğini göstermiştir. Cd konsantrasyonu

arttıkça AF hücrelerinin apoptoz oranı artmaktadır. Western blot analizleri, mitokondriyal apoptoz yolunda yer alan proteinlerin değiştiğini göstermiştir: Bax ekspresyonu artarken, Bcl-2 ekspresyonu azalmaktadır. Ayrıca, mitokondriyal apoptozun bir biyobelirteci olan sitokrom c (Cyt c) de upregüle olmaktadır (Jing ve ark., 2020; Vringer ve Tait, 2019).

Mitokondriyal membran potansiyelinde (MMP) azalma, mitokondriyal ilişkili hücre apoptozunun erken aşamasının bir işareti olarak kabul edilmektedir (Jing ve ark., 2020; Vringer ve Tait, 2019). JC-1 boyama ve akış sitometrisi analizi, Cd'nin doza bağlı bir şekilde MMP kaybına neden olduğunu göstermiştir (Jing ve ark., 2020). Bu, kırmızı floresans (agregat durumu) yeşil floresansa (monomer durumu) oranındaki azalma ile gösterilmiştir (Jing ve ark., 2020).

4.3. Hücre Senesansı İndüksiyonu

Kadmiyumun AF hücrelerinde senesansı indüklediği gösterilmiştir. Liu ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, SA- β -Gal boyama sonuçları, Cd konsantrasyonu arttıkça AF hücre senesansının arttığını göstermiştir. Western blot analizleri, Cd konsantrasyonu arttıkça senesans ilişkili proteinler olan p16 ve p21 ekspresyon seviyelerinin arttığını ortaya koymuştur (Liu ve ark., 2024; Dodig ve ark., 2019). Bu bulgular, Cd'nin AF hücre senesansını indükleyebildiğini göstermektedir (Liu ve ark., 2024). Senesans, aşırı hücre içi veya hücre dışı stres veya hasar sonucu ortaya çıkan, geri döndürülemez bir uzun süreli hücre döngüsü arresti türüdür (Liu ve ark., 2024; Dodig ve ark., 2019). Cd kaynaklı hücre hasar ve oksidatif stres, mitokondriyal disfonksiyon ve DNA hasarına yol açmaktadır (Liu ve ark., 2024; Ma ve ark., 2021). Oksidatif stres tarafından tetiklenen aşırı ROS oluşumu, proteinler, DNA ve mitokondriye hasar verebilmektedir (Liu ve ark., 2024; Dröge, 2002; Lin ve ark., 2021). Ayrıca, hücre içinde aşırı ROS birikimi, hücre senesansının ana nedenlerinden biridir (Liu ve ark., 2024; Colavitti ve Finkel, 2005; Davalli ve ark., 2016).

4.4. Oksidatif Stres ve Mitokondriyal Disfonksiyon

Kadmiyum maruziyeti, AF hücrelerinde mitokondriyal disfonksiyona yol açarak ROS birikimine neden olmaktadır. Liu ve ark. (2024) çalışmasında, Cd tedavisinden sonra AF hücrelerinde ROS içeriğinin önemli ölçüde arttığı gösterilmiştir. Bu bulgular, Cd kaynaklı AF hücre senesansının mitokondriyal disfonksiyon ve ROS birikimini içerebileceğini düşündürmektedir (Liu ve ark., 2024).

Mitokondri, Cd zehirlenmesinin ana hedefi olarak görünmektedir (Liu ve ark., 2024; Cannino ve ark., 2009). Hücre senesansın düzenlenmesi, metabolizma ve sinyal iletimi merkezi olan mitokondriye büyük ölçüde bağlıdır (Liu ve ark., 2024; Koch ve ark., 2017; Zhu ve ark., 2020). Hücre senesansı sürecinde MMP seviyeleri azalmakta ve mitokondri sayısı artmaktadır (Liu ve ark., 2024; Hernandez-Segura ve ark., 2018). Mitokondriyal aktivitedeki azalma, ROS üretimine ve mitokondriden enzim salınımına neden olabilmektedir (Liu ve ark., 2024). Buna göre, mitokondriyal homeostazın senesans üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır (Liu ve ark., 2024).

Jing ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada da, aşırı hücre içi ROS'un Cd kaynaklı AF hücre apoptozunda kilit rol oynadığı gösterilmiştir. N-acetyl-L-cysteine (NAC) gibi bir antioksidan ile ön tedavi, Cd kaynaklı AF hücre apoptozunu azaltmış ve MMP'yi artırmıştır (Jing ve ark., 2020). Bu sonuçlar, aşırı hücre içi ROS'un Cd kaynaklı AF hücre apoptozunda önemli bir rol oynadığını doğrulamaktadır (Jing ve ark., 2020; Vakifahmetoğlu-Norberg ve ark., 2017). Cd, mitokondriyal disfonksiyon yoluyla AF hücre senesansını teşvik edebilmektedir; bu da oksidatif stres hasarı yoluyla gerçekleşmektedir (Liu ve ark., 2024).

5. Kadmiyum Kaynaklı Hücre Senesansı ve Apoptozun Moleküler Mekanizmaları

5.1. JNK/p53 Sinyal Yolağı

Liu ve ark. (2024) tarafından yapılan transkriptom dizileme analizi, Cd tedavisinden sonra JNK'nın upregüle olduğunu göstermiştir. Zenginleştirme analizinde p53, MAPK ve hücre döngüsü sinyal yolları bulunmuştur (Liu ve ark., 2024). Bu bulgular, Cd kaynaklı AF hücre senesansının JNK/p53 sinyal yolağını içerdiğini düşündürmektedir (Liu ve ark., 2024; Nemmiche ve ark., 2012; Sugisawa ve ark., 2004).

Çalışmada, Cd'nin JNK fosforilasyonunu ve p53 ekspresyonunu belirgin şekilde artırdığı gösterilmiştir (Liu ve ark., 2024). JNK inhibitörü SP600125 tedavisinden sonra, p-JNK ve p53 ekspresyon seviyeleri downregüle olmuştur (Liu ve ark., 2024). Bu sonuçlar, Cd'nin JNK/p53 sinyal yolağını aktive edebileceğini göstermektedir (Liu ve ark., 2024). İmmünofloresan sonuçları da benzer şekilde doğrulanmıştır: Cd grubu, kontrol grubuna kıyasla önemli ölçüde daha yüksek p-JNK ve p53 ekspresyon seviyeleri göstermiş, ancak SP600125 tedavisi p-JNK ve p53 ekspresyon seviyelerini önemli ölçüde düşürmüştür (Liu ve ark., 2024).

Ayrıca, Cd grubunda p16 ve p21 ekspresyonunun belirgin şekilde upregüle olduğu, ancak SP600125 ön tedavisi ile bu etkilerin hafifletildiği gösterilmiştir (Liu ve ark., 2024). qRT-PCR

sonuçları da Cd grubunun p16, p21 ve p53 mRNA ekspresyon seviyelerinin kontrol grubuna göre önemli ölçüde yüksek olduğunu, ancak SP+Cd grubunda SP600125 ön tedavisinin bu etkiyi önemli ölçüde hafiflettiğini göstermiştir (Liu ve ark., 2024).

Hücre döngüsü analizi, Cd grubunda AF hücrelerinin daha büyük bir kısmının G2/M fazında hücre döngüsü arresti gösterdiğini ortaya koymuştur (Liu ve ark., 2024). SP600125 ön tedavisinden sonra, G2/M fazında arrest olan AF hücrelerinin oranı düşmüştür; bu, SP600125'in Cd kaynaklı hücre döngüsü arrestini hafifletebileceğini göstermektedir (Liu ve ark., 2024).

5.2. FoxO1a ve Pİ3K/AKT Sinyal Yolağı

Jing ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışma, Cd'nin AF hücrelerinde FoxO1a'nın nükleer translokasyonunu indüklediğini ve bunun mitokondriyal ilişkili yolak aracılığıyla AF hücre apoptozunu yönlendirdiğini göstermiştir. FoxO transkripsiyon faktörleri, mitokondriyal antioksidan enzimler ve apoptoz ile ilgili çoklu genlerin ekspresyonunu düzenleyerek mitokondriyal fonksiyonun sürdürülmesinde hayati bir rol oynamaktadır (Jing ve ark., 2020; Kim ve Koh, 2017; Zhang ve ark., 2011).

Çalışmada, Cd konsantrasyonu arttıkça FoxO1a, FoxO3 ve FoxO4 ekspresyonunun upregüle olduğu gösterilmiştir (Jing ve ark., 2020). İmmünofloresan boyama ile subselüler lokalizasyon incelendiğinde, sadece FoxO1a'nın Cd tedavisinden sonra hücre nükleusuna transloke olduğu gözlenmiştir (Jing ve ark., 2020). Bu sonuçlar, FoxO1a'nın Cd kaynaklı AF hücre apoptozunda rol oynadığını düşündürmektedir (Jing ve ark., 2020). FoxO1a'nın siRNA ile nakavt edilmesi, Cd tedavisinden sonra AF hücre apoptozunu azaltmıştır (Jing ve ark., 2020). Ayrıca, FoxO1a'nın bir hedef geni olan ve apoptozu teşvik eden BİM'in Cd tedavisinden sonra upregüle olduğu, FoxO1a nakavtının BİM ekspresyon seviyesini azalttığı gösterilmiştir (Jing ve ark., 2020). Bu sonuçlar, Cd kaynaklı AF hücre apoptozunun FoxO1a nakavtı ile kurtarılabileceğini göstermiştir (Jing ve ark., 2020).

Pİ3K/AKT sinyal yolağı da bu süreçte rol oynamaktadır. Çalışmada, Cd tedavisinden sonra Pİ3K ekspresyonunun ve p-AKT/AKT oranının upregüle olduğu, bunun Pİ3K/AKT yolunun aktive olduğunu gösterdiği belirtilmiştir (Jing ve ark., 2020). Pİ3K inhibitörü LY294002 ile ön tedavi, Cd tedavisinden sonra AF hücre apoptoz yüzdesini artırmıştır; ancak FoxO1a'nın nakavt edilmesi bu apoptozu kurtarabilmiştir (Jing ve ark., 2020). Bu sonuçlar, Pİ3K/AKT/FoxO1a ekseninin Cd kaynaklı AF hücre apoptozunda rol oynadığını göstermektedir (Jing ve ark., 2020; Hamann ve Klotz, 2013).

FoxO'lar ayrıca posttranslasyonel modifikasyon, en belirgin şekilde fosforilasyon ile düzenlenmektedir; bu, FoxO inaktivasyonuna ve nükleer dışlanmaya neden olmaktadır (Jing ve ark., 2020; Hamann ve Klotz, 2013). Çalışmada, FoxO1a'nın Ser 256 ve Ser 313'teki fosforilasyonunun Cd tedavisi ile upregüle olduğu gösterilmiştir (Jing ve ark., 2020).

5.3. Senesans İlişkili Salgı Fenotipi (SASP) ve İnflamatuvar Sitokinler

Liu ve ark. (2024) çalışmasında, Cd'nin senesans ilişkili salgı fenotipini (SASP) artırdığı gösterilmiştir. Cd grubunda İL-6 ve İL-1 β ekspresyon seviyeleri kontrol grubuna göre önemli ölçüde artmıştır (Liu ve ark., 2024). Ancak SP600125 tedavisi ile İL-6 ve İL-1 β ekspresyon seviyeleri Cd grubuna göre daha düşük bulunmuştur (Liu ve ark., 2024). Bu, SP600125'in İL-6 ve İL-1 β 'daki artış eğilimini önleyebileceğini düşündürmektedir (Liu ve ark., 2024).

JNK/p53 yolağının SASP ve p53'ün düzenlenmesini öngördüğü belirtilmektedir (Liu ve ark., 2024; Nakamura ve ark., 2014). JNK ve p53'ün etkileşimi SASP gelişimini hızlandırabilmektedir (Liu ve ark., 2024; Yang ve ark., 2019). Çalışma sonuçları, Cd'nin İL-1 β ve İL-6 ekspresyon seviyelerini artırabileceğini ve SP600125 ön tedavisinin bu etkileri tersine çevirebileceğini göstermiştir (Liu ve ark., 2024). Bu bulgular, JNK/p53 sinyal yolağının Cd kaynaklı AF hücre senesansının potansiyel bir mekanizması olduğunu ortaya koymaktadır (Liu ve ark., 2024).

6. Ağır Metal Toksisitesinin Disk Dejenerasyonu ve Bel Fitiği ile İlişkisi: Klinik ve Patofizyolojik Çıkarımlar

6.1. Sigara, Kadmiyum ve Disk Dejenerasyonu Arasındaki Bağlantı

Sigara, İVDD için önemli bir risk faktörüdür (Jing ve ark., 2020; Liu ve ark., 2024; Elmasry ve ark., 2015; Maher ve ark., 2017). Sigarada bulunan Cd, sigaranın disk dejenerasyonu üzerindeki olumsuz etkilerine aracılık edebilir (Jing ve ark., 2020; Liu ve ark., 2024; Bernhard ve ark., 2005). Sigara içenlerde kan Cd konsantrasyonu >30 mg'dır ve bu seviye birçok hücre tipi için toksiktir (Jing ve ark., 2020; Ellis ve ark., 1979).

Jing ve ark. (2020) çalışması, Cd'nin AF hücre apoptozunu indüklediğini ve bunun İVDD'ye katkıda bulunabileceğini gösteren ilk çalışmadır. Bu, sigaranın İVDD'ye katkıda bulunma mekanizmasını araştırmakta ve sigarada İVDD'yi önlemek için yeni bir hedef bulmaktadır (Jing ve ark., 2020). Benzer şekilde, Liu ve ark. (2024) çalışması, Cd'nin AF hücre senesansını indükleyerek İVDD'ye katkıda bulunabileceğini göstermiştir.

6.2. Kadmiyumun Disk Dokusundaki Potansiyel Birikimi

Her ne kadar intervertebral disk dokusunda Cd konsantrasyonlarına ilişkin raporlar bulunmasa da, sigara içenlerde kan Cd konsantrasyonunun >30 mg olduğu ve bunun birçok hücre tipi için toksik olduğu bilinmektedir (Jing ve ark., 2020; Ellis ve ark., 1979). Bu, disk dokusunun da Cd'ye maruz kalabileceğini ve toksik etkilerden etkilenebileceğini düşündürmektedir (Jing ve ark., 2020).

6.3. Hücre Senesansının ve Apoptozun Disk Dejenerasyonundaki Rolü

Hücresel senesans, disk dejenerasyonunun patofizyolojisinde rol oynamaktadır (Montgomery-Song ve ark., 2024; Patil ve ark., 2018; Silwal ve ark., 2023). İnsan fıtıklaşmış disk dokularında sağlıklı disklere kıyasla önemli ölçüde daha fazla senesans hücre bulunmuştur (Montgomery-Song ve ark., 2024; Roberts ve ark., 2006). Yaşlanmış veya dejeneratif disklerde daha fazla senesans hücre birikmektedir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Patil ve ark., 2019; Veroutis ve ark., 2021). p16 nakavt farelerde İVDD'nin spesifik belirteçlerinde iyileşme gözlenmiştir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Che ve ark., 2020; Patil ve ark., 2019). Senolitik ilaçlarla tedavinin İVDD şiddetini azalttığı gösterilmiştir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Novais ve ark., 2021; Lim ve ark., 2022; Cherif ve ark., 2020).

AF hücrelerinin apoptozu, AF yapısal destabilizasyonunun önemli bir nedeni olarak kabul edilmektedir (Jing ve ark., 2020; Hu ve ark., 2019). AF, intervertebral disk dokusunun hayati bir parçası olduğundan, AF'nin yapısal stabilitesi intervertebral disklerin dejenerasyonunu önlemek için önemlidir (Jing ve ark., 2020). Aslında, disk dejenerasyonundan çok önce, AF'nin yapısal stabilitesi bozulmaktadır (Jing ve ark., 2020; Hu ve ark., 2019).

7. Sonuç

Kadmiyum, sigara dumanı ve kontamine gıda/su yoluyla insan vücuduna girmekte ve uzun yarı ömrü nedeniyle dokularda birikmektedir (Liu ve ark., 2024; Jarup ve Akesson, 2009; Schutte ve ark., 2008). AF hücreleri üzerindeki toksik etkileri, hücre canlılığının azalması, proliferasyonun inhibisyonu, apoptoz ve senesansın indüklenmesi şeklinde kendini göstermektedir (Liu ve ark., 2024; Jing ve ark., 2020).

Moleküler düzeyde, Cd'nin JNK/p53 sinyal yolağını aktive ederek (Liu ve ark., 2024; Nemmiche ve ark., 2012; Sugisawa ve ark., 2004), ROS üretimini artırarak (Liu ve ark., 2024; Jing ve ark., 2020), mitokondriyal disfonksiyona yol açarak (Liu ve ark., 2024; Jing ve ark.,

2020; Cannino ve ark., 2009) ve FoxO1a transkripsiyon faktörünü nükleusa transloke ederek (Jing ve ark., 2020; Kim ve Koh, 2017; Zhang ve ark., 2011) AF hücrelerinde senesans ve apoptozu indüklediği gösterilmiştir. Ayrıca, Cd'nin SASP aracılığıyla pro-inflamatuvar sitokinlerin (İL-1 β , İL-6) salınımını artırdığı, bunun da disk mikroçevresinde inflamatuvar bir kaskadı tetikleyerek dejenerasyonu hızlandırdığı ortaya konmuştur (Liu ve ark., 2024; Nakamura ve ark., 2014; Yang ve ark., 2019).

NP ve AF hücreleri arasındaki parakrin sinyalleşme, disk dejenerasyonunda pozitif bir geri bildirim döngüsüne katkıda bulunabilir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Ashraf ve ark., 2021). Senesans NP hücreleri, iAF hücrelerinde senesans ve dejeneratif değişiklikleri indükleyebilen çözünür faktörler (H₂O₂ ve sitokinler gibi) salgılayabilmektedir (Montgomery-Song ve ark., 2024; Lopes-Paciencia ve ark., 2019).

Liu ve ark. (2024) çalışması, Cd'nin AF hücre senesansını JNK/p53 sinyal yolağı aracılığıyla indüklediğini ve bu bulguların Cd maruziyetinin neden olduğu İVDD'nin tedavisi ve önlenmesi için yeni bir yaklaşım sunabileceğini göstermiştir. Jing ve ark. (2020) çalışması, Cd'nin AF hücre apoptozunu mitokondriyal yolak aracılığıyla indüklediğini ve Pİ3K/AKT/FoxO1a yolunun bu süreçte rol oynadığını göstermiştir. Montgomery-Song ve ark. (2024) çalışması ise, senesans NP hücrelerinin iAF hücrelerinde senesansı indükleyebileceğini ve bunun disk dejenerasyonunda pozitif bir geri bildirim döngüsüne katkıda bulunabileceğini göstermiştir.

Bu bulgular, ağır metal maruziyetinin disk dejenerasyonundaki rolüne dair yeni bir bakış açısı sunmakta ve potansiyel terapötik hedefler önermektedir. JNK/p53 ve Pİ3K/AKT/FoxO1a sinyal yolaklarının modülasyonu, ROS üretiminin azaltılması ve senolitik tedaviler, Cd kaynaklı disk dejenerasyonunun önlenmesi ve tedavisinde umut verici stratejiler olarak görünmektedir.

Kaynaklar

- Ashraf, S., Santerre, P., & Kandel, R. (2021). Induced senescence of healthy nucleus pulposus cells is mediated by paracrine signaling, from TNF- α -activated cells. **The FASEB Journal**, 35(9), e21795.
- Bernhard, D., Rossmann, A., & Wick, G. (2005). Metals in cigarette smoke. **IUBMB Life**, 57(12), 805-809.
- Bulut H. (2020), Protective effect of humic acid against heavy metal stress in barley grown near highways, *Fresenius Environmenal Bulletin*, 29-8, 6991-7001
- Bulut H., Yıldırım F. S. (2025), The genotoxic effects of heavy metals in fly ash from thermal power plants on wheat, depending on wind direction, *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences*, 78, No 2
- Bulut, H., Yıldırım Doğan, N. (2018), Determination by molecular methods of genetic and epigenetic changes caused by heavy metals released from thermal power plants. **Appl Biol Chem** 61, 189–196. <https://doi.org/10.1007/s13765-018-0346-8>
- Cannino, G., Ferruggia, E., Luparello, C., & Rinaldi, A. M. (2009). Cadmium and mitochondria. **Mitochondrion**, 9(6), 377-384.
- Cazzanelli, P., & Wuertz-Kozak, K. (2020). MicroRNAs in intervertebral disc degeneration, apoptosis, inflammation, and mechanobiology. **International Journal of Molecular Sciences**, 21(10), 3601-3615.
- Che, H., Li, J., Li, Y., et al. (2020). P16 deficiency attenuates intervertebral disc degeneration by adjusting oxidative stress and nucleus pulposus cell cycle. **eLife**, 9, e52570.
- Cherif, H., Bisson, D. G., Mannarino, M., et al. (2020). Senotherapeutic drugs for human intervertebral disc degeneration and low back pain. **eLife**, 9, e54693.
- Colavitti, R., & Finkel, T. (2005). Reactive oxygen species as mediators of cellular senescence. **IUBMB Life**, 57(4-5), 277-281.
- Cosselman, K. E., Navas-Acien, A., & Kaufman, J. D. (2015). Environmental factors in cardiovascular disease. **Nature Reviews Cardiology**, 12(11), 627-642.

- Davalli, P., Mitic, T., Caporali, A., Lauriola, A., & D'Arca, D. (2016). ROS, cell senescence, and novel molecular mechanisms in aging and age-related diseases. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, 2016, 3565127-3565144.
- Dodig, S., Cepelak, I., & Pavic, I. (2019). Hallmarks of senescence and aging. **Biochimica Medica**, 29(3), 030501-030515.
- Driscoll, T., Jacklyn, G., Orchard, J., et al. (2014). The global burden of occupationally related low back pain: Estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. **Annals of the Rheumatic Diseases**, 73(6), 975-981.
- Dröge, W. (2002). Free radicals in the physiological control of cell function. **Physiological Reviews**, 82(1), 47-95.
- Ellis, K. J., Vartsky, D., Zanzi, I., Cohn, S. H., & Yasumura, S. (1979). Cadmium: In vivo measurement in smokers and nonsmokers. **Science**, 205(4403), 323-325.
- Elmasry, S., Asfour, S., de Rivero Vaccari, J. P., & Travascio, F. (2015). Effects of tobacco smoking on the degeneration of the intervertebral disc: A finite element study. **PLOS ONE**, 10(8), e0136137.
- Filippini, T., Michalke, B., Malagoli, C., et al. (2016). Determinants of serum cadmium levels in a Northern Italy community: A cross-sectional study. **Environmental Research**, 150, 219-226.
- Foster, N. E., Anema, J. R., Cherkin, D., et al. (2018). Prevention and treatment of low back pain: Evidence, challenges, and promising directions. **Lancet**, 391(10137), 2368-2383.
- Galazyn-Sidoreczuk, M., Brzoska, M. M., & Moniuszko-Jakoniuk, J. (2008). Estimation of Polish cigarettes contamination with cadmium and lead, and exposure to these metals via smoking. **Environmental Monitoring and Assessment**, 137(1-3), 481-493.
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The effects of cadmium toxicity. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 17(11), 3782-3805.
- Gruber, H. E., Ingram, J. A., Davis, D. E., & Hanley, E. N. (2009). Increased cell senescence is associated with decreased cell proliferation in vivo in the degenerating human annulus. **The Spine Journal**, 9(3), 210-215.

- Gruber, H. E., Ingram, J. A., Norton, H. J., & Hanley, E. N. (2007). Senescence in cells of the aging and degenerating intervertebral disc: Immunolocalization of senescence-associated β -galactosidase in human and sand rat discs. **Spine**, 32(3), 321-327.
- Hamann, I., & Klotz, L. O. (2013). Arsenite-induced stress signaling: Modulation of the phosphoinositide 3'-kinase/Akt/FoxO signaling cascade. **Redox Biology**, 1(1), 104-109.
- Hernandez-Segura, A., Nehme, J., & Demaria, M. (2018). Hallmarks of cellular senescence. **Trends in Cell Biology**, 28(6), 436-453.
- Hoy, D., March, L., Brooks, P., et al. (2014). The global burden of low back pain: Estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. **Annals of the Rheumatic Diseases**, 73(6), 968-974.
- Hu, Y., Shao, Z., Cai, X., et al. (2019). Mitochondrial pathway is involved in advanced glycation end products-induced apoptosis of rabbit annulus fibrosus cells. **Spine**, 44(10), E585-E595.
- Iwashita, H., Castillo, E., Messina, M. S., Swanson, R. A., & Chang, C. J. (2021). A tandem activity-based sensing and labeling strategy enables imaging of transcellular hydrogen peroxide signaling. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 118(9), e2018513118.
- Jarup, L., & Akesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. **Toxicology and Applied Pharmacology**, 238(3), 201-208.
- Jing, D., Wu, W., Deng, X., et al. (2021). FoxO1a mediated cadmium-induced annulus fibrosus cells apoptosis contributes to intervertebral disc degeneration in smoking. **Journal of Cellular Physiology**, 236(1), 677-687. <https://doi.org/10.1002/jcp.29895>
- Jomova, K., & Valko, M. (2011). Advances in metal-induced oxidative stress and human disease. **Toxicology**, 283(2-3), 65-87.
- Kim, K. W., Chung, H. N., Ha, K. Y., Lee, J. S., & Kim, Y. Y. (2009). Senescence mechanisms of nucleus pulposus chondrocytes in human intervertebral discs. **The Spine Journal**, 9(8), 658-666.

- Kim, S., & Koh, H. (2017). Role of FOXO transcription factors in crosstalk between mitochondria and the nucleus. **Journal of Bioenergetics and Biomembranes**, 49(4), 335-341.
- Koch, R. E., Josefsen, C. C., & Hill, G. E. (2017). Mitochondrial function, ornamentation, and immunocompetence. **Biological Reviews**, 92(3), 1459-1474.
- Kudelko, M., Chen, P., Tam, V., et al. (2021). PRIMUS: Comprehensive proteomics of mouse intervertebral discs that inform novel biology and relevance to human disease modelling. **Matrix Biology Plus**, 12, 100082\.
- Lim, S., An, S. B., Jung, M., et al. (2022). Local delivery of senolytic drug inhibits intervertebral disc degeneration and restores intervertebral disc structure. **Advanced Healthcare Materials**, 11(2), 2101483.
- Lin, J., Du, J., Wu, X., et al. (2021). SIRT3 mitigates intervertebral disc degeneration by delaying oxidative stress-induced senescence of nucleus pulposus cells. **Journal of Cellular Physiology**, 236(9), 6441-6456.
- Liu, X., Zhao, W., Hu, M., Zhang, Y., Wang, J., & Zhang, L. (2024). Cadmium-induced annulus fibrosus cell senescence contributes to intervertebral disc degeneration via the JNK/p53 signaling pathway. **Iranian Journal of Basic Medical Sciences**, 27(5), 588-595. <https://doi.org/10.22038/IJBMS.2024.72312.15728>
- Lopes-Paciencia, S., Saint-Germain, E., Rowell, M. C., et al. (2019). The senescence-associated secretory phenotype and its regulation. **Cytokine**, 117, 15-22.
- Lu, J., Santerre, J. P., & Kandel, R. A. (2014). Inner and outer annulus fibrosus cells exhibit differentiated phenotypes and yield changes in extracellular matrix protein composition in vitro on a polycarbonate urethane scaffold. **Tissue Engineering Part A**, 20(23-24), 3261-3269.
- Ma, Y., Ran, D., Zhao, H., et al. (2021). Cadmium exposure triggers osteoporosis in duck via P2X7/PI3K/AKT-mediated osteoblast and osteoclast differentiation. **Science of the Total Environment**, 750, 141638.
- Maher, C., Underwood, M., & Buchbinder, R. (2017). Non-specific low back pain. **Lancet**, 389(10070), 736-747.

- Montgomery-Song, A., Ashraf, S., Santerre, P., & Kandel, R. (2024). Senescent response in inner annulus fibrosus cells in response to TNF α , H₂O₂, and TNF α -induced nucleus pulposus senescent secretome. **PLOS ONE**, 19(1), e0280101. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280101>
- Nakamura, M., Ohsawa, S., & Igaki, T. (2014). Mitochondrial defects trigger proliferation of neighbouring cells via a senescence-associated secretory phenotype in *Drosophila*. **Nature Communications**, 5, 5264.
- Nawrot, T. S., Martens, D. S., Hara, A., et al. (2015). Association of total cancer and lung cancer with environmental exposure to cadmium: The meta-analytical evidence. **Cancer Causes & Control**, 26(9), 1281-1288.
- Nemmiche, S., Chabane-Sari, D., Kadri, M., & Guiraud, P. (2012). Cadmium-induced apoptosis in the BJAB human B cell line: Involvement of PKC/ERK1/2/JNK signaling pathways in HO-1 expression. **Toxicology**, 300(3), 103-111.
- Nisimoto, Y., Diebold, B. A., Constantino-Gomes, D., & Lambeth, J. D. (2014). Nox4: A hydrogen peroxide-generating oxygen sensor. **Biochemistry**, 53(31), 5111-5120.
- Novais, E. J., Tran, V. A., Johnston, S. N., et al. (2021). Long-term treatment with senolytic drugs Dasatinib and Quercetin ameliorates age-dependent intervertebral disc degeneration in mice. **Nature Communications**, 12(1), 5213.
- Ou, L., Wang, H., Wu, Z., et al. (2021). Effects of cadmium on osteoblast cell line: Exportin 1 accumulation, p-JNK activation, DNA damage and cell apoptosis. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 208, 111668.
- Panebianco, C. J., Dave, A., Charytonowicz, D., Sebra, R., & Iatridis, J. C. (2021). Single-cell RNA-sequencing atlas of bovine caudal intervertebral discs: Discovery of heterogeneous cell populations with distinct roles in homeostasis. **The FASEB Journal**, 35(11), e21919.
- Patil, P., Dong, Q., Wang, D., et al. (2019). Systemic clearance of p16INK4a-positive senescent cells mitigates age-associated intervertebral disc degeneration. **Aging Cell**, 18(3), e12938.

- Patil, P., Niedernhofer, L. J., Robbins, P. D., Lee, J., Sowa, G., & Vo, N. (2018). Cellular senescence in intervertebral disc aging and degeneration. **Current Molecular Biology Reports**, 4(4), 180-190.
- Pi, H., Li, M., Zou, L., et al. (2019). AKT inhibition-mediated dephosphorylation of TFE3 promotes overactive autophagy independent of MTORC1 in cadmium-exposed bone mesenchymal stem cells. **Autophagy**, 15(4), 565-582.
- Richardson, S. M., Knowles, R., Marples, D., Hoyland, J. A., & Mobasheri, A. (2008). Aquaporin expression in the human intervertebral disc. **Journal of Molecular Histology**, 39(3), 303-309.
- Roberts, S., Evans, E. H., Kletsas, D., Jaffray, D. C., & Eisenstein, S. M. (2006). Senescence in human intervertebral discs. **European Spine Journal**, 15(Suppl 3), 312-316.
- Schutte, R., Nawrot, T. S., Richart, T., et al. (2008). Bone resorption and environmental exposure to cadmium in women: A population study. **Environmental Health Perspectives**, 116(6), 777-783.
- Shukla, G. S., & Singhal, R. L. (1984). The present status of biological effects of toxic metals in the environment: Lead, cadmium, and manganese. **Canadian Journal of Physiology and Pharmacology**, 62(8), 1015-1031.
- Silwal, P., Nguyen-Thai, A. M., Mohammad, H. A., et al. (2023). Cellular senescence in intervertebral disc aging and degeneration: Molecular mechanisms and potential therapeutic opportunities. **Biomolecules**, 13(4), 686.
- Snuggs, J. W., Day, R. E., Bach, F. C., et al. (2019). Aquaporin expression in the human and canine intervertebral disc during maturation and degeneration. **JOR Spine**, 2(1), e1049.
- Sugisawa, N., Matsuoka, M., Okuno, T., & Igisu, H. (2004). Suppression of cadmium-induced JNK/p38 activation and HSP70 family gene expression by LL-Z1640-2 in NIH3T3 cells. **Toxicology and Applied Pharmacology**, 196(2), 206-214.
- Upenieks, A., Montgomery-Song, A., Santerre, J. P., & Kandel, R. A. (2022). Development of a perfusion reactor for intervertebral disk regeneration. **Tissue Engineering Part C: Methods**, 28(1), 12-22.

- Vakifahmetoğlu-Norberg, H., Ouchida, A. T., & Norberg, E. (2017). The role of mitochondria in metabolism and cell death. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, 482(3), 426-431.
- Veroutis, D., Kouroumalis, A., Lagopati, N., et al. (2021). Evaluation of senescent cells in intervertebral discs by lipofuscin staining. **Mechanisms of Ageing and Development**, 199, 111563.
- Vringer, E., & Tait, S. W. G. (2019). Mitochondria and inflammation: Cell death heats up. **Frontiers in Cell and Developmental Biology**, 7, 100.
- Wu, L., Wei, Q., Lv, Y., et al. (2019). Wnt/beta-catenin pathway is involved in cadmium-induced inhibition of osteoblast differentiation of bone marrow mesenchymal stem cells. **International Journal of Molecular Sciences**, 20(6), 1519-1535.
- Yang, L. W., Song, M., Li, Y. L., et al. (2019). L-Carnitine inhibits the senescence-associated secretory phenotype of aging adipose tissue by JNK/p53 pathway. **Biogerontology**, 20(2), 203-211.
- Yıldırım Doğan, N., Bulut, H (2020), Determination by molecular methods of dna damage caused by heavy metals in grains, *Fresenius Environmental Bulletin*, Volume 29/4, pp 2005-2014
- Zhang, S., Hu, B., Liu, W., et al. (2021). The role of structure and function changes of sensory nervous system in intervertebral disc-related low back pain. **Osteoarthritis and Cartilage**, 29(1), 17-27.
- Zhang, X. B., Tang, N. M., Hadden, T. J., & Rishi, A. K. (2011). Akt, FoxO and regulation of apoptosis. **Biochimica et Biophysica Acta - Molecular Cell Research**, 1813(11), 1978-1986.
- Zhu, D., Wu, X., Zhou, J., et al. (2020). NuRD mediates mitochondrial stress-induced longevity via chromatin remodeling in response to acetyl-CoA level. **Science Advances**, 6(33), eabb2529-2540.

BÖLÜM 2

FLEKSÖR TENDON YARALANMALARI VE REHABİLİTASYONU

*Hazal YAKUT ÖZDEMİR¹ , Arda ÇAKIR² ,
Ezgi ÜNÜVAR YÜKSEL³*

¹ Doç. Dr., İzmir Demokrasi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, fzthazalyakut@outlook.com, ORCID: 0000-0003-4918-9249

² Fzt., İzmir Demokrasi Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Anabilim Dalı, ardacakir45@icloud.com

³ Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Demokrasi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, unuvarezgi@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1606-3180

1. GİRİŞ

Fleksör tendon yaralanmaları, elin fonksiyonel bütünlüğünü önemli ölçüde etkileyen ve tedavi ile rehabilitasyon sürecinde multidisipliner bir yaklaşım gerektiren kompleks klinik durumlardır. Fleksör tendonlar, ön kol kaslarının ürettiği kuvveti el bileği ve parmak eklemlerine aktararak kavrama, tutma ve ince motor aktiviteler için gerekli fleksiyon hareketlerini sağlar. Bu tendonların kesilmesi, kopması veya kemik yapışma yerinden ayrılması aktif fleksiyon kaybına ve elin fonksiyonel kullanımında belirgin kısıtlılıklara yol açabilmektedir. Fleksör tendon yaralanmalarına sıklıkla sinir, damar, kemik ve cilt yaralanmaları eşlik ettiğinden bu yaralanmalar yalnızca tendonu ilgilendiren basit travmalar olarak değil, kompleks el yaralanmalarının bir parçası olarak ele alınmalıdır (Stevens ve ark., 2023).

Fleksör tendon yaralanmalarının klinik önemi yalnızca aktif hareket kaybından kaynaklanmamaktadır. Onarım sonrasında gelişebilen adezyonlar, eklem kontraktürleri ve tendon rüptürü gibi komplikasyonlar fonksiyonel iyileşmeyi olumsuz etkileyebilmektedir (Stevens ve ark., 2023). İyileşme sürecinde tendonun mekanik dayanıklılığının artması ile çevre dokulara yapışması arasında klinik açıdan önemli bir denge bulunmaktadır. Erken kontrollü hareket intrinsik iyileşmeyi destekleyip kısıtlayıcı adezyonları azaltırken immobilizasyonla görülen onarım gücü kaybını da önlemektedir (Mujadzić ve ark., 2005). Öte yandan onarımın henüz yeterince güçlenmediği dönemde aşırı yüklenme, onarım hattında boşluk (gap) oluşumuna veya rüptüre yol açabilmektedir (Skirven ve DeTullio, 2023). Bu nedenle başarılı bir cerrahi onarım tek başına yeterli değildir; cerrahi sonrasında uygulanan kontrollü rehabilitasyon programı tedavinin temel bileşenlerinden biridir.

Günümüzde fleksör tendon rehabilitasyonunun temel yaklaşımı, tendon onarımını korurken kontrollü hareketi mümkün olan en uygun zamanda başlatmaktır. Zon I fleksör digitorum profundus (FDP) yaralanmalarını inceleyen randomize kontrollü bir çalışmada, erken aktif hareketin adezyon oluşumunun önlenmesi ve fonksiyonel iyileşmenin desteklenmesi açısından önemli olduğu, ancak onarım hattına ek mekanik stres bindirerek boşluk oluşumu ve rüptür riskini artırabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle rehabilitasyonun belirli bir zaman çizelgesine bağlı kalmak yerine tendon iyileşmesinin durumu, adezyon varlığı ve hastanın klinik ilerlemesi dikkate alınarak bireyselleştirilmesi önerilmektedir (Zhu ve ark., 2023). Bu bölümde fleksör tendon yaralanmalarının epidemiyolojisi, yaralanma mekanizmaları, anatomisi, iyileşme süreci, klinik değerlendirmesi, komplikasyonları ve postoperatif rehabilitasyon protokolleri ele alınmaktadır.

2. EPİDEMİYOLOJİ VE YARALANMA MEKANİZMALARI

El yaralanmaları acil servis başvurularının yaklaşık %20'sini oluşturmakta ve tendon yaralanmalarının insidansının 100.000 kişide yaklaşık 30–42 olduğu tahmin edilmektedir. Fleksör tendon yaralanmaları en sık 20–45 yaş arasındaki çalışan genç erkeklerde görölmekte ve dominant el daha sık etkilenmektedir. Sanayileşmiş ölkelerde iş kazaları başlıca nedenler arasında yer alırken, daha düşük sosyoekonomik düzeydeki bölgelerde kavga sırasında oluşan bıçak ve cam kesileri ön plana çıkmaktadır. Yaralanmalar en sık Zon II–V'te ve özellikle işaret ile küçük parmakta görölmektedir (Stevens ve ark., 2023). Yaralanma mekanizması; tendon hasarının niteliğini, evre dokuların etkilenme düzeyini, cerrahi onarımın özelliklerini ve postoperatif rehabilitasyonun planlanmasını doğrudan etkilediğinden ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir.

2.1. Laserasyonlar

Laserasyonlar, fleksör tendon yaralanmalarının en sık görölen mekanizmasıdır. Bıçak, cam veya metal gibi kesici cisimlerin elin palmar yüzünde oluşturduğu travmalar tendon bütönlüğünü kısmen veya tamamen bozabilmektedir (Stevens ve ark., 2023). Travmanın lokalizasyonuna ve derinliğine bağlı olarak dijital sinirler ve damarlar da etkilenebileceğinden değerlendirme, aktif fleksiyon kaybının belirlenmesiyle sınırlı kalmamalı ve nörovasküler yapıları da kapsamalıdır. Kesici yaralanmalarda tendon uçlarının düzgün olması anatomik devamlılığın cerrahi olarak yeniden sağlanması için olanak tanır; ancak onarım bölgesinde oluşan boşluk tendon kaymasını ve son hareket açıklığını olumsuz etkilediğinden onarımın hem mekanik olarak güçlü olması hem de kaymaya mümkün olduğunca az engel oluşturması gerekir (Mujadzić ve ark., 2005).

2.2. Avulsiyon ve Aşırı Gerilme Yaralanmaları

Avulsiyon yaralanmaları, tendonun kemiğe yapışma yerinden ayrılmasıyla oluşan yaralanmalardır. Fleksör tendonlar arasında özellikle FDP tendonunun distal falankstaki yapışma yerinden avulsiyonu karakteristik bir klinik tablo oluşturur ve literatürde jersey parmak (jersey finger) olarak tanımlanmaktadır. Bu yaralanma, FDP maksimal kasılma hâlindeyken parmağın zorlu biçimde ekstansiyona getirilmesiyle oluşmakta; en sık temas sporlarıyla uğraşan genç erkeklerde ve yüzük parmağında görölmektedir (Ay ve ark., 2012; Stevens ve ark., 2023). Tendonun geri çekildiği düzeye ve vinkulaların durumuna göre farklı tipleri tanımlanan bu yaralanmalarda mekanizmanın doğru belirlenmesi, erken tanı ve uygun tedavi açısından önemlidir (Ay ve ark., 2012; Ceylan ve Kuzu, 2023).

2.3. Ezilme ve Kombine Yaralanmalar

Ezilme (crush) yaralanmaları genellikle endüstriyel pres kazaları gibi yüksek enerjili travmalar sonucunda ortaya çıkmakta ve tendonun yanı sıra sinovyal kılıfta, çevre yumuşak dokularda ve damarlarda da hasara yol açabilmektedir. Doku hasarının geniş olması, iyileşmede kılıf fibroblastlarının ve inflamatuvar hücrelerin rol aldığı ekstrinsik iyileşme mekanizmasını ön plana çıkarmaktadır. Ekstrinsik iyileşme adezyonların başlıca kaynağı olduğundan bu yaralanmalarda adezyon gelişme riski izole ve keskin laserasyonlara kıyasla daha yüksektir (Stevens ve ark., 2023).

3. FLEKSÖR TENDONLARIN ANATOMİSİ, PULLEY SİSTEMİ VE ZON SINIFLANDIRMASI

Parmak fleksiyonunda temel olarak fleksör digitorum superfisiyalis (FDS) ve FDP tendonları, başparmak fleksiyonunda ise fleksör pollisis longus (FPL) tendonu görev almaktadır. FDS orta falanksı yapışarak proksimal interfalangeal (PIP) eklemi, FDP ise distal falanksı yapışarak distal interfalangeal (DIP) eklemi fleksiyona getirir; FDP, DIP eklemine çaprazlayan tek fleksör tendondur (Stevens ve ark., 2023). Fleksör tendonlar metakarpofalangeal (MCP) eklem düzeyinden distal falanksı kadar fibro-osseöz bir kılıf içinde ilerler (Ay ve ark., 2012). Bu tendonların koordineli çalışması, kavrama, tutma ve günlük yaşam aktivitelerinde elin fonksiyonel kullanımının temelini oluşturmaktadır.

3.1. Pulley Sistemi

Parmaklardaki pulley (makara) sistemi beş anüler (A1–A5) ve üç krusiform (C1–C3) pulleyden oluşmaktadır; A1, A3 ve A5 pulleyleri sırasıyla MCP, PIP ve DIP eklemleri düzeyinde yer alır. Bu yapılar fleksör tendonları falankslara yakın tutarak tendon ile eklem arasındaki uygun moment kolunu korur ve kas kuvvetinin parmak fleksiyonuna etkin biçimde aktarılmasını sağlar. A2 ve A4 pulleyleri normal fonksiyon için en kritik yapılardır; bu pulleylerin hasarında tendon kemikten uzaklaşarak yay kirişi (bowstringing) adı verilen duruma yol açar ve parmağın fleksiyon mekaniği bozulur (Ay ve ark., 2012; Stevens ve ark., 2023). Başparmakta ise iki anüler ve bir oblik pulley bulunmakta ve oblik pulley hasarı FPL tendonunda yay kirişi oluşumuna neden olabilmektedir (Stevens ve ark., 2023). Pulley sisteminde oluşan hasar veya onarım sonrasında gelişen mekanik kısıtlılıklar tendon kaymasını azaltarak parmak hareketlerinin yeniden kazanılmasını güçleştirebileceğinden, değerlendirmede yaralanmanın pulley sistemine etkisi de dikkate alınmalıdır.

3.2. Anatomik Zon Sınıflandırması

Fleksör tendon yaralanmaları, tendonun anatomik konumuna göre zonlara ayrılarak değerlendirilmektedir. Bu sınıflandırma, yaralanmanın tanımlanmasının yanı sıra cerrahi yaklaşımın ve postoperatif rehabilitasyon programının belirlenmesinde de önem taşımaktadır. Parmaklar için beş, başparmak için ise ayrı bir zon sistemi tanımlanmıştır (Stevens ve ark., 2023).

Zon I: FDS tendonunun yapışma yerinin distalinde kalan ve yalnızca FDP tendonunun bulunduğu bölgedir. Bu bölgedeki yaralanmalar FDP tendonunun distal falanksa olan bağlantısını bozarak DIP ekleminde aktif fleksiyon kaybına yol açar; bu durum özellikle parmak ucuyla yapılan kavrama aktivitelerinde fonksiyon kaybına neden olur (Stevens ve ark., 2023).

Zon II: A1 pulleyden FDS yapışma yerine kadar uzanan ve FDS ile FDP tendonlarının aynı sinovyal kılıf içinde ilerlediği bölgedir. Bu bölge tarihsel olarak “no man's land” (sahipsiz bölge) olarak adlandırılmış (Stevens ve ark., 2023), ancak cerrahi ve rehabilitasyon yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte bu kavramın geçerliliğini yitirdiği belirtilmektedir (Ay ve ark., 2012). İki tendonun dar bir kılıf içinde birlikte bulunması, cerrahi sonrasında oluşan adezyonların tendon kaymasını kısıtlama olasılığını artırmaktadır. Bu nedenle bu bölgede cerrahi ve rehabilitasyonun temel amacı, onarımın mekanik bütünlüğünü korurken tendonların kılıf içinde kontrollü biçimde kaymasını sağlamaktır (Mujadzić ve ark., 2005).

Zon III–V: Zon III, karpal tünelin distal kenarı ile A1 pulley arasında kalan ve lumbrikal kasların FDP tendonlarından köken aldığı bölgedir. Zon IV karpal tünel içindeki, Zon V ise karpal tünelin proksimalindeki bölgeyi kapsamaktadır (Stevens ve ark., 2023). Bu bölgelerde tendon yaralanmalarına sıklıkla median ve ulnar sinir ile damar yaralanmaları eşlik ettiğinden duyu, dolaşım ve motor fonksiyonlar da ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir. Sinovyal kılıf dışında kalan bu tendonlar daha iyi vaskülarize olduğundan iyileşme potansiyelleri yüksektir (Stevens ve ark., 2023); bununla birlikte bu bölgelerde de adezyon gelişebilmekte ve adezyonu önlemeye yönelik yöntemler araştırılmaktadır (Lee ve ark., 2022).

Başparmak: Başparmakta T1 (IP eklemin distali), T2 (A1 pulley ile IP eklem arası), T3 (tenar bölge), T4 (karpal tünel) ve T5 (karpal tünelin proksimali) olmak üzere ayrı bir zon sınıflandırması kullanılmaktadır (Stevens ve ark., 2023).

4. TENDON BESLENMESİ VE İYİLEŞMESİ

Fleksör tendonların beslenmesi iki yolla gerçekleşmektedir. Vasküler perfüzyon, tendona kılıf içinde vinkula adı verilen mezotenon benzeri yapılar aracılığıyla ulaşan damarlarla sağlanırken sinovyal kılıf içindeki sıvı da difüzyon yoluyla tendonun beslenmesine katkıda bulunmaktadır (Ay ve ark., 2012; Mujadzić ve ark., 2005). Kılıf içindeki tendonların vaskülaritesi görece düşük olduğundan bu tendonlarda inflamatuvar ve metabolik yanıt da sınırlıdır (Stevens ve ark., 2023). Vinkulaların korunması, özellikle FDP avulsiyonlarında tendonun beslenmesi açısından önem taşımaktadır (Ay ve ark., 2012).

Tendon onarımı hemostaz, inflamasyon, proliferasyon ve yeniden şekillenme (remodelizasyon) evreleri üzerinden ilerlemektedir. İyileşmenin erken döneminde tip III kolajen baskınken, ilerleyen dönemde daha dayanıklı olan tip I kolajen ön plana çıkar ve kolajen liflerinin organizasyonu artar. İyileşme, tendon içindeki tenositlerin rol aldığı intrinsik ve kılıf fibroblastları ile inflamatuvar hücrelerin rol aldığı ekstrinsik mekanizmalar aracılığıyla gerçekleşir; ekstrinsik iyileşme adezyonların başlıca kaynağıdır. İmmobilize edilen onarımlar zamanla güç kaybederken mobilize edilen onarımların gücü 4. ile 6. haftalar arasında yaklaşık iki katına çıkmaktadır (Stevens ve ark., 2023). Tam iyileşme ve sportif aktivitelere dönüş ise 4–6 ayı bulabilmektedir (Ay ve ark., 2012).

5. KLİNİK DEĞERLENDİRME

Rehabilitasyon programının güvenli ve etkili biçimde planlanabilmesi için kapsamlı bir klinik değerlendirme gerekmektedir. Değerlendirme; ağrı, ödem, skar dokusu, eklem hareket açıklığı, tendon kayması, duyu, kas kuvveti, el becerisi ve günlük yaşam aktivitelerindeki fonksiyonel durumu birlikte ele almalıdır. El problemlerinde kullanılacak değerlendirme araçlarına ilişkin Avrupa uzlaşısı çalışmasında da vücut fonksiyonu ve aktivite kısıtlılıklarının birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir (van de Ven-Stevens ve ark., 2015).

5.1. Anamnez, Gözlem ve Palpasyon

Anamnezde hastanın yaşı, dominant eli, yaralanan parmak sayısı, yaralanmanın zonu ve mekanizması, cerrahi tarihi ve tekniği, yaralanma ile cerrahi arasında geçen süre ve eşlik eden yaralanmalar kaydedilmelidir. Hastanın yaralanma öncesindeki fonksiyonel düzeyi ve mesleki gereksinimleri, özellikle manuel işlerde çalışan bireylerde işe dönüş hedeflerinin belirlenmesine yardımcı olur. Gözlemde elin genel görünümü, yara bölgesi, skar dokusu, renk değişiklikleri ve parmakların istirahat pozisyonu; palpasyonda ise onarım bölgesindeki hassasiyet ve skarın derin dokular üzerindeki hareketliliği değerlendirilir. Postoperatif dönemde

süregelen ödem eklem hareketini ve tendon kaymasını kısıtlayabileceğinden ödem, parmak çevre ölçümleri veya su yer değiştirme (volümetri) yöntemiyle rehabilitasyon süreci boyunca izlenmelidir. Ödem veya sertlik bulunan hastalarda aktif egzersizlerden önce pasif egzersizlerle doku direncinin azaltılması önerilmektedir (Skirven ve DeTullio, 2023).

5.2. Eklem Hareket Açıklığı ve Tendon Kaymasının Değerlendirilmesi

Aktif ve pasif hareket açıklığı arasındaki fark, tendon kayması ve eklem çevresindeki yumuşak dokuların durumu hakkında bilgi sağlar; aktif hareketin pasif harekete kıyasla belirgin biçimde sınırlı olması tendon adezyonunu düşündürmelidir (Stevens ve ark., 2023). Fleksör tendon yaralanmalarında sık kullanılan sonuç ölçütlerinden biri, MCP, PIP ve DIP eklemlerindeki aktif fleksiyon değerlerinin toplamından ekstansiyon kayıplarının çıkarılmasıyla hesaplanan toplam aktif hareket (total active motion, TAM) değeridir.

Zon II yaralanmalarında sonuçların değerlendirilmesinde Strickland-Glogovac sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde PIP ve DIP eklemlerinin aktif fleksiyonları toplamından ekstansiyon kayıpları çıkarılarak elde edilen değer, normal kabul edilen 175°'ye oranlanır ve yüzde olarak ifade edilir. Elde edilen değer %85–100 için mükemmel, %70–84 için iyi, %50–69 için orta ve %50'nin altı için kötü sonuç olarak sınıflandırılmaktadır (Strickland ve Glogovac, 1980).

Tendonların birbirinden bağımsız kayma kapasitesi farklı yumruk pozisyonlarında incelenebilir. Kanca yumruk (hook fist) FDS ile FDP arasında en fazla diferansiyel kaymayı, tam yumruk (full fist) en fazla FDP kaymasını, düz yumruk (straight fist) ise en fazla FDS kaymasını gerektirmektedir (Skirven ve DeTullio, 2023). Bu pozisyonlarda aktif ve pasif hareket arasındaki farkın incelenmesi, olası adezyonların lokalizasyonu hakkında bilgi verir.

5.3. Duyu, Kas Kuvveti ve El Fonksiyonunun Değerlendirilmesi

Fleksör tendon yaralanmalarına, özellikle kesici travmalarda ve Zon III–V yaralanmalarında, sinir yaralanmaları eşlik edebildiğinden duyuşal değerlendirme klinik muayenenin bir parçasıdır. El problemlerinde duyunun değerlendirilmesinde Semmes-Weinstein monofilament testi, kas kuvvetinin değerlendirilmesinde Jamar dinamometresi ve pinçmetre, eklem hareket açıklığının ölçümünde gonyometre, el becerisinin değerlendirilmesinde Dokuz Delikli Peg Testi veya Purdue Pegboard Testi, aktivite kısıtlılıklarının değerlendirilmesinde ise Kol, Omuz ve El Sorunları Anketi (DASH) gibi araçlar önerilmektedir (van de Ven-Stevens ve ark., 2015). Klinikte statik ve dinamik iki nokta ayrımı, Jebsen-Taylor El Fonksiyon Testi, Minnesota El Beceri Testi ve Sollerman El Fonksiyon Testi de kullanılan diğer değerlendirme araçlarıdır.

Dirençli kuvvet testleri, onarımın yeterli dayanıklılığa ulaştığı ileri dönemlere kadar ertelenmelidir.

6. FLEKSÖR TENDON ONARIMI SONRASI KOMPLİKASYONLAR

Tendon Rüptürü: Onarım hattında devamlılığın bozulması, tendonun kuvvet iletimini ortadan kaldırarak parmak fleksiyonunda yeniden belirgin bir fonksiyon kaybına yol açmaktadır. Rüptür, onarımların yaklaşık %5'inde görülmekte ve en sık FPL tendonunda ortaya çıkmaktadır; iki geçişli (two-strand) onarımlarda rüptür oranının %11,7'ye ulaştığı bildirilmektedir (Stevens ve ark., 2023). Onarım hattının dayanıklılığını aşan egzersizler ve kullanım rüptür veya boşluk oluşumu riskini artırırken (Skirven ve DeTullio, 2023), uzun süreli immobilizasyon da fonksiyonel sonuçları olumsuz etkileyebileceğinden bu iki risk arasında uygun bir denge kurulmalıdır.

Adezyon Oluşumu: Tendon ile çevre dokular arasında oluşan fibröz bağlantılar, tendonun serbestçe kaymasını engelleyerek pasif hareket açıklığı korunurken aktif hareket açıklığında belirgin kayba yol açabilir. Adezyonlar olguların %12–47'sinde tenolizis gerektirmekte; tenolizis ise ancak 3–6 aylık rehabilitasyona karşın aktif hareket pasif hareketin belirgin biçimde gerisinde kaldığında düşünülmektedir (Stevens ve ark., 2023). Adezyon oluşumu tamamen önlenemese de cerrahi travmanın en aza indirilmesi, güçlü bir onarım yapılması ve kontrollü mobilizasyonun uygun zamanda başlatılmasıyla fonksiyonel etkisi sınırlandırılabilir (Mujadzić ve ark., 2005).

Eklem Kontraktürleri: Uzun süreli immobilizasyon, ödem, ağrı, adezyonlar ve eklem çevresindeki yumuşak doku değişiklikleri eklem hareket açıklığının azalmasına neden olabilir. Kontraktürlerin onarımların yaklaşık %17'sinde geliştiği ve önlenmesinde splint kullanımının temel yöntem olduğu bildirilmektedir (Stevens ve ark., 2023).

Quadrige Etkisi: İşaret, orta, yüzük ve küçük parmaklara giden FDP tendonları birbirine sıkı biçimde bağlı olduğundan, FDS tendonlarına kıyasla daha az bağımsız hareket edebilmektedir. Bu durum genellikle FDP'nin ortak kas karnına bağlanmakla birlikte, tendonlar arasındaki bağlantıların daha belirleyici olduğu vurgulanmaktadır. Bir FDP tendonunun onarım sırasında aşırı kısaltılması veya ilerletilmesi bu birlikte hareket nedeniyle komşu parmakların fleksiyonunu da sınırlayabilmektedir. Quadrige fenomeni, kuvvet testlerinde, tendon kaymasının değerlendirilmesinde ve tendon yaralanması sonrasında egzersiz seçiminde dikkate alınmalıdır (Schreuders, 2012).

Lumbrikal Plus Deformitesi: FDP tendonunun distal yapışma yerine etkisinin azaldığı durumlarda, örneğin lumbrikal kasın orijininin distalindeki kopma veya aşırı uzun bırakılan bir onarım sonrasında, fleksör kuvvet lumbrikal kas üzerinden iletilir. Bunun sonucunda hasta parmağını fleksiyona getirmeye çalıştığında IP eklemlerde paradoksal ekstansiyon ortaya çıkar (Stevens ve ark., 2023).

7. POSTOPERATİF REHABİLİTASYONUN TEMEL İLKELERİ

Postoperatif rehabilitasyonun temel amaçları; tendon onarımını korumak, tendon iyileşmesini optimize etmek, adezyon gelişimini sınırlandırmak, eklem hareket açıklığını ve tendon kaymasını korumak, ağrı ve ödemi kontrol etmek, kas kuvvetini ve dayanıklılığı yeniden kazandırmak ve hastanın günlük yaşam aktivitelerine ve işe dönüşünü desteklemektir. Bu amaçlara ulaşılabilmesi için cerrah ile fizyoterapist arasında yakın iletişim kurulması ve onarımın tipi, gücü ve eşlik eden yaralanmalar hakkında bilgi paylaşılması kritik önem taşımaktadır. Erken hareket programları, talimatları izleyebilen, tedaviye düzenli olarak katılan ve ev programına ve önlemlere uyan hastalar gerektirdiğinden hasta eğitimi rehabilitasyonun ayrılmaz bir parçasıdır (Skirven ve DeTullio, 2023).

7.1. Fleksiyon İş ve Kontrollü Yüklenme

Fleksiyon işi (work of flexion), onarılmış tendonun parmağı fleksiyona getirebilmesi için harcaması gereken eforu ifade etmektedir. Sürtünme, adezyonlar, ödem, eklem sertliği ve antagonist kasların direnci fleksiyon işini artıran başlıca faktörlerdir. Rehabilitasyonda uygulanan hareketin tendonu kaydırabilmek için fleksiyon işini aşması gerekir; ancak onarım hattının dayanıklılığını aşan direnç, boşluk oluşumuna veya rüptüre yol açabilir. Köpek modelinde fleksiyon işinin postoperatif 5. günde en düşük düzeyde olduğu, hareketin 3 günlük immobilizasyonun ardından başlatılmasının ise fleksiyon işindeki artışı en aza indirdiği gösterilmiştir; birçok erken hareket programının postoperatif 3–5. günlerde başlatılmasının gerekçelerinden biri budur (Skirven ve DeTullio, 2023). Klinik uygulamada fleksiyon işini azaltmak amacıyla ödem kontrolü sağlanmakta, eklemler aktif egzersizden önce pasif olarak gevşetilmekte ve aktif fleksiyon el bileğinin tenodesis etkisinden yararlanılan pozisyonlarda uygulanmaktadır.

7.2. Rehabilitasyonun Evreleri

Koruma Evresi (0–4. Haftalar): Bu dönemde onarımın gücü büyük ölçüde sütür materyalinin gücüne bağlıdır ve yeni oluşan skar dokusu zayıf olduğundan kolayca bozulabilir. Bu nedenle uygulanan tüm hareketler onarımın gerilme sınırları içinde kalmalıdır (Skirven ve DeTullio,

2023). Dorsal bloklu ortez, el bileği ile parmakların aynı anda ekstansiyona gelmesini engelleyerek onarım hattını korur. Ödem kontrolü, uzak eklemlerin hareket açıklığının korunması ve seçilen protokole uygun kontrollü pasif ve/veya aktif egzersizler bu evrenin temel bileşenleridir.

Geçiş Evresi (4–6. Haftalar): Skar dokusu olgunlaştıkça onarımın gücü artmakta ve tendona uygulanan yük dikkatli biçimde artırılabilir. Bu dönemde tendonun aktif kayma miktarı adezyonların yaygınlığı hakkında fikir verir: Kaymanın iyi olması daha az adezyonu, ancak görece daha yüksek rüptür riskini; kaymanın kısıtlı olması ise daha yoğun adezyonu ve yüklenmenin daha erken artırılabilirliğini düşündürür (Skirven ve DeTullio, 2023). Tendon kaydırma ve bloklama egzersizleri bu evrede programa eklenir; ortez kullanımı kademeli olarak azaltılır.

Tam Mobilizasyon Evresi (6. Haftadan İtibaren): Gerilme dayanıklılığı arttıkça hareket ve yüklenme kademeli olarak artırılır (Skirven ve DeTullio, 2023). Ortez genellikle bu dönemde bırakılır; dirençli egzersizlere, kavrama kuvvetinin geliştirilmesine ve fonksiyonel aktivitelere geçilir. PIP ekleminde fleksiyon kontraktürü gelişen hastalarda, MCP eklemi tam fleksiyonda tutulurken PIP ekstansiyonuna yönelik egzersizler önce ortez içinde, ardından ortez dışında uygulanmalıdır (Skirven ve DeTullio, 2023).

7.3. Egzersiz Progresyonu

Tendona binen yükün kontrollü biçimde artırılmasında Groth tarafından tanımlanan kuvvet piramidi yol gösterici bir model olarak kullanılmaktadır. Bu modelde egzersizler, tendona en az yük bindiren korumalı pasif ekstansiyon ve Place and Hold egzersizlerinden başlayarak aktif kompozit yumruk, kanca ve düz yumruk, bloklama ile izole eklem hareketi, dirençli kompozit yumruk, dirençli kanca ve düz yumruk ve son olarak dirençli izole eklem hareketi şeklinde ilerlemektedir. Bir üst basamağa ancak mevcut basamakta yeterli tendon kayması sağlanamadığında geçilmesi önerilmektedir; böylece tendona yalnızca kayma için gerekli olan en düşük yük uygulanmış olur (Groth, 2004, akt. Skirven ve DeTullio, 2023).

Programda kullanılan başlıca egzersizler şunlardır:

- **Tendon kaydırma egzersizleri:** Kanca yumruk FDS ile FDP arasında en fazla diferansiyel kaymayı, tam yumruk en fazla FDP kaymasını, düz yumruk ise en fazla FDS kaymasını sağlar; masa pozisyonu (tabletop) da bu egzersizler arasında yer alır (Skirven ve DeTullio, 2023).

- **Bloklama egzersizleri:** Proksimal falanksın stabilize edilmesiyle MCP eklemi bloke edilerek PIP ve DIP eklemlerinde izole hareket ve diferansiyel kayma sağlanır. PIP ekleminin bloke edilmesi ise izole DIP hareketine ve FDP kaymasına olanak tanır (Skirven ve DeTullio, 2023).
- **İzole FDS kaydırma egzersizi:** Komşu parmaklar ekstansiyonda tutulurken etkilenen parmağın PIP eklemi aktif olarak fleksiyona getirilir (Skirven ve DeTullio, 2023).
- **El bileği tenodez egzersizi:** El bileği ekstansiyonunda parmaklar pasif olarak fleksiyona, el bileği fleksiyonunda ise ekstansiyona gelir. Bu hareket, onarım hattını zorlamadan tendonun proksimal ve distal yönde kaymasını sağlar (Skirven ve DeTullio, 2023).
- **Dirençli egzersizler:** Kademeli olarak sertleşen terapi macunlarıyla kompozit yumruk, ardından kanca ve düz yumruk ve en son izole eklem hareketleri dirence karşı çalıştırılır (Skirven ve DeTullio, 2023).

8. POSTOPERATİF REHABİLİTASYON PROTOKOLLERİ

Postoperatif rehabilitasyon yaklaşımları, ilk hayvan çalışmalarına dayanan ve onarılan tendonun aktif kaymaya izin verilmeden önce yaklaşık 3 hafta immobilize edildiği uygulamalardan kontrollü pasif ve erken aktif mobilizasyon programlarına doğru gelişmiştir (Skirven ve DeTullio, 2023). Günümüzde erken kontrollü mobilizasyon standart yaklaşım hâline gelmiştir (Stevens ve ark., 2023). Protokol seçiminde onarımın mekanik gücü, yaralanmanın zonu, eşlik eden doku hasarı, cerrahi tekniğin özellikleri ve hastanın rehabilitasyona uyumu dikkate alınmalıdır. Fleksör tendon rehabilitasyon protokolleri temel olarak immobilizasyon, erken pasif mobilizasyon (Duran-Houser, Kleinert ve Washington) ve erken aktif mobilizasyon (Belfast, Silfverskiöld-May, Strickland-Indiana, Saint John, Manchester ve Nantong) protokolleri olarak sınıflandırılmaktadır. Place and Hold egzersizi ise pasif yerleştirme ile aktif tutmayı birleştirdiğinden pasif ve aktif yaklaşımlar arasında bir geçiş yöntemi olarak da değerlendirilmektedir. Başlıca protokollerin özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1

Başlıca Fleksör Tendon Rehabilitasyon Protokollerinin Karşılaştırılması

Protokol	Başlangıç	Ortez pozisyonu	Temel egzersiz	İlerleme
İmmobilizasyon	—	Dorsal bloklu ortez	İlk 3 hafta hareket yok	3. haftadan sonra aktif kayma
Duran (pasif)	Erken postoperatif dönem	Dorsal bloklu ortez	Kontrollü pasif DIP ve PIP ekstansiyonu	4,5. hafta
Kleinert (pasif)	İlk 24 saat	Dorsal bloklu ortez + elastik traksiyon	Aktif ekstansiyon, elastikle pasif fleksiyon	4. hafta
Silfverskiöld-May	Erken postoperatif dönem	El bileği nötral, MCP 60° fleksiyon	Aktif ekstansiyon, pasif fleksiyon, yardımcı tutma	4. haftadan sonra desteksiz aktif hareket
Strickland-Indiana	Erken postoperatif dönem	Statik ortez + tenodez ortezi (el bileği 30° ekstansiyona kadar, MCP 45–60° fleksiyon)	Tenodez eşliğinde Place and Hold	4–6. hafta
Saint John	3–5. gün	El bileği 45° ekstansiyon, MCP 30° fleksiyon, IP tam ekstansiyon	Yumruğun 1/3–1/2'sine kadar aktif fleksiyon	6. haftada tam yumruk, ortez bırakılır
Manchester	4–5. gün	Kısa ortez, MCP 30° fleksiyon blok	Pasif IP egzersizleri, ortez içinde aktif fleksiyon	Ortez 6. haftaya kadar
Nantong	4–6. gün	El bileği nötral	Pasif egzersiz sonrası kısmi aktif fleksiyon	4–5. haftada tam aktif fleksiyon

Not. MCP: metakarpofalangeal; IP: interfalangeal; DIP: distal interfalangeal; PIP: proksimal interfalangeal. Skirven ve DeTullio (2023) verilerinden derlenmiştir.

8.1. İmmobilizasyon Protokolü

Bu yaklaşımda ilk 3 hafta boyunca aktif veya pasif hareket uygulanmaz. İmmobilizasyon; çocuklarda, erken hareket programlarına uyum sağlayamayacak hastalarda ve erken hareketi engelleyen eşlik eden yaralanmaların varlığında tercih edilmektedir (Skirven ve DeTullio, 2023). Zayıf veya güvensiz tendon onarımları ve gecikmiş onarımlar da olası endikasyonlar arasında yer almaktadır. Uzun süreli immobilizasyon adezyon ve eklem sertliğine yol açabileceğinden süresi hastanın klinik durumuna göre belirlenmelidir.

- **Erken dönem (0–3. haftalar):** El bileğinin yaklaşık 20–30° fleksiyonda, MCP eklemlerinin 40–60° fleksiyonda ve IP eklemlerin ekstansiyonda tutulduğu dorsal bloklu ortez kullanılır. Gerekli durumlarda ortez gün boyunca çıkarılmaz. Ağrı ve ödem kontrolü sağlanır, omuz ve dirsek gibi uzak eklemlerin hareket açıklığı korunur.
- **Orta dönem (3–6. haftalar):** Ortez pozisyonu kademeli olarak değiştirilir; kontrollü aktif fleksiyon, aktif tenodez ve pasif tendon kaydırma egzersizleri programa eklenir.

Henüz yeterli dayanıklılığa ulaşmamış onarımda dirençli egzersizlerden ve ani ekstansiyon hareketlerinden kaçınılır.

- **Geç dönem (6–12. haftalar):** Ortez kullanımı azaltılır. Fleksör tendonlarda kısıklık varsa gece palmar ekstansiyon ortezi, PIP fleksiyon kontraktürü varsa uygun parmak ortezleri kullanılabilir. Bloklama ve aktif tendon kaydırma egzersizleriyle FDS ve FDP tendonlarının bağımsız kayması geliştirilir. 6–8. haftalarda sürekli kavrama ve germe egzersizlerine, yaklaşık 8. haftada dirençli egzersizlere geçilir; 10–12. haftalarda işe ve sportif aktivitelere dönüş hedeflenir (Berköz ve Altaş, 2021).

8.2. Erken Pasif Mobilizasyon Protokolleri

Erken pasif mobilizasyon yaklaşımlarında aktif kas kasılmasının oluşturabileceği mekanik yük azaltılırken pasif hareket yoluyla tendon kaymasının korunması ve adezyonların sınırlandırılması hedeflenmektedir. Erken pasif hareketin intrinsik iyileşmeyi desteklediği, kısıtlayıcı adezyonları azalttığı ve immobilizasyonla görülen onarım gücü kaybını önlediği bildirilmektedir (Mujadzić ve ark., 2005).

8.2.1. Modifiye Duran Protokolü

Duran ve Houser tarafından 1975 yılında tanımlanan program, Zon II onarımlarında FDS ile FDP arasında yapışma gelişmesini önlemek amacıyla geliştirilmiştir. Programda PIP ve MCP eklemleri fleksiyondayken DIP ekleminin pasif ekstansiyonu, FDP sütür hattını FDS sütür hattından uzaklaştırır; MCP ve DIP eklemleri fleksiyondayken PIP ekleminin pasif ekstansiyonu ise her iki sütür hattını yaralanma bölgesinden uzaklaştırır. Program yaklaşık 4,5. haftada ilerletilir (Skirven ve DeTullio, 2023). Kontrollü pasif hareketle sağlanan birkaç milimetrelik tendon kaymasının sıkı adezyonların oluşumunu önlemeye yeterli olduğu bildirilmektedir (Mujadzić ve ark., 2005). Yaklaşım daha sonra Strickland tarafından modifiye edilmiştir. Modifiye Duran protokolünün evreleri aşağıda özetlenmiştir (Büyükturan ve ark., 2018):

- **0–4. haftalar:** El bileği yaklaşık 20°, MCP eklemleri yaklaşık 50° fleksiyonda dorsal bloklu ortez kullanılır. Postoperatif üçüncü günden itibaren saat başı 10–15 tekrar olacak şekilde DIP, PIP ve kombine DIP+PIP+MCP eklemlerine pasif fleksiyon ve ekstansiyon egzersizleri uygulanır. Etkilenmemiş parmakların pasif hareket açıklığı egzersizleri de programa dahil edilir.

- **4–6. haftalar:** Ortez kademeli olarak bırakılır. Aktif fleksiyonun başlangıcı olarak Place and Hold egzersizine geçilir; parmaklar fleksiyundayken el bileğinin aktif fleksiyonu, ardından el bileği ve parmakların kontrollü aktif ekstansiyonu uygulanır.
- **6–8. haftalar:** Tam aktif fleksiyon, bloklama ve tendon kaydırma egzersizleri programa eklenir; amaç tendonun bağımsız kayma kapasitesini artırmak ve parmak hareketlerinin fonksiyonel kullanımını geliştirmektir.
- **8. hafta ve sonrası:** Tendon iyileşmesinin ilerlemesine bağlı olarak dirençli egzersizlere başlanır ve günlük yaşam aktivitelerine dönüş hedeflenir.

8.2.2. Kleinert Protokolü

1977 yılında tanımlanan ve ilk 24 saat içinde başlatılan bu programda, etkilenen ve komşu parmakların tırnağına uygulanan elastik traksiyonla parmaklar pasif olarak fleksiyona getirilirken hasta dorsal bloklu ortez içinde dirence karşı aktif ekstansiyon yapar (Skirven ve DeTullio, 2023). Ekstansör kasların aktif kasılması sırasında fleksörlerin resiprokal inhibisyonu onarım hattındaki gerilimi azaltır; elastik traksiyonla parmak fleksiyona geldiğinde tendon proksimale, aktif ekstansiyonda ise distale kayar. Böylece tendonun iki yönlü kontrollü hareketiyle bir tür piston etkisi oluşturulması amaçlanır. Orijinal programın zayıf DIP fleksiyonu ve PIP fleksiyon kontraktürü gibi önemli sorunlara yol açtığı bildirilmiştir (Mujadzić ve ark., 2005). Kontraktür gelişimini önlemek amacıyla elastik traksiyon geceleri serbest bırakılarak parmaklar ekstansiyonda sabitlenir. Program 4. haftadan itibaren aktif harekete doğru ilerletilir (Skirven ve DeTullio, 2023); elastik bant çıkarılarak Place and Hold ve sınırlı aktif fleksiyona, ardından aktif fleksiyon, tendon kaydırma ve bloklama egzersizlerine geçilir.

8.2.3. Washington Rejimi

Kleinert ve Duran programlarını birleştiren bu yaklaşımda, elastik traksiyonun avuç içindeki bir makara (palmar pulley) üzerinden yönlendirilmesiyle DIP fleksiyonu ve FDP kayması artırılmaktadır (Skirven ve DeTullio, 2023). Böylece orijinal Kleinert programında görülen zayıf DIP fleksiyonu sorununun giderilmesi hedeflenmektedir.

8.3. Erken Aktif Mobilizasyon Protokolleri

Erken aktif mobilizasyon, onarımın mekanik olarak yeterli olduğu durumlarda kontrollü aktif hareketin mümkün olduğunca erken başlatılmasına dayanmaktadır. Aktif programlar, aktif yüklenmeye dayanabilecek güçlü ve çok geçişli bir kor sütür ile periferik sütür içeren onarım gerektirmektedir (Skirven ve DeTullio, 2023). Kilitli dört-altı geçişli kor sütürler önerilmekte; iki geçişli onarımlar ise erken aktif hareket için yetersiz kabul edilmektedir (Stevens ve ark.,

2023). Düşük ödem ve eşlik eden doku hasarının minimal olması da erken aktif hareketin uygulanabilirliğini artırır. Bu ölçütler, erken aktif hareketin her hasta için standart bir yöntem olmadığını ve kararın onarımın özellikleri ile hastanın klinik durumuna göre verilmesi gerektiğini göstermektedir.

8.3.1. Place and Hold

Parmaklar terapist tarafından veya hastanın diğer eliyle pasif olarak fleksiyona getirilir ve hasta bu pozisyonu hafif bir kas kasılmasıyla aktif olarak korur (Mujadzić ve ark., 2005). Böylece tendon hareketini başlatmak için gereken yüksek başlangıç kuvveti pasif hareketle aşılmakta ve onarım hattına binen yük azaltılmaktadır. Uygulamada parmaklar pasif olarak fleksiyona alındıktan sonra pozisyon birkaç saniye aktif olarak korunur ve egzersiz gün içinde sık aralıklarla tekrarlanır. Zon I–II FDP onarımı yapılan hastaları kapsayan randomize kontrollü bir çalışmanın 5 yıllık sonuçlarında, Place and Hold ile pasif mobilizasyon uygulanan grupta aktif mobilizasyon grubuna kıyasla daha iyi hareket açıklığı ve hasta bildirimli fonksiyon sonuçları elde edildiğı, aktif grupta ise fleksiyon kontraktürünün zamanla arttığı bildirilmiştir (Chevalley ve ark., 2024).

8.3.2. Belfast Protokolü

Hastanın parmağını pasif bir başlangıç desteğı olmaksızın doğrudan aktif olarak fleksiyona getirdiğı kontrollü aktif hareket programıdır. Bu yaklaşımın malzeme açısından en düşük maliyetli ve kullanımı kolay seçenek olduğı, rüptür oranlarının ise Kleinert traksiyonu ile benzer olduğı bildirilmektedir (Mujadzić ve ark., 2005). Onarım hattına daha fazla aktif yük aktarıldığından egzersizin doğru teknikle uygulanması, hasta uyumu ve hareket açıklığı ile tekrar sayısının klinik duruma göre kontrol edilmesi önemlidir.

8.3.3. Silfverskiöld-May Protokolü

Bu programda el bileğı nötral pozisyonda, MCP eklemleri 60° fleksiyonda bloke eden dorsal bloklu orte z kullanılır. Hasta elastik traksiyona karşı aktif ekstansiyon yapar, ardından gevşeyerek parmakların pasif olarak fleksiyona gelmesine izin verir; parmaklar daha sonra elle distal palmar çizgiye kadar pasif olarak fleksiyona getirilir ve hasta bu pozisyonu yardımla aktif olarak korumaya çalışır. Desteksiz aktif fleksiyon ve ekstansiyona 4. haftadan sonra geçilir. Fleksiyon kontraktürünü önlemek amacıyla elastik traksiyon geceleri serbest bırakılarak parmaklar ekstansiyonda sabitlenir (Skirven ve DeTullio, 2023).

8.3.4. Strickland-Indiana Protokolü

Program, statik dorsal koruyucu ortezin yanı sıra Place and Hold egzersizleri sırasında kullanılan menteşeli bir el bileği ortezi (tenodez ortezi) içermektedir. Tenodez ortezi el bileğinin 30° ekstansiyona kadar hareket etmesine izin verirken MCP eklemlerini 45–60° fleksiyonda tutar. Hasta parmakları pasif olarak kompozit yumruk pozisyonuna getirir, el bileğini pasif olarak ekstansiyona alır ve yumruğu aktif olarak korur; ardından gevşeyerek el bileğinin fleksiyona düşmesine ve parmakların tenodez etkisiyle ekstansiyona açılmasına izin verir. Egzersizler 4–6. haftalarda ilerletilir (Skirven ve DeTullio, 2023).

8.3.5. Saint John ve Manchester Protokolleri

Saint John protokolünde egzersizlere postoperatif 3–5. günlerde başlanır. El bileğinin 45° ekstansiyonda, MCP eklemlerinin 30° fleksiyonda ve IP eklemlerin tam ekstansiyonda tutulduğu dorsal bloklu ortez içinde önce tüm parmaklara pasif hareket, ardından yumruğun üçte biri ile yarısına kadar gerçek aktif fleksiyon (kanca yumruk) uygulanır. 2–4. haftalarda ortez, el bileği hareketine izin veren kısa bir ortezle değiştirilerek sinerjik egzersizlere geçilir. Aktif hareket 6. haftaya kadar yarım yumruktan tam yumruğa ilerletilir ve ortez 6. haftada bırakılır (Skirven ve DeTullio, 2023). Bu programda tam yumruğa yaklaşık 6. haftada ulaşılması hedeflenmektedir (Stevens ve ark., 2023).

Manchester protokolünde postoperatif 4–5. günlerde başlanan kombine pasif-aktif bir program uygulanır. El bileğinin tam fleksiyonuna ve 45°'ye kadar ekstansiyonuna izin veren ve MCP eklemlerini 30° fleksiyonda bloke eden kısa bir ortez kullanılır. Önce pasif IP egzersizleri, ardından ortez içinde aktif fleksiyon uygulanır; parmak ekstansiyonu ise el bileği fleksiyondayken yapılır. Ortez kullanımı 6. haftaya kadar sürdürülür (Skirven ve DeTullio, 2023).

8.3.6. Sinerjik Egzersiz ve Nantong Protokolü

Sinerjik egzersizde el bileğinin kontrollü bir açıklıkta ekstansiyona getirilmesi tendonu proksimale çekerek parmakların fleksiyona gelmesini sağlar; el bileği fleksiyona geldiğinde ise parmaklar ekstansiyona açılır ve onarım hattı distale kayar. Modifiye sinerjik egzersizde el bileği ekstansiyonunun ardından MCP eklemleri pasif olarak ekstansiyona getirilerek tendonun proksimale çekilmesi artırılır (Skirven ve DeTullio, 2023).

Nantong protokolü de kombine pasif-aktif bir programdır. Postoperatif 4–6. günlerde el bileği nötral pozisyonda, el istirahat pozisyonunda olacak şekilde ortez içinde başlanır. Özellikle ödem veya sertlik bulunan hastalarda kısmi orta açıklıkta aktif fleksiyondan önce 10–30 tekrar

pasif fleksiyon ve ekstansiyon uygulanarak doku direnci azaltılır. Tam aktif fleksiyona 4–5. haftalarda geçilir ve ortez 6. haftadan sonra bırakılır (Skirven ve DeTullio, 2023).

8.3.7. Relatif Hareket Fleksiyon Ortezi

Dört geçişli onarım yapılan Zon I–II FDP yaralanmalarında kullanılan bu yaklaşımda, onarılan parmağın MCP eklemi komşu parmaklara göre 30–40° daha fazla fleksiyonda tutan relatif hareket ortezi, el bileğini 0–20° ekstansiyonda tutan statik dorsal bloklu ortezle birlikte kullanılır. İlk 3 hafta her iki ortez sürekli kullanılır ve kompozit pasif IP fleksiyonu, MCP eklemleri fleksiyondayken nötrale kadar aktif IP ekstansiyonu ve relatif hareket ortezi içinde aktif parmak hareketleri uygulanır. 3. haftadan sonra relatif hareket ortezi sürekli, dorsal bloklu ortez ise geceleri ve riskli durumlarda kullanılır. Dorsal bloklu ortez 6. haftada bırakılır ve tüm kısıtlamalar 8–10. haftalar arasında kaldırılır (Skirven ve DeTullio, 2023).

8.3.8. Erken Aktif Mobilizasyonda Genel Progresyon

Programlar arasında ayrıntılar farklılık gösterse de erken aktif mobilizasyon genel olarak benzer bir progresyon izlemektedir (Skirven ve DeTullio, 2023):

- **0–4. haftalar:** Dorsal bloklu ortez içinde pasif hareket, Place and Hold ve yumruğun üçte biri ile yarısı arasında sınırlı aktif fleksiyon uygulanır. Ağrı ve ödem kontrolü sağlanır; el bileği ve parmakların aynı anda ekstansiyona getirilmesinden kaçınılır.
- **4–6. haftalar:** Ortez kullanımı azaltılarak aktif fleksiyon açıklığı tam yumruğa doğru ilerletilir. Kanca, düz ve tam yumruk pozisyonlarını içeren tendon kaydırma egzersizleri ile bloklama egzersizleri programa eklenir.
- **6–8. haftalar:** Ortez bırakılır; izole eklem hareketleri, gerektiğinde PIP ekstansiyon kaybına yönelik egzersizler ve hafif fonksiyonel kullanım programa dahil edilir.
- **8. hafta ve sonrası:** Kuvvet piramidine uygun olarak dirençli egzersizlere geçilir ve el fonksiyonlarının günlük yaşam aktivitelerine, mesleki ve sportif gereksinimlere aktarılması hedeflenir.

9. SONUÇ

Fleksör tendon yaralanmaları, eşlik eden nörovasküler ve yumuşak doku hasarı ile onarım sonrasında gelişebilen komplikasyonlar nedeniyle cerrahi ve rehabilitasyonun birlikte planlanmasını gerektiren kompleks el yaralanmalarıdır. Rehabilitasyonun temel ilkesi, onarımı korurken tendon kaymasını sürdürmek; böylece rüptür riski ile adezyon ve kontraktür gelişimi arasında uygun dengeyi kurmaktır. Yaralanmanın zonu, onarımın mekanik gücü, eşlik eden

yaralanmalar ve hastanın uyumu, immobilizasyon, erken pasif veya erken aktif mobilizasyon protokolleri arasında seçim yapılırken belirleyici olmalıdır. Eklem hareket açıklığı, tendon kayması, duyu, kuvvet ve el fonksiyonunun düzenli olarak değerlendirilmesi, programın hastanın klinik ilerlemesine göre bireyselleştirilmesine olanak tanır. Güçlü bir cerrahi onarım ile kanıta dayalı, aşamalı ve bireyselleştirilmiş bir rehabilitasyon programının birlikte uygulanması, el fonksiyonlarının en üst düzeyde yeniden kazanılması açısından temel önem taşımaktadır.

KAYNAKÇA

- Ay, Ş., Güner, D., Bektaş, U., & Demirtaş, M. (2012). Sporcularda elde tendon yaralanmaları. *TOTBİD Dergisi*, 11(3), 201–213. <https://doi.org/10.5606/totbid.dergisi.2012.27>
- Berköz, Ö., & Altaş, O. (2021). Fleksör tendon yaralanmaları ve cerrahileri. In M. Aşık, D. Kaya, İ. Düzgün, & G. Polat (Eds.), *Sık yapılan ortopedik ameliyatlar ve rehabilitasyon yaklaşımları: Güncel bilgiler ve teknikler* (pp. 216–219). İstanbul Medikal Yayıncılık.
- Büyükturan, Ö., Ceylan, İ., Erden, Z., & Erçetin, Ö. (2018). Zon 2 fleksör tendon yaralanmalarında modifiye Duran protokolünün klinik sonuçları. *Journal of Exercise Therapy and Rehabilitation*, 5(3), 150–157.
- Ceylan, İ., & Kuzu, Ş. (2023). Fleksör digitorum profundus avulsiyonlarında rehabilitasyon. In *Sağlık bilimleri alanında gelişmeler* (pp. 154–162). Platanus Publishing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10027194>
- Chevalley, S., Wängberg, V., Åhlén, M., Strömberg, J., & Björkman, A. (2024). Passive mobilization with place-and-hold versus active mobilization therapy after flexor tendon repair: 5-year minimum follow-up of a randomized controlled trial. *The Journal of Hand Surgery*, 49(12), 1165–1172. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2024.08.011>
- Lee, Y. J., Ryoo, H. J., & Shim, H. S. (2022). Prevention of postoperative adhesions after flexor tendon repair with acellular dermal matrix in Zones III, IV, and V of the hand: A randomized controlled (CONSORT-compliant) trial. *Medicine*, 101(3), e28630. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000028630>
- Mujadžić, M., Pirela-Cruz, M., & Kanlić, E. (2005). Updates in flexor tendon repair at zone II. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 5(3), 16–25. <https://doi.org/10.17305/bjbms.2005.3265>
- Schreuders, T. A. R. (2012). The quadriga phenomenon: A review and clinical relevance. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, 37(6), 513–522. <https://doi.org/10.1177/1753193411430810>
- Skirven, T. M., & DeTullio, L. M. (2023). Therapy after flexor tendon repair. *Hand Clinics*, 39(2), 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2022.08.019>

- Stevens, K. A., Caruso, J. C., Fallahi, A.-K. M., & Patiño, J. M. (2023). Flexor tendon lacerations. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK493223/>
- Strickland, J. W., & Glogovac, S. V. (1980). Digital function following flexor tendon repair in Zone II: A comparison of immobilization and controlled passive motion techniques. *The Journal of Hand Surgery*, 5(6), 537–543.
- van de Ven-Stevens, L. A. W., Graff, M. J. L., Selles, R. W., Schreuders, T. A. R., Zondervan-van der Linde, H., Spauwen, P. H., & Geurts, A. C. H. (2015). Instruments for assessment of impairments and activity limitations in patients with hand conditions: A European Delphi study. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 47(10), 948–956. <https://doi.org/10.2340/16501977-2015>
- Zhu, X., Wei, H., Zhu, H., Zhong, W., Bao, B., Li, X., Gao, T., Zheng, X., & Mei, J. (2023). Relative efficacy of three different tendon repairs in complete flexor digitorum profundus laceration in Zone I: A randomized controlled study. *Journal of Orthopaedic Research*, 41(10), 2322–2328. <https://doi.org/10.1002/jor.25565>

BÖLÜM 3

FLEKSÖR TENDON YARALANMALARI VE REHABİLİTASYONU

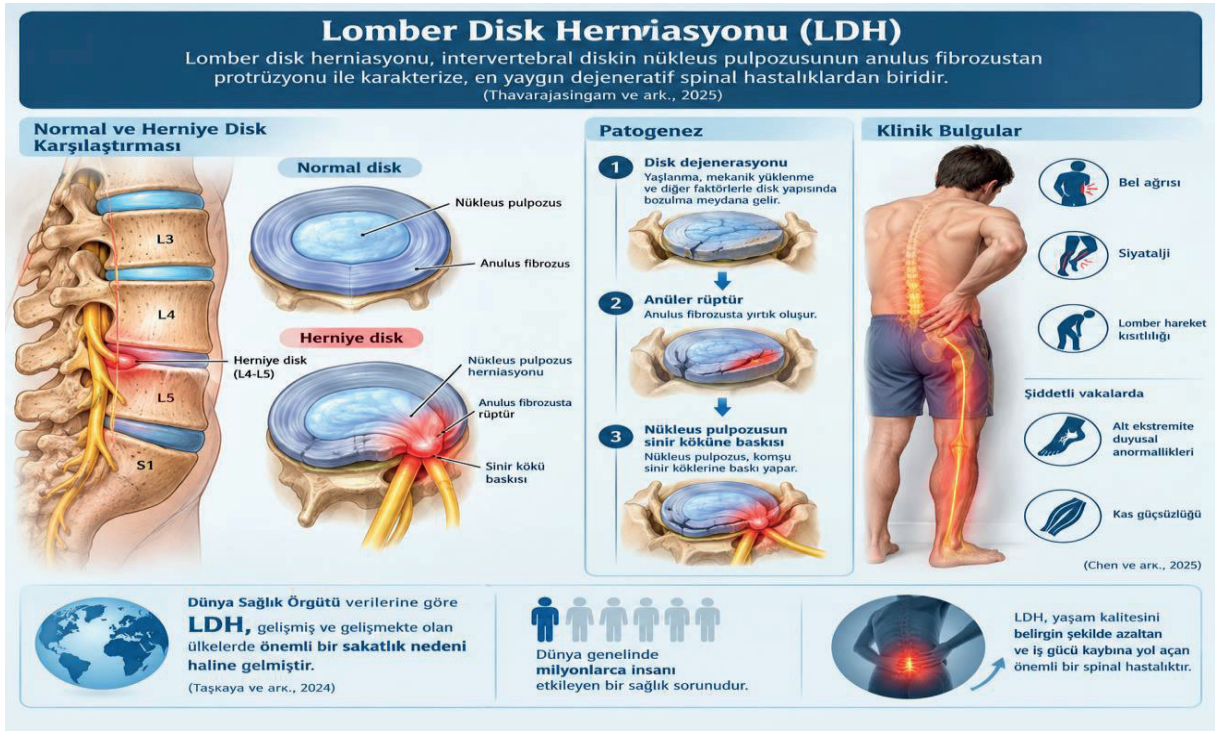
Muhammed Safa ÇANKAYA¹

¹ Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu ORCID: 0000-0003-2016-4152

1. GİRİŞ

1.1. Lomber Disk Herniasyonunun Tanımı ve Patofizyolojisi

Lomber disk herniasyonu (LDH), intervertebral diskin nükleus pulpozusunun anulus fibrozusun liflerini geçerek spinal kanala doğru fokal veya lokalize yer değiştirmesi olarak tanımlanmaktadır (Fardon ve ark., 2014; Antohe ve ark., 2025). LDH'nin patogenezi temel olarak disk dejenerasyonu, anüler rüptür ve nükleus pulpozusun komşu sinir köklerine bası yapması ile ilişkilidir (Chen ve ark., 2025). Dejeneratif süreç, disk hücrelerinin beslenme bozukluğu, matriks metalloproteinazların aktivasyonu ve enflamatuvar mediatörlerin salınımı gibi çok faktörlü mekanizmalarla ilerlemektedir (Yu ve ark., 2022; Benzakour ve ark., 2019). Şekil 1’de Lomber Disk Herniasyonu gösterilmiştir.



Şekil 1. Lomber Disk Herniasyonu oluşumları

Klinik açıdan LDH, bel ağrısı, siyatalji ve lomber hareket kısıtlılığı ile karakterize olup, şiddetli vakalarda alt ekstremité duyuşal anormallikleri ve kas güçsüzlüğü görülebilmektedir. Herniasyonun boyutuna bağlı olarak sinir kökü lateral reses, foraminal veya ekstraforaminal alanda sıkışabilmektedir. Manyetik rezonans görüntüleme (MRG), LDH tanısında altın standart olarak kabul edilmekte olup, bilgisayarlı tomografiye kıyasla daha geniş görüntüleme

parametreleri, çoklu doku değişkenliği ve iyonlaştırıcı radyasyon içermemesi gibi avantajlar sunmaktadır (Zheng ve ark., 2021).

1.2. Epidemiyoloji ve Klinik Yük

LDH'nin insidansı son yıllarda yaşam tarzı değişiklikleri ve nüfusun hızlanan yaşlanması nedeniyle artış göstermektedir ve önemli bir halk sağlığı yükü oluşturmaktadır (Göçer vd., 2023; Chen ve ark., 2025). Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre LDH, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde önemli bir engellilik nedeni haline gelmiştir (Taşkaya ve ark., 2023). Avrupa çalışmaları, herniye disk yıllık insidansının 1000 yetişkinde 5 ila 20 vaka arasında değiştiğini ve erkeklerin kadınlara kıyasla iki kat daha fazla etkilendiğini göstermektedir (Fjeld ve ark., 2019). Risk faktörleri arasında sigara içme, ağır fiziksel aktivite, genetik ve çevresel faktörler yer almakta olup, LDH en sık 30-50 yaş aralığında görülmektedir (Pojskic ve ark., 2024; Benzakour ve ark., 2019).

Disk herniasyonunun insidansı sürekli artmakta olup, hastalık 30-50 yaş arası popülasyonun %60-90'ını etkilemektedir (Radio ve ark., 2014; Antohe ve ark., 2025). Lomber disk herniasyonlarının yaklaşık %95'i L4-L5 ve L5-S1 seviyelerinde yerleşmekte ve vakaların %90'ında intervertebral disk herniasyonu sinir köklerinin kompresyonuna yol açmaktadır (Cai ve ark., 2013; Jacobs ve ark., 2011). Bel ağrısının ABD'ye yıllık maliyetinin 100 ila 200 milyar dolar arasında olduğu tahmin edilmektedir (Katz, 2006; Al Qaraghli ve De Jesus, 2025). İsveç'te yapılan bir çalışma, cerrahi tedavinin konservatif tedaviye kıyasla önemli ölçüde daha pahalı olduğunu göstermiştir (ortalama 10.311 'akars\c12.068'akars\c12.068) (Hansson ve Hansson, 2007; Thavarajasingam ve ark., 2025).

1.3. Konservatif Tedavinin Rasyoneli ve Endikasyonları

Konservatif tedavi, ciddi nörolojik semptomlar göstermeyen hastalarda ilk basamak yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bu yaklaşım nonsteroidal anti-inflamatuvar ilaçlar (NSAİİ), fizik tedavi, traksiyon, sinir blokları ve akupunktur gibi çok çeşitli yöntemleri kapsamaktadır (Chen ve ark., 2025; Awadalla ve ark., 2023). LDH için birinci basamak konservatif yönetim stratejileri arasında eğitim, yaşam tarzı değişikliği, analjezik ilaçlar, fizik tedavi ve epidural steroid enjeksiyonları yer almaktadır (Yang ve ark., 2020). Konservatif yönetimin önemli bir potansiyel avantajı, cerrahi ile ilişkili risk ve komplikasyonlardan kaçınmaktır (Cook ve ark., 2021). WFNS omurga komitesi, kırmızı bayrak semptomlarının yokluğunda aktivite

modifikasyonu, ilaç ve fizik tedavi kombinasyonunun çoğu LDH hastası için olumlu sonuçlar verdiğini önermektedir (Oertel ve ark., 2024).

Herniye spinal lomber disk cerrahisi geçiren hastaların %29,66'sında postoperatif komplikasyon görülmekte olup, en sık görülenler kronik ağrı ve yeniden cerrahi ihtiyacıdır (Sehat ve ark., 2023). Bu durum, birçok hasta için konservatif yönetimin birinci basamak yaklaşım olarak kritik önemini vurgulamaktadır. Saal ve Saal (1989), disk herniasyonu tanısı alan kişilerin %90'ında cerrahinin gerekli olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, hastaların %73'ünde cerrahi olmadan iyileşme mümkün olsa da, %74,6'sında ağrı tamamen kaybolmamaktadır (Yorimitsu ve ark., 2001; Antohe ve ark., 2025).

1.4. Bölümün Amacı ve Kapsamı

Bu kitap bölümü, LDH'de konservatif tedavi yaklaşımlarını oluşturan manuel terapi, fizik tedavi ve egzersiz tedavisinin etkinliğini kapsamlı biçimde sentezlemeyi amaçlamaktadır. Bölüm kapsamında öncelikle manuel terapinin klinik etkinliği, ardından fizik tedavi ve egzersiz yaklaşımlarının kanıt düzeyleri ele alınacak, son olarak da bu modalitelerin karşılaştırmalı etkinliği ve klinik öneriler sunulacaktır.

2. MANUEL TERAPİ YAKLAŞIMLARI VE KANIT SENTEZİ

2.1. Manuel Terapinin Tanımı ve Mekanizmaları

Manuel terapi, eklem pozisyonlarını ayarlamak, yumuşak doku fonksiyonunu geliştirmek ve nöral refleks aktiviteyi düzenlemek için elle uygulanan teknikleri içermektedir; böylece ağrıyı hafifletmekte ve fonksiyonel iyileşmeyi desteklemektedir (Chen ve ark., 2025). Manuel terapi, basitliği, bireyselleştirilmiş yaklaşımı ve minimal yan etkileri ile karakterize olup, LDH'nin konservatif yönetiminde giderek daha fazla ilgi görmektedir.

Manuel terapinin etki mekanizmaları çok boyutludur. Biyomekanik perspektiften, mobilizasyon, dekompresyon ve yumuşak doku manipülasyonu gibi teknikler segmental hareketliliği yeniden sağlamaya, disk ve sinir kökü kompresyonunu azaltmaya ve mekanik yük dağılımını iyileştirmeye yardımcı olmaktadır (Chen ve ark., 2025). Nöromodülatör ve immünoregülatör mekanizmalar da terapötik etkilere katkıda bulunabilmektedir. Manuel müdahaleler yalnızca spinal inhibitör yolları aktive ederek ağrı algısını modüle etmekle

kalmayıp, aynı zamanda periferik enflamatuvar mediatörleri de aşağı regüle edebilmektedir (Teodorczyk-Injeyan ve ark., 2021; Chen ve ark., 2025).

2.2. Çin Manuel Terapisi Üzerine Sistematiik Derleme ve Meta-Analiz Bulguları

Chen ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan kapsamlı sistematiik derleme ve meta-analiz, Çin manuel terapinin LDH üzerindeki klinik etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Dokuz veri tabanı sistematiik olarak taranmış ve 47 randomize kontrollü çalışma (RKÇ) meta-analize dâhil edilmiştir. Toplam 4.480 hasta çalışmaya alınmıştır.

Klinik Etkinlik Sonuçları: Meta-analiz, manuel terapinin klinik etkinlik açısından üstün olduğunu göstermiştir (RR = 1,20, %95 GA: 1,15-1,25). Klinik olarak bu, manuel terapinin diğer konservatif müdahalelere kıyasla belirgin bir avantaj sağladığını göstermektedir. Duyarlılık analizi, yüksek riskli altı çalışmanın dışlanmasıyla klinik etkinlik için havuzlanmış sonuçların anlamlı kaldığını göstermiştir (RR = 1,21, %95 GA: 1,16-1,27). Bu, yüksek riskli çalışmaların potansiyel önyargı getirebileceğini, ancak dışlanmalarının manuel terapi lehine genel sonucu değıştirmediğini göstermektedir (Chen ve ark., 2025).

Ağrı Sonuçları: Otuz altı RKÇ ağrı sonuçlarını bildirmiştir. Manuel terapi, kontrol tedavilerine kıyasla ağrıyı azaltmada üstün bulunmuştur (SMD = 1,23, %95 GA: 0,98-1,49, Z = 9,50, P < 0,001). Görsel Analog Skala (VAS) kullanan çalışmaların havuzlanmış analizi, manuel terapinin VAS skorlarını anlamlı şekilde azalttığını göstermiştir (MD = 1,39, %95 GA: 1,16-1,62, Z = 11,88, P < 0,001). Alt grup analizleri, traksiyon kontrolü olan 16 çalışmada manuel terapinin ağrıyı azaltmada anlamlı şekilde daha etkili olduğunu göstermiştir (MD = 1,37, %95 GA: 1,06-1,67). Fizik tedavi grubunda manuel terapi üstünlüğünü korumuştur (MD = 2,06, %95 GA: 1,16-2,96). Farmakolojik tedavi kontrol grubunda havuzlanmış MD 1,37 (%95 GA: 0,71-2,02) olmuştur. Akupunktur alt grubunda manuel terapi anlamlı fayda göstermiştir (MD = 0,68, %95 GA: 0,33-1,02) (Chen ve ark., 2025).

Fonksiyonel Sonuçlar: JOA skoru bildiren 21 çalışmada, manuel terapi nörolojik fonksiyonu anlamlı şekilde iyileştirmiştir (SMD = 1,42, %95 GA: 1,07-1,77, Z = 7,94, P < 0,001). ODI skoru bildiren sekiz RKÇ'de, manuel terapi ODI'de ortalama 14,47 puan azalma sağlamıştır (%95 GA: 10,33-18,61, Z = 6,85, P < 0,00001). Leave-one-out duyarlılık analizi hiçbir bireysel çalışmanın havuzlanmış sonucu önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir (Chen ve ark., 2025).

Enflamatuvar Belirteçler: Beş çalışma serum enflamatuvar sitokin düzeylerini bildirmiş ve manuel terapinin sistemik enflamasyonu anlamlı şekilde azalttığını göstermiştir. Havuzlanmış SMD 1,45 (%95 GA: 0,81-2,09, $P < 0,00001$) olmuştur. TNF- α 'daki azalma en belirgin olmuştur (SMD = 2,25), IL-1 β ve IL-6 da tutarlı aşağı yönlü eğilimler göstermiştir (SMD = 1,45 ve 0,66). Bu bulgular, manuel terapinin dolaşımdaki enflamatuvar sitokinleri modüle ederek anti-enflamatuvar ve analjezik etkiler gösterebileceğini düşündürmektedir (Chen ve ark., 2025).

2.3. Spinal Mobilizasyonun Radyolojik Sonuçlar Üzerine Etkisi

Taşkaya ve arkadaşları (2023) tarafından yapılan tek-kör randomize kontrollü klinik çalışma, spinal mobilizasyon uygulamalarının herniasyon mesafesi, disk yüksekliği ve faset eklem mesafesi ile fonksiyonel durum, ağrı, hareket açıklığı (ROM) ve esneklik üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmaya 32 katılımcı dahil edilmiştir. Kontrol grubu beş hafta boyunca haftada iki seans olmak üzere on seans stabilizasyon egzersizi almıştır. Müdahale grubunda stabilizasyon egzersizlerine ek olarak spinal mobilizasyon uygulamaları yapılmıştır. Şekil 2’de Lomber Mobilizasyon uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 2. Lomber Mobilizasyon uygulamaları ve etkileri

Radyolojik Bulgular: Grup içi analiz, her iki grupta da herniasyon mesafesinde anlamlı azalma, faset eklem mesafesinde artış, ağrı hafiflemesi, fonksiyonel iyileşme, esneklik artışı ve ROM'da uzama göstermiştir ($p < 0,05$). Özellikle, disk yüksekliğinde anlamlı artış yalnızca müdahale grubunda gözlenmiştir ($p < 0,05$). Herniasyon mesafesini azaltmada mobilizasyonun etkinliği, müdahale grubunda kontrol grubuna kıyasla iki kat daha yüksek olmuştur (Taşkaya ve ark., 2023).

Fonksiyonel ve Klinik Bulgular: Her iki grupta da müdahale sonrası ve üç aylık takipte Back Performance Scale skorlarında ve VAS ağrı düzeylerinde anlamlı azalmalar gözlenmiştir ($p < 0,05$). Her iki grup da müdahale sonrası straight leg raising açısında artış göstermiştir. Sit-and-reach testi skorları her iki grupta da tedavi sonrası artmıştır. Tüm parametreler için etki büyüklükleri müdahale grubunda daha büyük olmuştur. Mobilizasyon tekniklerinin uygulanması, hastaların VAS skorlarında yaklaşık dört puanlık bir azalmaya yol açmıştır (Taşkaya ve ark., 2023).

2.4. Osteopatik Teknikler ve Manuel Terapinin Kombinasyonu

Antohe ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan vaka raporu, osteopatik ve fizik tedavi tekniklerine dayalı bir terapötik programın rekürren lomber disk herniasyonu tedavisindeki etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. 34 yaşındaki kadın hastada sol paramedian L4-L5 disk herniasyonu (grade 4/4) tanısı konmuş ve başlangıçta konservatif tedavi denenmiştir. Ancak semptomların tekrarlaması üzerine hasta cerrahi kararı almış ve L4-L5 disk hernisi çıkarılmıştır. Cerrahiden üç ay sonra ağrı tekrarlamış ve dört ay sonra yeni MRG'de disk herniasyonunun rekürrens gösterdiği bulunmuştur.

Tedavi Protokolü ve Sonuçlar: Dört aylık tedavi programı sonrasında MRG görüntülerinde intervertebral disk yüksekliği başlangıçta 8,61 mm iken, cerrahi sonrası 7,04 mm'ye düşmüş ve final değerlendirmede 8,81 mm'ye yükselmiştir. Disk herniasyonu boyutu başlangıçta 8,65 mm iken, cerrahi sonrası 10,6 mm'ye çıkmış ve final değerlendirmede 3,5 mm'ye düşmüştür. VAS skoru başlangıçta 10 iken, final değerlendirmede 1'e düşmüştür. Oswestry Disability Index başlangıçta %82 iken, final değerlendirmede %20'ye gerilemiştir. Sciatica Bothersomeness Index değerleri %75 semptom azalması kaydetmiştir (Antohe ve ark., 2025). Bu vaka raporu, fizik tedavi ve osteopatik tedavinin kombinasyonunun rekürren LDH tedavisinde güvenli ve etkili bir müdahale yöntemi olabileceğini göstermektedir.

3. FİZİK TEDAVİ YAKLAŞIMLARI VE KANIT SENTEZİ

3.1. Fizik Tedavinin Rolü ve Kapsamı

Fizik tedavi, LDH'nin konservatif yönetiminde temel bir bileşen olarak kabul edilmektedir. LDH cerrahisi sonrası fizik tedavinin rolü belirsiz olmakla birlikte, mevcut kanıtlar fizik tedavinin ağrıyı hafifletmede, fonksiyonu ve yaşam kalitesini iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir (Brotis ve ark., 2025). Fizik tedavi modaliteleri arasında egzersiz programları, manuel terapi, traksiyon, elektroterapi, ultrason, lazer tedavisi ve sıcak/soğuk uygulamalar yer almaktadır (El Melhat ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2023).

Brotis ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan sistematik derleme, LDH cerrahisi sonrası fizik tedavinin etkinliğini değerlendirmek üzere altı araştırma sorusunu ele almıştır. Bu derleme, 55 randomize kontrollü çalışmayı (4.311 hasta) içermiştir. Bulgular, fizik tedavinin LDH cerrahisi sonrası ağrıyı hafifletmede, fonksiyonu ve yaşam kalitesini iyileştirmede etkili olduğunu göstermiştir. Sırt kaslarının dayanıklılığını, esnekliğini ve gücünü artırmaya yönelik egzersiz programları genellikle etkili bulunmuş, nöral mobilizasyon egzersizleri istisna olmuştur (Brotis ve ark., 2025).

3.2. Fizik Tedavi Modalitelerinin Etkinliği

Egzersiz Programları: Fizik tedavi sonrası ağrı kontrolü, sırtla ilişkili disabilite ve genel yaşam kalitesi üzerinde olumlu etkiler göstermiştir. Dolan ve arkadaşları (2000), dört haftalık bir egzersiz programının sırt kası dayanıklılık kapasitesinde ve kalça ile lomber mobilitede belirgin iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Donceel ve Du Bois (1999), multidisipliner bir rehabilitasyon programının lomber disk cerrahisi sonrası işe dönüş olasılığını artırdığını göstermiştir (Brotis ve ark., 2025).

Aktivite Kısıtlaması: Aktivite kısıtlamasının postoperatif sonuçlar üzerindeki etkisini inceleyen üç çalışma (toplam 252 hasta), korse kullanımının kısa ve orta vadeli sonuçlarda iyileşme sağlamadığını göstermiştir (Zoia ve ark., 2018). Bono ve arkadaşları (2017), iki haftalık kısa süreli aktivite kısıtlaması ile altı haftalık uzun süreli aktivite kısıtlaması arasında fonksiyonel sonuçlar veya işe dönüş süresi açısından anlamlı bir ilişki olmadığını bulmuştur. Yao ve arkadaşları (2018), postoperatif brace kullanımının füzyon oranı, komplikasyon veya reoperasyon üzerinde etkisi olmadığını göstermiştir (Brotis ve ark., 2025).

Fiziksel Egzersiz Başlangıç Zamanlaması: On bir çalışma optimal fizik tedavi başlangıç zamanlamasını araştırmıştır. Lindback ve arkadaşları (2018), cerrahi öncesi fizyoterapinin ağrıyı azalttığını, aktivite kaçınma riskini düşürdüğünü, mental iyilik halinin bozulmasını önlediğini ve yaşam kalitesini artırdığını göstermiştir. Newsome ve arkadaşları (2009), cerrahiden sonraki 2 saat içinde hastaların hareket etmeye teşvik edilmesinin hastanede kalış süresini kısalttığını ve işe dönüşü hızlandırdığını göstermiştir (Brotis ve ark., 2025).

3.3. Traksiyon Tedavisi

Traksiyon tedavisi, intradiskal basıncı azaltmayı, sinir kompresyonunu hafifletmeyi ve spinal hizalanmayı iyileştirmeyi amaçlayan mekanik veya cihaz destekli yöntemleri kapsamaktadır (Thavarajasingam ve ark., 2025). Thavarajasingam ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan sistematik derleme ve meta-analiz, 43 çalışmayı (4.043 hasta) niteliksel sentezde ve 20 çalışmayı (2.187 hasta) meta-analizde değerlendirmiştir. Meta-analiz, traksiyon tedavisinin en yüksek havuzlanmış etki büyüklüğüne sahip olduğunu göstermiştir (SMC = 2,52, %95 GA: 1,57-3,37).

Hasta Spesifik Üç Boyutlu Lomber Traksiyon (PS3DLT): Asiri ve arkadaşları (2020), PS3DLT'nin dört hafta içinde ağrıyı (VAS: 8,5'ten 3,2'ye, $p < 0,001$) ve disabilitayı (ODI: %53,5'ten %31,3'e, $p < 0,001$) anlamlı şekilde azalttığını göstermiştir. Basınç ağrı eşiği de belirgin şekilde artmıştır (0,70 kg/cm²'den 1,64 kg/cm²'ye) (Thavarajasingam ve ark., 2025).

Cerrahi Olmayan Spinal Dekompresyon Tedavisi (NSDT): Choi ve arkadaşları (2022), NSDT'nin herniasyon indeksinde %27,6 azalma sağladığını (psödodekompresyon ile %7,1'e kıyasla, $p = 0,017$) ve bacak ağrısı ile fonksiyonel skorlarda iyileşme olduğunu göstermiştir (Thavarajasingam ve ark., 2025).

Sürekli Lomber Traksiyon (CLT): Ozturk ve arkadaşları (2006), sürekli traksiyon ile herniasyon boyutunda %23 azalma olduğunu bildirmiştir ($p < 0,01$), özellikle daha büyük herniasyonu olan hastalarda. Moustafa ve Diab (2013), lomber ekstansiyon traksiyonunun spinal hizalanmayı iyileştirdiğini, ağrıyı ve disabilitayı azalttığını göstermiştir (Thavarajasingam ve ark., 2025).

3.4. Elektroterapi ve Diğer Fizik Tedavi Modaliteleri

Franca ve arkadaşları (2019), motor kontrol eğitiminin (MCT) transkütanöz elektriksel sinir stimülasyonuna (TENS) kıyasla ağrıyı azaltmada (ortalama fark = 3,3, $p < 0,001$) ve disabilitayı iyileştirmede (ortalama fark = 8,4, $p < 0,001$) üstün olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, aktif egzersiz temelli yaklaşımların pasif elektroterapi modalitelerine kıyasla daha etkili olabileceğini düşündürmektedir (Thavarajasingam ve ark., 2025). Kulikov ve arkadaşları (2018), tüm vücut manyetik alan tedavisinin rehabilitasyonla kombinasyonunun lomber ağrıyı ve muhtemelen enflamasyonu azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Zhao ve arkadaşları (2008), akupunkturun fonksiyonel iyileşmeyi destekleyebileceğini göstermiştir (Brotis ve ark., 2025).

4. EGZERSİZ TEDAVİSİ VE KANIT SENTEZİ

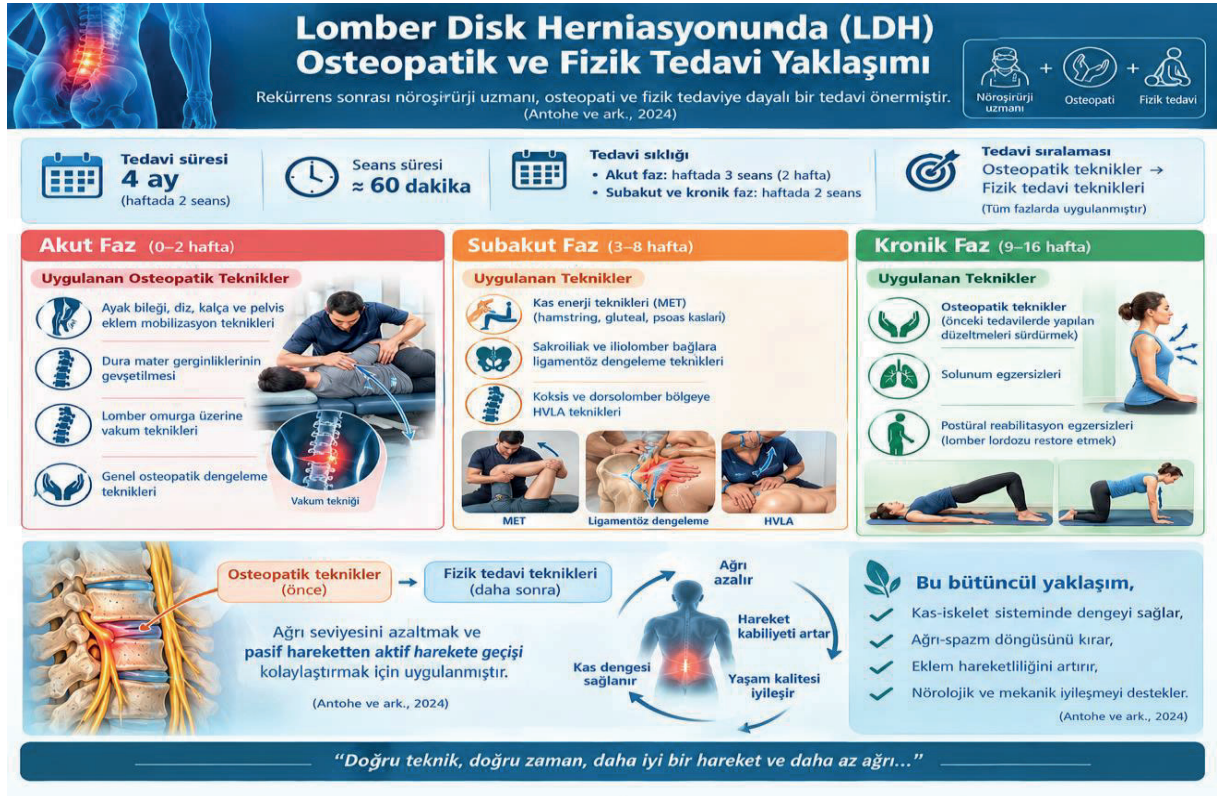
4.1. Egzersiz Tedavisinin Rolü ve Türleri

Egzersiz tedavisi, LDH'nin konservatif yönetiminde merkezi bir rol oynamaktadır. En yaygın egzersiz rejimleri arasında core stabilizasyon egzersizleri, McKenzie terapisi, fleksiyon ve ekstansiyon temelli rutinler, zihin-beden yaklaşımları (yoga, Pilates) ve yapılandırılmış fizyoterapi programları yer almaktadır (Thavarajasingam ve ark., 2025; Akuthota ve Nadler, 2004).

4.2. Egzersiz Tedavisinin Ağrı ve Disabilite Üzerine Etkisi

Thavarajasingam ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan meta-analiz, egzersiz tedavisinin havuzlanmış etki büyüklüğünü $SMC = 1,97$ (%95 GA: 0,46-3,48) olarak bildirmiştir. Altı çalışmanın tümü VAS ve ODI ile ölçülen ağrı ve disabilitede önemli azalmalar bildirmiştir. Taspınar ve arkadaşları (2022), Pilates temelli core stabilizasyon programlarının VAS skorlarında %62,3 azalma ve ODI'de %41,5 azalma sağladığını göstermiştir ($p < 0,001$). Yildirim ve Gultekin (2022), nöropatik ağrı hastalarına uyarlanmış 12 haftalık yoga programının nöropatik ağrı skorlarında (LANSS, $p < 0,001$), ODI'de ($p < 0,001$) ve yaşam kalitesi ölçümlerinde anlamlı iyileşmeler sağladığını göstermiştir (Thavarajasingam ve ark., 2025).

Ekstansiyon Temelli Egzersizler: Abdi ve arkadaşları (2023), ekstansiyon temelli rutinleri uygulayan hastalarda fleksiyon temelli egzersizlere kıyasla üstün ağrı (VAS, $p < 0,001$) ve disabilite (ODI, $p < 0,001$) azalmaları göstermiştir. Bu bulgular, ekstansiyon temelli programların postoperatif rehabilitasyonda faydalı olabileceğini ve fleksiyon egzersizlerinden daha etkili olabileceğini düşündürmektedir (Thavarajasingam ve ark., 2025). Şekil 3’de Lomber Disk Herniasyonunda tedavi yaklaşımları verilmiştir.



Şekil 3. Lomber Disk Herniasyonunda osteopatik ve fizik tedavi yaklaşımı

4.3. Fonksiyonel ve Psikososyal Kazanımlar

Egzersiz tedavisi, ağrı hafiflemesinin ötesinde esneklik, kas dayanıklılığı ve psikososyal iyilik halini iyileştirmiştir. McKenzie terapisi özellikle radiküler ağrıyı santralize etmede ve lomber mobilitayı artırmada etkili olmuştur. Yoga, nöropatik ağrı ve psikolojik stresi ele almada benzersiz bir yaklaşım sunmuş, disabilite ve ağrı sonuçları için orta düzeyde etki büyüklükleri (Cohen's $d = 0,7$) göstermiştir. Svensson ve arkadaşları (2014), yapılandırılmış fizyoterapi programlarının ağrıya karşı mobilize olma korkusunu azaltmada ve işe dönüş oranlarını iyileştirmede sürdürülen faydalar sağladığını, iyileşmelerin 24 ay boyunca korunduğunu göstermiştir ($p < 0,001$) (Thavarajasingam ve ark., 2025).

4.4. Zamanlama ve Bireyselleştirilmiş Yaklaşımlar

Thackeray ve arkadaşları (2017), altı hafta içinde erken fizyoterapinin bir yılda bel ağrısı rahatsızlığı için mütevazı faydalar sağladığını ($p = 0,05$), ancak ODI ve VAS sonuçlarının gecikmiş fizyoterapi ile karşılaştırılabilir olduğunu bulmuştur. Asiri ve arkadaşları (2020), bireyselleştirilmiş üç boyutlu lomber traksiyon (PS3DLT) ile egzersiz tedavisini birleştirmiştir. Bu yaklaşım, etkilenen spinal segmentlerin hedefli dekompresyonu yoluyla ağrıyı (VAS: 8,5'ten 3,2'ye, $p < 0,001$) ve disabilitayı (ODI: %53,5'ten %31,3'e, $p < 0,001$) azaltmıştır (Thavarajasingam ve ark., 2025).

5. KARŞILAŞTIRMALI ETKİNLİK VE SENTEZ

5.1. Modaliteler Arası Karşılaştırma

Thavarajasingam ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan meta-analiz, üç konservatif modalitenin karşılaştırmalı etkinliğini değerlendirmiştir. Havuzlanmış SMC değerleri şu şekildedir:

- **Traksiyon tedavisi:** SMC = 2,52 (%95 GA: 1,57-3,37), $I^2 = \%93,6$
- **Egzersiz tedavisi:** SMC = 1,97 (%95 GA: 0,46-3,48), $I^2 = \%56,7$
- **Manipülasyon tedavisi:** SMC = 1,91 (%95 GA: 0,24-4,04), $I^2 = \%99,3$

Traksiyon tedavisi en yüksek havuzlanmış etki büyüklüğüne sahip olmuştur. Ancak, egzersiz ve manipülasyon tedavileri için geniş güven aralıklarının sıfırı geçmesi ve yüksek heterojenite, gerçek etkileri konusunda belirsizlik olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, havuzlanmış tahminler mutlak bir etkinlik ölçüsü olarak değil, etkilerin genel bir görünümü olarak yorumlanmalıdır (Thavarajasingam ve ark., 2025). Chen ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan meta-analiz, manuel terapinin klinik etkinlik (RR = 1,20), ağrı (SMD = 1,23), JOA (SMD = 1,42) ve ODI (MD = 14,47) üzerinde tutarlı faydalar sağladığını göstermiştir.

5.2. Heterojenite ve Varyabilite Kaynakları

Meta-regresyon analizi, takip süresinin etki büyüklüklerini anlamlı şekilde etkilediğini göstermiştir (tahmin = -0,02, %95 GA: -0,03 ile -0,01, $p < 0,001$). Daha kısa takip süreleri daha büyük gözlenen etkilerle ilişkili bulunmuştur. Bu, kısa vadeli iyileşmelerin LDH

semptomlarının doğal çözülmesi nedeniyle terapötik faydaları abartabileceğini düşündürmektedir. Örneklem büyüklüğü ($p = 0,308$) ve ortalama yaş ($p = 0,901$) etki büyüklüklerini anlamlı şekilde öngörmemiştir. Yayın yanlılığı, asimetrik funnel plot dağılımı ve Egger testi ($p = 0,0031$) ile doğrulanmıştır (Thavarajasingam ve ark., 2025).

5.3. GRADE Kanıt Değerlendirmesi ve Klinik Öneriler

Chen ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan GRADE değerlendirmesine göre, klinik etkinlik ve ağrı hafiflemesi için kanıt kesinliği orta düzeyde, diğer sonuçlar için düşük düzeyde bulunmuştur. Thavarajasingam ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan değerlendirmede ise genel kanıt kesinliği ağırlıklı olarak orta düzeyde bulunmuş, ancak birkaç çalışmada risk yanlılığı ve yüksek heterojenite nedeniyle sınırlı olduğu belirtilmiştir.

Klinik Uygulama Önerileri:

- Manuel terapi, ilaçlar, fizik tedavi ve akupunktur ile birlikte multimodal tedavi rejimlerine entegre edilebilir (Chen ve ark., 2025).
- Aktivite kısıtlaması, korse kullanımı gibi müdahaleler rutin olarak önerilmemelidir; çünkü kanıtlar anlamlı fayda göstermemektedir (Brotis ve ark., 2025).

6. TARTIŞMA

6.1. Bulguların Yorumlanması

Bu kitap bölümü, LDH'de konservatif tedavi yaklaşımlarını oluşturan manuel terapi, fizik tedavi ve egzersiz tedavisinin etkinliğini kapsamlı biçimde sentezlemiştir. Sentezlenen kanıtlar, bu modalitelerin ağrı, fonksiyon ve yaşam kalitesi üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceğini göstermektedir.

Manuel terapi, özellikle Çin manuel terapisi, klinik etkinlik, ağrı hafiflemesi, fonksiyonel iyileşme ve enflamatuvar modülasyon açısından tutarlı kısa vadeli faydalar göstermiştir (Chen ve ark., 2025). Bu bulgular, manuel terapinin biyomekanik, nöromodülatör ve immünoregülatör mekanizmalar yoluyla etki gösterebileceğini desteklemektedir (Teodorczyk-Injeyan ve ark., 2021). Traksiyon tedavisi, meta-analizde en yüksek havuzlanmış etki büyüklüğüne sahip olmuştur (Thavarajasingam ve ark., 2025). Bununla birlikte, yüksek heterojenite ve değişken

protokoller nedeniyle bu bulgu dikkatli yorumlanmalıdır. Egzersiz tedavisi, özellikle ekstansiyon temelli programlar ve core stabilizasyon egzersizleri, fonksiyonel iyileşme ve ağrı azaltmada etkili bulunmuştur (Thavarajasingam ve ark., 2025).

6.2. Kanıtın Sınırlılıkları

Mevcut kanıtların bir dizi sınırlılığı bulunmaktadır: (1) Çalışmaların çoğu düşük-orta metodolojik kalitededir; Chen ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan değerlendirmede, 47 çalışmanın 32'si (%68) "bazı endişeler" olarak değerlendirilmiştir. (2) Manuel terapi çalışmalarında körleme doğası gereği zordur; bu da subjektif sonuçların abartılmış olabileceğini düşündürmektedir (Chen ve ark., 2025). (3) Çalışmaların çoğu Çin'de yapılmıştır; bu da genellenebilirliğin sınırlı olduğunu göstermektedir (Chen ve ark., 2025). (4) Çalışmaların çoğu kısa takip sürelerine sahiptir; bu da uzun vadeli etkinlik ve rekürrens hakkında güvenilir değerlendirme yapılmasını engellemektedir (Chen ve ark., 2025). (5) Meta-analizlerde yüksek heterojenite ($I^2 > \%90$) gözlenmiştir (Thavarajasingam ve ark., 2025). (6) Küçük örneklemli çalışmalar orantısız şekilde daha büyük etki büyüklükleri bildirme eğilimindedir (Egger testi, $p = 0,0031$) (Thavarajasingam ve ark., 2025). (7) "Toplam etkinlik oranı" gibi kompozit göstergeler uluslararası standartlardan yoksundur ve klinik yorumlanabilirliği sınırlıdır (Chen ve ark., 2025).

7. SONUÇ

Bu kitap bölümü, LDH'de konservatif tedavi yaklaşımlarını oluşturan manuel terapi, fizik tedavi ve egzersiz tedavisinin etkinliğini kapsamlı biçimde sentezlemiştir. Mevcut kanıtlar aşağıdaki sonuçları desteklemektedir:

Manuel terapi, LDH'li hastalarda ağrı, fonksiyon ve enflamasyon dahil olmak üzere çok boyutlu alanlarda tutarlı kısa vadeli faydalar göstermektedir. Bununla birlikte, çalışmaların çoğu Çin'de yapılmış ve düşük-orta metodolojik kalitede olduğundan, kanıt kesinliği orta-düşük düzeyde değerlendirilmeli ve bulgular dikkatli yorumlanmalıdır (Chen ve ark., 2025).

Fizik tedavi, LDH cerrahisi sonrası ağrıyı hafifletmede, fonksiyonu ve yaşam kalitesini iyileştirmede güvenli ve etkili bir müdahale olarak görünmektedir. Sırt kaslarının dayanıklılığını, esnekliğini ve gücünü artırmaya yönelik egzersiz programları genellikle etkilidir (Brotis ve ark., 2025).

Egzersiz tedavisi, özellikle ekstansiyon temelli programlar ve core stabilizasyon egzersizleri, fonksiyonel iyileşme ve ağrı azaltmada etkilidir. Zihin-beden yaklaşımları (yoga, Pilates) kronik ve psikososyal açıdan karmaşık vakalarda faydalı olabilir (Thavarajasingam ve ark., 2025).

Traksiyon tedavisi, meta-analizde en yüksek havuzlanmış etki büyüklüğüne sahip olmuş olsa da, yüksek heterojenite ve değişken protokoller nedeniyle kesin sonuçlar çıkarmak zordur (Thavarajasingam ve ark., 2025).

Spinal mobilizasyon, radyolojik parametreler (herniasyon mesafesi, disk yüksekliği, faset eklem mesafesi) zerinde olumlu etkiler göstermiştir (Taşkaya ve ark., 2023).

Osteopatik ve fizik tedavi kombinasyonu, rekürren LDH'de umut verici sonuçlar göstermiştir, ancak vaka raporu düzeyinde kanıt mevcuttur (Antohe ve ark., 2025).

Kanıt kesinliği orta-düşük düzeyde olmakla birlikte, bulgular manuel terapinin LDH için konservatif tedavi stratejilerine entegrasyonunu desteklemektedir. Gelecekteki yüksek kaliteli, çok merkezli uluslararası RKÇ'ler, uzun vadeli faydaları doğrulamak ve altta yatan biyolojik mekanizmaları aydınlatmak için gereklidir.

KAYNAKÇA

- Abdi, A., Bagheri, S.R., Shekarbegie, Z., Usevand, S., Alimohammadi, E. (2023). The effect of repeated flexion-based exercises versus extension-based exercises on the clinical outcomes of patients with lumbar disk herniation surgery: a randomized clinical trial. *Neurological Research*, 45(1), 28-40.
- Akuthota, V., Nadler, S.F. (2004). Core strengthening. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85, 86-92.
- Al Qaraghli, M.I., De Jesus, O. (2025). *Lumbar Disc Herniation*. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
- Annen, M., Peterson, C., Leemann, S., Schmid, C., Anklin, B., Humphreys, B.K. (2016). Comparison of outcomes in MRI confirmed lumbar disc herniation patients with and without modic changes treated with high velocity, low amplitude spinal manipulation. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 39(3), 200-209.
- Antohe, B.A., Rată, M., Rată, B., Rată, G. (2025). Efficiency of physical therapy and osteopathic techniques in the treatment of operated and recurrent lumbar disc herniation - A case report. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 42, 243-248.
- Asiri, F., Tedla, J.S., Ms, D.A., Ahmed, I., Reddy, R.S., Gular, K. (2020). Effects of patient-specific three-dimensional lumbar traction on pain and functional disability in patients with lumbar intervertebral disc prolapse. *Nigerian Journal of Clinical Practice*, 23(4), 498-502.
- Awadalla, A.M., Aljulayfi, A.S., Alrowaili, A.R., et al. (2023). Management of lumbar disc herniation: a systematic review. *Cureus*, 15(10), e47908.
- Benzakour, T., Igoumenou, V., Mavrogenis, A.F., Benzakour, A. (2019). Current concepts for lumbar disc herniation. *International Orthopaedics*, 43(4), 841-851.
- Bono, C., Leonard, D., Cha, T., Schwab, J., Wood, K., Harris, M., et al. (2017). The effect of short (2-weeks) versus long (6-weeks) post-operative restrictions following lumbar discectomy: a prospective randomized control trial. *European Spine Journal*, 26, 905-912.

- Brotis, A.G., Kalogeras, A., Spiliotopoulos, T., Fountas, K.N., Demetriades, A.K. (2025). Physical therapy after lumbar disc herniation surgery: a systematic review. *Brain and Spine*, 5, 104238.
- Cai, H., Wang, Y., Xu, H., et al. (2013). Trend of the incidence of lumbar disc herniation: decreasing with aging in the elderly. *Clinical Interventions in Aging*, 8, 1097-1101.
- Chen, D., Zhu, H., Wan, Z., Fan, T., Gu, J., Zhan, X., Sheng, X. (2025). Clinical efficacy of Chinese manual therapy for lumbar disc herniation: A systematic review and meta-analysis. *Complementary Therapies in Medicine*, 103285.
- Choi, J., Hwangbo, G., Park, J., et al. (2014). The effects of manual therapy using joint mobilization and flexion-distraction techniques on chronic low back pain and disc heights. *Journal of Physical Therapy Science*, 26(8), 1259-1262.
- Choi, E., Gil, H.Y., Ju, J., Han, W.K., Nahm, F.S., Lee, P.B. (2022). Effect of nonsurgical spinal decompression on intensity of pain and herniation of lumbar disc volume in subacute lumbar herniation disc. *International Journal of Clinical Practice*, 2022, 6343837.
- Cook, E., Scantlebury, A., Booth, A., Turner, E., Ranganathan, A., Khan, A., et al. (2021). Surgery versus conservative management of stable thoracolumbar fracture: the PRESTO feasibility RCT. *Health Technology Assessment*, 25(62), 1-126.
- Danazumi, M.S., Nuhu, J.M., Ibrahim, S.U., Falke, M.A., Rufai, S.A., Abdu, U.G., et al. (2023). Effects of spinal manipulation or mobilization as an adjunct to neurodynamic mobilization for lumbar disc herniation with radiculopathy: a randomized clinical trial. *Journal of Manual & Manipulative Therapy*, 31(6), 408-420.
- Dolan, P., Greenfield, K., Nelson, R., Nelson, I. (2000). Can exercise therapy improve the outcome of microdiscectomy? *Spine*, 25, 1523-1532.
- Donceel, P., Du Bois, M. (1999). Predictors for work incapacity continuing after disc surgery. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 25, 264-271.
- El Melhat, A.M., Youssef, A.S.A., Zebdawi, M.R., Hafez, M.A., Khalil, L.H., Harrison, D.E. (2024). Non-surgical approaches to the management of lumbar disc herniation associated with radiculopathy: a narrative review. *Journal of Clinical Medicine*, 13, 974.

- Fardon, D.F., Williams, A.L., Dohring, E.J., Murtagh, F.R., Gabriel Rothman, S.L., Sze, G.K. (2014). Lumbar disc nomenclature: version 2.0. *Spine Journal*, 14(11), 2525-2545.
- Fjeld, O.R., Grøvle, L., Helgeland, J., Småstuen, M.C., Solberg, T.K., Zwart, J.A., et al. (2019). Complications, reoperations, readmissions, and length of hospital stay in 34 639 surgical cases of lumbar disc herniation. *Bone & Joint Journal*, 101-B(4), 470-477.
- Franca, F.J.R., Callegari, B., Ramos, L.A.V., Burke, T.N., Magalhães, M.O., Comachio, J., et al. (2019). Motor control training compared with transcutaneous electrical nerve stimulation in patients with disc herniation with associated radiculopathy: a randomized controlled trial. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 98(3), 207-214.
- Göçer, Ş., Polat, T., Dere, T. (2023). Masa başı çalışanlarda üst ekstremitte fonksiyonel durumun ergonomi farkındalığı, uyku kalitesi ve yaşam kalitesi ile ilişkisinin incelenmesi. *Ergonomi*, 6(3), 203-213. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.1330901>
- Hansson, E., Hansson, T. (2007). The cost-utility of lumbar disc herniation surgery. *European Spine Journal*, 16(3), 329-337.
- Jacobs, W.C., van Tulder, M., Arts, M., Rubinstein, S.M., van Middelkoop, M., Ostelo, R., et al. (2011). Surgery versus conservative management of sciatica due to a lumbar herniated disc: a systematic review. *European Spine Journal*, 20(4), 513-522.
- Katz, J.N. (2006). Lumbar disc disorders and low-back pain: socioeconomic factors and consequences. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 88(Suppl 2), 21-24.
- Kulikov, O., Kolbovsky, D., Voronina, E., et al. (2018). Whole-body magnetic field therapy combined with rehabilitation for lumbar disc herniation. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 31(4), 683-690.
- Lindback, Y., Tropp, H., Enthoven, P., Abbott, A., Öberg, B. (2018). PREPARE: presurgery physiotherapy for patients with degenerative lumbar spine disorders: study protocol of a randomized controlled trial. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 19(1), 247.
- Moustafa, I.M., Diab, A.A. (2013). Extension traction treatment for patients with discogenic lumbosacral radiculopathy: a randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, 27(1), 51-62.

- Newsome, R.J., May, S., Chiverton, J., Cole, A. (2009). A prospective, randomized, controlled trial of immediate versus delayed mobilization following lumbar microdiscectomy. *Journal of Manual & Manipulative Therapy*, 17(3), 163-169.
- Oertel, J., Sharif, S., Zygourakis, C., Sippl, C. (2024). Acute low back pain: epidemiology, etiology, and prevention: WFNS spine committee recommendations. *World Neurosurgery*, 182, 70-73.
- Ozturk, B., Gunduz, O.H., Ozoran, K., Bostanoglu, S. (2006). Effect of continuous lumbar traction on the size of herniated disc material in lumbar disc herniation. *Rheumatology International*, 26(7), 622-626.
- Pojksic, M., Bisson, E., Oertel, J., Takami, T., Zygourakis, C., Costa, F. (2024). Lumbar disc herniation: epidemiology, clinical and radiologic diagnosis WFNS spine committee recommendations. *World Neurosurgery*, 22, 100279.
- Radio, F., Basso, G., Cimmino, A., et al. (2014). Lumbar disc herniation: a review. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 15(2), 69-76.
- Saal, J.A., Saal, J.S. (1989). Nonoperative treatment of herniated lumbar intervertebral disc with radiculopathy. *Spine*, 14(4), 431-437.
- Sehat, K.M., Tavakkoli, R., Lof, S., Ebrahim, M., Ghaffari, M., Alizadeh, A. (2023). Prevalence of long-term low back pain after symptomatic lumbar disc herniation. *World Neurosurgery*, 170, 163-171.
- Sterne, J.A.C., Savović, J., Page, M.J., Elbers, R.G., Blencowe, N.S., Boutron, I., et al. (2019). RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*, 366, 14898.
- Svensson, G.L., Wendt, G.K., Thomeé, R. (2014). A structured physiotherapy treatment model can provide rapid relief to patients who qualify for lumbar disc surgery: a prospective cohort study. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 46(3), 233-240.
- Taşkaya, B., Taşkent, I., Çakıllı, M., Tunca, Ö. (2023). Is regression in lumbar disk herniation possible by spinal mobilization? A single-blind randomized controlled clinical study. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 36, 1-9.

- Taspinar, F., Angin, E., Oksuz, S. (2023). The effects of pilates on pain, functionality, quality of life, flexibility and endurance in lumbar disc herniation. *Journal of Comparative Effectiveness Research*, 12(1), e220144.
- Teodorczyk-Injeyan, J.A., Triano, J.J., Gringmuth, R., et al. (2021). Effects of spinal manipulative therapy on inflammatory mediators in patients with non-specific low back pain: a non-randomized controlled clinical trial. *Chiropractic & Manual Therapies*, 29(1), 3.
- Thackeray, A., Fritz, J.M., Lurie, J.D., Zhao, W., Weinstein, J.N. (2017). Nonsurgical treatment choices by individuals with lumbar intervertebral disc herniation in the United States: associations with long-term outcomes. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 96(8), 557-564.
- Thavarajasingam, S.G., Ramsay, D.S.C., Namireddy, S.R., Kamath, A.G., Kanakala, S., Zaidi, H., et al. (2025). Exercise, manipulation and traction physiotherapy in the conservative management of lumbar disc herniation: A systematic review and meta-analysis. *Brain and Spine*, 5, 105632.
- Yang, S., Kim, W., Kong, H.H., Do, K.H., Choi, K.H. (2020). Epidural steroid injection versus conservative treatment for patients with lumbosacral radicular pain: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Medicine (Baltimore)*, 99(30), e21283.
- Yao, Y.C., Lin, H.H., Chang, M.C. (2018). Bracing following transforaminal lumbar interbody fusion is not necessary for patients with degenerative lumbar spine disease: a prospective, randomized trial. *Clinical Spine Surgery*, 31(9), E441-E445.
- Yildirim, P., Gultekin, A. (2022). The effect of a stretch and strength-based yoga exercise program on patients with neuropathic pain due to lumbar disc herniation. *Spine*, 47(10), 711-719.
- Yorimitsu, E., Chiba, K., Toyama, Y., Hirabayashi, K. (2001). Long-term outcomes of standard discectomy for lumbar disc herniation: a follow-up study of more than 10 years. *Spine*, 26(6), 652-657.
- Yu, P., Mao, F., Chen, J., et al. (2022). Characteristics and mechanisms of resorption in lumbar disc herniation. *Arthritis Research & Therapy*, 24(1), 205.

- Zhang, A.S., Xu, A., Ansari, K., Hardacker, K., Anderson, G., Alsoof, D., et al. (2023). Lumbar disc herniation: diagnosis and management. *American Journal of Medicine*, 136, 645-651.
- Zhao, B., Wang, K., Zhao, J., Wang, C., Huang, X., Shu-qiang, M., et al. (2008). Clinical effects of acupuncture after surgical operation in patients with prolapse of the lumbar intervertebral disc. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 28, 250-254.
- Zheng, K., Wen, Z., Li, D. (2021). The clinical diagnostic value of lumbar intervertebral disc herniation based on MRI images. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021, 9977553.
- Zoia, C., Bongetta, D., Alicino, C., Chimenti, M., Pugliese, R., Gaetani, P. (2018). Usefulness of corset adoption after single-level lumbar discectomy: a randomized controlled trial. *Journal of Neurosurgery: Spine*, 28, 481-485.

BÖLÜM 4

ÇOCUKLARDA FİZİKSEL UYGUNLUĞUN DEĞERLENDİRİLMESİNDE DİJİTAL TEKNOLOJİLER, YAPAY ZEKÂ VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Meryem SEVİM¹

¹ Öğr. Gör. Dr., Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Fizyoterapi Programı, Bartın, Türkiye, ORCID ID: 0000-0001-6368-0398, E-mail: msevim@bartin.edu.tr

1. Giriş

Dijital teknolojilerdeki hızlı gelişmeler, çocukların fiziksel aktivite düzeylerinin ve hareket davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemleri önemli ölçüde dönüştürmektedir. Özellikle giyilebilir sensörler, mobil uygulamalar, akıllı telefonlar, bilgisayarlı sistemler ve yapay zekâ tabanlı analizler, fiziksel performansın yalnızca belirli bir zaman noktasında değil, günlük yaşam koşulları içerisinde de izlenebilmesine olanak sağlamaktadır (Zhang vd., 2024; Yang vd., 2024).

Geleneksel değerlendirme yaklaşımlarında ölçüm çoğunlukla belirli bir ortamda ve belirli bir zaman diliminde gerçekleştirilirken, dijital teknolojiler hareket davranışının daha uzun süreli, sürekli ve gerçek yaşam koşullarında incelenmesine olanak sunmaktadır. Bu değişim, fiziksel uygunluk değerlendirmesinin yalnızca tek bir test sonucunun elde edilmesinden, bireyin hareket davranışını farklı boyutlarıyla izleyen daha dinamik bir değerlendirme modeline doğru gelişmesini desteklemektedir (Giurgiu vd., 2022; Zhang vd., 2024). Bununla birlikte, bir ölçüm aracının dijital olması tek başına onun geçerli veya güvenilir olduğu anlamına gelmemektedir. Çocuklarda kullanılacak dijital değerlendirme araçlarının yaş grubu, gelişimsel özellikler, ölçüm ortamı, cihazın kullanım biçimi ve veri işleme algoritmaları açısından ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir (Clanchy vd., 2024; van Moorsel vd., 2024).

Bu bölümde dijital teknolojiler, yalnızca fiziksel uygunluk bileşenlerinin doğrudan ölçümünde kullanılan araçlar olarak değil, fiziksel uygunlukla ilişkili hareket davranışlarının, günlük fiziksel aktivite örüntülerinin ve hareket performansının değerlendirilmesini sağlayan tamamlayıcı yöntemler olarak ele alınmaktadır.

2. Giyilebilir Teknolojilerle Değerlendirme

Giyilebilir teknolojiler, bireyin vücuduna takılabilen veya günlük yaşam sırasında taşınabilen sensör ve elektronik sistemler aracılığıyla hareket, fizyolojik durum ve davranışlara ilişkin verilerin sürekli ya da tekrarlı olarak toplanmasına olanak sağlayan teknolojiler olarak tanımlanabilir. İvmeölçerler, jiroskoplar, pedometreler, kalp hızı sensörleri, akıllı saatler çocuklarda fiziksel aktivite ve hareket davranışlarının objektif olarak değerlendirilmesinde kullanılan başlıca giyilebilir teknolojiler arasında yer almaktadır (Zhang vd., 2024). Çocuklarda giyilebilir teknolojilerin kullanımının temel avantajlarından biri, fiziksel aktiviteye ilişkin bilgilerin yalnızca çocuğun veya ebeveynin bildirimine dayalı olmadan, doğrudan cihaz tarafından kaydedilebilmesidir. Bu özellik, özellikle çocukların fiziksel aktivite sürelerini ve yoğunluklarını doğru hatırlamalarının güç olabileceği durumlarda önem taşımaktadır. Giyilebilir cihazlar sayesinde hareket davranışı, belirli bir değerlendirme seansı ile sınırlı kalmadan çocuğun günlük yaşamı içerisinde izlenebilmektedir (Creaser vd., 2021; Giurgiu vd., 2022).

İvmeölçerler bu teknolojiler içerisinde özellikle önemli bir yere sahiptir. İvmeölçerler, vücudun hareketi sırasında ortaya çıkan ivme değişikliklerini farklı eksenlerde kaydederek hareket miktarı ve yoğunluğu hakkında bilgi sağlayabilmektedir. Elde edilen ham veriler, belirli algoritmalar ve eşik değerler kullanılarak sedanter davranış, hafif şiddette fiziksel aktivite ve orta-yüksek şiddette fiziksel aktivite gibi kategorilere dönüştürülebilmektedir (Clanchy vd., 2024). Bununla birlikte, ivmeölçerden elde edilen verinin anlamlandırılması doğrudan cihazın kaydettiği ham sinyalin yorumlanmasından ibaret değildir. Kullanılan örnekleme sıklığı, veri kayıt süresi, cihazın vücuttaki konumu ve fiziksel aktivite yoğunluğunu belirlemek için kullanılan kesme noktaları sonuçları etkileyebilmektedir (Clanchy vd., 2024). Cihazın

vücuttaki yerleşim bölgesi de ölçüm sonuçlarının yorumlanmasında dikkate alınması gereken önemli bir değişkendir. Bel, kalça ve bilek gibi farklı anatomik bölgelerde kullanılan cihazlar aynı hareket için farklı ivme örüntüleri oluşturabilmektedir. Bu nedenle çocuklarda farklı çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için yalnızca kullanılan cihazın adı değil, cihazın yerleşim bölgesi, kayıt protokolü ve veri işleme yöntemi gibi teknik özelliklerin de raporlanması gerekmektedir (Giurgiu vd., 2022).

Giyilebilir teknolojiler yalnızca ivmelenme verisi sağlamamakta, kullanılan cihazın özelliklerine bağlı olarak kalp hızı, adım sayısı, enerji harcaması, uyku-uyanıklık örüntüsü ve bazı durumlarda konum veya hareket hızı gibi farklı göstergeleri de kaydedebilmektedir. Bu durum, fiziksel aktivitenin tek bir değişken üzerinden değerlendirilmesi yerine, farklı fizyolojik ve davranışsal göstergelerin birlikte incelenmesine olanak sağlamaktadır (Zhang vd., 2024). Özellikle akıllı saatlerin yaygınlaşması, giyilebilir teknolojilerin araştırma laboratuvarlarının dışına çıkarak günlük yaşamın bir parçası hâline gelmesini sağlamıştır. Çocuklar açısından bu durum, cihazın araştırma amacıyla kullanılan özel bir ölçüm aracı olmaktan ziyade günlük yaşamda kullanılabilen daha kabul edilebilir bir teknoloji hâline gelmesi bakımından önemlidir. Bununla birlikte tüketici tipi cihazların kullanım kolaylığı yüksek olsa da araştırma amaçlı ölçüm cihazlarıyla aynı ölçüm doğruluğunu her zaman sağlayamayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Creaser vd., 2021). Bu ayrım özellikle fiziksel aktivite yoğunluğunun ve sedanter geçirilen sürenin belirlenmesinde önem kazanmaktadır. Tüketici tipi giyilebilir cihazların çocuk ve adölesanlarda sedanter davranışı belirlemedeki doğruluğu üzerine yapılan çalışmalar arasında belirgin heterojenite olduğu ve cihazların karşılaştırma yöntemleriyle her zaman eşdeğer sonuçlar vermediği bildirilmiştir. Bu bulgu, günlük kullanım için tasarlanmış bir akıllı saatten elde edilen verinin araştırma amaçlı bir ölçüm cihazından elde edilen veriyle doğrudan eşdeğer kabul edilmemesi gerektiğini göstermektedir (Martinko vd., 2022).

Giyilebilir teknolojilerin çocuklarda kullanımındaki bir diğer önemli alan, 24 saatlik fiziksel davranışın değerlendirilmesidir. Bu yaklaşımda çocuğun gün içerisindeki fiziksel aktivite, sedanter davranış ve uyku süresi birbirinden tamamen bağımsız davranışlar olarak değil, aynı 24 saatlik zaman dilimini paylaşan davranışlar olarak ele alınmaktadır. Böylece fiziksel aktivitenin yalnızca “ne kadar yapıldığı” değil, günün geri kalan zamanının nasıl geçirildiği de değerlendirmeye dahil edilebilmektedir (Giurgiu vd., 2022). Bu yaklaşım çocukların fiziksel uygunluğunun değerlendirilmesi açısından özellikle önemlidir. Çünkü aynı miktarda fiziksel aktiviteye sahip iki çocuğun gün içerisindeki sedanter davranış ve uyku örüntüleri birbirinden farklı olabilir. Dolayısıyla gelecekte fiziksel uygunlukla ilişkili değerlendirmelerde yalnızca belirli bir test sırasında ortaya çıkan performansın değil, çocuğun günlük hareket davranışının daha geniş bir zaman perspektifi içerisinde ele alınması mümkün olabilir. Giyilebilir teknolojiler aynı zamanda fiziksel aktivitenin zamansal örüntüsünü inceleme fırsatı sağlamaktadır. Çocuğun gün boyunca toplam fiziksel aktivite süresinin yanı sıra aktivitenin günün hangi saatlerinde gerçekleştiği, aktivitenin kısa süreli veya daha uzun süreli dönemler şeklinde mi ortaya çıktığı ve hafta içi ile hafta sonu arasındaki farklılıklar incelenebilmektedir. Bu tür veriler, tek bir değerlendirme gününde elde edilemeyecek davranışsal bilgilerin ortaya çıkarılmasına katkı sağlayabilir.

Çocuklarda giyilebilir cihazların kullanımına ilişkin araştırmalar yalnızca ölçüm amacıyla sınırlı değildir. Bu cihazlar aynı zamanda çocuğa fiziksel aktivite düzeyi hakkında anlık geri bildirim sağlamak, günlük hedefler oluşturmak ve davranış değişikliğini desteklemek amacıyla da kullanılmaktadır. Giyilebilir aktivite takip cihazlarının çocuk ve adölesanlarda objektif olarak ölçülen günlük adım sayısını artırdığı, ancak orta-yüksek şiddette fiziksel aktivite üzerinde anlamlı bir etki göstermediği bildirilmiştir (Au vd., 2024).

Bu sonuç, giyilebilir teknolojilerin ölçüm aracı ile müdahale aracı arasındaki sınırın giderek ortadan kalktığını göstermesi bakımından dikkat çekicidir. Bir akıllı saat veya aktivite takip cihazı aynı anda hem fiziksel aktiviteyi kaydedebilmekte hem de çocuğa elde edilen sonuç üzerinden geri bildirim sağlayabilmektedir. Böylece değerlendirme süreci, yalnızca veri toplama aşamasından çıkarak davranışın izlenmesi ve değiştirilmesine yönelik bir sürecin parçası hâline gelebilmektedir. Çocuklarda giyilebilir teknoloji kullanımının uzun süreli sürdürülebilirliği her zaman garanti değildir. Cihazın fiziksel rahatsızlık oluşturmaması, cihazın çıkarılması veya unutulması, şarj gereksinimi, teknik sorunlar ve başlangıçta oluşan yenilik etkisinin zamanla azalması ölçüm sürekliliğini etkileyebilmektedir. Çocukların giyilebilir cihazları kullanmaya yönelik motivasyonlarının öz-izlem, hedef belirleme ve geri bildirimle desteklenebildiği; ancak teknik güçlüklerin ve cihazın yeniliğine bağlı geçici motivasyonun uzun dönemli kullanımı sınırlayabileceği bildirilmiştir (Creaser vd., 2021). Bu nedenle çocuklarda giyilebilir teknolojilerle değerlendirme planlanırken yalnızca cihazın teknik özellikleri değil, çocuğun cihazı kabul etmesi ve önerilen süre boyunca kullanabilmesi de dikkate alınmalıdır. Özellikle okul temelli araştırmalarda cihazın öğretmen, aile ve çocuk tarafından doğru anlaşılması; cihazın ne zaman takılacağı, hangi durumlarda çıkarılacağı ve ölçüm süresinin ne kadar olması gerektiği gibi konuların standartlaştırılması veri kalitesini doğrudan etkileyebilir.

Giyilebilir teknolojiler, çocuklarda fiziksel uygunluk değerlendirmesine süreklilik, objektiflik ve gerçek yaşam verisi kazandırma açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte bu teknolojilerin sağladığı çok sayıdaki veri, doğrudan fiziksel uygunluk düzeyi olarak yorumlanmamalı; cihazın ölçüm özellikleri, kullanılan algoritmalar ve hedef çocuğun özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Güncel yaklaşım, giyilebilir teknolojileri geleneksel değerlendirme yöntemlerinin alternatifini olarak değil, fiziksel uygunluğun günlük yaşam içerisindeki göstergelerini görünür hâle getiren ve değerlendirme sürecini zenginleştiren tamamlayıcı araçlar olarak ele almaktadır.

3. Bilgisayarlı Görme ve Yapay Zekâ Tabanlı Hareket Değerlendirmesi

Bilgisayarlı görme teknolojileri, dijital kameralar aracılığıyla elde edilen görüntülerin bilgisayar algoritmaları tarafından işlenerek insan hareketine ilişkin nicel verilerin elde edilmesini sağlayan yöntemlerdir. Son yıllarda bu teknolojilerin gelişmesiyle birlikte hareket değerlendirmesi için vücuda işaretleyici veya sensör yerleştirilmesine duyulan gereksinim giderek azalmakta ve kamera tabanlı, temassız değerlendirme yaklaşımları önem kazanmaktadır (Gao vd., 2025; Sulla-Torres vd., 2024). Bu dönüşüm özellikle çocuklarda dikkat çekicidir. Çocukların değerlendirme sırasında sensör veya işaretleyici takmak istememesi, hareketlerini doğal biçimde gerçekleştirmelerinin güçleşmesi ve değerlendirme ortamının çocuk için rahatsız edici olabilmesi, geleneksel hareket analizlerinin uygulanabilirliğini sınırlayabilmektedir. Kamera tabanlı sistemler ise değerlendirmeyi daha doğal bir ortamda gerçekleştirme ve çocuğun hareketini mümkün olduğunca müdahalesiz biçimde kaydetme olanağı sunmaktadır (Lam vd., 2023).

Bilgisayarlı görme sistemlerinin temelinde, görüntü içerisindeki insan vücudunun otomatik olarak algılanması ve hareket sırasında vücudun belirli anatomik noktalarının izlenmesi yer almaktadır. Bu süreçte baş, omuz, dirsek, el bileği, kalça, diz ve ayak bileği gibi anatomik noktalar dijital görüntü üzerinden belirlenebilmekte ve bu noktaların zaman içerisindeki konum değişikliklerinden hareket kinematiğine ilişkin bilgiler elde edilebilmektedir (Gao vd., 2025). Bu yaklaşım insan poz tahmini olarak adlandırılmaktadır. İnsan poz tahmini, bilgisayarlı görmenin önemli alt alanlarından biri olup tıp, spor bilimleri, rehabilitasyon ve fiziksel

uygunluk değerlendirmeleri gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Güncel sistemlerde derin öğrenme tabanlı algoritmalar kullanılarak tek bir görüntüden veya video dizisinden insan vücudunun iki ya da üç boyutlu eklem koordinatlarının tahmin edilmesi mümkün hâle gelmiştir (Gao vd., 2025).

Çocuklarda bu teknolojilerin kullanım alanlarından biri, hareket performansının nicel olarak değerlendirilmesidir. Kamera tarafından kaydedilen bir hareketin süresi, hareket genişliği, eklem açıları, hız ve hareketin farklı aşamalarındaki kinematik değişiklikler algoritmalar aracılığıyla hesaplanabilmektedir. Böylece değerlendirme yalnızca çocuğun belirli bir görevi tamamlayıp tamamlamadığına ilişkin gözlemsel bir karara dayanmamakta, hareketin özelliklerini sayısal olarak ifade eden veriler de üretilebilmektedir (Sulla-Torres vd., 2024). Bu açıdan bilgisayarlı görme teknolojilerinin önemli bir özelliği, hareketin sonucundan çok hareketin nasıl gerçekleştirildiğine ilişkin bilgi sağlayabilmesidir.

Bilgisayarlı görme teknolojilerinin bir diğer önemli kullanım alanı işaretleyicisiz hareket yakalama sistemleridir. Bu sistemlerde hareket sırasında çocuğun vücuduna reflektif işaretleyiciler veya özel sensörler yerleştirilmesine gerek kalmadan kamera görüntüsünden hareket verisi elde edilmektedir. Bu özellik çocuklar açısından değerlendirme sürecinin daha doğal ve daha az müdahaleci olmasını sağlayabilmektedir (Lam vd., 2023). İşaretleyicisiz hareket yakalama sistemleri, rehabilitasyon alanında da giderek daha fazla araştırılmaktadır. Sistematik incelemeler, bu teknolojilerin hareket kinematiğinin nicel olarak değerlendirilmesi açısından önemli bir potansiyel taşıdığını, ancak klinik ölçüm aracı olarak kullanımının hâlen gelişme aşamasında olduğunu göstermektedir (Lam vd., 2023).

Çocuklarda bu teknolojilerin özellikle nörogelişimsel ve nöromotor durumlarda önemli bir kullanım alanı bulunmaktadır. Yapay zekâ destekli işaretleyicisiz hareket yakalama sistemleri, çocukların doğal hareketlerinin değerlendirilmesi, motor gelişimin izlenmesi ve hareket bozukluklarının objektif göstergeler üzerinden takip edilmesi açısından araştırılmaktadır (Domènech-García vd., 2026). Çocuklarda yapay zekâ tabanlı hareket değerlendirmelerinin önemli bir potansiyele sahip olmakla birlikte henüz tamamen standartlaşmış bir yöntem olarak kabul edilemeyeceğini göstermektedir. Özellikle çocukların vücut oranlarının yaşla birlikte hızlı biçimde değişmesi, hareket becerilerinin gelişimsel özellik göstermesi ve farklı yaş gruplarının aynı algoritma tarafından farklı doğruluk düzeylerinde değerlendirilebilmesi, pediatrik uygulamalarda özel doğrulama çalışmalarını gerekli kılmaktadır (Domènech-García vd., 2026). Yapay zekânın bilgisayarlı görme sistemlerine eklenmesiyle birlikte teknolojinin rolü yalnızca hareketi kaydetmekten, hareketi sınıflandırmaya ve yorumlamaya doğru genişlemektedir. Makine öğrenmesi algoritmaları, kamera veya sensörlerden elde edilen çok sayıda hareket değişkenini birlikte değerlendirerek çocukların motor yeterlilik düzeylerinin sınıflandırılmasına veya belirli hareket örüntülerinin tanımlanmasına yardımcı olabilmektedir.

Postür değerlendirmesinde bilgisayarlı görmenin kullanılması, çocukların farklı açılardan alınan görüntülerinden anatomik noktaların belirlenmesine ve bu noktalar arasındaki ilişkilerin otomatik olarak analiz edilmesine olanak sağlayabilir. Bu yöntemler, değerlendirmecinin görsel kararına dayalı ölçümleri azaltarak daha objektif ve tekrarlanabilir değerlendirme modellerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bilgisayarlı görme ve yapay zekâ sistemlerinin performansı yalnızca kullanılan algoritmaya bağlı değildir. Kamera açısı, ışık koşulları, görüntü çözünürlüğü, çocuğun kıyafeti, arka plan, vücudun bazı bölümlerinin birbirini örtmesi ve hareketin hızının artması gibi faktörler anatomik noktaların doğru şekilde belirlenmesini güçleştirebilmektedir (Gao vd., 2025). Çocuklarda bu sorunlara gelişimsel farklılıklar da eklenmektedir. Küçük çocukların vücut oranları, hareket stratejileri ve motor becerileri daha

büyük çocuklardan farklı olduğundan, yetişkinler üzerinde geliştirilen bir algoritmanın çocuklarda aynı doğrulukla çalışacağı varsayılmaz. Bu nedenle çocuklarda kullanılacak yapay zekâ modellerinin mümkün olduğunca farklı yaş, cinsiyet, vücut yapısı ve hareket düzeylerini içeren veri setleriyle eğitilmesi ve bağımsız örneklemelerde doğrulanması gerekmektedir (Domènech-García vd., 2026).

Genel olarak değerlendirildiğinde bilgisayarlı görme ve yapay zekâ, çocuklarda fiziksel uygunluk değerlendirmesinde temassız, hızlı, tekrarlanabilir ve nicel veri sağlayabilen yeni bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır. Özellikle akıllı telefon kameralarının gelişmesi, derin öğrenme tabanlı algoritmalarının yaygınlaşması ve makine öğrenmesi yöntemlerinin hareket verilerinin yorumlanmasında kullanılabilmesi, bu teknolojilerin saha ve okul ortamlarında kullanım olasılığını artırmaktadır (Sulla-Torres vd., 2024; Gao vd., 2025). Bununla birlikte mevcut kanıtlar, bu teknolojilerin çocuklarda rutin fiziksel uygunluk değerlendirmesinin tamamen yerine geçtiğini söylemek için henüz yeterli değildir. Özellikle pediatrik popülasyonlarda dış doğrulama çalışmalarının artırılması, farklı yaş gruplarında ölçüm hatasının belirlenmesi, standart protokollerin oluşturulması ve yapay zekâ çıktılarının klinik açıdan anlamlandırılması gerekmektedir (Domènech-García vd., 2026). Bu nedenle bilgisayarlı görme ve yapay zekâ tabanlı sistemlerin günümüzdeki en uygun kullanım alanı, mevcut değerlendirme yaklaşımlarını ortadan kaldırmaktan çok hareketin daha objektif, ayrıntılı ve sürekli biçimde incelenmesini sağlayan tamamlayıcı dijital araçlar olarak görülmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gelecekte kamera, sensör ve yapay zekâ sistemlerinin aynı değerlendirme platformunda birleştirilmesi ve çocuğun hareket performansına ilişkin daha kapsamlı bireysel profiller oluşturulması mümkün olabilir.

4. Mobil Teknolojiler ve Uzaktan Değerlendirme

Mobil teknolojilerin yaygınlaşması, çocuklarda fiziksel uygunluk değerlendirmesinin yalnızca okul, klinik veya laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilen planlı ölçümlerle sınırlı kalmamasını sağlamıştır. Akıllı telefonlar, tabletler ve bunlar üzerinde çalışan mobil uygulamalar; fiziksel aktivite davranışlarının izlenmesi, hareket verilerinin kaydedilmesi, değerlendirme protokollerinin uygulanması ve sonuçların zaman içerisinde takip edilmesi amacıyla kullanılabilir (Nasruddin vd., 2023). Bu yaklaşım, özellikle çocuğun günlük yaşamındaki fiziksel davranışlarının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Geleneksel değerlendirmelerde çocuk belirli bir zamanda ve belirli bir ortamda test edilirken, mobil teknolojiler sayesinde değerlendirme gün içerisinde farklı zamanlarda tekrarlanabilmekte ve daha uzun süreli veri toplanabilmektedir. Böylece çocuğun yalnızca belirli bir andaki performansından ziyade günlük yaşam içerisindeki hareket davranışları hakkında bilgi elde etmek mümkün hâle gelmektedir (Nasruddin vd., 2023).

Akıllı telefonların sahip olduğu ivmeölçer, jiroskop, GPS ve kamera gibi donanımlar, farklı türde hareket verilerinin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellikler sayesinde adım sayısı, hareket süresi, hareket yoğunluğu, konum değişikliği ve bazı durumlarda hareket örüntüleri gibi değişkenler doğrudan cihaz üzerinden veya cihazla ilişkili uygulamalar aracılığıyla kaydedilebilmektedir. Bununla birlikte elde edilen verinin fiziksel uygunluğun doğrudan bir ölçümü olarak kabul edilmemesi, ölçülen değişkenin neyi temsil ettiğinin açık biçimde tanımlanması gerekmektedir. Mobil uygulamalar aynı zamanda değerlendirme sürecinin standardizasyonuna katkı sağlayabilir. Örneğin belirli bir hareket görevinin başlangıç ve bitişi uygulama tarafından tanımlanabilir, çocuğa standart yönergeler sunulabilir ve değerlendirme sonucunda elde edilen veriler otomatik olarak kaydedilebilir. Bu durum özellikle

çok sayıda çocuğun değerlendirildiği okul temelli çalışmalarda değerlendiriciye bağlı farklılıkların azaltılmasına yardımcı olabilir.

Mobil teknolojilerin çocuklarda fiziksel uygunluk değerlendirmesindeki rolü yalnızca veri toplamakla sınırlı değildir. Mobil uygulamalar aynı zamanda değerlendirme sonucunun çocuğa veya ebeveyne geri bildirilmesini ve fiziksel aktivite davranışlarının izlenmesini sağlayabilir. Örneğin uygulama üzerinden günlük hareket düzeyi, hedeflere ulaşma durumu veya zaman içerisindeki değişim grafiklerle gösterilebilir. Böylece değerlendirme tek seferlik bir ölçüm olmaktan çıkarak izlem sürecinin bir parçasına dönüşebilir. Mobil uygulamalar, fiziksel uygunluk değerlendirmesinin yanı sıra değerlendirme ile müdahale arasındaki sınırı da kısmen ortadan kaldırılabilmektedir. Bir uygulama önce çocuğun mevcut hareket davranışını değerlendirebilir, daha sonra elde edilen sonuca göre fiziksel aktivite hedefleri oluşturabilir ve sonraki günlerde yeni verileri kullanarak ilerlemeyi takip edebilir. Böylece değerlendirme, müdahaleden bağımsız bir işlem olmaktan çıkarak sürekli geri bildirim sağlayan dinamik bir sürecin parçası hâline gelebilir (Creaser vd., 2021; Nasruddin vd., 2023).

Mobil teknolojilerin bir diğer önemli kullanım alanı uzaktan değerlendirmedir. Uzaktan değerlendirmede çocuk, değerlendirmeyi gerçekleştiren uzmanla aynı fiziksel ortamda bulunmadan kamera veya görüntülü görüşme sistemleri aracılığıyla değerlendirilebilmektedir. Bu yaklaşım özellikle coğrafi olarak sağlık veya rehabilitasyon hizmetlerine erişimi sınırlı olan çocuklar açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Uzaktan değerlendirmede akıllı telefon, tablet veya bilgisayar kamerası aracılığıyla çocuğun gerçekleştirdiği hareketler gözlemlenebilir ve değerlendirmeyi yapan tarafından standart bir protokol doğrultusunda puanlanabilir. Daha gelişmiş sistemlerde ise video kaydı dijital olarak analiz edilerek belirli hareket özelliklerinin otomatik biçimde çıkarılması mümkün olabilir. Bu nedenle uzaktan değerlendirme, önceki bölümde ele alınan bilgisayarlı görme teknolojileriyle de bütünleşebilen bir yapı göstermektedir (Klein vd., 2025; Lam vd., 2023).

Çocuklarda uzaktan değerlendirme yapılırken çocuğun değerlendirme yönergelerini doğru anlaması ve uygulaması, ebeveynin veya başka bir yetişkinin gerektiğinde sürece destek olması ve değerlendirme alanının uygunluğu gibi faktörler önem kazanmaktadır. Ayrıca ev ortamındaki zemin, alan genişliği, kamera konumu ve aydınlatma koşulları her çocukta farklı olabilir. Bu durum, yüz yüze standart bir değerlendirme ortamına kıyasla ölçüm koşullarında daha fazla değişkenlik meydana getirebilir (Klein vd., 2025). Bu nedenle uzaktan değerlendirmede yalnızca kullanılacak uygulamanın veya görüntülü görüşme platformunun seçilmesi yeterli değildir. Kamera uzaklığı, kamera yüksekliği, görüntü açısı, çocuğun değerlendirme alanındaki konumu, kullanılacak ekipman ve hareketlerin uygulanma sırası mümkün olduğunca standartlaştırılmalıdır. Değerlendirme öncesinde çocuğa ve ebeveyne kısa ve açık bir teknik yönerge verilmesi, veri kalitesinin artırılması açısından önemlidir (Klein vd., 2025).

Sonuç olarak mobil teknolojiler ve uzaktan değerlendirme sistemleri, çocuklarda fiziksel uygunluk değerlendirmesini değerlendirme merkezinden çocuğun günlük yaşamına taşıma potansiyeline sahiptir. Akıllı telefon ve tablet uygulamaları kısa süreli ölçümlerin yanı sıra uzun süreli fiziksel aktivite izlemine destekleyebilir; görüntülü görüşme ve uzaktan değerlendirme sistemleri ise uzman ile çocuk arasındaki fiziksel mesafeyi azaltabilir. Bununla birlikte mevcut kanıtlar, özellikle çocuklarda uzaktan fiziksel uygunluk değerlendirmesine ilişkin araştırmaların hâlen sınırlı olduğunu göstermektedir (Klein vd., 2025). Bu nedenle mobil teknolojilerin gelecekteki rolü, geleneksel değerlendirmelerin tamamen ortadan kaldırılmasından çok, değerlendirme, izlem ve geri bildirim süreçlerini birbirine bağlayan

dijital bir değerlendirme katmanı oluşturmak şeklinde düşünülebilir. Mobil uygulamalardan elde edilen verilerin giyilebilir teknolojilerden gelen veriler ve kamera tabanlı hareket analizleriyle birleştirilmesi ise çocukların fiziksel uygunluğunun daha kapsamlı ve bireyselleştirilmiş biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayabilir.

5. Çoklu Dijital Verilerin Bütünleştirilmesi ve Kişiselleştirilmiş Değerlendirme

Çocuklarda dijital değerlendirme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte fiziksel uygunluğun yalnızca tek bir test veya tek bir cihaz üzerinden değerlendirilmesinden, farklı kaynaklardan elde edilen verilerin birlikte ele alındığı daha bütüncül bir değerlendirme yaklaşımına doğru geçiş söz konusudur (Giurgiu vd., 2022; Au vd., 2024). Giyilebilir cihazlar çocuğun günlük yaşam içerisindeki fiziksel aktivite ve hareket davranışına ilişkin uzun süreli bilgi sağlayabilirken, kamera tabanlı sistemler belirli bir hareketin gerçekleştirilme biçimi ve hareket kinematiği hakkında daha ayrıntılı veri üretebilmektedir (Giurgiu vd., 2022; Domènech-García vd., 2026). Mobil teknolojiler ise bu verilerin kaydedilmesi, izlenmesi ve kullanıcıya sunulması açısından bir bağlantı noktası oluşturabilmektedir (Nasruddin vd., 2023).

Verilerin bütünleştirilmesi yalnızca teknik bir işlem değildir; aynı zamanda hangi değişkenlerin birlikte yorumlanacağını belirlenmesini gerektirir (Sulla-Torres vd., 2024). Bu noktada veri füzyonu kavramı önem kazanmaktadır. Veri füzyonu, farklı sensör veya değerlendirme kaynaklarından elde edilen bilgilerin ortak bir analiz yapısı içerisinde birleştirilmesini ifade etmektedir. Fiziksel aktivite araştırmalarında çoklu sensör kullanımının yaygınlaşması, farklı davranış göstergelerinin aynı değerlendirme çerçevesinde ele alınabilmesini mümkün hâle getirmektedir (Giurgiu vd., 2022; Zhang vd., 2024). Yapay zekâ ve makine öğrenmesi yöntemleri de bu çoklu veri yapısının analizinde kullanılabilir. Çok sayıda değişkenin aynı anda değerlendirilmesi, insan gözlemi veya basit istatistiksel karşılaştırmalarla fark edilmesi güç olan veri örüntülerinin belirlenmesine olanak sağlayabilir (Sulla-Torres vd., 2024; Domènech-García vd., 2026). Böylece algoritmalar, farklı veri kaynaklarından elde edilen bilgileri kullanarak hareket veya fiziksel aktivite profillerinin sınıflandırılmasına yardımcı olabilir. Ancak yapay zekâ tarafından üretilen bir sınıflandırmanın doğrudan klinik veya gelişimsel bir sonuç olarak kabul edilmesi doğru değildir. Bir algoritmanın teknik olarak yüksek doğruluk göstermesi, elde edilen sınıflandırmanın çocuk açısından anlamlı veya karar vermede yeterli olduğu anlamına gelmeyebilir (Domènech-García vd., 2026). Bu nedenle yapay zekâ modellerinin teknik performanslarının yanında bağımsız örneklemelerdeki geçerliği, ölçüm hatası ve gerçek yaşam koşullarındaki uygulanabilirliği de değerlendirilmelidir.

Çoklu dijital verilerin bütünleştirilmesinin bir diğer önemli sonucu, değerlendirmelerin kişiselleştirilebilmesidir. Geleneksel değerlendirmelerde çocuğun performansı çoğunlukla yaş ve cinsiyete göre oluşturulmuş referans değerlerle karşılaştırılırken, dijital sistemler çocuğun önceki performansını, günlük fiziksel aktivite düzeyini ve zaman içerisindeki bireysel değişimini de değerlendirmeye dâhil edebilir (Tomkinson vd., 2018; Au vd., 2024).

Dijital sistemlerin sunduğu sürekli veri izlem ve erken fark etme aracı olarak daha anlamlı olabilir. Özellikle fiziksel aktivite davranışında belirgin değişiklikler veya hareket performansında zaman içerisinde ortaya çıkan farklılıklar, daha ayrıntılı bir değerlendirme gerektiren durumların belirlenmesine yardımcı olabilir (Zhang vd., 2024). Çoklu dijital verilerin bütünleştirilmesi aynı zamanda değerlendirme sonuçlarının görsel olarak sunulmasını kolaylaştırmaktadır. Fiziksel aktivite düzeyindeki değişim, hareket performansındaki gelişim veya belirli parametrelerin zaman içerisindeki seyri grafikler ve dijital raporlar aracılığıyla gösterilebilir (Nasruddin vd., 2023). Bu tür görselleştirmeler, teknik verilerin çocuk, ebeveyn

ve sağlık profesyoneli tarafından daha kolay anlaşılmasına katkı sağlayabilir. Çok fazla sayıda değişkenin aynı anda sunulması, değerlendirme sonucunun anlaşılmasını gúçlendirebilir. Bu nedenle dijital değerlendirme sistemlerinde amaç múmkún olduğunca fazla veri úretmek değil, karar vermeye anlamlı katkı sağlayan verileri seçmek ve anlaşılır biçimde sunmak olmalıdır (Zhang vd., 2024). Ózellikle çocuklara yónelik sistemlerde karmaşık teknik góstergelerin doğrudan sunulması yerine, gelişim düzeyine uygun ve anlaşılır geri bildirimler tercih edilmelidir.

Çoklu dijital verilerin bütúneřtirilmesi, çocuklarda fiziksel uygunluk değerlendirmesinin geleceğinde önemli bir dönüşüm alanı oluşturmaktadır. Giyilebilir teknolojiler gúnlük fiziksel davranışı, kamera sistemleri hareketin niteliğini, mobil uygulamalar ise değerlendirme ve izlem sürecini destekleyerek birbirini tamamlayan bilgi kaynakları oluşturabilir (Giurgiu vd., 2022; Sulla-Torres vd., 2024). Bu yaklaşımın temel katkısı, şocuğun fiziksel uygunluğunun tek bir zamanda elde edilen tek bir sonuştan ziyade, çok boyutlu ve zaman içerisinde değerşen bireysel bir profil olarak ele alınabilmesidir. Bununla birlikte bu potansiyelin gerçek anlamda kullanılabilmesi için ölçümlerin geçerli ve güvenilir olması, farklı veri kaynaklarının uyumlu biçimde birleştirilmesi ve yapay zekâ modellerinin pediatrik popúlyasyonlarda yeterince doğrulanması gerekmektedir (Martinko vd., 2022; Doménech-García vd., 2026). Dolayısıyla dijital teknolojilerin gelecekteki yónelimi yalnızca daha fazla veri toplamak değil, daha anlamlı, kişiye özgü ve klinik olarak yorumlanabilir veri üretmek olmalıdır. Bu dönüşüm, bir sonraki bölümde ele alınacak olan dijital değerlendirme araçlarının geçerlik, güvenilirlik ve uygulanabilirlik özelliklerinin neden kritik olduğunu da ortaya koymaktadır.

6. Dijital Değerlendirmelerde Geçerlik, Güvenirlik ve Uygulanabilirlik

Çocuklarda dijital teknolojilerin fiziksel uygunluk ve hareket değerlendirmesinde giderek daha fazla kullanılması, bu teknolojilerin ölçüm özelliklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesini gerekli kılmaktadır. Bir dijital cihazın veya uygulamanın teknik olarak ölçüm yapabilmesi, onun geçerli ve güvenilir bir değerlendirme aracı olduğu anlamına gelmemektedir. Bu nedenle dijital değerlendirme araçlarının ölçüm doğruluğu, tekrarlanabilirliği ve gerçek yaşam koşullarındaki uygulanabilirliği bağımsız şalışmalarla ortaya konmalıdır (Giurgiu vd., 2022; van Moorsel vd., 2024).

Dijital değerlendirme araçlarında temel ölçüm özelliklerinden biri geğerliktir. Kullanılan yöntemin ölçmeyi amaçladığı özelliği ne ölçüde doğru ölçtüğünün belirlenmesi için elde edilen verilerin kabul edilmiş bir referans yöntemle karşılaştırılması gerekir (Martinko vd., 2022). Bununla birlikte yüksek korelasyon tek başına iki yöntemin bireysel düzeyde birbirinin yerine kullanılabileceğini göstermemektedir. Bu nedenle sistematik farklılıklar, ölçüm hataları ve bireysel uyum gibi özelliklerin de değerlendirilmesi önemlidir (Martinko vd., 2022). Çocuklarda bu doğrulama süreci ayrıca önem taşımaktadır; çünkü adım uzunluğu, hareket hızı, vücut oranları ve hareket biçimleri gelişimle birlikte değerşmekte, dolayısıyla yetişkinlerde doğrulanmış bir cihaz veya algoritmanın çocuklarda aynı ölçüm doğruluğunu göstermesi garanti edilememektedir (Giurgiu vd., 2022; Clanchy vd., 2024).

Güvenirlik ve ölçüm standardizasyonu da dijital değerlendirmelerin önemli bileşenleridir. Giyilebilir cihazlarda sensörün vücuttaki konumu, cihazın yerleştirilme biçimi ve değerlendirme sırasında yer değerştirmesi; kamera tabanlı sistemlerde ise kamera konumu, çekim açısı, aydınlatma, kamera ile çocuk arasındaki mesafe ve hareket alanındaki pozisyon ölçüm sonuçlarını etkileyebilmektedir (Giurgiu vd., 2022; Gao vd., 2025). Ayrıca örnekleme sıklığı ve ham verilerin işlenme biçimi, özellikle çocuklarda kısa süreli ve aralıklı fiziksel

aktivitelerin doğru sınıflandırılması açısından önemlidir (Clanchy vd., 2024; Giurgiu vd., 2022). Bu nedenle cihazın teknik özelliklerinin yanı sıra kullanım protokolünün ayrıntılı biçimde tanımlanması, ölçümlerin tekrarlanabilirliğini ve çalışmalar arasındaki karşılaştırılabilirliği artırmaktadır.

Kamera tabanlı yapay zekâ sistemlerinde ölçüm doğruluğu; görüntü kalitesi, kamera açısı, vücudun bazı bölümlerinin birbirini örtmesi, ışık koşulları ve hareketin karmaşıklığı gibi faktörlerden etkilenebilmektedir (Gao vd., 2025). Çocuklarda büyüme ve gelişmeye bağlı vücut oranlarındaki farklılıklar bu sorunlara eklenmektedir (Domènech-García vd., 2026). Bu nedenle yapay zekâ tabanlı değerlendirme sistemlerinin pediatrik veri setleriyle geliştirilmesi veya çocuklardan oluşan bağımsız örneklerde doğrulanması önemlidir. Yetişkin verileriyle geliştirilen bir modelin çocuklarda aynı performansı göstermemesi, dijital değerlendirmelerde dış geçerliğin ayrıca ele alınması gerektiğini göstermektedir (Domènech-García vd., 2026).

Bir dijital sistemin bilimsel olarak geçerli ve güvenilir olması, gerçek yaşam koşullarında kullanılabilir olduğu anlamına gelmemektedir. Uygulanabilirlik; kullanım kolaylığı, değerlendirme süresi, teknik gereksinimler, maliyet, eğitim ihtiyacı ve çocuklar ile ebeveynlerin sistemi kabul etmesi gibi faktörleri kapsamaktadır (Creaser vd., 2021). Çocuğun cihazı taşımak istememesi, uygulamayı kullanmayı unutması veya değerlendirme sırasında dikkatinin dağılması, teknik olarak doğru çalışan bir sistemin yeterli veri üretmesini engelleyebilir. Laboratuvar temelli sistemler yüksek doğruluk sağlayabilse de maliyet ve uzman personel gereksinimi kullanım alanını sınırlandırabilirken, akıllı telefon veya tablet tabanlı sistemler daha geniş kullanıcı gruplarına ulaşma potansiyeline sahiptir; ancak bu sistemlerin ölçüm doğruluğu ve standardizasyonu ayrıca değerlendirilmelidir (Sulla-Torres vd., 2024).

Dijital sistemlerin önemli avantajlarından biri bazı ölçümlerin otomatik olarak gerçekleştirilmesine ve çok sayıda çocuğun daha kısa sürede değerlendirilmesine olanak sağlamasıdır (Sulla-Torres vd., 2024). Bununla birlikte otomasyon ölçüm hatasını ortadan kaldırmamaktadır. Hatalı bir verinin otomatik olarak işlenmesi, hatanın doğrudan değerlendirme sonucuna yansımaya neden olabilir. Bu nedenle görüntü kalitesi, sensör yerleşimi ve veri yeterliliğinin otomatik olarak kontrol edilmesi; gerektiğinde düşük kaliteli ölçümlerin yeniden alınması gibi kalite kontrol mekanizmalarının dijital değerlendirme protokollerine dâhil edilmesi önemlidir (Domènech-García vd., 2026). Sonuç olarak çocuklarda dijital değerlendirme araçlarının seçiminde teknolojik olanakların yanı sıra geçerlik, güvenilirlik, dış geçerlik ve gerçek yaşam koşullarındaki uygulanabilirlik birlikte değerlendirilmelidir.

7. Etik, Veri Güvenliği ve Çocuklara Özgü Hususlar

Çocuklarda dijital teknolojilerin fiziksel uygunluk ve hareket değerlendirmesinde kullanılması, ölçüm doğruluğu ve teknolojik yeterliliğin yanında önemli etik sorumlulukları da beraberinde getirmektedir. Giyilebilir cihazlar, akıllı telefonlar, kamera sistemleri ve mobil uygulamalar çocuklara ilişkin yalnızca fiziksel performans verisi değil, aynı zamanda davranışsal, konumsal ve bazı durumlarda biyometrik nitelikte bilgiler üretebilmektedir (Andreoletti vd., 2024; Sivakumar vd., 2024). Çocukların gelişimsel olarak korunmaya daha fazla ihtiyaç duyan bir grup olması, bu verilerin toplanması ve işlenmesinde yetişkinlere yönelik uygulamalardan daha dikkatli bir yaklaşım gerektirmektedir.

Dijital değerlendirmelerde ilk temel etik konu bilgilendirilmiş onamdır. Çocukların dijital araçlarla değerlendirilmesinde ebeveyn veya yasal temsilcinin bilgilendirilmiş onamının alınması gerekirken, çocuğun gelişimsel düzeyine uygun biçimde süreç hakkında

bilgilendirilmesi ve mümkün olduğunda değerlendirmeye yönelik isteğinin de dikkate alınması önemlidir. Çocuğun yaşına ve bilişsel düzeyine uygun açıklama yapılması, yalnızca hukuki bir gereklilik olarak değil, çocuğun araştırma veya değerlendirme sürecine aktif katılımının sağlanması açısından da önem taşımaktadır. Özellikle araştırma amaçlı dijital değerlendirmelerde çocuğa hangi verilerin toplanacağı, bu verilerin neden gerekli olduğu, ne kadar süreyle saklanacağı ve kimlerin erişebileceği mümkün olduğunca anlaşılır biçimde açıklanmalıdır. Çocuğun veya ebeveynin anlamakta zorlanacağı teknik ifadelerin kullanılması, gerçek anlamda bilgilendirilmiş bir onam sürecini zayıflatabilir (World Health Organization, 2021).

Kamera tabanlı değerlendirmeler bu açıdan özel bir önem taşımaktadır. Bir çocuğun video görüntüsü yalnızca fiziksel uygunluk verisi değil, aynı zamanda doğrudan kişiyi tanımlayabilecek görsel bilgi içermektedir. Görüntülerin depolanması, araştırmacılar arasında paylaşılması veya bulut tabanlı yapay zekâ sistemlerine aktarılması, çocuğun mahremiyeti açısından ek riskler oluşturmaktadır (Sivakumar vd., 2024). Bu nedenle video tabanlı değerlendirmelerde mümkün olduğunca veri minimizasyonu ilkesi benimsenmelidir. Yani araştırmanın veya değerlendirmenin amacını gerçekleştirmek için gerekli olmayan kişisel veriler toplanmamalı ve gereğinden uzun süre saklanmamalıdır (Crepax vd., 2022). GPS veya konum bilgisi içeren sistemlerde mahremiyet riski daha da artmaktadır. Çocuğun okul, ev, spor alanı veya başka bir yerde bulunduğunu gösteren konum verileri, fiziksel aktivite değerlendirmesinin ötesinde çocuğun günlük yaşamına ilişkin ayrıntılı bir profil oluşturabilir. Bu nedenle konum verilerinin toplanması yalnızca araştırma sorusu açısından gerçekten gerekli olduğunda düşünülmeli ve mümkün olduğunca düşük çözünürlükte veya anonimleştirilmiş biçimde işlenmelidir (Fahlquist, 2015). Ayrıca araştırmacıların kullandıkları ticari cihazların veri sahipliği politikalarını bilmesi önemlidir. Bazı ticari cihazlar verileri üretici firmaların sunucularına aktarabilmekte veya kullanıcıların açıkça farkında olmadığı ikincil veri işleme süreçlerine sahip olabilmektedir (Sivakumar vd., 2024). Çocuklarda bu tür sistemlerin kullanılması planlanıyorsa cihazın veri toplama ve paylaşım politikaları araştırma başlamadan önce incelenmelidir.

Dijital verilerin saklanma biçimi de önemli bir etik konudur. Özellikle ücretsiz veya ticari mobil uygulamalarda kullanıcıların verilerinin hangi sunucularda tutulduğu, üçüncü taraflarla paylaşılıp paylaşılmadığı ve verilerin ne kadar süreyle saklandığı her zaman açık olmayabilir (Sivakumar vd., 2024). Bu nedenle çocuklarda dijital değerlendirme için kullanılan uygulama ve cihazların yalnızca teknik özellikleri değil, veri politikaları ve gizlilik uygulamaları da değerlendirilmelidir. Bir uygulamanın kullanışlı ve düşük maliyetli olması, çocuklara ait verilerin güvenli biçimde işlendiği anlamına gelmemektedir (Andreoletti vd., 2024).

Çocukların dijital değerlendirmeye ilişkin görüşlerinin alınması, kullanıcı merkezli tasarım açısından önemlidir. Çocukların teknolojiyi nasıl deneyimlediği, hangi özellikleri kolay veya zor bulduğu ve değerlendirme sırasında kendilerini rahat hissedip hissetmedikleri, sistemin gerçek yaşamda sürdürülebilirliğini etkileyebilir (Creaser vd., 2021). Bu nedenle çocukların yalnızca “ölçülen birey” değil, aynı zamanda dijital değerlendirme sistemlerinin geliştirilmesinde görüşleri dikkate alınan kullanıcılar olarak ele alınması uygun olacaktır. Etik açıdan ideal dijital değerlendirme sistemi, mümkün olan en fazla veriyi toplayan sistem değildir. Bunun yerine yalnızca değerlendirme amacı için gerekli olan veriyi toplayan, veriyi güvenli biçimde saklayan, çocuğun ve ailenin süreç hakkında anlayabileceği şekilde bilgilendirilmesini sağlayan ve gerektiğinde insan değerlendirmesine başvuru sistemler daha sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır (Andreoletti vd., 2024; Sivakumar vd., 2024).

Çocuklarda dijital fiziksel uygunluk değerlendirmesi, teknolojik yenilik ile etik sorumluluğun birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Çocuğun mahremiyeti, veri güvenliği, ebeveyn onamı, çocuğun sürece katılımı, algoritmik adalet ve dijital eşitlik değerlendirme sürecinin ayrılmaz parçaları olmalıdır (Crepax vd., 2022; Fahlquist, 2015). Bu sayede dijital teknolojiler çocukların fiziksel uygunluğunu değerlendirmede yalnızca teknik olarak gelişmiş değil, aynı zamanda çocuk haklarına duyarlı ve etik açıdan sürdürülebilir araçlar hâline gelebilecektir.

8. Sonuç

Dijital teknolojiler, çocuklarda fiziksel uygunluğun değerlendirilmesinde ölçüm sürecinin kapsamını genişleten ve değerlendirmelerin farklı ortamlarda gerçekleştirilebilmesine olanak sağlayan önemli araçlar hâline gelmiştir. Giyilebilir teknolojiler, mobil uygulamalar, bilgisayarlı görme ve yapay zekâ tabanlı sistemler sayesinde çocukların hareket ve fiziksel performanslarına ilişkin daha fazla veri elde edilebilmekte ve bu veriler farklı zaman noktalarında izlenebilmektedir. Bununla birlikte dijital değerlendirme yöntemlerinin kullanımında teknolojik olanakların bilimsel gerekliliklerin önüne geçmemesi gerekir. Kullanılan sistemlerin çocuklarda geçerlik, güvenirlik ve uygulanabilirlik özelliklerinin ortaya konulması; farklı yaş ve gelişim düzeylerinde performanslarının değerlendirilmesi ve elde edilen sonuçların uygun biçimde yorumlanması önem taşımaktadır. Ayrıca veri güvenliği, mahremiyet, çocuk ve ebeveyn onamı ile dijital eşitsizlik gibi konular değerlendirme sürecinin ayrılmaz parçaları olarak ele alınmalıdır. Gelecekte dijital teknolojilerin daha fazla veri kaynağını bir araya getiren, bireysel farklılıkları dikkate alan ve uzun dönemli değişimleri izleyebilen değerlendirme sistemlerine dönüşmesi beklenmektedir. Bu gelişim sürecinde dijital yöntemlerin geleneksel değerlendirmelerin alternatifi olarak değil, uygun olduğunda onları tamamlayan araçlar olarak ele alınması daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Sonuç olarak, çocuklarda fiziksel uygunluğun dijital değerlendirilmesi; bilimsel olarak doğrulanmış teknolojilerin, gelişimsel özelliklerin ve etik ilkelerin birlikte değerlendirildiği bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir. Bu yaklaşım, çocukların fiziksel uygunluğunun daha kapsamlı ve sürdürülebilir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynakça

- Andreoletti, M., Haller, L., Vayena, E., & Blasimme, A. (2024). Mapping the ethical landscape of digital biomarkers: A scoping review. *PLOS Digital Health*, 3(5), e0000519. <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000519>
- Au, W. W., Recchia, F., Fong, D. Y., Wong, S. H. S., Chan, D. K. C., Capio, C. M., Yu, C. C. W., Wong, S. W. S., Sit, C. H. P., Ip, P., Chen, Y. J., Thompson, W. R., & Siu, P. M. (2024). Effect of wearable activity trackers on physical activity in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *The Lancet Digital Health*, 6(9), e625–e639. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(24\)00139-0](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(24)00139-0)
- Creaser, A. V., Clemes, S. A., Costa, S., Hall, J., Ridgers, N. D., Barber, S. E., & Bingham, D. D. (2021). The acceptability, feasibility, and effectiveness of wearable activity trackers for increasing physical activity in children and adolescents: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(12), 6211. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126211>
- Clanchy, K., Stanfield, M., Smits, E., Liimatainen, J., & Ritchie, C. (2024). Calibration and validation of physical behaviour cut-points using wrist-worn ActiGraphs for children and adolescents: A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 27(2), 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2023.11.008>
- Crepax, T., Muntés-Mulero, V., Martinez, J., & Ruiz, A. (2022). Information technologies exposing children to privacy risks: Domains and children-specific technical controls. *Computer Standards & Interfaces*, 82, 103624. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2022.103624>
- Domènech-García, G., Marimon, X., Carrasco-Urribarren, A., Portela, A. E., & Bagur-Calafat, C. (2026). Markerless motion capture for human movement estimation using artificial intelligence: A systematic review. *Pediatric Reports*, 18(4), 83. <https://doi.org/10.3390/pediatric18040083>
- Fahlquist, J. N. (2015). Responsibility and privacy—Ethical aspects of using GPS to track children. *Children & Society*, 29(1), 38–47. <https://doi.org/10.1111/chso.12016>
- Gao, Z., Chen, J., Liu, Y., Jin, Y., & Tian, D. (2025). A systematic survey on human pose estimation: Upstream and downstream tasks, approaches, lightweight models, and prospects. *Artificial Intelligence Review*, 58, 68. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11060-2>
- Giurgiu, M., Kolb, S., Nigg, C., Burchartz, A., Timm, I., Becker, M., Rulf, E., Doster, A. K., Koch, E., Bussmann, J. B. J., Nigg, C., Ebner-Priemer, U. W., & Woll, A. (2022). Assessment of 24-hour physical behaviour in children and adolescents via wearables: A systematic review of free-living validation studies. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 8(2), e001267. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2021-001267>

- Klein, T., Worth, A., Niessner, C., & Hanssen-Doose, A. (2025). Remote assessment of physical fitness via videoconferencing: A systematic review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17, 11. <https://doi.org/10.1186/s13102-024-01050-w>
- Lam, W. W. T., Tang, Y. M., & Fong, K. N. K. (2023). A systematic review of the applications of markerless motion capture (MMC) technology for clinical measurement in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 20, 57. <https://doi.org/10.1186/s12984-023-01186-9>
- Martinko, A., Karuc, J., Jurić, P., Podnar, H., & Sorić, M. (2022). Accuracy and precision of consumer-grade wearable activity monitors for assessing time spent in sedentary behavior in children and adolescents: Systematic review. *JMIR mHealth and uHealth*, 10(8), e37547. <https://doi.org/10.2196/37547>
- Nasruddin, N. I. N., Murphy, J., & Armstrong, M. E. G. (2023). Physical activity surveillance in children and adolescents using smartphone technology: Systematic review. *JMIR Pediatrics and Parenting*, 6, e42461. <https://doi.org/10.2196/42461>
- Sivakumar, C. L. V., Mone, V., & Abdumukhtor, R. (2024). Addressing privacy concerns with wearable health monitoring technology. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 14(3), e1535. <https://doi.org/10.1002/widm.1535>
- Sulla-Torres, J., Santos-Pamo, B., Cárdenas-Rodríguez, F., Angulo-Osorio, J., Gómez-Campos, R., & Cossio-Bolaños, M. (2024). Multiplatform computer vision system to support physical fitness assessments in schoolchildren. *Applied Sciences*, 14(16), 7140. <https://doi.org/10.3390/app14167140>
- Tomkinson, G. R., Carver, K. D., Atkinson, F., Daniell, N. D., Lewis, L. K., Fitzgerald, J. S., Lang, J. J., & Ortega, F. B. (2018). European normative values for physical fitness in children and adolescents aged 9–17 years: Results from 2,779,165 Eurofit performances representing 30 countries. *British Journal of Sports Medicine*, 52(22), 1445–1456. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-098253>
- van Moorsel, H., Engels, B., Buczny, J., Gorter, J. W., Arbour-Nicitopoulos, K. P., Takken, T., Engelbert, R. H. H., & Bloemen, M. A. T. (2024). Psychometrics of wearable devices measuring physical activity in ambulant children with gait abnormalities: A systematic review and meta-analysis. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*, 6(4), 100384. <https://doi.org/10.1016/j.arrct.2024.100384>
- World Health Organization. (2021). *Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Yang, J., Casey, A., & Cale, L. (2024). The influence of healthy lifestyle technologies on young people's physical activity participation and health learning: A systematic review. *Quest*, 76(1), 72–92. <https://doi.org/10.1080/00336297.2023.2218038>
- Zhang, W., Xiong, K., Zhu, C., Evans, R., Zhou, L., & Podrini, C. (2024). Promoting child and adolescent health through wearable technology: A systematic review. *Digital Health*, 10. <https://doi.org/10.1177/20552076241260507>

BÖLÜM 5

SPORCULARDA ÜST EKSTREMİTE FONKSİYONEL REHABİLİTASYONU

*Hazal YAKUT ÖZDEMİR¹ , Helin ÖNCEL² ,
Ezgi ÜNÜVAR YÜKSEL³*

¹ Doç. Dr., İzmir Demokrasi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, fzthazalyakut@outlook.com, ORCID: 0000-0003-4918-9249

² Fzt., İzmir Demokrasi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Anabilim Dalı, helinoncel.h@gmail.com

³ Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Demokrasi Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, unuvarezgi@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1606-3180

1. GİRİŞ

Omuz, günlük yaşam aktivitelerinde ve sportif hareketlerde yoğun biçimde kullanılan bir eklem kompleksidir ve bu bölgede çeşitli ve karmaşık problemler ortaya çıkabilmektedir. Glenohumeral eklem, top-soket tipinde bir eklem olup insan vücudundaki en geniş hareket açıklığına sahiptir. Ancak bu yüksek mobilite, eklemi çevreleyen dokular üzerinde kronik mekanik strese yol açabilmektedir. Bu stresin dengelenmesinde ve eklem stabilitesinin sağlanması rotator manşet kasları, biceps brakii kasının uzun başı, negatif eklem içi basınç ve eklem çevresindeki ligamentler birlikte görev almaktadır (Cools ve ark., 2021; Tewari ve ark., 2026).

Baş  st  sporlarda omuz, tekrarlayıcı ve yüksek hızlı yüklenmelere maruz kalmaktadır. Fırlatma, insanın gerçekleştirebildiği en hızlı hareketlerden biri olarak kabul edilmekte; maksimum humeral internal rotasyon ( R) hızı yaklaşık 7000–7500 /sn'ye, geç kurma (late cocking) fazındaki eksternal rotasyon (ER) açısı ise 165 –175 'ye ulaşmaktadır. Yüzme gibi branşlarda rekabet düzeyindeki sporcular haftada 6–7 gün, günde 10–14 km y zebilmekte; bu da haftada yaklaşık 16.000 omuz devrine karşılık gelmektedir. Bu devirlerin önemli bir bölümü kasların toparlanmasına fırsat tanınmaksızın ardışık olarak gerçekleştirilmektedir (Cools ve ark., 2021). Bu yüklenmelerin bir sonucu olarak omuz problemleri baş üstü sporcularda yaygındır; örneğin elit hentbol oyuncularında omuz ağrısı öyküsünün %44–75 arasında, haftalık omuz problemi prevalansının ise ortalama %28 olduğu bildirilmektedir (Andersson ve ark., 2017).

Omuz yaralanmalarının sporcular üzerinde oluşturduğu bu yük; yaralanmaların önlenmesini, etkili rehabilitasyon programlarının uygulanmasını ve spora dönüş kararının bireysel olarak verilmesini gerekli kılmaktadır (Cools ve ark., 2021). Fonksiyonel rehabilitasyon, izole kas kuvvetinin ötesinde kinetik zinciri, nöromüsküler kontrolü ve spora özgü hareket gereksinimlerini birlikte ele alarak sporcunun yaralanma öncesi performans düzeyine güvenli biçimde dönmesini amaçlamaktadır. Bu bölümde, sporcularda en sık etkilenen bölge olan omuz kompleksi odağında ve dirsek ile el bileği biyomekaniğine de değinilerek üst ekstremitenin anatomisi ve biyomekaniği, kinetik zincir kavramı, fonksiyonel değerlendirme yöntemleri, nöromüsküler kontrol, ileri evre rehabilitasyon yaklaşımları ve spora dönüş süreci ele alınmaktadır.

2. ANATOMİ VE BİYOMEKANİK

Omuz Eklemi (Glenohumeral Eklem) Humerus başı ile glenoid kavitenin oluşturduğu eklem, omuza yalnızca sınırlı düzeyde kemik kaynaklı stabilite sağlamaktadır. İki eklem yüzeyi arasındaki temas alanı küçüktür ve herhangi bir anatomik pozisyonda humerus başının yalnızca %25–30'u glenoid yüzeyle temas hâlinindedir. Yapısal kemik stabilitesinin sınırlı olması nedeniyle glenohumeral eklem, hareketin kontrolünde ve kısıtlanmasında ağırlıklı olarak kapsüller, ligamentöz ve dinamik kas aktivitesine gereksinim duymaktadır. Eklem kapsülü ve bağ yapıları eklem translasyonunu sınırlamak üzere koordineli biçimde çalışırken aktivite sırasındaki dinamik stabilite temel olarak omuz kasları tarafından sağlanmaktadır. Rotator manşet, aktif bir merkezleme mekanizması aracılığıyla humerus başını horizontal düzlemde glenoidin merkezinde konumlandırarak eklem stabilitesine katkıda bulunur. Subskapularis kası, abduksiyon ve eksternal rotasyon sırasında humerus başının anteroinferior yönde yer değiştirmesine karşı anterior bir bariyer işlevi gören önemli bir dinamik stabilizatördür. Bunun yanı sıra biceps brakii kasının uzun ve kısa başları, kasıldıklarında humerus başının anterior translasyonuna direnç oluşturarak omuz stabilitesine katkı sağlamaktadır (Zhao ve ark., 2021).

Dirsek Eklemi Medial kollateral ligamentin (MKL) anterior bandı dirseğin primer valgus stabilizatörü, radius başı ise sekonder stabilizatörüdür. Biyomekanik çalışmalar, radius başı sağlam olsa dahi MKL'nin anterior bandının kesilmesinin dirsekte orta düzeyde laksiteye yol açtığını göstermiştir. Lateral ulnar kollateral ligament, dirseğin hem rotasyonel hem de varus instabilitesine karşı temel stabilizatör yapıdır ve bu bağın yaralanması posterolateral subluksasyonla sonuçlanabilmektedir. Proksimal ulnanın eklem yüzeyi ve koronoid çıkıntı da dirsek stabilitesinde kritik öneme sahiptir; koronoid çıkıntı, özellikle dirsek ekstansiyondayken posterior subluksasyonu engelleyen temel kemik yapıdır (Zhao ve ark., 2021).

Ön Kol ve El Bileği Eklemleri Ön kol; radius ve ulnadan oluşan, proksimal ve distal radioulnar eklemler aracılığıyla hareket eden kompleks bir yapıdır. Ön kolda gerçekleşen hareket, temel olarak el, el bileği ve radiustan oluşan mobil ünitenin sabit ulna etrafındaki pivot hareketi olarak tanımlanabilir. Palmar radioulnar ligament ve dorsal radioulnar eklem kapsülü, radiusun ulnaya göre anterior translasyonunu sınırlayan temel yapılardır. El bileğinde stabilite, kompleks bir bağ sistemi ve eklem yüzeylerinin uyumu aracılığıyla sağlanmaktadır. Skafoid ve lunat kemiklerin stabilitesinde rol oynayan skafolunat ve lunotrikuetral bağlar, el bileğinin en kritik bağları olarak kabul edilmekte ve kopma öncesinde en yüksek yük ve gerinimi tolere edebilmektedir. El bileği stabilitesinin korunmasında bağlar ve eklem kapsülü gibi pasif yapılar ile çevre kasların dinamik katkısı birlikte rol oynamaktadır (Zhao ve ark., 2021).

Kas Morfolojisi ve Mimarisinin Biyomekaniği Kasın boyutu ve morfolojisi üç temel parametreyle tanımlanmaktadır: kas lifi uzunluğu tendon ekskürsiyonu (kayma) potansiyelini, fizyolojik kesit alanı kasın üretebileceği maksimum gerilimi, kas hacmi ya da kütesi ise kasın toplam iş kapasitesini belirlemektedir. Kas liflerinin yapısal dizilimi kasılma mekanizmasını doğrudan etkilemektedir. Paralel lifli kaslar daha uzun bir mesafe boyunca kuvvet üretimini sürdürebilen geniş bir uzunluk-gerilim eğrisi oluştururken pennat kaslar, daha kısa liflere sahip oldukları için keskin tepeli bir eğri üretmektedir. Ortalama lif uzunluğunun kas gövdesi uzunluğuna oranı, kasın genel uzunluk-gerilim ilişkisini tanımlamada önemli bir ölçüttür (Zhao ve ark., 2021).

Moment Kolları ve Eklem Kinematığı Eklemler çevresindeki kas moment kolları, hareket ve tork üretimindeki mekanik verimliliği belirlemektedir. Daha uzun bir moment kolu, aynı kas kuvvetiyle daha yüksek tork üretilmesine olanak tanır. Örneğin el bileğinde en büyük moment katkısını fleksör karpi ulnaris tendonu sağlamaktadır. Ekstansör karpi ulnaris tendonunun ekskürsiyonu ise ön kolun rotasyon (pronasyon/supinasyon) pozisyonundan doğrudan etkilenmektedir (Zhao ve ark., 2021).

Uzunluk-Gerilim İlişkisi ve Kavrama Kuvveti Bir kasın üretebileceği maksimum gerilim, eklem pozisyonuna bağlı olarak değişen anlık kas uzunluğuyla doğrudan ilişkilidir. El bileği biyomekaniğinde bu ilke, maksimum kavrama kuvvetinin elde edilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Kısıtlanmamış maksimum kavrama kuvveti için el bileğinin optimal pozisyonu 35° ekstansiyon ve 7° ulnar deviasyondur. Bu pozisyonun 10–15°'lik sapmalar dahi parmak fleksörlerinin fonksiyonel uzunluğunu olumsuz etkileyerek kavrama kuvvetinde belirgin bir azalmaya neden olmaktadır. Ulnar deviasyon ve ekstansiyon kombinasyonu, parmak fleksörlerinin en verimli fonksiyonel uzunlukta çalışmasını sağlayarak kuvvet üretimini en üst düzeye çıkarmaktadır (Zhao ve ark., 2021).

3. KİNETİK ZİNCİR

3.1. Kinetik Zincirin Tanımı

Kinetik zincir, ardışık olarak aktive edilen vücut segmentlerinden oluşan bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Kibler, 1994). Bu zincirin temelini proksimalden distale sıralı aktivasyon ilkesi oluşturmaktadır. Top atma, servis atma ve tekme atma gibi spora özgü aktivitelerin büyük bölümünde enerji ve kuvvet, proksimal segmentlerden distal segmentlere sıralı biçimde aktarılarak distal segmentte maksimum hız ve kuvvet elde edilmektedir. Bu ilkeye göre hareket proksimal segmentlerde başlamalı ve distal segmentlere doğru ilerlemeli; distal segmentin

hareketi, proksimal segmentin maksimum hıza ulaştığı anda başlamalıdır. Böylece ardışık her segment, kendisinden önceki segmente kıyasla daha yüksek uç nokta hızı ortaya koymaktadır (Bunn, 1972; Ellenbecker ve Aoki, 2020).

3.2. Fırlatma Hareketinde Kinetik Zincirin Biyomekaniği

Baş üstü fırlatma hareketi, alt ekstremitelerden üst ekstremitelere doğru hem başlangıç zamanlaması hem de tepe aktivasyonu bakımından ardışık bir segment aktivasyonu içerir ve sıralı vücut pozisyonları ile hareketler aracılığıyla oluşturulup kontrol edilir (Ellenbecker ve Aoki, 2020).

Kinetik zincir; kalça kuvveti ve hareket açıklığı (ROM), skapular kinematik, omuz kuvveti ve ROM ile diz ve ayak bileği mobilitesi gibi çok sayıda faktörden etkilenmektedir. Üst ekstremitayı içeren hareketlerde üst ekstremit segmentlerinde ortaya çıkan iş, geniş bir kas-iskelet ağı aracılığıyla gövdeye ve omurgaya iletilmekte ve bu kuvvet etkileşimi yüksek miktarda enerji üretimiyle sonuçlanmaktadır. Kinetik zincirin herhangi bir halkasındaki bozukluk, distal segmentlere binen stresi artırarak omuz ve dirsek patolojilerine zemin hazırlayabilmektedir (Ellenbecker ve Aoki, 2020). Kalça hareket açıklığı da bu zincirin önemli bir bileşenidir; profesyonel beyzbol atıcılarında adım atılan bacadaki toplam kalça pasif hareket açıklığının azalmasının pelvis ile gövde arasındaki ayrışma hızının azalmasıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Robb ve ark., 2010). Lumbopelvik bölge, fırlatma hareketindeki toplam kinetik enerji ve kuvvetin yaklaşık %50'sini sağlamakta olup bu bölgedeki kinematik değişiklikler distal segmentlerde artmış strese neden olmaktadır. Gövde, fleksiyon hareketiyle alt ekstremiteden gelen kuvveti üst ekstremiteye iletmekte; skapula ve glenohumeral eklem de bu aktarımı kolaylaştırmaktadır. Kalça ve gövdeden iletilen kinetik enerjideki %20'lik bir azalmanın, ele aynı miktarda enerjinin iletilebilmesi için omuz rotasyon hızında %34'lük bir artışla telafi edilmesi gerekmektedir (Ellenbecker ve Aoki, 2020).

Richardson ve ark. (2020) tarafından aktarılan çalışmalara göre, baş üstü fırlatma sporlarıyla uğraşan sporcularda azalmış kalça abdüksiyon kuvveti ve kalça eklem hareket açıklığı, omuz ve dirsek yaralanması riskindeki artışla ilişkilidir. Omuz yaralanması öyküsü bulunan tenis oyuncularında servis sırasında omuz kompleksi üzerinden aktarılan enerji oranlarının sağlıklı oyunculara kıyasla daha yüksek olduğu; alt ekstremit yaralanması öyküsü olan baş üstü sporcularda ise üst ekstremit yaralanması ve ağrı riskinin arttığı ve performansın azaldığı bildirilmektedir. Alt ekstremitede üretilen tepe güç (peak power), elit hentbolcularda fırlatma hızının birincil belirleyicisi olup serbest stil yüzücülerde sprint yüzme hızıyla güçlü biçimde

ilişkilidir. Benzer şekilde elit sporcularda alt ekstremitenin maksimum hızı ve kas kütlesi cirit atma performansıyla anlamlı düzeyde ilişkili bulunmuştur.

3.3. Kinetik Zincirin Değerlendirilmesi

Omuz ekleminin kapsamlı değerlendirilmesi, baş üstü sporcularda kinetik zincir değerlendirmesinin önemli bir bileşenidir. Skapular değerlendirme de üst ekstremitte disfonksiyonu bulunan bireylerde değerli bir unsurdur. Kalça ve kor bölgesi stabilizasyonunun değerlendirilmesinde tek bacak stabilite testi, Y-denge testi ve yüzüstü pozisyonda kalça internal rotasyon hareket açıklığı ölçümlerinden yararlanılabilir (Ellenbecker ve Aoki, 2020).

3.4. Kinetik Zincir Rehabilitasyonu

Baş üstü sporcularda üst ekstremitenin ve kinetik zincirin diğer temel bileşenlerinin kapsamlı değerlendirmesinin ardından, geleneksel egzersiz programlarına propriyoseptif egzersizlerin ve kor bölgesi egzersizlerinin eklenmesiyle kinetik zincir aktivasyonu artırılabilir. İleri düzey fırlatıcı egzersizleri (Advanced Thrower's Ten) olarak da bilinen bu yaklaşım; bilateral ekstremitte aktivasyonu, stabil olmayan yüzeylerin kullanımı ve sürekli izometrik kasılma ilkelerine dayanmaktadır. Bu modifikasyonlar, geleneksel egzersizlere kıyasla gövde ve alt ekstremitte kaslarını sürece daha fazla dahil ederek kuvveti ve kas dayanıklılığını artırmaktadır (Ellenbecker ve Aoki, 2020).

Bu ilkeler doğrultusunda üst ekstremitte kinetik zincir rehabilitasyonunda kullanılabilecek temel egzersizler aşağıda özetlenmiştir:

- **Bilateral İzometrik Tutuşlu 90/90 Eksternal Rotasyon Egzersizi:** Her iki kol, elastik bant direnci altında 90° abdüksiyon ve eksternal rotasyon pozisyonuna getirilir. Bir kol skapular retraksiyonla bu izometrik pozisyonu korurken diğer kol 10–15 tekrar boyunca yavaş ve kontrollü eksternal rotasyon hareketi gerçekleştirir; ardından aynı uygulama diğer kol için tekrarlanır. Son aşamada dayanıklılığı artırmak amacıyla, bir kol hareket ederken diğerinin sabit kaldığı ardışık aktivasyon paterni kullanılır.
- **Pilates Topu Üzerinde Yüzüstü Horizontal Abdüksiyon Egzersizi:** 90/90 eksternal rotasyon egzersizindeki bilateral izometrik tutuş ilkesi, pilates topu üzerinde yüzüstü pozisyonda uygulanır. Bir kol izometrik pozisyonda skapular retraksiyonu korurken diğer kol horizontal abdüksiyon hareketini gerçekleştirir.
- **Tek Bacak Duruşunda Eksternal Rotasyon ve Pertürbasyon Egzersizi:** Bu egzersizde ağırlık aktarımı ve duruş pozisyonunun alt trapez kas aktivasyonu üzerindeki etkisinden yararlanılır. Geleneksel omuz eksternal rotasyon egzersizi, stabil olmayan

bir zemin üzerinde tek bacak duruşunda uygulanır. Zorluk düzeyini artırmak amacıyla distal kol segmentine dışarıdan pertürbasyonlar (ani itme veya yön değişiklikleri) eklenebilir.

- **Yan Plank Pozisyonunda Dirençli Pliometrik Top Bırakma Egzersizi:** Egzersize kor bölgesi yüklenmesi eklemek amacıyla sporcu yan plank pozisyonuna alınır. Bu pozisyonda elastik bantla ek eksternal rotasyon direnci sağlanarak pliometrik top bırakma-yakalama hareketi uygulanır. Lokal kas dayanıklılığını geliştirmek için hareket 30–45 saniyelik süreler boyunca sürdürülür.
- **Görsel ve Dokunsal Geri Bildirimle Bilinçli Düzeltme:** Kinetik zincir egzersizlerinin uygulanması sırasında klinik gözetim önem taşımaktadır. Özellikle skapula stabilizatörlerinin kas aktivasyonunu artırmak için vücudun ve skapulanın doğru pozisyonlanması gereklidir. Bu süreçte klinisyen tarafından sağlanan görsel ve dokunsal geri bildirimler, sporcunun hareketi bilinçli olarak düzeltilmesine ve hedef kasları en üst düzeyde aktive etmesine olanak tanımaktadır (Ellenbecker ve Aoki, 2020).

Omuz yaralanması olan bireylerde yalnızca izole omuz egzersizlerinin uygulanması yetersiz kalabilmektedir. İzole omuz egzersizleri lokal kuvvet eksikliklerini giderebilmekle birlikte, lokal kuvvet kayıpları omuz yaralanmalarıyla her zaman kesin bir ilişki göstermemektedir. Bu nedenle kinetik zincir boyunca enerji aktarımının optimize edilmesi amacıyla alt ekstremite ve gövde hareketlerinin omuz rehabilitasyon programlarına dahil edilmesi önerilmektedir (Richardson ve ark., 2020).

4. FONKSİYONEL DEĞERLENDİRME

Literatürde üst ekstremite performansının, stabilitesinin ve kuvvetinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesi amacıyla Kapalı Kinetik Zincir Üst Ekstremité Stabilite Testi (CKCUEST), Oturarak Sağlık Topu Atma Testi (SMBT), Oturarak Tek Kollu Gülle Atma Testi (SSASP), tek kollu sıçrama testi, kol sıçrama tahtası testi, parmak asılma testi, sağlık topu patlayıcı güç testi, üst ekstremite rotasyon testi ve izokinetik sistemlerle (örneğin Biodex) yapılan omuz rotasyon kuvveti analizleri gibi testler kullanılmaktadır (Barbosa ve ark., 2024).

4.1. Kapalı Kinetik Zincir Üst Ekstremité Stabilite Testi (CKCUEST)

Test, sporcu sınav pozisyonundayken 15 saniye içinde bir eliyle karşı taraftaki banda kaç kez dokunabildiğinin sayılmasına dayanmakta ve kadınlarda ve erkeklerde aynı protokolle uygulanmaktadır. Test düzeneği için düz bir zemine, aralarında 36 inç (yaklaşık 91,4 cm) mesafe bulunan 1,5 inç (yaklaşık 3,8 cm) genişliğinde iki bant paralel olarak yerleştirilir.

Başlangıç pozisyonunda katılımcı sınav pozisyonundadır ve her iki eli birer bandın üzerindedir. Katılımcıdan bir elini gövdesinin önünden çaprazlayarak karşı elin altındaki banda dokunması, ardından elini başlangıç pozisyonuna geri getirerek aynı hareketi diğer eliyle tekrarlaması istenir. Elin karşı taraftaki banda yaptığı her temas bir dokunma olarak kaydedilir. Katılımcı önce bir ısınma denemesi yapar; ardından aralarında 45 saniyelik dinlenme bulunan ve her biri 15 saniye süren üç test denemesi gerçekleştirilir ve bu denemelerin ortalaması değerlendirmede esas alınır. Test sırasında ağrı bildiren bireyler değerlendirme dışında bırakılır (Lee ve Kim, 2015).

4.2. Atletik Omuz Testi (Athletic Shoulder Test, AST)

Atletik Omuz Testi, stabilite ve kuvvet üretiminde görev alan temel kas gruplarını hedefleyen izometrik kuvvet ölçümlerinden oluşan standardize bir değerlendirme yöntemidir. Test sırasında I (180°) pozisyonu, abdüksiyonu destekleyerek temel olarak deltoid ve supraspinatus kaslarını aktive etmektedir. Y (135°) pozisyonu, infraspinatus ve teres minör kaslarının artan katılımıyla rotator manşetin eksternal rotasyon ve skapular stabilite üzerindeki rolünü ön plana çıkarmaktadır. T (90°) pozisyonu ise internal rotasyon ve horizontal addüksiyona odaklanarak subskapularis ve pektoralis majör kaslarını hedeflemektedir. Böylece test, kas aktivasyonu, eklem stabilitesi ve kuvvet üretimi arasındaki karmaşık etkileşimi ortaya koyarak omuz fonksiyonunun biyomekanik açıdan kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Ulupınar ve ark., 2025).

4.3. Üst Ekstremitte Yıldız Uzanma Denge Testi (UESEBT)

Test, üst ekstremitenin dinamik denge ve stabilitesini değerlendirmekte ve sekiz farklı yöndeki performansı analiz ederek omuz bölgesindeki eksikliklerin spesifik olarak belirlenmesine olanak tanımaktadır. Test düzeneği, zemine 45°'lik açılarla yıldız şeklinde yerleştirilen sekiz banttan oluşmaktadır. Uygulama sırasında birey sınav pozisyonu alır ve destek kolunun avuç içini bantların kesişim noktasına yerleştirir; ayaklar zeminle temasını korur ve ayaklar arası mesafe yaklaşık 30,5 cm'yi (12 inç) aşmaz. Bireyden, destek kolunun dirseğini bükmeden ve tek taraflı stabilitesini kaybetmeden, serbest koluyla her bir yönde ulaşabildiği en uzak noktaya uzanması istenir. Uzanma sırasında kalça fleksiyonuna izin verilir; ancak ayakların zeminden kalkması veya dengenin bozulması denemeyi geçersiz kılar. Dominant ve non-dominant kol için ölçülen uzanma mesafeleri üst ekstremitte uzunluğuna göre normalize edilir ve sekiz yönün normalize değerlerinin ortalaması alınarak genel performansı yansıtan kompozit skor hesaplanır (Xu ve ark., 2023).

4.4. Oturarak Tek Kollu Gülle Atma Testi (SSASP)

SSASP, üst ekstremitenin kısa süreli ve maksimal itme kuvveti üretmesini gerektiren aktiviteleri taklit eden fonksiyonel bir performans testidir. Uygulama sırasında birey sırtını duvara dayayarak dizler ekstansiyonda, uzun oturuş pozisyonunda zemine oturur. Bu pozisyonda bireyden, belirli ağırlıktaki bir sağlık topunu (genellikle 1 veya 2 kg) tek koluyla patlayıcı biçimde olabildiğince uzağa itmesi istenir ve topun ulaştığı mesafe kaydedilir. Her kol için üç geçerli atışın ortalama mesafesi değerlendirmede esas alınır (Riemann ve Davies, 2020; Watson ve ark., 2021).

5. NÖROMÜSKÜLER KONTROL

Omuz kompleksinin stabilitesi ve fonksiyonu yalnızca eklem kapsülü gibi statik stabilizatörlere ya da izole kas kuvvetine değil, aynı zamanda propriyoseptif girdilerin ve dinamik nöromüsküler kontrol mekanizmalarının etkinliğine de bağlıdır. Nöromüsküler rehabilitasyon yaklaşımları, merkezi sinir sistemi ile kas-iskelet sistemi arasındaki entegrasyonu hedefleyerek bozulmuş motor fonksiyonları optimize etmeyi amaçlayan egzersiz stratejileridir. Bu yaklaşımların temelini oluşturan propriyoseptif nöromüsküler fasilasyon (PNF) gibi teknikler, eklem, kas ve tendonlarda yer alan propriyoseptörleri spesifik hareket paternleri aracılığıyla mekanik olarak uyarmaktadır. Bu afferent uyarılar duyuşal sinirlerin uyarılabilirliğini modüle ederek kas tonusunu nörofizyolojik düzeyde yeniden düzenlemekte ve çok sayıda motor ünitenin ardışık ve senkronize biçimde aktivasyonunu sağlamaktadır. Otojenik ve resiprokal inhibisyon ilkelerinden yararlanılarak kas spazmının azaltılmasına ve ağrının inhibisyonuna katkı sağlanabilmektedir (Zhang ve ark., 2026).

Adeziv kapsülit, subakromiyal sıkışma sendromu, rotator manşet tendinopatisi ve proksimal humerus kırıkları gibi çok sayıda omuz patolojisinde nöromüsküler kontrolün bozulduğu ve propriyosepsiyonun azaldığı bilinmektedir (Zhang ve ark., 2026). Bozulmuş motor kontrol paternlerinin yeniden eğitilmesi, eklem çevresindeki kuvvet aktarımını optimize etmekte ve omuz üzerindeki anormal biyomekanik stresi azaltmaktadır. Bu yaklaşım, kronik omuz ağrısına bağlı kinezyofobinin azaltılmasına ve giyinme, saç tarama ya da kol elevasyonu gerektiren ev işleri gibi günlük aktivitelerin yanı sıra kompleks motor becerilerin ağrısız ve akıcı biçimde gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır. Nöromüsküler rehabilitasyon yaklaşımlarının pasif eklem mobilizasyonu ve izole aktif kuvvetlendirme gibi geleneksel egzersiz programlarına entegre edilmesi sensörimotor adaptasyonu artırabilir; rekürren yaralanma ve omuz disfonksiyonuna bağlı uzun dönemli yetersizlik riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilir (Zhang ve ark., 2026).

6. İLERİ REHABİLİTASYON

6.1. Uygun Egzersiz Seçimi

Egzersiz seçimi çeşitli ölçütlere dayanabilir; bunların en önemlisi egzersizin amacıdır. Bir diğer ölçüt, hedeflenen kasların egzersiz sırasındaki tahmini aktivasyon düzeyidir. Egzersiz reçetesi oluşturulurken aşağıdaki noktalar göz önünde bulundurulmalıdır (Cools ve ark., 2021):

- Alt ve orta trapez kasları, egzersize ER bileşeni eklendiğinde belirgin biçimde aktive olmaktadır.
- Pektoralis minör kası, tercihen açık kinetik zincirde uygulanan ER hareketleriyle inhibe edilebilmektedir.
- Serratus anterior kası, izole protraksiyon egzersizlerine kıyasla elevasyon egzersizlerinde daha fazla aktive olmaktadır.
- Sehpada kaydırma (bench slide) veya duvarda kaydırma (wall slide) gibi düşük yüklü kapalı kinetik zincir egzersizlerinde rotator manşet aktivitesi düşüktür.
- ER egzersizleri sırasında infraspinatus ve supraspinatus aktivitesi yüksektir.
- Düşük elevasyon açılarında uygulanan fleksiyon-ekstansiyon egzersizleriyle subskapularis aktivitesi artırılabilir.
- Supinasyon pozisyonunda uygulanan pliyometrik elevasyon egzersizleri sırasında biceps aktivitesi yüksektir.
- Açık elle yapılan egzersizler orta ve alt trapez aktivitesini desteklerken yumruk pozisyonu rotator manşet aktivitesini artırabilmektedir.

6.2. Germe Uygulamalarının Yeri

Glenohumeral internal rotasyon defisiti (GIRD) veya posterior omuz sertliği, baş üstü sporcuların dominant tarafında sık görülen adaptasyonlardandır. Klinik olarak azalmış horizontal addüksiyon (cross-body adduction) ve İR mobilitesiyle kendini gösteren GIRD'in hem kapsüler gerginlikten hem de kas kontraktüründen kaynaklandığı bilinmektedir. Bazı çalışmalar rotasyonel ROM'daki değişiklikleri fırlatma kolundaki artmış humeral retrotorsiyonla ilişkilendirmektedir. Artmış retrotorsiyon iskelet olgunlaşmasından sonra kalıcı hâle gelen kemik kaynaklı bir adaptasyon olduğundan, fizik muayenede toplam rotasyon açıklığına bir defisit yerine rotasyon aralığına bir kayma saptanması durumunda germe uygulanmamalıdır (Cools ve ark., 2021).

Germe programlarının genel olarak glenohumeral İR ROM'unu artırmada ve semptomları azaltmada etkili olduğu bilinmektedir. Ancak klinisyenin, sık fırlatma sonucunda sertleştiği varsayılan posterior omzu germeye mi yoksa fırlatma sırasında kolu yavaşlatması beklenen deseleratör kasların (eksternal rotatörlerin) eğitimine mi odaklanması gerektiği tartışmalıdır. Deseleratör kuvvetin artmasıyla kapsüler sertleşme olasılığının azalacağı yönündeki klinik varsayım araştırmalarla tam olarak doğrulanmamış olsa da bu kas grubunun eksantrik kuvvetinin artırılmasına özen gösterilmelidir. Özellikle ağrı varlığında disfonksiyona yatkın olduğu gösterilen infraspinatus kası ön planda tutulmalıdır (Cools ve ark., 2021).

6.3. Rehabilitasyon Sürecindeki Güçlükler

Geleneksel omuz rehabilitasyon programları esnekliği, kuvveti, dayanıklılığı, fonksiyonel stabiliteyi ve motor kontrolü geliştirmek üzere tasarlanmaktadır. Erken dönemde kuvvetten çok motor beceri öğrenme süreçleri önem taşımaktadır. Hastanın dikkatinin yönlendirilme biçimi ve performansına ilişkin geri bildirimler bu süreci etkilemektedir. Dikkati hareketin sonucuna yönlendiren talimatların vücut hareketlerine yönlendiren talimatlardan daha etkili olduğu; dışsal odaklanmanın motor kontrolde otomatikliği kolaylaştırdığı ve hareket verimliliğini desteklediği bilinmektedir. Geri bildirimler spesifik olmalı, ancak gereksiz tekrarlardan kaçınılmalıdır. Sürekli geri bildirim yerine başarılı performansın ardından aralıklı geri bildirim verilmesi öğrenme üzerinde daha olumlu bir etkiye sahiptir (Cools ve ark., 2021).

Rehabilitasyonun ileri evresinde, erken spora dönüşün yeniden yaralanma riskini artırdığı göz önünde bulundurulmalı; progresif antrenman yükü ölçülmeli ve izlenmelidir. Son yıllarda spora özgü rehabilitasyonda yüksek kontrolden yüksek kaosa doğru ilerleyen bir çerçeve sunan kontrol-kaos sürekliliği (control-chaos continuum) yaklaşımı, üst ekstremiteye de kolaylıkla uyarlanabilmektedir:

1. **Yüksek Kontrol:** ROM, hız ve antrenman hacminin sıkı biçimde kontrol edildiği ve beklenmedik çevresel kuvvetlerin düşük düzeyde tutulduğu egzersizlerle başlanır.
2. **Orta Kontrol:** Sabit bir başlangıç pozisyonundan hedefe fırlatma (target throwing) veya smaç gibi kontrollü yön değişiklikleri programa dahil edilir.
3. **Orta Kaos:** Minimum kısıtlamayla pas ve hareket ile spora özgü oyun kurguları gibi öngörülemeyen hareketler programa eklenir.
4. **Yüksek Kaos:** Sporcunun yüksek hız, beklenmedik durumlar ve bire bir mücadeleler gibi en zorlayıcı senaryoları (worst-case scenarios) içeren antrenmanlarla haftalık antrenman taleplerine döndüğü son evredir (Cools ve ark., 2021).

6.4. Omuz Rehabilitasyonunda Eksantrik Kuvvetlendirme Egzersizleri

Eksantrik kasılma, kasın uzayarak kasılması, başka bir deyişle kas yapışma noktalarının birbirinden uzaklaşmasına karşı direnç oluşturması olarak tanımlanmaktadır. Bu kasılma tipi temel olarak eklem hareketinin yavaşlatılması sırasında kullanılır. Rotator manşet tendinopatilerinde ve subakromiyal sıkışma sendromunda eksantrik egzersizler; kas yorgunluğına karşı direnci artırmak, tendondaki kolajen yoğunluğunu artırmak ve hücrel onarımı desteklemek amacıyla rehabilitasyon programlarına dahil edilmektedir (Macías-Hernández ve Pérez-Ramírez, 2015).

Fırlatma sporlarıyla uğraşan sporcuların ileri evre rehabilitasyonunda, omuz kaslarının dinamik kuvvetini artırmak amacıyla spora özğü paternlerde uygulanan fonksiyonel pliyometrik egzersizler kritik bir rol oynamaktadır. Pliyometrik egzersizler, aynı kas grubunun hızla gerilmesi (eksantrik faz) ve ardından güçlü biçimde kasılması (konsantrik faz) ilkesine dayanır. Bu gerilme-kısalma döngüsü kas iğciklerini uyarak nöromüsküler sistemin reaktivitesini artırmakta ve Golgi tendon organlarının inhibitör etkisinin aşılmasını sağlamaktadır. Fırlatma hareketinin deselerasyon evresinde posterior omuz kasları yüksek eksantrik stres altında kaldığından, bu kasların eksantrik dayanıklılığını artıran egzersizler ileri evre rehabilitasyonun temelini oluşturmaktadır (Pezzullo ve ark., 1995). Bu amaçla kullanılan temel pliyometrik ve fonksiyonel egzersiz yaklaşımları aşağıda sunulmuştur:

- **İnertiyal Egzersiz Sistemi (Impulse System) Uygulamaları:**

- **İnternal Rotasyon:** Sporcu, 0° veya tolere edebiliyorsa 90° omuz abdüksiyonunda, maksimum eksternal rotasyon pozisyonunda egzersize başlar. Direnci konsantrik olarak çekerek internal rotasyon yapar ve ardından ağırlık taşıyıcının (weight carriage) geri dönüşünü internal rotatör kaslarla eksantrik olarak yavaşlatır.
- **Eksternal Rotasyon:** Sporcu maksimum internal rotasyon pozisyonunda başlar ve omzu konsantrik olarak eksternal rotasyona getirir. Konsantrik kasılmanın ardından eksternal rotatör kaslar, direncin başlangıç noktasına geri dönüşünü kontrol etmek için eksantrik olarak yüklenir.
- **Omuz Ekstansiyonu:** Omuz 45° fleksiyon pozisyonundayken başlanır; triseps, posterior omuz ve skapulotorasik kasların konsantrik kasılmasıyla kol tam ekstansiyona getirilir. Başlangıç pozisyonuna dönüş sırasında aynı kas grupları hareketi yavaşlatmak üzere eksantrik olarak çalışır.

- **Plyo-Ball ve Plyoback Egzersizleri:**

- **Plyo-Ball ile İnternal Rotasyon:** Genellikle 2 lb (yaklaşık 0,9 kg) ağırlığında bir sağlık topu kullanılır. Başlangıçta 10° olan abduksiyon açısı tolere edildikçe 90°'ye kadar ilerletilir ve top trampolin benzeri bir yüzeye (Plyoback) fırlatılır. Geri dönen top yakalanır ve internal rotatör kasların eksantrik kasılmasıyla yavaşlatılarak başlangıç pozisyonuna dönülür.
- **Plyo-Ball ile Eksternal Rotasyon:** Sporcu sırtını Plyoback cihazına döner ve omuz maksimum internal rotasyondayken topu hızla geriye doğru fırlatır. Cihazdan geri dönen top yakalandıktan sonra eksternal rotatör kaslar aracılığıyla eksantrik olarak yavaşlatılır.
- **Ters Atış (Reverse Throw):** Bir antrenör eşliğinde uygulanan bu egzersizde sporcu, 90° abduksiyon, maksimum eksternal rotasyon ve skapular retraksiyon pozisyonundayken antrenörün arkadan attığı topu yakalar. Ardından fırlatma hareketinin deselerasyon evresini taklit edecek şekilde posterior omuz kaslarını eksantrik olarak kasarak kolunu internal rotasyon ve addüksiyona doğru kontrollü biçimde indirir.

- **Direnç Bandı (Theraband) Egzersizleri:**

- **Direnç Bandıyla İnternal ve Eksternal Rotasyon:** Bant gergin durumdayken başlanır ve sporcunun toleransına göre 0° ile 90° arasındaki abduksiyon açılarında uygulanabilir. Hedeflenen rotatör kas grubu konsantrik olarak kasıldıktan sonra bandın başlangıç pozisyonuna dönüşü eksantrik olarak kontrol edilir.
- **Direnç Bandıyla Diyagonal Paternler:** Fırlatma sırasındaki akselerasyon ve deselerasyon evrelerini taklit eden çapraz hareket paternleridir. Akselerasyon evresinde görev alan anterior kasları çalıştırmak için bant sporcunun arkasına, deselerasyon evresinde görev alan posterior kasları çalıştırmak için ise sporcunun önüne sabitlenir (Pezzullo ve ark., 1995).

7. SPORA DÖNÜŞ VE PERFORMANSA DÖNÜŞ

Rehabilitasyon, yaralanmaların önlenmesinin yanı sıra spora dönüşle de yakından ilişkilidir. Rehabilitasyon sürecinde bilinen yaralanma risk faktörlerini azaltmaya yönelik egzersizlere ağırlık verilmekte ve kinetik zincir ilk günden itibaren egzersiz programına entegre edilerek spora dönüş (return to play, RTP) hedeflenmektedir (Cools ve ark., 2021). Uygun tedavi ve

rehabilitasyonla sporcuların önemli bir bölümü branşlarına dönebilmektedir; örneğin anterior omuz instabilitesi nedeniyle cerrahi stabilizasyon uygulanan 1.850 sporcuyla kapsayan bir meta-analizde sporcuların %79'unun spora tam olarak döndüğü, %10'unun ise sporu bıraktığı bildirilmiştir (Baur ve ark., 2026).

7.1. Omuz Yaralanması Sonrası Spora Dönüş

Karar Temelli Spora Dönüş Modeli Omuz yaralanması sonrasında spora dönüş zamanına karar verilmesi karmaşık ve çok faktörlü bir süreçtir. Önceki yaralanma öyküsü, yeniden yaralanma için en önemli risk faktörlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle tüm yaralanmaların tedavi süreci, spora güvenli dönüşün zamanlamasına ilişkin önerileri içermelidir. Risk ve Risk Toleransının Stratejik Değerlendirmesi (Strategic Assessment of Risk and Risk Tolerance, StARRT) modeli, spora dönüş sürecini desteklemek ve optimize etmek için yararlı bir rehberdir (Shrier, 2015). Bu model, RTP kararları alınırken klinisyenlerin izlemesi gereken süreçleri netleştirmek amacıyla geliştirilmiş olup sporcu, antrenör, sağlık ekibi ile sponsor ve federasyon gibi tüm paydaşları kapsayan ortak bir karar alma sürecine dayanmaktadır (Cools ve ark., 2021).

Spora dönüş sürecinde aşamalı ve ölçüte dayalı ilerlemeyi vurgulayan evreler tanımlanmaktadır. Katılıma dönüş (return to participation) evresinde sporcu, RTP hedeflerinin altında bir düzeyde sportif aktivitelere katılır. Spora dönüş (return to sport) evresinde sporcu kendi branşına dönmüştür, ancak henüz hedeflediği performans düzeyine ulaşmamıştır. Son evre olan performansa dönüş (return to performance) evresinde ise sporcu yaralanma öncesi düzeyinde veya bu düzeyin üzerinde performans sergilemektedir. Biyopsikososyal yaklaşım çerçevesinde fiziksel bileşenlerin yanı sıra psikolojik ve sosyal faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Psikolojik hazır oluşluk optimal spora dönüş için kritik bir unsurdur; yeniden yaralanma korkusu gibi duygusal faktörler ile öz yeterlik ve motivasyon gibi bilişsel faktörler, sportif yaralanmalar sonrasındaki tedavi sürecini ve sonuçlarını doğrudan etkilemektedir (Ardern ve ark., 2016; Cools ve ark., 2021).

7.2. Sportif Omuz İçin Pratik Öneriler

Literatürde GIRD için önerilen eşik değerler 18° ile 25° arasında değişmektedir. Bu nedenle sporcunun en üst düzeyde korunması amacıyla İR ROM'daki taraflar arası farkın 20°'nin altında olması ve total ROM farkının 10°'yi aşmaması önerilmektedir (Cools ve ark., 2021).

Rotator manşet kuvveti açısından baş üstü sporcular, genellikle eksternal rotatör kuvvetinde göreceli bir azalmaya ve buna bağlı olarak rotator manşette kas dengesizliğine yol açan spora

özgü adaptasyonlar sergilemektedir. Sağlıklı omzu risk altındaki omuzdan ayıran değerler açısından, dominant tarafta non-dominant tarafa kıyasla rotator manşet kuvvetinde %10'luk bir fazlalıkla birlikte, test pozisyonuna bağlı olarak %63–72 arasında bir izokinetik ER/İR oranı veya %75–100 arasında bir izometrik ER/İR oranı önerilmektedir. Bununla birlikte kuvvet testlerinde mutlak değerlerin de dikkate alınması büyük önem taşımaktadır; ideal bir ER/İR oranına sahip bir sporcunun genel kas performansı düşük olabilir ve bu durum sporcuyu yaralanmalara yatkın hâle getirebilir (Cools ve ark., 2021).

7.3. Spora Dönüşe Hazır Oluşun Belirlenmesi

RTP kararındaki temel kaygı, yeniden yaralanma riskinin en aza indirilmesidir. Yeniden yaralanma riskini öngörebilecek geçerli tarama araçlarının bulunmaması nedeniyle bazı temel ilkelerin dikkate alınması gerekmektedir. Aşağıdaki öneriler, 2016 yılında Bern'de düzenlenen Birinci Dünya Spor Fizyoterapisi Kongresi'ndeki uzman paneli toplantısının sonuçlarını özetleyen konsensüs bildirgesine dayanmaktadır (Ardern ve ark., 2016; Cools ve ark., 2021):

- Her RTP süreci, sporcunun branşına ve katılım düzeyine özgü olarak tanımlanmalıdır.
- Beklentileri ve RTP risk toleransını etkileyebilecek çeşitli bağlamsal faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.
- RTP, toparlanma ve rehabilitasyon süreçlerine paralel ilerleyen ve performansa dönüşten önce katılıma dönüşle başlayan bir süreklilik olarak ele alınmalıdır.
- Bazı durumlarda RTP kararının tersine dönebileceği ve sporcunun spordan uzaklaştırılmasının gerekebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

8. SONUÇ

Sporcularda üst ekstremité fonksiyonel rehabilitasyonu, yalnızca yaralanan eklemin iyileşmesine değil, sporcunun spora özgü yüklenmeleri güvenli biçimde karşılayabilmesine odaklanan bütüncül bir süreçtir. Glenohumeral eklemin yüksek mobilitesi ve baş üstü sporlarda omuza binen tekrarlayıcı ve yüksek hızlı yükler, değerlendirme ve tedavinin yalnızca omuzla sınırlı kalmamasını; kalçayı, gövdeyi ve skapulayı da içeren tüm kinetik zinciri kapsamasını gerektirmektedir. Bu süreçte CKCUEST, AST, UESEBT ve SSASP gibi fonksiyonel testler sporcunun durumunun nesnel olarak izlenmesine olanak tanırken; nöromüsküler kontrol eğitimi, eksantrik ve pliometrik egzersizler ve kontrol-kaos sürekliliğine dayalı spora özgü progresyon rehabilitasyonun temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Spora dönüş kararı ise tek bir zaman noktasında verilen bir karar olarak değil, fiziksel, psikolojik ve bağlamsal faktörlerin birlikte değerlendirildiği ve katılıma dönüşten performansa dönüş uzanan bir süreklilik olarak

ele alınmalıdır. Sporcuya özgü değerlendirmeye dayanan, kanıta dayalı ve aşamalı bir rehabilitasyon programı, yeniden yaralanma riskinin azaltılması ve yaralanma öncesi performans düzeyine dönölmesi açısından temel önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Andersson, S. H., Bahr, R., Clarsen, B., & Myklebust, G. (2017). Preventing overuse shoulder injuries among throwing athletes: A cluster-randomised controlled trial in 660 elite handball players. *British Journal of Sports Medicine*, 51(14), 1073–1080. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096226>
- Ardern, C. L., Glasgow, P., Schneiders, A., Witvrouw, E., Clarsen, B., Cools, A., Gojanovic, B., Griffin, S., Khan, K. M., Moksnes, H., Mutch, S. A., Phillips, N., Reurink, G., Sadler, R., Grävare Silbernagel, K., Thorborg, K., Wangensteen, A., Wilk, K. E., & Bizzini, M. (2016). 2016 consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *British Journal of Sports Medicine*, 50(14), 853–864. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096278>
- Barbosa, G. M., Calixtre, L. B., Fonseca Fialho, H. R., Locks, F., & Kamonseki, D. H. (2024). Measurement properties of upper extremity physical performance tests in athletes: A systematic review. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 28(1), 100575. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2023.100575>
- Baur, A. J., Houseman, T. J., Mansour, E. Z., Heller, R. R., & Posner, M. A. (2026). High rates of return to sport after surgical stabilization for anterior shoulder instability in athletes: A systematic review and meta-analysis. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 14(6), 23259671261450204. <https://doi.org/10.1177/23259671261450204>
- Bunn, J. W. (1972). *Scientific principles of coaching* (2nd ed.). Prentice-Hall.
- Cools, A. M., Maenhout, A. G., Vanderstucken, F., Declève, P., Johansson, F. R., & Borms, D. (2021). The challenge of the sporting shoulder: From injury prevention through sport-specific rehabilitation toward return to play. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 64(4), 101384. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2020.03.009>
- Ellenbecker, T. S., & Aoki, R. (2020). Step by step guide to understanding the kinetic chain concept in the overhead athlete. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 13(2), 155–163. <https://doi.org/10.1007/s12178-020-09615-1>
- Kibler, W. B. (1994). Clinical biomechanics of the elbow in tennis: Implications for evaluation and diagnosis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26(10), 1203–1206. <https://doi.org/10.1249/00005768-199410000-00004>

- Lee, D. R., & Kim, L. J. (2015). Reliability and validity of the closed kinetic chain upper extremity stability test. *Journal of Physical Therapy Science*, 27(4), 1071–1073. <https://doi.org/10.1589/jpts.27.1071>
- Macías-Hernández, S. I., & Pérez-Ramírez, L. E. (2015). Fortalecimiento excéntrico en tendinopatías del manguito de los rotadores asociadas a pinzamiento subacromial: Evidencia actual. *Cirugía y Cirujanos*, 83(1), 74–80.
- Pezzullo, D. J., Karas, S., & Irrgang, J. J. (1995). Functional plyometric exercises for the throwing athlete. *Journal of Athletic Training*, 30(1), 22–26. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1317824/>
- Richardson, E., Lewis, J. S., Gibson, J., Morgan, C., Halaki, M., Ginn, K., & Yeowell, G. (2020). Role of the kinetic chain in shoulder rehabilitation: Does incorporating the trunk and lower limb into shoulder exercise regimes influence shoulder muscle recruitment patterns? Systematic review of electromyography studies. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 6(1), e000683. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2019-000683>
- Riemann, B. L., & Davies, G. J. (2020). Association between the seated single-arm shot-put test with isokinetic pushing force. *Journal of Sport Rehabilitation*, 29(5), 689–692. <https://doi.org/10.1123/jsr.2019-0140>
- Robb, A. J., Fleisig, G., Wilk, K., Macrina, L., Bolt, B., & Pajaczowski, J. (2010). Passive ranges of motion of the hips and their relationship with pitching biomechanics and ball velocity in professional baseball pitchers. *American Journal of Sports Medicine*, 38(12), 2487–2493. <https://doi.org/10.1177/0363546510375535>
- Shrier, I. (2015). Strategic Assessment of Risk and Risk Tolerance (StARRT) framework for return-to-play decision-making. *British Journal of Sports Medicine*, 49(20), 1311–1315. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094569>
- Tewari, K., Sun, B., Sridharan, M., Olson, T., Streeter, S., Walker, P., Hame, S., & Petrigliano, F. (2026). A review of research on throwing biomechanics, upper extremity injuries, and treatment of throwing injuries in professional baseball and football. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 14(1), 23259671251407244. <https://doi.org/10.1177/23259671251407244>

- Ulupınar, S., İnce, İ., Gençoğlu, C., Asan, S., Çabuk, S., & Özbay, S. (2025). Validity and reliability of the Athletic Shoulder Test: A brief systematic review and meta-analysis. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 25(3), 351–363. <https://doi.org/10.22540/JMNI-25-351>
- Watson, M. D., Davies, G. J., & Riemann, B. L. (2021). Relationship between seated single-arm shot put and isokinetic shoulder flexion and elbow extension strength. *Journal of Sport Rehabilitation*, 30(3), 521–524. <https://doi.org/10.1123/jsr.2020-0069>
- Xu, H. R., Zhang, Y. H., Mao, Y., Ngo, T. L., Zhang, Q., He, G., Feng, Z., Sun, W., & Wang, X. Q. (2023). Validity and reliability of upper extremity star excursion balance test in adolescent swimmers. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 21(2), 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2023.02.003>
- Zhang, Y., Lu, D., & Lan, Y. (2026). Effects of neuromuscular physiotherapy on pain, range of motion, and function in shoulder-related disorders: A meta-analysis and systematic review. *Pain Research and Management*, 2026(1), e3157666. <https://doi.org/10.1155/prm/3157666>
- Zhao, K. D., Robinson, C. A., & Hilliard, M. J. (2021). Biomechanics of the upper limb. In T. M. Skirven, A. L. Osterman, J. M. Fedorczyk, P. C. Amadio, S. B. Feldscher, & E. K. Shin (Eds.), *Rehabilitation of the hand and upper extremity* (7th ed.). Elsevier.

BÖLÜM 6

MUSKULOSKELETAL REHABİLİTASYONDA YAPAY ZEKA UYGULAMALARINA GÜNCEL BİR BAKIŞ

Arife KORKUT¹ , Zeliha BAŞKURT²

¹ Öğr. Gör. , Antalya Bilim Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü, ORCID: 0000-0003-0146-5443

² Prof. Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi Doğu Kampüsü Sağlık Bilimleri Fakültesi Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, ORCID: 0000-0001-7488-9242

Giriş

Muskuloskeletal sistem patolojileri, dünya çapında yaygın şekilde görülmektedir ve engellilik sebepleri arasında yer almaktadır (Zihao Wang², 2024). Kronik ağrının başlıca nedenlerinden biri olup, etkilerinin önümüzdeki yıllarda artışı beklenmektedir. Muskuloskeletal sisteme ait patolojileri vücudun farklı bölgelerinde görülebilir. Patolojilerin oluşumunda yaş, postüral problemler, yanlış fiziksel aktivite ve travma gibi çeşitli faktörler etkili olabilir (Perna & Proietti, 2023). Muskuloskeletal sisteminin rehabilitasyonu engelliliği önleme ve fonksiyonel iyileşme açısından hayati öneme sahiptir. Ayrıca elde edilen veri sonuçlarına göre kronik ağrı kapsamında yapılan araştırmalar artarak daha fazla ilgi görmektedir (De Sire & Invernizzi, 2021).

Fiziksel rehabilitasyon bireylerde fiziksel fonksiyonun ve kas gücünün yeniden kazanılmasını hedefleyen yapılandırılmış müdahalelerden oluşur. Hastane veya toplum temelli ortamlarda uygulanabilen, terapist kontrolünde ya da bireyin kendi kendine yönlendirdiği, tek veya çok bileşenli programlar şeklinde farklı müdahale biçimleridir. Fiziksel rehabilitasyon hizmetleri küresel ölçekte yaygın olsa da literatür bu hizmetlerin sıklıkla yetersiz kullanım ve düşük katılım/uyum oranlarıyla sınırlı kaldığını göstermektedir. Rehabilitasyon programlarına düşük katılım ve uyum; hekim yönlendirmesi veya onayının yetersizliği, ulaşım ve erişim güçlükleri, müdahalelerin etkinliğine ilişkin düşük algı ve bireyin yaşam düzeniyle program zamanlamasının uyumsuzluğu gibi çok boyutlu faktörlerden kaynaklanmaktadır (Jack et al., 2010; Sumner et al., 2023).

Son yıllarda sağlıktaki dijitalleşme ile klinik uygulamaların pek çok alanında yapay zeka, sağlık hizmetlerinin planlanması ve yürütülmesinin geliştirilmesi, klinik karar verme süreçlerinin iyileştirilmesi ve hasta katılımının artırılması yoluyla sağlık alanında önemli katkılar sağlayabilmektedir. İnsan zekası ile ilişkili problem çözme süreçlerini gerçekleştirebilen bilgisayar sistemlerinin geliştirilmesi yapay zeka olarak ifade edilir. (Tack, 2019). Makine öğrenimi, derin öğrenme ve konvolüsyonel sinir ağları ile karmaşık ve çok boyutlu klinik verilerin analiz edilmesi, klinik örüntülerin tanımlanması ve öngörü modellerinin geliştirilmesi işlemleridir (Román-Belmonte et al., 2023).

Muskuloskeletal sistem patolojilerinin teşhisi, tedavisi ve tahmin edilmesi, çeşitli nedenleri ve yaşlanan nüfuslarda artan yaygınlık nedeniyle zordur. Yapay zeka geniş veri setlerini analiz eder ve tahminler yapar. Yapay zekanın fizyoterapiye entegre olması, hastalık veya yaralanma sonrası hastanın günlük yaşam aktivitelerindeki hareket kalıplarını ve fiziksel aktivitelerinin

sürekli izlenmesini ve geliştirilmesini sağlar. Tedavi planlarının güncellenmesi için objektif veriler oluşturur. (Shariatnia et al., 2025; TAKI F., 2024). Değerlendirme, hareket analizi, ağrı ve fonksiyon iyileşimi, egzersiz planlama, tedaviye yanıtın izlenmesi ve klinik karar verme gibi alanlarda giderek daha fazla araştırılmaktadır (Rasa, 2024; Sumner et al., 2023). Örneğin, sensör tabanlı yapay zeka uygulamaları, yürüyüş analizi gibi fonksiyonel değerlendirmeler yoluyla hastanın hareket becerilerinin gelişimini izler ve tedavi etkinliğini artırmak için en uygun tedaviyi belirler (TAKI F., 2024).

Geleneksel ağrı genellikle hastanın kendi kendine bildirdiği değerlendirme yöntemlerine dayanır. Bu durum bazen hastalarda tutarsız, zaman alıcı ve doğruluk açısından sınırlı olabilir. Yapay zeka destekli yaklaşımlar, hızlı tanılamaya yardımcı olur. Zamanında müdahaleyi kolaylaştırarak hasta sonuçlarını iyileştirip, klinik iş akışlarını optimize eder. Ayrıca fonksiyonel iyileşmeye de katkı sağlamaktadır (Casella, 2024; Popelnukha & Dmytriiev, 2025; Zhang et al., 2023).

Eklem hareket açıklığı, postür, denge ve yürüyüş gibi temel muskuloskeletal parametrelerin objektif, nicel ve sürekli biçimde değerlendirilmesine mobil uygulamalar, giyilebilir sensörler ve görüntü işleme teknikleri ile uyumlu yapay zeka algoritmaları katkıda bulunur. Atalet ölçüm birimleri (IMU), ivmeölçerler, jiroskoplar ve basınç sensörlerinden elde edilen verilerin makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz edilmektedir. Ayrıca klinik ortamda sıklıkla kullanılan geleneksel subjektif değerlendirmelere kıyasla daha hassas ve kolay tekrarlanabilir ölçümler sunmaktadır (Boltaboyeva et al., 2025; Hong et al., 2025; Kobsar et al., 2020)

Telerehabilitasyon, kas-iskelet sistemi bozukluklarının sağlık sonuçlarını iyileştirmede önemli bir rol oynar. Hastaların sağlık hizmetlerine katılımını teşvik ederek hastaları eğitmek ve sağlıklı bir yaşam tarzında davranış değişikliği sürecini kolaylaştırmak için yeni fırsatlar sunar. Telerehabilitasyon uygulamaları kapsamında YZ destekli geri bildirim sistemleri; egzersiz kontrolünün gerçek zamanlı izlenmesi, hatalı hareketlerin otomatik olarak tespit edilmesi ve hastaya düzeltici geri bildirimlerin anlık sağlanması açısından önemli bir fonksiyon taşımaktadır. Bu sistemlerin, tedaviye katılımı desteklediği ve fizyoterapi hizmetlerine erişimi kolaylaştırdığı ve klinik sonuçları artırdığı bildirilmiştir. Özellikle kronik muskuloskeletal rahatsızlıklarda ve uzun süreli rehabilitasyon gerektiren durumlarda, bu yaklaşımlar sürdürülebilir (Baroni et al., 2023; Hong et al., 2025; Krzyzaniak et al., 2023; Luo et al., 2025).

Muskuloskeletal rehabilitasyonda yapay zeka kullanımına ilişkin literatür kaynakları ilerlesede, klinik ortamlarda yapay zekanın yaygın uygulanması, yüksek donanım maliyetleri, veri yönetimindeki tutarsızlıklar ve çeşitli sağlık sistemlerinde doğrulama gerekliliği gibi önemli engellerle karşılaşmaktadır. Yapay zeka sistemlerinin eğitimi için büyük ve uygun şekilde veritabanlarına ihtiyaç vardır fakat bunların inşası maliyetlidir. Yapay zeka teknolojileri gelişmeye devam ederken, klinik karar alma süreçlerini iyileştirme konusunda ilerleme kaydetmektedir. YZ tabanlı sistemlerin fizyoterapistin klinik rolünü nasıl tamamlayacağı ve klinik karar süreçlerine nasıl entegre edileceği henüz netlik kazanmamıştır.

Muskuloskeletal rehabilitasyonda yapay zeka temelli uygulamaların güncel kullanım alanlarını, klinik etkinliğini ve sınırlılıklarını bütüncül bir şekilde ele almak ve fizyoterapi pratiği açısından gelecekteki araştırma ve klinik uygulamalara yol gösterici olması amaçlanmaktadır.

Muskuloskeletal Rehabilitasyonda Yapay Zeka Temelli Değerlendirme Araçları

Kas iskelet sistem değerlendirme süreçlerinde giyilebilir sensörler, kamera tabanlı sistemler ve akıllı telefon uygulamalarından oluşan verilerin makine öğrenmesi ve derin öğrenme ile analiz edilmesi; eklem hareket açıklığı, kuvvet, esneklik, postür, denge ve yürüyüş gibi parametrelerin objektif, tekrarlanabilir ölçümlerini sağlar. Geleneksel değerlendirmelerde gözlemciler arasında sonuçlarda minimal hatalar ve farklılıklar olsa da yapay zeka tabanlı değerlendirme de ölçüm daha üstün performanslıdır (Kobsar et al., 2020; Koul et al., 2025; Russell et al., 2010). Geleneksel nicel duyuşal değerlendirme testlerinin gerektirdiği protokoller yapay zekâ modelleri sayesinde yüksek doğrulukla simüle edilebilmektedir ve derin öğrenme tabanlı görüntü işleme modelleri ile duyuşal-motor işlevlerin anlık ve objektif ölçümüne imkân tanımaktadır (Pereira et al., 2020; Reis et al., 2023; Forsberg et al., 2024).

Yürüyüş analizi alanında yapılan çalışmalarda, YZ algoritmaları spatiotemporal parametreleri ve kinetik–kinematik değişkenleri yüksek doğrulukla sınıflandırır. Sağlıklı bireyler ile muskuloskeletal patolojilere sahip bireyler arasında anlamlı ayırım yapabildiğini gösterir. Benzer şekilde, kamera tabanlı derin öğrenme modellerinin eklem hareket açıklığı ve postüral hizalanma ölçümleri, yapay sinir ağı, akıllı tabanlı cihazı ve yapay zekaya dayalı poz tahmini klinik olarak kabul edilebilir hata paylarıyla çalışır (Chen et al., 2021; Kim et al., 2023).

Ağrı, Fonksiyon ve Klinik Sonuçların Öngörülmesinde Yapay Zeka

Ağrının tanınması, değerlendirilmesi, anlaşılması ve tedavisinde farklı yapay zeka temelli sistemler kullanılır ve bu sistemlerin her biri özgül görevler için geliştirilmiştir. Farklı

algoritmalar kullanan yapay zeka modelleri farklı düzeylerde etkinlik ve uygulanabilirlik göstermektedir ve çeşitli klinik uygulamalara uyarlanmıştır Yapay zeka ve makine öğrenimi modelleri, algoritmalarına ve geliştirildikleri alana özgü performans sergiler. Son yıllarda, yapay zeka destekli yüz ifadesine dayalı ağrı tanıma sistemleriyle umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Hasta verilerini girdi olarak kabul eden makine öğrenimi ve yapay zeka tabanlı algoritmalar, ağrının izlenmesini ve tedavi yanıtlarının tahmin edilmesini sağlar. Bu şekilde ağrı değerlendirme süreçleri daha sistematik ve güvenilir hale getirilebilir (El-Tallawy et al., 2024; Tian, 2020). Ayrıca yapay zeka modelleri yalnızca mevcut ağrının tanınması ve değerlendirilmesinde değil ağrının seyri, fonksiyonel yetersizlik ve tedaviye yanıt gibi klinik sonuçların öngörülmesinde de kullanılmaktadır. Özellikle muskuloskeletal ağrıda demografik özellikler, ağrı şiddeti ve süresi, fiziksel aktivite, psikososyal faktörler ve klinik değerlendirme bulguları gibi çok boyutlu verilerin birlikte analiz edilmesi, bireysel profillerin oluşturulmasında ve klinik sonuçların daha doğru öngörülmesine katkı sağlayabilir (Tagliaferri et al., 2020; Zmudzki & Smeets, 2023).

Muskuloskeletal sistem patolojileri rehabilitasyonunda, birincil hedef ağrının azaltılması ve fonksiyonel kayıpların ve hareket yetersizliklerinin giderilmesidir; yapılan çalışmalar, yapay zeka tabanlı aktivitelerin endorfin salınımını uyarak ağrı algısının azalmasına katkıda bulunduğunu göstermiştir. Yapay zeka tabanlı aktiviteler, hastaların ağrı eşiklerini yükselterek tedaviye katılımlarını olumlu yönde motive eder (Zhang et al., 2023).

Rehabilitasyon robotları (RR), MSD üzerindeki yükü azaltarak, fonksiyonel sınırlamalara neden olan bireysel sorunları ve ağrıları hafifletir ve böylece rehabilitasyon sürecinin verimli bir şekilde ilerlemesini sağlar. Tedavinin eş zamanlı geri bildirimi ve izlenmesi açısından avantajlar sunarlar. Ayrıca, terapistten bağımsız hareket etme olanağı sunarak, RR'ler hasta bağımsızlığını ve konforunu artırır, ayrıca hastanın tedaviye olan inancını da güçlendirerek daha etkili ve sürdürülebilir fonksiyonel iyileşmeye katkıda bulunur (Luo et al., 2025; Payedimarri et al., 2022). YZ ile bütünleştirilen rehabilitasyon sistemleri ortaya çıkan hareket ve performans verilerinin sürekli olarak değerlendirilmesine de olanak sağlayabilir ve hastanın zaman içerisindeki fonksiyonel değişimi ve tedaviye verdiği yanıt da izlenebilir. Bununla birlikte YZ modellerinde bildirilen yüksek tahmin performanslarının doğrudan klinik etkinlik anlamına gelmediği ve modellerin farklı hasta popülasyonlarında dış doğrulamasının gerekli olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Seas et al., 2025).

Kişiselleştirilmiş Egzersiz ve Yapay Zeka Destekli Tedavi Planlaması

Yapay zekanın bireye özgü egzersiz ve tedavi uygulamalarına nasıl katkıda bulunduğunu gösteren birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların bazıları, yapay zekanın kronik kas-iskelet ağrılarında ağrıyı azaltmadaki olumlu etkilerine ve fonksiyonelliği iyileştirmeye odaklanmaktadır (Favre et al., 2023; Lin et al., 2019; Luo et al., 2025; Vinay R Gowda & John Mathew, 2025). Bireysel verileri analiz ederek egzersiz reçeteleri veya tedavi planları önerebilen yapay zeka tabanlı uygulamalar ve giyilebilir cihazlardaki sensörler, geleneksel sağlık hizmeti ortamlarının dışında bile hasta verilerinin izlenmesine olanak sağlarken, yapay zeka destekli RR, hareket kabiliyeti sınırlı bireylerin tedavisinde yardımcı olmaktadır. (Brennan et al., 2019; Vinay R Gowda & John Mathew, 2025). Yapay zeka destekli sistemler rehabilitasyonda eklem açısı, hareket hızı, tekrar sayısı ve hareket kalitesi gibi parametreleri analiz ederek performansın objektif şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Hareketlerin doğru uygulanıp uygulanmadığının belirlenmesi ve performansa yönelik geri bildirimler ile özellikle ev tabanlı rehabilitasyon uygulamalarında önemli bir potansiyel taşımaktadır. Böylece bireye özgü rehabilitasyon programlarının uygulanma süreci daha yakından izlenmekte ve performansı sistematik olarak değerlendirilebilmektedir (Sardari et al., 2023).

Fiziksel rehabilitasyon alanında ciddi oyunların kullanımı öne çıkan yenilikçi yaklaşımlardan biridir. Oyunların eğitim ve bilgilendirme amaçlarına ek olarak, yapay zeka destekli videolar, eğlenceli ve motive edici rehabilitasyon süreçleri geliştirmek için kullanılmaktadır. Rehabilitasyonda yapay zeka tabanlı oyunlaştırma, sanal gerçeklik ve robotik uygulamaları aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Favre et al., 2023). Oyun mekaniği, zorluk seviyeleri ve ödül sistemlerinin entegrasyonu, ciddi oyunlar rehabilitasyondaki bireyler için ilgi çekici ve motive edici bir ortam sunar; aktif katılımı teşvik eder ve ilerleme takibini kolaylaştırır. Dahası ciddi oyunların ev tabanlı rehabilitasyon programlarına entegre edilmesi, tedavi sürecini daha etkileşimli ve keyifli hale getirerek hasta katılımını ve tedavi sonuçlarını olumlu yönde etkileme potansiyeline sahiptir (Cunha et al., 2023).

Yapay Zeka Destekli Telerehabilitasyon ve Geri Bildirim Sistemleri

Tele rehabilitasyon, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarında çok sayıda müdahale ve yöntem seçeneği sunarken, sağlık hizmeti kullanıcısının tercihlerini dikkate alarak hasta merkezli bakıma öncelik verilmelidir. Yapay zeka destekli dijital rehabilitasyon müdahaleleri, giyilebilir sensörlerden, kamera tabanlı sistemlerden ve mobil uygulamalardan elde edilen verileri analiz

ederek egzersiz performansını gerçek zamanlı olarak izleyebilir ve ayrıca hatalı hareket kalıplarını otomatik olarak tespit edebilir (Baroni et al., 2023).

Yapay zeka teknolojileri fizyolojik, psikolojik ve biyomekanik verileri bütüncül biçimde analiz etmek için gelişmiş algoritmalar kullanır. Eş zamanlı ve bireyselleştirilmiş geri bildirim sunarlar; bireysel yanıtlara göre eğitim yoğunluğunu ayarlarlar ve tedavi planlarını hastaya özel ilerlemesine uyarlarlar (Davenport & Kalakota, 2019; Luo et al., 2025).

Erişilebilirlik ve uygulanabilirlik açısından değerlendirildiğinde, mobil uygulamalar ve teleplatformlar, düşük maliyetleri ve yüksek erişilebilirlik potansiyelleri nedeniyle klinik uygulamada öne çıkmaktadır. Ev temelli rehabilitasyon ve rutin bakım süreçlerinde bu yaklaşımlar kolaylıkla uygulanabilmekte; yetersiz hizmet alan bölgeler dâhil olmak üzere uzaktan sunulabilmektedir. Eldeki bulgular, bu tür dijital çözümlerin sağlık hizmeti maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlayabildiğini göstermektedir. Ayrıca robotik tabanlı müdahaleler, artan kanıtlara ve belirli sağlık sistemi bağlamlarında umut vadeden maliyet-etkinlik analizlerine rağmen, yüksek başlangıç maliyetleri ve uygulama önündeki yapısal engeller nedeniyle şu anda daha sınırlı bir ölçekte kullanılmaktadır (Baroni et al., 2023; Luo et al., 2025).

Klinik Uygulamada Yapay Zeka'nın Avantajları

Muskuloskeletal rehabilitasyon da değerlendirme, bireyselleştirilmiş egzersiz yaklaşımları, yürüyüş, denge ve telerehabilitasyon alanlarında yapay zeka uygulamaları hızla artan bir araştırma odağı haline gelmiştir. Yapay zeka temelli rehabilitasyon teknolojileri geniş çaplıdır ve klinisyenlere göre karmaşık durumları daha hızlı analizleyebilir. Yapay zeka verilerinin analizi daha objektif ve hassas değerlendirme yapar. Uzaktan izlenme sağlar ve ilerlemeler hakkında daha fazla içgörü oluşturur. Hastane veya kliniklere fiziki olarak tamamen bağlı olmayı ortadan kaldırabilir. Kişilerin ev ortamında maliyeti düşük uygulamalarla değerlendirme ve tedavisi gerçekleşebilmektedir (Baroni et al., 2023; Brennan et al., 2019; Sumner et al., 2023).

Rehabilitasyon hizmetlerinde yapay zeka temelli akıllı teknolojilerin kullanımı, sağlık hizmetleri yönetimi perspektifinden değerlendirildiğinde, klinik etkinliğin ve hizmet sunumunun optimizasyonuna yönelik önemli avantajlar sunmaktadır. Bireysel işlevsel düzey ve yeteneklere göre uyarlanabilir biçimde tasarlanabilen giyilebilir ve dijital rehabilitasyon teknolojileri, ölçeklenebilir üretim ve standardizasyon olanakları sayesinde uzun vadede maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir. Buna ek olarak, tedavi sürecinde

zamanlama, yoğunluk, zorluk düzeyi ve uygulama hızı gibi temel parametrelerin esnek biçimde yapılandırılabilmesi hem terapist hem de hasta açısından kişiselleştirilmiş ve sürdürülebilir bir rehabilitasyon süreci oluşturmaktadır. Güvenilir ve geçerli kullanıcı algılama sistemleri aracılığıyla elde edilen objektif veriler, klinik karar verme süreçlerini desteklerken; eş zamanlı geri bildirim mekanizmaları ve gerçek yaşamı simüle eden uygulamalar, fonksiyonel aktivite eğitiminin etkinliğini artırmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, rehabilitasyon sürecine hasta katılımını güçlendirmekte ve uzun süreli tedavi süreçlerinde hasta ve terapist kaynaklı tükenmişlik riskinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Akalın, 2022; Wang et al., 2023).

Klinik Uygulamada Yapay Zeka'nın Sınırlılıkları

Yapay zeka temelli sağlık ve rehabilitasyon uygulamalarının klinik pratiğe entegrasyonu; yüksek başlangıç maliyetleri, sürdürülebilir finansman modellerinin yetersizliği, donanım–yazılım altyapı gereksinimleri, bakım ve güncelleme maliyetleri, dijital uçurum ve teknoloji okuryazarlığındaki eşitsizlikler, kullanıcı ihtiyaçlarına yeterince duyarlı olmayan tasarım yaklaşımları ve sağlık sistemlerine entegrasyondaki yapısal engeller nedeniyle sınırlı kalabilmektedir. Bu ekonomik ve yapısal kısıtlılıklar, yapay zeka destekli bakımın potansiyel yararlarının geniş popülasyonlara eşit biçimde yayılmasını zorlaştırmakta ve mevcut sağlık eşitsizliklerini derinleştirme riski taşımaktadır (Sumner et al., 2023).

Mevcut yapay zeka muskuloskeletal rehabilitasyonda klinik değerlendirme ve tedavi süreçlerini destekleyen güçlü bir potansiyele sahiptir. Mevcut kanıtlar yapay zeka tabanlı uygulamaların rutin klinik kullanımı için henüz yeterli düzeye ulaşmamıştır. Çalışmaların çoğunun sınırlı örneklem büyüklüğüne sahip olması, kısa takip süreleri içermesi ve metodolojik heterojenite göstermesi, elde edilen bulguların genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Yapay zeka potansiyeli klinik pratiğe güvenli ve etkili biçimde aktarılabilmesi için fizyoterapi odaklı, çok merkezli, uzun dönemli çalışmalarla desteklenmelidir.

Sonuç

Yapay zeka, muskuloskeletal rehabilitasyonda klinik karar verme süreçlerini destekleyen ve bireyselleştirilmiş fizyoterapi yaklaşımlarını güçlendiren umut verici bir araçtır. Gelecekte yapılacak yüksek kaliteli, uzun süreli ve gerçek klinik ortamları yansıtan araştırmaların; yapay zeka temelli rehabilitasyon uygulamalarının etkinliğini, sürdürülebilirliğini ve sağlık sistemlerine entegrasyonunu daha net biçimde ortaya koyması beklenmektedir.

Kaynakça

- Akalın, B. (2022). Artificial Intelligence Applications in Rehabilitation Service (DOI: 10.26650/acin.1068576). <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2234081>
- Baroni, M. P., Jacob, M. F. A., Rios, W. R., Fandim, J. V., Fernandes, L. G., Chaves, P. I., Fioratti, I., & Saragiotto, B. T. (2023). The state of the art in telerehabilitation for musculoskeletal conditions. *Archives of Physiotherapy* 2022 13:1, 13(1), 1-. <https://doi.org/10.1186/S40945-022-00155-0>
- Boltaboyeva, A., Baigarayeva, Z., Imanbek, B., Ozhikenov, K., Getahun, A. J., Aidarova, T., & Karymsakova, N. (2025). A Review of Innovative Medical Rehabilitation Systems with Scalable AI-Assisted Platforms for Sensor-Based Recovery Monitoring. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 6840, 15(12), 6840. <https://doi.org/10.3390/APP15126840>
- Brennan, L., Zubiete, E. D., & Caulfield, B. (2019). Feedback Design in Targeted Exercise Digital Biofeedback Systems for Home Rehabilitation: A Scoping Review. *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 181, 20(1), 181. <https://doi.org/10.3390/S20010181>
- Cascella, M. (2024). Clinical Applications of AI in Pain Medicine. *Exploring AI in Pain Research and Management*, 65–83. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78833-8_4
- Chen, H. C., Sunardi, Liau, B. Y., Lin, C. Y., Akbari, V. B. H., Lung, C. W., & Jan, Y. K. (2021). Estimation of Various Walking Intensities Based on Wearable Plantar Pressure Sensors Using Artificial Neural Networks. *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 6513, 21(19), 6513. <https://doi.org/10.3390/S21196513>
- Cunha, B., Ferreira, R., & Sousa, A. S. P. (2023). Home-Based Rehabilitation of the Shoulder Using Auxiliary Systems and Artificial Intelligence: An Overview. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 7100, 23(16), 7100. <https://doi.org/10.3390/S23167100>
- Davenport, T., & Kalakota, R. (2019). The potential for artificial intelligence in healthcare. *Future Healthcare Journal*, 6(2), 94–98. <https://doi.org/10.7861/FUTUREHOSP.6-2-94>
- De Sire, A., & Invernizzi, M. (2021). Musculoskeletal Rehabilitation: State-of-the-Art. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 6243, 11(14), 6243. <https://doi.org/10.3390/APP11146243>
- El-Tallawy, S. N., Pergolizzi, J. V., Vasiliu-Feltes, I., Ahmed, R. S., LeQuang, J. A. K., El-Tallawy, H. N., Varrassi, G., & Nagiub, M. S. (2024). Incorporation of “Artificial

- Intelligence” for Objective Pain Assessment: A Comprehensive Review. *Pain and Therapy* 2024 13:3, 13(3), 293–317. <https://doi.org/10.1007/S40122-024-00584-8>
- Favre, J., Cantaloube, A., & Jolles, B. M. (2023). Rehabilitation for Musculoskeletal Disorders: The Emergence of Serious Games and the Promise of Personalized Versions Using Artificial Intelligence. *Journal of Clinical Medicine* 2023, Vol. 12, Page 5310, 12(16), 5310. <https://doi.org/10.3390/JCM12165310>
- Forsberg, K., Jirlén, J., Jacobson, I., & Röijezon, U. (2024). Cervical Sensorimotor Function Tests Using a VR Headset—An Evaluation of Concurrent Validity. *Sensors*, 24(17), 5811. <https://doi.org/10.3390/s24175811>
- Hong, Y., Kim, G., Lee, D. Y., Song, S. Y., Kim, S. Y., Cho, S. B., Lee, J., Jeong, W., Jang, K. J., & Kim, D. H. (2025). AI-Empowered Rehabilitation Assistance Program for Patients With Lower-Limb Musculoskeletal Disorders. *IEEE Access*, 13, 188793–188807. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3622245>
- Howard, M. C. (2017). A meta-analysis and systematic literature review of virtual reality rehabilitation programs. *Computers in Human Behavior*, 70, 317–327. <https://doi.org/10.1016/J.CHB.2017.01.013>
- Jack, K., McLean, S. M., Moffett, J. K., & Gardiner, E. (2010). Barriers to treatment adherence in physiotherapy outpatient clinics: A systematic review. *Manual Therapy*, 15(3), 220–228. <https://doi.org/10.1016/J.MATH.2009.12.004>
- Kim, S., Kim, H. S., & Yoo, J. Il. (2023). Sarcopenia classification model for musculoskeletal patients using smart insole and artificial intelligence gait analysis. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, 14(6), 2793–2803. <https://doi.org/10.1002/JCSM.13356>;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Kobsar, D., Charlton, J. M., Tse, C. T. F., Esculier, J. F., Graffos, A., Krowchuk, N. M., Thatcher, D., & Hunt, M. A. (2020). Validity and reliability of wearable inertial sensors in healthy adult walking: a systematic review and meta-analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 2020 17:1, 17(1), 62-. <https://doi.org/10.1186/S12984-020-00685-3>
- Koul, M., Thanki, R., Koul, R., Fujarski, S., Radhakrishnan, S., & Jodbhavi, S. (2025). An AI-driven video based goniometer for knee joint range of motion (ROM) Assessment:

Reliability and validity compared to traditional goniometry. *Computers in Biology and Medicine*, 196, 110848. <https://doi.org/10.1016/J.COMPBIOMED.2025.110848>

Krzyzaniak, N., Cardona, M., Peiris, R., Michaleff, Z. A., Greenwood, H., Clark, J., Scott, A. M., & Glasziou, P. (2023). Telerehabilitation versus face-to-face rehabilitation in the management of musculoskeletal conditions: a systematic review and meta-analysis. *Physical Therapy Reviews*, 28(2), 71–87. <https://doi.org/10.1080/10833196.2023.2195214;CTYPE:STRING:JOURNAL>

Lin, H. T., Li, Y. I., Hu, W. P., Huang, C. C., & Du, Y. C. (2019). A Scoping Review of The Efficacy of Virtual Reality and Exergaming on Patients of Musculoskeletal System Disorder. *Journal of Clinical Medicine* 2019, Vol. 8, Page 791, 8(6), 791. <https://doi.org/10.3390/JCM8060791>

Luo, Z., Wang, Y., Zhang, T., & Wang, J. (2025). Effectiveness of AI-assisted rehabilitation for musculoskeletal disorders: a network meta-analysis of pain, range of motion, and functional outcomes. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1660524. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2025.1660524/BIBTEX>

Payedimarri, A. B., Ratti, M., Rescinito, R., Vanhaecht, K., & Panella, M. (2022). Effectiveness of Platform-Based Robot-Assisted Rehabilitation for Musculoskeletal or Neurologic Injuries: A Systematic Review. *Bioengineering*, 9(4), 129. <https://doi.org/10.3390/BIOENGINEERING9040129/S1>

Pereira, M. F., Prahm, C., Kolbenschlag, J., Oliveira, E., & Rodrigues, N. F. (2020, August). A virtual reality serious game for hand rehabilitation therapy. In *2020 IEEE 8th international conference on serious games and applications for health (SeGAH)* (pp. 1-7). IEEE.

Perna, A., & Proietti, L. (2023). Editorial on: Musculoskeletal Rehabilitation: Current Challenges and New Perspectives. *Journal of Clinical Medicine* 2023, Vol. 12, Page 3981, 12(12), 3981. <https://doi.org/10.3390/JCM12123981>

Popelnukha, A., & Dmytriiev, D. V. (2025). Rapid Pain Assessment Tool with AI support: redefining pain management. Pilot study. *Emergency Medicine (Ukraine)*, 21(5), 455–458. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.21.5.2025.1910>

- Rasa, A. R. (2024). Artificial Intelligence and Its Revolutionary Role in Physical and Mental Rehabilitation: A Review of Recent Advancements. *BioMed Research International*, 2024(1), 9554590. <https://doi.org/10.1155/BMRI/9554590>
- Reis, F. J. J., Bittencourt, J. V., Calestini, L., de Sá Ferreira, A., Meziat-Filho, N., & Nogueira, L. C. (2023). Exploratory analysis of 5 supervised machine learning models for predicting the efficacy of the endogenous pain inhibitory pathway in patients with musculoskeletal pain. *Musculoskeletal science & practice*, 66, 102788. <https://doi.org/10.1016/j.msksp.2023.102788>
- Román-Belmonte, J. M., Corte-Rodríguez, H. D. la, Rodríguez-Damiani, B. A., Rodríguez-Merchán, E. C., Román-Belmonte, J. M., Corte-Rodríguez, H. D. la, Rodríguez-Damiani, B. A., & Rodríguez-Merchán, E. C. (2023). Artificial Intelligence in Musculoskeletal Conditions. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.110696>
- Russell, T. G., Blumke, R., Richardson, B., & Truter, P. (2010). Telerehabilitation mediated physiotherapy assessment of ankle disorders. *Physiotherapy Research International*, 15(3), 167–175. <https://doi.org/10.1002/PRI.471>
- Sardari, S., Sharifzadeh, S., Daneshkhah, A., Nakisa, B., Loke, S. W., Palade, V., & Duncan, M. J. (2023). Artificial Intelligence for skeleton-based physical rehabilitation action evaluation: A systematic review. *Computers in biology and medicine*, 158, 106835. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.106835>
- Seas, A., Zachem, T. J., Valan, B., Goertz, C., Nischal, S., Chen, S. F., Sykes, D., Tabarestani, T. Q., Wissel, B. D., Blackwood, E. R., Holland, C., Gottfried, O., Shaffrey, C. I., & Abd-El-Barr, M. M. (2025). Machine learning in the diagnosis, management, and care of patients with low back pain: a scoping review of the literature and future directions. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society*, 25(1), 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2024.09.010>
- Shariatnia, M. M., Bagherieh, S., Semnani, F., Rafiei, N., Avval, A. H., Ollivier, M., Musahl, V., & Pareek, A. (2025). Artificial Intelligence Applications in Musculoskeletal Imaging. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 2025 19:1, 19(1), 4-. <https://doi.org/10.1007/S12178-025-09997-0>
- Sumner, J., Lim, H. W., Chong, L. S., Bundele, A., Mukhopadhyay, A., & Kayambu, G. (2023). Artificial intelligence in physical rehabilitation: A systematic review. *Artificial*

- Intelligence in Medicine, 146, 102693.
<https://doi.org/10.1016/J.ARTMED.2023.102693>
- Tack, C. (2019). Artificial intelligence and machine learning | applications in musculoskeletal physiotherapy. *Musculoskeletal Science and Practice*, 39, 164–169.
<https://doi.org/10.1016/J.MSKSP.2018.11.012>
- Tagliaferri, S.D., Angelova, M., Zhao, X. *et al.* Artificial intelligence to improve back pain outcomes and lessons learnt from clinical classification approaches: three systematic reviews. *npj Digit. Med.* **3**, 93 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0303-x>
- TAKI F., A. K. Ç. (2024). Use of Artificial Intelligence in Physiotherapy and Rehabilitation | ISRES - International Society for Research in Education and Science.
<https://www.isres.org/vodtypehtml/use-of-artificial-intelligence-in-physiotherapy-and-rehabilitation-626-s.html>
- Tian, Y. (2020). Artificial Intelligence Image Recognition Method Based on Convolutional Neural Network Algorithm. *IEEE Access*, 8, 125731–125744.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3006097>
- Vinay R Gowda, & John Mathew. (2025, June). AI Integration in Personalized Physical Therapy Programs.
https://www.researchgate.net/publication/392364391_AI_Integration_in_Personalized_Physical_Therapy_Programs
- Wang, L., Chen, X., Deng, Q., You, M. K., Xu, Y., Liu, D., Lin, Y., Li, P. C., & Li, J. (2023). Effectiveness of a digital rehabilitation program based on computer vision and augmented reality for isolated meniscus injury: protocol for a prospective randomized controlled trial. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 18(1).
<https://doi.org/10.1186/S13018-023-04367-3>
- Zhang, M., Zhu, L., Lin, S. Y., Herr, K., Chi, C. L., Demir, I., Dunn Lopez, K., & Chi, N. C. (2023). Using artificial intelligence to improve pain assessment and pain management: a scoping review. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 30(3), 570–587. <https://doi.org/10.1093/JAMIA/OCAC231>
- Zihao Wang², Z. X. C. S. G. X. and J. H. (2024). Global, regional and national burden of osteoarthritis in 1990–2021: a systematic analysis of the global burden of disease study 2021. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-08122-5>

Zmudzki, F., & Smeets, R. J. E. M. (2023). Machine learning clinical decision support for interdisciplinary multimodal chronic musculoskeletal pain treatment. *Frontiers in pain research* (Lausanne, Switzerland), 4, 1177070. <https://doi.org/10.3389/fpain.2023.1177070>

BÖLÜM 7

SARKOPENİDE ULUSLARARASI ÇALIŞMALAR

Nazlı Büşra CİĞERCİOĞLU

1.1. Sarkopeni Kavramı

Yaşlanma süreci ile birlikte kas kütlesinde ve fonksiyonlarında meydana gelen kayıplar insanlık tarihi boyunca gözlemlenmiş olsa da, bu durumun tıbbi bir kavram ve klinik sendrom olarak tanımlanması oldukça yakın bir geçmişe dayanmaktadır.

Eski Yunanca *sarx* (et/kas) ve *penia* (kayıp/eksiklik) kelimelerinin birleşiminden türetilen "sarkopeni" terimi, ilk kez 1989 yılında Amerikalı geriyatrist Irwin Rosenberg tarafından ortaya atılmıştır. Rosenberg, Albuquerque’de düzenlenen bir geriatri kongresinde, yaşlanmayla ilişkili vücut kompozisyonu değişiklikleri arasında en göze çarpan ve müdahale edilmesi gereken temel unsurun iskelesel kas kütlesindeki azalma olduğunu vurgulamıştır.

Sarkopeni tanımı ilk dönemlerde yalnızca nicel (kantitatif) kas kütlesi kaybı üzerine odaklanmıştır. Ancak zamanla yapılan geniş çaplı kohort araştırmaları (örneğin Health ABC Study ve Baltimore Longitudinal Study of Aging), kas kütlesindeki azalmanın tek başına fiziksel yeti yitimi ve mortaliteyi açıklamakta yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu bulgular doğrultusunda kavramsal bir dönüşüm yaşanmış; kas kütlesine ek olarak kas fonksiyonu (kas gücü ve fiziksel performans) da tanısal parametrelere dahil edilmiştir.

1.2. Epidemiyolojik Profil ve Küresel Halk Sağlığı Yüğü

Dünya nüfusunun hızla yaşlanması, sarkopeniyi küresel boyutta bir halk sağlığı önceliğı haline getirmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre, 60 yaş ve üzeri nüfusun 2050 yılına kadar iki katına çıkarak yaklaşık 2.1 milyara ulaşacağı öngörülmektedir. Bu demografik kayma, sarkopeni prevalansında belirgin bir artışı beraberinde getirmektedir.

Sarkopeni prevalansı; incelenen popülasyona (toplumda yaşayan, huzurevinde kalan veya hastanede yatan), kullanılan tanı kriterlerine (EWGSOP, AWGS, IWGS, SDOC) ve ölçüm yöntemlerine (DXA, BIA, Ultrason) göre geniş bir varyasyon sergilemektedir:

Popülasyon / Yaşam Alanı	Tahmini Prevalans Aralığı (%)	Temel Risk Faktörleri / Özellikler
Toplumda Yaşayan Bireyler (65+ Yaş)	%10 – %27	Sedanter yaşam, yetersiz protein alımı, komorbiditeler
Bakımevi / Huzurevi Sakinleri	%30 – %55	İleri yaş, kronik immobilizasyon, nörodejeneratif süreçler
Hastanede Yatan Hastalar (Akut/Kronik)	%15 – %50	Akut inflamasyon, yatışa bağlı immobilizasyon, malnütrisyon
Kanser ve Siroz Hastaları (Spesifik Grp.)	%30 – %65	Kaşeksi, sistemik konsept, katabolik stres artışı

Küresel düzeyde yapılan meta-analizler, 60 yaş üzerindeki toplum bazlı popülasyonda ortalama sarkopeni prevalansının yaklaşık %10-20 arasında değiştiğini; 80 yaş ve üzeri bireylerde ise bu oranın %50'yi aştığını ortaya koymaktadır.

2.1. Sarkopeninin Etiyolojisi

Sarkopeni, tek bir nedene bağlı olarak gelişen basit bir kas dokusu kaybı olmayıp; genetik, çevresel, hormonal, nörojenik ve metabolik faktörlerin karmaşık etkileşimi sonucu ortaya çıkan multifaktöriyel bir geriatric sendromdur. Yaşlanma süreciyle birlikte kas protein sentezi ile kas protein yıkımı arasındaki dengenin katabolizma lehine bozulması, hücresel ve doku düzeyinde belirgin patolojik değişimlere yol açar.



Etiyolojide rol oynayan temel biyolojik ve fizyolojik mekanizmalar şu başlıklar altında toplanmaktadır:

1. Nörojenik Faktörler ve Motor Ünite Kaybı: İleri yaşla birlikte omuriliğin ön boynuzundaki α -motor nöron sayısında ve işlevinde kademeli bir azalma meydana gelir. Bu nöronal kayıp, motor ünitelerin remodeling kapasitesini aşarak özellikle Tip II (hızlı kasılan, glikolitik) kas liflerinde belirgin atrofiye ve denervasyona neden olur.
2. Endokrin ve Hormonal Değişiklikler: Anabolik hormonların salınımındaki yaşa bağlı düşüş kas kütlesinin korunmasını zorlaştırır. Büyüme hormonu (GH), İnsülin Benzeri Büyüme Faktörü-1 (IGF-1), testosteron, DHEA ve östrojen seviyelerindeki azalma; insülin direnci ile birleştiğinde kas içi protein sentez oranlarını düşürür.
3. Kronik Düşük Düzeyli İnflamasyon (*Inflammaging*): Yaşlanmayla birlikte bağışıklık sisteminde görülen kronik ve steril inflamatuvar yanıt; interlökin-6 (IL-6), tümör nekroz faktör-alfa (TNF- α) ve C-reaktif protein (CRP) gibi sirküle eden pro-inflamatuvar sitokinlerin artışına yol açar. Bu sitokinler, ubiquitin-proteazom sistemini (UPS) uyararak katabolizmayı hızlandırır ve anabolik direnç gelişimine katkıda bulunur.
4. Hücrel ve Mitokondriyal Disfonksiyon: Mitokondriyal DNA hasarı, reaktif oksijen türlerinin (ROS) aşırı üretimi ve bozulan otolojik/mitofajik süreçler, kas hücresi apoptozunu tetikler.

2.2. Sarkopeninin Sınıflandırılması

Uluslararası geriatri ve sarkopeni uzlaşılı grupları (özellikle EWGSOP ve AWGS), klinik yaklaşım ve tedavi planlamasını kolaylaştırmak amacıyla sarkopeniyi etiyolojik kökenine, zamansal seyrine ve klinik şiddetine göre sınıflandırmaktadır.

A. Etiyolojik Kökenine Göre Sınıflandırma

Sınıflandırma Kriteri	Tanım ve �zellikler	Temel Klinik Nedenler / Tetikleyiciler
Primer (Yaşa Bağlı) Sarkopeni	Yaşlanma sürecinin kendisine doğrudan bağlı olarak gelişen, belirgin başka bir sekonder nedenin bulunmadığı durumdur.	• Hücresel senesens ve moleküler yaşlanma • Yaşa bağlı motor nöron kaybı • Büyüme faktörlerinde fizyolojik azalma
Sekonder Sarkopeni	İleri yaşın yanı sıra veya yaştan bağımsız olarak tanımlanabilir spesifik bir patolojiye sekonder gelişen durumdur.	• Aktiviteye Bağlı: İmmobilizasyon, sedanter yaşam, yatağa bağımlılık, uzay uçuşları • Hastalığa Bağlı: Kanser, KOAH, KKY, Kronik Böbrek Yetmezliği, Tip 2 DM, Siroz • Beslenmeye Bağlı: Yetersiz enerji/protein alımı, emilim bozuklukları, anorexia of aging

B. Zamansal Seyre Göre Sınıflandırma

EWGSOP2 kılavuzunda klinik müdahale zamanlamasını belirlemek amacıyla zamansal bir ayırım getirilmiştir:

- Akut Sarkopeni: Belirtilerin ve kas fonksiyon kayıplarının 6 aydan daha kısa süre içerisinde aniden ortaya çıkması durumudur. Genellikle akut hastaneye yatışlar, cerrahi operasyonlar, ağır enfeksiyonlar veya akut immobilizasyon sonrasında gelişir. Erken dönemde agresif fiziksel ve beslenme müdahaleleri ile geri d nd r lebilirlik oranı yüksektir.
- Kronik Sarkopeni: Tablonun 6 ay veya daha uzun süre devam etmesi halidir. Genellikle kronik progresif hastalıklar veya kademeli fizyolojik yaşlanma ile seyreder. Kalıcı yeti yitimi ve mortalite riski ile doğrudan ilişkilidir.

2.3. Klinik Şiddetine Göre Sınıflandırma

EWGSOP2 (2019) uzlaşısı raporu, klinisyenlerin hastadaki riski derecelendirmesi ve doğru tedavi basamağını seçebilmesi için sarkopeniyi üç belirgin klinik evreye ayırmıştır:

Olası Sarkopeni: Kriteri düşük kas gücünün (handgrip strength veya chair stand test ile) saptanmasıdır.

Klinik Önemi: Birincil basamak sağlık hizmetlerinde tarama ve erken müdahale (egzersiz ve beslenme) başlatılması için yeterli kabul edilir.

Kesin Sarkopeni: Kriteri düşük kas gücüne ek olarak, ölçüm yöntemleri (DXA, BIA veya BT/MRG) ile düşük kas miktarının veya kalitesinin doğrulanmasıdır. Klinik Önemi: Tanı kesinleşmiştir; ileri klinik değerlendirme ve spesifik etiyolojiyle yönelik tedavi planı zorunludur.

Şiddetli Sarkopeni: Kriteri düşük kas gücü ve düşük kas miktarına ek olarak düşük fiziksel performansın (ör. yürüme hızı, SPPB, TUG testi) tabloya eşlik etmesidir. Klinik Önemi: Yüksek düşme, kırık, bağımlılık, hastaneye yeniden yatış ve mortalite riski taşır; çok yönlü geriyatrik yaklaşım gerektirir.

3. Sarkopenin Patofizyoloji

Sarkopeni, iskelet kasında protein sentezi ile protein yıkımı arasındaki dengenin katabolizma lehine bozulmasıyla gelişir. Bu dengesizlik, hücresel ve moleküler düzeyde şu temel mekanizmalarla ortaya çıkar:

3. 1. Protein Dengesi ve Sinyal Yolları

Anabolik Direnç (mTORC1 Baskılanması): IGF-1, insülin ve amino asitlere verilen yanıtsızlık nedeniyle PI3K/Akt/mTORC1 yolu baskılanır. Bu durum, hücresel düzeyde protein sentezini belirgin şekilde düşürür.

Katabolik Yıkım (UPS Aktivasyonu): Akt sinyalinin azalmasıyla FOXO transkripsiyon faktörü aktive olur. FOXO, kas dokusuna özgü E3 ubiquitin ligazlar olan MuRF1 ve MAFbx'i uyararak miyofibrillerin 26S Ubiquitin-Proteazom Sistemi (UPS) üzerinden yıkımını hızlandırır.

3. 2. Nöromusküler Değişiklikler

Motor Nöron Kaybı: İleri yaşla birlikte omurilik ön boynuzundaki α -motor nöronlar apoptoza uğrar.

Tip II Lif Atrofisi: Denerve olan Tip II (hızlı/güçlü) kas liflerinde belirgin atrofi ve kayıp yaşanır. Bu süreç, kas kütlesinden önce kas gücündeki hızlı düşüşün (dinapeni) ana nedenidir.

3. 3. Sistemik İnflamasyon ve Miyostatin

Inflamaging: Yaşlanmaya bağlı kronik düşük düzeyli inflamasyon (IL-6, TNF- α), NF- κ B yolunu tetikleyerek kas yıkımını uyarır ve anabolik süreçleri engeller.

Miyostatin Yolağı: Kas büyümesini negatif düzenleyen miyostatin (GDF-8), Smad2/3 yolağı üzerinden hem protein sentezini durdurur hem de proteolizi başlatır.

3. 4. Mitokondriyal Disfonksiyon ve Kök Hücre Tükenmesi

Oksidatif Stres ve Apoptoz: Artan reaktif oksijen türleri (ROS) ve bozulan mitofaji süreci, hücrel enerji krizine ve Caspase-3 aracılı apoptoza yol açar.

Uydu Hücresi Senesensi: Kas kök hücrelerinin yenilenme kapasitesi azalır; kas dokusu yerini yağ (miyosteatoz) ve fibrotik dokuya bırakır.

4. Sarkopeni Tanı, Tarama ve Değerlendirme Protokolleri

Sarkopeni tanısı, EWGSOP2 (2019) kılavuzuna göre F-A-C-S (Bul-Değerlendir-Doğrula-Şiddetini Belirle) adımlarıyla kademeli olarak konur.

4. 1. Tarama ve Vaka Bulma

- SARC-F Anketi: 5 maddelik pratik ölçek (0-10 puan). ≥ 4 puan sarkopeni riskini gösterir.
- SARC-Calf: SARC-F'e Baldır Çevresi (CC) eklenmiş halidir. Baldır çevresi erkeklerde < 34 cm, kadınlarda < 33 cm altında ise hassasiyeti artırır; ≥ 11 puan yüksek risk kabul edilir.

4. 2. EWGSOP2 Tanı Kriterleri ve Algoritması

Adım / Evre	Değerlendirilen Metrik	Yöntem	Kesim Değeri (Erkek / Kadın)
1.Olası Sarkopeni	Kas Gücü	El Dinamometresi	< 27kg / < 16kg
		Sandalye Testi (5 kez)	> 15saniye
2. Kesin Sarkopeni	Kas Miktarı	Apendiküler Kas (ASM)	< 20kg / < 15kg
		ASM / Boy	< 7.0kg/m ² / < 5.5kg/m ²
3. Şiddetli Sarkopeni	Physical Performance	Yürüme Hızı (4m)	≤ 0.8m/sn
		SPPB Skoru	≤ 8Puan

4. 3. Kas Miktarı Ölçüm Yöntemleri

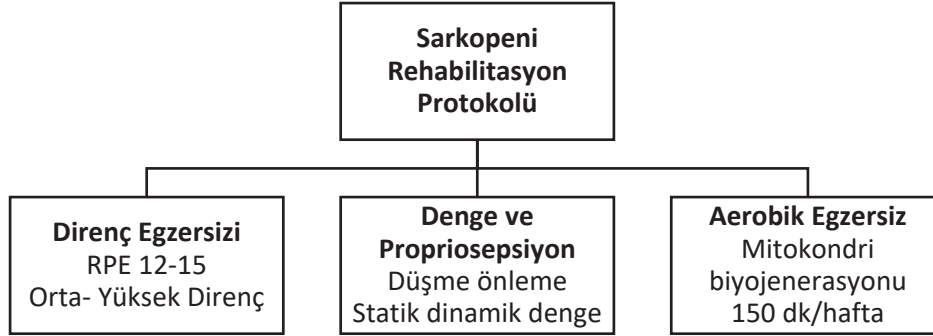
- DXA (Altın Standart - Klinik): Düşük radyasyonla Apendiküler İskelet Kası Kütlesini (ASM) doğru ölçer.
- BIA (Saha / Pratik): Vücut direncini kullanır, pratik ve ucuzdur; ancak hastanın sıvı dengesinden (ödem/dehidrasyon) etkilenir.
- BT / MRG ve Ultrason: Kas kesit alanı, doku kalitesi ve kas içi yağlanmayı gösteren hassas yöntemlerdir.

5. Sarkopenide Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Odaklı Yönetim ve Tedavi Yaklaşımları

Sarkopeni yönetiminde birincil ve en etkili müdahale hattını fizyoterapi ve rehabilitasyon uygulamaları oluşturur. Egzersiz, kas protein sentezini (anabolizmayı) doğrudan tetikleyen, nöromusküler uyumu artıran ve anabolik direnci kıran tek kanıta dayalı altın standart tedavidir.

5.1. Fizyoterapi ve Egzersiz Protokolleri

Rehabilitasyon programı hastanın klinik evresine göre kişiselleştirilmeli ve kişiye özel yüklenme ilkeleriyle uygulanmalıdır.



Direnç Egzersizi: Direnç egzersizleri, sarkopeni rehabilitasyonunun temelimizi oluşturur. Bu egzersizler özellikle yaşlanmayla birlikte atrofiye uğrayan Tip II kas liflerinin rekrütmanını sağlar ve hücresel düzeyde Akt/mTORC1 anabolik yolağını uyararak kas kütlesi ile hipertrofisinde artış elde edilmesini destekler.

- Uygulama Protokolü: Antrenman sıklığı haftada 2-3 gün (ardışık olmayan günlerde) olacak şekilde planlanmalıdır. Yüklenme şiddeti, bireyin 1 Tekrar Maksimumunun (1RM) %60-80'i aralığında veya Algılanan Zorluk Derecesi ölçeğine göre orta-yüksek düzeyde (RPE 12-15) tutulmalıdır. Hacim olarak büyük kas gruplarına yönelik 1-3 set ve 8-12 tekrar içeren programlar tercih edilmelidir.

Denge ve Koordinasyon Egzersizleri: Kas kütlesindeki kayıplara eşlik eden nöromusküler disfonksiyon, postüral salınımı artırarak düşme riskini tetikler. Denge çalışmaları, motor ünite rekrütmanını geliştirerek refleks yanıt sürelerini kısaltır ve düşmelerin önüne geçer.

- Uygulama Protokolü: Haftada 3-5 gün uygulanması önerilir. Çalışmalar tek ayak üstünde durma, tandem yürüyüşü, denge tahtası kullanma ve agilitate antrenmanları gibi statik ve dinamik denge bileşenlerini içermelidir.

Aerobik Egzersizler: Aerobik çalışmalar doğrudan belirgin bir kas kütlesi artışı sağlamasa da, kas liflerindeki mitokondriyal biyo-jenerasyonu artırır, insülin duyarlılığını düzenler ve kronik düşük düzeyli inflamasyonu azaltır.

- Uygulama Protokolü: Haftada 3-5 gün, maksimum kalp hızının %50-70'i şiddetinde uygulanmalıdır. Günlük 20-45 dakikalık seanslar halinde, haftalık toplam 150 dakikalık orta şiddetli aerobik aktivite hedeflenmelidir.

Multimodal Egzersizler: Dirençli, denge ve aerobik egzersiz bileşenlerinin aynı program içerisinde entegre edildiği kombine yaklaşımdır. Yaşlı ve kırılğan bireylerde hem kas kütlesini ve gücünü koruma hem de fonksiyonel bağımsızlığı maksimum seviyeye çıkarma konusunda en yüksek hasta uyumu ve klinik faydayı sunan yöntemdir.

5.2. Beslenme ile Fizyoterapinin Sinerjisi

Fizyoterapi uygulamalarının başarısı, anabolik pencerenin doğru nütrisyonel destekle desteklenmesine bağlıdır. Egzersiz seansını takip eden ilk 30-60 dakika içinde 20 – 30 gram yüksek kaliteli protein alımı, kas protein sentezini maksimuma çıkarır. Günlük hedef 1.2 – 1.5 g/kg/gün olmalıdır. Serum 25(OH)D₃ düzeyi < 30 ng/mL olan hastalarda fizyoterapinin kas gücü üzerindeki etkisi kısıtlanır. D vitamini replasmanı, Tip II kas lifi alanını ve kalsiyum duyarlılığını artırır.

5.3. Fizyoterapide Yenilikçi ve Teknolojik Yaklaşımlar

Kan Akımı Kısıtlama Terapisi: İleri derecede eklem ağrısı veya osteoartriti olan hastalarda düşük yüklerle (%20 – 30 1RM) manşet basıncı uygulanarak yapılan çalışmadır. Metabolik stres ve laktat birikimi yaratarak yüksek yüklere benzer hipertrofi yanıtı sağlar.

Nöromüsküler Elektrik Stimülasyonu: Yatağa bağımlı veya akut immobilize hastalarda Tip II kas lifi atrofisini ve denervasyonu önlemek amacıyla doğrudan kas gruplarına (özellikle m. quadriceps femoris) uygulanır.

Dual-Task Terapileri: Yürüyüş ve denge egzersizleri sırasında zihinsel görevlerin eklenmesiyle düşme ve frailty riskini azaltmaya yönelik motor-kognitif entegrasyon sağlatılır.

6. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Sarkopeni, yalnızca fizyolojik yaşlanmanın kaçınılmaz bir sonucu olmayıp; nöromüsküler, hormonal, inflamatuvar ve metabolik etmenlerin sinerjik etkileşimiyle

gelişen, erken evrede tespit edildiğinde önlenabilir ve yönetilebilir bir geriatrik sendromdur. ICD-10 kodlamasıyla bağımsız bir hastalık olarak kabul edilmesi ve EWGSOP2 gibi uluslararası uzlaş raporlarının kas gücünü tanı merkezine koyması, klinik farkındalığı artırmış ve tanı algoritmalarını standartlaştırmıştır.

Güncel kanıtlar, fizyoterapi odaklı kişiselleştirilmiş dirençli egzersizlerin ve yeterli protein/nütrisyonel desteğin anabolik direnci kırarak kas kütlesini, gücünü ve fonksiyonel bağımsızlığı korumada en etkili müdahale hattı olduğunu doğrulamaktadır.

6.1. Gelecek Perspektifleri ve Araştırma Yönelimleri

Sarkopeni alanında önümüzdeki dönemde öne çıkması beklenen temel klinik ve akademik odak alanları şunlardır:

Erken Tanı ve Biyobelirteçler (Biomarkers): Kas kaybı ve fonksiyonel gerileme henüz klinik düzeyde belirginleşmeden önce, kan/doku bazlı moleküler biyobelirteçlerin (ör. miyokinler, mikroRNA'lar, CAF-1, pro-inflamatuar sitokin panelleri) ve ultrasonik kas kalitesi parametrelerinin rutin taramalara entegrasyonu.

Kişiselleştirilmiş Hassas Tıp: Bireylerin genetik altyapısı, inflamatuvar profili, fenotipi ve miyosteatoz derecesine göre özelleştirilmiş beslenme, fizyoterapi ve egzersiz reçetelerinin oluşturulması.

Dijital Sağlık ve Yapay Zeka Uygulamaları: Giyilebilir sensörler ve yapay zeka destekli hareket analiz algoritmaları sayesinde yaşlı bireylerin günlük yaşam aktivitelerindeki kas gücü ve yürüme hızı değişimlerinin uzaktan, sürekli ve pasif olarak izlenmesi.

Halk Sağlığı ve Önleyici Politikalar: Birincil basamak sağlık hizmetlerinde rutin sarkopeni tarama protokollerinin yaygınlaştırılması ve orta yaştan itibaren koruyucu egzersiz ve beslenme farkındalık programlarının ulusal sağlık politikalarına dahil edilmesi.

7. Kaynaklar

- Bhasin, S., Trivison, T. G., Manini, T. M., Patel, S., Pencina, K. M., Fielding, R. A., Magaziner, J., Newman, A. B., Kiel, D. P., Cooper, C., Guralnik, J. M., Cauley, J. A., Arai, H., Clark, B. C., Landi, F., Schaap, L. A., Pereira, S. L., Rooks, D., Woo, J., ... Cawthon, P. M. (2020). Sarcopenia Definition and Outcomes Consortium (SDOC) consensus statements for the assessment of sarcopenia in clinical trials and clinical practice. *The Journals of Gerontology: Series A*, 75(7), 1310–1318. <https://doi.org/10.1093/gerona/glaa107>
- Bauer, J., Biolo, G., Cederholm, T., Cesari, M., Cruz-Jentoft, A. J., Morley, J. E., Phillips, S. M., Sieber, C., Stehle, P., Teta, D., Visvanathan, R., Volpi, E., & Boirie, Y. (2013). Evidence-based recommendations for optimal dietary protein intake in older people: A position paper from the PROT-AGE Study Group. *Journal of the American Medical Directors Association*, 14(8), 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2013.05.021>
- Cao, L., & Morley, J. E. (2016). Sarcopenia is recognized as an independent disease by ICD-10-CM. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 20(6), 675–676. <https://doi.org/10.1007/s12603-016-0731-3>
- Cederholm, T., Cruz-Jentoft, A. J., & Maggi, S. (2013). Sarcopenia and fragility fractures. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 49(1), 111–117.
- Chen, L. K., Woo, J., Assantachai, P., Auyeung, T. W., Chou, M. Y., Iijima, K., Jang, H. C., Kang, L., Kim, M., Kojima, T., Kuzuya, M., Lee, J. S. W., Lee, S. Y., Lee, W. J., Liang, C. K., Lim, J. Y., Lim, W. S., Peng, L. N., Sugimoto, K., ... Arai, H. (2020). Asian Working Group for Sarcopenia: 2019 consensus update on sarcopenia diagnosis and treatment. *Journal of the American Medical Directors Association*, 21(3), 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2019.12.012>
- Cruz-Jentoft, A. J., Baeyens, J. P., Bauer, J. M., Boirie, Y., Cederholm, T., Landi, F., Martin, F. C., Michel, J. P., Rolland, Y., Schneider, S. M., Topinková, E., Vandewoude, M., & Zamboni, M. (2010). Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People. *Age and Ageing*, 39(4), 412–423. <https://doi.org/10.1093/ageing/afq034>
- Cruz-Jentoft, A. J., Bahat, G., Bauer, J., Boirie, Y., Bruyère, O., Cederholm, T., Cooper, C., Landi, F., Rolland, Y., Sayer, A. A., Schneider, S. M., Sieber, C. C., Topinkova, E., Vandewoude, M., Visser, M., & Zamboni, M. (2019). Sarcopenia: Revised European consensus on definition and diagnosis. *Age and Ageing*, 48(1), 16–31. <https://doi.org/10.1093/ageing/afy169>
- Dent, E., Morley, J. E., Cruz-Jentoft, A. J., Arai, H., Kritchevsky, S. B., Guralnik, J., Bauer, J. M., Pahor, M., Entringer, S., Cesari, M., Boirie, Y., Vellas, B., & Bischoff-Ferrari, H. A. (2018). International clinical practice guidelines for sarcopenia (ICFSR): Screening, diagnosis and management. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 22(10), 1148–1161. <https://doi.org/10.1007/s12603-018-1139-9>
- Fielding, R. A., Vellas, B., Evans, W. J., Bhasin, S., Morley, J. E., Newman, A. B., Abellan van Kan, G., Andrieu, S., Bauer, J., Breuille, D., Cederholm, T., Chandler, J., De

- Meynard, C., Donini, L., Harris, T., Kannt, A., Keime Guibert, F., Onder, G., Papanicolaou, D., ... Studenski, S. (2011). Sarcopenia: An undiagnosed condition in older adults. Current consensus definition: Prevalence, etiology, and consequences. *Journal of the American Medical Directors Association*, 12(4), 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2011.01.003>
- Fragala, M. S., Cadore, E. L., Dorgo, S., Izquierdo, M., Kraemer, W. J., Peterson, M. D., & Ryan, E. D. (2019). Resistance training for older adults: Position statement from the National Strength and Conditioning Association. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(8), 2019–2052. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003230>
- Landi, F., Calvani, R., Cesari, M., Tosato, M., Martone, A. M., Bernabei, R., & Marzetti, E. (2015). Sarcopenia as the biological substrate of physical frailty. *Clinics in Geriatric Medicine*, 31(3), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.cger.2015.04.005>
- Malafarina, V., Uriz-Otano, F., Iniesta, R., & Gil-Guerrero, L. (2012). Sarcopenia in the elderly: Pathogenesis, nutrition and exercise. *Maturitas*, 71(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.10.002>
- Rosenberg, I. H. (1997). Sarcopenia: Origins and clinical relevance. *The Journal of Nutrition*, 127(5), 989S–991S. <https://doi.org/10.1093/jn/127.5.989S>
- Ryall, J. G., Schertzer, J. D., & Lynch, G. S. (2008). Cellular and molecular mechanisms underlying age-related skeletal muscle wasting and weakness. *Biogerontology*, 9(4), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s10522-008-9132-0>
- Wall, B. T., Dirks, M. L., & van Loon, L. J. (2013). Skeletal muscle atrophy during short-term disuse: Implications for age-related sarcopenia. *Ageing Research Reviews*, 12(4), 898–906. <https://doi.org/10.1016/j.arr.2013.07.003>

BÖLÜM 8

İNME SONRASI ÜST EKSTREMİTE REHABİLİTASYONUNDA KAÜÇUK EL PARADİGMASI: YENİ BİR YAKLAŞIM OLARAK UYGUNLUĞU VE TEDAVİ PROTOKOLÜNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ

Mehmet SÖNMEZ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Erzurum Teknik Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Ortopedik Fizyoterapi Anabilim Dalı, mehmet.sonmez@erzurum.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3617-9087

1. Giriş

Üst ekstremité bozukluğu, inmenin en kalıcı sonuçlarından biridir. Yetişkin kortikal temsillerin plastisitesi üzerine yapılan araştırmalar, önemli terapötik kazanımlar konusunda umutları artırmıştır; ancak aynı plastik süreçler, kendiliğinden veya uygunsuz terapötik manipölasyon sonucu uyumsuz değışiklikler de üretebilir. Bu durum, felçli elin rehabilitasyonuna yönelik çok modlu ve disiplinlerarası yaklaşımların genişletilmesi çağrısına yol açmıştır (Hlustík ve Mayer, 2006). Çoğu çağdaş yaklaşım, özellikle en şiddetli eksikliklere sahip hayatta kalanlar için en zor olan aktif uygulamaya dayanmaktadır. Bu nedenle, açık hareketin minimal veya yok olduğu durumlarda sensörimotor ağırları harekete geçirebilecek müdahalelere ihtiyaç vardır.

Botvinick ve Cohen (1998), kauçuk el illüzyonu olarak bilinen şeyi tanımladılar: bir katılımcının gizli eli ve görünür yapay bir el aynı anda okşandığında, yapay el katılımcının kendi vücudunun bir parçası olarak deneyimlenmeye başlar. İllüzyon, geleneksel olarak öz bildirim anketleri ve proprioseptif kayma, yani gerçek elin algılanan konumunun yapay ele doğru kayması yoluyla ölçülür (Burin ve ark., 2015). Başlangıçta çoklu duyusal entegrasyonun bir laboratuvar gösterimi olmasına rağmen, bu paradigma, vücut sahipliğini manipüle etmenin invaziv olmayan bir yolunu sunması ve sanal el illüzyonları da dahil olmak üzere rehabilitasyondaki olası uygulamalarının teknolojik iyileştirmeler ve bunların getirdiği sonuçlarla birlikte incelenmesi nedeniyle rehabilitasyon bilimcilerinin ilgisini çekmiştir (Christ ve Reiner, 2014).

Bu bölümün üç amacı vardır. Birincisi, inme ve ilgili rahatsızlıklarda RHP'yi kullanan çalışmaların etkilenen uzuvun vücut temsilindeki değışiklikler hakkında ortaya koyduğu bulguları sentezlemektir. İkincisi, paradigmanın yeni, bağımsız veya yardımcı bir rehabilitasyon yaklaşımı olarak uygun olup olmadığını eleştirel bir şekilde değerlendirmektir. Üçüncüsü, eğer cevap koşullu olarak olumluysa, paradigmanın nasıl yapılandırılmış bir tedavi protokolüne dönüştürülebileceğini göstermektir; bu protokol metinde açıklanmış ve tablolarda özetlenmiştir. Bölüm, kaynakça bölümünde listelenen raporlara dayanmaktadır; sistematik bir incelemeden ziyade kavramsal bir sentezdir ve önerdiği protokol, doğrulanmış bir tedavi değil, test edilecek bir hipotezdir.

2. Kauçuk El Paradigması: Prosedürler, Varyantlar ve Mekanizmalar

Klasik prosedürde, katılımcının kendi eli bir perdenin arkasına gizlenirken, anatomik olarak makul bir yapay el görünür hale getirilir ve muayene eden kişi her iki eli de aynı yerlerde ve aynı anda fırçalarla okşar. Sağlıklı katılımcıların çoğu daha sonra yapay elin kendi elleri gibi hissettirdiğini ve uygulandığını gördükleri yerde dokunma hissettiklerini bildirir (White ve Aimola Davies, 2017). Asenkron uyarım, geleneksel olarak bir kontrol koşulu olarak kullanılır, çünkü görülen ve hissedilen arasındaki zamansal uyumsuzluk, sağlıklı katılımcılarda yanılşamayı ortadan kaldırır (White ve Aimola Davies, 2017). Bu nedenle yanılşama, görsel ve dokunsal sinyallerin zamansal ve mekansal uyumuna bağlıdır ve genellikle görmenin dokunma ve uzuv pozisyonu hissi üzerinde güçlü bir etki yarattığı çoklu duyusal entegrasyonun sonucu olarak yorumlanır (Botvinick ve Cohen, 1998; Tidoni ve ark., 2014).

Rehabilitasyonla ilgili çeşitli varyantlar mevcuttur. Somatik veya kendi kendine dokunma versiyonunda, muayene eden kişi hastanın etkilenen elini uyarırken, hastanın diğer elini protez ele senkronize uyarı verecek şekilde yönlendirir; böylece hasta, iki el temas halinde olmasa bile dokunmayı kendi kendine uygulanan bir uyarı olarak deneyimler (White ve ark., 2010). Hareketli versiyonlarda, motorlu bir yapay el hareketler gerçekleştirir ve sahiplik yanılsamasıyla eşleştirilebilen görsel bir yönlendirme sağlar (Song ve Kim, 2017; Song ve Kim, 2019). Sanal gerçeklik uygulamaları aynı prensibi bilgisayar tarafından oluşturulan ellere genişletir ve invaziv olmayan rehabilitasyon için teknolojik gelişmeler olarak tartışılmıştır (Christ ve Reiner, 2014).

Bedenleşme deneyimi tek bir olgu değildir. Hemiparezi geçirmiş hayatta kalanlar üzerinde yapılan çalışmalar, en azından beden sahipliğini, elin lokalizasyonunu ve eylemliliği ayırt etmiş ve öznel raporları galvanik deri tepkisi (GSR), deri sıcaklığı ve yüzey elektromiyografik aktivitesi dahil olmak üzere fizyolojik ölçümlerle tamamlamıştır (Llorens ve ark., 2017). Bu çok bileşenli yapı klinik açıdan önemlidir, çünkü her bileşen lezyona ve eğitime farklı tepki verebilir ve fizyolojik ölçümler hastanın diline veya içgörüsüne daha az bağımlı olan objektif belirteçler sunar.

3. Kauçuk El Paradigmasının Felç Sonrası Vücut Hakkında Ortaya Koydukları

3.1 Mülkiyet yanılsamasına yatkınlık ve mülkiyetin şekillendirilebilirliği

İki çalışma, felç sonrası etkilenen uzvun farklı şekilde bedenlenip bedenlenmediğiyle doğrudan ilgilidir. Llorens ve ark. (2017) klinik olarak kontrol altında tutulan hemiparezik bireyleri sağlıklı katılımcılarla karşılaştırdı ve felç grubunun, uyarılmış elde GSR, cilt sıcaklığı ve kas aktivitesinde daha küçük bir artışla birlikte, önemli ölçüde daha güçlü beden sahipliği ve eylemlilik bildirdiğini buldu. Yazarlar bu farklılıkları, beden şemasının artan plastisitesinin ve propriosepsiyona göre görsel girdinin patolojik bir baskınlığının kanıtı olarak yorumladılar ve premotor korteksin ana rolüne işaret ettiler (Llorens ve ark., 2017).

Burin ve ark. (2015), proprioseptif veya dokunsal eksiklikleri olmayan, sol üst ekstremitte hemiplejisi olan hastaları incelediler. Sağlıklı kontrollere kıyasla, hastalar etkilenen el uyarıldığında daha güçlü yanılsamalı etkiler gösterirken, etkilenmeyen el uyarıldığında hiçbir etki göstermediler (Burin ve ark., 2015). Yazarlar, hemiplejiklerin etkilenen el için daha zayıf, daha esnek bir sahiplik duygusuna ve sağlıklı el için daha katı bir sahiplik duygusuna sahip oldukları ve hareketlerin kendilerinin tutarlı bir vücut sahipliği duygusunun geliştirilmesine ve sürdürülmesine katkıda bulunduğu sonucuna vardılar (Burin ve ark., 2015). Birlikte ele alındığında, bu bulgular, parezik uzvun bir anlamda görsel olarak yönlendirilen yeniden atıflara "açık" olduğunu ve bu açıklığın, paradigmayı terapötik olarak kullanmanın temel teorik argümanı olduğunu göstermektedir.

3.2 Duyusal bozukluk ve eşzamansız kontrol sorunu

White ve Aimola Davies (2017) tarafından hazırlanan kısa bir raporda, rehabilitasyon gören sağ yarım küre inme hastaları incelenmiş ve duyusal bozukluğun, uyarım eşzamansız olsa bile

yanılsama deneyimine yol açabileceği gösterilmiştir. Bu bulgu, klinik çeviri açısından özellikle önemlidir. Eşzamansız durumun, duyuşal bozukluğu olan hastalarda geçerli bir kontrol olarak kabul edilemeyeceği ve herhangi bir terapötik kullanımın, eşzamanlılığın katkısını varsaymak yerine deneysel olarak doğrulaması gerektiği anlamına gelir (White ve Aimola Davies, 2017). Yazarlar, bu gözlemin duyuşal bozukluğu olan hastaları tedavi eden klinisyenler için önemini açıkça belirtmişlerdir (White ve Aimola Davies, 2017).

3.3 Kendi kendine dokunma duyusunun geliştirilmesi ve somatosensör yeniden eğitimi

White ve ark. (2010), inme hastalarının başka bir kişi tarafından uygulanan dokunmayı bildirmede başarısız oldukları, ancak kendi kendilerine uygulanan dokunmayı bildirdikleri bir olguyu araştırdılar. Somatik kauçuk el paradigmasını kullanarak, hastaların kendi ellerine doğrudan dokunduklarında olduğu kadar çok uyarı algıladıklarını gösterdiler; bu da hastaların kendi kendilerine dokunma koşullarında uyarıyı çıkarım yoluyla değil, hissettiklerini gösterir (White ve ark., 2010). Ne proprioseptif bilgi ne de uygulayıcı elin konumundaki dikkat modülasyonu bu etkiyi açıklamak için yeterli değildi, oysa zamansal beklenti önemli bir rol oynadı: hastanın protez elini uyarması ile muayene edenin etkilenen elini uyarması arasında bir gecikme eklemek, artışı ortadan kaldırdı (White ve ark., 2010). Rehabilitasyon için bu, kalan dokunsal duyusun, hastanın kendi eylemini uyarı dizisine yerleştirerek ortaya çıkarılabileceğini ve potansiyel olarak eğitilebileceğini düşündürmektedir.

3.4 Omurilik yaralanmasından elde edilen kanıtlar

Her ne kadar inme çalışması olmasa da, Tidoni ve ark.'nın (2014) tek vaka raporu, derin sensörimotor bağlantı kopukluğuyla ilgili olduğu için bilgilendiricidir. Dörtlü felçli bir adam, dört test gününün her birinde yapay elin sahibi olduğunu bildirmiş ve veriler, lezyondan sonra güçlü görsel yakalama ve el-yüz temsillerinin olası yeniden haritalanmasını göstermiştir (Tidoni ve ark., 2014). Yazarlar, görme ve beyin plastisitesinin, duyuşal eksiklikleri olan hastalarda motor rehabilitasyon için destekleyici bir araç sağlayabileceğini öne sürmüşlerdir (Tidoni ve ark., 2014). İnmeye yönelik genellemeler dikkatli yapılmalıdır, ancak rapor, afferent ve efferent yolların dramatik bir şekilde bozulduğu durumlarda bile illüzyonun ortaya çıkarılabileceğini göstermektedir.

Tablo 1. İnme ve ilgili lezyonlardan sonra kauçuk el paradigmasının kullanımına ilişkin bilgi sağlayan temel çalışmalar

Kaynak	Nüfus	Paradigma / önlemler	Başlıca bulgu	Rehabilitasyonla ilişkisi
Burin ve ark. (2015)	Proprioseptif veya dokunsal eksiklik olmaksızın kronik sol üst ekstremitte hemiplejisi; sağlıklı kontrol grubu	Klasik RHI; anket ve proprioseptif kayma	Etkilenen el için illüzyon daha güçlü; etkilenmeyen el için ise hiç illüzyon yok.	Etkilenen uzuvun sahipliği esnektir; hareket sinyalleri önemlidir.
Llorens ve ark. (2017)	Hemiparezik inme; sağlıklı kontrol grubu	RHI; sahiplik, yerelleştirme, temsilcilik; GSR, cilt sıcaklığı, sEMG	Daha güçlü sahiplenme ve özerklik; inme sonrası daha küçük fizyolojik tepkiler.	Vücut şeması esnekliği; propriosepsiyona göre görselin baskınlığı
White ve Aimola Davies (2017)	Sağ beyin yarımküresi felci rehabilitasyonunda	Asenkron uyarımlı RHP	Duyusal bozukluğun varlığında, eşzamansızlığa rağmen yanılsama mevcuttur.	Asenkron kontrol geçersiz olabilir; ekran hissi
White ve ark. (2010)	Sağ beyin yarımküresinde dokunma duyusu kaybı olan inme	Somatik (kendine dokunma) RHP; gecikmeli manipülasyon	Kendi kendine dokunma geliştirme; gecikme nedeniyle kaldırıldı	Dokunma yoluyla duysal yeniden eğitimin temeli
Tidoni ve ark. (2014)	Dört uzvu felçli adam (tek vaka)	RHI, el ve yüzün senkron ve asenkron uyarımıyla gerçekleştirilir.	Sahiplik dört gün boyunca raporlandı; görsel yakalama; yüz-el yeniden eşleme	Deafferentasyon ve deafferentasyona rağmen yanılsama mümkündür.
Song ve Kim (2019)	20 sağlıklı yetişkin	Hareketli RHI paradigması ve motor imgeleme; EEG	Motor yürütmeye benzeyen güçlendirilmiş ERD	Sahiplik odaklı motor imgeleme; BCI uyumluluğu

Kısaltmalar: BCI, beyin-bilgisayar arayüzü; ERD, olayla ilişkili senkronizasyon bozulması; GSR, galvanik deri tepkisi; RHI, kauçuk el illüzyonu; RHP, kauçuk el paradigması; sEMG, yüzey elektromiyografisi.

4. Tedavi Gerekçesi: Deneysel İncelemeden Müdahaleye

4.1 Sahiplik odaklı motor imgeleri

Laboratuvar fenomeninden rehabilitasyon tekniğine en doğrudan adım, motor imgeleme (MI) alanında atılmıştır. MI'yı geliştirmek, olayla ilişkili senkronizasyon bozukluğunu (ERD) artırır ve MI tabanlı rehabilitasyon ve beyin-bilgisayar arayüzü (BCI) uygulamaları için önemlidir. Song ve Kim (2019), dış bir nesne üzerinde vücut sahipliği hissi uyandıran illüzyonun, basit gözlemden daha iyi bir MI rehberliği sağlayabileceğini öne sürdüler ve motorlu hareketli kauçuk el içeren bir paradigma geliştirdiler. 20 sağlıklı katılımcıyı içeren deneysel bir karşılaştırmada, paradigma, motor yürütme sırasında gözlemlenen ERD'ye benzer şekilde önemli ölçüde artırılmış bir ERD üretti ve varış zamanı BCI kullanımı için uygunluğunu gösterdi (Song ve Kim, 2019). Aynı yazarların daha önceki bir konferans raporunda, MI geliştirme için hareketli kauçuk el illüzyon sistemi tanıtıldı (Song ve Kim, 2017). Bu sonuçlar sağlıklı katılımcılarda elde edildi ve inmeye aktarılabilirliği varsayılmaz, ancak somut ve test edilebilir bir mekanizma sağlarlar: hareketli yapay bir elin sahipliği, imgelemenin ürettiği kortikal katılımı güçlendirebilir.

4.2 Fayda sağlayabilecek aday mekanizmalar

Mevcut kanıtlardan dört mekanistik hipotez formüle edilebilir. Bunlar hipotezlerdir, kanıtlanmış etkiler değildir ve her biri aşağıda önerilen protokolün bir bileşenine karşılık gelir.

- Felçli uzvun yeniden bedenlenmesi. Etkilenen uzvun daha zayıf ve daha esnek bir sahiplik duygusu varsa (Burin ve ark., 2015), uzvun ve hareketlerinin benliğe atfedilmesini güçlendirmek için görsel-dokunsal uyarı kullanılabilir.
- Kendi kendine dokunma yoluyla duysal yeniden eğitim. Kendi kendine uygulanan dokunma, zamansal beklenti altında dokunsal algılamayı geliştirebildiğinden (White ve ark., 2010), yapılandırılmış kendi kendine dokunma görevleri, kalan somatosensasyonu ortaya çıkarmaya ve eğitmeye yardımcı olabilir.
- Şiddetli parezide motor imgelemenin görsel rehberliği. Kişinin kendi eli olarak algıladığı hareketli bir kauçuk el, açık bir hareket mümkün olmadığında sensörimotor korteksi harekete geçirebilir (Song ve Kim, 2019) ve hareket edemeyen hastalar için bir uygulama yolu sunar.
- Premotor mekanizmaların devreye girmesi. Premotor korteksin felç sonrası değişen bedenleşmede merkezi bir rol oynadığı öne sürülmüştür (Llorens ve ark., 2017), bu da onu RHP tabanlı eğitimin olası bir hedefi haline getirmektedir.

Bu hipotezler, motor plastisite araştırmalarından gelen bir uyarıya karşı değerlendirilmelidir: plastisite doğası gereği faydalı değildir ve motor kortikal temsiller arasındaki rekabet, terapi kötü tasarlanmışsa uyumsuz sonuçlar doğurabilir (Hlustík ve Mayer, 2006). Bu nedenle, propriosepsiyon üzerinde görmenin baskınlığını artıran bir teknik (Llorens ve ark., 2017), tek başına kullanıldığında ters etki yaratabilir; bu da, tek başına bir tedavi olarak kullanılmasından ziyade çok modlu terapiyle entegre edilmesini savunmaktadır.

5. Kauçuk El Paradigması Yeni Bir Rehabilitasyon Yaklaşımı Olarak Uygun mu?

Bu soruyu yanıtlamak için, aday müdahalelerin erken değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılan dört pragmatik kriteri uyguluyoruz: mekanistik akılcılık, uygulanabilirlik, güvenlik ve kanıtlanmış etkinlik.

5.1 Güçlü Yönler

Mekanistik olasılık oldukça güçlüdür. Çalışmalar, etkilenen uzuv ve duyuşal temsilinin görsel-dokunsal manipölasyonla değıştirilebileceğı gözlemine odaklanmaktadır (Burin ve ark., 2015; Llorens ve ark., 2017; White ve ark., 2010) ve hareketli kauçuk el paradigması, MI tabanlı rehabilitasyonla ilgili olan, güçlendirilmiş ERD adı verilen nörofizyolojik bir imza üretmiştir (Song ve Kim, 2019). Uygulanabilirlik de olumludur. Temel kurulum yapay bir el, bir ekran ve fırçalar gerektirir ve illüzyon, tam hemiplejili kişilerde (Burin ve ark., 2015) ve tetraplejili bir kişide (Tidoni ve ark., 2014) ortaya çıkarılmıştır. Paradigma, birçok motor eğitim tekniğinden ayıran, kalan gönüllü harekete bağılı değildir. Son olarak, yaklaşım, parezik ele yönelik daha geniş çok modlu yaklaşımlar çağrısıyla uyumlu olarak, geleneksel motor odaklı programların yeterince vurgulamadığı alanlar olan vücut temsili ve somatosensasyona değinmektedir (Hlustík ve Mayer, 2006).

5.2 Sınırlamalar ve riskler

En önemli sınırlama, burada sentezlenen raporların hiçbirinin, inmede fonksiyonel sonuçlarla bir tedavi olarak paradigmayı değerlendirmemesidir. İnme çalışmaları küçük ve kesitseldir ve asenkronizasyonla ilgili rapor sınırlı sayıda hastayı kapsamaktadır (White ve Aimola Davies, 2017). Hareketli RHI ve MI geliştirmesi üzerine yapılan tek çalışma sağlıklı katılımcılarda gerçekleştirilmiştir (Song ve Kim, 2019). Birkaç çalışma sağ yarımküre lezyonları ve sol taraflı hemipleji içermektedir (Burin ve ark., 2015; White ve Aimola Davies, 2017; White ve ark., 2010), bu nedenle bulgular, dil bozukluğunun talimat ve raporlamayı zorlaştırabileceğı sol yarımküre inmesine genelleştirilemeyebilir. Duyusal bozukluğu olan hastalarda asenkron uyarım altında illüzyonların bulunması (White ve Aimola Davies, 2017), sahte veya kontrol koşullarının tasarımı zorlaştırmaktadır. İnmeden sonra gözlemlenen artan sahiplik ve eylemlilik, propriosepsiyon üzerinde görmenin patolojik bir baskınlığını yansıtabilir (Llorens ve ark., 2017); paradigmayı çekici kılan aynı duyarlılık, prensipte, görsel bağımlılığı pekiştirebilir. Son olarak, illüzyon geçicidir, herhangi bir kalıcılığın süresi bilinmemektedir ve daha güçlü bir sahiplik duygusu ile daha iyi motor fonksiyon arasındaki ilişki henüz belirlenmemiştir.

5.3 Mevcut yaklaşımlara göre konumlandırma

RHP, kavramsal olarak birçok yerleşik yaklaşıma yakındır ve katma değeri bunlara göre değerlendirilmelidir. Ayna tabanlı ve sanal el terapileri gibi, eksik veya güvenilmez proprioseptif girdiyi telafi etmek için görsel geri bildirim kullanır; ayırt edici özelliğı, bu yaklaşımların mutlaka gerektirmediğı dokunsal uyum yoluyla kasıtlı olarak sahiplik

duygusunun indüklenmesidir (Christ ve Reiner, 2014). Motor imgeleme eğitimi gibi, açık hareket olmadan sensörimotor ağları harekete geçirmeyi amaçlar, ancak hastanın kendi eli olarak deneyimlediği görsel olarak yönlendirilmiş bir el sağlayarak imgelemeyi daha etkili hale getirmeye çalışır (Song ve Kim, 2019). Geleneksel duyuşal yeniden eğitim gibi, dokunsal algılamayı hedefler, ancak bunu hastanın kendi eylemini uyarı dizisine yerleştirerek yapar (White ve ark., 2010). Bu ilişkilerin her biri bir derece meselesi olduğundan, üstünlük veya tamamlayıcılık iddiasında bulunulmadan önce doğrudan karşılaştırmalı denemeler gereklidir; o zamana kadar, en savunulabilir pozisyon, RHP'nin mevcut terapilerle birleştirilebilen ve onlardan önce sıralanabilen modüler bir teknik olduğudur.

5.4 Değerlendirme

Genel olarak, RHP, akla yatkınlık, uygulanabilirlik ve muhtemelen düşük risk kriterlerini karşılıyor, ancak kanıtlanmış etkinlik kriterini karşılamıyor. Bu nedenle, özellikle aktif pratiğin sınırlı olduğu şiddetli parezi veya duyu kaybı olan hastalarda, üst ekstremité rehabilitasyonunun yardımcı, somutlaştırıcı bir bileşeni olarak geliştirilmesi için umut vadeden bir aday olarak değerlendirilmesi uygundur; görev odaklı eğitimin yerine geçecek bir unsur olarak değil. Bu konumlandırma, kauçuk el ve sanal el illüzyonlarının teknolojik uzantılarının, değerlendirilmesi gereken yeni sonuçlar doğururken, invaziv olmayan rehabilitasyona katkıda bulunabileceği yönündeki daha geniş görüşle tutarlıdır (Christ ve Reiner, 2014). Sonraki bölümde, fikrin test edilebilmesi için nasıl operasyonel hale getirilebileceği açıklanmaktadır.

6. Tedavi Protokolüne Dönüştürme

Üst ekstremité için Çoklu Duyusal Bedenleme Hazırlama Protokolü'nü (MEP-UL) öneriyoruz. Bu, RHP'nin (senkronize görsel-dokunsal indüksiyon, kendi kendine dokunma uyarımı ve motor imgeleme ile hareketli kauçuk el) yerleşik bileşenlerini sıralayan ve bunları gerçek ekstremitenin görev odaklı uygulamasına bağlayan, klinisyen tarafından uygulanan, yardımcı bir protokoldür. Seans uzunluğu ve sıklığı gibi parametreler, alıntı yapılan çalışmalardan değil, yaygın rehabilitasyon uygulamalarından elde edilen gösterge değerleridir ve deneysel optimizasyon gerektirir.

6.1 Tasarım prensipleri

- Tedaviden önce tarama yapın. Duyusal bozukluk asenkron uyarım altında yanlısalar üretebileceğinden (White ve Aimola Davies, 2017), duyuşal ve yanlısama duyarlılığı başlangıçta profillenmeli ve senkronizasyon aktif bileşen olarak varsayılmamalıdır.
- Pasiften aktife doğru ilerleme. Tedavi pasif görsel-dokunsal indüksiyonla başlar, kendi kendine dokunma ve sahiplik odaklı imgelemeyle ilerler ve sahiplikteki hareketle ilgili sinyallerin rolünü yansıtan gerçek uzuvun pratiğiyle sona erer (Burin ve ark., 2015).
- Proprioseptif ankrajı koruyun. Görsel baskınlığı güçlendirme riskini sınırlamak için (Llorens ve ark., 2017), her seans proprioseptif ve gerçek uzuv görevlerini içermeli ve yapay el zamanla kademeli olarak azaltılmalıdır.

- Yanıta göre bireyselleştirin. Sahiplik gücü ve, mevcutsa, GSR yanıtları (Llorens ve ark., 2017), MI ile ilgili aktivitenin belirleyicisi olarak sahipliğe yapılan vurgunun önerdiği gibi bileşenleri seçmek ve ayarlamak için kullanılabilir (Song ve Kim, 2019).

6.2 Aday seçimi

Adaylar, basit talimatları takip edebilen ve yeterli görme yeteneğine sahip, tek taraflı inme ve üst ekstremité parezisi olan yetişkinler olmalıdır. Klinik değerlendirmeye dayalı ve alıntı yapılan çalışmalara değil, uyarılar veya dışlamalar arasında belirgin hemispatial ihmal, uzuvun sanrsal olarak reddedilmesi, ciddi bilişsel veya psikiyatrik bozukluk, uyarı bölgelerinde deri lezyonları ve kararsız ağrı sendromları yer almaktadır. Lezyon tarafı kaydedilmeli ve bir sınıflandırma değişkeni olarak kullanılmalıdır, çünkü mevcut kanıtlar büyük ölçüde sağ yarımküre lezyonlarından elde edilmektedir (Burin ve ark., 2015; White ve Aimola Davies, 2017; White ve ark., 2010).

6.3 Protokol yapısı

Protokol, bir temel değerlendirme ve her seansta uygulanan beş tedavi aşamasından oluşmaktadır. Tablo 2 aşamaları özetlemekte ve Tablo 3 60 dakikalık bir seans örneği vermektedir. 1. Aşamada, klasik paradigmaya (Botvinick ve Cohen, 1998) benzer şekilde, anatomik olarak makul bir pozisyonda yerleştirilen gizli felçli ele ve görünür yapay ele senkronize fırçalama uygulanır. 2. Aşama, dokunma duyusu eksikliği olan hastalar için ayrılmıştır ve somatik paradigmayı uygular: terapist, hastanın felçli olmayan elini protez ele sürtmek için yönlendirirken, felçli ele senkronize uyarım uygular; bu sırada görme engellenir ve dokunma algılaması kaydedilir (White ve ark., 2010). İki uyarı arasında gecikme olan denemeler, seans içi karşılaştırma koşulları olarak kullanılabilir, çünkü gecikme orijinal çalışmada kendi kendine dokunma artışını ortadan kaldırmıştır (White ve ark., 2010). 3. Aşamada, illüzyon indüksiyonundan sonra, motorlu bir yapay el, kavrama ve bırakma gibi hedef bir hareketi gerçekleştirirken, hasta Song ve Kim'in (2019) paradigmasını uyarlayarak motor imgeleme yapar; ERD'nin elektroensefalografik kaydı, mevcutsa eklenebilir. Faz 4, transfer fazıdır: Faz 3'ten hemen sonra, hasta, test edilmesi gereken bir hipotez olan, artan sahiplik varsayımından yararlanma amacıyla, parezik uzuv ile fonksiyonel görevleri uygular. Faz 5, haftalar boyunca okşama ve yapay el ipuçlarının geri çekildiği ve bunların yerine ayna, video veya sanal el rehberliği ve evde yapılan imgeleme pratiğinin getirildiği ilerleyici bir azalmadır (Christ ve Reiner, 2014).

Tablo 2. Üst Ekstremité için Çoklu Duyusal Bedenleme Hazırlama Protokolünün (MEP-UL) önerilen aşamaları

Faz	Amaç	Prosedür	Gösterge dozu	Kanıt temeli	İlerleme kriteri
0. Başlangıç Değeri	Profil algısı, yanılısamaya yatkınlık ve işlev	Klinik duyuşal testler; RHI anketi ve proprioseptif kayma; isteğe bağı GSR; üst ekstremité fonksiyon testleri	1 oturum	(Burin ve ark., 2015; Llorens ve ark., 2017; White ve Aimola Davies, 2017)	Uygunluk onaylandı
1. Tümevarım	Yapay elin sahiplenilmesini sağlayın.	Gizli felçli el ile görünür yapay elin eş zamanlı fırça darbeleri; saniyede yaklaşık 1 vuruşluk düzenli bir ritim.	Seans başına 3-5 dakika	(Botvinick ve Cohen, 1998)	Bildirilen yanılısama veya tespit edilen sapma
2. Kendine dokunma	Kalan dokunma duyuşunu ortaya çıkarın ve eğitin.	Hastanın felçli olmayan eli protez eline dokunurken, terapist de eş zamanlı olarak felçli eline dokunur; görme engellenir; algılama puanlanır; karşılaştırma için gecikmeli denemeler yapılır.	10 dakika (sadece dokunma duyuşu eksikliği durumunda)	(White ve ark., 2010)	Oturumlar boyunca tespit performansı iyileşir.
3. Elin hareketi ve imgeler	Açık hareket olmaksızın duyuşal-motor etkileşimi güçlendirin.	İndüksiyon sonrasında, motorlu el hedef hareketi gerçekleştirirken hasta aynı hareketi hayal eder; isteğe bağı EEG ERD geri bildirimi mevcuttur.	15 dakika	(Song ve Kim, 2017, 2019)	Güvenilir görüntüleme; ERD güçlendirilmiş

Faz	Amaç	Prosedür	Gösterge dozu	Kanıt temeli	İlerleme kriteri
4. Aktarım	Hazırlık aşamasını gerçek uzuv pratiğine dönüştürün	Felçli uzuv için kademeli destek ve görsel rehberlik ile görev odaklı eğitim.	15-20 dakika	(Hlustík ve Mayer, 2006)	Görev performansı iyileşiyor
5. Solma	Yapay ele olan bağımlılığı azaltın.	Okşama ve yapay eli bırakın; ayna veya sanal el ve ev imgelerini kullanın.	Son 1-2 hafta	(Christ ve Reiner, 2014)	Cihaz kullanılmadan elde edilen kazanımlar korundu.

Doz değerleri gösterge niteliğindedir ve test edilmemiştir. Kanıt temeli, bileşenin kaynağına atıfta bulunur, kombine protokolün etkinliğinin kanıtına değil.

Tablo 3. 60 dakikalık bir MEP-UL oturumuna örnek

Süre (dk)	Bileşen	İçerik	İzleme
0–5	Hazırlık	Konumlandırma; ekran ve yapay elin yerleştirilmesi; talimat; temel konfor değerlendirmesi	Ağrı, yorgunluk, rahatlık
5–10	Aşama 1: Oryantasyon	Eş zamanlı görsel-dokunsal okşama; kısa sahiplik anketi	Sahiplik derecelendirmesi
10–20	2. Aşama: Kendine Temas Müdahalesi	Algılama denemeleri içeren somatik paradigma (duyusal algı sağlam ise atlanmıştır)	Tespit oranı
20–35	Aşama 3: Görüntüleme	Senkron motor imgeleme ile yapay elin hareketi; bloklar arasında kısa süreli yeniden indüksiyon.	Görüntü kalitesi; kaydedildiyse ERD
35–55	Aşama 4: Transfer	Gerçek uzuv ile görev odaklı uygulama; kademeli destek	Tekrarlar; hareketin kalitesi
55–60	Kapanış	Değerlendirme toplantısı; evde görselleştirme görevi; olumsuz olay kontrolü	Yabancılaşma, sıkıntı, rahatsızlık

Dört ila altı hafta boyunca haftada üç ila beş seans önerilmektedir; 5. Aşama ise son haftaları kapsamaktadır.

6.4 Sonuç ölçütleri

Sonuçlar, işlev, duyum, bedenleşme ve mekanizmayı kapsamalıdır. Üst ekstremit motor fonksiyonu ve duyumunun standart klinik ölçekleri, klinik faydayı değerlendirecektir. Bedenleşme, sahiplik ve eylemlilik anketleri ve propioseptif kayma (Burin ve ark., 2015) ve GSR, cilt sıcaklığı ve sEMG (Llorens ve ark., 2017) ile ölçülebilir. Elektroensefalografi mevcutsa, imgeleme sırasında ERD, mekanistik bir belirteç sağlar (Song ve Kim, 2019). Hem klinik hem de mekanistik sonuçların ölçülmesi, temel nedensel sorunun, yani sahiplikteki değişikliklerin işlevdeki değişikliklere aracılık edip etmediğinin ele alınmasını sağlar.

Tablo 4. Önerilen sonuç alanları ve ölçütleri

İhtisas	Örnek önlemler	Zaman noktaları	Gerekçenin kaynağı
Motor fonksiyonu	Fugl-Meyer Değerlendirmesi (üst ekstremit); Hareket Araştırması Kol Testi	Başlangıç, orta, son, takip	Standart klinik uygulama
Duygu	Klinik dokunsal algılama ve ayırt etme testleri; kendi kendine dokunma algılama oranı	Başlangıç, bitiş, takip	(White ve ark., 2010)
Şekillenme	Mülkiyet ve temsilcilik anketi; propioseptif kayma	Her seans; başlangıç ve bitiş	(Burin ve ark., 2015; Llorens ve ark., 2017)
Fizyolojik	GSR, cilt sıcaklığı, uyarım sırasında sEMG	Başlangıç ve bitiş	(Llorens ve ark., 2017)
Sinirsel	Motor imgeleme sırasında EEG ERD	Başlangıç, orta, son	(Song ve Kim, 2019)
Güvenlik ve tolere edilebilirlik	Olumsuz olaylar; mülkiyetten mahrum bırakılma veya maddi sıkıntı derecelendirmeleri; işten ayrılma	Her oturum	Klinik değerlendirme

Fugl-Meyer Değerlendirmesi ve Eylem Araştırma Kol Testi yaygın olarak kullanılan klinik araçlardır; burada örnek olarak verilmişlerdir ve alıntı yapılan raporlarda değerlendirilmemişlerdir.

6.5 Protokolün hasta profiline uyarlanması

Felç geçiren hastalar lezyon tarafı, duysal durum ve illüzyon duyarlılığı açısından büyük farklılıklar gösterir ve tek bir sabit sıra tüm hastalara uygun olmayabilir. Tablo 5, protokolü uyarlamak için karar kuralları önermektedir. Örneğin, Burin ve ark. (2015) tarafından incelenenler gibi şiddetli parezi ve sağlam duyuya sahip hastalar esas olarak 1, 3 ve 4. Fazlardan geçebilirken, dokunma duyusu eksikliği olan hastalar 2. Fazı almalı ve kontrol olarak asenkron koşul kullanılarak değerlendirilmemelidir (White ve Aimola Davies, 2017; White ve ark., 2010). Zayıf fizyolojik yanıtlarla çok güçlü sahiplik gösteren hastalar ek propioseptif görevler

gerektirebilir (Llorens ve ark., 2017) ve illüzyon göstermeyen hastalar, sanal el sunumu gibi alternatifler düşünülmeden önce duruş, aralık ve okşama kalitesinin kontrol edilmesini gerektirebilir (Christ ve Reiner, 2014).

Tablo 5. Hasta profiline göre önerilen adaptasyon kuralları

Hasta profili	Adaptasyon	Gerekçe
Şiddetli felç, duyu bütünlüğü bozulmamış.	1., 3. ve 4. aşamalara ağırlık verin; 2. aşamayı atlayın.	Duyusal eksiklik olmaksızın hemiplejide mevcut olan yanılsama (Burin ve ark., 2015)
Dokunma duyusu eksikliği	Gecikmeli denemeler içeren 2. Fazı ekleyin; kontrol olarak eşzamansız uyarılmaya güvenmeyin.	Kendine dokunma geliştirme ve asenkronizasyon güdümlü illüzyonlar (White ve Aimola Davies, 2017; White ve ark., 2010)
Çok güçlü sahiplik, görsel üstünlük	Proprioseptif ve gerçek uzuv hareketlerini içeren görevler ekleyin; yalnızca görsel unsurları içeren bölümleri sınırlandırın.	Görme duyusunun proprioepsiyona göre muhtemel üstünlüğü (Llorens ve ark., 2017)
Zayıf veya eksik yanılsama	Duruşu, mesafeyi ve vuruşları kontrol edin; başlatma süresini uzatın; sanal el uygulamasını göz önünde bulundurun.	İllüzyon uyumluluğa bağlıdır; teknolojik alternatifler mevcuttur (Christ ve Reiner, 2014)
Sol yarımküre lezyonu veya afazi	Talimatları basitleştirin; sözsüz değerlendirme ölçekleri kullanın; sonuçları ayrı olarak kaydedin.	Mevcut kanıtların çoğu sağ yarımküre lezyonlarından elde edilmiştir (Burin ve ark., 2015; White ve Aimola Davies, 2017; White ve ark., 2010)
Uzuvun ihmal edilmesi veya sahiplenilmemesi	Hariç tutun veya erteleyin; iyileşme sonrasında yeniden değerlendirin.	Klinik değerlendirme; bozulmuş vücut farkındalığını kötüleştirme riski

Kurallar, belirtilen bulgular ve klinik akıl yürütmeden türetilen önerilerdir; doğrulanmamışlardır.

6.6 Örnek uygulama

Mantığı açıklamak için, sağ orta serebral arter felci geçirmiş, sol kolunda şiddetli parezi ve hafif dokunma algılamasında azalma olan, başlangıçtan üç ay sonraki varsayımsal bir hastayı ele alalım. Temel testler, bozulmuş dokunma algılamasını ve eşzamansız uyarım altında devam eden, duyusal bir etki olarak yorumlanan ve sahiplik kanıtı olarak görülmeyen hafif bir yanılsamayı belgelemektedir. Bu nedenle terapist, Tablo 5'teki duyusal bozukluk yolunu benimser. Altı hafta boyunca hastaya kısa bir indüksiyon, gecikmeli denemelerle kendi kendine

dokunma eğitimi, hareketli yapay bir el ile sahiplik odaklı imgeleme ve görev odaklı uygulama verilir ve son iki haftada yapay el çıkarılır ve video rehberliği ile ev imgelemesi ile değiştirilir. Dokunma algılaması, sahiplik derecelendirmeleri, ERD ve fonksiyonel puanlar temel, tedavi ortası, tedavi sonu ve takipte kaydedilir. Bu vaka yalnızca açıklayıcı amaçlarla uydurulmuştur ve bildirilen verileri temsil etmemektedir.

6.7 Güvenlik ve sadakat

Burada sentezlenen çalışmalar, inme geçiren hastalarda illüzyonun olumsuz etkilerine dair sistematik veriler sunmamaktadır; bu nedenle güvenlik izlemesi açıkça belirtilmelidir. Terapistler rahatsızlık, hoş olmayan kopukluk veya yabancılaşma hissi ve yorgunluk hakkında soru sormalı ve sıkıntı oluştursa işlemi durdurmalıdır. Yapay elin el tarafı ve ten rengi mümkün olduğunca hastaninkisiyle eşleşmeli, okşama düzenli ve tekrarlanabilir olmalı ve yapay el makul bir mesafe ve yönde yerleştirilmelidir, çünkü illüzyonun gücü mekansal uyumluluğa bağlıdır. Tekrarlanabilirlik için doğruluk kontrol listeleri ve terapist eğitimi şart olacaktır.

7. Araştırma Gündemi

Aşamalı bir program önerilir. Uygulanabilirlik ve kabul edilebilirlik öncelikle, heterojen inme popülasyonlarına uygun olan ve her hastanın sahiplenme yanıtlarının profillenmesine olanak tanıyan tek vaka deneysel tasarımları kullanılarak küçük vaka serilerinde belirlenmelidir. Daha sonraki randomize çalışmalar, MEP-UL artı olağan bakımı, yalnızca olağan bakım ve aktif bir kontrol ile karşılaştırılmalıdır. Kontrol seçimi dikkat gerektirir: çünkü asenkron uyarım, duyuşsal kaybı olan hastalarda yanılsamalara neden olabilir (White ve Aimola Davies, 2017), bu nedenle mekânsal olarak uyumsuz veya antropomorfik olmayan kontrol koşulları tercih edilebilir. Çalışmalar, lezyon tarafına, duyuşsal duruma ve inmeden bu yana geçen zamana göre tabakalandırılmalı, sol yarımküre lezyonlarını içermeli ve doz-yanıt ilişkilerini test etmelidir. Aracılık analizleri, sahiplenme gücünün, fizyolojik yanıtların ve ERD'nin (Llorens ve ark., 2017; Song ve Kim, 2019) fonksiyonel kazanımları tahmin edip etmediğini incelemelidir. Çalışmalar ayrıca görsel bağımlılıkta herhangi bir artışı izlemeli (Llorens ve ark., 2017) ve sanal gerçeklik ve BCI teknolojileriyle kombinasyonları değerlendirmelidir (Christ ve Reiner, 2014; Song ve Kim, 2019).

8. Sonuç

Kauçuk el paradigması, çoklu duyuşsal entegrasyonun bir gösteriminden, felçli uzuvun temsilini ortaya çıkaran ve potansiyel olarak değiştiren bir dizi prosedüre doğru evrilmiştir. Hemiparezik ve hemiplejik hastalardan elde edilen kanıtlar, etkilenen uzvun sahipliğinin değiştiğini, daha esnek hale geldiğini göstermektedir (Burin ve ark., 2015; Llorens ve ark., 2017), kendi kendine dokunma çalışmalarından elde edilen kanıtlar, hastanın kendi eyleminin uyarılmaya dahil edilmesiyle dokunsal algılamının artırılabilirliğini göstermektedir (White ve ark., 2010) ve hareketli el paradigmalarından elde edilen kanıtlar, sahiplik temelli yönlendirmenin motor imgeleme ile ilgili kortikal aktiviteyi artırabileceğini göstermektedir (Song ve Kim, 2019). Aynı

zamanda, henüz hiçbir çalışma felçte fonksiyonel fayda göstermemiştir ve duyuşsal bozukluğu olan hastaların asenkronizasyon kaynaklı illüzyonlara karşı duyarlılığı (White ve Aimola Davies, 2017), dikkatli deneysel kontrol gerektirmektedir. Bu nedenle paradigma, henüz yerleşik bir tedavi olarak değil, aday bir yardımcı yaklaşım olarak uygundur. Bu bölümde sunulan MEP-UL protokolü, mevcut mekanistik bilgiyi test edilebilir bir klinik diziye dönüştürmektedir ve denemelerle desteklenirse, geleneksel aktif egzersizlerle henüz eğitilemeyen felçli üst uzuvları olan hayatta kalanlar için mevcut seçenekleri genişletebilir.

Kaynakça

- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756. <https://doi.org/10.1038/35784>
- Burin, D., Livelli, A., Garbarini, F., Fossataro, C., Folegatti, A., Gindri, P., & Pia, L. (2015). Are movements necessary for the sense of body ownership? Evidence from the rubber hand illusion in pure hemiplegic patients. *PLOS ONE*, 10(3), Article e0117155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117155>
- Christ, O., & Reiner, M. (2014). Perspectives and possible applications of the rubber hand and virtual hand illusion in non-invasive rehabilitation: Technological improvements and their consequences. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.02.013>
- Hlustík, P., & Mayer, M. (2006). Paretic hand in stroke: From motor cortical plasticity research to rehabilitation. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 19(1), 34–40.
- Llorens, R., Borrego, A., Palomo, P., Cebolla, A., Noé, E., Bermúdez i Badia, S., & Baños, R. (2017). Body schema plasticity after stroke: Subjective and neurophysiological correlates of the rubber hand illusion. *Neuropsychologia*, 96, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.01.007>
- Song, M., & Kim, J. (2017). Motor imagery enhancement paradigm using moving rubber hand illusion system. In *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 1146–1149). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8037032>

- Song, M., & Kim, J. (2019). A paradigm to enhance motor imagery using rubber hand illusion induced by visuo-tactile stimulus. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27(3), 477–486.
<https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2895029>
- Tidoni, E., Grisoni, L., Liuzza, M. T., & Aglioti, S. M. (2014). Rubber hand illusion highlights massive visual capture and sensorimotor face-hand remapping in a tetraplegic man. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 32(5), 611–622.
<https://doi.org/10.3233/RNN-130385>
- White, R. C., & Aimola Davies, A. M. (2017). Asynchrony in the rubber hand paradigm: Unexpected illusions following stroke. *Cortex*, 93, 224–226.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.03.013>
- White, R. C., Aimola Davies, A. M., Kischka, U., & Davies, M. (2010). Touch and feel? Using the rubber hand paradigm to investigate self-touch enhancement in right-hemisphere stroke patients. *Neuropsychologia*, 48(1), 26–37.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.08.006>

BÖLÜM 9

SERVİKAL DİSK HERNİSİNDE KONSERVATİF TEDAVİ YAKLAŞIMLARI

Sümeyye AKBAŞ¹

¹ Öğr.Gör. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü ORCID ID : 0000-0001-6059-3379

1. SERVİKAL BÖLGENİN ANATOMİK VE FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ

Servikal omurga, C1–C7 düzeyleri arasında yer alan yedi vertebradan oluşur ve baş ile boynun farklı düzlemlerde hareket etmesine olanak sağlamaktadır. Medulla spinalisi çevreleyerek merkezi sinir sisteminin korunmasında önemli bir görev üstlenmektedir. Servikal vertebralar, kaslar, ligamentler ve eklem yapılarıyla birlikte çalışarak bölgenin hareketliliği ile mekanik stabilitesi arasında fonksiyonel bir denge oluşturmaktadır. Üst servikal segmentler hareket kapasitesi açısından özelleşmişken alt servikal segmentler yük taşıma ve mekanik destek işlevleri bakımından farklı yapısal özellikler göstermektedir (1).

İntervertebral diskler, komşu vertebra gövdeleri arasında konumlanan ve omurganın hareketliliğine katkıda bulunan yapılardır. Servikal bölgede altı intervertebral disk bulunmakta, atlas ile aksis arasında ise disk yer almamaktadır. Disklerin temel bileşenleri dışta anulus fibrosus, merkezde nükleus pulposus ve vertebra gövdeleriyle bağlantıyı sağlayan kıkırdak uç plaklardır. Yaşla birlikte disklerin damar yoluyla beslenmesi azalmakta ve besin alışverişi büyük ölçüde çevre dokulardan difüzyon yoluyla gerçekleşmektedir (2).

Kıkırdak uç plaklar, diskin üst ve alt yüzeylerinde bulunarak komşu vertebra gövdeleriyle bağlantısını sağlamakta ve disk dokusunun beslenmesinde rol oynamaktadır. İntervertebral diskler üzerine kompresif yük uygulandığında nükleus pulposus içerisindeki hidrostatik basınç artmakta ve oluşan kuvvetler anulus fibrosus ile uç plaklara aktarılmaktadır. Omurgaya iletilen yüklerin dağıtılmasına ve diskin şok absorpsiyon işlevine katkı sağlamaktadır (3).

Servikal bölgenin kas sistemi, baş ve boyun hareketlerinin gerçekleştirilmesinin yanı sıra segmental stabilitenin korunmasında da görev almaktadır. Servikal kas fonksiyonlarındaki bozukluklar ile boyun ağrısı arasında ilişki bulunduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur. Servikal kaslar, anatomik yerleşimlerine ve işlevlerine göre yüzeysel, orta ve derin kas grupları şeklinde değerlendirilebilmektedir. Kaslar baş ve boyun hareketlerine ek olarak solunum, yutma ve konuşma gibi işlevlerde de rol almaktadır (4).

Derin servikal kaslar içerisinde yer alan skalen kaslar, servikal stabilizasyona katkıda bulunmalarının yanında solunum sırasında üst kostaların hareketine yardımcı olmaktadır. Longus colli ve longus capitis kasları ise servikal hareketlerin kontrolünde ve baş-boyun pozisyonunun düzenlenmesinde görev üstlenmektedir. Posterior yerleşimli multifidus kası, postüral kontrol ve segmental stabilizasyon açısından önem taşımakta; bu kasın fonksiyonel özellikleri ile servikal ağrı arasında ilişki bulunduğu bildirilmektedir. Servikal kasların hareket kontrolü, postüral destek ve solunumla ilişkili işlevleri, konservatif rehabilitasyon yaklaşımlarının planlanmasında dikkate alınması gereken fonksiyonel özelliklerdir (4).

1.1. Medulla Spinalis ve Servikal Spinal Sinirler

Medulla spinalis, motor ve duyuşal iletim yollarını içeren, merkezi sinir sistemi ile periferik yapılar arasındaki iletişimde görev alan önemli bir anatomik oluşumdur. İskelet kaslarının motor kontrolü, otonom fonksiyonlar ve vücudun farklı bölgelerinden gelen duyuşal bilgilerin iletimi bu yapı üzerinden gerçekleşmektedir. Medulla spinaliste meydana gelen hasarlar, etkilenmenin düzeyine ve şiddetine bağlı olarak duyuşal kayıplara, kas tonusunda değişikliklere ve motor fonksiyon bozukluklarına yol açabilmektedir (4).

Servikal vertebral kanal içerisinde uzanan medulla spinalis ile ilişkili sekiz çift servikal spinal sinir bulunmaktadır. Servikal sinirlerin ön dalları, boyun ve üst ekstremitelerle ilişkili sinir ağlarının oluşumuna katılmaktadır. C1–C4 spinal sinirlerinin anterior dallarından meydana gelen servikal pleksus, sternokleidomastoid kasın derininde, levator skapula ve orta skalen kaslarla ilişkili anatomik bölgede yer almaktadır (5).

Brakiyal pleksustan kaynaklanan periferik sinirler de üst ekstremitenin motor ve duyu fonksiyonları açısından önem taşımaktadır. Median sinir C5–T1 düzeylerinden gelen liflerin katılımıyla oluşmakta ve ön kol ile elin belirli kas gruplarının innervasyonunu sağlamaktadır (5). Ulnar sinir ağırlıklı olarak C8–T1 kökenli lifler içermekte ve ön kol ile elin çeşitli kaslarının motor innervasyonunda görev almaktadır. Radial sinir ise C5–T1 segmentlerinden lifler alarak üst ekstremitenin özellikle ekstansör kas gruplarının innervasyonuna katkıda bulunmaktadır (6).

1.2. Servikal Eklemlerin Fonksiyonel Özellikleri

Servikal omurga, fleksiyon, ekstansiyon, lateral fleksiyon ve aksiyel rotasyon hareketlerinin gerçekleştirilebildiği hareketli bir omurga bölümüdür (6). Hareket kapasitesi, başın farklı yönlere konumlandırılmasına olanak tanıırken medulla spinalis ve ilişkili nörovasküler yapıların korunmasıyla birlikte sürdürülmektedir (7).

Üst servikal bölgede yer alan atlanto-oksipital eklem, oksipital kemik ile atlas arasında bağlantı oluşturmakta ve ağırlıklı olarak fleksiyon-ekstansiyon hareketlerine katılmaktadır. Her iki taraftaki eklem yüzeyleri ayrı kapsüllerle çevrili olmakla birlikte hareket sırasında fonksiyonel bir bütünlük göstermektedir. Atlas ile aksis arasındaki atlanto-aksiyal eklem kompleksi ise iki lateral ve bir median sinovyal eklemden oluşmaktadır (8).

Alt servikal segmentlerde komşu vertebra gövdeleri intervertebral diskler aracılığıyla birbirine bağlanmaktadır. Bağlantılar, omurganın mekanik bütünlüğünü korurken segmental hareketlere olanak sağlamaktadır. Faset eklemleri, sinovyal özellikteki eklem yüzeyleri ve kapsüler yapıları sayesinde komşu vertebralar arasındaki kayma hareketlerine katkıda bulunmaktadır. Servikal bölgedeki unkovertebral oluşumlar da segmental hareketlerin yönlendirilmesiyle ilişkili anatomik yapılardır (8).

1.3. Servikal Bölgenin Biyomekanik Özellikleri

Servikal omurganın üst bölümünü oluşturan atlanto-oksipital ve atlanto-aksiyal eklemler, baş hareketlerinin gerçekleştirilmesinde farklı biyomekanik görevler üstlenmektedir. Atlanto-oksipital eklemden fleksiyon ve ekstansiyon hareketleri belirgin olup lateral fleksiyon ve aksiyel rotasyon anatomik özellikler nedeniyle daha sınırlıdır. Atlanto-aksiyal eklem ise servikal aksiyel rotasyonun önemli bir bölümünü karşılamakta ve toplam boyun rotasyonunun yaklaşık yarısına katkıda bulunmaktadır (9).

Alt servikal bölgede intervertebral diskler ve eklem yapıları birlikte çalışarak segmental hareketlerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Servikal hareket açıklığı segmentler arasında eşit dağılmamakta; C4–C5 ve C5–C6 seviyeleri hareket kapasitesinin belirgin olduğu bölgeler arasında yer almaktadır. Servikotorasik geçişte bulunan C7–T1 segmentinde hareket açıklığı daha sınırlıdır (9).

Servikal omurga, fizyolojik olarak lordotik bir eğrilik göstermektedir. Oluşan eğrilik, büyüme ve postüral gelişim sürecinde şekillenmekte ve başın dengeli biçimde taşınmasına katkıda bulunmaktadır. Omurganın fizyolojik eğrilikleri, aksiyel yüklerin vertebral kolon boyunca dağıtılmasında işlev görmektedir (9).

Servikal stabilitenin korunmasında kas sistemi ve osteoligamentöz yapılar birlikte görev almaktadır. Mekanik stabilizasyona katkının yaklaşık %80'inin çevre kaslardan, %20'sinin ise osteoligamentöz yapılardan sağlandığı belirtilmektedir (10).

Servikal omurgaya aktarılan mekanik yükler; başın ağırlığı, postüral konum, kas aktivitesi, dış kuvvetler ve ligamentlerde oluşan gerilimden etkilenmektedir. Belirgin fleksiyon ve ekstansiyon pozisyonlarında diskler üzerindeki yüklenme değişebilmektedir. Kranioservikal ve servikotorasik seviyelerde oluşan kuvvetler de boynun pozisyonuna bağlı olarak farklılık göstermektedir (11).

2. SERVİKAL DİSK HERNİSİ

2.1. Tanım ve Etiyopatogenezi

Servikal disk hernisi, intervertebral diskin dejeneratif değişiklikler veya travmatik etkiler sonucunda yapısal bütünlüğünü kaybetmesi ve disk materyalinin normal anatomik sınırlarının dışına yer değiştirmesiyle karakterize bir durumdur. Yer değiştiren disk dokusu, komşu sinir kökleri üzerinde mekanik bası oluşturabildiği gibi inflamatuvar süreçlerle de ilişkili semptomlara yol açabilmektedir. Klinik belirtiler akut ya da kronik özellik gösterebilmekte ve semptomların ortaya çıkış biçimi ile şiddeti bireyler arasında farklılaşabilmektedir (3).

Disk dejenerasyonuna ilişkin değişiklikler yaşamın erken dönemlerinden itibaren başlayabilmektedir. Gelişim sürecinde intervertebral diskin vasküler yapısında azalma meydana gelmekte ve disk dokusunun beslenmesi giderek difüzyona bağımlı hâle gelmektedir. İlerleyen yaşla birlikte nükleus pulposusun yapısal özelliklerinde ve metabolik gereksinimlerinin karşılanmasında değişiklikler ortaya çıkmaktadır (12).

Yaşlanma sürecinde proteoglikan üretiminin azalması, diskin su tutma kapasitesini ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Sonucunda ise disk yüksekliğinde azalma, anulus fibrosusun yapısal organizasyonunda bozulma ve yük taşıma kapasitesinde değişiklikler meydana gelmektedir. Özellikle posterolateral bölgede gelişen yapısal zayıflık, disk materyalinin yer değiştirmesine yatkınlığı artırabilmektedir (12).

Disk herniasyonu gelişiminde yaşlanmanın yanı sıra tekrarlayıcı mekanik yüklenmeler, travmatik olaylar ve mesleki zorlanmalar da etkili olabilmektedir. Obezite, sigara kullanımı, uzun süreli statik pozisyonlar, ağır yük kaldırma ve bazı yapısal özellikler de risk faktörleri arasında değerlendirilmektedir. Disk herniasyonunun oluşumunda genetik yatkınlığın da önemli bir rol oynayabileceği bildirilmektedir (13).

Disk dejenerasyonunda proteoglikan kaybıyla birlikte matriksin ozmotik özellikleri değişmekte ve doku hidrasyonu azalmaktadır. Değişiklikler ile birlikte, nükleus pulposus ile anulus fibrosus arasındaki mekanik ilişkinin bozulmasına ve disk materyalinin dışa doğru yer değiştirmesine zemin hazırlayabilmektedir. Herniye disk materyalinin sinir kökleriyle teması, yalnızca mekanik bası nedeniyle değil, inflamatuvar mediyatörlerin etkisiyle de ağrıya neden

olabilmektedir. İnterlöklinler, prostaglandinler ve tümör nekroz faktörü-alfa gibi maddeler sinir kökü çevresindeki inflamatuvar yanıtla ilişkilendirilmektedir (13).

Yaşa bağlı disk değişikliklerinin her zaman klinik yakınmaya yol açmadığı dikkate alınmalıdır. Asemptomatik dejeneratif değişikliklerle ağrı ve fonksiyon kaybının eşlik ettiği dejeneratif disk hastalığı birbirinden ayrılmalıdır (12).

2.2. Epidemiyoloji ve Risk Faktörleri

Servikal disk dejenerasyonu yaşla birlikte daha sık izlenmekte ve ileri yaş gruplarında radyolojik dejeneratif bulguların görülme oranı artmaktadır. Altmış yaş üzerindeki bireylerde tedavi gerektiren servikal disk hernisi olgularının sıklığına ilişkin epidemiyolojik veriler de bildirilmiştir (14).

Servikal bölgeyle ilişkili yakınmalar arasında boyun ağrısı önemli bir yer tutmaktadır. Yetişkin bireylerde yaşam boyu boyun ağrısı görülme sıklığının yüksek olduğu ve bazı olgularda ağrının günlük yaşam aktivitelerini belirgin ölçüde kısıtladığı belirtilmektedir (14).

Servikal disk hernisinin gelişiminde yaş, mekanik yüklenme, tekrarlayıcı travmalar ve yaşam tarzına ilişkin etkenler birlikte rol oynayabilmektedir. Genetik özelliklerin de disk dejenerasyonuna yatkınlığı etkileyebileceği ifade edilmektedir (13).

2.3. Servikal Disk Hernisinin Sınıflandırılması

Servikal disk hernileri, disk materyalinin morfolojik özelliklerine göre protrüzyon, ekstrüzyon ve sekestrasyon olarak sınıflandırılabilir. Protrüzyonda disk materyali dışa doğru yer değiştirmekle birlikte dış konturla ilişkisini korumaktadır. Ekstrüzyonda disk materyali daha belirgin biçimde dışarı taşarken sekestrasyonda herniye olan parçanın ana disk dokusuyla devamlılığı ortadan kalkmaktadır (3). Herniasyonun anatomik yerleşimine göre median, paramedian ve lateral disk hernileri tanımlanmaktadır. Klinik belirtilerin süresi dikkate alındığında ise akut ve kronik özellik gösteren tablolar arasında ayırım yapılabilmektedir (9).

Servikal disk hernisinin klinik görünümü, disk materyalinin yerleşimi ve etkilenen nöral yapılara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Boyun ağrısı en sık karşılaşılan yakınmalardan biri olup bazı bireylerde radiküler belirtiler bulunmaksızın ortaya çıkabilmektedir. Sinir kökü etkileniminin eşlik ettiği olgularda ise ağrıya duyuşal değişiklikler, kas kuvvetinde azalma ve refleks farklılıkları eşlik edebilmektedir (15).

Servikal disk hernileri sıklıkla C5–C6 ve C6–C7 düzeylerinde görülmektedir. C6–C7 disk hernisine bağlı C7 radikülopatisinde ağrı omuzun posterior bölümünden üst ekstremiteye doğru yayılabilmekte ve orta parmak çevresinde hissedilebilmektedir. Triseps refleksinde azalma ve ilgili kas gruplarında kuvvet kaybı görülebilmektedir (15).

C5–C6 düzeyindeki disk hernilerinde C6 sinir kökü etkilenebilmektedir. Bu durumda ağrı omuzdan başlayarak kolun ve ön kolun lateral bölümüne, başparmak ve işaret parmağına doğru yayılabilmektedir. Biseps refleksinde azalma ve bazı üst ekstremitte kaslarında kuvvet kaybı görülebilmektedir (15).

C4–C5 düzeyindeki herniasyonlar C5 sinir kökü tutulumuna neden olabilmektedir. Deltoid kasının etkilenmesi, omuz abduksiyonunda güçsüzlük oluşturarak giyinme, saç tarama ve benzeri günlük yaşam aktivitelerini zorlaştırabilmektedir (15).

Üst servikal düzeylerdeki disk hernileri daha seyrek görülmekte ve bazı olgularda boyun ile baş bölgesinde ağrı yakınmaları ön plana çıkabilmektedir. C7–T1 düzeyindeki herniasyonlarda ise C8 sinir kökü etkilenerek özellikle dördüncü ve beşinci parmaklarda duyuşal değışikliklere ve elin intrinsik kaslarında kuvvet kaybına yol açabilmektedir. Kavrama ve ince motor becerilerde fonksiyonel kısıtlılıklarla ilişkili olabilmektedir (15).

Sinir kökü basısına bağı üst ekstremitte ağrısına uyuşma, karıncalanma ve kas güçsüzlüğü eşlik edebilmektedir. Klinik değerdendirme sadece ağrının şiddetinin değil, duyuşal ve motor bulguların dağılımının ve günlük yaşam aktivitelerindeki etkilenmenin de dikkate alınması önemlidir (15).

3. SERVİKAL DİSK HERNİSİNDE KLİNİK DEĞERLENDİRME VE FİZİK MUAYENE

Servikal disk hernisi bulunan bireylerin klinik özellikleri, disk materyalinin yerleşimine ve nöral yapıların etkilenme düzeyine bağı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bazı bireylerde belirgin yakınma bulunmazken diğelerinde boyun ağrısı, üst ekstremitteye yayılan ağrı, parestezi, duyuşal değışiklikler ve kas kuvvetinde azalma görülebilmektedir. Servikal radikülopatinin değerdendirilmesinde semptomların başlangıcı, süresi, yayılımı ve şiddetinin ayrıntılı biçimde sorgulanması önem taşımaktadır (16).

Servikal radikülopati tanısı bulunan yaklaşık 800 bireyin değerdendirildiğı bir araştırmada, hastaların %99,4'ünde kol ağrısı, %85,2'sinde skapular bölge ağrısı, %17,8'inde anterior göğüs ağrısı ve %9,7'sinde baş ağrısı bildirildiğı belirtilmiştir. Klinik değerdendirmenin yalnızca boyun bölgesindeki yakınmalarla sınırlandırılmaması gerektiğini göstermektedir (16).

Fizik muayene sırasında servikal omurganın postüral dizilimi, fizyolojik lordozu ve palpasyonla saptanan hassasiyet alanları incelenmektedir. Nöral yapıların etkileniminin söz konusu olduğı durumlarda ağrı düzeyi, eklem hareket açıklığı, kas kuvveti ile duyuşal ve motor fonksiyonların birlikte değerdendirilmesi, bireye özgü rehabilitasyon programının oluşturulması açısından önem taşımaktadır (17). Fleksiyon, ekstansiyon, lateral fleksiyon ve rotasyon yönlerindeki eklem hareket açıklıkları değerdendirilmekte; duyuşal bulguların dağılımı, kas kuvveti ve refleks değışiklikleri nörolojik muayenenin bir parçası olarak ele alınmaktadır (16).

4. ÖZEL KLİNİK TESTLER

Spurling testi: Servikal radiküler belirtilerin değerdendirilmesinde kullanılan provokasyon testlerinden biridir. Başın ekstansiyon ve ilgili tarafa lateral fleksiyon pozisyonuna getirilmesini takiben kontrollü aksiyel kompresyon uygulanır. Test sırasında hastanın alışılmış üst ekstremitteye yayılan radiküler ağrısının yeniden ortaya çıkması pozitif bulgu olarak değerdendirilir (18).

Servikal distraksiyon testi: Hastanın sırtüstü yatış pozisyonunda bulunduğı sırada servikal bölgeye nazik bir traksiyon kuvveti uygulanır. Üst ekstremitteye yayılan radiküler belirtilerin azalması, sinir kökü üzerindeki mekanik yüklenmenin semptomlarla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir (18).

Omuz abdüksiyon testi: Etkilenen üst ekstremitenin abdüksiyon pozisyonuna alınmasıyla radiküler ağrının hafifleyip hafiflemediği değerlendirilir. Belirtilerin azalması servikal radikülopatiyle uyumlu bir bulgu olarak kabul edilebilmekle birlikte testin tanısal değeri diğer muayene bulgularıyla birlikte yorumlanmalıdır (18).

Üst ekstremité nörodinamik testi: Üst ekstremitenin belirli eklem pozisyonlarına getirilmesiyle periferik sinir dokularının mekanik duyarlılığı değerlendirilir. Test sırasında omuz, dirsek, ön kol ve el bileği pozisyonları kontrollü biçimde değiştirilerek semptomların oluşumu ve boyun hareketleriyle değişip değişmediği incelenir (18).

Valsalva testi: İntratorasik ve intraabdominal basıncın artırıldığı manevra sırasında servikal veya radiküler belirtilerde değişiklik olup olmadığı gözlemlenir. Ağrının artması, diğer klinik bulgularla birlikte değerlendirilmesi gereken bir bulgudur (18).

Adson testi: Üst ekstremité pozisyonu ve solunum manevraları sırasında radial nabızdaki değişiklikler değerlendirilir. Adson test, servikal disk hernisini doğrulamaktan ziyade torasik çıkış bölgesindeki olası vasküler kompresyonların ayırıcı değerlendirilmesiyle ilişkilidir. Nabız değişikliğinin tek başına tanısal kabul edilmemesi gerekir (18).

Servikal disk hernisine benzer yakınmalar farklı kas-iskelet sistemi, nörolojik veya diğer patolojik durumlarda da görülebilmektedir. Bu nedenle değerlendirme sırasında belirtilerin kaynağının belirlenmesi ve ciddi patolojilere işaret edebilecek kırmızı bayrak bulgularının araştırılması önemlidir. Ayırıcı tanıda dejeneratif spinal stenoz, osteofitik değişiklikler, mekanik boyun ağrısı, diskal ve sinoviyal kistler, periferik nöropatik durumlar, nörinom, epidural hematoma, epidural apse ve metastatik lezyonlar gibi olasılıklar göz önünde bulundurulmalıdır (19).

5. SERVİKAL DİSK HERNİSİNDE KONSERVATİF TEDAVİ YAKLAŞIMLARI

5.1. Konservatif Tedavinin Genel İlkeleri

Servikal disk hernisinin tedavisinde temel amaç; ağrının kontrol altına alınması, nörolojik yakınmaların azaltılması, servikal bölgenin fonksiyonel kapasitesinin geliştirilmesi ve bireyin günlük yaşam aktivitelerine güvenli biçimde dönmesinin sağlanmasıdır. Hastaların önemli bir bölümünde cerrahi dışı yöntemlerle semptomların hafifletilmesi mümkün olduğundan konservatif tedavi, uygun olgularda öncelikli yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (20).

Konservatif tedavi; hasta eğitimi, aktivite düzenlemeleri, farmakolojik uygulamalar, terapötik egzersizler, fiziksel ajanlar ve manuel tedavi yöntemlerini kapsayan çok yönlü bir rehabilitasyon sürecidir. Tedavi planı oluşturulurken hastanın ağrı şiddeti, nörolojik bulguları, fonksiyonel kısıtlılıkları ve genel sağlık durumu dikkate alınmalıdır (20).

Akut dönemde semptomları artıran aktivitelerin geçici olarak sınırlandırılması ve kısa süreli istirahat yararlı olabilmekle birlikte uzun süreli hareketsizlikten kaçınılmalıdır. Rehabilitasyon sürecinde ağrı kontrolünü takiben hareket açıklığının, kas kuvvetinin, dayanıklılığın ve postüral kontrolün geliştirilmesi hedeflenmektedir (20).

Konservatif tedaviye rağmen şiddetli ve dirençli ağrının devam ettiği veya ilerleyici nörolojik kayıpların geliştiği durumlarda cerrahi değerlendirme gündeme gelebilmektedir.

Cerrahi kararının yalnızca ağrının varlığına değil, klinik ve nörolojik bulguların bütününe dayandırılması gerekmektedir (21).

5.2. Hasta Eğitimi ve Ergonomik Düzenlemeler

Hasta eğitimi, servikal disk hernisinin konservatif yönetiminde bireyin tedaviye aktif katılımını destekleyen önemli bir bileşendir. Eğitim programlarında hastalığın olası seyri, ağrının özellikleri, günlük yaşamda aktivitenin sürdürülmesi, öz bakım yöntemleri, egzersizlerin uygulanması ve stresle başa çıkma becerileri ele alınmaktadır (22).

Eğitim sürecinde hastanın ağrı nedeniyle tüm hareketlerden kaçınmasının gerekli olmadığı açıklanmalı ve semptomları artırmayan günlük aktivitelerin sürdürülmesi teşvik edilmelidir. Rehabilitasyon sürecinde bireyin koruyucu önlemler konusunda bilgilendirilmesi ve uygun egzersizlerin nasıl uygulanacağını öğretmesi, tedavi programının günlük yaşamda sürdürülebilmesi açısından önemli bir yer tutmaktadır (17). Hasta eğitiminin tek başına boyun ağrısını azaltmadaki etkinliğine ilişkin araştırma sonuçları sınırlıdır. Bir Cochrane derlemesinde, hasta eğitiminin klinisyen ile hasta arasındaki iletişimin önemli bir parçası olduğu belirtilmesine rağmen bağımsız tedavi etkisini destekleyen yeterli kanıt bulunamamıştır (23).

Koruyucu yaklaşımları inceleyen bir sistematik derlemede, hasta eğitiminin diğer önleyici müdahalelerle karşılaştırıldığında benzer düzeyde yarar sağladığı bildirilmiştir. Kronik boyun ağrısında terapötik egzersizlere eklenen ağrı nörobilim eğitiminin, yalnızca egzersiz uygulamasına kıyasla ağrıya bağlı yetersizlik, hareket korkusu ve kaçınma davranışları üzerinde daha olumlu sonuçlar oluşturabildiği gösterilmiştir (24)..

Ergonomik düzenlemeler kapsamında çalışma ortamının bireyin fiziksel özelliklerine uygun hâle getirilmesi, uzun süreli statik pozisyonlardan kaçınılması ve günlük aktiviteler sırasında servikal bölgeye binen yükün kontrol edilmesi önem taşımaktadır. Postüral farkındalık ve ergonomi eğitiminin fizyoterapi programlarına dâhil edilmesi önerilmektedir (24).

5.3. İstirahat ve Servikal Ortez Kullanımı

Servikal disk hernisinde istirahat, özellikle akut dönemde ağrıyı artıran mekanik yüklenmelerin geçici olarak azaltılması amacıyla uygulanabilmektedir. Uzun süreli immobilizasyonun kas kuvvetinde azalma, bağ dokusu esnekliğinde kayıp ve intervertebral disk beslenmesinde olumsuz değişikliklerle ilişkili olabileceği belirtilmektedir (25).

Yumuşak servikal boyunluklar, belirgin ağrı ve hareketle artan semptomların bulunduğu seçilmiş olgularda kısa süreli destek amacıyla kullanılabilir. Uzun süreli boyunluk kullanımının servikal kasların aktivitesini azaltabileceği ve kas atrofi riskini artırabileceği bildirilmiştir (20).

Akut ve subakut yakınmalarda yumuşak boyunluk kullanımının birkaç günle sınırlandırılmasını öneren yaklaşımlar bulunmaktadır. Boyunluk, aktif rehabilitasyonun yerine geçen bir tedavi olarak değil, gerekli görüldüğünde geçici semptom kontrolünü destekleyen bir uygulama olarak değerlendirilmelidir (20).

5.4. Farmakolojik Tedavi

Farmakolojik yöntemler, servikal disk hernisine eşlik eden ağrının azaltılması ve bireyin rehabilitasyon programına katılımının kolaylaştırılması amacıyla kullanılabilir. İlaç seçimi; semptomların şiddeti, eşlik eden hastalıklar, olası yan etkiler ve bireysel riskler dikkate alınarak hekim tarafından yapılmalıdır (26).

Analjezikler ve Nonsteroidal Antiinflatuar İlaçlar

Basit analjezikler ve nonsteroidal antiinflatuar ilaçlar (NSAİİ), servikal disk hastalığına bağlı ağrıların semptomatik tedavisinde sık kullanılan farmakolojik seçeneklerdir. Boyun ağrısında parasetamolün etkinliğini doğrudan inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu belirtilmiştir (22).

NSAİİ'ler, antiinflatuar etkileri nedeniyle özellikle inflamatuvar bileşenin eşlik ettiği ağrılı durumlarda tercih edilebilmektedir. Uzun süreli kullanımlarında gastrointestinal, renal, hepatik ve kardiyovasküler yan etkiler gelişebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (22).

Boyun ağrısı üzerine yapılan bazı randomize kontrollü araştırmalarda NSAİİ'lerin plaseboya kıyasla daha olumlu sonuçlar sağladığı, ancak egzersiz ve spinal manipölasyon gibi diğer müdahalelere karşı belirgin üstünlük göstermediği bildirilmiştir. Oral NSAİİ'lerin spinal ağrılarda plaseboya göre etkili olabileceği sistematik derlemelerde de ifade edilmiştir (22).

Topikal NSAİİ'ler de semptomatik tedavide değerlendirilen seçenekler arasındadır. Topikal diklofenakın etkinliğine ilişkin olumlu bulgular bildirilmekle birlikte bu sonuçların servikal disk hernisine özğü etkinlik kanıtı olarak yorumlanmaması gerekir (22).

Kas Gevşeticiler

Kas gevşeticiler, servikal radikülopatinin rutin tedavisinden ziyade boyun ağrısına belirgin kas spazmının eşlik ettiği durumlarda kısa süreli olarak tercih edilebilmektedir. Santral etkili ilaçların sedasyon oluşturunabilmesi nedeniyle özellikle araç kullanan veya dikkat gerektiren işlerde çalışan bireylerde dikkatli olunması gerekmektedir (26).

Diğer Farmakolojik Seçenekler

Kortikosteroidler güçlü antiinflatuar özellikleri nedeniyle bazı klinik durumlarda kullanılabilirle birlikte servikal disk hastalığındaki etkinliklerini destekleyen kanıtların yeterli olmadığı belirtilmektedir (26).

Trisiklik antidepressanlar, bazı hastalarda ağrı kontrolü ve uyku düzeninin desteklenmesi amacıyla değerlendirilebilmektedir. Ancak ağız kuruluğu, konstipasyon ve kilo artışı gibi yan etkiler kullanımlarını sınırlandırabilmektedir (26).

Opioid analjezikler ise diğer tedavilere yanıt alınamayan şiddetli ağrılı durumlarda, bağımlılık ve ciddi yan etki riskleri nedeniyle ancak dikkatli ve kısa süreli kullanım kapsamında değerlendirilmektedir. Sedasyon, bilişsel etkilenme, gastrointestinal yakınmalar ve solunum depresyonu olası komplikasyonlar arasındadır (26).

Genel olarak servikal disk hastalığına bağlı boyun ağrısında farmakolojik seçeneklerin birbirlerine üstünlüğünü ortaya koyan güçlü kanıtlar sınırlıdır. İlaç tedavisinin yararları ve riskleri bireysel olarak değerlendirilmelidir (26).

5.5. Terapötik Egzersiz Yaklaşımları

Terapötik egzersiz, servikal disk hernisinde konservatif rehabilitasyonun temel bileşenlerinden biridir. Egzersiz programlarıyla ağrının azaltılması, servikal hareketliliğin korunması, kas kuvveti ve dayanıklılığının geliştirilmesi, postüral kontrolün iyileştirilmesi ve fonksiyonel kapasitenin artırılması hedeflenmektedir (27).

Egzersiz seçimi bireyin klinik bulgularına göre yapılmalıdır. Kas kuvvetinin ve eklem hareketliliğinin korunması ve geliştirilmesine yönelik egzersiz uygulamaları, rehabilitasyon sürecinde fonksiyonel kapasitenin desteklenmesi ve hareket kısıtlılıklarının önlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (17). Kas güçsüzlüğü, hareket açıklığı kısıtlılığı, azalmış dayanıklılık, proprioseptif yetersizlik ve postüral bozukluklar değerlendirilerek kişiye özgü bir program oluşturulabilir (27).

Egzersizlerin başlangıç yoğunluğu hastanın semptom toleransına uygun düzeyde belirlenmeli, ilerleyen süreçte yüklenme kontrollü olarak artırılmalıdır. Fizyoterapi programlarında germe ve kuvvetlendirme çalışmalarının yanı sıra postüral eğitim ve ergonomik düzenlemelere yer verilmesi önerilmektedir (27).

Egzersiz tedavisinin etkinliğini değerlendiren derlemelerde, kronik boyun ağrısında kuvvet, dayanıklılık ve denge egzersizlerinin yararlı olabileceği orta kalitede kanıtlarla desteklenmiştir. Akut servikal radikülopatide ise germe, kuvvetlendirme ve denge egzersizlerinin yararına ilişkin kanıt düzeyinin daha düşük olduğu belirtilmiştir (27).

Eklem Hareket Açıklığı ve Germe Egzersizleri

Servikal bölgedeki hareket kısıtlılıklarının giderilmesi amacıyla aktif eklem hareket açıklığı ve esneklik egzersizlerinden yararlanılabilmektedir. Servikal retraksiyon, ekstansiyon ve lateral fleksiyon hareketleri, uygun hastalarda kullanılan terapötik egzersiz örnekleri arasındadır (27).

Ağrı ve inflamasyonun kontrol altına alınmasını takiben servikal ve torakal bölge ile üst ekstremitelerdeki hareket açıklığının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Germe ve mobilite egzersizleri, semptomları artırmayacak şekilde uygulanmalıdır (28).

Servikal disk hernisi bulunan bireylerde sekiz haftalık retraksiyon, ekstansiyon ve lateral fleksiyon egzersizlerinden sonra intervertebral foramen alanlarında değişiklikler saptandığını bildiren çalışmalar bulunmaktadır (29).

Kuvvetlendirme ve Servikal Stabilizasyon Egzersizleri

Servikal stabilizasyon egzersizleri, boyun çevresindeki kasların koordineli çalışmasını geliştirmeyi ve hareket sırasında segmental kontrolü desteklemeyi amaçlamaktadır. Egzersizler, özellikle postüral kontrol bozukluğu ve kas dayanıklılığında azalma bulunan bireylerin rehabilitasyonunda önemli bir yer tutmaktadır (28).

Servikal ve servikotorasik bölgeye yönelik stabilizasyon çalışmaları, tekrarlayan yakınmaların azaltılması amacıyla önerilen egzersiz yaklaşımları arasındadır. Programın yalnızca boyun kaslarına odaklanmaması; torakal bölge ve omuz kuşağındaki postüral yetersizlikleri de kapsamı gerektiği belirtilmektedir (28).

Sekiz hafta süren servikal stabilizasyon programını inceleyen bir çalışmada, egzersiz uygulanan bireylerin özürölülük düzeylerinde kontrol grubuna kıyasla azalma saptanmıştır. Servikal disk hernisiyle ilişkili boyun ağrısında skapula çevresi kaslara yönelik egzersizlerin de rehabilitasyon programına eklenmesi önerilmektedir (29).

Egzersizlerin aşırı yoğunlukta uygulanması bazı hastalarda semptomların artmasına neden olabilmektedir. Egzersiz dozu, hastanın klinik yanıtı ve toleransı doğrultusunda düzenlenmelidir (30).

Denge ve Proprioseptif Egzersizler

Servikal bölgeden kaynaklanan duyuşal girdiler, başın konumunun algılanması ve postüral kontrolün sürdürölmesinde rol oynamaktadır. Servikal disk hernisi bulunan bireylerde denge ve proprioseptif egzersizler, uygun görölldüğünde kapsamlı rehabilitasyon programının bir parçası olarak değeriendirilebilir. Konvansiyonel fizyoterapiye altı haftalık denge eğitiminin eklendiğı bir çalışmada, servikal disk hernisi bulunan bireylerin boyunla ilişkili sorunlarında olumlu sonuçlar bildirilmiştir (31).

Akuatik Egzersizler

Su içi egzersizler, bazı bireylerde hareketlerin daha rahat gerçekleştirilmesini sağlayan alternatif bir egzersiz ortamı sunmaktadır. Boyun ağrısına yönelik akuatik egzersizleri inceleyen bir derlemede ağrı, özürölülük, yaşam kalitesi, eklem hareketliliğı ve denge açısından olumlu sonuçlar bildirildiğı belirtilmiştir (31).

Fiziksel Ajanlar ve Elektroterapi

Servikal disk hernisine bağı ağrının yönetiminde sıcak ve soğuk uygulamalar, ultrason, elektriksel stimölasyon ve lazer gibi fiziksel ajanlardan yararlanılabilmektedir. Uygulamalar genellikle ağrının azaltılması ve aktif rehabilitasyona katılımın kolaylaştırılması amacıyla egzersiz tedavisiyle birlikte kullanılmaktadır (32).

Sıcak ve Soğuk Uygulamalar

Yüzeyel sıcak uygulamalar, kas gerginliğinin azaltılması ve geçici ağrı kontrolölünün desteklenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Hotpack ve infraruj yüzeyel ısıtma yöntemleri arasında yer alırken ultrason ve kısa dalga diatermi daha derin dokulara yönelik uygulamalar olarak tanımlanmaktadır (33).

Sıcak uygulamanın lokal dolaşımı artırması ve kas gevşemesini desteklemesi beklenmektedir. Servikal disk hastalığına bağı boyun ağrısında sıcak tedavisinin etkinliğini destekleyen araştırma kanıtlarının sınırlı olduğı bildirilmiştir (34).

Soğuk uygulamalar ise özellikle akut ağrı ve inflamatuvar belirtilerin kontrolünde tercih edilebilmektedir. Soğuk kompresler ve jel paketleri bu amaçla kullanılan yöntemler arasındadır (35).

Sıcak ve soğuk uygulamaların karşılaştırıldığı bir çalışmada, ibuprofen tedavisine eklenen iki yöntemin sonuçları arasında anlamlı fark bulunmadığı bildirilmiştir. Termal uygulamaların seçimi hastanın semptomları, toleransı ve klinik gereksinimleri doğrultusunda yapılmalıdır (36).

Terapötik Ultrason

Terapötik ultrason, yüksek frekanslı ses dalgalarının dokulara iletilmesi esasına dayanan bir fizik tedavi yöntemidir. Servikal bölgedeki ağrı ve yumuşak doku yakınmalarının yönetiminde yardımcı uygulama olarak kullanılabilmektedir (37).

Ultrasonun farklı uygulama parametreleriyle kullanılabildiği ve derin ısıtıcı yöntemler arasında değerlendirildiği belirtilmektedir. Ultrasonun servikal disk hernisine özgü klinik etkinliğinin kesin olarak ortaya konulması için daha güçlü araştırmalara ihtiyaç bulunmaktadır (35).

Transkütanöz Elektriksel Sinir Stimülasyonu ve Diğer Akımlar

Transkütanöz elektriksel sinir stimülasyonu (TENS), deri üzerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla elektriksel uyarı verilmesine dayanan, ağrının semptomatik kontrolünde kullanılan noninvaziv bir yöntemdir. Duyusal sinir liflerinin uyarılması yoluyla analjezik etki oluşturma amaçlanmaktadır (38).

TENS uygulamalarında farklı frekans, akım süresi ve şiddet parametreleri kullanılabilmektedir. Konvansiyonel TENS, klinik uygulamada yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biridir (39). Elektroterapi yöntemleri, ağrı kontrolünün yanı sıra bazı uygulamalarda kas aktivasyonunun desteklenmesi amacıyla da kullanılmaktadır (40).

Kronik boyun ağrısında TENS ve bazı elektromanyetik uygulamaları değerlendiren bir Cochrane derlemesinde, olumlu etkiler bildirilmesine karşın kanıtların kesinlik düzeyinin çok düşük olduğu belirtilmiştir. İnterferansiyel akım ve elektromanyetik alan tedavileriyle ilgili çalışmaların sonuçları da çelişkilidir (35).

Lazer Tedavisi

Lazer uygulamaları, boyun ağrısının konservatif tedavisinde değerlendirilen fiziksel ajanlar arasındadır. Düşük ve yüksek yoğunluklu lazer uygulamalarının analjezik ve biyostimülatör etkilerinden yararlanılması amaçlanmaktadır (41).

Düşük yoğunluklu lazer tedavisini inceleyen randomize kontrollü çalışmaların değerlendirildiği bir derlemede, akut ve kronik boyun ağrısında olumlu sonuçlar bildirilmiştir. Başka bir derlemede lazer tedavisinin bazı diğer konservatif yöntemlere kıyasla daha uzun süre devam eden etkiler gösterebildiği ifade edilmiştir (22).

Yüksek yoğunluklu lazer ve egzersiz kombinasyonunu, TENS, ultrason ve egzersiz kombinasyonu ile karşılaştıran bir çalışmada her iki grupta ağrı ve eklem hareket açıklığı açısından iyileşme gözlenmiş, ancak gruplar arasında anlamlı farklılık saptanmamıştır (33).

Servikal Traksiyon

Servikal traksiyon, servikal omurgaya kontrollü çekme kuvveti uygulanarak eklem ve yumuşak dokular üzerindeki mekanik yükün değiştirilmesini amaçlayan bir tedavi yöntemidir. Sinir kökü basısına bağlı yakınmaların bulunduğu hastalarda semptomların hafifletilmesi amacıyla kullanılabilmektedir (35).

Traksiyon manuel olarak veya mekanik cihazlarla uygulanabilmekte; sürekli ve aralıklı uygulama biçimleri tercih edilebilmektedir. Uygulama pozisyonu ve çekme kuvveti hastanın klinik özelliklerine göre belirlenmektedir (35).

Servikal traksiyonun nöral foramenlerin boyutları ve sinir köküne etki eden mekanik yük üzerinde değişiklik oluşturabileceği düşünülmektedir. Uygun uygulama açısı ve pozisyonunun hastanın semptomları ve klinik muayene bulgularına göre seçilmesi gerekmektedir (35).

Traksiyonun etkinliğini değerlendiren çalışmalarda farklı sonuçlar bildirilmiştir. Bir Cochrane derlemesinde, radikülopatisi bulunan ve bulunmayan boyun ağrılı hastalar birlikte değerlendirildiğinde traksiyonun etkinliğini destekleyen yeterli kanıt ulaşılamamıştır. Tümör, enfeksiyon, ileri osteoporoz, servikal instabilite, miyelopati ve vasküler bası gibi durumlarda traksiyonun uygulanmaması gerektiği belirtilmektedir. Traksiyon kararı, nörolojik değerlendirme ve olası kontrendikasyonların incelenmesinden sonra verilmelidir (42).

Manuel Terapi, Mobilizasyon ve Manipülasyon

Manuel terapi, eklem hareketliliğinin geliştirilmesi, ağrının azaltılması ve yumuşak doku fonksiyonlarının desteklenmesi amacıyla kullanılan elle uygulanan tedavi yöntemlerini kapsamaktadır. Servikal bölge rehabilitasyonunda mobilizasyon ve manipülasyon teknikleri bu yaklaşımın önemli bileşenleri arasındadır (42).

Mobilizasyon, eklem normal eklem hareket sınırları içerisinde uygulanan kontrollü ve düşük hızlı pasif hareketlerden oluşmaktadır. Manipülasyon ise belirli bir eklem segmentine yüksek hızlı ve düşük amplitüdlü kuvvet uygulanmasıyla gerçekleştirilen bir yöntemdir (43).

Manuel terapi uygulamalarının ağrı ve eklem hareket açıklığı üzerindeki etkileri çeşitli araştırmalarda incelenmiştir. Manipülasyon ve mobilizasyonun immobilizasyona kıyasla bazı hastalarda daha olumlu ağrı sonuçları oluşturabildiği, ancak egzersiz ve diğer fizik tedavi yöntemlerine karşı kısa, orta ve uzun dönemde belirgin üstünlük göstermediği bildirilmiştir (44). Uygulanan yöntemlerin etkinliğine ilişkin çalışmaların önemli bir bölümünün düşük veya çok düşük kanıt kalitesine sahip olduğu belirtilmektedir. Araştırmalarda torakal manipülasyonun boyun ağrısı üzerinde mobilizasyon ve standart bakıma kıyasla daha olumlu etkileri olabileceği bildirilmiştir (45).

Manuel terapi çoğunlukla tek başına uygulanmamakta; egzersiz ve hasta eğitimiyle birlikte uygulanmaktadır (46). Akut boyun ağrısında manipülasyon ve egzersizin birlikte uygulanmasının yalnızca egzersize kıyasla daha etkili olabileceğine ilişkin orta kalitede kanıtlar

bulunmaktadır. Özellikle yüksek hızlı servikal manipülasyonların olası ciddi komplikasyonları dikkate alınmalıdır. Servikal manipülasyon sonrası vertebral arter yaralanması ve serebrovasküler olaylarla ilgili olgu bildirimleri bulunmaktadır (46).

Servikal manipülasyon ile arter diseksiyonu ve inme arasındaki ilişkiyi değerlendiren yayınlarda risk artışına ilişkin bulgular bildirilmekle birlikte bu olayların sıklığı ve nedensel ilişkisinin kesin olarak belirlenmesi güçtür (35).

Masaj ve Yumuşak Doku Uygulamaları

Masaj, servikal bölgedeki kas gerginliğinin azaltılması, ağrının hafifletilmesi ve gevşemenin desteklenmesi amacıyla kullanılabilen tamamlayıcı bir yöntemdir. Uygulama teknikleri, basınç düzeyi ve hedeflenen dokular bakımından farklılık gösterebilmektedir (35).

Kronik nonspesifik boyun ağrısına yönelik araştırmalarda masajın kısa süreli ağrı kontrolüne katkı sağlayabileceği bildirilmiştir. Küçük ölçekli çalışmalarda masaj uygulamalarının kontrol müdahalelerine kıyasla yararlı sonuçlar oluşturduğu belirtilmiştir (47).

Akupunktur ve Diğer Tamamlayıcı Yaklaşımlar

Akupunktur, vücutta ağrı olan bölgelerine ince iğnelerin uygulanmasına dayanan tamamlayıcı bir tedavi yöntemidir. Ağrı kontrolündeki etkileri nörofizyolojik ve nörohormonal mekanizmalarla açıklanmaya çalışılmaktadır (48).

Servikal disk hernisi ve servikal radikülopatide akupunkturun yararını inceleyen araştırmalar bulunmakla birlikte bu alandaki çalışma sayısının sınırlı olduğu belirtilmektedir (49). Sistematik derlemelerde yer alan çalışmaların önemli bir bölümünün düşük veya orta metodolojik kaliteye sahip olduğu bildirilmiştir (49).

Akupunktur ve akupresür gibi yöntemler bazı hastalarda ağrı kontrolünü destekleyen tamamlayıcı uygulamalar olarak değerlendirilebilmektedir. Uygulanan bu yöntemlerin etkinliğine ilişkin belirsizlikler nedeniyle temel rehabilitasyon yaklaşımlarının yerine kullanılmaları uygun değildir (50).

Multimodal Rehabilitasyon Yaklaşımları

Servikal disk hernisinde konservatif tedavinin planlanması, farklı müdahalelerin hastanın ihtiyaçlarına göre bir araya getirilmesini gerektirebilmektedir. Hasta eğitimi, terapötik egzersiz, fiziksel ajanlar ve uygun manuel terapi teknikleri birlikte uygulanabilmektedir (46). Tedavi programının içeriği hastalığın evresine, radiküler bulguların varlığına, fonksiyonel yetersizliklere ve bireyin uygulamalara verdiği yanıtı göre düzenlenmelidir. Özellikle egzersiz yüklenmesinin aşamalı olarak artırılması ve yakınmaları belirgin biçimde şiddetlendiren uygulamalardan kaçınılması önem taşımaktadır (30).

6. SONUÇ

Servikal disk hernisi, boyun ağrısı ve üst ekstremiteye sinirler aracılığı ile yayılan nörolojik belirtilerle bireyin fonksiyonel kapasitesini ve yaşam kalitesini etkileyebilen bir kas-iskelet sistemi problemidir. Disk hernisi olan hastalarda konservatif tedavi, semptomların kontrol altına alınması ve günlük yaşam aktivitelerinin sürdürölmesi açısından önemli bir tedavi seçeneğidir (51).

Konservatif rehabilitasyonun temelini hasta eğitimi, aktivite düzenlemeleri ve kişiye özgü terapötik egzersiz programları oluşturmaktadır. Fiziksel ajanlar, traksiyon, manuel terapi ve tamamlayıcı yöntemler ise klinik gereksinimlere ve mevcut kanıtlara göre destekleyici uygulamalar olarak değerlendirilebilmektedir (32).

Özellikle servikal stabilizasyon, postüral kontrol, skapular kas fonksiyonları ve solunum paternine yönelik egzersizlerin birlikte ele alınması, rehabilitasyonun bütüncül biçimde planlanmasına katkı sağlayabilir (28).

KAYNAKLAR

- García-Fernandez, P., Torre, H., Flores, L., & Rea, J. (1998). The cervical vertebrae as maturational indicators. *Journal of Clinical Orthodontics*, 32(4), 221–225.
- Deyo, R. A., & Mirza, S. K. (2016). Herniated lumbar intervertebral disk. *The New England Journal of Medicine*, 374(18), 1763–1772. <https://doi.org/10.1056/NEJMcp1512658>
- Berg, E. J., & Ashurst, J. V. (2022). Anatomy, back, cauda equina. In StatPearls. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513251/>.
- Drake, R. L., Vogl, A. W., & Mitchell, A. W. M. (2009). *Gray's anatomy for students* (2nd ed.). Churchill Livingstone/Elsevier.
- Taner, D. (2003). *Fonksiyonel anatomi: Ekstremiteler ve sırt bölgesi*. Hekimler Yayın Birliği.
- Koç Direk, F. (Ed.). (2024). *Anatomiye klinik ve morfolojik yaklaşımlar*. Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub626>
- De Palma, M. S. (2010). Sık görülen boyun problemlerinde tedavi. R. L. Braddom (Ed.), *Fiziksel tıp ve rehabilitasyon* (3. baskı, ss. 797–824). Güneş Tıp Kitabevleri..
- Meyer, E. M. (2013). A comparison of mobilisation and exercise in the treatment of chronic non-specific neck pain [Yüksek lisans tezi, Durban University of Technology].
- Borenstein, D. G., Wiesel, S. W., & Boden, S. D. (2004). Anatomy and biomechanics of the cervical and lumbar spine. In D. G. Borenstein, S. W. Wiesel, & S. D. Boden (Eds.), *Low back and neck pain: Comprehensive diagnosis and management* (3rd ed., pp. 3–36). WB Saunders.
- Brotzman, S. B., & Manske, R. C. (2011). *Clinical orthopaedic rehabilitation: An evidence-based approach* (3rd ed.). Elsevier Mosby.
- Aslan, Ü. B. (2011). *Kronik boyun ağrılı hastalarda matrix ritm terapi uygulamasının etkinliği* (Yayımlanmamış doktora tezi). Pamukkale Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- O'Laoire, S. A., & Thomas, D. G. (1983). Spinal cord compression due to prolapse of cervical intervertebral disc (herniation of nucleus pulposus): Treatment in 26 cases by discectomy without interbody bone graft. *Journal of Neurosurgery*, 59(5), 847–853. <https://doi.org/10.3171/jns.1983.59.5.0847>
- Zielinska, N., Podgórski, M., Haładaj, R., Polguj, M., & Olewnik, Ł. (2021). Risk factors of intervertebral disc pathology—A point of view formerly and today—A review. *Journal of Clinical Medicine*, 10(3), 409. <https://doi.org/10.3390/jcm10030409>
- Radhakrishnan, K., Litchy, W. J., O'Fallon, W. M., & Kurland, L. T. (1994). Epidemiology of cervical radiculopathy: A population-based study from Rochester, Minnesota, 1976 through 1990. *Brain*, 117(2), 325–335. <https://doi.org/10.1093/brain/117.2.325>
- Zileli, M., & Özer, F. (1997). *Omurilik ve omurga cerrahisi* (Cilt 1). İzmir: Saray Kitabevi.

- Henderson, C. M., Hennessy, R. G., Shuey, H. M., Jr., & Shackelford, G. E. (1983). Posterior-lateral foraminotomy as an exclusive operative technique for cervical radiculopathy: A review of 846 consecutively operated cases. *Neurosurgery*, 13(5), 504–512.
- Şen, M. E., & Demirtaş, S. (2023). Afetlerde cerrahi müdahaleler ve postoperatif fizyoterapi. N. Ulutaşdemir & E. Öztürk Çopur (Ed.), *Afetlerde sağlık hizmetleri II* (ss. 205–220). İKSAD Yayınevi.
- Periyasamy, S., Charles, J., & Narasimhaprasad, A. (2022). Evaluation and management of cervical radiculopathy from disc herniation and degenerative disorders. *EC Orthopaedics*, 13(12), 18–27.
- Dydyk, A. M., Ngnitewe Massa, R., & Mesfin, F. B. (2023). Disc herniation. In StatPearls. StatPearls Publishing.
- Dinich, P. (2013). Chiropractic and health. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Sharrak, S., & Al Khalili, Y. (2022). Cervical disc herniation. In StatPearls. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK546618/>
- Lin, I., Wiles, L., Waller, R., Goucke, R., Nagree, Y., Gibberd, M., ... & O'Sullivan, P. P. B. (2020). What does best practice care for musculoskeletal pain look like? Eleven consistent recommendations from high-quality clinical practice guidelines: Systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 54(2), 79–86. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099878>
- Gross, A., Forget, M., St George, K., Fraser, M. M. H., Graham, N., Perry, L., ... & Brunarski, D. (2012). Patient education for neck pain. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (3), CD005106. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005106.pub4>
- Javdaneh, N., Saeterbakken, A. H., Shams, A., & Barati, A. H. (2021). Pain neuroscience education combined with therapeutic exercises provides added benefit in the treatment of chronic neck pain. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8848. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168848>
- Weinstein, A., Herring, S., & Gole, A. (1998). Rehabilitation of the patient with spinal pain. Lippincott-Raven.
- Peloso, P. M. J., Gross, A., Haines, T., Trinh, K., Goldsmith, C. H., & Burnie, S. J. (2011). Medicinal and injection therapies for mechanical neck pain. *Cochrane Database of Systematic Reviews*.
- Lee, J. H., Choi, K. H., Kang, S., Kim, D. H., Kim, D. H., & Kim, B. R. (2019). Nonsurgical treatments for patients with radicular pain from lumbosacral disc herniation. *The Spine Journal*, 19(9), 1478–1489.
- Kennedy, C. N. (2011). The cervical spine. In L. H. Brody & C. M. Hall (Eds.), *Therapeutic exercise: Moving toward function* (3rd ed., pp. 590–612). Lippincott Williams & Wilkins.

- Wu, S. K., Chen, H. Y., You, J. Y., Bau, J. G., Lin, Y. C., & Kuo, L. C. (2022). Outcomes of active cervical therapeutic exercise on dynamic intervertebral foramen changes in neck pain patients with disc herniation. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 23, 728.
- Durmuş, B. (2014). Servikal bölge sorunlarında egzersiz reçeteleme. *Türk Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon Dergisi*, 60(Özel Sayı 2), S15–S24.
- Yaşa, M. E., Ün Yıldırım, N., & Demir, P. (2021). The effects of a 6-week balance training in addition to conventional physiotherapy on pain, postural control, and balance confidence in patients with cervical disc herniation: A randomized controlled trial. *Somatosensory & Motor Research*, 38(1), 60–67.
- Hurwitz, E. L., Carragee, E. J., van der Velde, G., Carroll, L. J., Nordin, M., Guzman, J., ... Haldeman, S. (2008). Treatment of neck pain: Noninvasive interventions: Results of the Bone and Joint Decade 2000–2010 Task Force on Neck Pain and Its Associated Disorders. *Spine*, 33(4 Suppl.), S123–S152.
- Yasui, H., Takamoto, K., Hori, E., Urakawa, S., Nagashima, Y., Yada, Y., ... Nishijo, H. (2010). Significant correlation between autonomic nervous activity and cerebral hemodynamics during thermotherapy on the neck. *Autonomic Neuroscience*, 156(1–2), 96–103.
- Philadelphia Panel. (2001). Philadelphia Panel evidence-based clinical practice guidelines on selected rehabilitation interventions for neck pain. *Physical Therapy*, 81(10), 1701–1717.
- Swenson, R. S. (2003). Therapeutic modalities in the management of nonspecific neck pain. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 14(3), 605–627.
- Ma, C., Szeto, G. P., Yan, T., Wu, S., Lin, C., & Li, L. (2011). Comparing biofeedback with active exercise and passive treatment for the management of work-related neck and shoulder pain: A randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 92(6), 849–858.
- Panjabi, M. M. (2003). Clinical spinal instability and low back pain. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 13(4), 371–379.
- Johnson, M. I., & Bjordal, J. M. (2011). Transcutaneous electrical nerve stimulation for the management of painful conditions: Focus on neuropathic pain. *Expert Review of Neurotherapeutics*, 11(5), 735–753.
- Akyüz, G. (2001). Transkütan elektriksel sinir stimülasyonu. *Elektroterapi* (2. baskı, ss. 163–176). Nobel Tıp Kitabevleri.
- Robertson, V., Ward, A., Low, J., & Reed, A. (2006). *Electrotherapy explained: Principles and practice* (4th ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Chow, R. T., Johnson, M. I., Lopes-Martins, R. A. B., & Bjordal, J. M. (2009). Efficacy of low-level laser therapy in the management of neck pain: A systematic review and meta-analysis of randomised placebo or active-treatment controlled trials. *The Lancet*, 374(9705), 1897–1908.

- Khan, R. R., Awan, W. A., Rashid, S., & Masood, T. (2017). A randomized controlled trial of intermittent cervical traction in sitting vs. supine position for the management of cervical radiculopathy. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, 33(6), 1333–1338.
- Verhagen, A. P. (2021). Physiotherapy management of neck pain. *Journal of Physiotherapy*, 67(1), 5–11.
- Gross, A., Langevin, P., Burnie, S. J., Bédard-Brochu, M. S., Empey, B., Dugas, E., ... LeBlanc, F. (2015). Manipulation and mobilisation for neck pain contrasted against an inactive control or another active treatment. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (9), CD004249.
- Masaracchio, M., Kirker, K., States, R., Hanney, W. J., Liu, X., & Kolber, M. (2019). Thoracic spine manipulation for the management of mechanical neck pain: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(2), e0211877. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211877>
- Coulter, I. D., Crawford, C., Vernon, H., Hurwitz, E. L., Khorsan, R., & Booth, M. S. (2019). Manipulation and mobilization for treating chronic nonspecific neck pain: A systematic review and meta-analysis for an appropriateness panel. *Pain Physician*, 22, 55–70.
- Furlan, A. D., Yazdi, F., Tsertsvadze, A., Gross, A., van Tulder, M., Santaguida, L., & Gagnier, J. (2012). A systematic review and meta-analysis of efficacy, cost-effectiveness, and safety of selected complementary and alternative medicine for neck and low-back pain. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012, Article 953139. <https://doi.org/10.1155/2012/953139>
- Smith, L. A., Oldman, A. D., McQuay, H. J., & Moore, R. A. (2000). Teasing apart quality and validity in systematic reviews: An example from acupuncture trials in chronic neck and back pain. *Pain*, 86(1–2), 119–132.
- Zhuang, L. (2000). Twenty one cases of vertebral-artery-type cervical spondylosis treated with acupuncture and moxibustion. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 20(4), 280–281.
- Madson, T. J., Cieslak, K. R., & Gay, R. E. (2010). Joint mobilization vs massage for chronic mechanical neck pain: A pilot study to assess recruitment strategies and estimate outcome measure variability. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 33(9), 644–651.
- Caridi, J. M., Pumberger, M., & Hughes, A. P. (2011). Cervical radiculopathy: A review. *HSS Journal*, 7(3), 265–272.