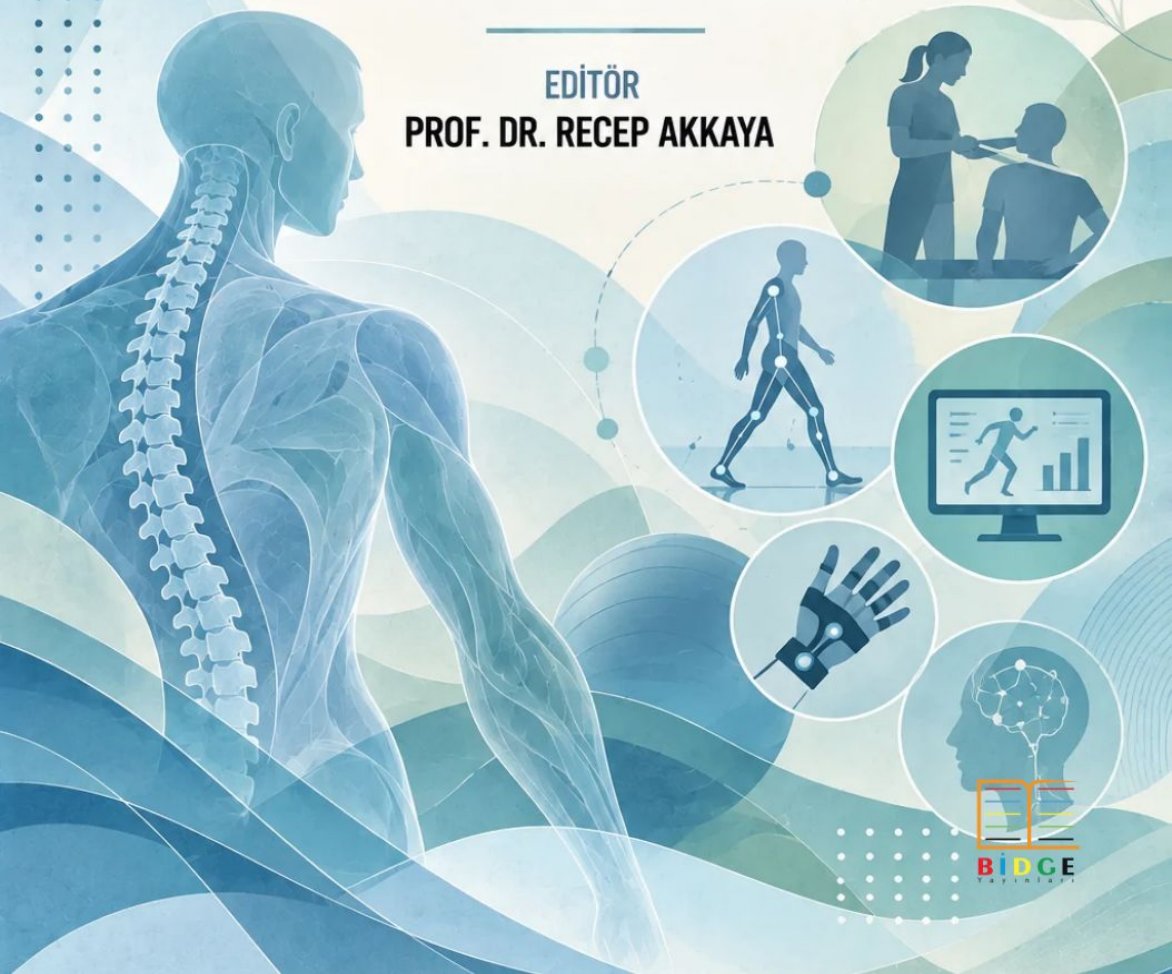
REHABİLİTASYON BİLİMLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR:

KLİNİK UYGULAMALAR, DİJİTAL TEKNOLOJİLER VE MULTİDİSİPLİNER BAKIŞ

EDİTÖR
PROF. DR. RECEP AKKAYA



BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Rehabilitasyon Bilimlerinde Yenilikçi Yaklaşımlar: Klinik Uygulamalar, Dijital Teknolojiler ve Multidisipliner Bakış

Editör: Prof. Dr. RECEP AKKAYA

ISBN: 978-625-5436-10-8

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

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

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

İÇİNDEKİLER

TENDİNOPATİLERDE YÜK YÖNETİMİ VE EGZERSİZ 1
SİMGE DÖNMEZ

DERİN GLUTEAL SENDROM KLİNİK DEĞERLENDİRME VE REHABİLİTASYON 28
VEDAT KURT, CİHAN CANER AKSOY

YOĞUN BAKIMDA KARDİYOPULMONER REHABİLİTASYON: FİZYOPATOLOJİK TEMELLER VE KLİNİK UYGULAMALAR 38
BETÜL YOLERİ

YOĞUN BAKIM ÜNİTESİNDE EDİNİLMİŞ KAS ZAYIFLIĞI VE FİZYOTERAPİNİN ROLÜ 67
CANSU ÖZDEMİR, TUĞBA KELEŞ REİS

DENGE DEĞERLENDİRMESİ VE REHABİLİTASYONUNDA GİYİLEBİLİR İNERSİYAL SENSÖRLER YERİ VE KULLANIM ALANLARI 94
YUSUF ŞİNASİ KIRMACI, ASİYA UZUN

ORTOPEDİK REHABİLİTASYONDA OBJEKTİF İZLEMDEN KİŞİSELLEŞTİRİLMİŞ TEDAVİYE: GİYİLEBİLİR SENSÖRLER, YAPAY ZEKÂ VE UZAKTAN TERAPÖTİK İZLEM 115
OKAN ÜZER, SEVTAP ÇAKIR

ORTOPEDİK CERRAHİDE YAPAY ZEKA: TANIDAN CERRAHİ PLANLAMAYA GÜNCEL UYGULAMALAR ... 134
FATİH TAHAK

BİR İNSAN HAKKI OLARAK REHABİLİTASYON: FİZİKSEL TIP VE REHABİLİTASYON PERSPEKTİFİNDEN EŞİTLİK, ERİŞİLEBİLİRLİK VE TOPLUMSAL KATILIM 148

İÇİNDEKİLER

EMRE ERSÖZ

BÖLÜM 1

TENDİNOPATİLERDE YÜK YÖNETİMİ VE EGZERSİZ

SİMGE DÖNMEZ[1]

Giriş

Tendinopatiler, tendon dokusunda meydana gelen değişikliklerle ilişkili ağrı, fonksiyon kaybı ve fiziksel aktivite intoleransı ile karakterize edilen kas-iskelet sistemi sorunlarıdır. Aşil, patellar, rotator manşet ve gluteal tendonlar başta olmak üzere farklı anatomik bölgelerde görülebilen bu durumlar, bireylerin günlük yaşam aktivitelerini, sportif performanslarını ve yaşam kalitelerini olumsuz etkileyebilmektedir. Tendinopatilerin gelişimi ve klinik seyri, tendonun maruz kaldığı mekanik yükler ile bu yükleri tolere edebilme kapasitesi arasındaki dengeye bağlıdır. Bununla birlikte, yaş, fiziksel aktivite düzeyi, bireysel özellikler ve toparlanma koşulları gibi faktörler de tendonun yüklenmeye verdiği yanıtı etkileyebilmektedir (Cook & Purdam, 2009).

Tendinopatilerin konservatif yönetiminde egzersiz tedavisi, kas kuvvetinin ve fonksiyonel kapasitenin geliştirilmesi açısından

[1] Araştırma Görevlisi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü. Orcid: 0000-0003-4072-4460

temel yaklaşımlardan biridir. İzometrik, konsantrik, eksantrik ve ağır-yavaş direnç egzersizleri, tendon rehabilitasyonunda kullanılan başlıca egzersiz yöntemleri arasındadır. Ancak tedavi sonuçları yalnızca egzersiz türüne değil; egzersizin yoğunluğu, hacmi, sıklığı ve progresyonu gibi temel bileşenlerine de bağlıdır. Yakın zamanda yapılan bir sistematik derleme ve meta-analizde direnç egzersizlerinin doz bileşenlerinin tendinopati yönetimindeki önemine vurgu yapılmış, bununla birlikte tüm tendinopatiler için geçerli tek bir optimal protokolün belirlenemediği de gösterilmiştir (Pavlova vd., 2023).

Yük yönetimi, tendinopatilerde fiziksel aktivitenin tamamen sınırlandırılmasından ziyade, bireyin mevcut kapasitesi ile günlük yaşam ve spor faaliyetlerinin oluşturduğu mekanik talepler arasında denge kurmayı amaçlamaktadır. Bu süreçte yük tolerasyonunun gözlenmesi ayrı bir önem arz etmektedir. Bu açıdan ağrı ve fonksiyonel kapasitenin izlenmesi, egzersiz yükünün bireye özgü oluşturulması ve toparlanma süresinin dikkate alınması önemlidir. Güncel klinik rehberler de tendon yükleme egzersizlerinin, hasta eğitimi ve bireyselleştirilmiş rehabilitasyon uygulamalarıyla birlikte ele alınmasını önermektedir (Chimenti vd., 2024; Desmeules vd., 2025).

Bu bölümün amacı, tendinopatilerin konservatif yönetiminde yük yönetiminin temel ilkelerini, farklı egzersiz yaklaşımlarını ve egzersiz dozunun belirlenmesine ilişkin güncel bilimsel kanıtları incelemektir. Ayrıca yükün ilerletilmesi ve fonksiyonel aktivitelere dönüş süreçleri ele alınarak kanıta dayalı uygulamalara yönelik bir çerçeve sunulması hedeflenmektedir.

Tendonun Bağ Dokusu Yapısı

Tendonlar, kaslar tarafından üretilen kuvvetleri kemiklere ileterek hareketin gerçekleşmesini sağlayan, kolajen açısından zengin bağ dokularıdır. Başlıca Tip 1 kolajenden oluşan ekstraselüler

matriksler, tendonların çekme mukavemetine karşı dayanıklılık göstermesini sağlar. Tendonlar, aynı zamanda viskoelastik özellik gösterdikleri için mekanik enerjiyi depolayabilir, daha sonra uygun zamanda serbest bırakabilir. Bu özellikler, özellikle koşma ve sıçrama gibi enerji gerektiren tekrarlı yüklenmeler sırasında hareketin verimliliğine katkıda bulunur (Bohm vd., 2015).

Tendon dokusunun temel bileşenleri hücreler ve ekstraselüler matrikstir. Tendon hücreleri arasında tenositler ve tenoblastlar bulunur. Bu hücreler, kolajen ve diğer matriks bileşenlerinin sentezlenmesi, sürdürülmesi ve yeniden yapılanmasında görev alır (Doral vd., 2010). Tendonun kuru ağırlığının büyük bölümünü oluşturan kolajenin başlıca tipi Tip 1 kolajendir. Kolajen molekülleri fibrilleri, fibriller lifleri, lifler ise daha büyük demetleri oluşturacak şekilde hiyerarşik olarak organize olur. Bu düzen, tendonun çekme mukavemetine karşı dayanıklılığın temelini oluşturmaktadır (Thorpe vd., 2015).

Ekstraselüler matriks yalnızca kolajenden oluşmaz; proteoglikanlar, glikoproteinler ve su da tendon dokusunun bileşenlerini oluşturmaktadır. Proteoglikanlar ve diğer matriks bileşenleri, kolajen fibrilleri arasındaki etkileşimlerin düzenlenmesinde ve dokunun viskoelastik davranışında rol oynamaktadır. Tendonun su içeriği ve matriks organizasyonu, mekanik yüklenme sırasında dokunun deformasyon özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle tendonun mekanik davranışı, yalnızca kolajen miktarıyla değil, matriksin bileşimi ve yapısal bütünlüğüyle de ilişkilidir (Doral vd., 2010; Kannus, 2000).

Tendonun Mekanik Özellikleri ve Yüklenmeye Adaptasyonu

Tendon dokusu, maruz kaldığı mekanik yüklenmelere hücresel ve yapısal düzeyde cevap verebilmektedir. Mekanotransdüksiyon olarak adlandırılan bu olaylar dizisinde dışarıdan alınan mekanik uyaranlar hücresel sinyallere

dönüştürülerek tendon dokusunun homeostazının ve yeniden yapılanmasının düzenlenmesine katkıda bulunur. Bununla birlikte, tendonun mekanik yüke verdiği yanıt; yükün şiddeti ve süresinin yanı sıra yüklenme sıklığı, toparlanma süresi ve bireysel özelliklerden de etkilenmektedir (Cook & Purdam, 2009; Nakamichi & Asahara, 2024).

Düzenli ve uygun dozda uygulanan mekanik yüklenme, tendonun özelliklerinde olumlu adaptasyonlara yol açabilir. Yapılan bir sistematik derleme ve meta-analiz çalışmasında, mekanik yüklenmenin alt ekstremite tendonlarında sertlik ve elastik modülde artışla ilişkili olduğu, kesit alanındaki değişimin ise daha küçük olduğu bildirilmiştir. Bu bulgular, tendonun yüklenmeye adaptasyonunun sadece yapısal olmayacağını göstermektedir. Öte yandan, yükün bireyin yük kapasitesini aşması veya toparlanması için yeterli zaman tanınmaması durumunda semptomların ortaya çıkmasına veya artmasına katkıda bulunabilir (Lazarczuk vd., 2022).

Tendinopatilerin Patofizyolojisi

Tendinopati; tendon bölgesinde yükle ilişkili ağrı, fonksiyon kaybı ve fiziksel aktivite toleransında azalma ile karakterize, çok faktörlü bir kas-iskelet sistemi problemidir. Gelişiminde yük ve tendon kapasitesi arasındaki dengesizliğin yanı sıra yaş, fiziksel aktivite düzeyi gibi bireysel özellikler de rol oynayabilir. Bu nedenle tendinopatiler yalnızca aşırı kullanım sonucu oluşan bir deformite olarak değerlendirilmemeli, tendonun mekanik uyaranlara verdiği yanıtlar ve dokunun yeniden iyileşme süreçleri birlikte ele alınmalıdır (Cook & Purdam, 2009; Magnusson vd., 2010a).

Tendinopatilerde kolajen organizasyonunda ve ekstraselüler matriks yapısında bazı değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişiklikler, hücresel yanıtların farklılaşmasına ve tendonun mekanik özelliklerinde değişikliklere yol açabilmektedir. Cook ve Purdam (2009) tarafından önerilen tendon patolojisi süreklilik

modelinde, bu değişimler reaktif tendinopati, tendon onarım bozukluğu ve dejeneratif tendinopati başlıkları altında açıklanmaktadır (Cook & Purdam, 2009). Patogenez mekanizmalarında en çok kabul gören açıklamaya göre tendon, fizyolojik eşiğini aşan mekanik yüklere veya aşırı gerilmelere maruz kaldığında önce ekstraselüler matrikste başlayan hasar, başlangıçta birbirine paralel ve düzenli dizilmiş Tip 1 kolajen liflerinin yırtılması ve liflerin arasındaki çapraz bağların bozulmasıyla devam etmektedir (Riley, 2005, 2008). Mekanik hasarın sinyalleri tenosit çeperindeki mekanoreseptörler aracılığıyla hücre içine iletilerek tenositler uyarılmaktadır. Bir yandan hasarlı bölgenin hücre onarımı için gerekli hücreler çoğalır, diğer yandan da uyarılan tenositler metalloproteinazların ekspresyonunu anormal şekilde artırır. Böylece hem hasarlı dokudaki hem de çevre dokudaki normal kolajen matriksleri aşırı derecede parçalanır; Tip 1 kolajen sentezi azalır, yerini Tip 3 kolajene bırakır. En nihayetinde ekstraselüler matriks düzensizliği ve elastikiyet ve gerilme kuvvetlerine dayanıksız doku haline gelir (Rees vd., 2009). Ayrıca, hasar sinyalleri iletildiğinde tenositlerin pro-anjiyojenik faktörler salgılamasına sebep olur, bu nedenle damarlanması zayıf olan tendonda anormal vasküler proliferasyonu teşvik eder. Neovasküler oluşumlar bir yandan normal ekstraselüler matriks onarımını bozarken öte yandan sinir uçlarının içeriye doğru büyümesiyle birlikte ağrı algısını şiddetlendirir (Riley, 2008). Bu modelde tendon patolojisinin her bireyde aynı sırayla ve aynı şekilde ilerleyen kesin evrelerden oluştuğu şeklinde yorumlanmamalıdır. Ayrıca tendon yapısındaki değişiklik ile semptomlar arasında her zaman doğrusal ilişki bulunmamaktadır (Cook vd., 2016). Bu nedenle klinik değerlendirmede hastanın öyküsü, yüklenmeyle ilişkili semptomları, fiziksel değerlendirmesi ve fonksiyonel durumu birlikte ele alınmalıdır.

Tendinopatilerde ortak patofizyolojik süreçler olmasına rağmen, etkilenen bölgenin anatomik ve biyomekanik özellikleri klinik tabloyu etkileyebilir. Örneğin, Aşil ve patellar tendinopatilerde koşma, sıçrama ve benzeri aktiviteler sırasında ortaya çıkan tekrarlayan yüksek çekme kuvvetleri ön plana çıkarken (Malliaras vd., 2013), gluteal tendinopatilerde tendon üzerindeki kompresyon ve çekme yüklerinin birlikte etkisi önem taşımaktadır (Grimaldi & Fearon, 2015). Rotator manşet tendinopatisinde omuz hareketleri sırasında oluşan yüklenmeler ve tendonun çevre anatomik yapılarla ilişkisi (Desmeules vd., 2025); lateral dirsek tendinopatisinde ise el bileği ekstansör tendonlarına binen tekrarlı yükler klinik açıdan dikkate alınmalıdır (Lucado vd., 2022). Dolayısıyla tendinopatilerde değerlendirme ve tedavi planlaması, genel ilkelerin yanı sıra etkilenen tendonun bölgesel özelliklerini de içermelidir. Bu çerçevede tendinopati rehabilitasyonunun temel amaçları; semptomları yönetmek, tendonun üzerindeki yükü hafifletmek, tendonun yük taşıma kapasitesini geliştirmek ve bireyin günlük yaşam ya da spor aktivitelerine güvenli biçimde dönmesini sağlamaktır. Yük yönetimi, hasta eğitimi ve kademeli egzersiz uygulamaları bu hedeflerin temel bileşenleridir. Bununla birlikte, egzersiz türü, şiddeti ve progresyonu belirlenirken tendonun doğası, semptomların şiddeti ve bireyin fonksiyonel hedefleri dikkate alınmalıdır.

Tendinopatilerde Yük Yönetimi

Yük yönetimi, tendonun maruz kaldığı mekanik yükün bireyin mevcut yük taşıma kapasitesiyle dengelenmesini ve bu kapasitenin iyileştirilmesini hedefler. Bu yaklaşım, pasif bir şekilde dinlenmeyi değil, günlük yaşam ve spor aktivitelerinin tendonun toleransına uygun biçimde düzenlenmesini de kapsar. Özellikle Aşil tendinopatisinde uzun süreli tam dinlenme fiziksel kapasitenin azalmasına yol açabileceği için uygun yüklenmenin sürdürülmesi

önerilmektedir (Chimenti vd., 2024; Malliaras vd., 2013; Vos vd., 2021).

Yük Yönetiminde Temel İlkeler

Yük yönetiminde öncelikle tendonun maruz kaldığı toplam yük ve bireyin bu yükü tolere etme kapasitesi değerlendirilmelidir. Günlük adım sayısı, merdiven kullanımı, ayakta kalma süresi, iş koşulları ve yapılan sportif aktiviteler toplam mekanik yükü etkileyebilir. Bu nedenle yalnızca egzersiz seanslarına uygulanan yük değil, gün boyunca gerçekleştirilen aktiviteler de dikkate alınmalıdır.

Semptomları artıran durumlarda yükün azaltılması veya aktivitenin yeniden düzenlenmesi gerekebilir. Bununla birlikte, amaç ağrıyı agrave eden aktiviteleri kısıtlamak değil, tolere edilebilir bir yük düzeyini korumaktır. Semptomları artıran aktivitelerin geçici olarak azaltılması veya daha düşük yük oluşturan alternatiflerle değiştirilmesi, fiziksel aktivitenin sürdürülmesine yardımcı olabilir (Vos vd., 2021).

Yükün artırılmasında bireyin semptomlarının seyri, egzersize verdiği yanıtlar ve fonksiyonel kapasitesi göz önünde bulundurulmalıdır. Aktivite sırasında ortaya çıkan ağrı ve sonraki günlerde deneyimlenen ağrının şiddeti, yükün yeniden düzenlenmesine ilişkin klinik bilgiler sunmaktadır. Bununla birlikte, sadece ağrı düzeyine göre değil, bireyin hedefleriyle birlikte de değerlendirilmelidir. Rotator manşet tendinopatisine ilişkin güncel klinik uygulama rehberi de hasta eğitimi, aktivite düzenlemesi ve bireyselleştirilmiş rehabilitasyon yaklaşımını önermektedir (Desmeules vd., 2025).

Sonuç olarak yük yönetiminin temel amacı, tendon üzerindeki yükü sürekli azaltmak değil, semptomları kontrol ederken dokunun yük taşıma kapasitesini geliştirmektir.

Aktivite Düzenlemesi ve Semptom İzlemi

Ağrı, tendinopatilerde yük toleransını izlemek için kullanılan önemli klinik belirteçlerden biridir. Egzersiz sırasında ortaya çıkan ağrı ile beraber aktivite sonrasında ve ertesi gün gözlenen değişimler de mutlaka sorgulanmalıdır. Özellikle sabah ağrısı veya sertliği, yürüme ve merdiven çıkma gibi günlük aktivitelerdeki yakınmaların ağrı şiddetinin puanlanması istendiğinde verilen skor, yüklenmenin birey üzerindeki etkisini anlamamıza yardımcı olabilir. Bununla birlikte, ağrının varlığı tek başına tendon dokusunda değişiklik olduğunu veya hasar meydana geldiğini göstermez (Chimenti vd., 2024). İzlem sırasında semptomlarda kalıcı artış veya fonksiyonda belirgin kötüleşme görülmesi, uygulanan yükün ve egzersiz/aktivite programının yeniden değerlendirilmesini gerektirebilir. Bu süreçte bireyin semptomlarını takip etmesi ve yüklenme ile toparlanma arasındaki dengeyi anlaması da önem arz etmektedir (Edgar vd., 2022).

Yük Toleransı ve Toparlanma Süreci

Yük toleransı, tendonun günlük yaşam ve sportif aktiviteler sırasında maruz kaldığı mekanik yükleri semptomlarda kabul edilemez bir artış veya fonksiyon kaybı olmaksızın karşılayabilme kapasitesi olarak düşünülebilir. Bu kapasite, tendonun yapısal özelliklerinin yanı sıra kas kuvveti, fiziksel aktivite düzeyi ve bireysel özelliklerden etkilenir. Tendinopati rehabilitasyonunda amaç, yalnızca ağrıyı azaltmak değil, aktivitelere katılımı da artırmaktır (Chimenti vd., 2024; Vos vd., 2021).

Tendonun mekanik yüklere adaptasyonu, hücresel yanıtları ve ekstraselüler matriksin yeniden yapılanmasını içeren biyolojik bir süreçtir. Tendonun temel yapı bileşeni olan Tip 1 kolajenin sentezi, organizasyonu ve yıkımı arasındaki denge, dokunun mekanik özelliklerinin korunmasında ve yeniden yapılanmasında önemli rol oynamaktadır (Bohm vd., 2015). Yeni sentezlenen kolajenin

olgunlaşması ve düzenli yapıya dönüşmesi zaman gerektirdiğinden, toparlanma süresi de dikkate alınmalıdır.

Egzersiz ve günlük aktivitelerden sonra semptomların seyrinin izlenmesi, mevcut yükün birey tarafından nasıl tolere edildiğini değerlendirmeye yardımcı olabilir. Bununla birlikte, ağrı düzeyi tek başına tendonun yük toleransını veya doku iyileşmesini gösteren kesin bir ölçüt değildir. Bu nedenle semptomlar, kas kuvveti, fonksiyonel kapasite, aktiviteye katılım ve egzersiz performansıyla birlikte yorumlanmalıdır. Semptomlarda ciddi artış olduğunda yük ve toparlanma süreci tekrar gözden geçirilmelidir. Buna karşılık, semptomların ve fonksiyonun kabul edilebilir düzeyde seyretmesi, yükün bireyin kapasitesine uygun biçimde ilerletilmesine olanak sağlayabilir (Chimenti vd., 2024; Magnusson vd., 2010b; Vos vd., 2021).

Sonuç olarak tendon rehabilitasyonunda yüklenmenin şiddeti ve sıklığı bireyin mevcut kapasitesine ve egzersize verdiği yanıta göre düzenlenmelidir (Chimenti vd., 2024). Yükün kademeli olarak artırılması ve yeterli toparlanma fırsatının sağlanması, tendonun mekanik kapasitesinin geliştirilmesini amaçlayan rehabilitasyon sürecinin temel bileşenleridir.

Tendinopatilerde Egzersiz Yaklaşımları

Egzersiz tedavisi, tendinopatilerin konservatif yönetiminde uygulanan temel yaklaşımlardan biridir. Egzersizin temel amaçları ağrının azaltılması, kas-tendon ünitesinin kuvvet ve yük toleransının geliştirilmesi ve bireyin günlük yaşam aktivitelerine veya sportif performansına yeniden katılımının sağlanmasıdır. Tendonun mekanik yüke uyum sağlayabilmesi için yüklenmenin bireyin mevcut kapasitesine uygun biçimde düzenlenmesi ve zamanla yükün artırılması gerekmektedir. Bu amaçla izometrik, izotonik ve yavaş direnç egzersizleri gibi farklı yüklenme çeşitleri kullanılmaktadır.

Egzersiz türleri kas kasılmasının özelliklerine, uygulanan direnç, yüklenme süresine ve hareketin hızına bağlı olarak birbirinden ayrılır. Bununla birlikte, bir egzersiz programının etkisi egzersizin hacmine, sıklığına, ilerleme biçimine ve bireyin uyumuna bağlı değişkenlik gösterir. Tendinopatiler farklı anatomik bölgelerde veya farklı klinik semptomlarla ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle tek bir egzersiz protokolü bulunmamaktadır. Nitekim direnç egzersizlerinin bileşenlerini inceleyen bir sistematik derlemede, farklı bileşenler ile sonuçlar arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiş; ancak tüm tendinopatiler için geçerli bir optimal doz belirlenememiştir (Pavlova vd., 2023).

İzometrik Egzersizler

İzometrik egzersizler, kasın boyunda herhangi bir değişiklik meydana gelmeden kuvvet ürettiği kasılma biçimleridir. Bu egzersizlerde kas-tendon ünitesi yük altında tutulurken eklemin belirli bir pozisyonda tutulması istenir. İzometrik egzersizler, özellikle hareketin ağrıyı artırdığı veya dinamik egzersizin tolere edilemediği tedavinin ilk dönemlerinde rehabilitasyon programına dahil edilebilir.

Tendinopatilerde izometrik egzersiz kullanımında, egzersizlerin kısa süreli ağrı azalması sağlayabileceğini bildiren çalışmalarla artış görülmüştür. Rio ve arkadaşları, patellar tendinopatisi olan altı voleybolcu üzerinde tek bir izometrik egzersiz uygulamış ve ağrıda belirgin azalma bildirilmiştir (Rio vd., 2015). İzometrik egzersizleri diğer yaklaşımlarla kıyaslayan sistematik derleme ve meta-analiz çalışmasında bu yöntemin izotonik egzersizlere göre ağrı ve fonksiyon açısından üstün olduğunu gösteren güçlü kanıtlar bulunmadığı gösterilmiştir (Clifford vd., 2020).

İzometrik egzersizlerde uygun direnç ve tutuş süresi bireyin semptomlarına ve yük toleransına göre düzenlenebilir. Örneğin,

patellar tendinopatide diz ekstansör kaslarının (Theodorou vd., 2023), Aşil tendinopatisinde ise ayak bileği plantar fleksörlerinin izometrik kontraksiyonlarından faydalanılabilir (Silbernagel vd., 2020). Ancak egzersiz sırasında ağrının azalması beklenen veya zorunlu bir yanıt olarak değerlendirilmemelidir. Bazı bireylerde izometrik yüklenme ağrıyı azaltabilirken, bazılarında belirgin bir değişiklik oluşturmayabilir ya da semptomları artırabilir. Bu değişiklik göz önünde bulundurularak rehabilitasyon süreci yönetilmelidir.

Sonuç olarak, izometrik egzersizler bütün tendinopatiler için tek başına veya diğer egzersiz türlerinden üstün bir tedavi olarak değil, uygun bireylerde kullanılabilecek bir egzersiz seçeneği olarak görülmelidir. Uzun dönem rehabilitasyonda hedef yalnızca ağrıyı kontrol etmek değil, tendonun daha yüksek yüklere tolere edebilmesini sağlamaktır.

İzotonik Egzersizler

İzotonik egzersizler, kas kuvvetinin üretildiği sırada kas boyunun değiştiği dinamik kasılmaları içermektedir. Bu egzersizler kasın boyunun kısaldığı konsantrik veya kasın boyunun uzadığı eksantrik egzersizler olabilir. Tendinopati rehabilitasyonunda bu egzersizlerin kombinasyonu kullanılabilir.

Konsantrik egzersizler sırasında kasın boyu kısalırken kuvvet üretilir. Örneğin, Aşil tendinopatisinde topuk yükseltme egzersizi sırasında yukarı çıkarken gastro-soleus kas grubu konsantrik kasılır. Eksantrik egzersizler sırasında ise kasın boyu uzarken kuvvet üretilir. Aynı harekette topuk aşağıya doğru indirilirken aynı kas grubu eksantrik kasılır. Bu tür egzersizler, tendonun tekrarlı yüklenmelere adaptasyonunu ve kas-tendon ünitesinin yük kapasitesinin geliştirilmesini amaçlamaktadır (Charles vd., 2023).

Eksantrik egzersizlerin tendinopati rehabilitasyonunda kullanımı oldukça araştırılan bir konu olmuştur. Özellikle Aşil tendinopatisi üzerine yoğunlaşan araştırmalar bulunmaktadır. 2023 yılında yapılan bir sistematik derleme ve meta-analizde orta bölüm Aşil tendinopatisi olan bireylerde eksantrik egzersizlerin ağrıyı azaltmada etkili olduğu bildirilmiştir (Yuan vd., 2026). 2024 yılında güncellenen orta bölüm Aşil tendinopatisi klinik uygulama rehberi, tedavide yalnızca eksantrik kasılmalara odaklanmak yerine; eksantrik, konsantrik, izometrik ve gerektiğinde pliometrik egzersizleri içerebilen, bireyin ağrı toleransı ve fonksiyonel kapasitesine göre ilerletilen bir tendon yükleme programını önermektedir. Bu yaklaşım, eksantrik egzersizlerin etkili bir seçenek olduğunu, ancak tek başına zorunlu veya bütün bireylerde üstün bir yöntem olarak değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir (Chimenti vd., 2024).

Klinik uygulamada eksantrik egzersizler, bireyin semptomları, mevcut kas kuvveti ve yük toleransı birlikte değerlendirilerek ele alınmalıdır. Egzersiz, başlangıçta vücut ağırlığıyla veya düşük dirençle uygulanabilir. Tolerans geliştikçe egzersizin zorluk düzeyi progresif olarak artırılabilir (Pavlova vd., 2023). Bununla birlikte, orta bölüm ve insersiyonel Aşil tendinopatisi arasında klinik farklılıklar bulunduğundan, egzersizin hareket açıklığı ve yüklenme biçimi tutulum bölgesine göre uyarlanmalıdır. Örneğin, insersiyonel Aşil tendinopatisinde, başlangıçta topuğun basamak seviyesinden indirilmesi tendondaki kompresif yükü artırabileceğinden hareket açıklığını sınırlandırmak gerekebilir. Eksantrik egzersizler patellar tendinopatide de önemli bir bileşendir. Bu egzersizler arasında en bilineni diz ekstansör kaslarına yönelik eğimli yüzeyde tek bacak çömelme egzersizidir. Egzersizin klinik etkileri sadece egzersizin türüne bağlı değil; egzersizin şiddeti, sıklığı, hareketin kontrolü ve yükün nasıl artırıldığına bağlı olarak değişebilmektedir. Patellar tendinopatiye

ilişkin yapılan bir sistematik derleme ve ağ meta-analizi, eksantrik yüklenmenin klinik yönetimde kullanılmasını desteklemekle birlikte, diğer egzersiz yöntemlerinin karşılaştırmalı etkinliğine ilişkin kanıtların sınırlı olduğunu ortaya koymuştur (Challoumas vd., 2021).

Rehabilitasyonun ilerleyen aşamalarında, bireyin günlük yaşam ve spor faaliyetlerine uygun, daha yüksek hız ve enerji depolama kapasitesi gerektiren aktivitelere de yer verilmelidir. Sonuç olarak, güncel kanıtlar eksantrik egzersizlerin diğer egzersizlerden üstünlüğünü ortaya koymamaktadır. Bu nedenle egzersizin türünden ziyade bireyin egzersize uyumu, uygun yükün belirlenmesi, semptomların izlenmesi ve egzersiz programının aşamalı ilerletilmesine odaklanılmalıdır.

Ağır ve Yavaş Direnç Egzersizleri

Ağır ve yavaş direnç egzersizleri, kasların yüksek direnç altında, kontrollü ve yavaş hareketlerle yüklenmesini esas almaktadır. Bu yaklaşımda konsantrik ve eksantrik fazlar genellikle aynı egzersiz içinde kullanılır. Yük, tekrar sayısı, hareket hızı ve set sayısı bireyin fonksiyonel kapasitesine göre bireyselleştirilmelidir.

Ağır ve yavaş direnç egzersizleri, özellikle patellar ve Aşil tendinopatilerinde araştırılan bir konudur. Patellar tendinopatili bireylerde gerçekleştirilen randomize kontrollü bir çalışmada 12 haftalık ağır yavaş direnç egzersiz programı ile eksantrik egzersizler karşılaştırılmıştır. Her iki yaklaşımda da ağrı ve fonksiyon açısından iyileşme görülmüş; kazanımlar takip döneminde de korunmuştur (Kongsgaard vd., 2009). Aşil tendinopatili bireylerde yapılan randomize kontrollü bir çalışmada 12 hafta boyunca eksantrik egzersiz veya ağır yavaş direnç egzersizi uygulanmıştır. Her iki grupta ağrı ve fonksiyonda anlamlı iyileşmeler bulunmuş olup gruplar arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır (Beyer vd., 2015). Bu bulgular, ağır ve yavaş dirençli egzersizlerin eksantrik

egzersizlere üstün olmadığını, her iki yöntemin de uygun koşullarda uygulandığında etkili olabileceğini göstermektedir. 2026 yılında yayımlanan bir derleme, eksantrik ve ağır-yavaş direnç egzersizlerinin tendon morfolojisi, mekanik özellikleri ve klinik sonuçlar üzerindeki etkilerine ilişkin kanıtları incelemiştir (Manieu Seguel vd., 2026). Bu literatür, iki egzersiz modalitesinin de Aşil ve patellar tendinopatisi olan bireyler için faydalı olduğunu göstermektedir. Tendonun sertliği ve Young modülü gibi mekanik özellikleri açısından eksantrik egzersizlerden daha çok fayda görüldüğü, kas kesit alanı ve neovaskülarizasyon gibi morfolojik özellikler açısından ise ağır-yavaş direnç egzersizlerinden daha fayda görülebileceği bildirilmiştir. Tendon açısından ise, Aşil tendonunun her iki yöntemden fayda gördüğü; patellar tendonun ise ağır-yavaş direnç egzersizinden sonra morfolojik, klinik ve fonksiyonel açıdan daha fazla yarar gördüğü bulunmuştur.

Klinikte ağır ve yavaş direnç egzersizi uygulanırken başlangıç direnci, set ve tekrar sayısı, hareket hızı, seans sıklığı bireysel olarak belirlenmelidir. Başlangıçta daha düşük dirençle ve kontrollü hareketle çalıştırılabilir, bireyin kapasitesi ve egzersiz sırasındaki ve sonrasındaki semptomları göz önünde bulundurularak yük aşamalı olarak artırılabilir. Egzersiz türünün ağır dirençli olması, başlangıçtan itibaren ağır yüklenme yapılacağı anlamına gelmemelidir. Düşük yük toleransı bulunan bireylerde, egzersiz yükü uygun düzeyden başlatılmalıdır. Sonuç olarak, ağır ve yavaş direnç egzersizi, özellikle Aşil ve patellar tendinopatilerde ağrı ve fonksiyonun iyileştirilmesini destekleyen bir seçenektir. Eksantrik egzersize göre üstünlüğü kesin olarak gösterilmemiştir.

Egzersiz Yaklaşımlarının Karşılaştırılması ve Klinik Kullanımı

Tendinopati rehabilitasyonunda uygulanan egzersiz yaklaşımlarının uygulanabilirliği bireyin özelliklerine, tendonun bulunduğu anatomik bölgeye ve fonksiyonel hedeflere göre

değişebilir. İzometrik egzersizler, dinamik yükü tolere edemeyen bireylerde ve uygun bireylerde rehabilitasyonun başlangıç döneminde kullanılabilir. Konsantrik ve eksantrik kontraksiyonları içeren izotonik egzersizler, kuvveti geliştirmeyi ve tendonun yüklenme kapasitesini artırmayı hedefler (O'Neill vd., 2015). Ağır ve yavaş direnç egzersizleri ise yeterli yük toleransı olan bireylerde direnç düzeyinin progresif olarak artırılmasına katkıda bulunur. Rehabilitasyonun ilerleyen aşamalarında daha hızlı hareketler, sıçrama veya koşu gibi enerji depolama ve geri salma aktiviteleri de programa dahil edilebilir. Egzersiz seçimi yapılırken ağrının egzersiz sırasında ve sonrasında nasıl değiştiği, ertesi günkü semptomlar, bireyin kas kuvveti, fonksiyonel kapasitesi ve bireyin günlük yaşam aktivitelerine veya sportif faaliyetlere katılımı birlikte değerlendirilmelidir. Egzersizlerin sürdürülebilirliği ve bireyin programa uyumu tedavinin başarısını etkilemektedir. Tedavinin başarısını egzersiz türünün tek başına belirlemediği göz önünde bulundurulduğunda, belirli egzersiz türünü tüm hastalar için standartlaştırmak yerine bireysel yanıtlar izlenerek progresif yüklenen bir program oluşturulmalıdır (Pavlova vd., 2023).

Egzersiz Dozunun Belirlenmesi ve Yükün Progresyonu

Egzersiz dozu, temel olarak yoğunluk, hacim ve sıklık bileşenlerinden oluşmaktadır. Yoğunluk, egzersiz sırasında uygulanan direncin düzeyini; hacim, gerçekleştirilen set ve tekrar sayısını; sıklık ise egzersiz seanslarının belirli zaman diliminde kaç kez uygulandığını gösterir. Hareket hızı, kontraksiyon süresi, dinlenme aralıkları ve programın toplam süresi de egzersiz reçetesinin önemli bileşenleri arasındadır (Wasfy & Baggish, 2016).

Pavlova ve arkadaşlarının beş farklı anatomik bölgedeki tendinopatileri inceledikleri sistematik derleme ve meta-analizinde, dış direnç kullanılan daha yüksek yoğunluklu egzersiz programları ile günlük uygulamadan daha düşük sıklıkta gerçekleştirilen

programlar lehine bulgular elde edilmiştir. Buna karşılık, egzersiz hacmi ile tedavi sonuçları arasında anlamlı ilişki bulunmamıştır. Bulgular, farklı çalışmaların sonuçlarından elde edilen genel eğilimleri yansıtmaktadır ve egzersiz dozunun bireye özgü belirlenmesi gerektiğini göstermektedir (Pavlova vd., 2023).

Egzersiz Dozunun Temel Bileşenleri

Egzersiz yoğunluğu, hacmi ve sıklığı birbirleriyle ilişkili bileşenlerdir. Örneğin, direnç artırıldığında aynı tekrar sayısının sürdürülmesi daha zor hale gelebilir; egzersiz sıklığı artırıldığında ise toparlanma için gereken süre azalabilir. Bu yüzden egzersiz bileşenleri birlikte değerlendirilmelidir (Wasfy & Baggish, 2016).

Egzersiz yoğunluğu, kullanılan eksternal direnç veya vücut ağırlığıyla oluşturulan yük üzerinden hesaplanabilir. Başlangıçta bireyin zorlanmadığı, tolere edebildiği bir yük seçilir ve hareket kaliteli bir şekilde gerçekleştirilir. Kuvvet geliştikçe elastik bant veya ağırlık kullanılarak direnç artırılabilir (Wasfy & Baggish, 2016).

Egzersiz hacmi, set ve tekrar sayısı ile bunların toplamını ifade eder. Daha fazla set veya tekrar sayısı daha fazla iyileşme anlamına gelmez. Gereğinden fazla egzersiz hacmi, toparlanmayı geciktirebilir ve egzersize olan uyumu azaltabilir. Bu nedenle hacim, kullanılan dirence, hareketin niteliğine ve bireyin toleransına göre belirlenmelidir (Wasfy & Baggish, 2016).

Egzersiz sıklığı, yüklenme ile toparlanma arasındaki dengeyi etkileyen temel unsurlardan biridir. Tendonun mekanik yüke adaptasyon sağlaması için egzersizin düzenli olması önemlidir; ancak yüklenme sonrası yeterli toparlanma süresi bırakılması gerekmektedir. Yapılan bir çalışmada, direnç egzersizlerinin her gün veya günde birkaç kez uygulanmasının, daha seyrek uygulanan programlara göre tutarlı bir üstünlük sağlamadığı bulunmuştur. Dolayısıyla egzersiz sıklığı, bireyin toparlanma durumuna ve

egzersiz yoğunluğuna göre belirlenmelidir. Toparlanma, yüklenme kadar önemli bir bileşendir. Egzersiz planlanırken yalnızca rehabilitasyon seansları sırasında değil, günlük yaşamda iş sırasında ayakta kalma, yürüme, merdiven çıkma ve sportif aktiviteler gibi diğer yüklenmeler de göz önünde bulundurulmalıdır (Wasfy & Baggish, 2016). Örneğin, gün içinde yoğun fiziksel aktivitede bulunan bir bireyin toplam tendon yükü, yalnızca egzersiz programında uygulanan dirençle açıklanamaz. 2023 yılında yapılan sistematik derleme ve meta-analizde tendinopati durumunda direnç egzersizlerinin daha seyrek uygulanmasının bazı sonuçlar açısından daha olumlu etkiler yarattığı gösterilmiştir (Pavlova vd., 2023). Bunun olası açıklamalarından biri tendona yeterli toparlanma süresi tanımak olabilir. Sonuç olarak, tendinopati rehabilitasyonu egzersiz dozunun belirlenmesini ve yükün ilerletilmesini, başlangıç kapasitesinin değerlendirilmesini, egzersiz bileşenleri arasındaki dengenin kurulmasını ve klinik yanıtların düzenli izlenmesini gerektirir.

Farklı Tendinopatilerde Yük Yönetimi ve Egzersiz Uygulamaları

Tendinopatilerde yük yönetimi ve egzersiz ilkeleri benzer olsa da tendonun anatomik konumu, maruz kaldığı mekanik yükler ve bireyin fonksiyonel kapasitesi tedavi programının kapsamını etkilemektedir.

Aşil tendinopatisinde kalf kaslarının kuvvetlendirilmesi ve tendonun yük taşıma kapasitesinin artırılması temel hedeflerdendir. Kılavuzlarda eksantrik ve ağır ve yavaş direnç egzersizleri de dahil olmak üzere progresif tendon yükleme programları önerilmektedir. Ancak orta bölüm ve insersiyonel yapışma bölgesi tutulumlarında yükleme biçimi farklılaşmaktadır: insersiyonel tutulumda erken dönemde ayak bileğinin aşırı dorsifleksiyona gittiği hareketlerden kaçınmak gerekebilir (Chimenti vd., 2024).

Patellar tendinopatide diz ekstansör mekanizmasının kuvvetlendirilmesi ve sıçrama, koşma gibi tendonda yüksek yük oluşturan aktivitelerin toleransının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. İzometrik, izotonik ve ağır-yavaş direnç egzersizleri bireyin durumuna göre kullanılabilir. Bir sistematik derlemede eksantrik egzersizlerin birinci basamakta tercih edilen yaklaşım türü olduğu gösterilmiştir. İzotonik egzersizlerden biri olan konsantrik egzersizin tek başına kullanımı önerilmemektedir. Ayrıca, ağrının azaltılması hedeflendiği aşamada izometrik egzersizin izotonik egzersizler kadar etkili olduğu gösterilmiştir. Aynı çalışmada sınırlı kanıtlar ağır-yavaş direnç egzersizlerinin eksantrik egzersiz yerine kullanılabileceğini göstermektedir (Challoumas vd., 2021). Rehabilitasyonun ilerleyen aşamalarında, spora dönüş hedefleniyorsa yön değiştirme ve sıçrama gibi enerjiyi depolama ve geri kullanma gerektiren aktivitelere aşamalı geçiş yapılması önerilmektedir.

Gluteal tendinopatide özellikle kalça abdüktör kaslarının kuvvetlendirilmesi ve tendon üzerindeki kompresif yüklerin düzenlenmesi önem arz etmektedir. Kalçanın adduksiyonda uzun süre tutulması, etkilenen taraf üzerine yan yatılması ve bacak bacak üstüne atarak oturma, adduksiyon germeleri ve ayaktayken tek ayak üzerine yüklenme gibi tendonun kompresif yüklerini artıran durumlar bireyin semptomlarını artırabilir. Bu nedenle hasta eğitimi, günlük yaşam aktivite düzenlemesi ve progresif kuvvetlendirme programı birlikte ele alınmalıdır. Antaljik yürüyüşte ağrı yönetimi için geçici baston veya koltuk değneği kullanılabilir. Egzersiz programında kalça abdüktörlerinin izometrik kuvvetlendirme egzersizleri, köprü kurma, tek bacak veya çift bacak çömelme gibi fonksiyonel yükleme egzersizleri, frontal düzleme yönelik bantla yana adım atma kullanılabilir. Tedavi programı sonrası 24 saatlik yanıtlar izlenmeli, gece veya ertesi sabah ağrı şiddetli bir şekilde artıyorsa, yükler tekrar ayarlanmalıdır. Koşu ve pliometrik gibi

tendonun germe-kısalma döngülerini içeren hızlı aktiviteler semptomları artırabilir. Gerekirse bu tür aktiviteler durdurulmalı veya sınırlandırılmalıdır. Bu tür aktivitelerin yanı sıra klam egzersizinden, iliotibial bandın ve adduksiyon germelerinden kaçınılması önerilmektedir (Grimaldi vd., 2025).

Rotator manşet tendinopatisinde omuz çevresi kaslarının kuvveti ve hareket kontrolü geliştirilirken bireyin tolere edebildiği düzeyde yüklenme sağlanmalıdır. Güncel kılavuzlar, ilk tedavi seçeneği olarak aktif egzersiz programını önermektedir. Tendonu farklı dirençlere maruz bırakarak tendonun yüklenmeye uyum sağlamasına katkıda bulunulmalıdır. Ayrıca, motor kontrol egzersizlerinin standart programlara kıyasla daha etkili olabileceği belirtilmiştir. Herhangi bir egzersiz tipinin diğerine göre üstünlüğü kanıtlanamamıştır. Direncin miktarı için de aynı belirsizlik söz konusudur. İkinci en güçlü kanıt, manuel terapi yönündedir. Üst ekstremiteye yönelik yumuşak doku mobilizasyonu ve manipülasyonu kapsayan manuel terapi yaklaşımları tek başına veya egzersizle birlikte kullanıldığında kısa vadede ağrıyı azaltmak için etkili gibi görünmektedir. Kanıtlar çelişkili olsa da aktif rehabilitasyona ek olarak bantlama da kısa vadede ağrı yönetimi için kullanılabilir. Egzersiz seanslarının dışında aktivite ve iş ile ilgili düzenlemelerin yapılması da önerilmektedir (Desmeules vd., 2025). Kolun baş üzeri hareketleri başlangıçta semptomları artırıyorsa, hareket açıklığı sınırlandırılabilir ve direnç düzenlemesi yapılabilir. İlerleyen aşamalarda günlük yaşam ve iş gereksinimlerine uygun omuz kuvveti ve fonksiyonel kapasitenin geliştirilmesi hedeflenir

Lateral dirsek tendinopatisinde (tenisçi dirseği) el bileği ekstansörlerinin, özellikle el bileği ekstansiyonu sırasında yük taşıyan kas ve tendon yapılarının kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Dirençli kavrama, kaldırma ve tekrarlı el bileği hareketleri başlangıçta sınırlandırılabilir; daha sonra bu aktiviteler kademeli ve kontrollü şekilde yeniden programa dahil edilebilir. Güncel

kılavuzlarda subakut veya kronik lateral dirsek tendinopatisi olan bireylerde dirsek ekstansörlerine yönelik izometrik, eksantrik ve konsantrik dirençli egzersizlerin kullanımı orta düzeyde önerilmektedir. Bu egzersizler, manuel terapi ile kombine edilerek kullanılabilir. Ağrıyı azaltmak ve ağrısız kavrama kuvvetini artırmak için manuel terapi kapsamında el bileği eklem mobilizasyonu ve manipülasyonu orta düzey kanıtlarla desteklenmektedir. Ağrı ve fonksiyonu iyileştirmek için yumuşak doku mobilizasyonu uygulaması önerilse de düşük kanıt düzeyine sahiptir. Akut ağrıyı iyileştirmek için rijit bantlama tekniklerinin kullanımı orta kanıt düzeyine sahiptir. Kinezyobant kullanımı, kısa dönem ağrı ve kas fonksiyonu yönetiminde düşük kanıt düzeyine sahiptir (Lucado vd., 2022).

Sonuç olarak, tendinopatilerde egzersiz ve yük yönetiminin temel ilkeleri ortak olmakla birlikte, uygulama etkilenen tendonun anatomik ve mekanik özelliklerine göre uyarlanmalıdır.

Sonuç

Tendinopati rehabilitasyonunda yük yönetimi ve egzersiz tedavisi, ağrının azaltılması, fonksiyonel kapasitenin iyileştirilmesi ve günlük yaşam ya da sportif aktivitelere geri dönüşün desteklenmesi açısından temel yaklaşımlardır. Güncel kanıtlar, izometrik, eksantrik, konsantrik ve ağır-yavaş direnç egzersizlerinin uygun koşullarda uygun bireylere uygulanabileceğini; ancak herhangi bir egzersiz türünün bütün tendinopatilerde diğerlerinden üstün olduğunu gösteren yeterli kanıt bulunmadığını ortaya koymaktadır.

Klinik uygulamada egzersiz programı, tendonun anatomik özellikleri, bireyin semptomları, mevcut kas kuvveti ve yük toleransı ile gereksinimleri dikkate alınarak bireyselleştirilmelidir. Egzersizin bileşenleri bireyin başlangıç kapasitesine uygun şekilde belirlenmeli, yük zaman içerisinde kademeli olarak artırılmalıdır. Bu

süreçte egzersiz sonrası belirtiler iyi gözlenmeli, gerektiğinde egzersiz dozu yeniden düzenlenmelidir. Sonuç olarak tendinopati rehabilitasyonunda başarılı bir yaklaşım; uygun egzersiz seçimi, bireyselleştirilmiş yük yönetimi, kademeli ilerleme ve düzenli klinik değerlendirmeyi bir araya getirmelidir.

Kaynakça

Beyer, R., Kongsgaard, M., Hougs Kjær, B., Øhlenschlæger, T., Kjær, M., & Magnusson, S. P. (2015). Heavy Slow Resistance Versus Eccentric Training as Treatment for Achilles Tendinopathy: A Randomized Controlled Trial. *The American Journal of Sports Medicine*, *43*(7), 1704-1711. https://doi.org/10.1177/0363546515584760

Bohm, S., Mersmann, F., & Arampatzis, A. (2015). Human tendon adaptation in response to mechanical loading: A systematic review and meta-analysis of exercise intervention studies on healthy adults. *Sports Medicine - Open*, *1*(1), 7. https://doi.org/10.1186/s40798-015-0009-9

Challoumas, D., Pedret, C., Biddle, M., Ng, N. Y. B., Kirwan, P., Cooper, B., Nicholas, P., Wilson, S., Clifford, C., & Millar, N. L. (2021). Management of patellar tendinopathy: A systematic review and network meta-analysis of randomised studies. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, *7*(4), e001110. https://doi.org/10.1136/bmjsem-2021-001110

Charles, R., Fang, L., Zhu, R., & Wang, J. (2023). The effectiveness of shockwave therapy on patellar tendinopathy, Achilles tendinopathy, and plantar fasciitis: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Immunology*, *14*, 1193835. https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1193835

Chimenti, R. L., Neville, C., Houck, J., Cuddeford, T., Carreira, D., & Martin, R. L. (2024). Achilles Pain, Stiffness, and Muscle Power Deficits: Midportion Achilles Tendinopathy Revision – 2024: Clinical Practice Guidelines Linked to the International Classification of Functioning, Disability, and Health from the Academy of Orthopaedic Physical Therapy of the American Physical Therapy Association. *Journal of*

Orthopaedic & Sports Physical Therapy, *54*(12), CPG1-CPG32. https://doi.org/10.2519/jospt.2024.0302

Clifford, C., Challoumas, D., Paul, L., Syme, G., & Millar, N. L. (2020). Effectiveness of isometric exercise in the management of tendinopathy: A systematic review and meta-analysis of randomised trials. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, *6*(1). https://doi.org/10.1136/bmjsem-2020-000760

Cook, J. L., & Purdam, C. R. (2009). Is tendon pathology a continuum? A pathology model to explain the clinical presentation of load-induced tendinopathy. *British Journal of Sports Medicine*, *43*(6), 409-416. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.051193

Cook, J. L., Rio, E., Purdam, C. R., & Docking, S. I. (2016). Revisiting the continuum model of tendon pathology: What is its merit in clinical practice and research? *British Journal of Sports Medicine*, *50*(19), 1187-1191. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095422

Desmeules, F., Roy, J.-S., Lafrance, S., Charron, M., Dubé, M.-O., Dupuis, F., Beneciuk, J. M., Grimes, J., Kim, H. M., Lamontagne, M., McCreesh, K., Shanley, E., Vukobrat, T., & Michener, L. A. (2025). Rotator Cuff Tendinopathy Diagnosis, Nonsurgical Medical Care, and Rehabilitation: A Clinical Practice Guideline. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *55*(4), 235-274. https://doi.org/10.2519/jospt.2025.13182

Doral, M. N., Alam, M., Bozkurt, M., Turhan, E., Atay, O. A., Dönmez, G., & Maffulli, N. (2010). Functional anatomy of the Achilles tendon. *Knee Surgery, Sports Traumatology,*

Arthroscopy, *18*(5), 638-643. https://doi.org/10.1007/s00167-010-1083-7

Edgar, N., Clifford, C., O'Neill, S., Pedret, C., Kirwan, P., & Millar, N. L. (2022). Biopsychosocial approach to tendinopathy. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, *8*(3). https://doi.org/10.1136/bmjsem-2022-001326

Grimaldi, A., & Fearon, A. (2015). Gluteal Tendinopathy: Integrating Pathomechanics and Clinical Features in Its Management. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *45*(11), 910-922. https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5829

Grimaldi, A., Ganderton, C., & Nasser, A. (2025). Gluteal tendinopathy masterclass: Refuting the myths and engaging with the evidence. *Musculoskeletal Science & Practice*, *76*. https://doi.org/10.1016/j.msksp.2025.103253

Kannus, P. (2000). Structure of the tendon connective tissue. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *10*(6), 312-320. https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2000.010006312.x

Kongsgaard, M., Kovanen, V., Aagaard, P., Doessing, S., Hansen, P., Laursen, A. H., Kaldau, N. C., Kjaer, M., & Magnusson, S. P. (2009). Corticosteroid injections, eccentric decline squat training and heavy slow resistance training in patellar tendinopathy. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *19*(6), 790-802. https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00949.x

Lazarczuk, S. L., Maniar, N., Opar, D. A., Duhig, S. J., Shield, A., Barrett, R. S., & Bourne, M. N. (2022). Mechanical, Material and Morphological Adaptations of Healthy Lower Limb Tendons to Mechanical Loading: A Systematic Review and

Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.z.)*, *52*(10), 2405-2429. https://doi.org/10.1007/s40279-022-01695-y

Lucado, A. M., Day, J. M., Vincent, J. I., MacDermid, J. C., Fedorczyk, J., Grewal, R., & Martin, R. L. (2022). Lateral Elbow Pain and Muscle Function Impairments. *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, *52*(12), CPG1-CPG111. https://doi.org/10.2519/jospt.2022.0302

Magnusson, S. P., Langberg, H., & Kjaer, M. (2010a). The pathogenesis of tendinopathy: Balancing the response to loading. *Nature Reviews. Rheumatology*, *6*(5), 262-268. https://doi.org/10.1038/nrrheum.2010.43

Magnusson, S. P., Langberg, H., & Kjaer, M. (2010b). The pathogenesis of tendinopathy: Balancing the response to loading. *Nature Reviews Rheumatology*, *6*(5), 262-268.

Malliaras, P., Barton, C. J., Reeves, N. D., & Langberg, H. (2013). Achilles and patellar tendinopathy loading programmes: A systematic review comparing clinical outcomes and identifying potential mechanisms for effectiveness. *Sports Medicine*, *43*(4), 267-286. https://doi.org/10.1007/s40279-013-0019-z

Manieu Seguel, J., Paternoster, F. K., Schappacher-Tilp, G., Konrad, A., & Tilp, M. (2026). Tendon morphological and mechanical responses to eccentric and heavy-slow resistance training in Achilles and patellar tendinopathy: A scoping review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. https://doi.org/10.1186/s13102-026-02023-x

Nakamichi, R., & Asahara, H. (2024). The role of mechanotransduction in tendon. *Journal of Bone and Mineral Research: The Official Journal of the American*

Society for Bone and Mineral Research, *39*(7), 814-820. https://doi.org/10.1093/jbmr/zjae074

O'Neill, S., Watson, P. J., & Barry, S. (2015). WHY ARE ECCENTRIC EXERCISES EFFECTIVE FOR ACHILLES TENDINOPATHY? *International Journal of Sports Physical Therapy*, *10*(4), 552-562.

Pavlova, A. V., Shim, J. S. C., Moss, R., Maclean, C., Brandie, D., Mitchell, L., Greig, L., Parkinson, E., Alexander, L., Tzortziou Brown, V., Morrissey, D., Cooper, K., & Swinton, P. A. (2023). Effect of resistance exercise dose components for tendinopathy management: A systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *57*(20), 1327-1334. https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-105754

Rees, S. G., Dent, C. M., & Caterson, B. (2009). Metabolism of proteoglycans in tendon. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *19*(4), 470-478. https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00938.x

Riley, G. (2005). Chronic tendon pathology: Molecular basis and therapeutic implications. *Expert Reviews in Molecular Medicine*, *7*(5), 1-25. https://doi.org/10.1017/S1462399405008963

Riley, G. (2008). Tendinopathy—From basic science to treatment. *Nature Clinical Practice. Rheumatology*, *4*(2), 82-89. https://doi.org/10.1038/ncprheum0700

Rio, E., Kidgell, D., Purdam, C., Gaida, J., Moseley, G. L., Pearce, A. J., & Cook, J. (2015). Isometric exercise induces analgesia and reduces inhibition in patellar tendinopathy. *British Journal of Sports Medicine*, *49*(19), 1277-1283. https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094386

Silbernagel, K. G., Hanlon, S., & Sprague, A. (2020). Current Clinical Concepts: Conservative Management of Achilles Tendinopathy. *Journal of Athletic Training*, *55*(5), 438-447. https://doi.org/10.4085/1062-6050-356-19

Theodorou, A., Komnos, G., & Hantes, M. (2023). Patellar tendinopathy: An overview of prevalence, risk factors, screening, diagnosis, treatment and prevention. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, *143*(11), 6695-6705. https://doi.org/10.1007/s00402-023-04998-5

Thorpe, C. T., Birch, H. L., Clegg, P. D., & Screen, H. R. C. (2015). Chapter 1 - Tendon Physiology and Mechanical Behavior: Structure–Function Relationships. İçinde M. E. Gomes, R. L. Reis, & M. T. Rodrigues (Ed.), *Tendon Regeneration* (ss. 3-39). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801590-2.00001-6

Vos, R.-J. de, Vlist, A. C. van der, Zwerver, J., Meuffels, D. E., Smithuis, F., Ingen, R. van, Giesen, F. van der, Visser, E., Balemans, A., Pols, M., Veen, N., Ouden, M. den, & Weir, A. (2021). Dutch multidisciplinary guideline on Achilles tendinopathy. *British Journal of Sports Medicine*, *55*(20), 1125-1134. https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-103867

Wasfy, M. M., & Baggish, A. L. (2016). Exercise Dose in Clinical Practice. *Circulation*, *133*(23), 2297-2313. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.116.018093

Yuan, F., Ren, K., Zhao, Z., Wang, P., & Song, L. (2026). The efficacy of eccentric exercise in the treatment of Achilles tendinopathy: A systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, *27*(1), 481. https://doi.org/10.1186/s12891-026-09861-3

BÖLÜM 2
DERİN GLUTEAL SENDROM
KLİNİK DEĞERLENDİRME VE REHABİLİTASYON

Vedat KURT[1], Cihan Caner AKSOY[2]

1. Giriş ve Klinik Önem

Posterior kalça ağrısı; lomber radikülopati, sakroiliak eklem patolojileri, kalça eklemi bozuklukları ve proksimal hamstring sorunları ile klinik olarak örtüşebilen heterojen bir semptom tablosudur. Bu nedenle bel görüntülemesinin semptomları açıklamadığı, uzamış oturmayla ağrının arttığı veya kalça hareketleriyle siyatik-benzeri yakınmaların provoke olduğu olgularda ekstraspinal kaynaklar sistematik biçimde araştırılmalıdır. Derin gluteal sendrom (DGS), bu klinik çerçevede sıklıkla gözden kaçan ancak fizyoterapi açısından önemli bir posterior kalça ağrısı nedenidir (Kizaki vd., 2020; Martin, Palmer, vd., 2014) .

DGS, yalnızca ağrı kontrolü açısından değil; oturma, yürüme, koşma, merdiven çıkma ve spor katılımı üzerindeki etkisi nedeniyle de klinik önem taşır. Semptomların sinir dokusunun mekanosensitivitesi, kalça çevresi kas-tendon yüklenmesi, lumbopelvik kontrol ve günlük mekanik maruziyetler ile ilişkili olması, tedavinin tek bir kasta germe veya yalnızca pasif uygulamalarla sınırlandırılmamasını gerektirir (Hernando vd., 2015; Martin, Palmer, vd., 2014) .

2. Tanım, Terminoloji ve Uygulamalı Biyomekanik Temeller

2.1. Tanım ve Terminoloji

DGS, siyatik sinirin derin gluteal boşluk içinde disk dışı sıkışması veya mekanik irritasyonu ile ilişkili posterior kalça ağrısı ve/veya alt ekstremiteye yayılan semptomları tanımlar(Kizaki vd., 2020) . Bu tanım, DGS'yi yalnızca piriformis kası ile ilişkilendiren geleneksel "piriformis sendromu" yaklaşımından ayırır. Piriformis ilişkili sinir etkilenimi DGS'nin bir alt grubu olabilir; ancak fibrovasküler bantlar, gemelli–obturator internus kompleksi, quadratus femoris, proksimal hamstring orijini, travma veya cerrahi sonrası skar dokusu ve yer kaplayan lezyonlar da siyatik sinirin hareketini veya çevresel basıncını etkileyebilir (Carro vd., 2016; Hernando vd., 2015; Martin, Palmer, vd., 2014) .

DGS tanımının temel bileşenleri, sistematik bir derlemede disk dışı doğa, siyatik sinir bozukluğu ve derin gluteal alanda sinir tuzaklanması olmak üzere üç ana öge üzerinden biçimlendirilmiştir (Kizaki vd., 2020) . Güncel kavramsallaştırmalarda ise DGS'nin sınırları daha da genişletilmiştir; Yoon ve arkadaşları (2025), derin dış rotatörlerin entezopatileri ve kas-tendon kökenli patolojilerin de temel ağrı jeneratörü olabileceğini belirterek DGS'yi yalnızca nörojenik bir tuzaklanma tablosu değil, daha kapsayıcı bir kas-iskelet sistemi patolojisi olarak tanımlamışlardır (Yoon vd., 2025) . Tarihsel süreçte ise piriformis kasının siyatik ağrısına yol açabileceği ilk kez Yeoman (1928) tarafından öne sürülmüş, "piriformis sendromu" terimi ise Robinson (1947) tarafından literatüre kazandırılmıştır (Ilizaliturri Jr. vd., 2018; Yoon vd., 2025) .

Siyatik dışı pelvik sinir etkilenimleri terminolojik olarak DGS'nin dar tanımına dahil edilmemelidir. Bununla birlikte pudendal sinir, posterior femoral kutanöz sinir ile superior ve

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

inferior gluteal sinirlerin etkilenimi, benzer posterior kalça ağrısı veya oturma intoleransı yaratabildiğinden ayırıcı tanıda önemlidir. Özellikle perineal-genital ağrı, üriner/anorektal semptomlar, yüzeyel duyusal yakınmalar veya belirgin izole motor kayıp varlığında değerlendirme kapsamı genişletilmelidir (Labat vd., 2008) .

2.2. Derin Gluteal Boşluk ve Sinir Kinematiği

Derin gluteal boşluk; gluteus maksimusun derininde yer alan, anteriorunda posterior asetabular kolon, kalça kapsülü ve proksimal femurun; posteriorunda gluteus maksimusun; medialinde sakrotüberöz ligament ve falkiform fasyanın; inferiorunda proksimal hamstring orijininin bulunduğu potansiyel anatomik aralıktır. Siyatik sinir bu alanda piriformis, gemelli kasları, obturator internus ve quadratus femoris ile yakın ilişki gösterir (Hernando vd., 2015; Martin vd., 2015) . Siyatik sinirin anatomik seyri ve piriformis ile olan ilişkisindeki varyasyonlar oldukça sık görülmekte olup kadaverik çalışmalarda %16,9, cerrahi olgularda ise %16,2 oranında bildirilmiştir (Caetano & Seeger, 2019) . Biyomekanik açıdan siyatik sinirin, üstte piriformis kası/tendonu ile altta gemelli–obturator internus kompleksi arasında adeta bir "makas mekanizması" (*scissor-like entrapment*) ile sıkışması, derin gluteal alandaki en karakteristik mekanik tuzaklanma mekanizmalarından birini oluşturur (Pośnik vd., 2024) .

Periferik sinirler ekstremite hareketi sırasında rijit bir yapı gibi davranmaz; longitudinal kayma ve gerim yoluyla hareket açıklığına uyum sağlar. Kalça fleksiyonu, rotasyonları ve diz pozisyonu siyatik sinirin derin gluteal boşluktaki konumunu değiştirebilir. Fibröz bant, skar dokusu veya komşu kas-tendon yapılarının kalınlaşması sinirin bu fizyolojik kaymasını sınırlandırdığında, nispeten düşük düzeyli günlük hareketler dahi lokal mekanik duyarlılığı artırabilir (Carro vd., 2016; Martin vd., 2015) .

2.3. Klinik Alt Gruplar ve Mekanik Provokasyonlar

Tablo 1. Klinik alt gruplar ve mekanik provokasyonlar

Klinik alt grup / eşlik eden durum	**Tipik mekanik ipucu**
Piriformis veya derin dış rotatör ilişkili siyatik irritasyonu	Kalça fleksiyon–addüksiyon–iç rotasyon kombinasyonları ve uzamış oturma ile semptom artışı.
İskiyofemoral sıkışma	Terminal kalça ekstansiyonu ve uzun adımlı yürüyüşle posterior kalça/iskial ağrı.
Proksimal hamstring ilişkili tablo	İskiyal tüberozite üzerinde lokal hassasiyet; koşu, hızlanma veya kalça fleksiyonunda tendon yüklenmesiyle artış.
Pudendal sinir etkilenimi	Oturmakla artan perineal veya genital ağrı; bisiklet, cinsel, üriner ya da anorektal semptomların eşlik edebilmesi.
Posterior femoral kutanöz sinir etkilenimi	Gluteal kıvrım ve posterior uylukta baskın yüzeyel yanma, uyuşma veya allodini; motor kaybın olmaması.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

3. Klinik Değerlendirme ve Ayırıcı Tanı

3.1. Anamnez ve Semptom Davranışı

Anamnezde ağrının başlangıcı, travma veya kalça çevresi cerrahi/enjeksiyon öyküsü, oturma ile ilişkisi, posterior uyluk veya bacak boyunca yayılımı, nörolojik karakteri ve fonksiyonel provokatörleri sorgulanmalıdır. DGS'de hastalar derin gluteal ağrı, uzamış oturma intoleransı, oturur pozisyondan ayağa kalkarken parestezi ya da aksama ve kalça rotasyonlarıyla artan siyatik-benzeri yakınmalar tarif edebilir. Ancak bu bulgular özgül değildir; ağrının kesin lokalizasyonu ve eşlik eden özellikleri ayırıcı tanı için belirleyicidir (Kizaki vd., 2020; Martin, Palmer, vd., 2014) .

- Bel ağrısı, öksürme-hapşırma ile semptom artışı, dermatomal yayılım veya belirgin refleks/miyotomal değişiklikler lomber köken olasılığını artırır.
- İskiyal tüberoziteye odaklanan ağrı ve artan hamstring yüküyle tutarlı semptom artışı proksimal hamstring patolojisini düşündürür.
- Perineal-genital ağrı ile üriner, anorektal veya cinsel semptomların birlikteliği pudendal sinir/pelvik taban değerlendirmesini gerektirir.
- Gece baskın, mekanik davranış göstermeyen ağrı; sistemik semptomlar, ilerleyici güç kaybı veya mesane-bağırsak değişikliği tıbbi değerlendirme gerektirir.

3.2. Lomber Omurga, Kalça ve Nörolojik Tarama

DGS şüphesinde lomber omurga, kalça ve nörolojik muayene birlikte yürütülmelidir. Aktif lomber hareketler, tekrarlayan hareketlerle semptom değişimi, dermatomal duyu, miyotom temelli kas kuvveti, refleksler ve sinir dokusu mekanosensitivitesi değerlendirilir. Düz bacak kaldırma ve slump testleri sinir dokusu duyarlılığını gösterebilir; ancak pozitiflikleri tek başına lezyonun spinal ya da derin gluteal yerleşimini belirlemez. Sonuçlar ağrının dağılımı ve kalça provokasyonlarıyla birlikte yorumlanmalıdır (Hernando vd., 2015; Martin vd., 2015) .

Kalça eklem hareket açıklığı ve FADIR (Flexion, Adduction, Internal Rotation) ve FABER (Flexion, Abduction, External Rotation*)* gibi testler, eklem içi kalça patolojileri ile posterior yapıların ayrımına katkı sağlar. Kasık ağrısı, iç rotasyon kısıtlılığı ve eklem içi provokasyonlar femoroasetabular sıkışma veya labral patoloji olasılığını destekler. Buna karşılık posterior gluteal ağrının kalça rotasyonlarıyla yeniden üretilmesi, DGS lehine klinik bağlam oluşturabilir.

3.3. DGS'ye Özgü Testlerin Yorumlanması

Aktif piriformis ve oturarak piriformis germe testleri, derin gluteal alandaki siyatik sinir tuzaklanması şüphesini desteklemek amacıyla kullanılabilir. Endoskopik doğrulamalı bir çalışmada, bu iki testin birlikte değerlendirilmesinin %91 duyarlılık ve %80 özgüllük ile en yüksek klinik performansı gösterdiği bildirilmiştir. (Martin vd., 2015) . Bu değerler testlerin yararlı olduğunu düşündürmekle birlikte, çalışmanın seçilmiş bir hasta grubunda yürütüldüğü ve testlerin tek başına tanı koydurucu olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Klinik değerlendirmede oturma intoleransı nicel bir parametre olarak öne çıkmakta ve hastaların "30 dakikadan uzun süre oturamaması" DGS tanısını destekleyen kilit bir öykü kriteri kabul edilmektedir (Kizaki vd., 2020; Park vd., 2016) . Fizik muayenede derin gluteal boşluk üzerine

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

uygulanan palpasyon hassasiyetinin DGS tanısında yüksek istatistiksel anlamlılık gösterdiği saptanmıştır(Park vd., 2016) . Ayrıca sırtüstü pozisyondaki hastada etkilenen bacağın tonik kontraktür nedeniyle sürekli dış rotasyonda kalması "piriformis işareti" olarak tanımlanmakta (Külcü, 2024) ; oturur pozisyonda dirençli abdüksiyonda ağrı ortaya çıkması (Pace işareti), bacağın pasif iç rotasyonu (Freiberg işareti) ve yan yatışta aktif abdüksiyon (Beatty testi) gibi provokasyon testleri klinik değerlendirmeyi zenginleştirmektedir (Ilizaliturri Jr. vd., 2018; Külcü, 2024; Pangestu vd., 2026) .

İskiyofemoral sıkışma şüphesinde uzun adımlı yürüyüş ve iskiyofemoral sıkışma testi, terminal kalça ekstansiyonu ile ortaya çıkan ağrıyı değerlendirmek için kullanılabilir. Uzun adımda semptomların artması ve kısa adımda azalması destekleyicidir; ancak sakroiliak, lomber ve kas-tendon kaynaklı ağrılar dışlanmadan sonuç kesin kabul edilmemelidir (Gómez-Hoyos vd., 2016) .

3.4. Ayırıcı Tanıda Klinik İpuçları

Tablo 1 Ayırıcı tanıda klinik ipuçları

Klinik bulgu	Öncelikle düşünülmesi gereken durum	Değerlendirmede öne çıkanlar
Bel hareketleriyle değişen dermatomal ağrı, refleks veya miyotomal güç kaybı	Lomber radikülopati	Lomber hareketler, nörolojik tarama, semptomun santralizasyon/periferizasyonu.
Derin gluteal ağrı, oturma intoleransı, kalça rotasyonlarıyla semptom	DGS	Aktif piriformis ve oturarak germe testi; gluteal palpasyon; lomber dışlama.
Terminal ekstansiyon veya uzun adımda iskial/posterior kalça ağrısı	İskiyofemoral sıkışma	Uzun adım testi, kalça ekstansiyon paterninin gözlenmesi, gerektiğinde MRG.
İskiyal tüberozitede lokal ağrı ve tendon yükleme ile tutarlı artış	Proksimal hamstring tendinopatisi	Tendon palpasyonu, hamstring yükleme testleri, kompresif yük toleransı.
Perineal-genital ağrı ve oturma ile artış	Pudendal sinir etkilenimi / pelvik taban disfonksiyonu	Pelvik sağlık değerlendirmesi, üriner-anorektal-cinsel semptom sorgulaması.
Gluteal kıvrımda veya posterior uylukta yüzeyel duyu semptomları	Posterior femoral kutanöz sinir etkilenimi	Duyu dağılımı, basınçla provokasyon, motor bulgunun yokluğu.

4. Hasta Bildirimli Ölçümler, Fonksiyonel Testler ve Görüntüleme

4.1. Sonuç Ölçümleri ve Fonksiyonel İzlem

DGS için patellar tendinopatideki VISA-P (Victorian Institute of Sport Assessment - Patella) benzeri, yaygın kabul görmüş hastalığa özgü tek bir hasta bildirimli sonuç ölçümü

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

bulunmamaktadır. Bu nedenle klinik izlem; ağrı şiddeti, oturma toleransı, hasta tarafından tanımlanan fonksiyonel hedefler ve semptomu provoke eden görevlerin tekrarlanabilirliği üzerinden yürütülmelidir. Hastanın başlangıçta semptom oluşturan oturma süresi, yürüyüş mesafesi, merdiven/yokuş toleransı veya spora özgü hareketleri kaydedilmeli; aynı koşullar takipte yeniden değerlendirilmelidir.

Fonksiyonel test seçimi, hipotez edilen mekanizmaya göre yapılmalıdır. Tek ayak duruşu, basamak inme (step-down), tek bacak köprü, çömelme (squat), yürüyüş ve koşu analizi; kalça abdüktör-ekstansör performansı ile lumbopelvik kontrol hakkında bilgi verir. Testin değeri, maksimum tekrar sayısından çok hastanın tanıdık semptomunu üretip üretmediği, hareket kalitesi ve egzersiz sonrası 24 saatlik semptom yanıtı ile ilişkilidir.

4.2. Görüntüleme ve İleri İncelemeler

Manyetik rezonans görüntüleme; quadratus femoris ödemi veya yağlı infiltrasyonu, iskiyofemoral aralık değişiklikleri, proksimal hamstring patolojisi, hematom, kitle ve posttravmatik/postoperatif değişiklikleri araştırmada yararlı olabilir (Gómez-Hoyos vd., 2016; Hernando vd., 2015) . Ancak yapısal bulguların semptomlarla bire bir örtüşmediği unutulmamalıdır. Görüntüleme, klinik şüpheyi desteklemek ve ayırıcı tanıyı daraltmak için kullanılmalı; tek başına tedavi hedefi hâline getirilmemelidir.

Konvansiyonel MRG'nin DGS tanısındaki duyarlılığının kısıtlı olduğu akılda tutulmalıdır; nitekim cerrahi olarak siyatik sinir tuzaklanması doğrulanmış 60 hastalık bir seride, hastaların yalnızca %10'unda (6 hasta) MRG'de hafif siyatik sinir şişmesi tespit edilebilmiştir (Park vd., 2016) . Bu durum, normal MRG bulgularının DGS tanısını ekarte ettirmeyeceğini açıkça göstermektedir (Martin, Palmer, vd., 2014; Park vd., 2016) . Öte yandan, Lee ve arkadaşları (2026) tarafından yapılan kadaverik bir çalışmada, ultrason rehberliğinde uygulanan fasiyal plan enjeksiyonunun hem kısa dış rotatörlerin entezis bölgesine hem de siyatik sinir çevresine eş zamanlı olarak başarıyla ulaşabildiği gösterilmiştir (Kim vd., 2026) .

Belirsiz olgularda MR nörografi, elektrodiagnostik incelemeler veya pozisyonla modifiye edilmiş elektrofizyolojik testler tanısal sürece ek katkı sağlayabilir. Yeni bir multimodal çalışma, standart görüntülemenin bazı olgularda yetersiz kalabildiğini ve ileri görüntüleme/elektrofizyolojik değerlendirmelerin klinik şüphe ile birlikte yorumlanması gerektiğini göstermiştir (Kurková vd., 2025) .

5. Konservatif Rehabilitasyon ve Yük Yönetimi

5.1. Temel İlkeler

DGS’de konservatif rehabilitasyonun amacı, sinir yatağındaki gereksiz kompresif veya traksiyonel yükleri azaltmak; ağrıyı sürdüren hareket ve oturma davranışlarını düzenlemek; kalça-lumbopelvik kapasiteyi kademeli biçimde geliştirmektir. DGS'ye yönelik fizyoterapi ve rehabilitasyon protokollerinin mevcut kanıt tabanının büyük ölçüde Seviye IV kanıtlara (uzman görüşleri, olgu serileri ve naratif derlemeler) dayandığı açıkça vurgulanmalıdır (Hu vd., 2021; Yoon vd., 2025) . Güncel literatürde doğrudan DGS rehabilitasyon protokollerini değerlendiren yüksek kaliteli

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

randomize kontrollü çalışmaların bulunmayışı, egzersiz rejimlerinin biyomekanik ilkelere ve hasta bazlı semptom irritabilitesine göre bireyselleştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Kay vd., 2017; Kizaki vd., 2020; Martin vd., 2015; Metikala & Sharma, 2022; Yoon vd., 2025) .

- Uzamış oturma, sert zeminde oturma, bisiklet, uzun adımlı yürüyüş, tekrarlayıcı derin kalça fleksiyonu veya yüksek hızlı koşu gibi bireye özgü provokatörleri geçici olarak düzenlemelidir.
- Yüksek irritabilite döneminde agresif piriformis/hamstring germe, semptomu belirgin şekilde yeniden üreten manuel basınç ve yüksek gerimli nörodinamik uygulamalardan kaçınılmalıdır.
- Ağrı ile tamamen kaçınma arasında denge kurmak: günlük aktivite ve egzersiz sonrası semptom artışı geçici olmalı, sonraki gün başlangıç düzeyine yaklaşmalıdır.
- Pudendal semptomlarda perineal basıncı azaltan oturma düzenlemeleri ve pelvik sağlık fizyoterapisine yönlendirme değerlendirilmelidir.

5.2. Aşamalı Rehabilitasyon Çerçevesi

Tablo 2 Aşamalı Rehabilitasyon Çerçevesi

Aşama	**Amaç**	**Örnek klinik içerik ve ilerleme mantığı**
1. Semptom modülasyonu ve yük düzenleme	İrritabiliteyi ve mekanik provokasyonu azaltmak.	Oturma aralarının planlanması, semptom oluşturan aktivitenin dozunun azaltılması, rahat kalça hareketleri; gerekirse düşük doz sinir kaydırma.
2. Hareket kontrolü ve temel kuvvet	Lumbopelvik kontrolü ve kalça çevresi kuvvet kapasitesini geliştirmek.	Ağrısız/tolere edilebilir aralıkta kalça abdüksiyon-ekstansiyon egzersizleri, köprü varyasyonları, kontrollü squat/step çalışmaları.
3. Fonksiyonel kuvvet ve enerji yönetimi	Yürüme, merdiven, koşu ve günlük talepler için kuvvet-enduransı artırmak.	Tek bacaklı görevler, basamağa çıkma/inme (step-up/step-down), kalça dominantkuvvetlendirme; semptom yanıtına göre hamstring yüklemesi.
4. Aktivite veya spora özgü dönüş	Hız, yön değişimi, uzun adım veya sportif görevlere güvenli dönüş.	Kademeli yürüyüş-koşu ilerlemesi, branşa özgü hızlanma-yavaşlama ve yön

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

		değiştirme; ertesi gün semptom kontrolü.

5.3. Nörodinamik Yaklaşım ve Egzersiz Seçimi

Nörodinamik egzersizler, amaç siniri "germek" değil, mekanik toleransı semptom sınırları içinde desteklemek olduğunda düşünülebilir. Başlangıçta düşük doz, kaydırma (slider) ağırlıklı uygulamalar tercih edilebilir; semptomların yayılması, artan uyuşma veya ertesi gün belirgin kötüleşme durumunda doz azaltılmalıdır. Kalça çevresi egzersizleri ise seçilmiş bir kası izole biçimde "düzeltmek" için değil, yürüme ve tek ayaklı görevlerde yük transferini iyileştirmek üzere uygulanmalıdır.

Proksimal hamstring eşlik eden olgularda tendon kompresyonunu artıran yüksek kalça fleksiyonlu pozisyonlar erken dönemde sınırlanabilir; daha sonra hamstring kuvveti ve fonksiyonel enerji depolama kapasitesi kademeli biçimde artırılır. İskiyofemoral sıkışma olasılığında ise terminal kalça ekstansiyonu ve uzun adım mekanikleri başlangıçta modifiye edilerek kalça kontrolü ve adım toleransı ilerletilir (Gómez-Hoyos vd., 2016) .

6. Girişimsel ve Cerrahi Tedaviye Yönlendirme

Görüntüleme eşliğinde lokal anestezik enjeksiyonlar, seçilmiş olgularda semptom kaynağına ilişkin ek bilgi sağlayabilir ve kısa dönem ağrı kontrolüne katkıda bulunabilir. Buna karşın enjeksiyona yanıt, tek başına primer patolojinin kesin kanıtı olarak yorumlanmamalıdır. İlerleyici nörolojik defisit, kitle/hematom şüphesi, şiddetli travma, sistemik uyarı bulguları veya yeterli süre ve nitelikte konservatif yaklaşıma rağmen devam eden anlamlı fonksiyon kaybında ileri tıbbi değerlendirme gerekir (Hernando vd., 2015; Kay vd., 2017) .

Cerrahi dekompresyon, konservatif tedaviye yanıt vermeyen ve klinik-görüntüleme bulgularıyla uygun biçimde seçilmiş hastalarda düşünülebilir. Endoskopik siyatik nöroliz çalışmalarının sonuçları genel olarak olumlu olsa da mevcut kanıtların çoğu düşük düzeyli çalışma tasarımlarına dayanır; bu nedenle cerrahi karar multidisipliner değerlendirme ve net bir klinik endikasyon gerektirir (Kay vd., 2017; Metikala & Sharma, 2022) .

Konservatif tedaviye yanıt vermeyen olgularda uygulanan endoskopik dekompresyonun klinik sonuçları klinik açıdan belirgin iyileşme sağlamaktadır (Martin, Kivlan, vd., 2014; Metikala & Sharma, 2022) . Park ve arkadaşları (2016), ortalama 2 yıllık takipte ağrı skorunda anlamlı bir düşüş ve Modifiye Harris Kalça Skorunda anlamlı bir artış bildirmişlerdir (Park vd., 2016) . Quesada-Jimenez ve arkadaşları (2025) ise yüksek hasta memnuniyeti ve kalıcı fonksiyonel iyileşme sağlamışlardır (Quesada-Jimenez vd., 2025) . Buna karşın, majör travmatik siyatik nöropatisi olan olgularda ve kalça artroskopisi sonrası gelişen DGS olgularında (özellikle kadın cinsiyet, laksite, düşük vücut kitle indeksi ve gelişimsel kalça displazisi varlığında) cerrahi yanıtın ve prognozun daha az olumlu olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Park vd., 2016; Uchida vd., 2020) .

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

7. Sonuç

Derin gluteal sendrom, yalnızca piriformis kasına atfedilmemesi gereken, siyatik sinirin derin gluteal boşluktaki disk dışı etkilenimini tanımlayan klinik bir çerçevedir. Etkili fizyoterapi yönetimi; lomber ve kalça kaynaklı patolojilerin dışlanmasını, semptomun anatomik dağılımının dikkatle yorumlanmasını, mekanik provokatörlerin düzenlenmesini ve fonksiyonel kapasitenin kademeli olarak geliştirilmesini gerektirir. Klinik testler, görüntüleme ve gerekirse ileri incelemeler tek başına değil, bütüncül karar verme sürecinin bileşenleri olarak kullanılmalıdır.

Kaynakça

Caetano, A. P., & Seeger, L. L. (2019). A rare anatomical variant of unilateral piriformis muscle agenesis: A case report. *Cureus*, *11*(6), e4887. https://doi.org/10.7759/cureus.4887

Carro, L. P., Hernando, M. F., Cerezal, L., Navarro, I. S., Fernandez, A. A., & Castillo, A. O. (2016). Deep gluteal space problems: Piriformis syndrome, ischiofemoral impingement and sciatic nerve release. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal*, *6*(3), 384-396. https://doi.org/10.11138/mltj/2016.6.3.384

Gómez-Hoyos, J., Martin, R. L., Schröder, R., Palmer, I. J., & Martin, H. D. (2016). Accuracy of 2 clinical tests for ischiofemoral impingement in patients with posterior hip pain and endoscopically confirmed diagnosis. *Arthroscopy*, *32*(7), 1279-1284. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.01.024

Hernando, M. F., Cerezal, L., Pérez-Carro, L., Abascal, F., & Canga, A. (2015). Deep gluteal syndrome: Anatomy, imaging, and management of sciatic nerve entrapments in the subgluteal space. *Skeletal Radiology*, *44*(7), 919-934. https://doi.org/10.1007/s00256-015-2124-6

Hu, Y.-W. E., Ho, G. W. K., & Tortland, P. D. (2021). Deep gluteal syndrome: A pain in the buttock. *Current Sports Medicine Reports*, *20*(6), 279-285. https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000848

Ilizaliturri Jr., V. M., Arriaga, R., Villalobos, F. E., & Suarez-Ahedo, C. (2018). Endoscopic release of the piriformis tendon and sciatic nerve exploration. *Journal of Hip Preservation Surgery*, *5*(3), 301-306. https://doi.org/10.1093/jhps/hny018

Kay, J., de Sa, D., Morrison, L., Fejtek, E., Simunovic, N., Martin, H. D., & Ayeni, O. R. (2017). Surgical management of deep gluteal syndrome causing sciatic nerve entrapment: A systematic review. *Arthroscopy*, *33*(12), 2263-2278.e1. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.06.041

Kim, S.-H., Lee, U.-Y., Yoon, Y., Hwang, J., Lee, J., Kim, S., Lam, K. H. S., Suryadi, T., & Suhaimi, A. (2026). An anatomical cadaveric demonstration of an ultrasound-guided fascial plane injection pathway in the deep gluteal space. *Bioengineering*, *13*(4), 412. https://doi.org/10.3390/bioengineering13040412

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

Kizaki, K., Uchida, S., Shanmugaraj, A., Aquino, C., Duong, A., Simunovic, N., Martin, H. D., & Ayeni, O. R. (2020). Deep gluteal syndrome is defined as a non-discogenic sciatic nerve disorder with entrapment in the deep gluteal space: A systematic review. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *28*(10), 3354-3364. https://doi.org/10.1007/s00167-020-05966-x

Kurková, S., Kynčl, M., Ibrahim, I., Lachman, H., Sakmárová, K., & Machač, S. (2025). Exploring non-invasive diagnostic tools for deep gluteal syndrome: A multimodal approach integrating clinical and imaging techniques. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, *15*(9), 8409-8422. https://doi.org/10.21037/qims-2025-241

Külcü, D. G. (2024). Deep gluteal syndrome: An underestimated cause of posterior hip pain. *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, *70*(1), 4-16. https://doi.org/10.5606/tftrd.2024.14668

Labat, J.-J., Riant, T., Robert, R., Amarenco, G., Lefaucheur, J.-P., & Rigaud, J. (2008). Diagnostic criteria for pudendal neuralgia by pudendal nerve entrapment (Nantes criteria). *Neurourology and Urodynamics*, *27*(4), 306-310. https://doi.org/10.1002/nau.20505

Martin, H. D., Kivlan, B. R., Palmer, I. J., & Martin, R. L. (2014). Diagnostic accuracy of clinical tests for sciatic nerve entrapment in the gluteal region. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *22*(4), 882-888. https://doi.org/10.1007/s00167-013-2758-7

Martin, H. D., Palmer, I. J., & Hatem, M. A. (2014). Deep gluteal syndrome. Içinde *Hip arthroscopy and hip joint preservation surgery* (ss. 1-30). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7321-3_75-1

Martin, H. D., Reddy, M., & Gómez-Hoyos, J. (2015). Deep gluteal syndrome. *Journal of Hip Preservation Surgery*, *2*(2), 99-107. https://doi.org/10.1093/jhps/hnv029

Metikala, S., & Sharma, V. (2022). Endoscopic sciatic neurolysis for deep gluteal syndrome: A systematic review. *Cureus*, *14*(3), e23153. https://doi.org/10.7759/cureus.23153

Pangestu, V., Simadibrata, C., Gressida, L. M., Ginting, B. K., Fitriani, F. D., Putrianda, T. N., & Hanggarsari, D. (2026). Combination of manual acupuncture therapy and ear acupuncture (battlefield acupuncture) in patients with piriformis syndrome: A case report. *Medical Acupuncture*, *38*(1), 85-88. https://doi.org/10.1177/19336586261416443

Park, M.-S., Yoon, S., Jung, S., & Kim, S. (2016). Clinical results of endoscopic sciatic nerve decompression for deep gluteal syndrome: Mean 2-year follow-up. *BMC Musculoskeletal Disorders*, *17*, 218. https://doi.org/10.1186/s12891-016-1062-3

Pośnik, M., Zielińska, N., Ruzik, K., & Olewnik, Ł. (2024). The morphological variability of the pelvic girdle muscles: A potential trap during ultrasound. *Folia Morphologica*, *83*(4), 789-801. https://doi.org/10.5603/fm.94434

Quesada-Jimenez, R., Walsh, E. G., Kahana-Rojkind, A. H., Schab, A. R., McCarroll, T. R., & Domb, B. G. (2025). Comprehensive management of piriformis syndrome with endoscopic release and sciatic neurolysis provides favorable outcomes and low complication rate.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery, *41*(11), 4596-4603. https://doi.org/10.1016/j.arthro.2025.06.023

Uchida, S., Kizaki, K., Hirano, F., Martin, H. D., & Sakai, A. (2020). Postoperative deep gluteal syndrome after hip arthroscopic surgery. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, *8*(9), 2325967120951118. https://doi.org/10.1177/2325967120951118

Yoon, Y. H., Hwang, J. H., Lee, H. W., Lee, M., Park, C., Lee, J., Kim, S., Lee, J., de Castro, J. C., Lam, K. H. S., Suryadi, T., & Youn, K. H. (2025). Beyond nerve entrapment: A narrative review of muscle–tendon pathologies in deep gluteal syndrome. *Diagnostics*, *15*(19), 2531. https://doi.org/10.3390/diagnostics15192531

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0002-7623-9101
2 Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, SBF FTR Bölümü, 0000-0003-0538-3613

BÖLÜM 3

YOĞUN BAKIMDA KARDİYOPULMONER REHABİLİTASYON: FİZYOPATOLOJİK TEMELLER VE KLİNİK UYGULAMALAR

BETÜL YOLERİ[1]

Giriş

Yoğun bakım ünitelerinde (YBÜ) sunulan organ destek tedavilerindeki gelişmeler, kritik hastalık sonrasında hayatta kalan hasta sayısını belirgin biçimde artırmıştır. Ancak sağkalımdaki bu artış, taburculuk sonrasında aylar hatta yıllar boyunca süren kas güçsüzlüğü, egzersiz kapasitesinde azalma, bilişsel ve ruhsal sorunlar gibi yeni bir sağlık yükünü de beraberinde getirmiştir (Herridge et al., 2011; Rousseau et al., 2021). Akut solunum sıkıntısı sendromu (ARDS) sonrası hastaların izlendiği bir kohortta, hastaların beş yıl sonra dahi altı dakika yürüme mesafelerinin beklenen değerin altında kaldığı ve fiziksel işlevlerinin tam olarak düzelmediği gösterilmiştir (Herridge et al., 2011). Bu tablo, yoğun bakım tedavisinin hedefinin yalnızca sağkalım değil, hastanın

[1] Arş. Gör., Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Orcid: 0000-0002-0649-7252

işlevsel bağımsızlığına geri dönüşü olması gerektiği düşüncesini güçlendirmiştir.

Kardiyopulmoner rehabilitasyon, kritik hastalığın ve uzamış immobilizasyonun solunum, dolaşım ve iskelet kası sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini önlemeyi ya da en aza indirmeyi amaçlayan; erken mobilizasyon, solunum kas eğitimi, aerobik ve dirençli egzersiz eğitimi, nöromusküler elektrik stimülasyonu ve hava yolu temizleme tekniklerini kapsayan çok bileşenli bir yaklaşımdır (Gosselink et al., 2008; Sommers et al., 2015). Güncel kılavuzlar, yoğun bakımda rehabilitasyonu ağrı, sedasyon, deliryum ve immobilitenin birlikte yönetildiği bütüncül bakımın ayrılmaz bir parçası olarak tanımlamaktadır (Devlin et al., 2018; Pun et al., 2019). Bu bölümde, yoğun bakım hastasının rehabilitasyon gereksinimini doğuran fizyopatolojik mekanizmalar özetlenmekte, dünyada ve Türkiye'deki uygulama durumu kısaca ele alınmakta ve kardiyopulmoner rehabilitasyonun güvenlik ilkeleri ile temel uygulamaları güncel kanıtlar ışığında sunulmaktadır.

Yoğun Bakım Hastası ve Rehabilitasyon Gereksinimi

Kritik hasta, bir ya da daha fazla organ sisteminde yaşamı tehdit eden yetmezlik nedeniyle sürekli izlem ve mekanik ventilasyon, vazoaktif ilaç desteği ya da renal replasman tedavisi gibi organ destek uygulamalarına gereksinim duyan hastadır. Bu hasta grubu; sepsis, ARDS, kronik obstrüktif akciğer hastalığı alevlenmesi, majör cerrahi ve kardiyak cerrahi sonrası dönem, travma ve nörolojik hastalıklar gibi oldukça heterojen klinik tablolardan oluşur. Ortak özellikleri, uzun süre yatağa bağımlı kalmaları, sıklıkla sedasyon ve mekanik ventilasyon almaları ve sistemik inflamasyona maruz kalmalarıdır (Kress & Hall, 2014).

Yoğun bakım sonrası sendrom (post-intensive care syndrome, PICS), kritik hastalık sonrasında ortaya çıkan ve hastaneden taburculuktan sonra da süren fiziksel, bilişsel ve ruhsal

sağlık bozukluklarını tanımlamak amacıyla geliştirilmiş bir kavramdır (Needham et al., 2012). Fiziksel bileşen; kas güçsüzlüğü, eklem sertliği, egzersiz intoleransı, yorgunluk ve günlük yaşam aktivitelerinde bağımlılığı kapsar. Bilişsel bileşen bellek ve yürütücü işlevlerde bozulmayı, ruhsal bileşen ise anksiyete, depresyon ve travma sonrası stres bozukluğunu içerir (Inoue et al., 2019). PICS'in önlenmesinde erken rehabilitasyon, sedasyonun en aza indirilmesi ve deliryumun önlenmesi ile birlikte en önemli değiştirilebilir bileşenlerden biri olarak kabul edilmektedir (Inoue et al., 2019; Pun et al., 2019).

Fizyopatolojik Mekanizmalar

Yoğun bakım kazanılmış güçsüzlük (intensive care unit-acquired weakness, ICU-AW), kritik hastalık sırasında gelişen ve kritik hastalık dışında başka bir açıklaması bulunmayan, genellikle simetrik, proksimal kaslarda daha belirgin ve solunum kaslarını da etkileyen yaygın kas güçsüzlüğü olarak tanımlanır (Fan et al., 2014). Klinik tanı, işbirliği yapabilen hastada Medical Research Council toplam skorunun (MRC-SS) 60 üzerinden 48'in altında olmasına dayanır; bu skorun 36'nın altında olması ağır güçsüzlüğü gösterir (Fan et al., 2014; Vanhorebeek et al., 2020). Mekanik ventilasyon süresi uzayan hastaların önemli bir bölümünde ICU-AW geliştiği bildirilmiş olup ICU-AW; daha uzun mekanik ventilasyon ve hastanede kalış süresi, artmış maliyet ve bir yıllık mortalitede artış ile ilişkilidir (Fan et al., 2014; Hermans et al., 2014).

ICU-AW'nin iki temel elektrofizyolojik alt tipi kritik hastalık polinöropatisi (critical illness polyneuropathy, CIP) ve kritik hastalık miyopatisidir (critical illness myopathy, CIM); bu iki tablo sıklıkla birlikte bulunur ve kritik hastalık polinöromiyopatisi olarak adlandırılır (Latronico & Bolton, 2011). CIP, sensorimotor aksonal bir nöropatidir ve mikrosirkülasyon bozukluğu, endonöral ödem, hiperglisemi ve sodyum kanal işlev bozukluğu sonucu gelişen sinir

iletim kaybıyla karakterizedir. CIM ise primer bir miyopatidir; kas zarı uyarılabilirliğinin azalması, miyozin filamentlerinin seçici kaybı, mitokondriyal işlev bozukluğu ve proteoliz artışı ile kas lifi atrofisi temel bulgulardır (Latronico & Bolton, 2011; Vanhorebeek et al., 2020). Sepsis, çoklu organ yetmezliği, hiperglisemi, sistemik inflamasyon, kortikosteroid ve nöromusküler blokör kullanımı ile immobilizasyon başlıca risk etmenleridir (Hermans & Van den Berghe, 2015; Vanhorebeek et al., 2020).

Kritik hastalıkta kas kaybı oldukça hızlı gelişir. Puthucheary et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada rektus femoris kesit alanının ilk on günde yaklaşık %18 oranında azaldığı; bu kaybın kas protein sentezinin baskılanması ve yıkımın artmasından kaynaklandığı ve çoklu organ yetmezliği olan hastalarda daha belirgin olduğu gösterilmiştir. Sistemik inflamasyon, ubikitin-proteazom ve otofaji yolaklarını etkinleştirerek proteolizi artırırken, uzamış yatak istirahati mekanik yükün ortadan kalkması nedeniyle bu süreci hızlandırır (Parry & Puthucheary, 2015).

Ventilatörle ilişkili diyafram disfonksiyonu (ventilator-induced diaphragm dysfunction, VIDD), kontrollü mekanik ventilasyon sırasında diyaframın pasif kalmasına bağlı olarak gelişen atrofi ve kontraktil güç kaybını ifade eder. Organ donörlerinde yapılan bir çalışmada, 18 ile 69 saat arasında süren tam diyafram inaktivitesinin hem yavaş hem de hızlı kas liflerinde belirgin atrofiye yol açtığı gösterilmiştir (Levine et al., 2008). Mekanik ventilasyondaki hastalarda ultrasonografi ile saptanan diyafram kalınlığındaki azalmanın, uzamış ventilasyon süresi ve ventilatörden ayırmada (weaning) güçlük ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Goligher et al., 2018). Diyafram güçsüzlüğü yoğun bakıma kabul sırasında da sık görülür ve weaning başarısızlığının önemli bir belirleyicisidir (Dres et al., 2017).

İmmobilizasyonun etkileri yalnızca iskelet kası ile sınırlı değildir. Uzamış yatak istirahati; plazma hacminde azalma,

ortostatik intolerans, istirahat kalp hızında artış ve maksimal oksijen tüketiminde düşüş ile kardiyovasküler dekondisyona; atelektazi, sekresyon birikimi ve ventilasyon-perfüzyon uyumsuzluğu ile solunumsal komplikasyonlara; insülin direnci, kemik mineral kaybı, eklem kontraktürleri ve basınç yaralarına yol açar (Gosselink et al., 2008; Parry & Puthucheary, 2015). Kardiyopulmoner rehabilitasyon, kas kasılması ve mekanik yüklenme aracılığıyla protein sentezini uyarmayı, mitokondriyal işlevi ve insülin duyarlılığını korumayı, ventilasyonu ve oksijenasyonu iyileştirmeyi ve böylece bu kısır döngüyü kırmayı hedefler (Kress & Hall, 2014; Parry & Puthucheary, 2015).

Dünyada ve Türkiye'de Yoğun Bakım Rehabilitasyonunun Yeri

Yoğun bakımda erken rehabilitasyon, Avrupa Solunum Derneği (ERS) ile Avrupa Yoğun Bakım Tıbbı Derneği (ESICM) ortak görev grubunun önerileriyle uluslararası düzeyde tanımlanmış ve sonraki yıllarda pek çok ulusal kılavuza girmiştir (Gosselink et al., 2008; Lang et al., 2020). Amerikan Yoğun Bakım Tıbbı Derneği'nin PADIS kılavuzu, erişkin yoğun bakım hastalarında rehabilitasyon ve mobilizasyon uygulanmasını önermekte; ABCDEF demeti ise erken mobilizasyonu sedasyon, deliryum ve aile katılımı ile birlikte ele almaktadır (Devlin et al., 2018; Pun et al., 2019). Bununla birlikte, uygulamaya yansıma ülkeler ve merkezler arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Almanya'da yapılan nokta prevalans çalışmasında mekanik ventilasyon alan hastaların yalnızca yaklaşık dörtte birinin mobilize edildiği (Nydahl et al., 2014); dört ülkeyi kapsayan uluslararası bir ankette ise erken mobilizasyon uygulayan ünitelerin yaklaşık yarı oranında kaldığı ve yazılı protokol bulunan ünitelerin oranının daha da düşük olduğu bildirilmiştir (Bakhru et al., 2016). Ayrılmış fizyoterapist bulunması, multidisipliner viziteler ve günlük hedef belirlenmesi uygulamayı kolaylaştıran etmenler olarak öne çıkmaktadır (Bakhru et al., 2016).

Türkiye'de yoğun bakım ünitelerinde fizyoterapi hizmetleri son yıllarda yaygınlaşmakla birlikte, uygulamalar merkezler arasında farklılık göstermektedir. Yoğun bakımda çalışan fizyoterapistlerle yapılan ulusal bir anket çalışmasında en sık kullanılan uygulamaların pozisyonlama, aktif ve pasif egzersizler, solunum egzersizleri ve perküsyon olduğu; fizyoterapistten, hastadan, ekip çalışmasından, ekipmandan ve yasal süreçlerden kaynaklanan engellerin uygulamayı sınırladığı bildirilmiştir (Çakmak et al., 2019). Son yıllarda Yoğun Bakım Mobilite Ölçeği ve CPAx'in Türkçe geçerlik ve güvenirlik çalışmalarının yapılmış olması, ülkemizde yoğun bakım hastalarının işlevsel durumunun standart ve karşılaştırılabilir araçlarla izlenmesine olanak sağlamıştır (İbrahimoğlu et al., 2022; Koyutürk et al., 2025). COVID-19 pandemisi, yoğun bakım rehabilitasyonunun önemini hem dünyada hem de ülkemizde daha görünür kılmıştır (Thomas et al., 2020). Kanıta dayalı protokollerin yaygınlaştırılması, ekip içi iş birliğinin güçlendirilmesi ve yoğun bakım fizyoterapisine yönelik eğitimin artırılması, ülkemizde öncelikli gelişim alanları olarak değerlendirilebilir.

Değerlendirme ve Güvenlik

Rehabilitasyon programının planlanması, hastanın kardiyovasküler, solunumsal ve nörolojik durumunun bütüncül değerlendirilmesiyle başlar. Uzman uzlaşı raporu, mekanik ventilasyondaki hastaların aktif mobilizasyonu için güvenlik kriterlerini "trafik ışığı" yaklaşımıyla sınıflandırmıştır: yeşil, olumsuz olay riskinin düşük olduğunu; sarı, potansiyel riskin bulunduğunu ve uygulamanın ekip tarafından tartışılarak yapılmasını; kırmızı ise önemli risk nedeniyle aktif mobilizasyonun ertelenmesini ifade eder (Hodgson et al., 2014). Bu kriterlerin özeti Tablo 1'de sunulmuştur. Kriterler kesin sınırlar olarak değil, klinik karar verme sürecini destekleyen bir çerçeve olarak kullanılmalıdır.

Tablo 1. Mekanik Ventilasyondaki Hastalarda Aktif Mobilizasyon İçin Güvenlik Değerlendirmesinin Özeti

Sistem	Değerlendirme ölçütleri
Solunum	FiO2 ≤0,60, SpO2 ≥%90, solunum sayısı ≤30/dk ve PEEP ≤10 cmH2O olması genellikle düşük riskli kabul edilir. Endotrakeal tüp ya da trakeostomi tek başına mobilizasyon için kontrendikasyon değildir; ileri oksijenasyon gereksinimi ve prone pozisyon tedavisi kırmızı/sarı kategoride değerlendirilir.
Kardiyovasküler	Ortalama arter basıncının hedef aralıkta ve semptomsuz olması gerekir. Artan dozda vazopressör gereksinimi, kontrol altında olmayan aritmi, akut miyokard iskemisi bulguları ve semptomatik hipotansiyon aktif mobilizasyonun ertelenmesini gerektirir.
Nörolojik	Hastanın uyanıklık düzeyi (ör. RASS) ve komutlara uyumu değerlendirilir. Kontrolsüz kafa içi basınç artışı, ajitasyon ve kontrolsüz nöbet aktivitesi aktif mobilizasyon için yüksek riskli durumlardır.
Diğer	Stabilize edilmemiş kırıklar, kontrol altında olmayan aktif kanama ve büyük cerrahi yara ile ilgili sınırlamalar değerlendirilmelidir. Femoral kateter ve sürekli renal replasman tedavisi tek başına mutlak engel değildir; kateter güvenliği gözetilerek planlama yapılır.

Kaynak: Hodgson et al. (2014) temel alınarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Değerlendirmede kas gücü, işlevsel durum ve solunum kas kuvveti birlikte ele alınmalıdır. İşbirliği yapabilen hastada MRC-SS ve el kavrama dinamometrisi ICU-AW tanısında kullanılır (Fan et al., 2014). İşlevsel durumun izlenmesinde Chelsea Kritik Bakım Fiziksel Değerlendirme Aracı (CPAx), yoğun bakım için Fiziksel Fonksiyon Testi (PFIT-s), Yoğun Bakımda Fonksiyonel Durum Skoru (FSS-ICU) ve Yoğun Bakım Mobilite Ölçeği (IMS) gibi geçerliği gösterilmiş araçlar önerilmektedir (Corner et al., 2013; Parry et al., 2015); bu araçlardan IMS ve CPAx'in Türkçe sürümleri de bulunmaktadır (İbrahimoğlu et al., 2022; Koyutürk et al., 2025). Maksimal inspiratuvar (MIP) ve ekspiratuvar (MEP) ağız basınçları solunum kas kuvvetinin, öksürük tepe akımı ise öksürük etkinliğinin değerlendirilmesinde yararlıdır (Dres et al., 2017; Gosselink et al., 2008).

Egzersiz Sırasında İzlem ve Sonlandırma Kriterleri

Rehabilitasyon seansı öncesinde güvenlik kriterlerinin karşılanması, seans sırasında hastanın izlenmesi gerekliliğini ortadan kaldırmaz. Seans boyunca kalp hızı ve ritmi, arter basıncı, solunum sayısı, oksijen satürasyonu, ventilatör uyumu ve hastanın öznel yanıtı izlenmelidir. Erken mobilizasyon çalışmalarında kullanılan ve klinik uygulamada yaygın olarak benimsenen sonlandırma kriterleri aşağıda özetlenmiştir (Hodgson et al., 2014; Schweickert et al., 2009):

- Ortalama arter basıncının 65 mmHg'nin altına düşmesi ya da 110 mmHg'nin üzerine çıkması
- Kalp hızının 40/dk'nın altına düşmesi ya da 130/dk'nın üzerine çıkması, yeni gelişen aritmi ya da miyokard iskemisi bulguları
- Solunum sayısının 5/dk'nın altına düşmesi ya da 40/dk'nın üzerine çıkması
- Oksijen satürasyonunun %88'in altına düşmesi
- Belirgin ventilatör uyumsuzluğu ya da hava yolu güvenliğine ilişkin endişe
- Hastada belirgin sıkıntı ya da ajitasyon gelişmesi, düşme ya da düşme riski

Seans sonrasında fizyolojik parametrelerin başlangıç değerlerine dönüş süresi de izlenmeli ve bir sonraki seansın yoğunluğu hastanın bu yanıtına göre planlanmalıdır (Gosselink et al., 2008; Sommers et al., 2015).

Kardiyopulmoner Rehabilitasyon Uygulamaları

Yoğun bakımda rehabilitasyon, hastanın klinik durumuna ve işbirliği düzeyine göre kademeli olarak ilerletilen bireyselleştirilmiş

bir programdır. Bilinci kapalı ya da işbirliği kuramayan hastalarda pozisyonlama, pasif eklem hareketleri, pasif sikloergometre ve nöromusküler elektrik stimülasyonu gibi uygulamalar ön plandadır. Hasta uyandıkça ve işbirliği arttıkça aktif-yardımlı ve aktif egzersizlere, yatak kenarında oturmaya, ayakta durmaya, transferlere ve yürümeye geçilir (Gosselink et al., 2008; Sommers et al., 2015). Temel uygulamalar ve önerilen dozaj ilkeleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Erken Mobilizasyon

Erken mobilizasyon, fizyolojik stabilite sağlandıktan sonra mümkün olan en kısa sürede başlatılan ve hastanın yatak içi aktivitelerden yürümeye kadar ilerletildiği fiziksel aktivitelerin tümünü kapsar. Schweickert et al. (2009) tarafından yapılan randomize kontrollü çalışmada, sedasyon kesintisi ile eş zamanlı uygulanan erken fizik ve iş terapisi, taburculukta bağımsız işlevsel duruma dönüş oranını artırmış, deliryum süresini kısaltmış ve ventilatörsüz gün sayısını artırmıştır. Cerrahi yoğun bakımda hedefe yönelik erken mobilizasyonun mobilizasyon düzeyini artırdığı, yoğun bakımda kalış süresini kısalttığı ve taburculuktaki işlevsel durumu iyileştirdiği gösterilmiştir (Schaller et al., 2016).

Mobilizasyonun ilerletilmesinde hastanın bilinç düzeyine ve kas gücüne dayanan basamaklı protokoller yaygın olarak kullanılmaktadır. Morris et al. (2008) tarafından tanımlanan dört basamaklı protokolde, bilinci kapalı hastada pozisyonlama ve pasif eklem hareketleri ile başlanmakta; hasta uyanıp üst ve alt ekstremite kasları yerçekimine karşı hareket edebilecek güce ulaştıkça yatak kenarında oturma, sandalyeye transfer ve yürümeye geçilmektedir. Bu protokolle hastaların yataktan daha erken çıkarılabildiği, yoğun bakımda ve hastanede kalış sürelerinin kısaldığı bildirilmiştir (Morris et al., 2008). Basamakların genel çerçevesi Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Yoğun Bakımda Basamaklı Mobilizasyon Protokolü

Basamak	Hastanın durumu	Uygulamalar
Basamak 1	Bilinci kapalı, işbirliği yok	Pozisyonlama (en az iki saatte bir), pasif eklem hareketleri, pasif sikloergometre, gerektiğinde nöromusküler elektrik stimülasyonu
Basamak 2	Uyanık ve işbirliği var; üst ekstremite kasları yerçekimine karşı hareket edemiyor	Aktif-yardımlı eklem hareketleri, yatak içinde dik oturma, solunum egzersizleri
Basamak 3	Üst ekstremite kasları yerçekimine karşı hareket edebiliyor (MRC ≥3)	Aktif ve dirençli egzersizler, yatak kenarında oturma ve denge çalışmaları, aktif sikloergometre
Basamak 4	Alt ekstremite kasları yerçekimine karşı hareket edebiliyor (MRC ≥3)	Ayakta durma, yerinde yürüme, sandalyeye aktif transfer, destekli ya da bağımsız yürüme

Kaynak: Morris et al. (2008) ve Gosselink et al. (2008) temel alınarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Öte yandan tüm çalışmalar olumlu sonuç vermemiştir. Standart rehabilitasyon protokolünün hastanede kalış süresini kısaltmadığı (Morris et al., 2016), yoğunlaştırılmış rehabilitasyonun altı ayda fiziksel yaşam kalitesine ek katkı sağlamadığı (Wright et al., 2018) bildirilmiştir. Mekanik ventilasyondaki 750 hastayı kapsayan çok merkezli TEAM çalışmasında, erken aktif mobilizasyon dozunun artırılması 180 günlük hastane dışında yaşanan gün sayısını artırmamış; müdahale grubunda olumsuz olaylar daha sık görülmüştür (TEAM Study Investigators and the ANZICS Clinical Trials Group, 2022). Sistematik derlemeler de kanıt düzeyinin düşük olduğunu ve etkinin hasta seçimi, başlama zamanı ve dozaja göre değiştiğini vurgulamaktadır (Doiron et al., 2018; Lang et al., 2020). Bu bulgular, erken mobilizasyonun "herkese, her zaman en yüksek doz" şeklinde değil; güvenlik kriterleri gözetilerek, hastaya özgü hedeflerle ve kademeli olarak uygulanması gerektiğini göstermektedir.

Solunum Kas Eğitimi ve Weaning

İnspiratuvar kas eğitimi (inspiratory muscle training, IMT), diyafram ve yardımcı inspiratuvar kasların kuvvet ve dayanıklılığını artırmak amacıyla, genellikle eşik yüklemeli (threshold) cihazlar ya da ventilatör tetikleme duyarlılığının ayarlanması ile uygulanan dirençli solunum egzersizidir. VIDD'nin weaning başarısızlığındaki rolü göz önüne alındığında, IMT'nin özellikle uzamış mekanik ventilasyon ve weaning güçlüğü yaşayan hastalarda önemli bir yeri vardır (Dres et al., 2017; Vorona et al., 2018).

Weaning başarısızlığı olan hastalarda yüksek yoğunluklu IMT'nin MIP'i artırdığı ve başarılı weaning oranını anlamlı ölçüde yükselttiği gösterilmiştir (Martin et al., 2011). Sistematik derleme ve meta-analizler, IMT'nin inspiratuvar kas kuvvetini artırdığını ve weaning süresini kısaltabildiğini, ancak mortalite üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ortaya koymuştur (Elkins & Dentice, 2015; Vorona et al., 2018). Yedi günden uzun süre mekanik ventilasyon alan hastalarda weaning sonrasında uygulanan IMT ise inspiratuvar kas kuvvetini ve yorgunluğa direnci artırmış, yaşam kalitesine olumlu katkı sağlamıştır (Bissett et al., 2016).

Klinik uygulamada IMT, hasta uyanık, işbirliği yapabilen ve hemodinamik olarak stabil olduğunda, ventilatörden kısa süreli ayrılarak ya da spontan solunum denemeleri sırasında başlatılır. Yük genellikle MIP'in %30–50'si düzeyinde başlatılır ve tolerans doğrultusunda artırılır. Günde bir ya da iki kez, 6–10 nefeslik 3–5 set şeklinde, setler arasında ventilatör desteğine geri dönülerek uygulanabilir (Bissett et al., 2016; Martin et al., 2011). Uygulama sırasında solunum sayısı, oksijen satürasyonu, kalp hızı ve algılanan zorluk düzeyi (Borg skalası) yakından izlenmelidir.

Aerobik Egzersiz Eğitimi

Aerobik egzersiz eğitimi, yoğun bakımda kardiyovasküler dekondisyonun önlenmesi ve egzersiz kapasitesinin korunması

amacıyla uygulanır. Yatak başı sikloergometre, hasta işbirliği kuramadığı dönemde dahi pasif olarak başlatılabilmesi ve hasta uyandıkça aktif-yardımlı ve aktif kullanıma geçilebilmesi nedeniyle yoğun bakımda en sık kullanılan aerobik egzersiz yöntemidir. Burtin et al. (2009) tarafından yapılan çalışmada, standart fizyoterapiye ek olarak günde 20 dakika uygulanan yatak başı sikloergometre egzersizinin taburculukta altı dakika yürüme mesafesini, kuadriseps kuvvetini ve fiziksel işlevi iyileştirdiği gösterilmiştir.

Bununla birlikte, erken rehabilitasyona eklenen yatak içi bisiklet ve kuadriseps elektrik stimülasyonunun yoğun bakım taburculuğundaki genel kas gücünü artırmadığı bildirilmiştir (Fossat et al., 2018). Meta-analiz sonuçları sikloergometrenin güvenli olduğunu, ancak işlevsel sonuçlar üzerindeki etkisine ilişkin kanıtın kesinliğinin düşük olduğunu göstermektedir (Takaoka et al., 2020). Aerobik egzersizin yoğunluğu, yoğun bakım koşullarında genellikle kalp hızı yanıtı, oksijen satürasyonu ve algılanan zorluk düzeyine (Borg skalasında orta düzey) göre ayarlanır; süre ve direnç, hastanın toleransına göre kademeli olarak artırılır (Sommers et al., 2015). Hasta ayağa kalkabildiğinde yerinde yürüme ve yürüteç ya da destek ile yürüme, aerobik eğitimin işlevsel bileşenini oluşturur.

Dirençli Egzersiz Eğitimi

Dirençli egzersiz eğitimi, ICU-AW'nin en belirgin bileşeni olan iskelet kası kuvvet kaybını hedef alır. Hasta işbirliği yapabildiğinde serbest ağırlıklar, elastik bantlar ya da manuel direnç ile üst ve alt ekstremite büyük kas gruplarına yönelik egzersizler uygulanır. Uzman önerileri, dirençli egzersizlerin bir maksimum tekrarın yaklaşık %50–70'i düzeyinde, 8–10 tekrardan oluşan 3 set şeklinde uygulanmasını ve hastanın yanıtına göre kademeli olarak ilerletilmesini önermektedir (Sommers et al., 2015). Bir maksimum tekrarın ölçülemediği durumlarda, yük algılanan zorluk düzeyine göre belirlenebilir.

Dirençli egzersizin tek başına etkisini inceleyen çalışmalar sınırlı olup kanıtların büyük bölümü çok bileşenli rehabilitasyon programlarından elde edilmiştir (Morris et al., 2016; Wright et al., 2018). Yoğun bakımdan taburcu olan hastalarda nöromusküler stimülasyon ve bireyselleştirilmiş rehabilitasyonun kas kuvveti üzerine ek bir yarar sağlamadığını bildiren çalışmalar da bulunmaktadır (Patsaki et al., 2017). Bu nedenle dirençli egzersiz, kas kaybının önlenmesinde tek başına değil, mobilizasyon, aerobik egzersiz ve yeterli beslenme desteğiyle birlikte ele alınmalıdır.

Nöromusküler Elektrik Stimülasyonu

Nöromusküler elektrik stimülasyonu (NMES), yüzeyel elektrotlar aracılığıyla kas kasılması oluşturarak, istemli egzersize katılamayan sedatize ya da bilinci kapalı hastalarda kas kütlesini ve kuvvetini korumayı amaçlar. Fonksiyonel elektrik stimülasyonunun sikloergometre ile birlikte kullanıldığı uygulamalar da bu kapsamda değerlendirilmektedir. Routsi et al. (2010) tarafından yapılan çalışmada, yoğun bakıma yatışın ikinci gününden itibaren her gün kuadriseps ve peroneus longus kaslarına uygulanan NMES'in (45 Hz, 400 μs, 12 sn kasılma/6 sn dinlenme, günde 55 dakika) kritik hastalık polinöromiyopatisi gelişimini azalttığı ve weaning süresini kısalttığı bildirilmiştir.

Ancak NMES ile ilgili bulgular tutarlı değildir. Randomize kontrollü çalışmaların meta-analizinde NMES'in kas kuvveti, mekanik ventilasyon süresi ve mortalite üzerinde anlamlı bir etkisi gösterilememiştir (Zayed et al., 2020). Sepsis, ödem, vazopressör kullanımı ve kas zarı uyarılabilirliğindeki azalma, yeterli kas kasılması elde edilmesini güçleştirebilir. Bu nedenle NMES, aktif egzersize katılamayan ve yüksek ICU-AW riski taşıyan hastalarda tamamlayıcı bir yöntem olarak değerlendirilmelidir (Vanhorebeek et al., 2020).

Hava Yolu Temizleme Teknikleri ve Öksürük Fasilitasyonu

Mekanik ventilasyon, sedasyon, mukosiliyer klirensin bozulması ve ekspiratuvar kas güçsüzlüğü, yoğun bakım hastalarında sekresyon birikimine ve etkisiz öksürüğe yol açar. Hava yolu temizleme uygulamaları; pozisyonlama ve postüral drenaj, perküsyon ve vibrasyon, manuel ya da ventilatör aracılı hiperinflasyon, aspirasyon ve öksürük destek teknikleri olarak sıralanabilir (Gosselink et al., 2008). Bu uygulamalar özellikle atelektazi, pnömoni ve yoğun sekresyonu olan hastalarda endikedir.

Öksürük fasilitasyonu, öksürüğün inspiratuvar, kompresyon ve ekspulsif evrelerinin desteklenmesine dayanır. Manuel destekli öksürükte ekspirasyon sırasında abdominal ya da torakal bölgeye uygulanan basınçla ekspiratuvar akım artırılır. Mekanik insuflasyon-eksuflasyon (MI-E) ise pozitif basınçla akciğerlerin şişirilmesini takiben hızlı negatif basınç uygulanmasıyla öksürüğü taklit eder. Ekstübasyon sonrası standart bakıma eklenen MI-E'nin reentübasyon oranını azalttığı gösterilmiş olsa da (Gonçalves et al., 2012), öksürük destek tekniklerinin weaning ve ekstübasyon sonuçları üzerine etkisine ilişkin kanıtın kesinliği düşüktür (Rose et al., 2017). Ekstübasyon öncesi öksürük tepe akımı ve sekresyon miktarının değerlendirilmesi, bu tekniklerden yarar görebilecek hastaların belirlenmesine yardımcı olur.

Tablo 3. Yoğun Bakımda Kardiyopulmoner Rehabilitasyon Uygulamaları ve Dozaj İlkeleri

Uygulama	Uygun hasta	Dozaj ve uygulama ilkeleri
Erken mobilizasyon	Güvenlik kriterlerini karşılayan tüm hastalar	Pozisyonlama ve pasif hareketlerden başlayarak yatak kenarında oturma, ayakta durma, transfer ve yürümeye kademeli ilerleme; günlük hedef belirlenmesi

Uygulama	Uygun hasta	Dozaj ve uygulama ilkeleri
İnspiratuvar kas eğitimi	Uzamış mekanik ventilasyon, weaning güçlüğü, weaning sonrası dönem	MIP'in %30–50'si ile başlama; günde 1–2 kez, 6–10 nefeslik 3–5 set; tolerans doğrultusunda yük artışı
Aerobik egzersiz	Sedatize hasta (pasif) ve işbirliği yapan hasta (aktif)	Yatak başı sikloergometre, günde yaklaşık 20 dakika; yoğunluk Borg skalası, kalp hızı ve SpO2 yanıtına göre
Dirençli egzersiz	İşbirliği yapabilen hasta	1 maksimum tekrarın %50–70'i ile 8–10 tekrar, 3 set; büyük kas gruplarına öncelik
Nöromusküler elektrik stimülasyonu	Aktif egzersize katılamayan, ICU-AW riski yüksek hasta	Kuadriseps ve tibialis anterior/peroneus longus; yaklaşık 45 Hz, 300–400 μs, günde 30–60 dakika
Hava yolu temizleme ve öksürük fasilitasyonu	Sekresyon birikimi, atelektazi, etkisiz öksürük	Pozisyonlama, hiperinflasyon, manuel destekli öksürük, mekanik insuflasyon-eksuflasyon; öksürük tepe akımı ile izlem

Kaynak: Gosselink et al. (2008), Sommers et al. (2015), Bissett et al. (2016) ve Routsi et al. (2010) temel alınarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Kardiyak Hastalarda ve Kardiyak Cerrahi Sonrasında Rehabilitasyon

Kardiyak cerrahi sonrasında yoğun bakımda izlenen hastalar ile akut kalp yetmezliği, akut koroner sendrom ya da kardiyojenik şok nedeniyle yoğun bakımda tedavi edilen hastalar, kardiyopulmoner rehabilitasyonun kardiyak bileşeninin ön plana çıktığı gruplardır. Bu hastalarda yoğun bakımda başlatılan rehabilitasyon, kardiyak rehabilitasyonun hastane içi (faz I) dönemine karşılık gelir ve klinik stabilitenin sağlanmasının ardından erken mobilizasyon, solunum egzersizleri ve düşük yoğunluklu egzersizlerle başlatılır (Ambrosetti et al., 2021). Kardiyak cerrahi sonrasında uygulanan erken mobilizasyonun fiziksel işlev üzerinde olumlu etkileri olduğu gösterilmiştir (Kanejima et al., 2020).

Kardiyak cerrahi sonrasında atelektazi ve pnömoni gibi pulmoner komplikasyonlar sık görüldüğünden, rehabilitasyonun solunumsal bileşeni bu hasta grubunda da önemlidir. Yüksek riskli koroner arter baypas cerrahisi adaylarında ameliyat öncesinde uygulanan yoğun IMT'nin postoperatif pulmoner komplikasyonları ve pnömoniyi azalttığı gösterilmiştir (Hulzebos et al., 2006). Medyan sternotomi sonrasında geleneksel olarak uygulanan kısıtlayıcı sternal önlemler yerine, ağrı sınırları içinde üst ekstremite kullanımına izin veren daha esnek önlemlerin benzer güvenlik ve işlevsel sonuçlar sağladığı bildirilmiştir (Katijjahbe et al., 2018). Bu hastalarda egzersiz yoğunluğu belirlenirken inotrop ve vazopressör desteği, ritim bozuklukları, geçici pacemaker, drenler ve hemodinamik yanıt birlikte değerlendirilmelidir. Beta blokör kullanımı nedeniyle kalp hızı yanıtı sınırlı olabileceğinden, algılanan zorluk düzeyi (Borg skalası) yoğunluğun ayarlanmasında yol gösterici olarak kullanılabilir (Ambrosetti et al., 2021).

Pozisyonlama ve Özel Durumlar

Pozisyonlama, yoğun bakımda hem solunumsal hem de muskuloskeletal amaçlarla kullanılan temel bir uygulamadır. Yarı oturur pozisyon aspirasyon riskini azaltırken, yan yatış ve sık pozisyon değişimleri ventilasyon-perfüzyon uyumunu iyileştirir, sekresyon drenajını kolaylaştırır ve basınç yaralarını önler. Ağır ARDS'de prone pozisyon oksijenasyonu iyileştiren önemli bir tedavi stratejisidir; COVID-19 pandemisi sürecinde fizyoterapistlerin prone pozisyonlama ekiplerinde etkin rol aldığı ve yoğun bakım sonrasında da rehabilitasyon gereksiniminin belirgin biçimde arttığı vurgulanmıştır (Thomas et al., 2020). Ekstrakorporeal membran oksijenasyonu (ECMO) desteği alan hastalarda da deneyimli merkezlerde, multidisipliner ekip eşliğinde ve kanül güvenliği sağlanarak yürümeyi de içeren aktif mobilizasyonun güvenle uygulanabildiği bildirilmiştir (Abrams et al., 2014).

Rehabilitasyon programı, hasta yoğun bakımdan servise ve taburculuk sonrasında eve geçtiğinde de sürdürülmelidir. Yoğun bakımdaki kazanımların korunması ve PICS'in fiziksel bileşeninin azaltılması için servis döneminde ve taburculuk sonrasında yapılandırılmış egzersiz programlarına devam edilmesi ve hastanın uzun dönemde izlenmesi önerilmektedir (Needham et al., 2012; Rousseau et al., 2021).

Sonuç

Kritik hastalık; ICU-AW, kritik hastalık polinöromiyopatisi, VIDD ve immobilizasyonun sistemik etkileri aracılığıyla hastaların uzun dönemli işlevsel kapasitesini ciddi biçimde tehdit etmektedir. Kardiyopulmoner rehabilitasyon; erken mobilizasyon, inspiratuvar kas eğitimi, aerobik ve dirençli egzersiz eğitimi, nöromusküler elektrik stimülasyonu ve hava yolu temizleme tekniklerini kapsayan, multidisipliner ekip tarafından yürütülen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, mekanik ventilasyondaki hastalardan kardiyak cerrahi sonrası ve ECMO desteği alan hastalara kadar geniş bir hasta grubunda uygulanabilmektedir. Güncel kanıtlar, bu uygulamaların güvenli olduğunu ve özellikle uygun hastalarda kas kuvveti, weaning ve işlevsel sonuçlar üzerinde olumlu etkiler sağlayabildiğini göstermektedir; ancak en uygun başlama zamanı, dozaj ve hasta seçimi konusundaki belirsizlikler sürmektedir. Klinik uygulamada başlama ve sonlandırma kriterleri gözetilerek, standart değerlendirme araçlarıyla izlenen, bireyselleştirilmiş ve kademeli olarak ilerletilen programlar tercih edilmelidir. Türkiye'de yoğun bakım rehabilitasyonunun yaygınlaşması için kanıta dayalı protokollerin oluşturulması, fizyoterapistlerin yoğun bakım ekibine etkin katılımı ve bu alanda çok merkezli araştırmaların artırılması gerekmektedir.

Kaynakça

Abrams, D., Javidfar, J., Farrand, E., Mongero, L. B., Agerstrand, C. L., Ryan, P., Zemmel, D., Galuskin, K., Morrone, T. M., Boerem, P., Bacchetta, M., & Brodie, D. (2014). Early mobilization of patients receiving extracorporeal membrane oxygenation: A retrospective cohort study. *Critical Care, 18*(1), Article R38. https://doi.org/10.1186/cc13746

Ambrosetti, M., Abreu, A., Corrà, U., Davos, C. H., Hansen, D., Frederix, I., Iliou, M. C., Pedretti, R. F. E., Schmid, J.-P., Vigorito, C., Voller, H., Wilhelm, M., Piepoli, M. F., Bjarnason-Wehrens, B., Berger, T., Cohen-Solal, A., Cornelissen, V., Dendale, P., Doehner, W., . . ., Zwisler, A.-D. O. (2021). Secondary prevention through comprehensive cardiovascular rehabilitation: From knowledge to implementation. 2020 update. A position paper from the Secondary Prevention and Rehabilitation Section of the European Association of Preventive Cardiology. *European Journal of Preventive Cardiology, 28*(5), 460–495. https://doi.org/10.1177/2047487320913379

Bakhru, R. N., McWilliams, D. J., Wiebe, D. J., Spuhler, V. J., & Schweickert, W. D. (2016). Intensive care unit structure variation and implications for early mobilization practices: An international survey. *Annals of the American Thoracic Society, 13*(9), 1527–1537. https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201601-078OC

Bissett, B. M., Leditschke, I. A., Neeman, T., Boots, R., & Paratz, J. (2016). Inspiratory muscle training to enhance recovery from mechanical ventilation: A randomised trial. *Thorax, 71*(9), 812–819. https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2016-208279

Burtin, C., Clerckx, B., Robbeets, C., Ferdinande, P., Langer, D., Troosters, T., Hermans, G., Decramer, M., & Gosselink, R. (2009). Early exercise in critically ill patients enhances short-term functional recovery. *Critical Care Medicine, 37*(9), 2499–2505. https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e3181a38937

Çakmak, A., İnal İnce, D., Sağlam, M., Savcı, S., Vardar Yağlı, N., Çalık Kütükcü, E., Bozdemir Özel, C., Sonbahar Ulu, H., & Arıkan, H. (2019). Physiotherapy and rehabilitation implementation in intensive care units: A survey study. *Turkish Thoracic Journal, 20*(2), 114–119. https://doi.org/10.5152/TurkThoracJ.2018.18107

Corner, E. J., Wood, H., Englebretsen, C., Thomas, A., Grant, R. L., Nikoletou, D., & Soni, N. (2013). The Chelsea critical care physical assessment tool (CPAx): Validation of an innovative new tool to measure physical morbidity in the general adult critical care population; an observational proof-of-concept pilot study. *Physiotherapy, 99*(1), 33–41. https://doi.org/10.1016/j.physio.2012.01.003

Devlin, J. W., Skrobik, Y., Gélinas, C., Needham, D. M., Slooter, A. J. C., Pandharipande, P. P., Watson, P. L., Weinhouse, G. L., Nunnally, M. E., Rochwerg, B., Balas, M. C., van den Boogaard, M., Bosma, K. J., Brummel, N. E., Chanques, G., Denehy, L., Drouot, X., Fraser, G. L., Harris, J. E., . . ., Alhazzani, W. (2018). Clinical practice guidelines for the prevention and management of pain, agitation/sedation, delirium, immobility, and sleep disruption in adult patients in the ICU. *Critical Care Medicine, 46*(9), e825–e873. https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000003299

Doiron, K. A., Hoffmann, T. C., & Beller, E. M. (2018). Early intervention (mobilization or active exercise) for critically

ill adults in the intensive care unit. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2018*(3), Article CD010754. https://doi.org/10.1002/14651858.CD010754.pub2

Dres, M., Goligher, E. C., Heunks, L. M. A., & Brochard, L. J. (2017). Critical illness-associated diaphragm weakness. *Intensive Care Medicine, 43*(10), 1441–1452. https://doi.org/10.1007/s00134-017-4928-4

Elkins, M., & Dentice, R. (2015). Inspiratory muscle training facilitates weaning from mechanical ventilation among patients in the intensive care unit: A systematic review. *Journal of Physiotherapy, 61*(3), 125–134. https://doi.org/10.1016/j.jphys.2015.05.016

Fan, E., Cheek, F., Chlan, L., Gosselink, R., Hart, N., Herridge, M. S., Hopkins, R. O., Hough, C. L., Kress, J. P., Latronico, N., Moss, M., Needham, D. M., Rich, M. M., Stevens, R. D., Wilson, K. C., Winkelman, C., Zochodne, D. W., & Ali, N. A. (2014). An official American Thoracic Society clinical practice guideline: The diagnosis of intensive care unit-acquired weakness in adults. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 190*(12), 1437–1446. https://doi.org/10.1164/rccm.201411-2011ST

Fossat, G., Baudin, F., Courtes, L., Bobet, S., Dupont, A., Bretagnol, A., Benzekri-Lefèvre, D., Kamel, T., Muller, G., Bercault, N., Barbier, F., Runge, I., Nay, M. A., Skarzynski, M., Mathonnet, A., & Boulain, T. (2018). Effect of in-bed leg cycling and electrical stimulation of the quadriceps on global muscle strength in critically ill adults: A randomized clinical trial. *JAMA, 320*(4), 368–378. https://doi.org/10.1001/jama.2018.9592

Goligher, E. C., Dres, M., Fan, E., Rubenfeld, G. D., Scales, D. C., Herridge, M. S., Vorona, S., Sklar, M. C., Rittayamai, N., Lanys, A., Murray, A., Brace, D., Urrea, C., Reid, W. D., Tomlinson, G., Slutsky, A. S., Kavanagh, B. P., Brochard, L. J., & Ferguson, N. D. (2018). Mechanical ventilation-induced diaphragm atrophy strongly impacts clinical outcomes. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 197*(2), 204–213. https://doi.org/10.1164/rccm.201703-0536OC

Gonçalves, M. R., Honrado, T., Winck, J. C., & Paiva, J. A. (2012). Effects of mechanical insufflation-exsufflation in preventing respiratory failure after extubation: A randomized controlled trial. *Critical Care, 16*(2), Article R48. https://doi.org/10.1186/cc11249

Gosselink, R., Bott, J., Johnson, M., Dean, E., Nava, S., Norrenberg, M., Schönhofer, B., Stiller, K., van de Leur, H., & Vincent, J. L. (2008). Physiotherapy for adult patients with critical illness: Recommendations of the European Respiratory Society and European Society of Intensive Care Medicine Task Force on Physiotherapy for Critically Ill Patients. *Intensive Care Medicine, 34*(7), 1188–1199. https://doi.org/10.1007/s00134-008-1026-7

Hermans, G., & Van den Berghe, G. (2015). Clinical review: Intensive care unit acquired weakness. *Critical Care, 19*, Article 274. https://doi.org/10.1186/s13054-015-0993-7

Hermans, G., Van Mechelen, H., Clerckx, B., Vanhullebusch, T., Mesotten, D., Wilmer, A., Casaer, M. P., Meersseman, P., Debaveye, Y., Van Cromphaut, S., Wouters, P. J., Gosselink, R., & Van den Berghe, G. (2014). Acute outcomes and 1-year mortality of intensive care unit-acquired weakness: A cohort study and propensity-matched analysis. *American*

Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 190(4), 410–420. https://doi.org/10.1164/rccm.201312-2257OC

Herridge, M. S., Tansey, C. M., Matté, A., Tomlinson, G., Diaz-Granados, N., Cooper, A., Guest, C. B., Mazer, C. D., Mehta, S., Stewart, T. E., Kudlow, P., Cook, D., Slutsky, A. S., & Cheung, A. M. (2011). Functional disability 5 years after acute respiratory distress syndrome. *New England Journal of Medicine, 364*(14), 1293–1304. https://doi.org/10.1056/NEJMoa1011802

Hodgson, C. L., Stiller, K., Needham, D. M., Tipping, C. J., Harrold, M., Baldwin, C. E., Bradley, S., Berney, S., Caruana, L. R., Elliott, D., Green, M., Haines, K., Higgins, A. M., Kaukonen, K.-M., Leditschke, I. A., Nickels, M. R., Paratz, J., Patman, S., Skinner, E. H., . . ., Webb, S. A. (2014). Expert consensus and recommendations on safety criteria for active mobilization of mechanically ventilated critically ill adults. *Critical Care, 18*(6), Article 658. https://doi.org/10.1186/s13054-014-0658-y

Hulzebos, E. H. J., Helders, P. J. M., Favié, N. J., De Bie, R. A., Brutel de la Riviere, A., & Van Meeteren, N. L. U. (2006). Preoperative intensive inspiratory muscle training to prevent postoperative pulmonary complications in high-risk patients undergoing CABG surgery: A randomized clinical trial. *JAMA, 296*(15), 1851–1857. https://doi.org/10.1001/jama.296.15.1851

İbrahimoğlu, Ö., Saray Kılıç, H., & Açıkgöz, G. (2022). The Turkish adaptation, validity and reliability of intensive care unit mobility scale: A methodological study. *Turkiye Klinikleri Journal of Nursing Sciences, 14*(1), 20–25. https://doi.org/10.5336/nurses.2021-83032

Inoue, S., Hatakeyama, J., Kondo, Y., Hifumi, T., Sakuramoto, H., Kawasaki, T., Taito, S., Nakamura, K., Unoki, T., Kawai, Y., Kenmotsu, Y., Saito, M., Yamakawa, K., & Nishida, O. (2019). Post-intensive care syndrome: Its pathophysiology, prevention, and future directions. *Acute Medicine & Surgery, 6*(3), 233–246. https://doi.org/10.1002/ams2.415

Kanejima, Y., Shimogai, T., Kitamura, M., Ishihara, K., & Izawa, K. P. (2020). Effect of early mobilization on physical function in patients after cardiac surgery: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(19), Article 7091. https://doi.org/10.3390/ijerph17197091

Katijjahbe, M. A., Granger, C. L., Denehy, L., Royse, A., Royse, C., Bates, R., Logie, S., Nur Ayub, M. A., Clarke, S., & El-Ansary, D. (2018). Standard restrictive sternal precautions and modified sternal precautions had similar effects in people after cardiac surgery via median sternotomy ('SMART' Trial): A randomised trial. *Journal of Physiotherapy, 64*(2), 97–106. https://doi.org/10.1016/j.jphys.2018.02.013

Koyutürk, G., Parlak, H., Baydilli, K. N., Uyaroğlu, M. B., & Pehlivan, E. (2025). Reliability and validity of the Turkish version of the Chelsea Critical Care Physical Assessment Tool (CPAx-TR). *Turkish Journal of Intensive Care, 23*(3), 222–230. https://doi.org/10.4274/tjic.2025.665

Kress, J. P., & Hall, J. B. (2014). ICU-acquired weakness and recovery from critical illness. *New England Journal of Medicine, 370*(17), 1626–1635. https://doi.org/10.1056/NEJMra1209390

Lang, J. K., Paykel, M. S., Haines, K. J., & Hodgson, C. L. (2020). Clinical practice guidelines for early mobilization in the ICU: A systematic review. *Critical Care Medicine, 48*(11), e1121–e1128. https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000004574

Latronico, N., & Bolton, C. F. (2011). Critical illness polyneuropathy and myopathy: A major cause of muscle weakness and paralysis. *The Lancet Neurology, 10*(10), 931–941. https://doi.org/10.1016/S1474-4422(11)70178-8

Levine, S., Nguyen, T., Taylor, N., Friscia, M. E., Budak, M. T., Rothenberg, P., Zhu, J., Sachdeva, R., Sonnad, S., Kaiser, L. R., Rubinstein, N. A., Powers, S. K., & Shrager, J. B. (2008). Rapid disuse atrophy of diaphragm fibers in mechanically ventilated humans. *New England Journal of Medicine, 358*(13), 1327–1335. https://doi.org/10.1056/NEJMoa070447

Martin, A. D., Smith, B. K., Davenport, P. D., Harman, E., Gonzalez-Rothi, R. J., Baz, M., Layon, A. J., Banner, M. J., Caruso, L. J., Deoghare, H., Huang, T.-T., & Gabrielli, A. (2011). Inspiratory muscle strength training improves weaning outcome in failure to wean patients: A randomized trial. *Critical Care, 15*(2), Article R84. https://doi.org/10.1186/cc10081

Morris, P. E., Berry, M. J., Files, D. C., Thompson, J. C., Hauser, J., Flores, L., Dhar, S., Chmelo, E., Lovato, J., Case, L. D., Bakhru, R. N., Sarwal, A., Parry, S. M., Campbell, P., Mote, A., Winkelman, C., Hite, R. D., Nicklas, B., Chatterjee, A., & Young, M. P. (2016). Standardized rehabilitation and hospital length of stay among patients with acute respiratory failure: A randomized clinical trial. *JAMA, 315*(24), 2694–2702. https://doi.org/10.1001/jama.2016.7201

Morris, P. E., Goad, A., Thompson, C., Taylor, K., Harry, B., Passmore, L., Ross, A., Anderson, L., Baker, S., Sanchez, M., Penley, L., Howard, A., Dixon, L., Leach, S., Small, R., Hite, R. D., & Haponik, E. (2008). Early intensive care unit mobility therapy in the treatment of acute respiratory failure. *Critical Care Medicine, 36*(8), 2238–2243. https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e318180b90e

Needham, D. M., Davidson, J., Cohen, H., Hopkins, R. O., Weinert, C., Wunsch, H., Zawistowski, C., Bemis-Dougherty, A., Berney, S. C., Bienvenu, O. J., Brady, S. L., Brodsky, M. B., Denehy, L., Elliott, D., Flatley, C., Harabin, A. L., Jones, C., Louis, D., Meltzer, W., . . ., Harvey, M. A. (2012). Improving long-term outcomes after discharge from intensive care unit: Report from a stakeholders' conference. *Critical Care Medicine, 40*(2), 502–509. https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e318232da75

Nydahl, P., Ruhl, A. P., Bartoszek, G., Dubb, R., Filipovic, S., Flohr, H.-J., Kaltwasser, A., Mende, H., Rothaug, O., Schuchhardt, D., Schwabbauer, N., & Needham, D. M. (2014). Early mobilization of mechanically ventilated patients: A 1-day point-prevalence study in Germany. *Critical Care Medicine, 42*(5), 1178–1186. https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000000149

Parry, S. M., Granger, C. L., Berney, S., Jones, J., Beach, L., El-Ansary, D., Koopman, R., & Denehy, L. (2015). Assessment of impairment and activity limitations in the critically ill: A systematic review of measurement instruments and their clinimetric properties. *Intensive Care Medicine, 41*(5), 744–762. https://doi.org/10.1007/s00134-015-3672-x

Parry, S. M., & Puthucheary, Z. A. (2015). The impact of extended bed rest on the musculoskeletal system in the critical care environment. *Extreme Physiology & Medicine, 4*, Article 16. https://doi.org/10.1186/s13728-015-0036-7

Patsaki, I., Gerovasili, V., Sidiras, G., Karatzanos, E., Mitsiou, G., Papadopoulos, E., Christakou, A., Routsi, C., Kotanidou, A., & Nanas, S. (2017). Effect of neuromuscular stimulation and individualized rehabilitation on muscle strength in intensive care unit survivors: A randomized trial. *Journal of Critical Care, 40*, 76–82. https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2017.03.014

Pun, B. T., Balas, M. C., Barnes-Daly, M. A., Thompson, J. L., Aldrich, J. M., Barr, J., Byrum, D., Carson, S. S., Devlin, J. W., Engel, H. J., Esbrook, C. L., Hargett, K. D., Harmon, L., Hielsberg, C., Jackson, J. C., Kelly, T. L., Kumar, V., Millner, L., Morse, A., . . ., Ely, E. W. (2019). Caring for critically ill patients with the ABCDEF bundle: Results of the ICU Liberation Collaborative in over 15,000 adults. *Critical Care Medicine, 47*(1), 3–14. https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000003482

Puthucheary, Z. A., Rawal, J., McPhail, M., Connolly, B., Ratnayake, G., Chan, P., Hopkinson, N. S., Phadke, R., Dew, T., Sidhu, P. S., Velloso, C., Seymour, J., Agley, C. C., Selby, A., Limb, M., Edwards, L. M., Smith, K., Rowlerson, A., Rennie, M. J., . . ., Montgomery, H. E. (2013). Acute skeletal muscle wasting in critical illness. *JAMA, 310*(15), 1591–1600. https://doi.org/10.1001/jama.2013.278481

Rose, L., Adhikari, N. K. J., Leasa, D., Fergusson, D. A., & McKim, D. (2017). Cough augmentation techniques for extubation or weaning critically ill patients from mechanical ventilation. *Cochrane Database of Systematic*

Reviews, 2017(1), Article CD011833. https://doi.org/10.1002/14651858.CD011833.pub2

Rousseau, A.-F., Prescott, H. C., Brett, S. J., Weiss, B., Azoulay, E., Creteur, J., Latronico, N., Hough, C. L., Weber-Carstens, S., Vincent, J.-L., & Preiser, J.-C. (2021). Long-term outcomes after critical illness: Recent insights. *Critical Care, 25*, Article 108. https://doi.org/10.1186/s13054-021-03535-3

Routsi, C., Gerovasili, V., Vasileiadis, I., Karatzanos, E., Pitsolis, T., Tripodaki, E., Markaki, V., Zervakis, D., & Nanas, S. (2010). Electrical muscle stimulation prevents critical illness polyneuromyopathy: A randomized parallel intervention trial. *Critical Care, 14*(2), Article R74. https://doi.org/10.1186/cc8987

Schaller, S. J., Anstey, M., Blobner, M., Edrich, T., Grabitz, S. D., Gradwohl-Matis, I., Heim, M., Houle, T., Kurth, T., Latronico, N., Lee, J., Meyer, M. J., Peponis, T., Talmor, D., Velmahos, G. C., Waak, K., Walz, J. M., Zafonte, R., & Eikermann, M. (2016). Early, goal-directed mobilisation in the surgical intensive care unit: A randomised controlled trial. *The Lancet, 388*(10052), 1377–1388. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31637-3

Schweickert, W. D., Pohlman, M. C., Pohlman, A. S., Nigos, C., Pawlik, A. J., Esbrook, C. L., Spears, L., Miller, M., Franczyk, M., Deprizio, D., Schmidt, G. A., Bowman, A., Barr, R., McCallister, K. E., Hall, J. B., & Kress, J. P. (2009). Early physical and occupational therapy in mechanically ventilated, critically ill patients: A randomised controlled trial. *The Lancet, 373*(9678), 1874–1882. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60658-9

Sommers, J., Engelbert, R. H. H., Dettling-Ihnenfeldt, D., Gosselink, R., Spronk, P. E., Nollet, F., & van der Schaaf, M. (2015). Physiotherapy in the intensive care unit: An evidence-based, expert driven, practical statement and rehabilitation recommendations. *Clinical Rehabilitation, 29*(11), 1051–1063. https://doi.org/10.1177/0269215514567156

Takaoka, A., Utgikar, R., Rochwerg, B., Cook, D. J., & Kho, M. E. (2020). The efficacy and safety of in-intensive care unit leg-cycle ergometry in critically ill adults: A systematic review and meta-analysis. *Annals of the American Thoracic Society, 17*(10), 1289–1307. https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.202001-059OC

TEAM Study Investigators and the ANZICS Clinical Trials Group. (2022). Early active mobilization during mechanical ventilation in the ICU. *New England Journal of Medicine, 387*(19), 1747–1758. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2209083

Thomas, P., Baldwin, C., Bissett, B., Boden, I., Gosselink, R., Granger, C. L., Hodgson, C., Jones, A. Y. M., Kho, M. E., Moses, R., Ntoumenopoulos, G., Parry, S. M., Patman, S., & van der Lee, L. (2020). Physiotherapy management for COVID-19 in the acute hospital setting: Clinical practice recommendations. *Journal of Physiotherapy, 66*(2), 73–82. https://doi.org/10.1016/j.jphys.2020.03.011

Vanhorebeek, I., Latronico, N., & Van den Berghe, G. (2020). ICU-acquired weakness. *Intensive Care Medicine, 46*(4), 637–653. https://doi.org/10.1007/s00134-020-05944-4

Vorona, S., Sabatini, U., Al-Maqbali, S., Bertoni, M., Dres, M., Bissett, B., Van Haren, F., Martin, A. D., Urrea, C., Brace,

D., Parotto, M., Herridge, M. S., Adhikari, N. K. J., Fan, E., Melo, L. T., Reid, W. D., Brochard, L. J., Ferguson, N. D., & Goligher, E. C. (2018). Inspiratory muscle rehabilitation in critically ill adults: A systematic review and meta-analysis. *Annals of the American Thoracic Society, 15*(6), 735–744. https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201712-961OC

Wright, S. E., Thomas, K., Watson, G., Baker, C., Bryant, A., Chadwick, T. J., Shen, J., Wood, R., Wilkinson, J., Mansfield, L., Stafford, V., Wade, C., Furneval, J., Henderson, A., Hugill, K., Howard, P., Roy, A., Bonner, S., & Baudouin, S. (2018). Intensive versus standard physical rehabilitation therapy in the critically ill (EPICC): A multicentre, parallel-group, randomised controlled trial. *Thorax, 73*(3), 213–221. https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2016-209858

Zayed, Y., Kheiri, B., Barbarawi, M., Chahine, A., Rashdan, L., Chintalapati, S., Bachuwa, G., & Al-Sanouri, I. (2020). Effects of neuromuscular electrical stimulation in critically ill patients: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Australian Critical Care, 33*(2), 203–210. https://doi.org/10.1016/j.aucc.2019.04.003

BÖLÜM 4

YOĞUN BAKIM ÜNİTESİNDE EDİNİLMİŞ KAS ZAYIFLIĞI VE FİZYOTERAPİNİN ROLÜ

Cansu ÖZDEMİR[1], Tuğba KELEŞ REİS[2]

Giriş

Yoğun bakım üniteleri (YBÜ), yaşamı tehdit eden hastalık veya yaralanmaları bulunan hastalara ileri düzey tıbbi ve hemşirelik bakımı, sürekli izlem ve gerekli durumlarda organ destek tedavileri sağlayan özel sağlık hizmeti birimleridir (Ervin vd., 2018; Marshall vd., 2017). Genellikle hastane içerisinde belirli bir alanda yer almakla birlikte, faaliyet alanları acil servisler, yataklı servisler ve takip polikliniklerine kadar uzanmaktadır (Shime, 2021; Vincent, 2019). Bu ünitelerde temel amaç, hastaların bozulan fizyolojik fonksiyonlarını stabilize etmek, organ yetmezliklerini desteklemek ve kritik hastalığın altında yatan nedeni tedavi etmektir (Jackson & Cairns, 2021). Gelişmiş monitörizasyon yöntemleri ve yaşam destek teknolojileri sayesinde solunum, kardiyovasküler, renal ve nörolojik sistemlerin sürekliliği sağlanırken; enfeksiyonlar, deliryum ve edinilmiş kas güçsüzlüğü gibi komplikasyonların önlenmesine

[1] Öğretim Görevlisi, Avrasya Üniversitesi, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Fizyoterapi Programı. Orcid: 0009-0000-8908-5941.
[2] Öğretim Görevlisi, Avrasya Üniversitesi, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Ortopedik Protez ve Ortez Programı. Orcid: 0000-0002-2847-9696.

yönelik uygulamalar da yürütülmektedir (Martinez vd., 2022). Yoğun bakım hizmetleri yalnızca yaşamın sürdürülmesini değil, aynı zamanda hastaların uzun dönem fonksiyonel iyilik halinin korunmasını ve yaşam kalitesinin artırılmasını da hedeflemektedir (Case vd., 2024). Bu nedenle YBÜ, kritik hastaların zamanında ve uygun düzeyde bakım almasını sağlayarak mortalite ve morbiditenin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Gomides vd., 2019).

YBÜ hastaları genellikle ileri yaşta, erkek cinsiyetin daha sık görüldüğü ve birden fazla kronik hastalığa sahip bireylerden oluşmaktadır (Aguiar vd., 2021). Bu hastalarda diyabet, hipertansiyon, kardiyovasküler hastalıklar ve kronik böbrek hastalığı gibi komorbiditeler yaygın olarak görülmektedir (Bohula vd., 2019). YBÜ'ye yatış nedenleri arasında kardiyovasküler olaylar, solunum yetmezliği, sepsis, şok, travma ve nörolojik aciller ön planda yer almaktadır. Hastaların önemli bir kısmı mekanik ventilasyon ve diğer yaşam destek tedavilerine ihtiyaç duymaktadır (Aguiar vd., 2021; Siddika vd., 2023). Yoğun bakımda kalış süresi birçok hasta için nispeten kısa olmakla birlikte, hastaların klinik durumlarının ağırlığı nedeniyle mortalite riski yüksektir (Suh vd., 2025). Ancak uygulanan tedavilerin karmaşıklığı, mekanik ventilasyon gereksinimi ve çoklu organ desteği gibi nedenlerle yoğun bakımda kalış süresi uzayabilmektedir (Bekele vd., 2024; Ibrahim vd., 2024; Sabaz & Aşar, 2021). Uzun süreli yoğun bakım yatışı; enfeksiyonlar, deliryum, basınç yaralanmaları, kontraktürler ve fonksiyonel kapasitede azalma gibi çeşitli komplikasyonların gelişme riskini artırmaktadır (Desai vd., 2011; Gravante vd., 2024). Bu komplikasyonlar arasında YBÜ'de edinilmiş kas zayıflığı (ICU-acquired weakness, ICU-AW), yüksek görülme sıklığı ve hastaların kısa ve uzun dönem fonksiyonel sonuçları üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle önemli bir yere sahiptir (Chen & Huang, 2024). ICU-AW, kritik hastalık sürecinde gelişen yaygın kas güçsüzlüğü ile karakterize olup mekanik ventilasyon süresinin uzaması, yoğun

bakım ve hastanede kalış süresinin artması, rehabilitasyon gereksiniminin yükselmesi ve yaşam kalitesinin azalması ile ilişkilendirilmektedir (Hiser vd., 2025). Bu nedenle, kas zayıflığının önlenmesi ve etkin yönetimi kritik bakımın temel hedefleri arasında yer almaktadır.

Son yıllarda erken mobilizasyon protokolleri, elektrofiziksel ajanlar, terapötik egzersiz ve rehabilitasyon uygulamalarını içeren fizyoterapi yaklaşımlarının, edinilmiş kas zayıflığının önlenmesinde ve etkilerinin azaltılmasında önemli bir rol oynadığı bildirilmektedir. Bu derlemenin amacı, yoğun bakımda edinilmiş kas zayıflığının yönetiminde fizyoterapinin rolünü ve klinik sonuçlar üzerindeki etkilerini güncel literatür ışığında incelemektir.

Yoğun Bakım Ünitesinde Edinilmiş Kas Zayıflığı (ICU-AW) ve Risk Faktörleri

Yoğun bakım ünitesinde edinilmiş kas zayıflığı (Intensive Care Unit-Acquired Weakness, ICU-AW), kritik hastalarda gelişen ve mevcut güçsüzlüğü açıklayabilecek başka bir nöromüsküler nedenin bulunmadığı durumlarda tanımlanan yaygın kas zayıflığıdır (Vanhorebeek vd., 2020). Klinik olarak genellikle simetrik özellik gösteren bu tablo, özellikle proksimal ekstremite kaslarını ve solunum kaslarını etkilemekte, yüz ve ekstraoküler kaslar ise çoğunlukla korunmaktadır. ICU-AW; kritik hastalık polinöropatisi (CIP), kritik hastalık miyopatisi (CIM) veya her iki durumun birlikte görüldüğü kritik hastalık polinöromiyopatisi şeklinde ortaya çıkabilmektedir (Saxena & Hodgson, 2012).

ICU-AW, yoğun bakım ünitesinde en sık karşılaşılan nöromüsküler komplikasyonlardan biridir. Literatürde prevalansın hasta grubuna, değerlendirme yöntemine ve hastalığın şiddetine bağlı olarak değişmekle birlikte yaklaşık %30–50 arasında olduğu bildirilmektedir (Hermans & Van den Berghe, 2015a). Sistematik derlemelerde median prevalansın %40–43 düzeylerinde olduğu

belirtilirken, sepsisli hastalarda bu oranın %60'ın üzerine çıkabildiği rapor edilmektedir (Vanhorebeek vd., 2020).

ICU-AW gelişiminde birçok hasta ve tedavi ilişkili faktör rol oynamaktadır. Bu faktörler modifiye edilemeyen ve modifiye edilebilir risk faktörleri olarak sınıflandırılabilir (Farhan vd., 2016) (Tablo 1).

Tablo 1. ICU-AW İçin Risk Faktörleri

Modifiye Edilemeyen Risk Faktörleri	*Modifiye Edilebilir Risk Faktörleri*
İleri Yaş	*Uzun Süreli İmmobilizasyon*
Sepsis	*Hiperglisemi*
Hastalık Şiddetinin Yüksek Olması	*Nöromüsküler Bloker Ajan Kullanımı*
Septik Şok	*Kortikosteroid Kullanımı*
Multipl Organ Yetmezliği	*Aminoglikozid Kullanımı*
Uzamış Kritik Hastalık Süreci	*Parenteral Beslenme*
Akut Solunum Yetmezliği	*Uzamış Mekanik Ventilasyon*

ICU-AW Patofizyolojisi

ICU-AW'nin patofizyolojisi karmaşık ve çok faktörlüdür. Hastalığın gelişiminde sistemik inflamasyon, metabolik stres, immobilizasyon ve kritik hastalığa bağlı nöromüsküler hasar temel rol oynamaktadır (Petrucci vd., 2025). İnflamatuar yanıt ve katabolik süreçler kas protein yıkımını artırırken protein sentezini baskılayarak kas atrofisine ve kuvvet kaybına yol açmaktadır. Bu süreçte ubikuitin-proteazom sistemi ve otofaji mekanizmalarındaki düzensizlikler proteolizi hızlandırmaktadır (Pierre vd., 2025).

ICU-AW'nin nöropatik ve miyopatik bileşenlerini oluşturan CIP ve CIM'de farklı ancak birbiriyle ilişkili mekanizmalar rol oynamaktadır. CIP'de mikrovasküler değişikliklere bağlı aksonal hasar gelişirken, CIM'de seçici miyozin kaybı ve kas kontraktilitesinde bozulma görülmektedir. Ayrıca mikrosirkülasyon bozuklukları ve mitokondriyal disfonksiyon, kas dokusunda oksijen kullanımını ve ATP üretimini azaltarak kas performansını olumsuz etkilemektedir (Cheung vd., 2021; Kanova & Kohout, 2022; Pierre vd., 2025).

Uzamış immobilizasyon, mekanik ventilasyon, sepsis, çoklu organ yetmezliği, hiperglisemi ve bazı ilaçların kullanımı bu süreçleri daha da şiddetlendirebilmektedir (Voiriot vd., 2022). Sonuç olarak nöropatik, miyopatik ve metabolik mekanizmaların etkileşimi ICU-AW'nin ortaya çıkmasına ve yoğun bakım sonrası dönemde devam edebilen fonksiyonel limitasyonlara neden olmaktadır.

ICU-AW Değerlendirme ve Tanı Kriterleri

ICU-AW'nin tanısı temel olarak klinik değerlendirmeye dayanmaktadır. Hastalarda kritik hastalık sonrasında gelişen yaygın ve simetrik kas güçsüzlüğünün, başka bir nöromüsküler hastalık ile açıklanamaması gerekmektedir (Piva vd., 2019). Bununla birlikte günümüzde ICU-AW tanısında tek bir altın standart yöntem bulunmamakta olup, klinik değerlendirme çoğu zaman elektrofizyolojik ve görüntüleme yöntemleri ile desteklenmektedir.

Kas kuvvetinin değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan yöntem Medical Research Council Sum Score (MRC-SS)'dur. Bu yöntemde üst ve alt ekstremitelerde belirlenen 12 kas grubunun kas kuvveti değerlendirilmekte ve toplam puan 0–60 arasında hesaplanmaktadır. MRC-SS değerinin 48 puanın altında olması veya ortalama kas kuvveti skorunun 4'ün altında bulunması ICU-AW lehine kabul edilmektedir (Turan vd., 2020). El kavrama kuvveti ölçümü de hızlı ve objektif bir değerlendirme yöntemi olarak

kullanılmakta olup, erkeklerde 11 kg'nin, kadınlarda ise 7 kg'nin altındaki değerler ICU-AW ile ilişkilendirilmektedir (Piva vd., 2019).

Elektrofizyolojik incelemeler özellikle CIP, CIM ve CIPNM ayrımında önemli rol oynamaktadır (Latronico vd., 2023). Sinir ileti çalışmaları ve elektromiyografi, klinik değerlendirmenin yetersiz kaldığı veya hastanın kooperasyon sağlayamadığı durumlarda tanıya katkı sağlamaktadır. Bunun yanında peroneal sinir testi, yoğun bakım hastalarında uygulanabilen hızlı bir tarama yöntemi olarak önerilmektedir (Piva vd., 2019).

Son yıllarda kas ultrasonografisi, ICU-AW'nin erken tanısı ve takibinde umut verici bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Kas kesit alanı, kas kalınlığı ve pennasyon açısı gibi parametrelerde meydana gelen değişikliklerin ilerleyen dönemde gelişebilecek kas zayıflığını öngörebileceği bildirilmektedir. Ayrıca ultrason bulgularının inflamatuar belirteçlerle birlikte değerlendirilmesinin tanısal doğruluğu artırabileceği düşünülmektedir (Paolo vd., 2022; Xin vd., 2025).

Mevcut kanıtlar, ICU-AW'nin değerlendirilmesinde hiçbir yöntemin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle klinik muayene, kas kuvveti testleri, elektrofizyolojik incelemeler ve görüntüleme yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bütüncül bir yaklaşım önerilmektedir.

ICU-AW Yönetimi ve Koruyucu Yaklaşımlar

ICU-AW’nin güncel yönetimi esas olarak farmakolojik bir tedaviye değil, risk faktörlerinin azaltılmasına ve hastalığın erken dönemde önlenmesine dayanmaktadır. Kritik hastalık sürecinde kas zayıflığını tamamen ortadan kaldıran spesifik bir ilaç tedavisi bulunmamaktadır. Bu nedenle klinik yaklaşım, sistemik komplikasyonların kontrolü, metabolik stabilizasyon ve erken

dönemde başlatılan çok bileşenli bakım stratejileri üzerine odaklanmaktadır (Hermans & Van den Berghe, 2015b).

Koruyucu tıbbi yaklaşımlar arasında glisemik kontrolün sağlanması, sepsis ve organ yetmezliği gibi durumların etkin yönetimi, erken dönemde aşırı parenteral beslenmeden kaçınılması ve kas zayıflığını artırabileceği bilinen ilaçların (kortikosteroidler ve nöromüsküler bloker ajanlar gibi) mümkün olduğunca sınırlı kullanılması yer almaktadır (Hermans & Van den Berghe, 2015b). Bununla birlikte sedasyonun azaltılması ve ABCDEF bakım paketi kapsamında erken mobilizasyonun teşvik edilmesi, ICU-AW gelişimini azaltmaya yönelik temel stratejiler arasında kabul edilmektedir (Xu vd., 2024).

Beslenme stratejileri tek başına ICU-AW'nin önlenmesinde yeterli olmamakla birlikte, erken mobilizasyon ile kombine edildiğinde kas kaybını azaltıcı ve fonksiyonel iyileşmeyi destekleyici etkiler gösterebilmektedir (Formenti vd., 2025). Ayrıca β-hidroksi-β-metilbütirat ve omega-3 yağ asitleri gibi bazı nutrisyonel desteklerin kas kütlesi ve kas kuvveti üzerine sınırlı ancak umut verici etkileri bildirilmektedir (Zhang vd., 2025).

Farmakolojik tedavi açısından ICU-AW için etkinliği kanıtlanmış spesifik bir ilaç tedavisi bulunmamaktadır. Myostatin inhibitörleri, mitokondriyi hedefleyen ajanlar ve çeşitli deneysel moleküller üzerine yapılan çalışmalar umut verici olmakla birlikte, mevcut kanıt düzeyi klinik uygulama için yeterli değildir (Boelens vd., 2022; Zhang vd., 2025).

ICU-AW Yönetiminde Fizyoterapinin Rolü

ICU-AW gelişimi ve ilerleyişi üzerinde etkili olan immobilizasyon, kas inaktivasyonu ve yoğun bakım ilişkili fonksiyon kayıpları, fizyoterapiyi bu klinik tablonun yönetiminde merkezi bir bileşen haline getirmektedir. Bu bağlamda fizyoterapi uygulamaları, yalnızca kas gücünün korunmasına yönelik değil, aynı

zamanda erken dönemde mobilizasyonun sağlanması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Son yıllarda erken mobilizasyon, egzersiz uygulamaları ve nöromüsküler elektrik stimülasyonu gibi müdahalelerin ICU-AW üzerindeki etkilerine ilişkin kanıtlar artmakta olup, bu yaklaşımlar giderek daha yapılandırılmış klinik protokoller içinde yer almaktadır.

Erken Mobilizasyon

Erken mobilizasyon, ICU-AW'nin önlenmesi ve yönetiminde en yaygın kullanılan fizyoterapi yaklaşımlarından biridir (Formenti vd., 2025) Literatürde erken mobilizasyonun başlama zamanı konusunda tam bir görüş birliği bulunmamakla birlikte, uygulamanın klinik olarak stabil hastalarda yoğun bakım yatışının ilk 24–72 saati içerisinde başlatılmasının daha olumlu sonuçlarla ilişkili olduğu gösterilmiştir (Ruo Yu vd., 2024). Erken mobilizasyon programları genellikle pasif ve aktif yardımlı eklem hareket açıklığı egzersizleri ile başlamakta; hastanın klinik durumuna bağlı olarak yatak içi aktif egzersizler, yatak kenarında oturma, transfer aktiviteleri, ayağa kalkma ve yürüme uygulamalarına doğru ilerlemektedir. Ayrıca yatak içi bisiklet ergometresi, tilt table uygulamaları ve nöromüsküler elektrik stimülasyonu gibi yöntemler de mobilizasyon programlarını desteklemek amacıyla kullanılabilmektedir (Anekwe vd., 2020; Formenti vd., 2025b).

Erken mobilizasyonun güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için hastanın hemodinamik durumu, solunum parametreleri, bilinç düzeyi ve egzersiz toleransının düzenli olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Sepúlveda vd., 2025). Bu nedenle güncel rehberler, multidisipliner ekip yaklaşımıyla yürütülen ve önceden belirlenmiş güvenlik kriterlerini içeren yapılandırılmış mobilizasyon protokollerinin kullanılmasını önermektedir.

Erken mobilizasyonun etkinliğine ilişkin kanıtlar büyük ölçüde sistematik derlemeler, meta-analizler ve randomize kontrollü

çalışmalardan elde edilmektedir. Mevcut veriler, erken rehabilitasyon uygulamalarının ICU-AW gelişme riskini azaltabildiğini, fonksiyonel sonuçları iyileştirebildiğini ve yoğun bakımda kalış süresini kısaltabildiğini göstermektedir (Bento vd., 2025; Chang vd., 2026). Ayrıca nöromüsküler elektrik stimülasyonunun erken mobilizasyon programlarına eklenmesinin kas kuvveti ve fonksiyonel sonuçlar üzerinde ek yararlar sağlayabileceği gösterilmiştir (Othman vd., 2024).

Bununla birlikte çalışmalar arasında hasta popülasyonu, uygulama içeriği ve yoğunluğu açısından belirgin bir heterojenlik bulunmaktadır. Bazı meta-analizlerde erken mobilizasyonun ICU-AW gelişimini anlamlı düzeyde azalttığı bildirilirken, özellikle mekanik ventilasyon uygulanan hastalarda yürütülen bazı çalışmalarda standart bakım ile karşılaştırıldığında iyileşmelerin sınırlı olduğu gösterilmiştir (Menges vd., 2021). Bu nedenle erken mobilizasyonun ICU-AW üzerindeki olumlu etkileri genel olarak kabul edilmekle birlikte; optimal uygulama zamanı, yoğunluğu ve içeriği ile ilgili belirsizlikler devam etmektedir.

Egzersiz Temelli Rehabilitasyon

ICU-AW'nin önlenmesi ve yönetiminde kullanılan egzersiz yaklaşımları, hastanın bilinç düzeyi, hemodinamik stabilitesi ve kas gücüne göre ilerleyen kademeli rehabilitasyon programlarından oluşmaktadır. Erken dönemde, özellikle sedasyon altında veya mekanik ventilasyon desteği alan hastalarda pasif eklem hareket açıklığı egzersizleri, pozisyonlama ve yatak içi hareketler uygulanırken; hastanın klinik durumu düzeldikçe aktif egzersizler, kuvvetlendirme egzersizleri ve fonksiyonel aktiviteler programa eklenmektedir (Bai vd., 2026)

Pasif ROM egzersizleri eklem hareket açıklığının korunması, kontraktürlerin önlenmesi ve immobilizasyona bağlı kas kaybının azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Sedatize ve mekanik

ventilasyon uygulanan hastalarda pasif hareketlerin kas kaybını azaltabileceği ve bazı hücresel belirteçlerde olumlu değişiklikler sağlayabileceği bildirilmiş olsa da pasif egzersizlerin tek başına ICU-AW gelişimini önlediğine dair kanıtlar sınırlıdır (Vollenweider vd., 2022). Aktif katılımın mümkün olduğu hastalarda uygulanan aktif ve aktif-yardımlı egzersizler ise, kas kuvvetinin korunmasına ve fonksiyonel iyileşmenin desteklenmesine katkı sağlamaktadır (Nazir & Anggraini, 2024).

Kas gücü arttıkça rehabilitasyon programları dirençli egzersizler ve fonksiyonel aktiviteler ile genişletilmektedir . Bu kapsamda üst ve alt ekstremite kuvvetlendirme egzersizleri, theraband veya hafif ağırlıklarla yapılan kuvvetlendirme çalışmaları, yatakta oturma, yatak kenarında oturma, otur-kalk aktiviteleri, ayakta durma ve yürüme uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır (Eggmann vd., 2018; Nazir & Anggraini, 2024; Wu vd., 2023). Kanıtlar, özellikle fonksiyonel görev odaklı egzersizlerin fiziksel fonksiyonların geri kazanılmasında önemli rol oynadığını göstermektedir (Burtin vd., 2009; Taito vd., 2019).

Egzersiz programları sıklıkla NMES veya yatak içi sikloergometre gibi yardımcı yöntemlerle desteklenmektedir. Yapılan çalışmalar, egzersizin NMES ile kombine uygulanmasının kas kuvveti kaybını azaltabildiğini, ICU-AW insidansını düşürebildiğini ve ventilasyon ile yoğun bakımda kalış süresini kısaltabildiğini göstermektedir (Verceles vd., 2021). Bu nedenle güncel literatür, ICU-AW rehabilitasyonunda tek bir egzersiz türünden ziyade pasif ve aktif hareketler, kuvvetlendirme, fonksiyonel aktiviteler ve gerektiğinde yardımcı teknolojilerin birlikte kullanıldığı, bireyselleştirilmiş ve progresif egzersiz programlarını önermektedir.

Nöromusküler Elektrik Stimülasyonu (NMES)

Nöromüsküler elektrik stimülasyonu (NMES), ICU-AW'nin önlenmesi ve tedavisinde en sık kullanılan yardımcı rehabilitasyon yöntemlerinden biridir. Özellikle mekanik ventilasyon desteği alan, aktif egzersize katılamayan veya kas kuvveti belirgin azalmış hastalarda kas kontraksiyonu oluşturmak amacıyla uygulanmaktadır. Çalışmalarda NMES genellikle kuadriseps femoris başta olmak üzere alt ekstremite kaslarına uygulanmakta, bazı protokollerde tibialis anterior, gastroknemius ve diğer alt ekstremite kas grupları da hedeflenmektedir (Kho vd., 2012; Kusumawardani vd., 2019). Uygulamalarda çoğunlukla 30–75 Hz frekans aralığında, bifazik dikdörtgen akım kullanıldığı ve akım şiddetinin görünür veya palpe edilebilir kas kontraksiyonu oluşturacak şekilde bireyselleştirildiği bildirilmektedir (Liu vd., 2020; Yustiawan vd., 2024).

NMES protokolleri çalışmalar arasında önemli farklılıklar göstermekle birlikte, uygulamalar genellikle günde 30–60 dakika, 5–10 gün boyunca veya yoğun bakım taburculuğuna kadar sürdürülmektedir. Sıklıkla 1:1 çalışma-dinlenme döngüsü (örneğin 10 saniye kasılma/10 saniye dinlenme) kullanılmakta ve tedavi öncesinde kısa bir ısınma, sonrasında ise soğuma periyodu yer almaktadır (Daum vd., 2026; Nakanishi vd., 2023). Son yıllarda NMES'nin erken mobilizasyon, aktif egzersizler veya yatak içi sikloergometre uygulamaları ile kombine edilmesi yaygınlaşmıştır.

Mevcut kanıtlar, erken dönemde uygulanan NMES'nin kas gücünün korunmasına katkı sağlayabildiğini, mekanik ventilasyon süresi ile yoğun bakımda kalış süresini azaltabildiğini ve ICU-AW gelişme riskini düşürebildiğini göstermektedir (Arfianti vd., 2025; Campos vd., 2022). Özellikle ROM egzersizleri ile birlikte uygulandığında ICU-AW insidansında belirgin azalmalar bildirilmiştir (Othman vd., 2024b). Bununla birlikte, literatürde frekans, puls süresi, uygulama süresi ve hedef kas grupları açısından önemli heterojenlik bulunmaktadır. Yakın tarihli bir sistematik

derleme, yoğun bakım hastalarında kullanılan 50 farklı NMES protokolü tanımlamış ve mevcut verilerin standart bir uygulama protokolü önermek için yetersiz olduğunu bildirmiştir (Daum vd., 2026). Bu nedenle NMES uygulamalarının hasta özelliklerine göre bireyselleştirilmesi ve kapsamlı rehabilitasyon programlarının bir parçası olarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

Pulmoner Rehabilitasyon ve Solunum Kas Eğitimi

Pulmoner rehabilitasyon, yoğun bakımda yatan kritik hastalarda kas fonksiyon kaybını azaltmayı, ventilatörden ayrılmayı kolaylaştırmayı ve genel fonksiyonel iyileşmeyi desteklemeyi amaçlayan temel yaklaşımlardır (Jang vd., 2019). Bu çerçevede erken mobilizasyon, pasif ve aktif egzersizler, uygun pozisyonlama ve solunum fizyoterapisi ana bileşenleri oluşturmaktadır. Hemodinamik olarak stabil hastalarda erken mobilizasyonun güvenli olduğu ve kas kaybını azalttığı gösterilmiştir (Huang vd., 2021a). Ayrıca göğüs fizyoterapisi ve sekresyon yönetimi, ventilasyon-perfüzyon dengesinin korunmasına katkı sağlamaktadır (Sunaryo vd., 2025). Literatür, mekanik ventilasyon sürecine entegre edilen pulmoner rehabilitasyonun MRC kas gücü skorlarını artırdığını, yoğun bakımda gelişen kas zayıflığını azalttığını ve hem ventilasyon süresi hem de yoğun bakım yatış süresini kısalttığını bildirmektedir (Huang vd., 2021b).

Solunum kas eğitimi, ICU-AW yönetiminde en sık kullanılan spesifik rehabilitasyon yaklaşımlarından biridir. Genellikle threshold tipi dirençli cihazlarla uygulanır ve temel amacı inspiratuvar kas gücünü artırmaktır (Bissett vd., 2019). IMT'nin maksimum inspiratuar basınç (MIP) ve ekspiratuar basınç (MEP) değerlerini artırabildiği, bazı çalışmalarda ise weaning süresini kısaltabileceği bildirilmekle birlikte, fonksiyonel sonuçlara etkisine dair kanıtlar sınırlıdır (Alonso-Pérez vd., 2025; Kazemi vd., 2024). Klinik uygulamalarda sıklıkla yüksek yoğunluklu protokoller tercih

edilmektedir. Bu protokollerde genellikle günde bir kez, MIP'nin %50 ve üzeri yükünde, 5 set 6 inspirasyon şeklinde uygulama yapılmakta ve yük progresif olarak artırılmaktadır (Bissett vd., 2019). Ancak mevcut çalışmalar, düşük ve yüksek yoğunluklu IMT arasında net bir üstünlük ortaya koyamamış, optimal doz ve protokolün belirlenmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır (Vorona vd., 2018).

Hava yolu temizleme teknikleri de ICU-AW yönetiminde destekleyici bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda aspirasyon, pozisyonlama, postüral drenaj, göğüs fizyoterapisi (perküsyon ve vibrasyon), pozitif ekspiratuar basınç uygulamaları ve uygun hastalarda öksürük destekleyici teknikler kullanılmaktadır (Myers, 2007). Özellikle mekanik ventilasyon altındaki hastalarda sekresyon birikiminin önlenmesi amacıyla düzenli aspirasyon ve pozisyon değişiklikleri temel yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Alonso-Pérez vd., 2025). Bu yöntemler, çoğunlukla erken mobilizasyon ve solunum kas eğitimi ile uygulanarak multidisipliner pulmoner rehabilitasyon programlarının bir parçasını oluşturmaktadır. Bununla birlikte, hava yolu temizleme tekniklerine ilişkin ICU-AW'ye özgü standartlaştırılmış protokoller bulunmamakta, uygulamalar büyük ölçüde klinik duruma göre bireyselleştirilmektedir. Mevcut kanıtlar, bu yaklaşımların ventilasyon süresini ve komplikasyonları azaltabileceğini düşündürmekle birlikte, ICU-AW'ye özgü doğrudan ve güçlü kanıtlar sınırlıdır (Strickland vd., 2013).

Sonuç

Yoğun bakım ünitesinde edinilmiş kas zayıflığı, kritik hastalarda uzun dönem fiziksel fonksiyonları ve yaşam kalitesini etkileyen önemli bir sorundur. Bu durumun gelişiminde immobilizasyon, sistemik inflamasyon ve organ destek tedavileri gibi birçok faktör rol oynamaktadır. Mevcut bulgular, multidisipliner

yaklaşımla uygulanan rehabilitasyon stratejilerinin hastaların fiziksel kapasitesinin korunmasına ve iyileşme sürecinin desteklenmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, farklı hasta gruplarında en etkili rehabilitasyon yöntemlerinin belirlenebilmesi için daha kapsamlı ve yüksek kalitede çalışmalara ihtiyaç vardır.

Kaynakça

Aguiar, L. M. M., Martins, G. de S., Valduga, R., Gerez, A. P., Carmo, E. C. do, Cunha, K. da C., Cipriano, G. F. B., & Silva, M. L. da. (2021). Profile of adult intensive care units in Brazil: systematic review of observational studies. Critical Care Science, 33(4). https://doi.org/10.5935/0103-507X.20210088

Alonso-Pérez, J. L., Riquelme-Aguado, V., Rodríguez-Prieto, D., López-Mejías, A., Romero-Morales, C., Rossettini, G., & Villafañe, J. H. (2025). Inspiratory Muscle Training and Its Impact on Weaning Success in Mechanically Ventilated ICU Patients: A Systematic Review. Journal of Functional Morphology and Kinesiology, 10(2), 111. https://doi.org/10.3390/jfmk10020111

Anekwe, D. E., Biswas, S., Bussières, A., & Spahija, J. (2020). Early rehabilitation reduces the likelihood of developing intensive care unit-acquired weakness: a systematic review and meta-analysis. Physiotherapy, 107, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.physio.2019.12.004

Arfianti, L., Hutapea, J. D. I. U., Al Hayyan, A. J., & Semedi, B. P. (2025). Functional outcomes of early neuromuscular electrical stimulation for ICU-acquired weakness: a pilot study. Anaesthesia, Pain & Intensive Care, 29(6), 492-496. https://doi.org/10.35975/apic.v29i6.2785

Bai, X., Gu, C., Li, Y., Jin, X., Liu, J., & Guo, C. (2026). Best Evidence Summary on Early Exercise for Prevention of ICU-Acquired Weakness: An Evidence-Based Synthesis. Journal of Multidisciplinary Healthcare, Volume 19, 1-19. https://doi.org/10.2147/JMDH.S574831

Bekele, T. G., Melaku, B., Demisse, L. B., Abza, L. F., & Assen, A. S. (2024). Outcomes and factors associated with

prolonged stays among patients admitted to adult intensive care unit in a resource-limited setting: a multicenter chart review. Scientific Reports, 14(1), 13960. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64911-x

Bento, I., Ferreira, B., Baixinho, C. L., & Henriques, M. A. (2025). Effectiveness of Early Mobilization and Bed Positioning in the Management of Muscle Weakness in Critically Ill People Under Invasive Mechanical Ventilation in Intensive Care: A Systematic Review of Intervention Literature Protocol. Nursing Reports, 15(3), 75. https://doi.org/10.3390/nursrep15030075

Bissett, B., Leditschke, I. A., Green, M., Marzano, V., Collins, S., & Van Haren, F. (2019). Inspiratory muscle training for intensive care patients: A multidisciplinary practical guide for clinicians. Australian Critical Care, 32(3), 249-255. https://doi.org/10.1016/j.aucc.2018.06.001

Boelens, Y. F. N., Melchers, M., & van Zanten, A. R. H. (2022). Poor physical recovery after critical illness: incidence, features, risk factors, pathophysiology, and evidence-based therapies. Current Opinion in Critical Care, 28(4), 409-416. https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000955

Bohula, E. A., Katz, J. N., van Diepen, S., Alviar, C. L., Baird-Zars, V. M., Park, J.-G., Barnett, C. F., Bhattal, G., Barsness, G. W., Burke, J. A., Cremer, P. C., Cruz, J., Daniels, L. B., DeFilippis, A., Granger, C. B., Hollenberg, S., Horowitz, J. M., Keller, N., Kontos, M. C., … Morrow, D. A. (2019). Demographics, Care Patterns, and Outcomes of Patients Admitted to Cardiac Intensive Care Units. JAMA Cardiology, 4(9), 928. https://doi.org/10.1001/jamacardio.2019.2467

Burtin, C., Clerckx, B., Robbeets, C., Ferdinande, P., Langer, D., Troosters, T., Hermans, G., Decramer, M., & Gosselink, R. (2009). Early exercise in critically ill patients enhances short-term

functional recovery*. Critical Care Medicine, 37(9), 2499-2505. https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e3181a38937

Campos, D. R., Bueno, T. B. C., Anjos, J. S. G. G., Zoppi, D., Dantas, B. G., Gosselink, R., Guirro, R. R. J., & Borges, M. C. (2022). Early Neuromuscular Electrical Stimulation in Addition to Early Mobilization Improves Functional Status and Decreases Hospitalization Days of Critically Ill Patients. Critical Care Medicine, 50(7), 1116-1126. https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000005557

Case, A. S., Hochberg, C. H., & Hager, D. N. (2024). The Role of Intermediate Care in Supporting Critically Ill Patients and Critical Care Infrastructure. Critical Care Clinics, 40(3), 507-522. https://doi.org/10.1016/j.ccc.2024.03.005

Chang, K.-M., Tu, Y.-K., Wu, C.-R., Peters, K., Ramjan, L., Hou, W.-H., Hou, S.-K., Phuc, N. T., & Chiu, H.-Y. (2026). Comparative effects of early physical interventions on preventing intensive care unit-acquired weakness: a systematic review and component network meta-analysis. BMJ Evidence-Based Medicine, 31(3), 178-188. https://doi.org/10.1136/bmjebm-2024-113476

Chen, J., & Huang, M. (2024). Intensive care unit-acquired weakness: Recent insights. Journal of Intensive Medicine, 4(1), 73-80. https://doi.org/10.1016/j.jointm.2023.07.002

Cheung, K., Rathbone, A., Melanson, M., Trier, J., Ritsma, B. R., & Allen, M. D. (2021). Pathophysiology and management of critical illness polyneuropathy and myopathy. Journal of Applied Physiology, 130(5), 1479-1489. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00019.2021

Daum, N., Drewniok, N., Bald, A., Homann, L., Warner, L., Scheffenbichler, F. T., Leder, A., Liebl, M., Reißhauer, A., Wollersheim, T., Schaller, S. J., Weber-Carstens, S., & Grunow, J. J.

(2026). Neuromuscular electrical stimulation for early rehabilitation in critically ill patients: a systematic review of applied protocols. Critical Care, 30(1), 92. https://doi.org/10.1186/s13054-026-05873-6

Desai, S. V., Law, T. J., & Needham, D. M. (2011). Long-term complications of critical care. Critical Care Medicine, 39(2), 371-379. https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e3181fd66e5

Eggmann, S., Verra, M. L., Luder, G., Takala, J., & Jakob, S. M. (2018). Effects of early, combined endurance and resistance training in mechanically ventilated, critically ill patients: A randomised controlled trial. PLOS ONE, 13(11), e0207428. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207428

Ervin, J. N., Kahn, J. M., Cohen, T. R., & Weingart, L. R. (2018). Teamwork in the intensive care unit. American Psychologist, 73(4), 468-477. https://doi.org/10.1037/amp0000247

Farhan, H., Moreno-Duarte, I., Latronico, N., Zafonte, R., & Eikermann, M. (2016). Acquired Muscle Weakness in the Surgical Intensive Care Unit: Nosology, Epidemiology, Diagnosis, and Prevention. Anesthesiology, 124(1), 207-234. https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000000874

Formenti, P., Menozzi, A., Sabbatini, G., Gotti, M., Galimberti, A., Bruno, G., Pezzi, A., & Umbrello, M. (2025a). Combined Effects of Early Mobilization and Nutrition on ICU-Acquired Weakness. Nutrients, 17(6), 1073. https://doi.org/10.3390/nu17061073

Formenti, P., Menozzi, A., Sabbatini, G., Gotti, M., Galimberti, A., Bruno, G., Pezzi, A., & Umbrello, M. (2025b). Combined Effects of Early Mobilization and Nutrition on ICU-Acquired Weakness. Nutrients, 17(6), 1073. https://doi.org/10.3390/nu17061073

Gomides, M. D. A., Fontes, A. M. de S., Silveira, A. O. S. M., & Sadoyama, G. (2019). Patient safety culture in the intensive care unit: cross-study. The Journal of Infection in Developing Countries, 13(06), 496-503. https://doi.org/10.3855/jidc.11166

Gravante, F., Trotta, F., Latina, S., Simeone, S., Alvaro, R., Vellone, E., & Pucciarelli, G. (2024). Quality of life in <scp>ICU</scp> survivors and their relatives with post-intensive care syndrome: A systematic review. Nursing in Critical Care, 29(4), 807-823. https://doi.org/10.1111/nicc.13077

Hermans, G., & Van den Berghe, G. (2015a). Clinical review: intensive care unit acquired weakness. Critical Care, 19(1), 274. https://doi.org/10.1186/s13054-015-0993-7

Hermans, G., & Van den Berghe, G. (2015b). Clinical review: intensive care unit acquired weakness. Critical Care, 19(1), 274. https://doi.org/10.1186/s13054-015-0993-7

Hiser, S. L., Casey, K., Nydahl, P., Hodgson, C. L., & Needham, D. M. (2025). Intensive care unit acquired weakness and physical rehabilitation in the ICU. BMJ, 388, e077292. https://doi.org/10.1136/bmj-2023-077292

Huang, D., Zhao, W., Chen, Y., Shen, B., Wang, Y., Guan, H., & Luo, W. (2021a). Effect of mechanical ventilation and pulmonary rehabilitation in patients with ICU-acquired weakness: a systematic review and meta-analysis. Annals of Palliative Medicine, 10(9), 9594-9606. https://doi.org/10.21037/apm-21-1928

Huang, D., Zhao, W., Chen, Y., Shen, B., Wang, Y., Guan, H., & Luo, W. (2021b). Effect of mechanical ventilation and pulmonary rehabilitation in patients with ICU-acquired weakness: a systematic review and meta-analysis. Annals of Palliative Medicine, 10(9), 9594-9606. https://doi.org/10.21037/apm-21-1928

Ibrahim, K. S., Kheirallah, K. A., Al Manasra, A. R. A., & Megdadi, M. A. (2024). Factors affecting duration of stay in the intensive care unit after coronary artery bypass surgery and its impact on in-hospital mortality: a retrospective study. Journal of Cardiothoracic Surgery, 19(1), 45. https://doi.org/10.1186/s13019-024-02527-y

Jackson, M., & Cairns, T. (2021). Care of the critically ill patient. Surgery (Oxford), 39(1), 29-36. https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2020.11.002

Jang, M. H., Shin, M.-J., & Shin, Y. B. (2019). Pulmonary and Physical Rehabilitation in Critically Ill Patients. Acute and Critical Care, 34(1), 1-13. https://doi.org/10.4266/acc.2019.00444

Kanova, M., & Kohout, P. (2022). Molecular Mechanisms Underlying Intensive Care Unit-Acquired Weakness and Sarcopenia. International Journal of Molecular Sciences, 23(15), 8396. https://doi.org/10.3390/ijms23158396

Kazemi, M., Froutan, R., & Bagheri Moghadam, A. (2024). Impact of Inspiratory Muscle Training and Positive Expiratory Pressure on Lung Function and Extubation Success of ICU Patients: a Randomized Controlled Trial. Archives of academic emergency medicine, 12(1), e59. https://doi.org/10.22037/aaem.v12i1.2331

Kho, M. E., Truong, A. D., Brower, R. G., Palmer, J. B., Fan, E., Zanni, J. M., Ciesla, N. D., Feldman, D. R., Korupolu, R., & Needham, D. M. (2012). Neuromuscular Electrical Stimulation for Intensive Care Unit–Acquired Weakness: Protocol and Methodological Implications for a Randomized, Sham-Controlled, Phase II Trial. Physical Therapy, 92(12), 1564-1579. https://doi.org/10.2522/ptj.20110437

Kusumawardani, M. K., Poerwandari, D., Narasinta, I., Hidayati, H. B., & Subadi, I. (2019). The role of neuromuscular

electrical stimulation for rehabilitation in ICU acquired weakness. Anaesthesia, Pain & Intensive Care, S164-S169. https://doi.org/10.35975/apic.v22i1.1103

Latronico, N., Rasulo, F. A., Eikermann, M., & Piva, S. (2023). Critical Illness Weakness, Polyneuropathy and Myopathy: Diagnosis, treatment, and long-term outcomes. Critical Care, 27(1), 439. https://doi.org/10.1186/s13054-023-04676-3

Liu, M., Luo, J., Zhou, J., & Zhu, X. (2020). Intervention effect of neuromuscular electrical stimulation on ICU acquired weakness: A meta-analysis. International Journal of Nursing Sciences, 7(2), 228-237. https://doi.org/10.1016/j.ijnss.2020.03.002

Marshall, J. C., Bosco, L., Adhikari, N. K., Connolly, B., Diaz, J. V., Dorman, T., Fowler, R. A., Meyfroidt, G., Nakagawa, S., Pelosi, P., Vincent, J.-L., Vollman, K., & Zimmerman, J. (2017). What is an intensive care unit? A report of the task force of the World Federation of Societies of Intensive and Critical Care Medicine. Journal of Critical Care, 37, 270-276. https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2016.07.015

Martinez, R. H., Liu, K. D., & Aldrich, J. M. (2022). Overview of the Medical Management of the Critically Ill Patient. Clinical Journal of the American Society of Nephrology, 17(12), 1805-1813. https://doi.org/10.2215/CJN.07130622

Menges, D., Seiler, B., Tomonaga, Y., Schwenkglenks, M., Puhan, M. A., & Yebyo, H. G. (2021). Systematic early versus late mobilization or standard early mobilization in mechanically ventilated adult ICU patients: systematic review and meta-analysis. Critical Care, 25(1), 16. https://doi.org/10.1186/s13054-020-03446-9

Myers, T. R. (2007). Positive expiratory pressure and oscillatory positive expiratory pressure therapies. Respiratory care, 52(10), 1308-1326; discussion 1327.

Nakanishi, N., Yoshihiro, S., Kawamura, Y., Aikawa, G., Shida, H., Shimizu, M., Fujinami, Y., Matsuoka, A., Watanabe, S., Taito, S., & Inoue, S. (2023). Effect of Neuromuscular Electrical Stimulation in Patients With Critical Illness: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. Critical Care Medicine, 51(10), 1386-1396. https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000005941

Nazir, A., & Anggraini, G. (2024). Rehabilitation Management of Intensive Care Unit-acquired Weakness (ICU-AW): A Narrative Review. Surabaya Physical Medicine and Rehabilitation Journal, 6(1), 98-116. https://doi.org/10.20473/spmrj.v6i1.42513

Othman, S. Y., Elbiaa, M. A., Mansour, E. R., El-Menshawy, A. M., & Elsayed, S. M. (2024a). Effect of neuromuscular electrical stimulation and early physical activity on <scp>ICU</scp> - acquired weakness in mechanically ventilated patients: A randomized controlled trial. Nursing in Critical Care, 29(3), 584-596. https://doi.org/10.1111/nicc.13010

Othman, S. Y., Elbiaa, M. A., Mansour, E. R., El-Menshawy, A. M., & Elsayed, S. M. (2024b). Effect of neuromuscular electrical stimulation and early physical activity on <scp>ICU</scp> - acquired weakness in mechanically ventilated patients: A randomized controlled trial. Nursing in Critical Care, 29(3), 584-596. https://doi.org/10.1111/nicc.13010

Paolo, F., Valentina, D. G., Silvia, C., Tommaso, P., Elena, C., Martin, D., Marini John, J., & Davide, C. (2022). The possible predictive value of muscle ultrasound in the diagnosis of ICUAW in

long-term critically ill patients. Journal of Critical Care, 71, 154104. https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2022.154104

Petrucci, M., Gemma, S., Carbone, L., Piccioni, A., Della Polla, D. A., Simeoni, B., Franceschi, F., & Covino, M. (2025). ICU-Acquired Weakness: From Pathophysiology to Management in Critical Care. Emergency Care and Medicine, 2(1), 4. https://doi.org/10.3390/ecm2010004

Pierre, A., Favory, R., Bourel, C., Howsam, M., Romien, R., Lancel, S., & Preau, S. (2025). Muscle weakness after critical illness: unravelling biological mechanisms and clinical hurdles. Critical Care, 29(1), 248. https://doi.org/10.1186/s13054-025-05462-z

Piva, S., Fagoni, N., & Latronico, N. (2019). Intensive care unit–acquired weakness: unanswered questions and targets for future research. F1000Research, 8, 508. https://doi.org/10.12688/f1000research.17376.1

Ruo Yu, L., Jia Jia, W., Meng Tian, W., Tian Cha, H., & Ji Yong, J. (2024). Optimal timing for early mobilization initiatives in intensive care unit patients: A systematic review and network meta-analysis. Intensive and Critical Care Nursing, 82, 103607. https://doi.org/10.1016/j.iccn.2023.103607

Sabaz, M. S., & Aşar, S. (2021). Identification of Factors Associated with Prolonged Stay in the Intensive Care Unit. Bakirkoy Tip Dergisi / Medical Journal of Bakirkoy, 17(3), 233-242. https://doi.org/10.4274/BMJ.galenos.2021.96658

Saxena, M. K., & Hodgson, C. L. (2012). Intensive care unit acquired weakness. Anaesthesia & Intensive Care Medicine, 13(4), 145-147. https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2012.01.003

Sepúlveda, P., Gallardo, A., Arriagada, R., González, E., Rocco, P. R. M., & Battaglini, D. (2025). Protocolized strategies to

encourage early mobilization of critical care patients: challenges and success. Critical Care Science, 37. https://doi.org/10.62675/2965-2774.20250128

Shime, N. (2021). The right care at the right place: Significance of intensive care units for critically ill patients. The Lancet Regional Health - Western Pacific, 13, 100198. https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2021.100198

Siddika, N., Anowar, M. N., Islam, M. S., & Mallick, D. R. (2023). Characteristics of Adult Intensive Care Unit Patients at a University Hospital. OALib, 10(03), 1-15. https://doi.org/10.4236/oalib.1109891

Strickland, S. L., Rubin, B. K., Drescher, G. S., Haas, C. F., O'Malley, C. A., Volsko, T. A., Branson, R. D., & Hess, D. R. (2013). AARC Clinical Practice Guideline: Effectiveness of Nonpharmacologic Airway Clearance Therapies in Hospitalized Patients. Respiratory Care, 58(12), 2187-2193. https://doi.org/10.4187/respcare.02925

Suh, J. M., Raykateeraroj, N., Waldman, B., Kitisin, N., Haywood, C., Bellomo, R., Koshy, A. N., Pilcher, D., Lee, D.-K., & Weinberg, L. (2025). Characteristics, outcomes, and complications among nonagenarian and centenarian patients admitted to the intensive care unit: a scoping review. Critical Care, 29(1), 112. https://doi.org/10.1186/s13054-025-05349-z

Sunaryo, E. Y. A. B., Lee, H., Sofia, L., Peng, Z., Tsai, H., & Lee, W. (2025). Preventing <scp>ICU</scp> -Acquired Weakness With Early Rehabilitation: An Umbrella Review of Systematic Reviews and Meta-Analysis. Nursing in Critical Care, 30(4). https://doi.org/10.1111/nicc.70113

Taito, S., Yamauchi, K., Tsujimoto, Y., Banno, M., Tsujimoto, H., & Kataoka, Y. (2019). Does enhanced physical rehabilitation

following intensive care unit discharge improve outcomes in patients who received mechanical ventilation? A systematic review and meta-analysis. BMJ Open, 9(6), e026075. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-026075

Turan, Z., Topaloglu, M., & Ozyemisci Taskiran, O. (2020). Medical Research Council-sumscore: a tool for evaluating muscle weakness in patients with post-intensive care syndrome. Critical Care, 24(1), 562. https://doi.org/10.1186/s13054-020-03282-x

Vanhorebeek, I., Latronico, N., & Van den Berghe, G. (2020). ICU-acquired weakness. Intensive care medicine, 46(4), 637-653. https://doi.org/10.1007/S00134-020-05944-4

Verceles, A., Serra, M., Davis, D., Alon, G., Wells, C., Parker, E., Terrin, M. L., Sorkin, J., Bhatti, W., & Goldberg, A. P. (2021). Combining Exercise, Protein Supplementation and Electric Stimulation to Mitigate Muscle Wasting and Improve Outcomes for Survivors of Critical Illness - the ExPrES Study. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1170718/v1

Vincent, J.-L. (2019). The continuum of critical care. Critical Care, 23(S1), 122. https://doi.org/10.1186/s13054-019-2393-x

Voiriot, G., Oualha, M., Pierre, A., Salmon-Gandonnière, C., Gaudet, A., Jouan, Y., Kallel, H., Radermacher, P., Vodovar, D., Sarton, B., Stiel, L., Bréchot, N., Préau, S., & Joffre, J. (2022). Chronic critical illness and post-intensive care syndrome: from pathophysiology to clinical challenges. Annals of Intensive Care, 12(1), 58. https://doi.org/10.1186/s13613-022-01038-0

Vollenweider, R., Manettas, A. I., Häni, N., de Bruin, E. D., & Knols, R. H. (2022). Passive motion of the lower extremities in sedated and ventilated patients in the ICU – a systematic review of early effects and replicability of Interventions. PLOS ONE, 17(5), e0267255. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267255

Vorona, S., Sabatini, U., Al-Maqbali, S., Bertoni, M., Dres, M., Bissett, B., Van Haren, F., Martin, A. D., Urrea, C., Brace, D., Parotto, M., Herridge, M. S., Adhikari, N. K. J., Fan, E., Melo, L. T., Reid, W. D., Brochard, L. J., Ferguson, N. D., & Goligher, E. C. (2018). Inspiratory Muscle Rehabilitation in Critically Ill Adults. A Systematic Review and Meta-Analysis. Annals of the American Thoracic Society, 15(6), 735-744. https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201712-961OC

Wu, T.-T., Chen, Q.-L., Lin, X.-X., Xu, M.-L., Chen, X.-X., Luo, C.-J., Zhuang, Y.-N., Wei, Y.-Q., Wu, J.-B., Xiong, J., Chen, L.-L., & Li, H. (2023). Effects of a multilevel intervention of resistance training with or without beta-hydroxy-beta-methylbutyrate in medical ICU patients during entire hospitalisation: a four-arm multicentre randomised controlled trial. Critical Care, 27(1), 493. https://doi.org/10.1186/s13054-023-04698-x

Xin, C., Gai, Y., Wei, L., Wang, Y., Luo, Y., & Han, B. (2025). Potential diagnostic tools for intensive care unit acquired weakness: A systematic review. International Journal of Nursing Studies Advances, 8, 100301. https://doi.org/10.1016/j.ijnsa.2025.100301

Xu, Q., Tan, J., Wang, Y., & Tang, M. (2024). Theory-based and evidence-based nursing interventions for the prevention of ICU-acquired weakness in the intensive care unit: A systematic review. PLOS ONE, 19(9), e0308291. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308291

Yustiawan, A., Semedi, B. P., Arfianti, L., Hidayati, H. B., Maulydia, M., Edwar, P. P. M., Airlangga, P. S., Santoso, K. H., & Andriana, M. (2024). The effect of early neuromuscular electrical stimulation in intensive care unit-acquired weakness. Anaesthesia, Pain & Intensive Care, 28(4), 706-711. https://doi.org/10.35975/apic.v28i4.2405

Zhang, X., Wang, Z., Wang, J., Wu, F., Xia, L., Shi, S., Zhu, M., & Zhuang, J. (2025). Risk Factors, Diagnostic Challenges, and Emerging Therapeutic Strategies for ICU-Acquired Weakness: A Brief Review. Journal of Multidisciplinary Healthcare, Volume 18, 7769-7778. https://doi.org/10.2147/JMDH.S560139

BÖLÜM 5
DENGE DEĞERLENDİRMESİ VE REHABİLİTASYONUNDA GİYİLEBİLİR İNERSİYAL SENSÖRLER: YERİ VE KULLANIM ALANLARI

YUSUF ŞİNASİ KIRMACI[1]

ASİYA UZUN[2]

Giriş

Denge, bireyin vücut kütle merkezini destek yüzeyi sınırları içinde tutabilme ve değişen çevresel koşullara uygun postüral yanıtlar üretebilme yeteneği olarak tanımlanır. Oturma, ayakta durma, yürüme, merdiven çıkma ve dönme gibi temel günlük yaşam aktivitelerinin güvenli biçimde yerine getirilebilmesi büyük ölçüde yeterli denge kontrolüne bağlıdır. Denge kontrolündeki bozulmalar; nörolojik hastalıklar, yaşlanma, kas-iskelet sistemi yaralanmaları ve vestibüler bozukluklar gibi pek çok klinik tabloda ortaya çıkmakta, düşme riskini artırarak bireyin bağımsızlığını, katılımını ve yaşam kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Fizyoterapi ve rehabilitasyon uygulamalarında denge değerlendirmesi uzun yıllar boyunca büyük ölçüde gözleme dayalı klinik testler ve ölçeklerle yürütülmüştür. Berg Denge Ölçeği, Mini-BESTest ve Zamanlı Kalk ve Yürü Testi gibi araçlar klinikte kolay uygulanabilir olmaları nedeniyle yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak bu araçların sıralı (ordinal) puanlama yapısına sahip olması, tavan etkisi göstermesi ve değerlendiriciye bağımlı olması, özellikle

[1] Dr.Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Orcid: 0000-0001-7151-6854
[2] Dr.Öğr. Üyesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Bölümü, Orcid: 0000-0003-1496-9827

hafif ve erken dönem denge bozukluklarının saptanmasını ve tedaviye bağlı küçük değişimlerin izlenmesini güçleştirmektedir (Mancini & Horak, 2010; Franchignoni et al., 2010).

Son yirmi yılda mikro-elektromekanik sistem (MEMS) teknolojisindeki gelişmeler; küçük, hafif, düşük maliyetli ve kablosuz çalışabilen inersiyal (ataletsel) sensörlerin klinik kullanıma girmesini sağlamıştır. İvmeölçer, jiroskop ve manyetometre bileşenlerini içeren bu sensörler, vücudun farklı segmentlerine yerleştirilerek statik ve dinamik denge görevlerine ilişkin nicel, objektif ve yüksek çözünürlüklü veriler sunmaktadır. Laboratuvar ortamına bağımlı olmayan bu teknoloji, denge değerlendirmesini klinik, ev ve toplum ortamına taşıyarak fizyoterapistlere yeni bir ölçüm ve tedavi olanağı sunmaktadır (Horak et al., 2015; Iosa et al., 2016; Porciuncula et al., 2018).

Bu bölümde, denge ve postüral kontrolün temel bileşenleri kısaca ele alındıktan sonra inersiyal sensörlerin çalışma ilkeleri, denge değerlendirmesinde elde edilen başlıca parametreler, fizyoterapi ve rehabilitasyonun farklı alanlarındaki kullanım örnekleri, biyogeri bildirim temelli denge eğitimi, tele-rehabilitasyon ve yapay zekâ uygulamaları ile mevcut sınırlılıklar ve geleceğe yönelik perspektifler güncel literatür ışığında tartışılmaktadır.

Denge ve Postüral Kontrolün Temelleri

Postüral kontrol, vücut segmentlerinin birbirine ve çevreye göre uygun biçimde hizalanmasını ifade eden postüral yönelim ile vücut kütle merkezinin destek yüzeyi üzerinde kontrol edilmesini ifade eden postüral denge olmak üzere iki temel amaca hizmet eder (Horak, 2006). Bu kontrol; somatosensoriyel, vestibüler ve görsel

sistemlerden gelen duyusal bilgilerin merkezi sinir sistemi tarafından bütünleştirilmesi ve uygun motor yanıtların üretilmesiyle sağlanır. Sağlıklı bireylerde merkezi sinir sistemi, çevresel koşullara göre duyusal girdilerin göreceli katkısını değiştirebilmektedir. Duyusal yeniden ağırlıklandırma olarak adlandırılan bu mekanizma sayesinde, örneğin gözler kapalıyken ya da yumuşak bir zeminde durulurken vestibüler bilgiye daha fazla dayanılır (Peterka, 2002).

Günümüzde denge, tek bir yetenekten ziyade birbiriyle etkileşim içinde olan çok sayıda alt sistemin ürünü olarak kabul edilmektedir. Bu sistem yaklaşımı, Balance Evaluation Systems Test (BESTest) ve onun kısaltılmış formu olan Mini-BESTest'in de kuramsal temelini oluşturur. Mini-BESTest, denge kontrolünü aşağıdaki dört temel bileşen üzerinden değerlendirir (Franchignoni et al., 2010):

- **Öngörüsel postüral ayarlamalar:** İstemli bir hareketten önce ya da hareketle eş zamanlı olarak ortaya çıkan ve beklenen bozulmayı dengelemeye yönelik ileri beslemeli (feedforward) kontrol mekanizmalarıdır.
- **Reaktif postüral kontrol:** Beklenmedik dış bozulmalara karşı üretilen ayak bileği, kalça ve adım stratejileri gibi geri beslemeli yanıtları kapsar.
- **Duyusal yönelim:** Görsel, vestibüler ve somatosensoriyel bilginin farklı çevresel koşullarda uygun biçimde kullanılabilme kapasitesini yansıtır.
- **Yürüme sırasında dinamik denge:** Hız değişimi, baş hareketleri, engel aşma ve dönme gibi görevler sırasında dengenin sürdürülebilmesini ifade eder.

Bu bileşenlerin her biri farklı nöral mekanizmalara dayandığından, klinik popülasyonlarda denge bozukluğunun hangi alt sistemden kaynaklandığının belirlenmesi, hedefe yönelik tedavi

planlamasının ön koşuludur. İnersiyal sensörler, bu bileşenlerin her biri için ayrıntılı ve nicel ölçüm yapılmasına olanak tanıdığından sistem yaklaşımıyla yüksek düzeyde uyum göstermektedir (Horak et al., 2015).

Geleneksel Denge Değerlendirme Yöntemleri ve Sınırlılıkları

Klinik denge ölçekleri; ucuz, hızlı ve özel ekipman gerektirmeyen araçlar olmaları nedeniyle fizyoterapi pratiğinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Ne var ki bu ölçeklerin önemli bir kısmı görevin tamamlanıp tamamlanmadığına ya da süresine odaklanır ve hareketin nasıl gerçekleştirildiğine ilişkin kalitatif bilgiyi sınırlı düzeyde yansıtır. Ayrıca yüksek fonksiyonlu bireylerde tavan etkisi görülmesi, değerlendiriciler arası farklılıklar ve küçük klinik değişimlere karşı düşük duyarlılık bu araçların başlıca sınırlılıkları arasında sayılmaktadır (Mancini & Horak, 2010).

Laboratuvar tabanlı yöntemler arasında yer alan kuvvet platformları, basınç merkezi (center of pressure) salınımının analizine dayalı olarak postüral stabilitenin altın standart ölçümü kabul edilmektedir. Basınç merkezine ait salınım alanı, ortalama hız ve frekans gibi parametreler, yaşlanmaya bağlı denge değişimlerini ortaya koymada duyarlı bulunmuştur (Prieto et al., 1996). Optoelektronik üç boyutlu hareket analiz sistemleri ise tüm vücut kinematiğinin yüksek doğrulukla ölçülmesini sağlar. Ancak bu sistemlerin yüksek maliyeti, laboratuvar ortamına bağımlılığı, kurulum ve analiz süresinin uzunluğu ile uzmanlık gerektirmesi rutin klinik kullanımlarını kısıtlamaktadır. Klinik ölçeklerin pratikliği ile laboratuvar sistemlerinin ölçüm hassasiyeti arasındaki bu boşluk, giyilebilir inersiyal sensörlerin rehabilitasyon alanında hızla yaygınlaşmasının temel nedenlerinden biridir (Horak et al., 2015; Iosa et al., 2016).

İnersiyal Sensörlerin Çalışma İlkeleri

İnersiyal ölçüm birimi (inertial measurement unit, IMU), genellikle üç eksenli bir ivmeölçer ve üç eksenli bir jiroskoptan oluşan, çoğu zaman üç eksenli bir manyetometre ile desteklenen elektronik bir sistemdir. Günümüzde kullanılan sensörlerin büyük bölümü MEMS teknolojisiyle üretilmekte olup birkaç gram ağırlığında, şarj edilebilir bataryalı ve kablosuz veri aktarımı yapabilen cihazlardır (Iosa et al., 2016).

İvmeölçer, sensörün maruz kaldığı doğrusal ivmeyi yerçekimi ivmesiyle birlikte ölçer. Statik koşullarda yerçekimi vektörünün eksenlere dağılımından segmentin eğim açısı hesaplanabilir; dinamik koşullarda ise hareketin şiddeti ve düzgünlüğü hakkında bilgi sağlar. Jiroskop, segmentin açısal hızını ölçer ve özellikle dönme, oturma-kalkma geçişleri ve gövde salınımının hızına ilişkin değerlendirmelerde önemlidir. Bununla birlikte açısal hızın zaman içinde integrali alınarak açı hesaplandığında sapma (drift) adı verilen birikimli hatalar ortaya çıkabilir. Manyetometre ise yer manyetik alanını referans alarak yatay düzlemdeki yönelimin (baş açısı, heading) belirlenmesine yardımcı olur; ancak ferromanyetik cisimlerin bulunduğu ortamlarda manyetik bozulmalardan etkilenebilir. Bu bileşenlerin temel özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. İnersiyal Sensör Bileşenleri ve Denge Değerlendirmesindeki İşlevleri

Bileşen	Ölçtüğü büyüklük	Denge değerlendirmesindeki katkısı
İvmeölçer	Doğrusal ivme ve yerçekimi ivmesi (m/s^2)	Gövde salınımının büyüklüğü ve düzgünlüğü, statik eğim açısı, adım olaylarının tespiti
Jiroskop	Açısal hız (°/s)	Dönme süresi ve hızı, oturma-kalkma geçişleri, segment açısal hareketi
Manyetometre	Manyetik alan şiddeti (μT)	Yatay düzlemde yönelimin belirlenmesi, jiroskop sapmasının düzeltilmesi
IMU (sensör füzyonu)	Üç boyutlu segment yönelimi	Eklem açılarının kestirimi, tüm vücut kinematiğinin laboratuvar dışında izlenmesi

Kaynak: (Iosa et al., 2016; Bergamini et al., 2014) temel alınarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Her bir bileşenin kendine özgü hata kaynakları bulunduğundan, güvenilir bir yönelim kestirimi için sensör füzyonu algoritmalarından yararlanılır. Kalman filtresi ve türevleri ile tamamlayıcı (complementary) filtreler, ivmeölçerin uzun dönemde kararlı ancak gürültülü verisini jiroskobun kısa dönemde hassas ancak sapmaya eğilimli verisiyle birleştirerek daha doğru segment yönelimi elde edilmesini sağlar. Farklı füzyon yaklaşımlarının doğruluğunun görev türüne ve hareket hızına bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir (Bergamini et al., 2014). Bu nedenle klinik uygulamada kullanılan sistemin hangi algoritmayı kullandığı, örnekleme frekansı ve kalibrasyon prosedürü ölçüm sonuçlarının yorumlanmasında dikkate alınmalıdır.

Sensör Yerleşimi ve Veri İşleme

Denge değerlendirmesinde en sık tercih edilen yerleşim bölgesi, vücut kütle merkezine yakınlığı nedeniyle alt lomber (L4–L5) ya da sakral bölgedir. Bunun yanında sternum, baş, uyluk, tibia

ve ayak üzerine yerleştirilen sensörler; gövde kontrolü, baş stabilizasyonu ve adım olaylarının belirlenmesi gibi farklı amaçlara hizmet eder. Ayakta durma dengesini inceleyen çalışmaların sistematik olarak derlendiği bir incelemede, tek bir sensörün alt gövdeye yerleştirildiği protokollerin literatürde baskın olduğu, ancak sensör konumu, görev koşulları ve hesaplanan parametreler açısından çalışmalar arasında belirgin bir heterojenlik bulunduğu bildirilmiştir (Ghislieri et al., 2019).

İnersiyal sensör verilerinden klinik olarak anlamlı bilgilere ulaşmak, genel olarak aşağıdaki aşamalardan oluşan bir veri işleme sürecini gerektirir:

1. Ham verinin uygun örnekleme frekansında toplanması ve birden fazla sensör kullanıldığında zamansal senkronizasyonun sağlanması,
2. Sensör eksenlerinin anatomik eksenlerle ve yerçekimi yönüyle hizalanması (kalibrasyon),
3. Hareket artefaktlarının ve yüksek frekanslı gürültünün uygun filtreleme yöntemleriyle azaltılması,
4. Görevin alt bileşenlerinin (örneğin oturmadan kalkma, yürüme, dönme) ya da adım olaylarının otomatik olarak belirlenmesi,
5. Zaman ve frekans alanında denge parametrelerinin hesaplanması,
6. Elde edilen değerlerin normatif verilerle ya da bireyin önceki ölçümleriyle karşılaştırılarak klinik olarak yorumlanması.

Günümüzde ticari sistemlerin önemli bir kısmı bu aşamaları otomatik olarak gerçekleştirerek klinisyene doğrudan rapor sunabilmektedir. Bununla birlikte fizyoterapistin kullanılan algoritmaların temel mantığını bilmesi, hatalı ölçümleri

tanıyabilmesi ve sonuçları klinik tabloyla birlikte değerlendirebilmesi önem taşımaktadır.

İnersiyal Sensörlerle Elde Edilen Denge Parametreleri

İnersiyal sensörlerden elde edilen denge parametreleri; salınımın büyüklüğünü, hızını, düzgünlüğünü ve frekans özelliklerini yansıtan statik ölçümler ile fonksiyonel görevlerin zamansal ve kinematik özelliklerini tanımlayan dinamik ölçümler olarak iki ana grupta toplanabilir. Başlıca parametreler ve klinik anlamları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. İnersiyal Sensörlerle Elde Edilen Başlıca Denge Parametreleri

Parametre	**Tanım**	**Klinik yorumu**
Salınım alanı	Gövde ivmesinin anteroposterior ve mediolateral düzlemdeki dağılımının kapladığı alan	Artış, postüral stabilitenin azaldığını gösterir
RMS ivme	Salınım ivmesinin karekök ortalama değeri	Salınımın genel büyüklüğünü yansıtır
Jerk	İvmenin zamana göre türevi	Postüral düzeltmelerin düzgünlüğünü ve sıklığını gösterir; artış, daha az kontrollü salınımla ilişkilidir
Ortalama salınım hızı	Salınım yolunun toplam süreye oranı	Postüral kontrol için harcanan düzeltici aktiviteyi yansıtır
Merkez frekans / F95	Salınım gücünün yoğunlaştığı frekans bandı	Duyusal kontrol stratejisindeki ve postüral sertlikteki değişimlerle ilişkilidir
Dönme süresi ve tepe dönme hızı	Jiroskopla ölçülen dönme görevine ait süre ve maksimum açısal hız	Dinamik denge ve düşme riskinin duyarlı göstergeleridir
Adım zamanı değişkenliği	Ardışık adım sürelerinin değişkenlik katsayısı	Yürüyüşün otomatikliği ve dinamik stabilitesi hakkında bilgi verir

Kaynak: (Mancini et al., 2012; Salarian et al., 2010; Ghislieri et al., 2019) temel alınarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Bu parametrelerin psikometrik özellikleri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Alt lomber bölgeye yerleştirilen tek bir sensörle ölçülen salınım parametrelerinin kuvvet platformu ölçümleriyle anlamlı ilişki gösterdiği; özellikle jerk ve RMS gibi ivme temelli ölçümlerin yüksek test-tekrar test güvenirliğine sahip olduğu ve erken evre Parkinson hastalığı olan bireyleri sağlıklı kontrollerden ayırt edebildiği bildirilmiştir (Mancini et al., 2012). Yürüme sırasında elde edilen zamansal-mekânsal parametrelerin geçerlik ve güvenirliğini sağlıklı yetişkinlerde inceleyen bir meta-analiz ise, birçok parametre için iyi ile mükemmel düzeyde güvenirlik rapor etmekle birlikte, sonuçların sensör konumu ve kullanılan algoritmaya göre farklılaştığına dikkat çekmiştir (Kobsar et al., 2020).

Statik Denge Değerlendirmesi

Statik denge değerlendirmesinde birey genellikle ayaklar bitişik, yarı tandem, tandem ya da tek ayak üzerinde durma pozisyonlarında, gözler açık ve kapalı olarak ve sert ya da köpük zemin üzerinde test edilir. Duyusal koşulların sistematik biçimde değiştirildiği bu protokoller, duyusal bütünleştirme kapasitesinin değerlendirilmesine olanak tanır. İnersiyal sensörler bu testlerin geleneksel olarak yalnızca süre ya da hata sayısıyla değerlendirilmesinin ötesine geçerek, bireyin pozisyonu nasıl koruduğuna dair nicel bilgi sağlar (Ghislieri et al., 2019).

Örneğin Balance Error Scoring System (BESS) testinin inersiyal sensörlerle enstrümante edilmesi, hafif travmatik beyin hasarı sonrasında süregen denge yakınmaları olan bireylerde geleneksel hata puanlamasına kıyasla daha duyarlı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır (King et al., 2014). Benzer şekilde tedavi almamış Parkinson hastalarında gövde ivmesine dayalı ölçümlerin,

klinik muayenede henüz belirgin olmayan postüral instabiliteyi ortaya koyabildiği gösterilmiştir (Mancini et al., 2011). Bu bulgular, inersiyal sensörlerin özellikle subklinik denge bozukluklarının erken tespitinde değerli bir araç olduğunu düşündürmektedir.

Dinamik Denge ve Fonksiyonel Mobilite Değerlendirmesi

Dinamik denge, günlük yaşamda düşmelerin büyük bölümünün gerçekleştiği yürüme, dönme ve pozisyon değiştirme görevleri sırasında sergilenir. Zamanlı Kalk ve Yürü Testi'nin inersiyal sensörlerle enstrümante edilmiş formu olan iTUG, testi oturmadan kalkma, yürüme, dönme ve oturmaya dönüş olmak üzere alt bileşenlerine ayırarak her birine ilişkin ayrıntılı parametreler sunar. Erken evre Parkinson hastalığı olan bireylerde toplam test süresi sağlıklı kontrollerden farklılık göstermezken, iTUG'dan elde edilen dönme ve oturmadan kalkma parametrelerinin grupları ayırt edebildiği ve yüksek güvenirliğe sahip olduğu bildirilmiştir (Salarian et al., 2010).

Yürüme sırasında dinamik stabilitenin değerlendirilmesinde adım zamanlamasının değişkenliği, gövde ivmesinin düzenliliği ve simetrisi ile mediolateral salınım gibi ölçümler kullanılmaktadır. Normal yürüme hızına sahip multipl skleroz hastalarında vücuda takılan sensörlerle elde edilen denge ve yürüme parametrelerinin, klinik gözlemle fark edilemeyen bozuklukları ortaya çıkarabildiği gösterilmiştir (Spain et al., 2012). Bunun yanı sıra yürüyüşe başlama sırasında öngörüsel postüral ayarlamalar, dönme sırasında segmentler arası koordinasyon ve çift görev koşullarında yürüme performansı da inersiyal sensörlerle ayrıntılı olarak incelenebilmektedir (Horak et al., 2015).

Nörolojik Rehabilitasyonda Kullanım Alanları

Nörolojik rehabilitasyon, inersiyal sensörlerin denge değerlendirmesinde en yoğun kullanıldığı alandır. Parkinson hastalığında postüral instabilite, dönme güçlüğü ve donma epizotları

düşmelerin başlıca nedenleri arasında yer alır. Parkinson hastalarında ayakta durma dengesi ve yürüme stabilitesini değerlendiren çalışmaların sistematik incelemesi, giyilebilir sensörlerin hastalığın erken döneminden itibaren denge bozukluklarını saptayabildiğini, ancak protokollerin standartlaştırılmasına ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur (Hubble et al., 2015). Sensör temelli ölçümler aynı zamanda ilaç tedavisine ve egzersiz programlarına verilen yanıtın nesnel biçimde izlenmesinde de kullanılmaktadır.

İnme sonrası rehabilitasyonda inersiyal sensörler; yürüme asimetrisinin, paretik ve paretik olmayan taraf arasındaki yük aktarımının ve gövde kontrolündeki değişimlerin izlenmesinde kullanılmaktadır. Multipl skleroz, serebellar ataksi ve serebral palsi gibi durumlarda da sensörlerin hastalık progresyonunu ve tedavi etkinliğini izlemede klinik ölçeklere göre daha duyarlı sonuçlar verebileceği bildirilmektedir (Spain et al., 2012; Porciuncula et al., 2018).

Geriatrik Rehabilitasyon ve Düşme Riskinin Belirlenmesi

Yaşlı bireylerde düşmeler, yaralanma, hastaneye yatış, düşme korkusu ve fonksiyonel bağımsızlık kaybının önemli nedenleri arasındadır. Bu nedenle düşme riski yüksek bireylerin erken belirlenmesi, geriatrik fizyoterapinin öncelikli hedeflerinden biridir. Geriatrik popülasyonlarda inersiyal sensörlerle düşme riski değerlendirmesini inceleyen bir derlemede, sensörlerin çoğunlukla pelvis ya da alt gövdeye yerleştirildiği ve yürüme, iTUG ve ayakta durma görevlerinden elde edilen parametrelerin düşme öyküsü olan ve olmayan bireyleri ayırt etmede umut verici sonuçlar sunduğu belirtilmiştir (Howcroft et al., 2013).

Daha güncel bir derleme ise giyilebilir sensör sistemlerinin düşme riskinin değerlendirilmesinde giderek yaygınlaştığını, ancak çalışmaların büyük bölümünün retrospektif düşme öyküsüne

dayandığını ve ileriye dönük (prospektif) düşme verileriyle doğrulanmış modellerin sınırlı kaldığını vurgulamıştır (Subramaniam et al., 2022). Bu durum, sensör temelli düşme riski modellerinin klinik karar süreçlerine dahil edilmeden önce daha geniş ve prospektif kohortlarda doğrulanması gerektiğini göstermektedir.

Ortopedik ve Sportif Rehabilitasyonda Kullanım Alanları

Ortopedik ve sportif rehabilitasyonda inersiyal sensörler; ön çapraz bağ rekonstrüksiyonu, kronik ayak bileği instabilitesi, total diz ve kalça artroplastisi gibi durumlarda tek bacak üzerinde denge, sıçrama-iniş görevleri ve fonksiyonel performans testlerinin nicel olarak değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Sensörler, özellikle taraflar arası asimetrinin belirlenmesi ve spora dönüş kararlarının nesnel verilerle desteklenmesi açısından klinisyene önemli bilgiler sunar (Porciuncula et al., 2018).

Spor hekimliğinde beyin sarsıntısı sonrası değerlendirme, sensör kullanımının öne çıktığı bir diğer alandır. Enstrümante denge testlerinin, belirtilerin gerilediği ancak postüral kontrol bozukluğunun sürdüğü sporcularda gizli defisitleri ortaya koyabilmesi, güvenli spora dönüş sürecinin planlanmasına katkı sağlamaktadır (King et al., 2014).

Vestibüler Rehabilitasyonda Kullanım Alanları

Vestibüler hipofonksiyonu olan bireylerde denge bozukluğu özellikle baş hareketleri, görsel bilginin azaldığı koşullar ve yumuşak zeminlerde belirginleşir. Baş ve gövdeye yerleştirilen inersiyal sensörler, bakış stabilizasyonu egzersizleri sırasında baş hareketinin hızının ve genliğinin izlenmesine, duyusal koşullara bağlı salınım değişimlerinin nicel olarak belirlenmesine ve ev programına uyumun takip edilmesine olanak tanır. Ayrıca sensörlerden elde edilen salınım bilgisinin titreşimli, işitsel ya da görsel uyaranlarla bireye geri iletildiği duyusal güçlendirme

(sensory augmentation) sistemleri, vestibüler kaybı olan bireylerde denge kontrolünü destekleyen umut verici bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Sienko et al., 2018).

Farklı klinik popülasyonlarda inersiyal sensörlerin başlıca kullanım alanları Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Klinik Popülasyonlara Göre İnersiyal Sensörlerin Başlıca Kullanım Alanları

Klinik alan	Başlıca uygulamalar	Klinik katkı
Parkinson hastalığı	iSway, iTUG, dönme analizi, donma epizotlarının tespiti	Erken dönem postüral instabilitenin saptanması, tedavi yanıtının izlenmesi
Multipl skleroz	Ayakta durma salınımı, yürüme değişkenliği	Klinik olarak fark edilmeyen defisitlerin belirlenmesi
İnme	Yürüme simetrisi, gövde kontrolü, günlük aktivite izlemi	Paretik tarafa yönelik hedefli eğitim ve ilerlemenin nesnel takibi
Geriatri	Düşme riski değerlendirmesi, uzun süreli ev izlemi	Yüksek riskli bireylerin erken belirlenmesi ve önleyici programlar
Ortopedi ve spor	Tek bacak dengesi, sıçrama-iniş, enstrümante BESS	Asimetrinin belirlenmesi, spora dönüş kararının desteklenmesi
Vestibüler bozukluklar	Baş hareketi izlemi, duyusal güçlendirme	Egzersiz dozajının kontrolü, gerçek zamanlı biyogeri bildirim

Kaynak: (Horak et al., 2015; Porciuncula et al., 2018; Hubble et al., 2015; Howcroft et al., 2013) temel alınarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Biyogeri Bildirim Temelli Denge Eğitiminde İnersiyal Sensörler

İnersiyal sensörler yalnızca bir değerlendirme aracı değil, aynı zamanda denge eğitiminde etkili bir tedavi bileşenidir. Sensörlerden elde edilen gövde salınımı ya da segment yönelimi bilgisi gerçek zamanlı olarak işlenerek bireye farklı duyusal kanallar aracılığıyla geri bildirim şeklinde sunulabilir. Giyilebilir sensörler ve geri bildirim cihazları içeren biyogeri bildirim sistemlerinin

etkinliğini inceleyen bir sistematik derleme, bu sistemlerin farklı popülasyonlarda denge performansını iyileştirdiğini bildirmiştir (Ma et al., 2016). Klinik uygulamada kullanılan başlıca geri bildirim türleri şunlardır:

- **Görsel geri bildirim:** Salınımın ekran, tablet ya da sanal gerçeklik ortamında grafik veya oyun öğeleri aracılığıyla gösterilmesidir.
- **İşitsel geri bildirim:** Salınımın yönü ve büyüklüğüne göre ses tonu, şiddeti ya da ritminin değiştirilmesidir.
- **Vibrotaktil geri bildirim:** Gövde çevresine yerleştirilen titreşim motorlarıyla salınım yönüne ilişkin dokunsal uyarı verilmesidir.

Duyusal güçlendirme sistemlerinin denge üzerindeki etkilerinin; ek duyusal bilginin doğrudan kullanılması, duyusal yeniden ağırlıklandırmanın kolaylaştırılması ve motor öğrenmenin desteklenmesi gibi farklı mekanizmalar aracılığıyla ortaya çıkabileceği ileri sürülmektedir (Sienko et al., 2018). Egzersiz oyunları (exergame) ve sanal gerçeklik uygulamalarıyla birleştirilen sensör temelli sistemler ise eğitimin motivasyonunu ve tekrar sayısını artırarak özellikle uzun süreli rehabilitasyon programlarında tedaviye uyumu desteklemektedir.

Tele-rehabilitasyon ve Günlük Yaşamda Sürekli İzlem

Giyilebilir inersiyal sensörlerin en önemli avantajlarından biri, denge ve mobilitenin klinik ortamın dışında, bireyin kendi yaşam alanında değerlendirilebilmesidir. Klinikte kısa süreli testlerle ölçülen performans, bireyin kapasitesini yansıtırken; gün boyu süren izlem, bireyin gerçek yaşamdaki performansı hakkında bilgi verir. Günlük yaşam sırasında kaydedilen dönme sayısı ve kalitesi, yürüme süreleri ve postüral geçişler gibi ölçümler, klinik testlerde

gözlenemeyen dalgalanmaları ve düşme öncesi değişimleri ortaya koyma potansiyeline sahiptir (Horak et al., 2015).

Akıllı telefonlar ve akıllı saatlerde yer alan yerleşik inersiyal sensörler, tele-rehabilitasyon uygulamalarının yaygınlaşmasına önemli katkı sağlamıştır. Bu cihazlar aracılığıyla ev egzersiz programlarının doğru uygulanıp uygulanmadığı izlenebilmekte, fizyoterapiste uzaktan geri bildirim iletilebilmekte ve tedavi programı veriye dayalı olarak güncellenebilmektedir. Bununla birlikte tüketici cihazlarından elde edilen verilerin doğruluğunun klinik sınıf sensörlerle karşılaştırmalı olarak doğrulanması gerekmektedir (Porciuncula et al., 2018).

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları

İnersiyal sensörlerin yüksek örnekleme frekansında ürettiği büyük veri kümeleri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerinin rehabilitasyon alanında kullanımını hızlandırmıştır. Bu yöntemler; aktivite tanıma, düşme tespiti, düşme riskinin öngörülmesi, hastalık evrelerinin sınıflandırılması ve bireye özgü tedavi yanıtının tahmin edilmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Düşme riski değerlendirmesine yönelik sensör sistemlerini inceleyen güncel çalışmalar, makine öğrenmesi temelli modellerin yüksek sınıflama doğruluğu bildirebildiğini, ancak küçük örneklem büyüklüğü, dış doğrulama eksikliği ve farklı veri toplama protokolleri nedeniyle bu sonuçların genellenebilirliğinin sınırlı kaldığını vurgulamaktadır (Subramaniam et al., 2022). Klinik kabul açısından modellerin açıklanabilir olması ve klinisyenin karar sürecini destekleyici biçimde tasarlanması önem taşımaktadır.

Sınırlılıklar ve Geleceğe Yönelik Perspektifler

İnersiyal sensörlerin fizyoterapi ve rehabilitasyonda sunduğu önemli olanaklara karşın, klinik uygulamaya tam olarak entegre olabilmeleri için aşılması gereken bazı engeller bulunmaktadır (Ghislieri et al., 2019; Horak et al., 2015):

- Sensör yerleşimi, test protokolleri, filtreleme yöntemleri ve raporlanan parametreler açısından standartların bulunmaması, çalışmalar arası karşılaştırmayı güçleştirmektedir.
- Farklı yaş grupları ve klinik popülasyonlar için yeterli normatif veri ile minimal klinik önemli fark değerlerinin henüz tanımlanmamış olması, sonuçların yorumlanmasını sınırlamaktadır.
- Jiroskop sapması, manyetik bozulmalar ve sensörün cilt üzerindeki hareketi gibi teknik hata kaynakları ölçüm doğruluğunu etkileyebilmektedir.
- Klinisyenlerin veri analizi ve yorumlama konusundaki eğitim gereksinimi ile ek zaman yükü, rutin kullanımın önünde önemli bir engel oluşturmaktadır.
- Kişisel sağlık verilerinin gizliliği ve güvenliği, cihaz maliyeti ve geri ödeme politikaları, özellikle ev temelli uzun süreli izlemde dikkate alınması gereken konulardır.

Gelecekte uzlaşıya dayalı ölçüm protokollerinin geliştirilmesi, açık erişimli ve çok merkezli veri tabanlarının oluşturulması ve sensör verilerinin elektronik sağlık kayıtlarıyla bütünleştirilmesi beklenmektedir. İnersiyal sensörlerin yüzey elektromiyografisi, basınç tabanlıkları ve sanal gerçeklik sistemleri gibi diğer teknolojilerle birlikte kullanıldığı çok modlu yaklaşımlar, denge bozukluğunun mekanizmalarının daha bütüncül biçimde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Fizyoterapi eğitim programlarında giyilebilir teknolojiler ve veri okuryazarlığına ilişkin içeriklerin yer alması da bu teknolojilerin kanıta dayalı biçimde kullanımını destekleyecektir.

Sonuç

Giyilebilir inersiyal sensörler; denge değerlendirmesini sübjektif gözlemden nesnel ve nicel ölçüme, laboratuvar ortamından klinik ve günlük yaşam ortamına taşıyan önemli bir teknolojik gelişmeyi temsil etmektedir. Statik ve dinamik denge bileşenlerinin ayrıntılı analizine olanak tanıyan bu sensörler, özellikle hafif ve erken dönem denge bozukluklarının saptanmasında, düşme riskinin belirlenmesinde ve tedavi etkinliğinin izlenmesinde klinik ölçeklere önemli katkılar sunmaktadır.

Bunun yanında sensör temelli biyogeri bildirim sistemleri, tele-rehabilitasyon uygulamaları ve yapay zekâ destekli karar destek sistemleri, denge rehabilitasyonunu daha kişiselleştirilmiş, erişilebilir ve veriye dayalı hâle getirme potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin klinik uygulamaya tam olarak yansıyabilmesi için ölçüm protokollerinin standartlaştırılması, normatif verilerin oluşturulması ve fizyoterapistlerin bu teknolojileri klinik akıl yürütme süreçleriyle bütünleştirerek kullanabilmesi gerekmektedir. İnersiyal sensörler, klinisyenin yerini alan değil, klinik karar verme sürecini güçlendiren tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilmelidir.

Kaynakça

Bergamini, E., Ligorio, G., Summa, A., Vannozzi, G., Cappozzo, A., & Sabatini, A. M. (2014). Estimating orientation using magnetic and inertial sensors and different sensor fusion approaches: Accuracy assessment in manual and locomotion tasks. *Sensors, 14*(10), 18625–18649. https://doi.org/10.3390/s141018625

Franchignoni, F., Horak, F., Godi, M., Nardone, A., & Giordano, A. (2010). Using psychometric techniques to improve the Balance Evaluation Systems Test: The mini-BESTest. *Journal of Rehabilitation Medicine, 42*(4), 323–331. https://doi.org/10.2340/16501977-0537

Ghislieri, M., Gastaldi, L., Pastorelli, S., Tadano, S., & Agostini, V. (2019). Wearable inertial sensors to assess standing balance: A systematic review. *Sensors, 19*(19), 4075. https://doi.org/10.3390/s19194075

Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: What do we need to know about neural control of balance to prevent falls?. *Age and Ageing, 35*(Suppl. 2), ii7–ii11. https://doi.org/10.1093/ageing/afl077

Horak, F., King, L., & Mancini, M. (2015). Role of body-worn movement monitor technology for balance and gait rehabilitation. *Physical Therapy, 95*(3), 461–470. https://doi.org/10.2522/ptj.20140253

Howcroft, J., Kofman, J., & Lemaire, E. D. (2013). Review of fall risk assessment in geriatric populations using inertial sensors. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 10*, 91. https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-91

Hubble, R. P., Naughton, G. A., Silburn, P. A., & Cole, M. H. (2015). Wearable sensor use for assessing standing balance and walking stability in people with Parkinson's disease: A systematic review. *PLoS ONE, 10*(4), e0123705. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123705

Iosa, M., Picerno, P., Paolucci, S., & Morone, G. (2016). Wearable inertial sensors for human movement analysis. *Expert Review of Medical Devices, 13*(7), 641–659. https://doi.org/10.1080/17434440.2016.1198694

King, L. A., Horak, F. B., Mancini, M., Pierce, D., Priest, K. C., Chesnutt, J., Sullivan, P., & Chapman, J. C. (2014). Instrumenting the balance error scoring system for use with patients reporting persistent balance problems after mild traumatic brain injury. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 95*(2), 353–359. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.10.015

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, 17*, 62. https://doi.org/10.1186/s12984-020-00685-3

Ma, C. Z.-H., Wong, D. W.-C., Lam, W. K., Wan, A. H.-P., & Lee, W. C.-C. (2016). Balance improvement effects of biofeedback systems with state-of-the-art wearable sensors and feedback devices: A systematic review. *Sensors, 16*(4), 434. https://doi.org/10.3390/s16040434

Mancini, M., & Horak, F. B. (2010). The relevance of clinical balance assessment tools to differentiate balance deficits.

European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, 46(2), 239–248.

Mancini, M., Horak, F. B., Zampieri, C., Carlson-Kuhta, P., Nutt, J. G., & Chiari, L. (2011). Trunk accelerometry reveals postural instability in untreated Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders, 17*(7), 557–562. https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2011.05.010

Mancini, M., Salarian, A., Carlson-Kuhta, P., Zampieri, C., King, L., Chiari, L., & Horak, F. B. (2012). ISway: A sensitive, valid and reliable measure of postural control. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 9*, 59. https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-59

Peterka, R. J. (2002). Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology, 88*(3), 1097–1118. https://doi.org/10.1152/jn.2002.88.3.1097

Porciuncula, F., Roto, A. V., Kumar, D., Davis, I., Roy, S., Walsh, C. J., & Awad, L. N. (2018). Wearable movement sensors for rehabilitation: A focused review of technological and clinical advances. *PM&R, 10*(9 Suppl. 2), S220–S232. https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.06.013

Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: Differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 43*(9), 956–966. https://doi.org/10.1109/10.532130

Salarian, A., Horak, F. B., Zampieri, C., Carlson-Kuhta, P., Nutt, J. G., & Aminian, K. (2010). iTUG, a sensitive and reliable measure of mobility. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 18*(3), 303–310. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2010.2047606

Sienko, K. H., Seidler, R. D., Carender, W. J., Goodworth, A. D., Whitney, S. L., & Peterka, R. J. (2018). Potential mechanisms of sensory augmentation systems on human balance control. *Frontiers in Neurology, 9*, 944. https://doi.org/10.3389/fneur.2018.00944

Spain, R. I., St George, R. J., Salarian, A., Mancini, M., Wagner, J. M., Horak, F. B., & Bourdette, D. (2012). Body-worn motion sensors detect balance and gait deficits in people with multiple sclerosis who have normal walking speed. *Gait & Posture, 35*(4), 573–578. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.11.026

Subramaniam, S., Faisal, A. I., & Deen, M. J. (2022). Wearable sensor systems for fall risk assessment: A review. *Frontiers in Digital Health, 4*, 921506. https://doi.org/10.3389/fdgth.2022.921506

BÖLÜM 6

Ortopedik Rehabilitasyonda Objektif İzlemden Kişiselleştirilmiş Tedaviye: Giyilebilir Sensörler, Yapay Zekâ ve Uzaktan Terapötik İzlem

Dr. Öğr. Üyesi Okan ÜZER[1]

Dr. Öğr. Üyesi Sevtap ÇAKIR[2]

[1] Dr. Öğr. Üyesi. Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Tavşanlı Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü. e-mail: okan.uzer@ksbu.edu.tr. Orcid: 0000-0003-2375-9207.

[2] Dr. Öğr. Üyesi. Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Simav Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Terapi ve Rehabilitasyon Bölümü. e-mail: sevtap.cakir@ksbu.edu.tr. Orcid: 0000-0002-4122-3441

Giriş

Ortopedik rehabilitasyon, kas-iskelet sistemi yaralanması ya da cerrahi girişim sonrası bireyin ağrı, eklem hareket açıklığı, kas kuvveti, fonksiyonel kapasite ve yaşam kalitesi açısından mümkün olan en iyi düzeye ulaşmasını destekleyen kapsamlı bir süreçtir (Patil et al., 2026). Geleneksel fizyoterapi yaklaşımında klinik değerlendirme çoğunlukla seans sırasında yapılan ölçümlere, hasta beyanına ve terapistin gözlemsel analizine dayanmaktadır. Bu değerlendirmeler klinik karar verme sürecinde önemli bir yer tutsa da hastanın klinik dışındaki hareket davranışını, egzersizlere uyumunu, günlük aktivite düzeyini ve hareket kalitesini sürekli olarak ortaya koymakta her zaman yeterli olmayabilir (M. P. Baroni et al., 2023). Özellikle total diz artroplastisi, ön çapraz bağ rekonstrüksiyonu, rotator manşet patolojileri, distal radius kırıkları ve kronik bel ağrısı gibi durumlarda klinik iyileşme ile günlük yaşam performansı her zaman aynı hızda ilerlemeyebilir. Bu nedenle ortopedik rehabilitasyonda yalnızca klinikte yapılan ölçümler değil, hastanın kendi yaşam alanındaki gerçek hareket davranışı da değerlendirme sürecine dahil edilmelidir. Giyilebilir sensörler ve uzaktan izlem sistemleri, hastanın rehabilitasyon sürecini klinik dışına taşıyarak daha sürekli, daha ölçülebilir ve daha kişiye özgü bir takip modeli sunmaktadır. Giyilebilir sensörler, objektif ölçüm sistemleri ve yapay zekâ destekli dijital teknolojiler, ortopedik rehabilitasyonda daha ayrıntılı izlem ve kişiye özgü tedavi planlaması için giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Small et al., 2019; Tedesco et al., 2022).

Bu teknolojilerden elde edilen veriler, fizyoterapistin hastayı seans sırasında gözlemlediği performansın ötesinde, günlük yaşam içindeki rehabilitasyon süreciyle birlikte değerlendirmesine yardımcı olabilir. Egzersizlere devamlılık, uygulama süresi, hareketlerin niteliği, günlük aktivite düzeyindeki değişim ve tedaviye verilen yanıt bu sayede daha izlenebilir hale gelir (De Fazio et al., 2023). Kas-iskelet sistemi problemlerinde dijital rehabilitasyon programlarının terapötik egzersiz uyumunu destekleyebildiği, ancak bu etkinin izlem süresi, geri bildirim biçimi ve hastanın bireysel özelliklerine göre değişebildiği bildirilmektedir (Miller et al., 2025). Yapay zekâ destekli sistemler ise bu verilerin daha anlamlı biçimde yorumlanmasına katkı sağlayarak hastanın programa katılımını, performansındaki değişimi ve tedaviye uyumunu daha yakından izleme olanağı sunabilir. Objektif izlem, ortopedik rehabilitasyonda teknik bir takip yönteminden çok, hastanın gereksinimlerini daha

iyi anlamaya ve tedavi planını bireysel yanıtlara göre şekillendirmeye yardımcı olan bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir (Lanotte et al., 2023).

1. Ortopedik Rehabilitasyonda Objektif İzlem İhtiyacı

Ortopedik rehabilitasyonda ağrı, eklem hareket açıklığı, kas kuvveti ve fonksiyonel kapasite gibi parametreler tedavinin yönünü belirleyen temel klinik göstergelerdir (Yu et al., 2025). Bununla birlikte bu ölçümler genellikle belirli zaman noktalarında yapılır ve hastanın gün içindeki değişken performansını tam olarak yansıtmayabilir (Yu et al., 2025). Örneğin diz artroplastisi sonrası klinikte yeterli diz fleksiyonu gösteren bir hasta, evde merdiven çıkma, sandalyeden kalkma veya uzun süre yürüme gibi aktivitelerde hâlâ belirgin kısıtlılık yaşayabilir (Capin et al., 2022). Benzer şekilde omuz rehabilitasyonunda seans sırasında aktif elevasyon açısı artmış olsa bile hastanın evde kolunu ne kadar kullandığı veya egzersizleri doğru formda yapıp yapmadığı çoğu zaman objektif olarak bilinmemektedir (Todorović et al., 2026).

Objektif izlem yaklaşımı, hastanın klinikte ölçülen kapasitesi ile günlük yaşamda ortaya koyduğu gerçek performans arasındaki farkı görünür hale getirebilir. Bu farkın belirlenmesi, egzersiz reçetesinin ilerletilmesi, yüklenme dozunun ayarlanması, aktivite önerilerinin değiştirilmesi ve gerektiğinde erken müdahale yapılması açısından klinik değer taşımaktadır (Attoh-Mensah et al., 2025; Miller et al., 2025). Dolayısıyla objektif izlem, modern ortopedik rehabilitasyonda yalnızca veri toplama işlemi değil, tedavinin zamanlamasını ve dozunu şekillendiren karar destek süreci olarak görülmelidir(Agarwal et al., 2018).

Ortopedik hastalıkların ve cerrahi sonrası iyileşme süreçlerinin takibinde fiziksel fonksiyonun doğru biçimde değerlendirilmesi, tedavinin yönünü belirleyen önemli unsurlardan biridir. Ancak bu değerlendirme yalnızca hastanın kendi beyanına veya klinikte belirli bir anda gösterdiği performansa dayandığında, günlük yaşam içindeki gerçek fonksiyonel durumu tam olarak yansıtmayabilir. Özellikle ağrı, hareket kısıtlılığı, kas kuvvet kaybı veya yüklenme toleransındaki değişimler, hastanın ev ve toplum ortamındaki hareket davranışını klinikte görülenden farklı hale getirebilir. Bu noktada giyilebilir cihazlardan elde edilen günlük fiziksel aktivite verileri, ortopedik hastaların gerçek yaşam içindeki hareket örüntülerini daha objektif ve nicel biçimde izleme olanağı sunmaktadır. Böylece klinikte ölçülen fiziksel kapasite ile günlük yaşamda sergilenen fonksiyonel performans arasındaki fark daha anlaşılır hale gelir ve

rehabilitasyon süreci hastanın gerçek gereksinimlerine göre daha bilinçli biçimde planlanabilir (Agarwal et al., 2018; Smuck et al., 2017).

2. Giyilebilir Sensörler: Temel Teknolojiler ve Klinik Anlamı

Giyilebilir sensörler, vücuda takılabilen veya giysi, bant, saat, bileklik, tabanlık ve benzeri sistemlere entegre edilebilen elektronik ölçüm araçlarıdır (Kurul et al., 2025). Ortopedik rehabilitasyonda en sık kullanılan sensörler arasında ivmeölçerler, jiroskoplar, manyetometreler, inertial measurement unit sistemleri, yüzeyel elektromiyografi sensörleri ve basınç algılayıcı tabanlıklar yer almaktadır (Prisco et al., 2024). İnertial measurement unit sensörleri, segmentin açısal hızını, ivmesini ve uzaydaki yönelimini kaydederek hareket analizi için pratik bir veri kaynağı sunmaktadır. Bu sensörler laboratuvar temelli hareket analiz sistemlerine göre daha taşınabilir, daha düşük maliyetli ve günlük yaşam ölçümlerine daha uygun bir seçenek oluşturmaktadır (Prill et al., 2021). Bununla birlikte sensörün yerleşim noktası, kalibrasyon yöntemi, veri işleme algoritması ve ölçülen aktivitenin tipi sonuçların doğruluğunu doğrudan etkileyebilmektedir (Bissenov et al., 2025).

Alt ekstremitede giyilebilir sensörler daha çok yürüyüş analizi, adım sayısı, kadans, simetri, diz hareket açıklığı, merdiven performansı ve fiziksel aktivite düzeyi gibi parametrelerin izlenmesinde kullanılmaktadır (Prisco et al., 2024). Üst ekstremitede ise bu sistemler omuz hareketleri, el bileği kullanımı, günlük üst ekstremite aktivitesi, egzersiz tekrarı ve hareket kalitesi gibi alanlarda araştırılmaktadır (Zadeh et al., 2023). Özellikle omuz rehabilitasyonunda akıllı saat veya kol üzerine yerleştirilen sensörlerle egzersizlerin sınıflandırılması ve ev programı uyumunun izlenmesi mümkün hale gelmektedir (Burns et al., 2018). Bu nedenle giyilebilir sensörler, fizyoterapistin klinik gözlemini ortadan kaldıran değil, klinik gözlemi ev ve toplum ortamına doğru genişleten araçlar olarak değerlendirilmelidir (Miller et al., 2025).

3. Uzaktan Terapötik İzlem ve Telerehabilitasyon

Telerehabilitasyon, rehabilitasyon hizmetlerinin bilgi ve iletişim teknolojileri aracılığıyla uzaktan sunulması veya desteklenmesi olarak tanımlanabilir (Shnitzer et al., 2025). Uzaktan terapötik izlem ise hastanın egzersiz, aktivite, ağrı, fonksiyon, semptom ve tedavi uyumu gibi terapötik süreçle ilişkili verilerinin klinik dışı ortamdan takip edilmesini ifade eder. Bu model, yalnızca video görüşme ile egzersiz yaptırmaktan ibaret değildir; hastanın rehabilitasyon sürecine ilişkin verilerin düzenli toplanması, yorumlanması ve tedavi planına yansıtılmasını da içerir (Zhang et al., 2026).

Kas-iskelet sistemi problemlerinde telerehabilitasyonun güvenli ve uygulanabilir bir seçenek olduğu, farklı modellerde yüz yüze hizmete alternatif veya tamamlayıcı olarak kullanılabileceği bildirilmektedir (Marina P Baroni et al., 2023). Dijital rehabilitasyon programlarının terapötik egzersiz uyumunu artırabileceği, ancak bu etkinin süreye, hasta grubuna, geri bildirim yapısına ve müdahale tasarımına göre değişebileceği gösterilmiştir. Ev egzersiz programlarına dijital destek eklenmesi kısa dönemde uyumu artırabilir, fakat uzun dönem sürdürülebilirlik için hastanın motivasyonu, teknoloji kullanma becerisi ve terapistle ilişkisi belirleyici olmaya devam etmektedir (Lang et al., 2022). Total diz artroplastisi sonrası yapılan VERITAS çalışmasında, sanal ev egzersiz terapisi geleneksel fizyoterapiye benzer klinik sonuçlar sunarken 3 aylık sağlık hizmeti maliyetlerini azaltmıştır (Bettger et al., 2020). Bu sonuç, uzaktan izlem ve dijital fizyoterapi uygulamalarının özellikle cerrahi sonrası yoğun takip gerektiren ortopedik hasta gruplarında klinik ve ekonomik açıdan değer taşıyabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte uzaktan izlem sistemlerinin başarısı yalnızca teknolojik altyapıya değil, hastaya verilen eğitime, terapistin düzenli geri bildirimine ve tedavi hedeflerinin anlaşılır biçimde belirlenmesine bağlıdır (van Tilburg et al., 2024).

4. Yapay Zekâ Destekli Kişiselleştirilmiş Rehabilitasyon

Yapay zekâ, rehabilitasyonda büyük ve karmaşık veri setlerinden örüntüler çıkararak değerlendirme, tahmin, karar destek ve tedavi uyarlaması süreçlerine katkı sağlayabilen bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Kişiselleştirilmiş rehabilitasyon bağlamında yapay zekâ, hastanın ağrı düzeyi, fonksiyonel kapasitesi, egzersiz performansı, aktivite davranışı ve iyileşme hızı gibi değişkenleri birlikte değerlendirerek tedavi planının bireye göre düzenlenmesine yardımcı olabilir (Attoh-Mensah et al., 2025).

Kas-iskelet sistemi bozukluklarında yapay zekâ destekli rehabilitasyon stratejilerini inceleyen güncel bir ağ meta-analizi, bu yaklaşımların ağrı, fonksiyonel iyileşme ve eklem hareket açıklığı üzerinde olumlu etkiler gösterebildiğini bildirmiştir. Bu sonuçlar umut verici olsa da yapay zekâ destekli rehabilitasyon çalışmalarında hasta grupları, müdahale türleri, algoritmalar ve sonuç ölçütleri arasında belirgin heterojenlik bulunduğu unutulmamalıdır (Luo et al., 2025). Yapay zekâ sistemleri egzersiz formunu tanıma, hatalı hareketi belirleme, tekrar sayısını otomatik hesaplama, aktivite düzeyini sınıflandırma ve riskli gidişatı erken saptama gibi görevlerde kullanılabilir (Boyer et al., 2023).

Örneğin omuz rehabilitasyonunda akıllı saatten alınan inertial verilerle rotator manşet egzersizlerinin sınıflandırılabilmesi, ev egzersizi uyumunun objektif izlenmesi açısından önemli bir teknik potansiyel sunmaktadır (Burns et al., 2018). Benzer şekilde diz rehabilitasyonunda hareket sensörleri ve yapay zekâ algoritmaları, egzersizin yalnızca yapılıp yapılmadığını değil, hareketin uygun formda gerçekleştirilip gerçekleştirilmediğini değerlendirmeye yardımcı olabilir (Prill et al., 2021). Ancak yapay zekâdan elde edilen sonuçlar klinik kararın yerine geçmemeli, fizyoterapistin değerlendirmesiyle birlikte yorumlanan yardımcı veriler olarak kullanılmalıdır (Hao et al., 2025). Bu nedenle yapay zekâ destekli sistemlerin ortopedik rehabilitasyondaki rolü, klinik karar verme sürecini devralmak yerine sağlık profesyonellerinin değerlendirme, izlem ve tedavi planlamasına katkı sağlayan destekleyici araçlar olarak değerlendirilmelidir (Khosravi et al., 2024).

5. Egzersiz Dozajlaması, Uyum ve Geri Bildirim

Ortopedik rehabilitasyonda egzersiz reçetesi genellikle tekrar sayısı, set sayısı, yüklenme düzeyi, hareket açıklığı, ağrı yanıtı ve fonksiyonel hedeflere göre düzenlenmektedir (Smith et al., 2025). Klinikte verilen egzersiz programının evde ne kadar uygulandığı, hangi kalitede yapıldığı ve hastanın egzersize nasıl yanıt verdiği çoğu zaman yeterince izlenememektedir (Lang et al., 2022).

Dijital rehabilitasyon uygulamaları, hatırlatıcılar, video rehberliği, ilerleme grafikleri, oyunlaştırma, sensör tabanlı geri bildirim ve terapist mesajlaşması gibi özelliklerle hasta uyumunu destekleyebilir. Bununla birlikte mobil uygulama pazarında yer alan kas-iskelet rehabilitasyon uygulamalarının kanıt düzeyi, klinik entegrasyonu ve fonksiyonel kapsamı

değişkenlik göstermektedir (Ryan et al., 2022). Bu nedenle dijital rehabilitasyon uygulamaları değerlendirilirken, uygulamanın popülerliği kadar klinik amaçlara ne ölçüde hizmet ettiği de göz önünde bulundurulmalıdır. Egzersiz ilerlemesini izleyebilmesi, hasta güvenliğini desteklemesi, geri bildirim sunabilmesi ve sağlık profesyonellerinin tedavi planlamasına katkı sağlayabilmesi bu uygulamaların klinik değerini belirleyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır (Wu et al., 2026).

Egzersiz dozajlaması, rehabilitasyon sürecinde hastanın mevcut klinik durumu ve iyileşme evresiyle uyumlu biçimde planlanması gereken dinamik bir süreçtir. Doku iyileşmesi, ağrı yanıtı, fonksiyonel kapasite, yüklenme toleransı ve psikolojik hazır oluş düzeyi; egzersizin zamanlaması, şiddeti ve ilerletilmesi üzerinde etkili olabilecek temel faktörler arasında yer almaktadır. Sensörlerden elde edilen verilerin klinik muayene bulguları ve hasta bildirimiyle birlikte değerlendirilmesi, egzersiz dozunun daha güvenli, izlenebilir ve bireysel özelliklere uygun biçimde düzenlenmesine katkı sağlayabilir (Gu et al., 2026).

6. Ortopedik Rehabilitasyonda Klinik Uygulama Alanları

Diz ve kalça artroplastisi sonrası rehabilitasyon

Total diz ve kalça artroplastisi sonrası rehabilitasyon, giyilebilir sensörler ve uzaktan izlem sistemleri için en çok çalışılan ortopedik uygulama alanlarından biridir (King et al., 2025). Bu hasta grubunda erken dönemde eklem hareket açıklığı, yürüme miktarı, adım sayısı, yürüme simetrisi, ağrı düzeyi ve fonksiyonel bağımsızlık yakından izlenmelidir (Feng et al., 2023). Giyilebilir sensörler, artroplasti sonrası hastanın klinik randevular arasında nasıl ilerlediğini gösterebilir ve olağan dışı iyileşme paternlerinin erken fark edilmesine yardımcı olabilir (Astephen Wilson & Chapman, 2026). Diz artroplastisi sonrası sanal egzersiz terapisi ve telerehabilitasyon, uygun hasta seçimi ve terapist takibiyle geleneksel bakıma benzer fonksiyonel sonuçlar sağlayabilir (Bettger et al., 2020). Total kalça artroplastisi sonrası rehabilitasyona yönelik güncel bir meta-analizde de teknoloji destekli rehabilitasyon uygulamalarının, özellikle telerehabilitasyonun, hastaların fiziksel fonksiyonunu destekleyebilecek bir yaklaşım olduğu belirtilmiştir. Ancak bu sonuçların uzun dönem etkinlik ve güvenlik açısından daha güçlü araştırmalarla desteklenmesi gerektiği de ifade edilmektedir (Wu et al., 2023).

Ön çapraz bağ ve spor yaralanmaları sonrası izlem

Ön çapraz bağ rekonstrüksiyonu sonrası rehabilitasyonda karar verme süreci yalnızca zaman temelli değil, kuvvet, denge, sıçrama performansı, hareket kalitesi ve psikolojik hazır oluş gibi çok boyutlu ölçütlere dayanmalıdır (Van Melick et al., 2016). Güncel yaklaşımlar, rehabilitasyon evreleri arasında ilerlemede ve spora dönüş kararında kuvvet simetrisi, hop testleri, nöromüsküler kontrol, hareket kalitesi ve psikolojik değerlendirmelerin birlikte kullanılmasını önermektedir (Brinlee et al., 2022; Myer et al., 2006). ESSKA anketinde de spora özgü aktivitelere geçişte fonksiyonel ölçütlerin zaman temelli ölçütlere göre daha uygun görüldüğü bildirilmektedir (Vascellari et al., 2020). Bu nedenle objektif ve kriter temelli değerlendirme, ön çapraz bağ rehabilitasyonunda daha güvenli ve bireye özgü karar verme sürecini destekleyebilir.

Bu süreçte giyilebilir sensörler, koşu, sıçrama, iniş mekaniği, yüklenme simetrisi ve günlük aktivite düzeyi gibi performans bileşenlerinin klinik dışı ortamlarda da izlenmesine katkı sağlayabilir (Gu et al., 2026). Böylece spora dönüş sürecinde hastanın yalnızca test sırasındaki performansı değil, günlük yaşam ve antrenman ortamındaki yüklenme toleransı da daha bütüncül biçimde değerlendirilebilir (Prisco et al., 2024). Ancak sensörlerden elde edilen veriler spora dönüş kararında tek başına belirleyici görülmemeli; klinik testler, hasta bildirimi ve fizyoterapist gözlemiyle birlikte yorumlanmalıdır.

Omuz ve üst ekstremite rehabilitasyonu

Üst ekstremite kas-iskelet sistemi problemlerinde giyilebilir sensör teknolojileri; omuz hareketlerinin değerlendirilmesi, el bileği ve üst ekstremite kullanımının izlenmesi, ev egzersiz programlarının takibi ve ergonomik risklerin belirlenmesi gibi farklı amaçlarla kullanılabilmektedir. Rotator manşet patolojileri, adeziv kapsülit, distal radius kırıkları, el bileği problemleri ve işe bağlı üst ekstremite bozuklukları, bu teknolojilerin klinik açıdan uygulanabileceği başlıca alanlar arasında yer almaktadır (Zadeh et al., 2023). Ev temelli omuz rehabilitasyonuna yönelik uzaktan izlem cihazlarını inceleyen çalışmalar, bu alanda teknolojik çeşitliliğin giderek arttığını göstermektedir; ancak mevcut kanıtların önemli bir bölümünün hâlâ laboratuvar veya kontrollü klinik ortamlarla sınırlı olması, gerçek yaşam koşullarındaki uygulanabilirlik açısından dikkatli yorumlanmalıdır. Makine öğrenmesi tabanlı modellerin omuz rehabilitasyon egzersizlerini sınıflandırmada kullanılabilmesi, gelecekte ev egzersizi uyumunun ve hareket kalitesinin daha objektif biçimde izlenmesine katkı sağlayabilir (Sassi et al., 2025). Bununla birlikte, üst ekstremite hareketlerinin günlük yaşam içinde oldukça değişken

ve göreve özgü olması, sensörlerden elde edilen verilerin klinik yorumunu alt ekstremite yürüyüş analizine kıyasla daha karmaşık hale getirebilmektedir (Thakkar et al., 2026).

Bel ağrısı ve omurga rehabilitasyonu

Kronik bel ağrısı ve diğer omurga kaynaklı kas-iskelet sistemi problemleri, dijital sağlık ve telerehabilitasyon uygulamalarının yaygın olarak araştırıldığı alanlardandır (Hewitt et al., 2020). Akıllı telefon uygulamaları, video tabanlı egzersiz programları, giyilebilir aktivite izleyicileri ve uzaktan danışmanlık modelleri bu hasta grubunda ağrı, fonksiyon ve öz yönetim becerilerini desteklemek amacıyla kullanılmaktadır (Tayshete et al., 2025). Kronik kas-iskelet ağrısında giyilebilir cihazlarla desteklenen telemedicine uygulamasını inceleyen randomize kontrollü bir çalışmada, objektif verilerin kaydedildiği ev temelli takip modelinin ağrı ilişkili sonuçlar açısından araştırıldığı bildirilmiştir (Hayashi et al., 2025). Bu alanda dijital uygulamalar umut verici olsa da ağrı deneyiminin biyopsikososyal yapısı nedeniyle teknoloji tabanlı izlem, eğitim, davranış değişikliği ve terapötik ilişki ile ele alınmalıdır (M. P. Baroni et al., 2023).

7. Klinik İş Akışına Entegrasyon

Giyilebilir sensör ve yapay zekâ destekli sistemlerin klinik değeri, yalnızca doğru veri toplamalarına değil, bu verinin fizyoterapistin iş akışına anlamlı biçimde girmesine bağlıdır (Miller et al., 2025). Fizyoterapist için asıl sorun çoğu zaman veri eksikliği değil, elde edilen verinin hangi klinik karara dönüşeceğinin net olmamasıdır (Williams et al., 2025). Bu nedenle teknolojik sistemler hastaya ve terapiste gereksiz veri yükü oluşturmamalı, karar vermeyi kolaylaştıran sade, anlaşılır ve klinik olarak yorumlanabilir çıktılar üretmelidir (van Tilburg et al., 2024).

Klinik entegrasyonda ilk basamak, hangi hasta grubunda hangi verinin gerçekten tedavi kararını değiştireceğini belirlemektir (Gu et al., 2026). Örneğin diz artroplastisi sonrası günlük adım sayısı, diz fleksiyon açısı ve yürüme simetrisi anlamlı olabilirken, omuz rehabilitasyonunda aktif kol kullanımı, egzersiz tekrarı ve hareket paterninin kalitesi daha değerli olabilir (King et al., 2025).

İkinci basamak, veriye göre uygulanacak klinik eylemin önceden tanımlanmasıdır. Örneğin hastanın günlük aktivite düzeyi hızla düşüyorsa ağrı, ödem, enfeksiyon, korku-kaçınma veya egzersiz toleransı açısından yeniden değerlendirme yapılabilir (Rama et al., 2025).

Üçüncü basamak ise hasta eğitimi ve ortak karar verme sürecidir, çünkü hastanın teknolojiyi neden kullandığını anlamadığı bir sistem uzun süreli uyum sağlayamaz. Bu nedenle sensör veya uygulama reçetelemek, klasik egzersiz reçetesi vermek gibi düşünülmeli ve kullanım amacı, beklenen fayda, veri güvenliği ve takip planı hastaya açıkça anlatılmalıdır (Terada et al., 2025).

8. Sınırlılıklar, Etik Sorunlar ve Güvenlik

Giyilebilir sensörler ve yapay zekâ destekli sistemler ortopedik rehabilitasyonda önemli fırsatlar sunsa da bu teknolojilerin sınırsız ve sorunsuz araçlar olduğu düşünülmemelidir. Sensör yerleşimindeki küçük farklılıklar, kalibrasyon hataları, cihazlar arası ölçüm farklılıkları ve algoritma çeşitliliği sonuçların güvenilirliğini etkileyebilir. Bu nedenle klinik kullanımda sensör verisi mutlak gerçek olarak değil, belirli hata payı ve bağlam içinde yorumlanması gereken bir ölçüm olarak kabul edilmelidir (Bissenov et al., 2025; Prisco et al., 2024).

Yapay zekâ sistemlerinde eğitim verisinin sınırlı, tek merkezli veya belirli hasta gruplarına özgü olması algoritmik yanlılık riskini artırabilir. Bu durum özellikle yaşlı hastalar, teknolojiye erişimi sınırlı bireyler, düşük dijital okuryazarlığa sahip hastalar ve farklı sosyokültürel gruplar için eşitsizlik yaratabilir. Veri mahremiyeti, hasta onamı, veri saklama koşulları, üçüncü taraf erişimi ve siber güvenlik riskleri uzaktan izlem sistemlerinde temel etik başlıklar arasında yer almaktadır (Attoh-Mensah et al., 2025; Pham, 2025).

Klinisyen açısından bir diğer önemli soru, sensör veya yapay zekâ uyarısına rağmen müdahale edilmediğinde ya da yanlış pozitif bir uyarı gereksiz tedavi değişikliğine yol açtığında sorumluluğun nasıl paylaşılacağıdır. Bu nedenle yapay zekâ ve sensör tabanlı sistemler klinik denetim, şeffaf algoritma yapısı, hasta bilgilendirmesi ve etik veri yönetimi ilkeleriyle birlikte kullanılmalıdır. Teknoloji kullanımında temel ilke, hastayı daha fazla ölçmek değil, hastanın

iyileşmesini daha güvenli, daha anlaşılır ve daha katılımcı bir süreç haline getirmek olmalıdır (Miller et al., 2025; Pham, 2025).

9. Gelecek Yönelimleri

Ortopedik rehabilitasyonda geleceğin izlem sistemleri büyük olasılıkla tek bir cihazdan ziyade sensör, mobil uygulama, hasta bildirimi, klinik değerlendirme ve yapay zekâ analizini birleştiren çok kaynaklı veri modelleri üzerine kurulacaktır. Bu modellerde yalnızca hareket miktarı değil, hareket kalitesi, ağrı yanıtı, yorgunluk, uyku, aktivite alışkanlığı ve psikososyal faktörler birlikte değerlendirilebilir (Astephen Wilson & Chapman, 2026; Han et al., 2025) Akıllı telefon kameraları ve markerless hareket analizi sistemleri, pahalı laboratuvar altyapısına gerek kalmadan egzersiz formunun izlenmesi için gelecekte daha yaygın kullanılabilir (Pereira et al., 2023).

Giyilebilir sensörler ve yapay zekâ modelleri, özellikle cerrahi sonrası komplikasyon riski, yavaş iyileşme paterni, egzersiz uyumsuzluğu ve erken fonksiyonel gerileme gibi durumların önceden fark edilmesinde daha fazla rol alabilir (Astephen Wilson & Chapman, 2026). Bununla birlikte gelecekteki çalışmaların yalnızca teknik doğruluk üzerine değil, klinik sonuçlar, hasta memnuniyeti, maliyet-etkililik, güvenlik ve sağlık sistemine entegrasyon üzerine de odaklanması gerekmektedir (van Tilburg et al., 2024). Özellikle fizyoterapistlerin bu sistemlerin tasarım sürecine dahil edilmesi, klinik olarak anlamlı, kullanımı kolay ve hastaya gerçekten fayda sağlayan çözümlerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Williams et al., 2025).

10. Sonuç

Sonuç olarak giyilebilir sensörler, yapay zekâ destekli sistemler ve uzaktan terapötik izlem yaklaşımları, ortopedik rehabilitasyonda değerlendirme ve takip süreçlerine yeni bir bakış açısı kazandırmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde hastanın klinik seanslardaki performansının yanında günlük yaşam içindeki hareket davranışı, egzersizlere katılımı ve fonksiyonel ilerleyişi daha ayrıntılı biçimde izlenebilir. Böyle bir izlem yapısı, rehabilitasyon sürecinin daha

ölçülebilir, takip edilebilir ve bireysel gereksinimlere duyarlı şekilde planlanmasına katkı sağlayabilir. Elde edilen verilerin klinik açıdan anlamlı hale gelmesi ise bu verilerin hastanın ihtiyaçları, tedavi hedefleri ve sağlık profesyonellerinin klinik değerlendirmeleriyle birlikte yorumlanmasına bağlıdır. Bu nedenle dijital teknolojiler, ortopedik rehabilitasyonda kişiselleştirilmiş bakım anlayışını destekleyen ve klinik karar verme sürecini güçlendiren tamamlayıcı araçlar olarak değerlendirilebilir. Gelecekte etkili rehabilitasyon modellerinin, teknolojik izlem olanaklarını terapötik ilişki, klinik deneyim ve hasta merkezli karar verme süreçleriyle uyum içinde bir araya getiren yaklaşımlar üzerinden gelişmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

Agarwal, V., Smuck, M., Tomkins-Lane, C., & Shah, N. H. (2018). Inferring Physical Function From Wearable Activity Monitors: Analysis of Free-Living Activity Data From Patients With Knee Osteoarthritis. *JMIR Mhealth Uhealth*, *6*(12), e11315. https://doi.org/10.2196/11315

Astephen Wilson, J. L., & Chapman, R. M. (2026). Reimagining Outcomes: A Perspective Review of Advances in Remote Monitoring Technologies in Post-Arthroplasty Patient Care. *Journal of Orthopaedic Research®*, *44*(1), e70064.

Attoh-Mensah, E., Boujut, A., Desmons, M., & Perrochon, A. (2025). Artificial intelligence in personalized rehabilitation: current applications and a SWOT analysis. *Front Digit Health*, *7*, 1606088. https://doi.org/10.3389/fdgth.2025.1606088

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*, *13*(1), 1.

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. *Arch Physiother*, *13*(1), 1. https://doi.org/10.1186/s40945-022-00155-0

Bettger, J. P., Green, C. L., Holmes, D. N., Chokshi, A., Mather III, R. C., Hoch, B. T., De Leon, A. J., Aluisio, F., Seyler, T. M., & Del Gaizo, D. J. (2020). Effects of virtual exercise rehabilitation in-home therapy compared with traditional care after total knee arthroplasty: VERITAS, a randomized controlled trial. *JBJS*, *102*(2), 101-109.

Bissenov, A., Zhubi, E., Engh, M. A., Gresits, O., Tóth, R., & Terebessy, T. (2025). Concurrent validity of wearable IMUs for sagittal plane lower-limb range of motion during walking and estimated ground reaction forces: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, *20*(1), 1-14.

Boyer, P., Burns, D., & Whyne, C. (2023). Evaluation of at-home physiotherapy: machine-learning prediction with smart watch inertial sensors. *Bone & Joint Research*, *12*(3), 165-177.

Brinlee, A. W., Dickenson, S. B., Hunter-Giordano, A., & Snyder-Mackler, L. (2022). ACL reconstruction rehabilitation: clinical data, biologic healing, and criterion-based milestones to inform a return-to-sport guideline. *Sports health*, *14*(5), 770-779.

Burns, D. M., Leung, N., Hardisty, M., Whyne, C. M., Henry, P., & McLachlin, S. (2018). Shoulder physiotherapy exercise recognition: machine learning the inertial signals from a smartwatch. *Physiological measurement*, *39*(7), 075007.

Capin, J. J., Bade, M. J., Jennings, J. M., Snyder-Mackler, L., & Stevens-Lapsley, J. E. (2022). Total knee arthroplasty assessments should include strength and performance-based functional tests to complement range-of-motion and patient-reported outcome measures. *Physical Therapy*, *102*(6), pzac033.

De Fazio, R., Mastronardi, V. M., De Vittorio, M., & Visconti, P. (2023). Wearable sensors and smart devices to monitor rehabilitation parameters and sports performance: an overview. *Sensors*, *23*(4), 1856.

Feng, Y., Liu, Y., Fang, Y., Chang, J., Deng, F., Liu, J., & Xiong, Y. (2023). Advances in the application of wearable sensors for gait analysis after total knee arthroplasty: a systematic review. *Arthroplasty*, *5*(1), 49.

Gu, B., Kim, H. S., Kim, H., & Yoo, J.-I. (2026). Advancements in Wearable Sensor Technologies for Health Monitoring in Terms of Clinical Applications, Rehabilitation, and Disease Risk Assessment: Systematic Review. *JMIR mHealth and uHealth*, *14*(1), e76084.

Han, F., Huang, X., Wang, X., Chen, Y. f., Lu, C., Li, S., Lu, L., & Zhang, D. W. (2025). Artificial intelligence in orthopedic surgery: current applications, challenges, and future directions. *MedComm*, *6*(7), e70260.

Hao, J., Yao, Z., Tang, Y., Remis, A., Wu, K., & Yu, X. (2025). Artificial Intelligence in Physical Therapy: Evaluating ChatGPT's Role in Clinical Decision Support for Musculoskeletal Care: Artificial Intelligence in Physical Therapy...: J. Hao et al. *Annals of Biomedical Engineering*, *53*(1), 9.

Hayashi, K., Miki, K., Shiro, Y., Tetsunaga, T., Takasusuki, T., Hosoi, M., & Yukioka, M. (2025). Utilization of telemedicine in conjunction with wearable devices for patients

with chronic musculoskeletal pain: a randomized controlled clinical trial. *Scientific reports*, *15*(1), 1396.

Hewitt, S., Sephton, R., & Yeowell, G. (2020). The effectiveness of digital health interventions in the management of musculoskeletal conditions: systematic literature review. *Journal of medical Internet research*, *22*(6), e15617.

Khosravi, M., Zare, Z., Mojtabaeian, S. M., & Izadi, R. (2024). Artificial Intelligence and Decision-Making in Healthcare: A Thematic Analysis of a Systematic Review of Reviews. *Health Serv Res Manag Epidemiol*, *11*, 23333928241234863. https://doi.org/10.1177/23333928241234863

King, S. W., Chapman, L. S., Smith, T. J., Palan, J., & Pandit, H. (2025). Wearable Sensors to Aid Rehabilitation Following Total Knee Arthroplasty: Experiences of Trial Participants. *Cureus*, *17*(3).

Kurul, F., Aydoğan, D., Janat, S., Kırlangıc, I. A., Kaya, H. O., & Topkaya, S. N. (2025). Wearable Sensors for Health Monitoring: Current Applications, Trends, and Future Directions. *Biosensors and Bioelectronics: X*, 100727.

Lang, S., McLelland, C., MacDonald, D., & Hamilton, D. F. (2022). Do digital interventions increase adherence to home exercise rehabilitation? A systematic review of randomised controlled trials. *Archives of physiotherapy*, *12*(1), 24.

Lanotte, F., O'Brien, M. K., & Jayaraman, A. (2023). AI in rehabilitation medicine: opportunities and challenges. *Annals of Rehabilitation Medicine*, *47*(6), 444-458.

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.

Miller, A. E., Holleran, C. L., Bland, M. D., Fitzsimmons-Craft, E. E., Newman, C. A., Maddox, T. M., & Lang, C. E. (2025). Perspectives of key stakeholders on integrating wearable sensor technology into rehabilitation care: a mixed-methods analysis. *Front Digit Health*, *7*, 1534419. https://doi.org/10.3389/fdgth.2025.1534419

Myer, G. D., Paterno, M. V., Ford, K. R., Quatman, C. E., & Hewett, T. E. (2006). Rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction: criteria-based progression through the return-to-sport phase. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, *36*(6), 385-402.

Patil, N., Saket, R., Diwakar, R., Reddy, G. H. V., Kumar, K. A., & Sathe, A. M. (2026). Orthopedic Trauma Management: A Comprehensive Review of Surgical Interventions, Rehabilitation, and Patient Outcomes. *Cureus*, *18*(2), e104429. https://doi.org/10.7759/cureus.104429

Pereira, B., Cunha, B., Viana, P., Lopes, M., Melo, A. S., & Sousa, A. S. (2023). A machine learning app for monitoring physical therapy at home. *Sensors*, *24*(1), 158.

Pham, T. (2025). Ethical and legal considerations in healthcare AI: innovation and policy for safe and fair use. *Royal Society open science*, *12*(5), 241873.

Prill, R., Walter, M., Królikowska, A., & Becker, R. (2021). A systematic review of diagnostic accuracy and clinical applications of wearable movement sensors for knee joint rehabilitation. *Sensors*, *21*(24), 8221.

Prisco, G., Pirozzi, M. A., Santone, A., Esposito, F., Cesarelli, M., Amato, F., & Donisi, L. (2024). Validity of wearable inertial sensors for gait analysis: A systematic review. *Diagnostics*, *15*(1), 36.

Rama, E., Zuberi, S., Aly, M., Askari, A., & Iqbal, F. M. (2025). Clinical outcomes of passive sensors in remote monitoring: a systematic review. *Sensors*, *25*(11), 3285.

Ryan, S., Chasaide, N. N., O'Hanrahan, S., Corcoran, D., Caulfield, B., & Argent, R. (2022). mHealth apps for musculoskeletal rehabilitation: systematic search in app stores and content analysis. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, *9*(3), e34355.

Sassi, M., Carnevale, A., Mancuso, M., Schena, E., Pecchia, L., & Longo, U. G. (2025). Machine-learning models for shoulder rehabilitation exercises classification using a wearable system. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *33*(4), 1452-1458.

Shnitzer, H., Chan, J., Yau, T., McIntyre, M., Andreoli, A., Kua, A., Bayley, M., Leochico, C. F., Guo, M., & Munce, S. (2025). The safety of telerehabilitation: systematic review. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, *12*, e68681.

Small, S. R., Bullock, G. S., Khalid, S., Barker, K., Trivella, M., & Price, A. J. (2019). Current clinical utilisation of wearable motion sensors for the assessment of outcome following knee arthroplasty: a scoping review. *BMJ Open*, *9*(12), e033832. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-033832

Smith, S. S., Snodgrass, S. J., & Osmotherly, P. G. (2025). THE Key Elements of the Exercise Prescription Process in Musculoskeletal Rehabilitation in a One-On-One Setting. A Delphi Study of Australian Physiotherapy Specialists. *Musculoskeletal care*, *23*(1), e70042.

Smuck, M., Tomkins-Lane, C., Ith, M. A., Jarosz, R., & Kao, M. J. (2017). Physical performance analysis: A new approach to assessing free-living physical activity in musculoskeletal pain and mobility-limited populations. *PLoS One*, *12*(2), e0172804. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172804

Tayshete, I., McCarthy, C., Ademoyegun, A., Gebrye, T., Fatoye, F., & Mbada, C. (2025). Effectiveness of smartphone-based applications in low-back pain rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Bulletin of Faculty of Physical Therapy*, *30*(1), 29.

Tedesco, S., Torre, O. M., Belcastro, M., Torchia, P., Alfieri, D., Khokhlova, L., Komaris, S. D., & O'flynn, B. (2022). Design of a multi-sensors wearable platform for remote monitoring of knee rehabilitation. *IEEE Access*, *10*, 98309-98328.

Terada, T., Hausen, M., Way, K. L., O'Neill, C. D., Marçal, I. R., Dorian, P., & Reed, J. L. (2025). Wearable devices for exercise prescription and physical activity monitoring in patients with various cardiovascular conditions. *CJC open*, *7*(5), 695-706.

Thakkar, P., Sharma, D., Hodakowski, A., Bonadiman, J. A., Westrick, J., & Gustafson, J. A. (2026). Accuracy and reliability of inertial measurement units to estimate shoulder joint kinematics for clinical application: a systematic review. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 1-27.

Todorović, P., Pavlović, N., Kopilaš, A., Vukojević, K., & Čarić, A. (2026). Tele-Rehabilitation and Tele-Diagnostics in Shoulder Disorders: Current Evidence, Challenges, and Future Directions-A Narrative Review. *J Clin Med*, *15*(7). https://doi.org/10.3390/jcm15072694

Van Melick, N., Van Cingel, R. E., Brooijmans, F., Neeter, C., van Tienen, T., Hullegie, W., & Nijhuis-van der Sanden, M. W. (2016). Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *British journal of sports medicine*, *50*(24), 1506-1515.

van Tilburg, M. L., Spin, I., Pisters, M. F., Staal, J. B., Ostelo, R. W., van der Velde, M., Veenhof, C., & Kloek, C. J. (2024). Barriers and facilitators to the implementation of digital health services for people with musculoskeletal conditions in the primary health care setting: systematic review. *Journal of medical Internet research*, *26*, e49868.

Vascellari, A., Gokeler, A., Grassi, A., Canata, G. L., Zaffagnini, S., & Jones, H. (2020). Functional progression milestones following anterior cruciate ligament reconstruction are more appropriate than time-based criteria: a survey among the ESSKA. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *28*(11), 3647-3654.

Williams, C., Toth, L., Osborne, R., Bailey, C. E., & Joshi, A. (2025). Assessing Physical Therapists' Expectations and Experiences With an Automated Rehabilitation System Using Technology Acceptance Model: Multiple Methods Pilot Study. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, *12*, e67440.

Wu, C.-H., Chang, C.-N., Chang, C.-F., Lin, M.-H., Chen, H.-Y., & Chen, Y.-C. (2026). Clinical Usability of Exercise Prescription Apps for Professional Use: Systematic Review and Multidimensional Evaluation. *JMIR mHealth and uHealth*, *14*(1), e77616.

Wu, L., Li, X., Hua, L., & Sun, Q. (2023). Effects of technology-assisted rehabilitation for patients with hip arthroplasty: a meta-analysis. *Medicine*, *102*(45), e35921.

Yu, X., Wang, H.-j., Guo, X.-f., Pei, Q., Wang, X.-q., Zhi, W.-q., Hao, J., Wang, J.-x., & Huang, Q. (2025). Evaluating the impact of movement representation techniques on recovery outcomes in post-orthopaedic surgery individuals: a systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, *26*(1), 271.

Zadeh, S. M., MacDermid, J., Johnson, J., Birmingham, T. B., & Shafiee, E. (2023). Applications of wearable sensors in upper extremity MSK conditions: a scoping review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *20*(1), 158.

Zhang, K., Schatman, M. E., & Hascalovici, J. (2026). Remote Therapeutic Monitoring in Musculoskeletal Pain Medicine: A Systematic Review and Comparison with Remote Physiologic Monitoring. *Journal of Pain Research*, 588752.

BÖLÜM 7

ORTOPEDİK CERRAHİDE YAPAY ZEKA: TANIDAN CERRAHİ PLANLAMAYA GÜNCEL UYGULAMALAR

FATİH TAHAK [1]

GİRİŞ

Yapay zeka (YZ), insan zekâsıyla ilişkilendirilen örüntü tanıma, sınıflandırma, tahmin ve karar verme gibi görevlerin bilgisayar sistemleri tarafından gerçekleştirilmesini amaçlayan geniş ve yeni bir teknoloji alanıdır. Sağlık hizmetlerinde dijital veriler hızla artış göstermekte ve görüntüleme yöntemlerinin merkezine yerleşmekte olup YZ uygulamalarının klinik tıpta etkinliğini belirgin biçimde artırmıştır. Ortopedi ve travmatoloji; direkt grafi, bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG), üç boyutlu görüntülemeler ve çok sayıda klinik değişkenin birlikte değerlendirildiği bir alan olması nedeniyle YZ araştırmaları için son derece yaygın bir uygulama ortamı sunmaktadır (Lalehzarian et al., 2021; Lisacek-Kiosoglous et al., 2023).

Ortopedide ilk YZ uygulamalarının önemli bir bölümü görüntü tanıma üzerine kurulmuştur. Kırığın varlığının saptanması,

[1] Uzman Doktor, Beyhekim Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Ortopedi ve Travmatoloji, Orcid: 0009-0005-3684-7953

osteoartritin derecelendirilmesi ve kemik lezyonlarının sınıflandırılması gibi görevlerde YZ modelleri kullanımı araştırılmıştır. Yakın dönemde ise yalnızca tanı koymaktan ziyade; kırık sınıflandırması, hasta-spesifik cerrahi planlama, implant boyutlandırma, komplikasyon tahmini, robotik sistemlerin desteklenmesi ve büyük dil modelleriyle klinik bilgi işleme gibi daha karmaşık süreçlere genişlemiştir (Badejo et al., 2026; Eskandar, 2026).

Bu bölümün amacı, YZ'nin ortopedik cerrahideki; tanı, sınıflandırma, cerrahi planlama, intraoperatif uygulamalar, prognoz tahmini gibi alanlardaki kullanımını klinik bir bakış açısıyla özetlemek; mevcut kanıtları tartışmak ve klinik uygulamaya geçişte karşılaşılan sınırlılıkları ortaya koymaktır.

YAPAY ZEKANIN TEMEL KAVRAMLARI

Makine öğrenmesi (machine learning; ML), bilgisayar sistemlerinin açık biçimde her bir kural programlanmadan verilerdeki örüntülerden öğrenmesini sağlayan YZ alt alanıdır. (Lalehzarian et al., 2021).

Derin öğrenme (deep learning), çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak özellikle görüntü, ses ve metin gibi yüksek boyutlu verilerde özellik çıkarımını büyük ölçüde otomatikleştiren bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Ortopedik görüntü analizinde konvolüsyonel sinir ağları (convolutional neural networks; CNN), görüntülerdeki karmaşık örüntü ve özelliklerin otomatik olarak belirlenebilmesi nedeniyle kırık tespiti ve sınıflandırması başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmıştır (Lalehzarian et al., 2021)

Generatif YZ ise yalnızca sınıflandırma veya tahmin yapmak yerine yeni metin, görüntü ya da başka içerikler üretebilen modelleri kapsar. Büyük dil modelleri (large language models; LLM), geniş metin koleksiyonları üzerinde eğitilerek doğal dilde soru yanıtlama,

özetleme ve içerik üretme becerisi kazanır. Bu modellerin ortopedide eğitim, hasta bilgilendirme, dokümantasyon ve araştırma süreçlerinde kullanımı hızla artmaktadır (Chatterjee et al., 2023).

ORTOPEDİK TANI VE GÖRÜNTÜLEMEDE YAPAY ZEKA

Kırık Tespiti

Kırık tespiti, ortopedik YZ literatürünün en olgun alanlarından biridir. Lindsey ve arkadaşları tarafından geliştirilen derin sinir ağı, ekstremite grafilerinde kırık tespitinde klinisyen performansını desteklemiş ve YZ'nin bağımsız bir 'rakip okuyucu'dan çok karar destek aracı olarak kullanılabileceğine ilişkin erken klinik kanıtlardan birini sağlamıştır (Lindsey et al., 2018).

Kuo ve arkadaşlarının 42 çalışmayı içeren sistematik derleme ve meta-analizi, YZ algoritmalarının kırık tespit performansının klinisyenlerle karşılaştırılabilir düzeylere ulaşabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte çalışma tasarımları, veri setlerinin niteliği, anatomik bölgeler ve doğrulama yöntemleri arasında belirgin heterojenite vardır (Kuo et al., 2022). Langerhuizen ve arkadaşları da erken dönem literatürde yüksek performans değerleri bildirilmesine rağmen dış doğrulama ve klinik uygulanabilirlik sorunlarına dikkat çekmiştir (Langerhuizen et al., 2019).

2026 tarihli güncel bir derleme, 2016-2026 döneminde ortopedik kırık tanısı ve cerrahi planlama çalışmalarını birlikte ele almış; CNN ve vision transformer tabanlı modellerin kalça, femur, omurga, skafoid, tibia, pelvis ve kaburga gibi farklı bölgelerde yüksek ayırt edici performans gösterebildiğini bildirmiştir (Badejo et al., 2026). Bu sonuçlar, YZ'nin özellikle acil servis ve yoğun görüntüleme iş yükü olan ortamlarda ikinci okuyucu olarak potansiyelini desteklemektedir.

Kırık Sınıflandırması

Kırığın saptanması ile kırığın sınıflandırılması aynı problem değildir. Kırık sınıflandırması çoğu zaman fragman sayısı, eklem yüzü tutulumu, deplasman yönü ve morfolojik özelliklerin birlikte yorumlanmasını gerektirir. Ayrıca kullanılan referans sınıflandırmanın gözlemciler arası güvenilirliği sınırlıysa, YZ modelinin 'doğru' etiketi öğrenmesi de zorlaşır. Bu nedenle algoritmanın yüksek doğruluk göstermesi, sınıflandırmanın klinik karar üzerindeki etkisini tek başına kanıtlamaz (Langerhuizen et al., 2019).

Kompleks periartiküler kırıklarda, iki boyutlu görüntülerin yanı sıra BT tabanlı üç boyutlu değerlendirme ve otomatik segmentasyon yöntemlerinin kullanımı giderek artmaktadır. Tibia plato kırıklarında 3D U-Net tabanlı derin öğrenme modelleri ile BT görüntülerinden kemik yapıların otomatik olarak segmente edilebildiği, yüksek doğrulukta üç boyutlu kırık haritaları oluşturulabildiği ve bu modellerin Schatzker sınıflandırmasında klinisyenlere yardımcı olabileceği gösterilmiştir (**Cai** et al., 2024). Üç boyutlu görüntüleme ve modelleme yöntemleri ayrıca kompleks kırık morfolojisinin anlaşılması ve preoperatif planlamanın geliştirilmesi açısından potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte, yapay zekâ tarafından gerçekleştirilen otomatik segmentasyonun doğrudan cerrahi yaklaşım veya implant seçimine dönüştürülebileceğini gösteren klinik kanıtlar halen sınırlıdır.

OSTEOARTRİT VE DEJENERATİF HASTALIKLARDA YAPAY ZEKA

Diz ve kalça osteoartritinde YZ; radyografik derecelendirme, eklem aralığı ölçümü, progresyon tahmini ve artroplasti gereksiniminin öngörülmesi gibi farklı görevlerde araştırılmaktadır. Bu alandaki temel avantaj, görüntü özelliklerinin yaş, vücut kitle indeksi, ağrı, fonksiyon ve diğer klinik değişkenlerle birlikte modellenebilmesidir (Lalehzarian et al., 2021).

ML, yalnızca radyografik evreyi sınıflandırmak yerine klinik karar eşiğini öngörmesi daha yüksek klinik değer taşır. Nitekim 2025 tarihli sistematik derleme ve meta-analiz, ML modellerinin total diz artroplastisi adaylarını belirleme performansını incelemiş ve bu modellerin karar desteği potansiyelini ortaya koymuştur; ancak merkezler arası genellenebilirlik ve standart veri seti eksikliği devam eden sorunlardır (Tian et al., 2025).

CERRAHİ PLANLAMADA YAPAY ZEKA

Artroplasti Planlaması ve İmplant Boyutlandırma

Preoperatif planlama, YZ'nin tanısal bir araçtan doğrudan cerrahi iş akışına geçtiği en dikkat çekici alanlardan biridir. Total kalça ve diz artroplastisinde implant boyutunun, pozisyonunun ve anatomik hedeflerin ameliyat öncesi tahmin edilmesi; cerrahi verimlilik ve komponent yerleşimi açısından önemlidir.

Lambrechts ve arkadaşları 5.409 preoperatif plan ve 39 cerrahın düzeltmelerinden yararlanarak total diz artroplastisi için hasta ve cerraha özgü bir YZ planlama algoritması geliştirmiştir. YZ tabanlı yaklaşımın cerrah tarafından gereken plan değişikliklerini azalttığı ve komponent boyutu tahminini iyileştirdiği bildirilmiştir (Lambrechts et al., 2022). Bu çalışma, algoritmanın yalnızca anatomiyi değil cerrah tercihlerini de öğrenebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Total kalça artroplastisinde 117 hastalık prospektif bir çalışmada YZ destekli üç boyutlu planlama, geleneksel iki boyutlu templating ile karşılaştırılmıştır. YZ destekli yöntemin asetabular cup ve femoral stem boyutunu öngörme doğruluğu daha yüksek bulunmuştur (Anwar et al., 2024). Benzer biçimde, 2024 tarihli sistematik derleme altı çalışma ve toplam 831 hastayı değerlendirerek YZ destekli planlamanın komponent boyutu ve konumlandırma doğruluğunda avantaj sağlayabildiğini bildirmiştir (Mozafari et al., 2024).

YZ tabanlı üç boyutlu templating literatürünü inceleyen bir scoping review, total eklem artroplastisinde otomatik segmentasyon ve implant planlamasının hızla geliştiğini, ancak çalışma sayısının sınırlı ve yöntemlerin heterojen olduğunu vurgulamıştır (Velasquez Garcia et al., 2024). Randomize kontrollü bir çalışmada da YZ destekli Total kalça artroplastisinde planlamasının geleneksel iki boyutlu planlamaya göre bazı perioperatif ve fonksiyonel sonuçlarda avantaj sağlayabileceği araştırılmıştır (Zhang et al., 2024).

Travma Cerrahisinde Planlama

Travma cerrahisinde preoperatif planlama artroplastiden daha heterojen bir problemdir. Kırık morfolojisinin yanında yumuşak doku durumu, kemik kalitesi, açık kırık varlığı, eşlik eden yaralanmalar, hasta pozisyonu ve cerrahın yaklaşım deneyimi gibi değişkenler karara katılır. Bu nedenle yalnızca görüntü tabanlı bir modelin 'cerrahi yaklaşım' önermesi, gerçek klinik kararın tamamını temsil etmeyebilir.

Bununla birlikte BT tabanlı otomatik segmentasyon ile kırık fragmanlarının üç boyutlu haritalanması; yaklaşım, redüksiyon sırası ve implant konfigürasyonunun planlanmasında önemli bir gelecek alanıdır. Güncel literatür, YZ'nin kırık tanısından cerrahi planlamaya doğru ilerlediğini göstermekte, ancak bu alanda tanı çalışmalarına kıyasla prospektif ve dış doğrulamalı klinik kanıtların daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır (Badejo et al., 2026; Eskandar, 2026).

PROGNOZ VE KOMPLİKASYON TAHMİNİNDE YAPAY ZEKA

Ortopedik cerrahi sonuçları çok sayıda klinik faktörün etkileşimiyle belirlenir. Makine öğrenmesi modelleri; enfeksiyon, venöz tromboembolizm, yeniden yatış, revizyon, hastanede kalış süresi, mortalite ve hasta tarafından bildirilen sonuçların tahmininde araştırılmaktadır. Bu modellerin teorik avantajı, doğrusal olmayan

ilişkileri ve değişkenler arası karmaşık etkileşimleri yakalayabilmeleridir.

Alt ekstremite artroplastisi sonrasında venöz tromboembolizm tahminini inceleyen 2025 tarihli sistematik derleme, YZ/ML modellerinin risk sınıflandırması için umut verici olduğunu ancak model geliştirme ve doğrulama yöntemlerinde heterojenlik bulunduğunu göstermiştir (Dalil et al., 2025). Total eklem artroplastisi ML modellerinin kalite güvencesini değerlendiren başka bir sistematik derleme de metodolojik kalite, raporlama ve dış doğrulamanın klinik geçişte belirleyici olduğunu vurgulamıştır (Helbing et al., 2025).

YZ modellerinin yüksek AUROC, doğruluk veya diğer ayrım gücü ölçütlerine ulaşması, tek başına klinik yarar sağladıklarını göstermemektedir. Bir tahmin modelinin klinik değeri; mevcut klinik değerlendirmeye ek katkı sağlaması, klinik kararları anlamlı biçimde etkileyebilmesi ve nihayetinde hasta yönetimi veya sonuçlarında iyileşmeye katkıda bulunmasıyla değerlendirilmelidir (Jang et al., 2024; De Hond et al., 2022). Bu nedenle, retrospektif veri setlerinde model geliştirme ve performans değerlendirmesine odaklanan çalışmaların yanı sıra, YZ sistemlerinin gerçek klinik iş akışındaki uygulanabilirliğini ve hasta bakımına etkisini değerlendiren prospektif çalışmalara ihtiyaç vardır (De Hond et al., 2022).

YAPAY ZEKA VE ORTOPEDİST: REKABET Mİ, İŞ BİRLİĞİ Mİ?

YZ'nin hekimlerin yerini alıp almayacağı tartışması, klinik uygulamanın karmaşıklığını olduğundan basit gösterebilir. Kırık var/yok ayrımı gibi dar ve iyi tanımlanmış görevlerde algoritmalar yüksek performansa ulaşabilir. Buna karşılık cerrahi endikasyon, hasta beklentisi, yumuşak doku durumu, sosyal koşullar ve

intraoperatif bulguların birlikte değerlendirilmesi yalnızca görüntü sınıflandırma problemi değildir.

Lindsey ve arkadaşlarının çalışması, YZ desteğinin klinisyenlerin kırık tespit performansını artırabileceğini göstermesi bakımından 'insan + YZ' yaklaşımına erken bir örnektir (Lindsey et al., 2018). Bu nedenle geleceğin temel sorusu YZ'nin ortopedistin yerini alıp almayacağından çok, YZ ile desteklenen ortopedistin daha tutarlı, hızlı ve güvenli karar verip veremeyeceğidir.

En uygun kullanım modeli, algoritmanın güçlü olduğu tekrarlanabilir ve veri yoğun görevleri üstlenmesi; klinisyenin ise bağlam, hasta tercihi, belirsizlik ve etik sorumluluk gerektiren kararları yönetmesi olabilir. Böyle bir iş bölümünün başarısı için kullanıcı arayüzlerinin klinik iş akışına uygun tasarlanması ve algoritmik çıktının gerekçesinin mümkün olduğunca açıklanabilir olması gerekir.

SINIRLILIKLAR, ETİK VE MEDİKOLEGAL SORUNLAR

Ortopedik YZ çalışmalarında en önemli sorunlardan biri veri seti yanlılığıdır. Tek merkezli, belirli cihazlarla elde edilmiş veya belirli hasta gruplarını temsil eden veriler üzerinde geliştirilen modeller farklı popülasyonlarda aynı performansı göstermeyebilir. Veri sızıntısı, uygunsuz eğitim-test ayrımı ve yalnızca iç doğrulamaya dayanılması performansın olduğundan yüksek görünmesine neden olabilir.

Dış doğrulama, bir algoritmanın farklı kurum, cihaz ve hasta popülasyonlarında genellenebilirliğini değerlendirmek için gereklidir. Güncel sistematik derlemeler, ortopedik YZ literatüründe klinik uygulamaya geçişi sınırlayan temel faktörler arasında dış doğrulama eksikliği, metodolojik heterojenite ve standardizasyon sorunlarını öne çıkarmaktadır (Eskandar, 2026; Helbing et al., 2025).

Açıklanabilirlik diğer önemli konudur. Bir modelin doğru tahminde bulunması, tahminin hangi klinik veya görüntü özelliklerine dayandığının anlaşılabildiği anlamına gelmez. Özellikle cerrahi karar desteğinde hekim, algoritmanın önerisini klinik bağlama göre sorgulayabilmelidir.

Medikolegal sorumluluk henüz tam olarak çözülmüş değildir. Algoritmanın hatalı önerisinin uygulandığı bir durumda sorumluluğun cerrah, hastane, yazılım üreticisi veya veri sağlayıcısı arasında nasıl dağıtılacağı ülkelere ve düzenleyici çerçevelere göre değişebilir. Bu nedenle YZ'nin mevcut aşamada hekim gözetimindeki karar destek sistemi olarak kullanılması, hem klinik güvenlik hem de sorumluluk açısından daha uygun görünmektedir.

GELECEK PERSPEKTİFİ

Ortopedide YZ'nin geleceği, tek bir radyografiyi sınıflandıran izole algoritmalardan multimodal ve hasta-spesifik karar destek sistemlerine doğru ilerlemektedir. Gelecekte bir sistemin grafi ve BT görüntülerini, laboratuvar değerlerini, komorbiditeleri, fonksiyon skorlarını ve hastanın beklentilerini birlikte değerlendirerek tedavi seçeneklerini karşılaştırması mümkün olabilir.

Travma cerrahisinde potansiyel iş akışı; kırığın otomatik tespiti, sınıflandırılması, üç boyutlu fragman segmentasyonu, cerrahi yaklaşım önerisi, implant konfigürasyonu ve komplikasyon risk tahmininin tek platformda birleştirilmesi şeklinde düşünülebilir. Ancak 2026 itibarıyla bu zincirin tümünü prospektif olarak doğrulanmış biçimde gerçekleştiren standart bir klinik sistemden söz etmek mümkün değildir; mevcut kanıtlar daha çok bu basamakların ayrı ayrı uygulanabilirliğini göstermektedir (Badejo et al., 2026).

Artroplastide ise YZ destekli üç boyutlu templating, robotik uygulamalar ve sonuç tahmini birbirine daha yakınlaşmaktadır. 2024-2026 dönemindeki çalışmalar, özellikle THA planlamasında implant boyutu tahmininin geleneksel iki boyutlu templating'e göre iyileşebildiğini göstermektedir (Anwar et al., 2024; Mozafari et al., 2024). Bu gelişmeler, YZ'nin ortopedistin yerine geçen bir sistemden çok kişiselleştirilmiş dijital cerrahi asistan olarak konumlanacağını düşündürmektedir.

SONUÇ

Yapay zekâ, ortopedi ve travmatolojide araştırma konusu olmanın ötesine geçerek klinik iş akışının farklı basamaklarında kullanılabilecek bir teknoloji ailesine dönüşmektedir. Kırık tespiti, bugün en güçlü kanıtların bulunduğu uygulamalardan biridir. Kırık sınıflandırması, osteoartrit değerlendirmesi, artroplasti planlaması, implant boyutlandırma, komplikasyon tahmini ve LLM tabanlı klinik bilgi işleme ise hızla gelişen diğer alanlardır.

Özellikle preoperatif planlama, YZ'nin ortopedik cerrahide doğrudan klinik değer üretme potansiyelinin yüksek olduğu bir alandır. Bununla birlikte yüksek doğruluk değerleri tek başına güvenli klinik uygulama anlamına gelmez. Dış doğrulama, veri kalitesi, açıklanabilirlik, etik, mahremiyet ve medikolegal sorumluluk konuları klinik entegrasyonun temel belirleyicileri olacaktır.

Gelecekte en olası senaryo, ortopedistin YZ tarafından yer değiştirmesi değil; görüntüleme, klinik veri ve cerrahi planlamayı birleştiren YZ destekli sistemlerin cerrahın karar verme kapasitesini güçlendirmesidir. Bu nedenle ortopedik YZ araştırmalarının sonraki aşamasında algoritmaların yalnızca teknik doğruluğuna değil, gerçek klinik sonuçlara ve insan-YZ iş birliğinin niteliğine odaklanılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA/REFERENCES

Anwar, A., Zhang, Y., Zhang, Z., & Li, J. (2024). Artificial intelligence technology improves the accuracy of preoperative planning in primary total hip arthroplasty. *Asian journal of surgery*, *47*(7), 2999–3006. doi:10.1016/j.asjsur.2024.01.133

Badejo, A. A., Kolade, M. O., Igbokwe, K., Olowookere, T., Adegbesan, A. C., Adefokun, I. G., Fakiyesi, T., Anifalaje, O. K., & Ayeni, F. (2026). The Evolving Role of Artificial Intelligence in Fracture Diagnosis and Surgical Planning in Orthopaedics: Current Insights and Future Directions. *Cureus*, *18*(4), e107470. doi:10.7759/cureus.107470

Cai, D., Zhou, Y., He, W., Yuan, J., Liu, C., Li, R., Wang, Y., & Xia, J. (2024). Automatic segmentation of knee CT images of tibial plateau fractures based on three-dimensional U-Net: Assisting junior physicians with Schatzker classification. *European journal of radiology*, *178*, 111605. doi:10.1016/j.ejrad.2024.111605

Chatterjee, S., Bhattacharya, M., Pal, S., Lee, S. S., & Chakraborty, C. (2023). ChatGPT and large language models in orthopedics: from education and surgery to research. *Journal of experimental orthopaedics*, *10*(1), 128. doi:10.1186/s40634-023-00700-1

Dalil, D., Esmaeili, S., Safaee, E., Asgari, S., & Kejani, N. (2025). The Prediction of Venous Thromboembolism Using Artificial Intelligence and Machine Learning in Lower Extremity Arthroplasty: A Systematic Review. *Arthroplasty today*, *33*, 101672. doi:10.1016/j.artd.2025.101672

De Hond, A. A. H., Leeuwenberg, A. M., Hooft, L., Kant, I. M. J., Nijman, S. W. J., van Os, H. J. A., Aardoom, J. J., Debray, T. P. A.,

Schuit, E., van Smeden, M., Reitsma, J. B., Steyerberg, E. W., Chavannes, N. H., & Moons, K. G. M. (2022). Guidelines and quality criteria for artificial intelligence-based prediction models in healthcare: a scoping review. *NPJ digital medicine*, *5*(1), 2. doi:10.1038/s41746-021-00549-7

Eskandar K. (2026). The role of artificial intelligence in orthopedic surgery: Current applications and future perspectives-A systematic review of the literature. *Revista espanola de cirugia ortopedica y traumatologia*, *70*(3), 248–257. doi:10.1016/j.recot.2025.09.005

Helbing, J., Oh, C., Joshi, A. S., Cyrus, J. W., Kamath, A. F., & Patel, N. K. (2025). Quality assurance in machine Learning: Do we hit the mark for total joint arthroplasty models? A systematic review. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, *70*, 103177. doi:10.1016/j.jcot.2025.103177

Jang, S. J., Rosenstadt, J., Lee, E., & Kunze, K. N. (2024). Artificial Intelligence for Clinically Meaningful Outcome Prediction in Orthopedic Research: Current Applications and Limitations. *Current reviews in musculoskeletal medicine*, *17*(6), 185–206. doi:10.1007/s12178-024-09893-z

Kuo, R. Y. L., Harrison, C., Curran, T. A., Jones, B., Freethy, A., Cussons, D., Stewart, M., Collins, G. S., & Furniss, D. (2022). Artificial Intelligence in Fracture Detection: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Radiology*, *304*(1), 50–62. doi:10.1148/radiol.211785

Lalehzarian, S. P., Gowd, A. K., & Liu, J. N. (2021). Machine learning in orthopaedic surgery. World Journal of Orthopedics, 12(9), 685-699. doi:10.5312/wjo.v12.i9.685

Lambrechts, A., Wirix-Speetjens, R., Maes, F., & Van Huffel, S. (2022). Artificial Intelligence Based Patient-Specific Preoperative

Planning Algorithm for Total Knee Arthroplasty. *Frontiers in robotics and AI*, *9*, 840282. doi:10.3389/frobt.2022.840282

Langerhuizen, D. W. G., Janssen, S. J., Mallee, W. H., van den Bekerom, M. P. J., Ring, D., Kerkhoffs, G. M. M. J., Jaarsma, R. L., & Doornberg, J. N. (2019). What Are the Applications and Limitations of Artificial Intelligence for Fracture Detection and Classification in Orthopaedic Trauma Imaging? A Systematic Review. *Clinical orthopaedics and related research*, *477*(11), 2482–2491. doi:10.1097/CORR.0000000000000848

Lindsey, R., Daluiski, A., Chopra, S., Lachapelle, A., Mozer, M., Sicular, S., Hanel, D., Gardner, M., Gupta, A., Hotchkiss, R., & Potter, H. (2018). Deep neural network improves fracture detection by clinicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *115*(45), 11591–11596. doi:10.1073/pnas.1806905115

Lisacek-Kiosoglous, A. B., Powling, A. S., Fontalis, A., Gabr, A., Mazomenos, E., & Haddad, F. S. (2023). Artificial intelligence in orthopaedic surgery. *Bone & joint research*, *12*(7), 447–454. doi:10.1302/2046-3758.127.BJR-2023-0111.R1

Mozafari, J. K., Moshtaghioon, S. A., Mahdavi, S. M., Ghaznavi, A., Behjat, M., & Yeganeh, A. (2024). The role of artificial intelligence in preoperative planning for Total Hip Arthroplasty: a systematic review. *Frontiers in artificial intelligence*, *7*, 1417729. doi:10.3389/frai.2024.1417729

Tian, C., Chen, H., Shao, W., Zhang, R., Yao, X., & Shu, J. (2025). Accuracy of machine learning in identifying candidates for total knee arthroplasty (TKA) surgery: A systematic review and meta-analysis. European Journal of Medical Research, 30(1), 317. doi:10.1186/s40001-025-02545-z

Velasquez Garcia, A., Bukowiec, L. G., Yang, L., Nishikawa, H., Fitzsimmons, J. S., Larson, A. N., Taunton, M. J., Sanchez-Sotelo, J., O'Driscoll, S. W., & Wyles, C. C. (2024). Artificial intelligence-based three-dimensional templating for total joint arthroplasty planning: a scoping review. *International orthopaedics*, *48*(4), 997–1010. doi:10.1007/s00264-024-06088-6

Zhang, G., Liu, Z., Wang, D., Tian, Z., & Yao, Q. (2024). The advantages of artificial intelligence-assisted total hip arthroplasty: A randomized controlled trial followed by 12 months. *Heliyon*, *10*(22), e39664. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e39664

BÖLÜM 8

BİR İNSAN HAKKI OLARAK REHABİLİTASYON: FİZİKSEL TIP VE REHABİLİTASYON PERSPEKTİFİNDEN EŞİTLİK, ERİŞİLEBİLİRLİK VE TOPLUMSAL KATILIM

EMRE ERSÖZ[1]

Giriş

Rehabilitasyon, modern sağlık sistemlerinde yalnızca hastalık ya da yaralanma sonrasında kaybedilen bir işlevin yeniden kazandırılmasına yönelik teknik bir hizmet değildir. Rehabilitasyonun temel amacı bireyin günlük yaşamındaki fonksiyonelliğini en üst düzeye çıkarmak, bağımsızlığını desteklemek ve kişinin aile, eğitim, çalışma ve toplum yaşamına anlamlı biçimde katılabilmesini sağlamaktır. Bu yönüyle rehabilitasyon, klinik sonuçlarla insan onuru, eşitlik, özerklik ve toplumsal katılım arasında doğrudan bağ kuran sağlık alanlarından biridir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), rehabilitasyonu evrensel sağlık kapsamının temel bileşenlerinden biri olarak değerlendirmekte; yaşlanma, kronik hastalıklar, yaralanmalar ve insani krizler

[1] Uzman Doktor, Ankara İl Sağlık Müdürlüğü, Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon, ORCID: 0009-0009-6184-805X

nedeniyle gereksinimin hızla arttığını vurgulamaktadır (World Health Organization [WHO], 2017, 2024, 2026).

Rehabilitasyon gereksiniminin büyüklüğü, konunun yalnızca belirli bir engelli grubuna ilişkin olmadığını göstermektedir. Global Burden of Disease 2019 verilerine dayanan analizde yaklaşık 2,41 milyar kişinin yaşamının bir döneminde rehabilitasyondan yarar görebilecek bir sağlık durumuyla yaşadığı bildirilmiştir (Cieza et al., 2020). DSÖ'nün 2026 tarihli savunuculuk belgesinde küresel olarak yaklaşık her üç kişiden birinin rehabilitasyondan yarar görebilecek bir durumla yaşadığı ve birçok ülkede rehabilitasyona gereksinim duyanların yarısından fazlasının uygun hizmete erişemediği belirtilmektedir (WHO, 2026). Dolayısıyla sorun yalnızca rehabilitasyon hizmetinin varlığı değil; hizmetin zamanında, karşılanabilir maliyetle, coğrafi olarak erişilebilir, kabul edilebilir ve nitelikli biçimde sunulup sunulmadığıdır.

İnsan hakları yaklaşımı, rehabilitasyona erişimi yardım veya sosyal iyilik anlayışından çıkararak hak sahibi birey ile yükümlülük sahibi devlet ve kurumlar arasındaki ilişki üzerinden ele alır. Birleşmiş Milletler Engelli Hakları Sözleşmesi (EHS), engelliliği kişinin yalnızca bedensel ya da zihinsel özelliklerinden kaynaklanan bir durum olarak değil, bireysel özellikler ile çevresel ve tutumsal engellerin etkileşimi içinde değerlendiren hak temelli yaklaşımın en önemli uluslararası belgelerindendir. Sözleşmenin özellikle eşitlik ve ayrımcılık yasağı, erişilebilirlik, bağımsız yaşam, sağlık, habilitasyon ve rehabilitasyon, hareketlilik ve çalışma yaşamına ilişkin hükümleri fiziksel tıp ve rehabilitasyon (FTR) pratiğiyle doğrudan ilişkilidir (United Nations, 2006). Bu bölümün amacı, rehabilitasyonun insan hakları boyutunu FTR perspektifinden incelemek; eşitlik, erişilebilirlik, özerklik ve toplumsal katılım ilkelerinin klinik uygulama ve sağlık sistemi düzeyinde nasıl somutlaştırılabileceğini tartışmaktır.

REHABİLİTASYONUN KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ: FONKSİYONELLİK, ENGELLİLİK VE KATILIM

FTR'nin özgün katkısı, hastalık tanısının ötesine geçerek bireyin 'nasıl yaşadığı' sorusuna odaklanmasıdır. Bir kişinin inme, omurilik yaralanması, amputasyon, romatizmal hastalık, kronik ağrı, nöromüsküler hastalık ya da ileri yaşla ilişkili bir sağlık sorunu bulunması; tek başına o kişinin günlük yaşamda ne ölçüde bağımsız olduğunu açıklamaz. Aynı tanıya sahip iki bireyin hareket, öz bakım, iletişim, çalışma, eğitim ve toplumsal katılım düzeyleri; çevresel düzenlemeler, sosyal destek, yardımcı teknoloji, ekonomik kaynaklar ve kişisel hedefler nedeniyle önemli ölçüde farklı olabilir. Bu nedenle rehabilitasyon tıbbının temel çıktısı yalnız morbiditenin azaltılması değil, fonksiyonelliğin geliştirilmesidir.

DSÖ'nün İşlevsellik, Yetiyitimi ve Sağlığın Uluslararası Sınıflandırması (ICF), fonksiyonelliği vücut işlevleri ve yapıları, aktiviteler ve katılım ile çevresel ve kişisel etmenler arasındaki dinamik etkileşim üzerinden ele alır (WHO, 2001). Stucki ve Bickenbach (2017), mortalite ve morbiditeye ek olarak fonksiyonelliğin sağlık sistemlerinde 'üçüncü sağlık göstergesi' olarak ele alınmasını önermiştir. Bu yaklaşım insan hakları açısından önemlidir; çünkü kişinin yaşama katılımını sınırlandıran sonuçlar yalnız patolojinin şiddetinden değil, erişilebilir olmayan çevreden, uygun yardımcı cihaz bulunmamasından, ulaşım sorunlarından veya ayrımcı uygulamalardan da doğabilir.

Hak temelli rehabilitasyon, işlev kaybını yalnız bireyin 'düzeltilmesi gereken eksikliği' olarak görmez. Tıbbi tedavi ve bireye yönelik rehabilitasyon gerekli olmakla birlikte, bunların çevresel engelleri ortadan kaldıran düzenlemelerle birlikte yürütülmesi gerekir. Örneğin tekerlekli sandalye kullanan bir kişinin üst ekstremite gücünün artırılması klinik açıdan değerli bir hedeftir; ancak kişinin hastaneye, işyerine veya toplu taşımaya erişemediği bir çevrede yalnız kas gücündeki artış toplumsal katılımı garanti

etmez. Bu nedenle FTR uygulaması, bireysel kapasiteyi artırma ile çevresel kolaylaştırıcıları güçlendirme hedeflerini aynı rehabilitasyon planında birleştirmelidir.

REHABİLİTASYONUN İNSAN HAKLARI HUKUKUNDAKİ YERİ

EHS, rehabilitasyonun insan hakları hukukundaki konumunu açık biçimde ortaya koyar. Sözleşmenin 25. maddesi engelli bireylerin ayrımcılığa uğramaksızın ulaşılabilir en yüksek sağlık standardından yararlanma hakkını düzenler ve engellilik nedeniyle gereksinim duyulan sağlık hizmetleri ile sağlıkla ilişkili rehabilitasyonu sağlık hakkının kapsamına yerleştirir. 26. madde ise habilitasyon ve rehabilitasyona müstakil olarak yer verir; bireyin azami bağımsızlığını, fiziksel, zihinsel, sosyal ve mesleki yeteneklerini ve yaşamın tüm alanlarına tam katılımını sağlamaya yönelik etkili ve uygun önlemleri öngörür (United Nations, 2006).

Madde 26'nın FTR açısından dikkat çekici yönü, rehabilitasyonun yalnız sonuç hedefini değil, hizmetin örgütlenme ilkelerini de tanımlamasıdır. Hizmetlerin mümkün olan en erken dönemde başlaması, bireysel ihtiyaçların ve güçlü yönlerin multidisipliner değerlendirmesine dayanması, gönüllülük temelinde yürütülmesi ve kişinin yaşadığı topluma mümkün olduğunca yakın sunulması öngörülmektedir. Ayrıca rehabilitasyon alanında çalışan profesyonellerin eğitimine ve yardımcı cihaz ile teknolojilerin kullanılabilirliği ve erişimine ilişkin yükümlülükler de belirtilmektedir. Bu çerçeve, rehabilitasyon hizmetinin var olmasını tek başına yeterli görmez; hizmetin kişiye uygun biçimde erişilebilir ve katılımı destekleyici olması gerektiğini ortaya koyar.

Skempes, Stucki ve Bickenbach (2015), EHS bağlamında sağlıkla ilişkili rehabilitasyon yükümlülüklerini analiz etmiş ve eşitlik, ayrımcılık yasağı, erişilebilirlik, katılım, gizlilik, bilgilendirilmiş karar verme ve hesap verebilirlik ilkelerinin

rehabilitasyon politikalarına yansıtılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu yaklaşım, insan haklarının klinik pratiğe dışarıdan eklenen teorik ilkeler olmadığını; rehabilitasyonun amaç, süreç ve sonuçlarının nasıl tasarlanacağını belirleyen normatif bir çerçeve olduğunu göstermektedir.

EŞİTLİK, AYRIMCILIK YASAĞI VE MAKUL DÜZENLEME

Eşitlik, herkesin aynı hizmeti aynı biçimde alması anlamına gelmez. Rehabilitasyonda biçimsel eşitlik yerine, kişinin gereksinimine uygun hizmete gerçekten ulaşmasını sağlayan maddi veya kapsayıcı eşitlik yaklaşımı önem taşır. EHS'nin 5. maddesi eşitliği ve ayrımcılık yasağını güvence altına alırken, makul düzenleme yapılmamasını da ayrımcılıkla ilişkilendirir (United Nations, 2006). Bu nedenle randevu sistemi, fiziksel çevre, iletişim biçimi, tedavi ekipmanı ve değerlendirme yöntemlerinin farklı gereksinimleri bulunan bireyler için uyarlanması yalnız iyi klinik uygulama değil, eşit hizmete erişimin bir gereği olarak görülmelidir.

FTR polikliniğinde makul düzenleme çok somut biçimler alabilir. Tekerlekli sandalye kullanan birey için erişilebilir muayene masası ve tartı; işitme kaybı olan kişi için uygun iletişim desteği; görme yetersizliği olan kişi için erişilebilir bilgilendirme materyali; bilişsel güçlüğü olan birey için sadeleştirilmiş anlatım ve yeterli görüşme süresi; ağrı veya yorgunluğu belirgin hastalar için uygun bekleme ve dinlenme koşulları bu kapsamdadır. Standart işleyişe küçük fakat etkili uyarlamalar eklenmediğinde, kağıt üzerinde herkes için açık olan hizmet fiilen belirli gruplar için erişilemez hale gelebilir.

Eşitlik değerlendirmesinin bir diğer boyutu kaynak tahsisidir. Rehabilitasyon gereksiniminin yalnız tanı sayılarıyla değil, fonksiyon kaybı, bakım yükü, yoksulluk, kırsalda yaşama, ulaşım ve yardımcı teknoloji gereksinimi gibi etmenlerle birlikte

değerlendirilmesi gerekir. Son yıllardaki derlemeler rehabilitasyona erişimde maliyet, ulaşım, hizmetlerin coğrafi dağılımı ve insan gücü yetersizliğinin tekrar eden engeller olduğunu göstermektedir (Kamenov et al., 2019; Htwe et al., 2024; Wenzel et al., 2026). Bu nedenle adil bir sistem, herkese aynı sayıda seans vermek yerine gereksinime göre yoğunluk, süre, takip modeli ve destek düzeyi belirlemeyi hedeflemelidir.

ERİŞİLEBİLİRLİK VE REHABİLİTASYON HİZMETLERİNE ERİŞİM

Erişilebilirlik, rehabilitasyon hakkının uygulanabilir olmasının ön koşullarındandır. EHS'nin 9. maddesi fiziksel çevre, ulaşım, bilgi ve iletişim teknolojileri ile kamuya açık hizmetlerin engelli bireyler için erişilebilir olmasını öngörür (United Nations, 2006). Rehabilitasyon bağlamında erişilebilirlik; hastane kapısına ulaşabilmekten daha geniş bir kavramdır. Sevk zinciri, randevuya erişim, bekleme süresi, fiziksel mekan, iletişim, maliyet, hizmetin coğrafi dağılımı, sağlık okuryazarlığı ve dijital sistemlere erişim birlikte değerlendirilmelidir.

Rehabilitasyonun doğası gereği hizmetler çoğu zaman tek bir başvuruyla tamamlanmaz. Tekrarlayan poliklinik kontrolleri, fizik tedavi seansları, ortez-protez uygulamaları, yardımcı cihaz denemeleri ve multidisipliner görüşmeler ulaşım yükünü artırabilir. Bu nedenle kırsal bölgede yaşayan, düşük gelirli, bakım verene bağımlı veya toplu taşımayı kullanamayan bir birey için kağıt üzerinde mevcut olan hizmet fiilen kullanılamaz olabilir. Bright ve arkadaşlarının (2018) sistematik derlemesi ile Kamenov ve arkadaşlarının (2019) kapsam derlemesi, özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde rehabilitasyona erişimin çok katmanlı engellerle sınırlanabildiğini göstermektedir.

Erişimi geliştirmek için rehabilitasyonun sağlık sisteminin tüm basamaklarına entegrasyonu önemlidir. DSÖ'nün Rehabilitation

2030 yaklaşımı, rehabilitasyonun üçüncü basamakta dar bir uzman hizmeti olarak konumlandırılması yerine birinci basamak dahil sağlık sistemine entegre edilmesini, uygun sevk yollarının kurulmasını, iş gücünün güçlendirilmesini ve finansal korumanın sağlanmasını önermektedir (WHO, 2017, 2019, 2024). Telerehabilitasyon, ev temelli hizmetler ve toplum temelli modeller belirli hasta gruplarında erişimi artırabilir; ancak dijital uçurum, teknoloji okuryazarlığı, mahremiyet ve hizmet kalitesi gibi riskler nedeniyle bu modeller yüz yüze hizmetin otomatik ikamesi olarak görülmemelidir.

HAK TEMELLİ REHABİLİTASYONDA MEVCUDİYET, ERİŞİLEBİLİRLİK, KABUL EDİLEBİLİRLİK VE KALİTE

Sağlık hakkının uygulanmasını değerlendirmede Birleşmiş Milletler Ekonomik, Sosyal ve Kültürel Haklar Komitesinin geliştirdiği mevcut olma, erişilebilirlik, kabul edilebilirlik ve kalite yaklaşımı - literatürde AAAQ çerçevesi olarak anılmaktadır - rehabilitasyon hizmetleri için de işlevsel bir değerlendirme aracı sunar (Committee on Economic, Social and Cultural Rights [CESCR], 2000; Skempes et al., 2015). Bu çerçeve sayesinde 'hizmet var mı?' sorusu, 'yeterli mi, kim erişebiliyor, kişiye saygılı mı ve bilimsel olarak nitelikli mi?' sorularına genişletilir.

Mevcudiyet, toplumun gereksinimini karşılayacak rehabilitasyon birimi, yatak, insan gücü, yardımcı teknoloji ve süreklilik mekanizmasının bulunmasını ifade eder. Erişilebilirlik; ayrımcılık yapılmamasını, fiziksel ve coğrafi erişimi, ekonomik karşılanabilirliği ve bilgiye erişimi kapsar. Kabul edilebilirlik, hizmetin etik ilkelere, bireyin mahremiyetine, kültürel özelliklerine ve tercihine saygılı biçimde sunulmasını gerektirir. Kalite ise yeterli eğitimli insan gücü, kanıta dayalı uygulama, güvenli ekipman, doğru endikasyon, uygun doz ve süre, sonuç ölçümü ve sürekli iyileştirmeyi içerir.

Bu dört boyut birbirinin yerine geçmez. Örneğin çok sayıda fizik tedavi ünitesinin bulunması, hizmet bedeli karşılanamıyorsa ekonomik erişilebilirlik sorununu çözmez. Randevu kolaylığı, merkezde erişilebilir tuvalet veya transfer ekipmanı yoksa fiziksel erişilebilirliği sağlamaz. Hizmet ücretsiz ve erişilebilir olsa bile kişinin hedefleri dikkate alınmıyor, gereksiz müdahaleler uygulanıyor veya mahremiyet korunmuyorsa kabul edilebilirlik ve kalite sorunları devam eder. Bu nedenle rehabilitasyon performans göstergelerinin yalnız seans veya hasta sayısını değil, erişim, fonksiyonel sonuç, hasta deneyimi ve katılım boyutlarını da kapsaması gerekir.

Tablo 1. İnsan hakları ilkelerinin FTR pratiğindeki somut karşılıkları

İlke / hak	**Başlıca dayanak**	**FTR uygulamasındaki karşılık**
Eşitlik ve ayrımcılık yasağı	EHS md. 5	Gereksinime göre hizmet; engellilik nedeniyle doğrudan veya dolaylı dışlamanın önlenmesi; makul düzenleme.
Erişilebilirlik	EHS md. 9	Erişilebilir bina, muayene ekipmanı, iletişim, randevu, ulaşım ve dijital süreçler.
Sağlık hakkı	EHS md. 25	Aynı kalite standardı; engelliliğe özgü gereksinimlerin karşılanması; bilgilendirilmiş karar verme.
Habilitasyon ve rehabilitasyon	EHS md. 26	Erken başlangıç, multidisipliner değerlendirme, gönüllülük, bireysel hedefler, topluma yakın hizmet.
Bağımsız yaşam ve katılım	EHS md. 19 ve 26	Öz bakımın ötesinde eğitim, iş, aile ve toplum rollerini hedefleyen sonuçlar.
Hareketlilik ve yardımcı teknoloji	EHS md. 20 ve 26	Uygun ortez, protez, mobilite cihazı ve yardımcı teknolojinin seçimi, eğitimi ve takibi.
Özerklik ve mahremiyet	EHS genel ilkeleri; hasta hakları	Ortak karar verme, rıza, tedaviyi reddetme hakkı, gizlilik ve kişisel hedeflere saygı.

Kaynak: United Nations (2006), WHO (2017, 2024) ve Skempes et al. (2015) temel alınarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

ÖZERKLİK, BİLGİLENDİRİLMİŞ ONAM VE ORTAK KARAR VERME

Rehabilitasyonun uzun süreli ve hedef odaklı yapısı, hasta özerkliğini merkezi bir etik ve hukuki ilke haline getirir. Rehabilitasyon hedefleri, yalnız profesyonelin klinik olarak 'doğru' gördüğü çıktılardan oluşmamalıdır. Bir birey için merdiven çıkmak öncelikli olabilirken başka bir birey için bağımsız araç kullanmak, işe dönmek, çocuğunun bakımını üstlenmek veya ağrıyı tamamen ortadan kaldırmadan belirli bir aktiviteye devam edebilmek daha anlamlı olabilir. Bu nedenle hedef belirleme süreci, kişinin değerleri ve yaşam rolleriyle klinik olasılıkları buluşturan ortak karar verme süreci olmalıdır.

Bilgilendirilmiş onam, yalnız girişim öncesi imza alınması olarak daraltılmamalıdır. FTR uygulamalarında egzersiz programları, elektroterapi, enjeksiyonlar, girişimsel ağrı uygulamaları, ortez-protez seçimi, spastisite tedavisi, robotik rehabilitasyon veya telerehabilitasyon gibi seçeneklerde amaç, beklenen yarar, olası risk, alternatifler ve tedavi uygulanmamasının olası sonuçları anlaşılır biçimde aktarılmalıdır. İletişim güçlüğü bulunan bireylerde destekli karar verme yöntemleri ve erişilebilir bilgilendirme araçları kullanılmalıdır. Kişinin bilişsel ya da iletişimsel yetersizliği olduğu varsayılarak karar sürecinden otomatik dışlanması, hak temelli yaklaşımla bağdaşmaz.

Mahremiyet de rehabilitasyon ortamlarında özel önem taşır. Fizik tedavi salonlarının açık plan yapısı, transfer ve giyinme gerektiren uygulamalar, yürüme eğitimi veya vücut bölgelerinin açılmasını gerektiren muayeneler mahremiyet riskini artırabilir. Bu nedenle fiziksel alan düzenlemeleri, perdeleme, uygun kıyafet, yalnız gerekli personelin bulunması ve hasta bilgilerinin korunması klinik kalite kadar insan onurunun da parçasıdır. Türkiye'de Hasta Hakları Yönetmeliği de mahremiyet, rıza ve bilgilerin gizliliğini açık biçimde düzenlemektedir (Sağlık Bakanlığı, 1998).

BAĞIMSIZ YAŞAM, TOPLUMSAL KATILIM VE ÇALIŞMA HAYATI

Rehabilitasyonun başarı ölçütü yalnız impairment düzeyindeki değişiklikler değildir. Eklem hareket açıklığının artması, kas kuvvetinin yükselmesi veya ağrı skorunun azalması önemli klinik sonuçlardır; ancak bu değişikliklerin kişinin günlük yaşamda ne yapabildiğine ve hangi rollere dönebildiğine yansıması gerekir. Hak temelli bakış, rehabilitasyonun nihai amacını bireyin toplum içinde diğer kişilerle eşit temelde yaşayabilmesi, seçim yapabilmesi ve yaşam rollerine katılabilmesi olarak tanımlar.

EHS'nin bağımsız yaşam ve topluma dahil olma yaklaşımı, kurum merkezli ve korumacı modeller yerine toplum içinde yaşamı destekleyen hizmetleri öne çıkarır (United Nations, 2006). Bu çerçevede FTR ekibinin taburculuk planı yalnız tıbbi stabiliteye göre değil, ev çevresinin erişilebilirliği, bakım veren kapasitesi, ulaşım, okul veya işe dönüş, yardımcı cihaz, ev modifikasyonu ve toplum temelli hizmetlerin sürekliliği dikkate alınarak yapılmalıdır. Özellikle omurilik yaralanması, travmatik beyin hasarı, inme ve amputasyon gibi durumlarda taburculuk sonrası katılım engellerinin öngörülmesi, yeniden hastaneye yatışın ve bağımlılığın azaltılması açısından da önemlidir.

Çalışma yaşamına dönüş rehabilitasyonun sosyal ve ekonomik boyutunu görünür kılar. Mesleki taleplerin analizi, işyeri düzenlemeleri, kademeli işe dönüş, ergonomik uyarlamalar, yardımcı teknoloji ve işverenle uygun iletişim stratejileri FTR programının parçası olabilir. Burada temel soru yalnız kişinin 'iş yapabilir' olup olmadığı değil, işin ve çalışma ortamının kişinin fonksiyonel özelliklerine nasıl uyarlanabileceğidir. Bu yaklaşım, bireyi çalışma yaşamından dışlayan ikili 'uygun/uygun değil' değerlendirmelerinin yerine işlevsel kapasite ile makul düzenleme olanaklarını birlikte ele alır.

YARDIMCI TEKNOLOJİLER VE HAREKETLİLİK

Yardımcı ürünler ve teknolojiler, birçok birey için rehabilitasyon hedeflerinin günlük yaşama aktarılmasını sağlayan temel araçlardır. Tekerlekli sandalye, baston, yürüteç, ortez, protez, işitme ve görme destekleri, iletişim cihazları, çevresel kontrol sistemleri ve dijital erişilebilirlik çözümleri yalnız teknik ekipman değildir; eğitim, çalışma, hareketlilik ve bağımsız yaşam haklarının kullanılmasını mümkün kılabilir. DSÖ ve UNICEF'in küresel raporu, yardımcı teknolojiye gereksinimin çok büyük olduğunu ve erişimde ciddi eşitsizlikler bulunduğunu göstermektedir (WHO & UNICEF, 2022).

FTR hekiminin rolü uygun cihazı reçetelemekle sınırlı olmamalıdır. Ürünün bireyin hedeflerine uygunluğu, doğru ölçü ve ayar, güvenli kullanım, eğitim, bakım-onarım, yeniden değerlendirme ve gerektiğinde ürün değişikliği bir bütün olarak ele alınmalıdır. Yanlış seçilmiş veya bireyin çevresine uygun olmayan yardımcı cihaz, teorik olarak sağlanmış olsa bile fiilen kullanılamayabilir. Örneğin evinde kapı genişlikleri uygun olmayan bir bireye verilen tekerlekli sandalye veya işyerinde erişilebilir masa düzenlemesi olmayan bir çalışana sağlanan mobilite cihazı katılım sorununu tek başına çözmez.

Yeni teknolojiler hak temelli rehabilitasyon için önemli fırsatlar sunarken yeni eşitsizlikler de yaratabilir. Robotik sistemler, nöromodülasyon, giyilebilir sensörler, yapay zeka destekli değerlendirme ve telerehabilitasyonun yaygınlaşması; maliyet, coğrafi dağılım, dijital okuryazarlık ve kapsayıcı tasarım konularını gündeme getirir. Rehabilitasyon profesyonellerinin insan hakları ve teknoloji erişimi konusundaki yaklaşımlarını inceleyen nitel bir çalışma, profesyonellerin insan hakları çerçevesine açık olduğunu ancak bunun klinik uygulamaya dönüştürülmesi için somut araçlara gereksinim bulunduğunu göstermiştir (Bryden et al., 2024).

FİZİKSEL TIP VE REHABİLİTASYON HEKİMİNİN HAK TEMELLİ ROLÜ

FTR uzmanlığı, biyolojik hastalık ile kişinin yaşadığı fonksiyonel sonuçlar arasındaki bağlantıyı kurması nedeniyle insan hakları yaklaşımının klinik düzeyde uygulanabileceği temel alanlardan biridir. Avrupa FTR Beyaz Kitabı, uzmanlığın fonksiyonelliği optimize etmeyi, aktivite ve katılımı geliştirmeyi ve rehabilitasyon sürecini tıbbi olarak yönetmeyi hedefleyen kapsamlı yapısını tanımlamaktadır (European Physical and Rehabilitation Medicine Bodies Alliance, 2018a, 2018b). Hak temelli perspektif bu klinik rolü genişletir: FTR hekimi yalnız hastanın ne kadar yürüdüğünü değil, yürüyememenin veya çevresel engellerin bireyin yaşamındaki hangi hak alanlarını sınırladığını da değerlendirmelidir.

İlk görev, hedeflerin kişi merkezli belirlenmesidir. ICF temelli değerlendirme ile vücut işlevleri, aktiviteler, katılım ve çevresel faktörler birlikte kaydedilebilir; sorun listesi yalnız tanı ve impairment düzeyinde bırakılmaz. İkinci görev, multidisipliner ekibin hedeflerini aynı işlevsel sonuçlar etrafında koordine etmektir. Üçüncü görev, taburculuk ve toplum yaşamına geçişte erişilebilirlik, yardımcı cihaz, sosyal hizmet, iş ve eğitim gereksinimleri için uygun yönlendirmeleri sağlamaktır. Dördüncü görev, gereksiz veya yararsız müdahalelerden kaçınarak kanıta dayalı ve güvenli hizmet sunumunu korumaktır.

Hak temelli FTR yaklaşımı aynı zamanda savunuculuk rolü içerir. Bir sağlık tesisinde erişilebilir muayene ekipmanı bulunmaması, randevu sürelerinin belirli hasta grupları için fiili engel oluşturması, uygun ortez-protez veya rehabilitasyon yatağına sistematik erişim güçlüğü yaşanması yalnız bireysel hasta sorunu olarak görülmemelidir. Bu tür örüntüler hizmet tasarımındaki yapısal engelleri gösterebilir. FTR uzmanı klinik veriyi kullanarak kurum yönetimine erişim göstergeleri, bekleme süreleri, coğrafi dağılım,

fonksiyonel sonuçlar ve karşılanmamış gereksinimlere ilişkin geri bildirim sağlayabilir.

EŞİTSİZLİK RİSKİ YÜKSEK GRUPLARDA REHABİLİTASYON

Rehabilitasyona erişimdeki eşitsizlikler toplumun tüm gruplarını aynı ölçüde etkilemez. Kırsal bölgede yaşayanlar, düşük gelirli bireyler, yaşlılar, çocuklar, kadınlar, engelli bireyler, göçmenler, mülteciler ve çatışma ya da afetlerden etkilenen topluluklarda ulaşım, maliyet, sağlık okuryazarlığı, bakım verme yükü, dil ve iletişim engelleri daha belirgin hale gelebilir. DSÖ'nün engelli bireylerde sağlık eşitliğine ilişkin küresel raporu, engelli bireylerin önlenebilir ve adaletsiz sağlık eşitsizlikleriyle karşılaştığını; sağlık sistemi içindeki engellerin bu eşitsizlikleri pekiştirebildiğini vurgulamaktadır (WHO, 2022).

Yaşlı bireylerde rehabilitasyon gereksinimi çoklu hastalık, kırılganlık, sarkopeni, düşme riski ve bilişsel sorunlarla birlikte değerlendirilmelidir. Yaşa dayalı terapötik nihilizm - ileri yaş nedeniyle rehabilitasyondan sınırlı yarar göreceği varsayımı - bireysel potansiyelin değerlendirilmesini engelleyebilir. Çocuklarda ise hedefler büyüme ve gelişim, oyun, okul katılımı, aile yükü ve uzun dönemli bağımsızlık dikkate alınarak belirlenmelidir. Çocuğun görüşünün yaş ve gelişim düzeyine uygun biçimde alınması, aile merkezli yaklaşımın çocuğun bireysel tercihlerini görünmez kılmaması önemlidir.

Afet ve çatışma ortamlarında rehabilitasyon çoğu zaman akut yaşam kurtarıcı hizmetlerin gerisinde kalabilir; oysa erken mobilizasyon, kontraktür ve bası yarası önleme, ampüte rehabilitasyonu, omurilik ve beyin yaralanması yönetimi ile yardımcı teknoloji temini uzun dönemli sonuçları belirler. Bu ortamlarda rehabilitasyonun acil sağlık planlarına başlangıçtan itibaren dahil edilmesi, süreklilik ve sevk zincirinin kurulması bir

eşitlik meselesidir. DSÖ, Rehabilitation 2030 çerçevesinde insani aciller dahil olmak üzere rehabilitasyonun sağlık sistemlerine entegrasyonunu temel politika alanlarından biri olarak ele almaktadır (WHO, 2024).

TÜRKİYE'DE HUKUKİ VE KURUMSAL ÇERÇEVE

Türkiye'de rehabilitasyonun insan hakları boyutu anayasal sağlık ve eşitlik ilkeleri, Engelliler Hakkında Kanun ve hasta hakları düzenlemeleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Türkiye Cumhuriyeti Anayasası'nın 10. maddesi kanun önünde eşitlik ilkesini düzenlemekte ve engelli bireyler lehine alınacak tedbirlerin eşitlik ilkesine aykırı sayılmayacağını belirtmektedir. 56. madde ise devletin herkesin hayatını beden ve ruh sağlığı içinde sürdürmesini sağlamak amacıyla sağlık hizmetlerini planlama ve düzenleme görevini tanımlar (Türkiye Cumhuriyeti Anayasası, 1982).

5378 sayılı Engelliler Hakkında Kanun, rehabilitasyonu bağımsız yaşamı destekleyen fiziksel, sosyal, zihinsel ve mesleki becerilerin geliştirilmesine yönelik hizmetler olarak tanımlar. Kanunun 7. maddesi yapılı çevre, ulaşım ve bilgi-iletişim alanlarında erişilebilirliği; 10. maddesi ise habilitasyon ve rehabilitasyonu doğrudan düzenlemektedir. Madde 10'da hizmetlerin toplumsal hayata katılım ve eşitlik temelinde sunulması, engelli birey ve ailesinin sürecin tüm aşamalarına aktif ve etkin katılımı, hizmetlerin mümkün olan en erken evrede başlaması ve yerleşim yerine en yakın yerde verilmesi ile yardımcı araç ve destek teknolojilerine erişim öngörülmektedir (Engelliler Hakkında Kanun, 2005). Bu düzenlemeler EHS'nin 26. maddesiyle belirgin bir normatif paralellik göstermektedir.

Hasta Hakları Yönetmeliği ise sağlık hizmetlerinden adalet ve hakkaniyete uygun yararlanma, bilgi isteme, mahremiyet, rıza ve bilgilerin gizliliği gibi hakları düzenler (Sağlık Bakanlığı, 1998). FTR uygulamasında bu hükümler özellikle uzun süreli tedavi

süreçleri, açık tedavi salonları, girişimsel işlemler, bakım verenlerin sürece katılımı ve çok disiplinli ekip içi bilgi paylaşımı açısından önem taşır. Ulusal mevzuatın klinik pratiğe etkili biçimde yansıması için yalnız mevzuata sahip olmak yeterli değildir; erişilebilir fiziki altyapı, yeterli insan gücü, ölçülebilir hizmet standartları ve kurum düzeyinde izleme mekanizmaları gerekir.

Türkiye açısından geliştirilebilecek önemli alanlardan biri rehabilitasyon hizmetlerinin performansının yalnız hizmet hacmi üzerinden değil, hak temelli göstergelerle de izlenmesidir. İl ve tesis düzeyinde rehabilitasyona bekleme süresi, kişinin ikamet ettiği yerden hizmete ulaşım mesafesi, randevuya erişememe nedenleri, uygun yardımcı cihaz temin süresi, taburculuk sonrası toplum temelli hizmete geçiş, fonksiyonel kazanım ve işe/okula dönüş gibi göstergeler izlenebilir. Böyle bir sistem, kapasite planlamasını hasta sayısından gereksinim ve sonuç odaklı bir modele yaklaştırabilir.

HAK TEMELLİ REHABİLİTASYON İÇİN POLİTİKA VE UYGULAMA ÖNERİLERİ

Hak temelli rehabilitasyonun güçlendirilmesi için ilk adım rehabilitasyonun temel sağlık hizmet paketinin ve evrensel sağlık kapsamının ayrılmaz bir parçası olarak planlanmasıdır. Rehabilitasyon yalnız akut tedavi tamamlandıktan sonra başvurulan ikincil bir hizmet olarak değil; akut hastane, birinci basamak, toplum ve uzun süreli bakım arasında süreklilik sağlayan bir sağlık stratejisi olarak konumlandırılmalıdır. DSÖ'nün sağlık sistemlerinde rehabilitasyon rehberleri de yönetişim, finansman, insan gücü, hizmet sunumu, bilgi sistemleri ve yardımcı teknolojilerin birlikte güçlendirilmesini önermektedir (WHO, 2017, 2019).

İkinci adım, nüfus gereksinimine dayalı kapasite planlamasıdır. Rehabilitasyon yatağı, FTR uzmanı ve ekip sayısı yalnız mevcut hizmet kullanımına göre planlanırsa, hizmete hiç ulaşamayan nüfus görünmez kalır. Bu nedenle hastalık yükü, yaş

yapısı, engellilik ve fonksiyon kaybı göstergeleri, kırsal nüfus, travma ve kronik hastalık profili, mevcut bekleme süreleri ve karşılanmamış ihtiyaç verileri birlikte kullanılmalıdır. Üçüncü adım, hizmet dağılımındaki coğrafi eşitsizliklerin azaltılması ve toplum temelli rehabilitasyon, evde rehabilitasyon ve uygun durumlarda telerehabilitasyon seçeneklerinin erişilebilir biçimde geliştirilmesidir.

Dördüncü adım, kalite ve hesap verebilirliktir. Fonksiyonel sonuç ölçümlerinin rutin kullanılması, kişi tarafından bildirilen sonuç ve deneyim ölçütlerinin eklenmesi, erişim ve eşitlik verilerinin kırılımlı olarak izlenmesi gereklidir. Beşinci adım, sağlık profesyonellerinin insan hakları, engellilik, erişilebilirlik ve destekli karar verme alanlarında eğitilmesidir. İnsan hakları yaklaşımının yalnız hukuk birimlerinin konusu olarak görülmesi klinik uygulamadaki etkisini sınırlar. FTR eğitim programlarında EHS, ICF, makul düzenleme ve erişilebilir iletişim uygulamalarına yer verilmesi, bu ilkelerin gündelik klinik kararlara dönüşmesini kolaylaştırabilir.

Altıncı adım, engelli bireylerin ve hizmet kullanıcılarının planlama, değerlendirme ve kalite iyileştirme süreçlerine etkin katılımıdır. Rehabilitasyonun kişi merkezli olması, bireyin yalnız kendi tedavi hedeflerini seçmesiyle sınırlı değildir; hizmet tasarımı ve politika geliştirmede de kullanıcı deneyiminin dikkate alınmasını gerektirir. Bu yaklaşım, 'biz onlar için neyin iyi olduğunu biliyoruz' anlayışından, hizmeti kullanan kişilerin deneyim ve tercihlerini uzmanlık bilgisiyle eşit değerde veri kaynağı olarak gören ortak üretim modeline geçişi destekler.

SONUÇ

Rehabilitasyon, sağlık hizmeti ile insan haklarının kesiştiği en belirgin alanlardan biridir. Fonksiyonelliği geliştirmek, bağımsızlığı artırmak ve toplumsal katılımı desteklemek; bireyin

yalnız klinik durumunu değil, eğitim, çalışma, aile ve toplum yaşamındaki fırsatlarını doğrudan etkiler. Bu nedenle rehabilitasyona erişim, yalnız sağlık sisteminin teknik kapasitesiyle ilgili bir mesele değil; eşitlik, ayrımcılık yasağı, erişilebilirlik, özerklik, insan onuru ve topluma tam katılım ilkeleriyle birlikte ele alınması gereken bir hak konusudur.

EHS'nin 25. ve 26. maddeleri ile Türkiye'deki 5378 sayılı Kanun, rehabilitasyonun erken, bireyselleştirilmiş, katılımcı ve topluma yakın biçimde sunulması için güçlü bir normatif temel oluşturmaktadır. FTR uzmanı bu çerçevenin klinik uygulamadaki kilit aktörlerinden biridir. Hak temelli FTR pratiği; hastalık tanısından fonksiyonelliğe, standart hizmetten gereksinime göre eşitliğe, pasif hasta rolünden ortak karar vermeye ve kurum içi tedaviden toplum yaşamına katılıma doğru bir perspektif değişimi gerektirir.

Geleceğin rehabilitasyon sistemlerinin başarısı yalnız kaç hastaya hizmet verildiğiyle değil, kimin hizmete ulaşamadığı, hizmetin ne kadar erken ve nitelikli sunulduğu, bireyin kendi hedeflerine ne ölçüde ulaştığı ve rehabilitasyonun gerçek yaşamda bağımsızlık ile katılımı ne kadar artırdığıyla değerlendirilmelidir. Rehabilitasyonun bir insan hakkı olarak ele alınması, bu soruları görünür kılmakta ve FTR'yi yalnız fonksiyon kaybını azaltan bir uzmanlık alanı olmaktan çıkararak bireyin yaşam fırsatlarını genişleten hak temelli bir sağlık hizmeti olarak konumlandırmaktadır.

Kaynakça/References

Bright, T., Wallace, S., & Kuper, H. (2018). A systematic review of access to rehabilitation for people with disabilities in low- and middle-income countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*(10), 2165.

Bryden, A., Anderson, K., & Gran, B. (2024). Rehabilitation professionals' perspectives on human rights, disability, and science: A qualitative study. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation, 6*(2), 100336.

Cieza, A., Causey, K., Kamenov, K., Hanson, S., Chatterji, S., & Vos, T. (2020). Global estimates of the need for rehabilitation based on the Global Burden of Disease study 2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet, 396*(10267), 2006-2017.

Committee on Economic, Social and Cultural Rights. (2000). *General Comment No. 14: The right to the highest attainable standard of health (Art. 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights).* United Nations. https://docs.un.org/en/E/C.12/2000/4 adresinden alındı

European Physical and Rehabilitation Medicine Bodies Alliance. (2018). White Book on Physical and Rehabilitation Medicine in Europe. Chapter 1. Definitions and concepts of Physical and Rehabilitation Medicine. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, 54*(2), 156-165.

European Physical and Rehabilitation Medicine Bodies Alliance. (2018). White Book on Physical and Rehabilitation Medicine in Europe. Chapter 2. Why rehabilitation is needed by individual and society. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, 54*(2), 166-176.

Htwe, O., Yuliawiratman, B., Tannor, A., Nor Asikin, M., Soh, E., De Groote, W., . . . Naicker, A. (2024). Barriers and facilitators for increased accessibility to quality rehabilitation services in low- and middle-income countries: A systematic review. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, 60*(3), 514-522.

Kamenov, K., Mills, J.-A., Chatterji, S., & Cieza, A. (2019). Needs and unmet needs for rehabilitation services: A scoping review. *Disability and Rehabilitation, 41*(10), 1227-1237.

Sağlık Bakanlığı. (1998). *Hasta Hakları Yönetmeliği*. https://www.saglik.gov.tr/ adresinden alındı

Skempes, D., Stucki, G., & Bickenbach, J. (2015). Health-related rehabilitation and human rights: Analyzing states' obligations under the United Nations Convention on the Rights of Persons with Disabilities. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 96*(1), 163-173.

Stucki, G., & Bickenbach, J. (2017). Functioning: The third health indicator in the health system and the key indicator for rehabilitation. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, 53*(1), 134-138.

Türkiye Cumhuriyeti. (1982). Türkiye Cumhuriyeti Anayasası, Kanun No. 2709. https://www.anayasa.gov.tr/tr/mevzuat/anayasa/ adresinden alındı

Türkiye Cumhuriyeti. (2005). Engelliler Hakkında Kanun, Kanun No. 5378. https://www.aile.gov.tr/eyhgm/mevzuat/ulusal-mevzuat/kanunlar/engelliler-hakkinda-kanun/ adresinden alındı

United Nations. (2006). *Convention on the Rights of Persons with Disabilities*. https://www.un.org/development/desa/disabilities/convention-on-the-rights-of-persons-with-disabilities.html adresinden alındı

Wenzel, A., Cowan, C., Parchini, P., Azhdar, M., Perreault, K., Breedt, E., . . . McCabe, E. (2026). (In)equitable access to rehabilitation services: A scoping review with implications for rehabilitation researchers and administrators. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*.

World Health Organization & United Nations Children's Fund. (2022). *Global report on assistive technology*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240049451 adresinden alındı

World Health Organization. (2001). *International classification of functioning, disability and health: ICF*. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/42407 adresinden alındı

World Health Organization. (2017). *Rehabilitation in health systems*. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/254506 adresinden alındı

World Health Organization. (2019). *Rehabilitation in health systems: Guide for action*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789241515986 adresinden alındı

World Health Organization. (2022). *Global report on health equity for persons with disabilities*. World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240063600 adresinden alındı

World Health Organization. (2024). *Rehabilitation 2030: Meeting report, Geneva, Switzerland, 10-11 July 2023.* World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240087392 adresinden alındı

World Health Organization. (2026). *Rehabilitation: A non-negotiable pillar of universal health coverage.* World Health Organization. https://www.who.int/publications/m/item/rehabilitation--a-non-negotiable-pillar-of-universal-health-coverage adresinden alındı


BİDGE