

TEMEL BİYOMEKANİK

Editör

Yasin KIŞIOĞLU

Kocaeli Üniversitesi



© Copyright 2026

Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Yayınevi'ne aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kâğıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçlı kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.

ISBN **Sayfa ve Kapak Tasarımı**
978-625-362-161-2 Akademisyen Dizgi Ünitesi

Kitap Adı **Yayıncı Sertifika No**
Temel Biyomekanik 47518

Editör **Baskı ve Cilt**
Yasin KİŞİOĞLU Vadi Matbaacılık
ORCID iD: 0000-0002-9819-2551

Yayın Koordinatörü **Bisac Code**
Yasin DİLMEN TEC000000

DOI
10.37609/akya.4284

Kütüphane Kimlik Kartı
Temel Biyomekanik / ed. Yasin Kişioğlu.
Ankara : Akademisyen Yayınevi Kitabevi, 2026.
390 s. : tablo, şekil ; 160x235 mm.
Kaynaklar var.
ISBN 9786253621612

GENEL DAĞITIM
Akademisyen Yayınevi
Halk Sokak 5 / A Yenışehir / Ankara
Tel: 0312 431 16 33
siparis@akademisyen.com

www.akademisyen.com

ÖNSÖZ

Biyomedikal mühendisliği ve biyomekanik, mühendislik bilimleri ile sağlık bilimlerini ortak bir paydada buluşturan, günümüzün en hızlı gelişen ve gelecekte stratejik önemini daha da artıracak disiplinler arası çalışma alanları arasında yer almaktadır. Yaşam süresinin uzaması, kronik hastalıkların artışı, kişiselleştirilmiş tedavi yaklaşımlarının yaygınlaşması, dijital sağlık teknolojilerindeki gelişmeler ve yapay zekâ destekli klinik uygulamaların hız kazanması, biyomedikal mühendisliği ve biyomekanik alanlarında nitelikli bilgiye, araştırmaya ve insan kaynağına duyulan gereksinimi her geçen gün artırmaktadır. Bu gelişmeler, yalnızca yeni tanı ve tedavi teknolojilerinin geliştirilmesine değil, aynı zamanda hasta güvenliği, yaşam kalitesi ve sağlık hizmetlerinin etkinliğinin artırılmasına da önemli katkılar sağlamaktadır. Biyomedikal mühendisliği, modern sağlık teknolojilerinin geliştirilmesi, klinik uygulamaların iyileştirilmesi ve tıbbi cihaz tasarımının bilimsel temellerinin oluşturulmasında merkezi bir konuma ulaşmıştır. Biyomedikal mühendisleri, malzemelerin, implantların, protezlerin, tıbbi cihazların, ölçüm sistemlerinin ve biyomedikal yazılımların tasarımından geliştirilmesine, doğrulanmasından klinik uygulamalara aktarılmasına kadar geniş bir alanda görev almakta, sağlık profesyonelleri ile birlikte çalışarak günümüzün karmaşık sağlık problemlerine yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler üretmektedir. Bu disiplinler arası yaklaşımın başarıya ulaşabilmesi ise mühendislik, temel bilimler ve sağlık bilimleri arasında ortak bir bilimsel dilin oluşturulmasına ve güvenilir bilgi kaynaklarının geliştirilmesine bağlıdır.

Bu kitap, biyomekaniğin temelini oluşturan mühendislik prensiplerini insan anatomisi, fizyolojisi ve hareket sistemi ile bütüncül bir bakış açısıyla ele almayı amaçlamaktadır. Temel mekanik ilkelerinin biyolojik sistemlere uygulanışı, güncel bilimsel yaklaşımlar ve uygulama örnekleriyle birlikte, anlaşılır ve sistematik bir biçimde sunulmuştur. Kitabın hazırlanmasında temel hedef, farklı akademik altyapılara sahip öğrenciler, araştırmacılar ve uygulayıcılar için ortak bir başvuru kaynağı oluşturmak, mühendislik bakış açısı ile biyolojik sistemlerin işleyişini bütünleştiren disiplinler arası bir öğrenme ortamına katkı sağlamaktır. Ayrıca, kitapta klasik biyomekanik konularına ilaveten biyomalzemeler, implant ve protez teknolojileri, insan hareket analizi, modern ölçüm sistemleri, yapay zekâ destekli biyomekanik uygulamalar ve etik ilkeler gibi günümüz araştırmalarının odak noktası hâline gelen güncel konular da kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bu

yönüyle kitap, hem lisans ve lisansüstü düzeyde eğitim gören öğrenciler hem de akademik çalışmalarını sürdüren araştırmacılar için temel kavramlardan güncel uygulamalara uzanan bütüncül bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Kitabın içeriği, on iki bölüm olarak düzenlenmiştir. Bölüm 1'de biyomekanikğin tanımı, kapsamı, tarihsel gelişimi ve diğer bilim dallarıyla olan ilişkisi ele alınmıştır. Bölüm 2'de biyomekanik uygulamalarının temelini oluşturan kuvvet, moment, tork, basınç, gerilme, gerinim, deformasyon ve viskoelastisite gibi temel mekanik kavramlar açıklanmıştır. İlk iki bölümde yer alan görsellerin önemli bir kısmı, konuların daha etkin anlaşılmasını sağlamak amacıyla yazarlar tarafından özgün olarak hazırlanmıştır. Bölüm 3'de kemik dokusunun biyomekanik özellikleri, eklemlerin yapısı ve fonksiyonları ile eklem biyomekanikği, Bölüm 4'de ise kas dokusunun mekanik özellikleri, kas kuvvetinin oluşumu, kas-iskelet sistemi etkileşimi ve kas aktivitesinin ölçüm yöntemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bölüm 5'de yürüyüş ve denge biyomekanikğine ayrılmış; yürüyüş döngüsü, eklem hareketleri, denge mekanizmaları ve egzersiz biyomekanikği bilimsel bir çerçevede değerlendirilmiştir. Bölüm 6'da spor biyomekanikği kapsamında performans analizi, hareket optimizasyonu ve spor yaralanmalarının biyomekanik temelleri ele alınmıştır. Bölüm 7'de kuvvet platformları, hareket yakalama sistemleri, elektromiyografi sistemleri, sensör teknolojileri, bilgisayar destekli modelleme ve biyomekanik veri analizi yöntemleri tanıtılmıştır. Bölüm 8'de biyomalzemelerin sınıflandırılması, mekanik özellikleri, biyouyumluluk ve doku etkileşimleri ile akıllı biyomalzemelere ayrılmıştır. Bölüm 9'da implant, protez ve ortez sistemlerinin tasarım ilkeleri, malzeme seçimi, üretim yöntemleri, kişiye özgü tasarım yaklaşımları ve osseointegrasyon süreçleri ele alınmıştır. Bölüm 10'da insan hareketinin kinematik ve kinetik analizi ile dinamik davranışını kapsamaktadır. Bölüm 11'de yapay zekâ tabanlı biyomekanik uygulamalar, sensör verilerinin analizi, klinik karar destek sistemleri ve rehabilitasyon teknolojilerindeki güncel gelişmeler değerlendirilmiştir. Son olarak Bölüm 12'de ise, araştırma etiği, mesleki etik ilkeler, deneysel çalışmalarda etik sorumluluklar ile çevresel ve toplumsal sorumluluk anlayışı bilimsel bir bakış açısıyla ele alınmıştır.

Bu kitap, üniversitelerin biyomedikal mühendisliği, biyomekanik ve ilgili mühendislik ile sağlık bilimleri programlarında yürütülen lisans ve lisansüstü derslerinde temel kaynak olarak kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Aynı zamanda biyomekanik alanında araştırma yapan akademisyenler, araştırmacılar ve sektör profesyonelleri için güvenilir bir başvuru kaynağı olmayı hedeflemektedir. İçeriğin oluşturulmasında ulusal ve uluslararası literatürdeki güncel gelişmeler dikkate alınmış, teorik bilgilerin uygulama örnekleriyle desteklenmesine özen

gösterilmiştir. Bununla birlikte, biyomekanik alanındaki bilimsel ve teknolojik gelişmelerin son derece dinamik olduğu göz önünde bulundurulduğunda, yeni araştırmalar ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda içeriğin sürekli güncellenmesi doğal bir gereklilik olabilir. Kitabın her bölümü, kendi uzmanlık alanlarında yetkin akademisyenler ve araştırmacılar tarafından bilimsel titizlikle hazırlanmış, editoryal süreç boyunca içeriklerin akademik bütünlüğü, bilimsel doğruluğu ve pedagojik yeterliliği ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Bu süreçte gösterdikleri özverili çalışmalar, yapıcı akademik yaklaşım ve iş birliği için tüm bölüm yazarlarına teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, hazırlık sürecinde gerçekleştirilen bilimsel değerlendirmeler ve eleştirel tartışmaların kitabın akademik niteliğinin güçlenmesine sağladığı değerli katkıları belirtmek isterim.

Sürekli gelişen ve kendini yenileyen dinamik bilim sürecinde, bu kitabın bilimsel eleştirilere, önerilere ve yeni katkılara her zaman açık olduğu düşüncesindeyiz. Okuyuculardan gelecek yapıcı değerlendirmelerin sonraki baskılara önemli katkılar sağlayacağına inanıyoruz. En büyük temennimiz, bu kitabın biyomekanik alanında eğitim gören öğrencilere sağlam bir bilimsel temel oluşturması, araştırmacılar, akademisyenler, mühendisler ve sağlık profesyonelleri için güvenilir bir başvuru kaynağı olması, disiplinler arası araştırmalara katkı sağlaması ve geleceğin sağlık teknolojilerinin geliştirilmesi için başvurulacak bilgi kaynağı olmasını diliyoruz.

Prof. Dr. Yasin KİŞİOĞLU

Editör

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1	Biyomekaniğe Giriş.....	1
	<i>Esra TOPRAK</i> <i>Yasin KİŞİOĞLU</i>	
Bölüm 2	Temel Biyomekanik Kavramlar.....	37
	<i>Esra TOPRAK</i> <i>Yasin KİŞİOĞLU</i>	
Bölüm 3	Kemik ve Eklemlerin Biyomekaniği	89
	<i>Talip ÇELİK</i>	
Bölüm 4	Kasların Biyomekaniği	129
	<i>Emine TONAK</i> <i>Melisa İLHAN</i> <i>Zeynal YASACI</i>	
Bölüm 5	Yürüyüş ve Denge Biyomekaniği.....	157
	<i>Melis Beril BABUCÇU</i> <i>Büşra TÜRK</i> <i>Zeynep Beyza KUŞVA</i> <i>Bengisu KARAYILMAZLAR</i> <i>Kadriye ŞAHİN YORGUN</i> <i>Ayça ARSLANTÜRK YILDIRIM</i> <i>Rüstem MUSTAFAOĞLU</i>	
Bölüm 6	Spor Biyomekaniği	201
	<i>Zehra GÜÇHAN TOPCU</i>	
Bölüm 7	Biyomekanikte Ölçüm ve Analiz Yöntemleri.....	233
	<i>Merve KOYUNCU CENİKLİ</i> <i>Zeynep Lide UZ</i> <i>Nilgün YILDIZ</i> <i>Tayfun EFE</i> <i>Sevdenur AKTAŞ</i> <i>Çilen TAVŞANOĞLU</i> <i>Rüstem MUSTAFAOĞLU</i>	
Bölüm 8	Biyomalzemeler	259
	<i>Arif GÖK</i>	
Bölüm 9	İmplant/Protez/Ortez Tasarımı.....	281
	<i>Kadir GÖK</i>	

Bölüm 10	İnsan Hareketi Dinamiği (Kinematik/Kinetik)	295
	<i>Nazlıhan KILIÇASLAN</i>	
	<i>Yasin ERDOĞAN</i>	
Bölüm 11	Biyomekanik Uygulamalarda Yapay Zeka Kullanımı	327
	<i>Gülfem Ezgi ÖZALTIN</i>	
Bölüm 12	Biyomekanik Uygulamalarda Etik	353
	<i>Simay ÖZDEMİR</i>	
	<i>İrem YİĞİT</i>	
	<i>Büşra CANDİRİ</i>	

YAZARLAR

Uzm. Fzt. Sevdener AKTAŞ

İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sağlık
Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Podoloji

Uzm. Fzt. Melis Beril BABUCÇU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Dr. Öğr. Üyesi Büşra CANDİRİ

İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Uzm. Fzt. Merve KOYUNCU CENİKLİ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Doç. Dr. Talip ÇELİK

Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Biyomalzeme AD

Uzm. Fzt. Tayfun EFE

Kocaeli Şehir Hastanesi

Arş. Gör. Yasin ERDOĞAN

İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve
Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği
AD

Prof. Dr. Arif GÖK

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mimarlık
Fakültesi, Endüstriyel Tasarım AD

Prof. Dr. Kadir GÖK

İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve
Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği
AD

Fizyoterapist Melisa İLHAN

İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Uzm. Fzt. Bengisu KARAYILMAZLAR

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Arş. Gör. Nazlıhan KILIÇASLAN

İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve
Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği
AD

Prof. Dr. Yasin KIŞIOĞLU

Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Biyomedikal Mühendisliği Bölümü,
Biyomekanik AD

Uzm. Fzt. Zeynep Beyza KUŞVA

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Doç. Dr. Rüstem MUSTAFAOĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Dr. Öğr. Üyesi Gülfem Ezgi ÖZALTIN

İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Fizyoterapist Simay ÖZDEMİR

İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Uzm. Fzt. Çilen TAVŞANOĞLU

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Fizyoterapist Emine TONAK

İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Doç. Dr. Zehra GÜÇHAN TOPCU

Doğu Akdeniz Üniversitesi, Sağlık Bilimleri
Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Pr.

Arş. Gör. Esra TOPRAK

Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Biyomedikal Mühendisliği Bölümü,
Biyomalzeme AD

Uzm. Fzt. Büşra TÜRK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Uzm. Fzt. Zeynep Lide UZ

İstinye Liv Hastanesi, Bahçeşehir Sağlık
Uygulama ve Araştırma Merkezi, Neur-on
Klinik

Dr. Öğr. Üyesi Zeynal YASACI

İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Uzm. Fzt. Nilgün YILDIZ

İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sağlık Bilimleri
Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Uzm. Fzt. Ayça ARSLANTÜRK YILDIRIM

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Fizyoterapist İrem YİĞİT

İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü,
Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD

Uzm. Fzt. Kadriye ŞAHİN YORGUN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve
Rehabilitasyon AD

Bölüm 1

BİYOMEKANİĞE GİRİŞ

Esra TOPRAK¹
Yasin KİŞİOĞLU²

1.1 Giriş

Biyomekanik terimi, “canlı, yaşam” anlamına gelen “biyo” ön eki ile cisimlere kuvvetlerin etkilerin inceleyen “mekanik” alanını birleştirerek “Biyomekanik” şeklinde kullanılması kabul görmüştür. 1970’lerin başlarında, canlı organizmaların mekanik yönlerinin incelenmesini içeren bilimi tanımlamak için biyomekanik terimi benimsenmiştir (1). Biyomekaniğin ilgi duyduğu canlı organizma insan vücudu olup, insan vücuduna etkileyen kuvvetler, hem kaslar tarafından üretilen iç kuvvetleri hem de vücuda dışarıdan etki eden dış kuvvetleri içerir. Biyomekanik çalışmalarda, kuvvetlerin etkilerinin analizini yapabilmek için mekaniğin araçlarını kullanarak canlı organizmaların anatomik ve fonksiyonel durumları araştırılır. Dolayısı ile biyomekanik konusuna girmeden önce mühendislik mekaniğinin prensiplerini incelemek ve anlamak gerekir.

1.2. Mekanik

Mekanik, kuvvetlerin etkisi altındaki cisimlerin denge ve hareket koşullarını inceleyen temel bir fizik bilimidir. Doğa olaylarının anlaşılması ve mühendislik biliminin gelişiminde önemli bir yere sahip olan mekanik, cisimlerin konum, hareket ve etkileşimlerini matematiksel ve fiziksel prensipler çerçevesinde açıklar. Bu sayede doğal olaylar nicel olarak ifade edilebilmekte ve mühendislik problemlerine sistematik çözümler geliştirilebilmektedir.

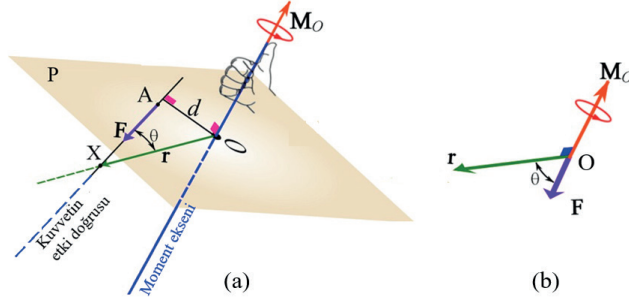
İnsanlık tarihi boyunca gözlem ve deneyimlerden elde edilen bilgiler, araç ve makinelerin geliştirilmesine katkı sağlamış, böylece teknolojik ilerlemenin

¹ Arş. Gör., Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Biyomalzeme AD, esra.toprak@kocaeli.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-4243-8716

² Arş. Gör., Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Biyomekanik AD, ykisioglu@kocaeli.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-9819-2551

$$M = F \cdot (r \sin \alpha) = F \cdot d \quad (1.34)$$

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (1.35)$$



Şekil 1.22 Bir momentin (M) vektörel ifadesi (7)

Varignon teoremi, bir kuvvetin momentini doğrudan hesaplamak yerine, o kuvvetin bileşenlerine ayrılarak her birinin momentini ayrı ayrı hesaplayıp, toplamayı mümkün kılar. Bu, özellikle karmaşık kuvvet sistemlerinde hesaplamayı oldukça kolaylaştırır. Buna göre, bir kuvvetler sisteminde, bileşke kuvvetin herhangi bir noktaya (eksene) göre oluşturduğu momenti, bu kuvveti oluşturan bileşenlerin aynı noktaya (eksene) göre oluşturdukları momentlerin cebirsel toplamına eşittir ve Denklem 1.36 ile ifade edilir (2).

$$M_o \cdot (\vec{R}) = \sum M_o \cdot (\vec{F}_i) \quad (1.36)$$

KAYNAKLAR

1. Hall SJ. *Basic Biomechanics*. 6th ed. New York, USA: McGraw-Hill; 2012.
2. Meriam JL & Kraige LG. *Engineering Mechanics: Statics*. 7th ed. New Jersey, ABD: John Wiley & Sons, Inc; 2012.
3. Hibbeler RC. & Fan SC. *Mühendislik Mekaniği: Statik*. 14. Metrik Baskıdan Çeviri, çev. A. Soyuçok ve Ö. Soyuçok. İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık; 2020.
4. Vinogradov, O., *Fundamentals of kinematics and dynamic of machines and mechanisms*, CRC Press LLC, 2000.
5. Clifford M, Brooks R, Howe A, Kennedy A, McWilliam S, Pickering S, Shayler P & Shipway P. *An Introduction to Mechanical Engineering: Part 1*. 3rd ed. London: Hodder Education; 2013.
6. Dubey NH. *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*. 1st ed. New Delhi: McGraw Hill Education (India); 2015.
7. Özkaya N, Nordin M, Goldsheyder D & Leger D. *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation*. 3rd ed. New York, ABD: Springer Science+Business Media; 2012

8. Vedantu-Tendon. <https://www.vedantu.com/question-answer/which-of-the-following-connects-bones-and-class-11-biology-cbse-5f682015eee2a36606fb5418> (Accessed: 25/06/2026)
9. Nigg BN & Herzog W. *Biomechanics of the Musculo-Skeletal System*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons; 1994.
10. Selçuk AB, Gök A, İnal S & Gök K. *Biyomekanik: Teorik Anlatım – Pratik Uygulama (Deneyisel – Nümerik)*. 1st ed. Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık; 2021.
11. McGinnis PM. *Biomechanics of Sport and Exercise*. 3rd ed. Champaign, USA: Human Kinetics; 2013.
12. Medan magnet. <https://katadata.co.id/berita/nasional/61f78bff6f329/medan-magnet-adalah-ruang-sekitar-magnet-pahami-penjasannya> (Accessed: 15/06/2026)
13. Lateral raise exercise with resistance band. https://www.shutterstock.com/tr/image-photo/lateral-raise-exercise-resistance-band-studio-290277440?dd_referrer= (Accessed: 14/06/2026)

Bölüm 2

TEMEL BİYOMEKANİK KAVRAMLAR

Esra TOPRAK¹
Yasin KİŞİOĞLU²

2.1. Giriş

Bölüm 1’de de kısaca belirtildiği gibi biyomekanik temel olarak mekanik biliminin canlı sistemlere uygulanmasıdır. Mekanik, mühendislik ve uygulamalı fizik alanlarında kuvvet, hareket ve bunlar arasındaki ilişkileri inceleyen bir disiplin olarak tanımlanırken, biyomekanik ise bu ilkelerin başta insan vücudu olmak üzere biyolojik sistemlere uygulanmasını konu edinir. Bununla birlikte, biyolojik sistemlerin mekanik açıdan incelenmesi, yapay mühendislik sistemlerinin analizine kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durumun temel nedenlerinden biri, biyolojik yapıların geometrik olarak son derece düzensiz olması ve çoğu zaman bilinen temel geometrik şekillerle temsil edilememesidir. Ayrıca, biyolojik dokular ve sistemler, yön bağımlı (anizotropik) malzeme özellikleri göstermekte, doğrusal olmayan, viskoelastik ve bazı durumlarda Newton dışı davranışlar sergileyen katı, sıvı ve gaz fazlarından oluşmaktadır. Bu karmaşık yapısal ve mekanik özellikler, biyomekanik problemlerin modellenmesi ve analiz edilmesini güçleştirmektedir. Bu nedenle, biyomekanik alanında çalışan araştırmacılar ve öğrenciler, simülasyon ve analiz süreçlerinde karşılaşılan problemlerin çözümünü kolaylaştırmak amacıyla çeşitli kabuller ve ihmal yaklaşımlarından yararlanmakta, böylece incelenen sistemlerin temel davranışlarını yeterli doğruluk düzeyinde temsil eden çözüm yöntemleri geliştirmektedirler.

Biyomekanik çalışmalar genel olarak performans analizi, yaralanma (hasar) mekanizmalarının incelenmesi ve rehabilitasyon uygulamaları üç farklı alanda yapılır. Performans odaklı biyomekanik araştırmalar, bireylerin günlük yaşam, iş ve spor aktiviteleri sırasında gerçekleştirdikleri hareketlerin mekanik

¹ Arş. Gör., Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Biyomalzeme AD, esra.toprak@kocaeli.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-4243-8716

² Arş. Gör., Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Biyomekanik AD, ykisioglu@kocaeli.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-9819-2551

(5, 7).

$$\dot{I}ş = kuvvet \cdot yol = F \cdot L \quad (2.56)$$

2.23. Güç

Güç (P), yapılan işin zamana bağlı değişim oranı olarak tanımlanır ve Denklem 2.57 ile tanımlanır (5, 12).

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (2.57)$$

Bir cisme etki eden sabit bir kuvvetin yaptığı iş, kuvvet ve yer değiştirme vektörlerinin iç çarpımı dikkate alınarak Denklem 2.58 ile belirlenebilir. İşin zamana göre türevi gücü verir ve Denklem 2.59 ile tanımlanır.

$$W = F \cdot s \quad (2.58)$$

$$P = \frac{d}{dt}(F \cdot s) \quad (2.59)$$

Eğer F vektörü sabit ise;

$$P = F \cdot \frac{ds}{dt}(F \cdot v) \quad (2.60)$$

İş ve enerji birimleri, birim sistemlerine göre farklılık gösterebilir. Mesela, SI birim sistemine göre $N \cdot m/s = J/s$ olup *Watt* (W) olarak tanımlanır. CGS birim sistemine göre, *Dyne santimetre* ($dyn \cdot cm/s = erg/s$) olup, *Horsepower* (hp) olarak adlandırılır.

KAYNAKLAR

1. Huston RL. *Fundamentals of Biomechanics*. CRC Press, 2013, Taylor & Francis Group, LLC: Boca Raton, Florida; 2013
2. MedicTests. "Anatomical Planes." <https://medictests.com/>, Son erişim 16 Haziran 2026.
3. Introduction to Anatomy: Anatomical Movements. <https://www.clinicalanatomy.ca/labs/411movements.pdf> (Accessed:14 June 2026)

4. Types of movements in the human body. <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/types-of-movements-in-the-human-body> , (Accessed: 15 June 2026)
5. Özkaya N, Nordin M, Goldsheyder D & Leger D. *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation*. 3rd ed. New York, ABD: Springer Science+Business Media; 2012
6. Nigg BN & Herzog W. *Biomechanics of the Musculo-Skeletal System*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons; 1994.
7. Dao TT & Ho Ba Tho MC. *Biomechanics of the Musculoskeletal System*. 1st ed. London, UK: Wiley-ISTE; 2014.
8. McGinnis PM. *Biomechanics of Sport and Exercise*. 3rd ed. Champaign, USA: Human Kinetics; 2013.
9. Selçuk AB, Gök A, İnal S & Gök K. *Biyomekanik: Teorik Anlatım – Pratik Uygulama (Deneysel – Nümerik)*. 1st ed. Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık; 2021.
10. Hamm K. *Biomechanics of Human Movement*. Kanada: BCcampus Open Education (Pressbooks); 2016.
11. Knudson D. *Fundamentals of Biomechanics*. 2nd ed. Springer Science Business Media, LLC, NY; 2007.
12. Hall, SJ. *Basic Biomechanics*, 6th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2012.
13. Peterson DR & Branzino JD. *Biomechanics: Principles and Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group; 2008.
14. Hibbeler RC. & Fan SC. *Mühendislik Mekaniği: Statik*. 14. Metrik Baskıdan Çeviri, çev. A. Soyuçok ve Ö. Soyuçok. İstanbul, Türkiye: Literatür Yayıncılık; 2020.
15. Meriam JL & Kraige LG. *Engineering Mechanics: Statics*. 7th ed. New Jersey, ABD: John Wiley & Sons, Inc; 2012.
16. Nelson A. *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*. 1st ed. New Delhi: McGraw-Hill / McGraw Hill Education, 2009.
17. Dhiman AK, Dhiman P & Kulshreshtha K. *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*. 1st ed. **New Delhi**: McGraw Hill Education; 2015.
18. Philpot TA. *Mechanics of Materials: An Integrated Learning System*. 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley; 2017.
19. South Africa Inspiring new days. <https://www.embaixada-africadosul.pt/images/stories/TourismNewsletterNov2013.pdf> (Accessed: 24/06/2026).
20. Toolkit. <https://instructionstechnology.weebly.com/sit-disc.html> (Accessed: 23/06/2026).
21. Cai J, Le Grogne P. *Lateral buckling of submarine pipelines under high temperature and high pressure—A literature review*. *Ocean Engineering*; 2022; 244:110254. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110254>.
22. Fundamentals of Musculoskeletal Biomechanics. <https://musculoskeletalkey.com/fundamentals-of-musculoskeletal-biomechanics/> (Accessed: 23/06/2026).
23. Ugural AC & Fenster SK. *Advanced Strength and Applied Elasticity*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 1995.
24. Budynas RG. *Advanced Strength and Applied Stress Analysis*. 2nd ed. Boston, MA: McGraw-Hill; 1999.

Bölüm 3

KEMİK VE EKLEMLERİN BİYOMEKANİĞİ

Talip ÇELİK¹

3.1. Kemik Dokusunun Yapısı ve Mekanik Özellikleri

3.1.1. Kemik Dokusunun Yapısı

Kemik dokusu, biyolojik bir doku olmasının ötesinde, ileri mühendislik kompozitlerine benzer şekilde davranan, çok fazlı ve hiyerarşik olarak organize olmuş bir yapıdır. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde kemik; heterojen, anizotropik ve viskoelastik özellikler sergileyen bir biyomalzemedir. Bu kompleks davranış, kemik dokusunun bileşimi, mikro-mimari organizasyonu ve sürekli yenilenme kapasitesinin bir sonucudur (1).

Kemik dokusu faz bileşimi açısından üç farklı temel fazdan oluşur. Bu fazlar; organik, inorganik ve su fazlarıdır. Organik faz kemik kuru ağırlığının yaklaşık olarak %30-35'ini oluşturmaktadır. Temel bileşeni Tip I kolajendir ve kemik matrisinin organik kısmının %90'ını temsil eder. Kolajen fibriller üçlü heliks yapılı tropokolajen moleküllerinin hiyerarşik olarak bir araya gelmesiyle oluşan iplikli organik yapılarıdır. Bu organizasyon, kemik dokusunun çekme dayanımına ve kırılma tokluğuna temel katkıyı sağlar. Ayrıca, osteokalsin, osteonektin ve proteoglikanlar gibi kolajen olmayan matriks proteinleri, mineralizasyon sürecinin düzenlenmesinde önemli rol oynar (1-3).

İnorganik faz, kemik kuru ağırlığının yaklaşık %65-70'ini oluşturmaktadır. Bu fazın temel bileşeni, karbonat iyonları (CO_3^{2-}) ile kısmen oluşturulmuş biyolojik hidroksiapatit kristalleridir. Genellikle 20-40 nm uzunluğunda ve 2-5 nm kalınlığında olan bu nano boyutlu kristaller, kolajen fibrilleri boyunca düzenli şekilde hizalanarak kemik dokusunun kompozit yapısını oluşturur. Bu organize yerleşim, kemiğe özellikle sertlik, elastik modülü ve basma dayanımı kazandıran temel mekanizmadır. Ayrıca kristal yapıda bulunan sodyum karbonat iyonları, mineral fazın biyolojik ortamda daha kolay yeniden şekillenmesine olanak

¹ Doç. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomalzeme AD, talip.celik@kocaeli.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-0033-2454

KAYNAKLAR

1. Gibson LJ. The mechanical behaviour of cancellous bone. *Journal of Biomechanics*. 1985;18(5):317-328.
2. Carter DR, Hayes WC. The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure. *Journal of Bone and Joint Surgery American Volume*. 1977;59(7):954-962.
3. Rho JY, Kuhn-Spearing L, Zioupos P. Mechanical properties and the hierarchical structure of bone. *Medical Engineering and Physics*. 1998;20(2):92-102.
4. Currey JD. *Bones: Structure and Mechanics*. Princeton: Princeton University Press; 2002.
5. Cowin SC. *Bone Mechanics Handbook*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press; 2001.
6. Helgason B, et al. Mathematical relationships between bone density and mechanical properties: a literature review. *Clinical Biomechanics*. 2008;23(2):135-146.
7. Fung YC. *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*. 2nd ed. New York: Springer; 1993.
8. Nyman JS, Roy A, Shen X, et al. The influence of water removal on the strength and toughness of cortical bone. *Journal of Biomechanics*. 2006;39(5):931-938.
9. Anderson TL. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2005.
10. Ritchie RO. The conflicts between strength and toughness. *Nature Materials*. 2011;10(11):817-822.
11. Nalla RK, Kinney JH, Ritchie RO. Mechanistic fracture criteria for the failure of human cortical bone. *Nature Materials*. 2003;2(3):164-168.
12. Taylor D. Fatigue of bone and bones: An analysis based on stressed volume. *Journal of Orthopaedic Research*. 1998;16(2):163-169.
13. Carter DR, Caler WE. A cumulative damage model for bone fracture. *Journal of Orthopaedic Research*. 1985;3(1):84-90.
14. Burr DB, Turner CH, Naick P, et al. Does microdamage accumulation affect the mechanical properties of bone? *Journal of Biomechanics*. 1998;31(4):337-345.
15. Martin RB. Toward a unifying theory of bone remodeling. *Bone*. 2000;26(1):1-6.
16. Milgrom C, Giladi M, Stein M, et al. Stress fractures in military recruits. A prospective study showing an unusually high incidence. *J Bone Joint Surg Br*. 1985;67(5): 732-735. doi:10.1302/0301-620X.67B5.4055871
17. Frost HM. Bone “mass” and the “mechanostat”: a proposal. *Anatomical Record*. 1987;219(1):1-9.
18. Çelik T, Taş ZC. Biomechanical Evaluation of a Newly Developed Functional-Grade Composite Material for Pedicle Screws. *World Neurosurgery*. 2024;187: 525-533. doi:10.1016/j.wneu.2024.04.120
19. Hedia HS, Aldousari SM, Abdellatif AK, et al. A new design of cemented stem using functionally graded materials (FGM). *Bio-Medical Materials and Engineering*. 2014;24 (3): 1575-1588.
20. Bayraktar HH, et al. Comparison of the elastic and yield properties of human femoral trabecular and cortical bone tissue. *Journal of Biomechanics*. 2004;37(1):27-35.
21. Huijskes R, et al. Adaptive bone remodeling theory applied to prosthetic-design analysis. *Journal of Biomechanics*. 1987;20(11-12):1135-1150.
22. Reilly DT, Burstein AH. The mechanical properties of cortical bone. *Journal of Bone and Joint Surgery American Volume*. 1974 Jul;56(5):1001-22. PMID: 4603167.
23. Baleani M, Erani P, Acciaioli A, Schileo E. Tensile yield strain of human cortical bone from the femoral diaphysis is constant among healthy adults and across the anatomical quadrants. *Bioengineering (Basel)*. 2024;11(4):395. doi:10.3390/bioengineering11040395.
24. Shalimov A, Tashkinov M, Silberschmidt VV. Failure of trabecular bone: XFEM modelling of multiple crack growth. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2024;130: 104338.

25. Öhman-Mägi C, Holub O, Wu D, et al. Density and mechanical properties of vertebral trabecular bone-A review. *Journal of Orthopaedic Research Spine*. 2021;4(4): e1176. doi:10.1002/jsp2.1176.
26. Kumar A, Pathak H, Ghosh R. Cortical bone fracture analysis including the combined influence of osteon orientations, applied load and crack lengths: a numerical investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2024;238(11-12):1091-1102. doi:10.1177/09544119241299081.
27. Burr DB, Akkus O. Bone morphology and organization. In: Burr DB, Allen MR (eds.) *Basic and Applied Bone Biology*. 2nd ed. Academic Press; 2014. p. 3-25.
28. Bayraktar HH, Morgan EF, Niebur GL, et al. Comparison of the elastic and yield properties of human femoral trabecular and cortical bone tissue. *Journal of Biomechanics*. 2004;37(1): 27-35. doi:10.1016/s0021-9290(03)00257-4.
29. Pistoia W, van Rietbergen B, Lochmüller EM, et al. Estimation of distal radius failure load with micro-finite element analysis models based on three-dimensional peripheral quantitative computed tomography images. *Bone*. 2002;30(6):842-848.
30. Keyak JH, Rossi SA, Jones KA, et al. Prediction of femoral fracture load using automated finite element modeling. *Journal of Biomechanics*. 1998;31(2): 125-133. doi:10.1016/s0021-9290(97)00123-1.
31. Foster KR, Schwan HP. Dielectric properties of tissues and biological materials: a critical review. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering*. 1989;17(1):25-104. PMID: 2651001.
32. Mow VC, Huiskes R. *Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-biology*. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott; 2005.
33. Nordin M, Frankel VH. *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*. 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
34. Sophia Fox AJ, Bedi A, Rodeo SA. The basic science of articular cartilage : structure, composition, and function *Sports Health*. 2009;1(6):461-468.
35. Hall JE. *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*. 13th ed. Philadelphia: Elsevier; 2016.
36. Macleod CM, Hall CA Jr, Frohman LA. Lubrication of Joints. *British Medical Journal*. 1964;1(5380): 384-385. doi:10.1136/bmj.1.5380.384.
37. Woo SL, Abramowitch SD, Kilger R, Liang R. Biomechanics of knee ligaments: injury, healing, and repair. *Journal of Biomechanics*. 2006;39(1):1-20. doi: 10.1016/j.jbiomech.2004.10.025.
38. Makris EA, Hadidi P, Athanasios KA. The knee meniscus: structure-function, pathophysiology, current repair techniques, and prospects for regeneration. *Biomaterials*. 2011 Oct;32(30):7411-31.
39. Neumann DA. *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Rehabilitation*. 3rd ed. Elsevier; 2017.
40. Hall SJ. *Basic Biomechanics*. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2015.
41. Kapandji IA, Anderson A, Owerko C. *The Physiology of the Joints. Volume 3: The Spinal Column, Pelvic Girdle and Head*. 7th ed. Edinburgh: Churchill Livingstone; 2019.
42. Bergmann G, et al. Hip contact forces and gait patterns from routine activities . *Journal of Biomechanics*. 2001;34(7):859-871.
43. OrthoLoad Veri Tabanı. *Loading of Orthopaedic Implants*. (20/04/2026 tarihinde www.orthoload.com adresinden ulaşılmıştır).
44. Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 4th ed. Hoboken: Wiley; 2009.
45. Makris EA, et al. Repair and tissue engineering techniques for articular cartilage. *Nature Reviews Rheumatology*. 2015;11(1):21-34.
46. Buckwalter JA, Mankin HJ. Articular cartilage: degeneration and osteoarthritis, repair, regeneration, and transplantation. *Instr Course Lect*. 1998;47:487-504. PMID: 9571450.
47. Robertson DGE, et al. *Research Methods in Biomechanics*. 2nd ed. Champaign: Human Kinetics; 2013.

48. Andriacchi TP, Mundermann A, Smith RL, et al. A framework for the in vivo pathomechanics of osteoarthritis at the knee. *Annals of Biomedical Engineering*. 2004;32(3): 447-457.
49. Guilak F. Biomechanical factors in osteoarthritis. *Best Practice & Research: Clinical Rheumatology*. 2011;25(6):815-23. doi: 10.1016/j.berh.2011.11.013.

Bölüm 4

KASLARIN BİYOMEKANIĞI

Emine TONAK¹

Melisa İLHAN²

Zeynal YASACI³

4.1. Giriş

Kas sistemi, insan hareketinin temelini oluşturan ve iskelet sistemi ile birlikte çalışarak vücudun fonksiyonel hareketlerini mümkün kılan önemli bir yapıdır. Kasların biyomekaniği kas dokusunun yapısal özellikleri, kasılma mekanizması, kas kuvvetinin oluşumu ve bu kuvvetin iskelet sistemi üzerindeki etkilerinin incelenmesini kapsamaktadır. Kas liflerinin yapısı, kasılma sırasında ortaya çıkan moleküler ve mekanik süreçler ile kas kuvvetini belirleyen biyolojik ve biyomekanik faktörler, insan hareketinin anlaşılmasında temel öneme sahiptir. Kasların oluşturduğu kuvvet, hareketin meydana gelmesinin yanı sıra eklem stabilitesinin korunması, postürün sürdürülmesi ve günlük yaşam aktivitelerinin güvenli biçimde yürütülmesinde de önemli bir işleve sahiptir. Ayrıca kas aktivitesinin ölçülmesi ve analizi, kas fonksiyonunun değerlendirilmesi ve performansın objektif olarak izlenmesi açısından değerli bilgiler sunmaktadır. Özellikle elektromiyografi gibi yöntemler, kas aktivasyon özelliklerinin objektif olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte kasların fizyolojik sınırlarının aşılması, kas yorgunluğu ve kas yaralanmaları gibi durumların gelişimine neden olabilmektedir. Bu nedenle kas biyomekaniğinin anlaşılması hem sportif performansın geliştirilmesi hem de kas-iskelet sistemi yaralanmalarının önlenmesi ve rehabilitasyon süreçlerinin planlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bölümde; kas dokusunun yapısı ve

¹ Fizyoterapist, İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, eminetonak4006@gmail.com, ORCID iD: 0009-0004-9583-6368

² Fizyoterapist, İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, melisailhan09@gmail.com, ORCID iD: 0009-0001-9963-5123

³ Dr. Öğr. Üyesi, İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, zeynal.yasaci@inonu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-9496-8095

kuvvet, yalnızca hareketin gerçekleştirilmesinde değil, aynı zamanda eklem stabilitesinin korunması, postürün sürdürülmesi ve fonksiyonel hareketlerin güvenli bir şekilde yapılmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle kasların mekanik ve fizyolojik özelliklerinin incelenmesi, kas-iskelet sisteminin sağlıklı işleyişinin anlaşılması açısından büyük önem taşır. Kas aktivitesinin ölçülmesi ve analizi, kas fonksiyonunun değerlendirilmesine ve performansın objektif olarak izlenmesine olanak sağlayarak klinik ve sportif alanlarda önemli katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte aşırı yüklenme, yetersiz toparlanma veya biomekanik dengesizlikler kas yorgunluğu ve kas yaralanmalarına yol açabilmektedir. Bu bağlamda kas biyomekaniğine ilişkin bilgilerin geliştirilmesi, hem performansın artırılması hem de kas-iskelet sistemi yaralanmalarının önlenmesi ve rehabilitasyon süreçlerinin planlanması açısından önemli bir bilimsel temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

1. Takagaki Y, Yamagishi H, Matsuoka R. Chapter four - Factors Involved in Signal Transduction During Vertebrate Myogenesis. In: Jeon KW, editor. International Review of Cell and Molecular Biology. 296: Academic Press; 2012. p. 187-272.
2. Sweeney HL, Hammers DW. Muscle Contraction. Cold Spring Harb Perspect Biology. 2018;10(2).
3. Henderson CA, Gomez CG, Novak SM, et al. Overview of the Muscle Cytoskeleton. Comprehensive Physiology. 2017;7(3):891-944.
4. Marcadet L, Bouredji Z, Argaw A, Frenette J. The Roles of RANK/RANKL/OPG in Cardiac, Skeletal, and Smooth Muscles in Health and Disease. Frontiers in Cell and Developmental Biology. 2022;10:903657.
5. Shadrin IY, Khodabukus A, Bursac N. Striated muscle function, regeneration, and repair. Cellular and Molecular Life Sciences 2016;73(22):4175-202.
6. Gollapudi S, Michael J, Chandra M. Striated Muscle Dynamics. San Diego: Academic Press; 2014.
7. Lin BL, Song T, Sadayappan S. Myofilaments: Movers and Rulers of the Sarcomere. Comprehensive Physiology. 2017;7(2):675-92.
8. Parmentier E, Thiry M. A new organisational design in skeletal muscle fibres. Cell and Tissue Research. 2023;393(1):111-7.
9. Enoka RM, Duchateau J. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. The Journal of Physiology. 2008;586(1):11-23.
10. Roig M, O'Brien K, Kirk G, Murray R, McKinnon P, Shadgan B, et al. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. British Journal of Sports Medicine. 2009;43(8):556-68.
11. Gash MC, Kandle PF, Murray IV, Varacallo MA. Physiology, Muscle Contraction. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing LLC; 2026.
12. Scott W, Stevens J, Binder-Macleod SA. Human skeletal muscle fiber type classifications. Physical Therapy. 2001;81(11):1810-6.
13. Physiopedia. Muscle Fibre Types. [Online] https://www.physio-pedia.com/index.php?title=Muscle_Fibre_Types&oldid=288185.

14. Hafen BB, Burns B. Physiology, Smooth Muscle. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing LLC; 2026.
15. Pollard TD, Earnshaw WC, Lippincott-Schwartz J, Johnson GT (eds.). Cell Biology. 3rd ed. Philadelphia: Elsevier; 2017.
16. Wang K, Wang X, Wang Y. Factors, mechanisms and improvement methods of muscle strength loss. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2024;12:1509519.
17. Kruse A, Rivares C, Weide G, Tilp M, Jaspers RT. Stimuli for Adaptations in Muscle Length and the Length Range of Active Force Exertion-A Narrative Review. *Frontiers in Physiology*. 2021;12:742034.
18. Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Developing Maximal Neuromuscular Power. *Sports Medicine*. 2011;41(1):17-38.
19. Benzon HT, Raja SN, Molloy RE, et al. (eds.). Essentials of Pain Medicine and Regional Anesthesia. 2nd ed. Philadelphia: Churchill Livingstone; 2005.
20. Radák Z. Chapter 2 - Skeletal Muscle, Function, and Muscle Fiber Types. In: Radák Z, editor. *The Physiology of Physical Training*: Academic Press; 2018. p. 15-31.
21. Stotz A, Maghames E, Mason J, Groll A, Zech A. Maximum isometric torque at individually-adjusted joint angles exceeds eccentric and concentric torque in lower extremity joint actions. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. 2022;14(1):13.
22. Stotz A, Maghames E, Mason J, Groll A, Zech A. Maximum isometric torque at individually-adjusted joint angles exceeds eccentric and concentric torque in lower extremity joint actions. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. 2022;14(1):13.
23. Hollander DB, Kraemer RR, Kilpatrick MW, Ramadan ZG, Reeves GV, Francois M, et al. Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2007;21(1):34-40.
24. Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, Folland J, Tillin N, Duchateau J. Rate of force development: physiological and methodological considerations. *European Journal of Applied Physiology*. 2016;116(6):1091-116.
25. Mota JA, Gerstner GR, Giuliani HK. Motor unit properties of rapid force development during explosive contractions. *The Journal of Physiology*. 2019;597(9):2335-6.
26. Balshaw TG, Massey GJ, Maden-Wilkinson TM, Lanza MB, Folland JP. Effect of long-term maximum strength training on explosive strength, neural, and contractile properties. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2022;32(4):685-97.
27. Salvage SC, Jackson AP, Huang CLH. Structure and Function of Skeletal Muscle. In: Zaidi M, editor. *Encyclopedia of Bone Biology*. Oxford: Academic Press; 2020. p. 247-69.
28. Rockenfeller R, Günther M, Clemente CJ, Dick TJM. Rethinking the physiological cross-sectional area of skeletal muscle reveals the mechanical advantage of pennation. *Royal Society Open Science*. 2024;11(9):240037.
29. SN DEO, Zapello GMB, Knih DA, Fischer G, Moro ARP. Muscle Architecture and Maximal Strength between Male Practitioners of Functional Fitness Training and Strength Training. *International Journal of Exercise Science*. 2023;16(7):1142-53.
30. Herzog W, Powers K, Johnston K, Duvall M. A new paradigm for muscle contraction. *Frontiers in Physiology*. 2015;6:174.
31. Lichtwark GA, Farris DJ, Chen X, Hodges PW, Delp SL. Microendoscopy reveals positive correlation in multiscale length changes and variable sarcomere lengths across different regions of human muscle. *Journal of Applied Physiology* (1985). 2018;125(6):1812-20.
32. Sahinis C, Amiridis IG, Kellis E. Neuromechanical basis of region-specific differences and their implications for sport performance and injury prevention: a narrative review. *European Journal of Applied Physiology*. 2025;125(12):3417-40.
33. Lundberg T, McPhee J. Chapter 2 - Muscle adaptations and fatigue. In: Porter S, Wilson J, editors. *A Comprehensive Guide to Sports Physiology and Injury Management*. St. Louis (MO): Elsevier; 2020. p. 7-13.

34. Qaisar R, Bhaskaran S, Van Remmen H. Muscle fiber type diversification during exercise and regeneration. *Free Radical Biology and Medicine*. 2016;98:56-67.
35. Schiaffino S, Reggiani C. Fiber Types in Mammalian Skeletal Muscles. *Physiological Reviews*. 2011;91(4):1447-531.
36. Qaisar R. Fiber-type-specific architecture and pathophysiology of the neuromuscular junction. *Neuroscience*. 2026;597:13-26.
37. Plotkin DL, Roberts MD, Haun CT, Schoenfeld BJ. Muscle Fiber Type Transitions with Exercise Training: Shifting Perspectives. *Sports (Basel)*. 2021;9(9).
38. Rodríguez Cruz PM, Cossins J, Beeson D, Vincent A. The Neuromuscular Junction in Health and Disease: Molecular Mechanisms Governing Synaptic Formation and Homeostasis. *Frontiers in Molecular Neuroscience*. 2020;13:590736.
39. Borzuola R, Giombini A, Torre G, Campi S, Albo E, Bravi M, et al. Central and Peripheral Neuromuscular Adaptations to Ageing. *Journal of Clinical Medicine*. 2020;9(3).
40. Santello M, Fuglevand AJ. Role of across-muscle motor unit synchrony for the coordination of forces. *Experimental Brain Research*. 2004;159(4):501-8.
41. Liang C, Liu H. Effects and mechanisms of resistance training on corticospinal adaptation. *Frontiers in Physiology*. 2025;16:1569639.
42. Weavil JC, Amann M. Corticospinal excitability during fatiguing whole body exercise. *Progress in Brain Research*. 2018;240:219-46.
43. Rudolph KS, Cloutier M, Stackhouse S. Pain inhibition-the unintended benefit of electrically elicited muscle strengthening contractions. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2023;24(1):131.
44. Sale DG. Neural adaptation to resistance training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1988;20(5 Suppl):S135-45.
45. Taylor JL, Amann M, Duchateau J, Meeusen R, Rice CL. Neural Contributions to Muscle Fatigue: From the Brain to the Muscle and Back Again. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2016;48(11):2294-306.
46. Kamrani P, Marston G, Arbor TC, Jan A. *Anatomy, Connective Tissue*. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing LLC; 2026.
47. Lieber R, Ward S. Skeletal muscle design to meet functional demands. *Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B, Biological sciences*. 2011;366:1466-76.
48. O'Brien TD, Reeves ND, Baltzopoulos V, Jones DA, Maganaris CN. The effects of agonist and antagonist muscle activation on the knee extension moment-angle relationship in adults and children. *European Journal of Applied Physiology*. 2009;106(6):849-56.
49. Latash ML. Muscle coactivation: definitions, mechanisms, and functions. *Journal of Neurophysiology*. 2018;120(1):88-104.
50. An KN. Muscle force and its role in joint dynamic stability. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2002(403 Suppl):S37-42.
51. Baratta R, Solomonow M, Zhou BH, Letson D, Chuinard R, D'Ambrosia R. Muscular coactivation. The role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *The American Journal of Sports Medicine*. 1988;16(2):113-22.
52. Huang H, Xie H, Zhang G, Xiao W, Ge L, Chen S, et al. Effects of dynamic neuromuscular stabilization training on the core muscle contractility and standing postural control in patients with chronic low back pain: a randomized controlled trial. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2025;26(1):213.
53. Mongold SJ, Georgiev C, Legrand T, Yildiran Carlak E, Iannotta A, Cabaraux P, et al. Aging-related changes in neuromuscular control strategies and their influence on postural stability. *Scientific Reports*. 2025;15(1):30127.
54. Clark NC. Sensorimotor control of functional joint stability: Scientific concepts, clinical considerations, and the articuloneuromuscular cascade paradigm in peripheral joint injury. *Musculoskeletal Science and Practice*. 2024;74:103198.

55. Tayfur B, Charupongsas C, Morrissey D, Miller SC. Neuromuscular joint function in knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2023;66(2):101662.
56. Concha-Cisternas Y, Piñero JC, Celis-Morales C, Valdés-Badilla P, Núñez-Espinosa C, Cigarroa I, et al. Effects of neuromuscular training on proprioception and muscular reaction time in older woman: Randomized controlled trial. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2025;82:102994.
57. Yılmaz O, Soylu Y, Erkmen N, Kaplan T, Batalik L. Effects of proprioceptive training on sports performance: a systematic review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. 2024;16(1):149.
58. Xu W, Ghaziani AO, Khanduja V, Pattyn C, Duquesne K, Van Couwenberghe G, et al. Anatomy, biomechanics and function of the hip capsule: A narrative review from a surgeons perspective. *Clinical Biomechanics*. (Bristol). 2025;127:106588.
59. Wang C, Fu R, Yang H. Toward a clear relationship between mechanical signals and bone adaptation. *Mechanobiology in Medicine*. 2025;3(1):100115.
60. Chen N, Danalache M, Liang C, Alexander D, Umrath F. Mechanosignaling in Osteoporosis: When Cells Feel the Force. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025;26(9):4007.
61. Ma J, Wen J, Qiu Y, Wang Y, Liu T, Xiao Q, et al. The regional impact of exercise on bone density in older adults: a meta-analysis with molecular mechanism insights. *Geriatric Nursing*. 2025;65:103451.
62. Li Y, Saibon JB, Mo W, Xu J. Effects of Physical Exercise on Whole-Body Bone Mineral Density in Adolescents: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Health*. 2026;18(2):288-97.
63. Bruyère O, Scott D, Papaioannou A, Buehring B, Camargos BM, Chapurlat R, et al. The Impact of Sedentary Behavior and Physical Activity on Bone Health: A Narrative Review from the Rehabilitation Working Group of the International Osteoporosis Foundation. *Calcified Tissue International*. 2025;116(1):109.
64. Porto AB, Nascimento Guimarães A, Alves Okazaki VH. The effect of exercise on postural alignment: A systematic review. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2024;40:99-108.
65. Barassi G, Di Simone E, Galasso P, Cristiani S, Supplizi M, Kontochristos L, et al. Posture and Health: Are the Biomechanical Postural Evaluation and the Postural Evaluation Questionnaire Comparable to and Predictive of the Digitized Biometrics Examination? *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(7):3507.
66. Fasser M-R, Furrer PR, Fislser L, Urbanschitz L, Snedeker JG, Farshad M, et al. The triadic relationship between spinal posture, loading, and degeneration. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025;13:1556889.
67. Lee N, Kang H, Shin G. Use of antagonist muscle EMG in the assessment of neuromuscular health of the low back. *Journal of Physiological Anthropology*. 2015;34(1):18.
68. Chen L, Zhang Z, Liu X. Role and Mechanism of Mechanical Load in the Homeostasis of the Subchondral Bone in Knee Osteoarthritis: A Comprehensive Review. *Journal of Inflammation Research*. 2024;17:9359-78.
69. Van Rossom S, Wesseling M, Smith CR, Thelen DG, Vanwanseele B, Dieter VA, et al. The influence of knee joint geometry and alignment on the tibiofemoral load distribution: A computational study. *Knee*. 2019;26(4):813-23.
70. Wang Y, Wu Z, Chen Z, Ye X, Chen G, Yang J, et al. Proprioceptive Training for Knee Osteoarthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Frontiers in Medicine*. (Lausanne). 2021;8:699921.
71. de la Motte SJ, Lisman P, Gribbin TC, Murphy K, Deuster PA. Systematic Review of the Association Between Physical Fitness and Musculoskeletal Injury Risk: Part 3-Flexibility, Power, Speed, Balance, and Agility. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2019;33(6):1723-35.

72. Drigny J, Gauthier A, Reboursière E, Guermont H, Gremeaux V, Edouard P. Shoulder Muscle Imbalance as a Risk for Shoulder Injury in Elite Adolescent Swimmers: A Prospective Study. *Journal of Human Kinetics*. 2020;75:103-13.
73. Kacprzak B, Stańczak M, Surmacz J, Hagner-Derengowska M. Biophysics of ACL Injuries. *Orthopaedic Reviews*. 2024;16:126041.
74. Zemková E, Zapletalová L. The Role of Neuromuscular Control of Postural and Core Stability in Functional Movement and Athlete Performance. *Frontiers in Physiology*. 2022;13:796097.
75. Pienciak-Siewert A, Horan DP, Ahmed AA. Role of muscle coactivation in adaptation of standing posture during arm reaching. *Journal of Neurophysiology*. 2020;123(2):529-47.
76. Zajac FE, Neptune RR, Kautz SA. Biomechanics and muscle coordination of human walking: part II: lessons from dynamical simulations and clinical implications. *Gait & Posture*. 2003;17(1):1-17.
77. Olmo MD, Domingo R. EMG Characterization and Processing in Production Engineering. *Materials (Basel)*. 2020;13(24).
78. Wu Y, Ángeles Martínez Martínez M, Orizaola P. Overview of the Application of EMG Recording in the Diagnosis and Approach of Neurological Disorders. In: Turker H, editor. *Electrodiagnosis in New Frontiers of Clinical Research*. London: IntechOpen; 2013.
79. Raez MB, Hussain MS, Mohd-Yasin F. Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications. *Biological Procedures Online*. 2006;8:11-35.
80. Tiwari V, Khare S, Sharma K, Shrivastava A, Geddam R, Awais M, et al. From muscle potentials to computer interfaces: A multiscale review of electromyography for clinical and computational applications. *Sensing and Bio-Sensing Research*. 2026;51:100969.
81. Rock K, Addison O, Gray VL, Henshaw RM, Ward C, Marchese V. Skeletal Muscle Measurements in Pediatric Hematology and Oncology: Essential Components to a Comprehensive Assessment. *Children (Basel)*. 2023;10(1).
82. Naqvi U, Margetis K, Sherman AL. Muscle Strength Grading. *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing LLC; 2026.
83. Baltzopoulos V, Brodie DA. Isokinetic dynamometry. Applications and limitations. *Sports Medicine*. 1989;8(2):101-16.
84. Figueiredo PHS, Veloso LRdS, Lima MMO, Vieira CFD, Alves FL, Lacerda ACR, et al. The reliability and validity of the 30-seconds sit-to-stand test and its capacity for assessment of the functional status of hemodialysis patients. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2021;27:157-64.
85. Park TS, Shin MJ. Comprehensive Assessment of Lower Limb Function and Muscle Strength in Sarcopenia: Insights from the Sit-to-Stand Test. *Annals of Geriatric Medicine and Research*. 2024;28(1):1-8.
86. Niewiadomski W, Laskowska D, Gąsiorowska A, Cybulski G, Strasz A, Langfort J. Determination and Prediction of One Repetition Maximum (1RM): Safety Considerations. *Journal of Human Kinetics - J HUM KINET*. 2008;19:109-20.
87. Constantin-Teodosiu D, Constantin D. Molecular Mechanisms of Muscle Fatigue. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(21).
88. Moldover JR, Borg-Stein J. Chapter 15 - Exercise and Fatigue. In: Downey JA, Myers SJ, Gonzalez EG, Lieberman JS, editors. *The Physiological Basis of Rehabilitation Medicine (Second Edition)*: Butterworth-Heinemann; 1994. p. 393-411.
89. Tórnero-Aguilera JF, Jimenez-Morcillo J, Rubio-Zarapuz A, Clemente-Suárez VJ. Central and Peripheral Fatigue in Physical Exercise Explained: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(7).
90. Flores DV, Mejía Gómez C, Estrada-Castrillón M, Smitaman E, Pathria MN. MR Imaging of Muscle Trauma: Anatomy, Biomechanics, Pathophysiology, and Imaging Appearance. *Radiographics*. 2018;38(1):124-48.

91. Roberts TJ, Konow N. How tendons buffer energy dissipation by muscle. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 2013;41(4):186-93.
92. Lieber RL. Biomechanical response of skeletal muscle to eccentric contractions. *Journal of Sport and Health Science*. 2018;7(3):294-309.
93. Qian Z, Ping L, Xuelin Z. Re-examining the mechanism of eccentric exercise-induced skeletal muscle damage from the role of the third filament, titin (Review). *Biomedical Reports*. 2024;20(1):14.
94. Edouard P, Reurink G, Mackey AL, Lieber RL, Pizzari T, Järvinen TAH, et al. Traumatic muscle injury. *Nature Reviews Disease Primers*. 2023;9(1):56.
95. Andrews MH, Shield AJ, Lichtwark GA, Pincheira PA. Hamstring Injury Mechanisms and Eccentric Training-Induced Muscle Adaptations: Current Insights and Future Directions. *Sports Medicine*. 2025;55(10):2429-43.
96. Harper DJ, McBurnie AJ, Santos TD, Eriksrud O, Evans M, Cohen DD, et al. Biomechanical and Neuromuscular Performance Requirements of Horizontal Deceleration: A Review with Implications for Random Intermittent Multi-Directional Sports. *Sports Medicine*. 2022;52(10):2321-54.
97. Jakobsen JR, Krogsgaard MR. The Myotendinous Junction—A Vulnerable Companion in Sports. A Narrative Review. *Frontiers in Physiology*. 2021;12:635561.
98. Hagos A, Merchant AA, Kayani B, Yasen AT, Haddad FS. Risk factors and injury prevention strategies for hamstring injuries: a narrative review. *EFORT Open Reviews*. 2025;10(8):636-45.
99. Mersmann F, Bohm S, Domroes T, Weidlich K, Arampatzis A. Personalized Injury Risk Assessment and Exercise Prescription Based on Tendon Strain. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 2025;53(2):77-86.
100. Fan P, Kim Y, Han DW, Kim S, Wang T. Alterations in the Neuromuscular Control Mechanism of the Legs During a Post-Fatigue Landing Make the Lower Limbs More Susceptible to Injury. *Bioengineering (Basel)*. 2025;12(3).
101. Peitola JPJ, Esrafilian A, Simonsen MB, Andersen MS, Korhonen RK. Reduced Muscle Strength Can Alter the Impact of Gait Modifications on Knee Cartilage Mechanics. *Journal of Orthopaedic Research*. 2025;43(9):1566-80.
102. Choudhary PK, Choudhary S, Saha S, Rajpoot YS, Ciocan VC, Nicolae-Lucian V, et al. Lower-Limb Biomechanical Adaptations to Exercise-Induced Fatigue During Running: A Systematic Review of Injury-Relevant Mechanical Changes. *Life (Basel)*. 2026;16(2).
103. Hu J, Ding Z, Bull AMJ. Alterations in Muscle Coordination to Reduce Knee Joint Loading for People with Limb Loss. *Annals of Biomedical Engineering*. 2025;53(4):935-45.
104. Noh JW, Park BS, Kim MY, Lee LK, Yang SM, Lee WD, et al. Analysis of isokinetic muscle strength for sports physiotherapy research in Korean ssireum athletes. *Journal of Physical Therapy Science*. 2015;27(10):3223-6.

Bölüm 5

YÜRÜYÜŞ VE DENGİ BİYOMEKANİĞİ

Melis Beril BABUÇCU¹

Büşra TÜRK²

Zeynep Beyza KUŞVA³

Bengisu KARAYILMAZLAR⁴

Kadriye ŞAHİN YORGUN⁵

Ayça ARSLANTÜRK YILDIRIM⁶

Rüstem MUSTAFAOĞLU⁷

5.1 Giriş

İnsan yürüyüşü, nöromusküler kontrol, biyomekanik prensipler ve çevresel etkileşimlerin bütünleşmesiyle ortaya çıkan karmaşık ve koordineli bir hareket paternidir. Yürüyüş sırasında alt ekstremit eklemlerinin uyumlu hareketi, kasların zamanlaması ve vücut ağırlığının dengeli şekilde aktarılması hem hareketin verimliliğini hem de postüral stabiliteyi belirleyen temel unsurlardır. Bu süreç yalnızca lokomasyonun sağlanmasını değil, aynı zamanda denge kontrolünün korunmasını ve günlük yaşam aktivitelerinin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini mümkün kılar.

Yürüyüş biyomekaniğinin anlaşılması; normal yürüyüş paternlerinin tanımlanması, patolojik değişikliklerin ortaya konulması ve klinik değerlendirme

¹ Uzm. Fzt. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, fzt.melisbyazici@gmail.com, ORCID iD: 0009-0008-9978-9713

² Uzm Fzt. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, bsrgvn9@gmail.com, ORCID iD: 0009-0004-7709-9464

³ Uzm. Fzt. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, zeynepkusva@gmail.com, ORCID iD: 0009-0002-9751-5520

⁴ Uzm. Fzt. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, bengisukarayilmazlar@gmail.com, ORCID iD: 0009-0001-8160-1566

⁵ Uzm. Fzt. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, kadriyeesahin@gmail.com, ORCID iD: 0009-0009-3619-0081

⁶ Uzm. Fzt. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, ayca.arslanturk@bezmialem.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-2535-6631

⁷ Doç. Dr. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, rustem.mustafaoglu@iuc.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-7030-0787

KAYNAKLAR

1. Whittle MW. *Gait analysis: an introduction*: Butterworth-Heinemann; 2014.
2. Simoneau GG. Kinesiology of walking. *Kinesiology of the musculoskeletal system: foundations for physical rehabilitation*, 2002;1:523
3. Perry J, Burnfield J. *Gait analysis: normal and pathological function*: CRC Press; 2024.
4. Spallone G, Mancini L, Carnevale A, et al. Step-by-step insight into gait analysis: A narrative review unlocking knee biomechanics. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 2025
5. Beyazova YSM. Yürüme bozuklukları ve düşme. In: Yağız-On A, editor. *Normal yürüme: Güneş Tıp Kitabevleri*; 2014.
6. Neumann D. *Kinesiology of the musculoskeletal system: Foundations for rehabilitation Third Edition* 2017.
7. Andrews AW, Vallabhajosula S, Boise S, et al. Normal gait speed varies by age and sex but not by geographical region: a systematic review. *Journal of physiotherapy*, 2023;69(1):47-52
8. Şener G. *Kinezyoloji ve biyomekanik*: Hipokrat Kitabevi; 2016.
9. Kolbası Dogan E, Van Der Hulst L, Spildooren J, et al. Does Sensory Integration Influence Gait Parameters in Healthy Older Adults? Insights from a Systematic Review with Meta-Analysis. 2025
10. Faisal AI, Mondal T, Deen MJ. Systematic development of a simple human gait index. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 2023;17:229-42
11. Karatsidis A, Angelini L, Scaramozza M, et al. Characterizing gait in people with multiple sclerosis using digital data from smartphone sensors: A proposed framework. *Multiple Sclerosis Journal*, 2025;31(5):512-28
12. Cappozzo A, Della Croce U, Leardini A, et al. Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 1: theoretical background. *Gait & posture*, 2005;21(2):186-96
13. Bejek Z, Paróczai R, Illyés Á, et al. The influence of walking speed on gait parameters in healthy people and in patients with osteoarthritis. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 2006;14(7):612-22
14. Crosbie J, Vachalathiti R, Smith R. Age, gender and speed effects on spinal kinematics during walking. *Gait & posture*, 1997;5(1):13-20
15. Stokes V, Andersson C, Forssberg H. Rotational and translational movement features of the pelvis and thorax during adult human locomotion. *Journal of Biomechanics*, 1989;22(1):43-50
16. Neumann DA, Kelly ER. *Kinesiology of the musculoskeletal system: foundations for rehabilitation*. 2010
17. O'Neill MC, Demes B, Thompson NE, et al. Adaptations for bipedal walking: Musculoskeletal structure and three-dimensional joint mechanics of humans and bipedal chimpanzees (Pan troglodytes). *Journal of Human Evolution*, 2022;168:103195
18. Bruening DA, Frimenko RE, Goodyear CD, et al. Sex differences in whole body gait kinematics at preferred speeds. *Gait & posture*, 2015;41(2):540-5
19. Kadaba MP, Ramakrishnan H, Wootten M. Measurement of lower extremity kinematics during level walking. *Journal of orthopaedic research*, 1990;8(3):383-92
20. Murray MP, Drought AB, Kory RC. Walking patterns of normal men. *JBJS*, 1964;46(2):335-60
21. Smith LK, Lelas JL, Kerrigan DC. Gender differences in pelvic motions and center of mass displacement during walking: stereotypes quantified. *Journal of women's health & gender-based medicine*, 2002;11(5):453-8
22. Kerrigan DC, Todd MK, Della Croce U. Gender differences in joint biomechanics during walking: normative study in young adults. *Am J Phys Med Rehabil*, 1998;77(1):2-7.10.1097/00002060-199801000-00002
23. Sangeux M. *Biomechanics of the hip during gait. The pediatric and adolescent hip: essentials and evidence*: Springer; 2019. p. 53-71.
24. Chao E, Cahalan T. Kinetics and kinematics of normal gait. *Smidt G Gait in Rehabilitation*

- Churchill Livingstone, NY, 1990:45-63
25. Wang D, Lee K-M, Ji J. A passive gait-based weight-support lower extremity exoskeleton with compliant joints. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016;32(4):933-42
 26. Malcolm P, Derave W, Galle S, et al. A simple exoskeleton that assists plantarflexion can reduce the metabolic cost of human walking. *PloS one*, 2013;8(2):e56137
 27. Zhu J, Wang Y, Jiang J, et al. Unidirectional variable stiffness hydraulic actuator for load-carrying knee exoskeleton. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017;14(1):1729881416686955
 28. Zheng C. Study on Low Energy Consumption Driven Joint of Lower Exoskeleton Based on Energy Flow Characteristics of Human Body. *Harbin Institute of Technology*, 2016
 29. Brockett CL, Chapman GJ. Biomechanics of the ankle. *Orthopaedics and trauma*, 2016;30(3):232-8
 30. Rajagopal A, Dembia CL, DeMers MS, et al. Full-body musculoskeletal model for muscle-driven simulation of human gait. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 2016;63(10):2068-79
 31. Houghlum PA, Bertoti DB. *Brunnstrom's clinical kinesiology*: FA Davis; 2011.
 32. Winter DA. *Biomechanics and motor control of human movement*: John Wiley & sons; 2009.
 33. Bergmann G, Deuretzbacher G, Heller M, et al. Hip contact forces and gait patterns from routine activities. *Journal of Biomechanics*, 2001;34(7):859-71
 34. Diamond LE, Wrigley TV, Bennell KL, et al. Hip joint biomechanics during gait in people with and without symptomatic femoroacetabular impingement. *Gait & posture*, 2016;43:198-203. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.09.023>
 35. Zhang L, Liu G, Han B, et al. Knee joint biomechanics in physiological conditions and how pathologies can affect it: a systematic review. *Applied bionics and biomechanics*, 2020;2020(1):7451683
 36. Sethi D, Bharti S, Prakash C. A comprehensive survey on gait analysis: History, parameters, approaches, pose estimation, and future work. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2022;129:102314. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2022.102314>
 37. Muro-de-la-Herran A, Garcia-Zapirain B, Mendez-Zorrilla A. Gait Analysis Methods: An Overview of Wearable and Non-Wearable Systems, Highlighting Clinical Applications. *Sensors*, 2014;14(2):3362-94
 38. Wallmann HW. Introduction to observational gait analysis. *Home health care management & practice*, 2009;22(1):66-8
 39. Whittle M, Levine D, Richards J. Methods of gait analysis. *Gait analysis*, 2007:137-75
 40. Baek J-E, Jung J-H, Kim H-K, et al. Smartphone Accelerometer for Gait Assessment: Validity and Reliability in Healthy Adults. *Applied Sciences*, 2024;14(23):11321
 41. Saito Y, Nakamura S, Tanaka A, et al. Evaluation of the validity and reliability of the 10-meter walk test using a smartphone application among Japanese older adults. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2022;4:904924
 42. Rosen KL, Sui M, Kvedar JC. Smartphone videos are a scalable tool for gait evaluation in Parkinson's disease. *NPJ Digit Med*, 2026;9(1):161.10.1038/s41746-026-02447-2
 43. Mukaino M, Ohtsuka K, Tanikawa H, et al. Clinical-oriented Three-dimensional Gait Analysis Method for Evaluating Gait Disorder. *J Vis Exp*, 2018(133).10.3791/57063
 44. Kessler SE, Rainbow MJ, Lichtwark GA, et al. A Direct Comparison of Biplanar Videoradiography and Optical Motion Capture for Foot and Ankle Kinematics. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2019;Volume 7 - 2019.10.3389/fbioe.2019.00199
 45. Colyer SL, Evans M, Cosker DP, et al. A Review of the Evolution of Vision-Based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computer Vision Methods Towards Developing a Markerless System. *Sports Medicine - Open*, 2018;4(1):24.10.1186/s40798-018-0139-y
 46. Hulleck AA, Menoth Mohan D, Abdallah N, et al. Present and future of gait assessment in clinical practice: Towards the application of novel trends and technologies. *Front Med Technol*, 2022;4:901331.10.3389/fmedt.2022.901331

47. Han X, Guffanti D, Brunete A. A comprehensive review of vision-based sensor systems for human gait analysis. *Sensors*, 2025;25(2):498
48. Scataglini S, Abts E, Van Bocxlaer C, et al. Accuracy, Validity, and Reliability of Markerless Camera-Based 3D Motion Capture Systems versus Marker-Based 3D Motion Capture Systems in Gait Analysis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sensors*, 2024;24(11):3686
49. Scott B, Seyres M, Philp F, et al. Healthcare applications of single camera markerless motion capture: a scoping review. *PeerJ*, 2022;10:e13517.10.7717/peerj.13517
50. McHenry BD, Exten E, Long JT, et al. Sagittal Fluoroscopy for the Assessment of Hindfoot Kinematics. *J Biomech Eng*, 2016;138(3):4032445.10.1115/1.4032445
51. Do TN, Suh YS. Gait Analysis Using Floor Markers and Inertial Sensors. *Sensors*, 2012;12(2):1594-611
52. Sacco G, Ben-Sadoun G, Gautier J, et al. Comparison of spatio-temporal gait parameters between the GAITRite® platinum plus classic and the GAITRite® CIRFACE among older adults: a retrospective observational study. *BMC Geriatr*, 2023;23(1):132.10.1186/s12877-023-03811-7
53. Klöpfer-Krämer I, Brand A, Wackerle H, et al. Gait analysis – Available platforms for outcome assessment. *Injury*, 2020;51:S90-S6.https://doi.org/10.1016/j.injury.2019.11.011
54. Prasanth H, Caban M, Keller U, et al. Wearable Sensor-Based Real-Time Gait Detection: A Systematic Review. *Sensors*, 2021;21(8):2727
55. Duan P, Li S, Duan Z, et al. Bio-Inspired Real-Time Prediction of Human Locomotion for Exoskeletal Robot Control. *Applied Sciences*, 2017;7(11):1130
56. Pollock AS, Durward BR, Rowe PJ, et al. What is balance? *Clinical rehabilitation*, 2000;14(4):402-6
57. Richmond SB, Fling BW, Lee H, et al. The assessment of center of mass and center of pressure during quiet stance: Current applications and future directions. *Journal of Biomechanics*, 2021;123:110485
58. Levangie PK, Norkin CC. *Joint structure and function: a comprehensive analysis*: FA Davis; 2011.
59. Horak FB. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? *Age and ageing*, 2006;35(suppl_2):ii7-ii11
60. Herdman SJ. Vestibular rehabilitation. *Curr Opin Neurol*, 2013;26(1):96-101.10.1097/WCO.0b013e32835c5ec4
61. Loram ID, Lakie M. Human balancing of an inverted pendulum: position control by small, ballistic-like, throw and catch movements. *The Journal of physiology*, 2002;540(3):1111-24
62. Peterka RJ. Sensory integration for human balance control. *Handbook of clinical neurology*, 2018;159:27-42
63. Peterka RJ. Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of neurophysiology*, 2002
64. Sousa AS, Silva A, Tavares JMR. Biomechanical and neurophysiological mechanisms related to postural control and efficiency of movement: a review. *Somatosensory & motor research*, 2012;29(4):131-43
65. Milton J, Cabrera JL, Ohira T, et al. The time-delayed inverted pendulum: implications for human balance control. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2009;19(2)
66. Assländer L, Peterka RJ. Sensory reweighting dynamics in human postural control. *Journal of neurophysiology*, 2014;111(9):1852-64
67. Shanbhag J, Wolf A, Wechsler I, et al. Methods for integrating postural control into biomechanical human simulations: a systematic review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2023;20(1):111
68. Bronstein A. Multisensory integration in balance control. *Handbook of clinical neurology*, 2016;137:57-66
69. Sturme DL, St George R, Lord SR. Balance disorders in the elderly. *Neurophysiologie Clinique/ Clinical Neurophysiology*, 2008;38(6):467-78

70. Liu Z, Wang Q, Sun W, et al. Balancing sensory inputs: somatosensory reweighting from proprioception to tactile sensation in maintaining postural stability among older adults with sensory deficits. *Frontiers in Public Health*, 2023;11:1165010
71. Nashner LM. Practical biomechanics and physiology of balance. *Balance function assessment and management*, 2014;431
72. Hall CD, Herdman SJ, Whitney SL, et al. Vestibular rehabilitation for peripheral vestibular hy-pofunction: an updated clinical practice guideline from the Academy of Neurologic Physical Therapy of the American Physical Therapy Association. *Journal of neurologic physical therapy*, 2022;46(2):118-77
73. Horak FB, Nashner LM, Diener H. Postural strategies associated with somatosensory and ves-tibular loss. *Experimental brain research*, 1990;82(1):167-77
74. Rinalduzzi S, Trompetto C, Marinelli L, et al. Balance dysfunction in Parkinson's disease. *Bio-Med research international*, 2015;2015(1):434683
75. Palakurthi B, Burugupally SP. Postural instability in Parkinson's disease: a review. *Brain scien-ces*, 2019;9(9):239
76. Wang J, Li Y, Yang G-Y, et al. Age-related dysfunction in balance: a comprehensive review of causes, consequences, and interventions. *Aging and disease*, 2024;16(2):714
77. Zemková E, Kováčiková Z. Sport-specific training induced adaptations in postural control and their relationship with athletic performance. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2023;16:1007804
78. Zemková E. Sport-specific balance. *Sports Medicine*, 2014;44(5):579-90
79. Gebel A, Busch A, Stelzel C, et al. Effects of physical and mental fatigue on postural sway and cortical activity in healthy young adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2022;16:871930
80. Paillard T. Sport-specific balance develops specific postural skills. *Sports Medicine*, 2014;44(7):1019-20
81. Sibley KM, Straus SE, Inness EL, et al. Balance assessment practices and use of standardized balance measures among Ontario physical therapists. *Physical therapy*, 2011;91(11):1583-91
82. Paillard T. The optimal method for improving postural balance in healthy young and older people: specific training for postural tasks encountered in personal physical practice. *Frontiers in Physiology*, 2023;14:1188496
83. Brachman A, Kamieniarz A, Michalska J, et al. Balance training programs in athletes—A syste-matic review. *Journal of human kinetics*, 2017;58:45
84. Zech A. Neuromuscular training for rehabilitation of sports injuries: a systematic review. *Medi-cine Science in Sports Exercise Official Journal of the American College of Sports Medicine*, 2009
85. Taube W, Gruber M, Gollhofer A. Spinal and supraspinal adaptations associated with balance training and their functional relevance. *Acta physiologica*, 2008;193(2):101-16
86. Hübscher M, Zech A, Pfeifer K, et al. Neuromuscular training for sports injury prevention: a systematic review. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2010;42(3):413-21
87. Schiftan GS, Ross LA, Hahne AJ. The effectiveness of proprioceptive training in preventing ankle sprains in sporting populations: a systematic review and meta-analysis. *Journal of science and medicine in sport*, 2015;18(3):238-44
88. Lauersen JB, Bertelsen DM, Andersen LB. The effectiveness of exercise interventions to prevent sports injuries: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *British journal of sports medicine*, 2014;48(11):871-7
89. Barbieri FA, Vuillerme N, Chardon M, et al. Muscle fatigue effects on postural control in young adults: a systematic review and meta-analysis. *Brazilian Journal of Motor Behavior*, 2025;19
90. Powden CJ, Dodds TK, Gabriel EH. The reliability of the star excursion balance test and lower quarter y-balance test in healthy adults: a systematic review. *International journal of sports phy-sical therapy*, 2019;14(5):683
91. Gebel A, Lesinski M, Behm DG, et al. Effects and dose–response relationship of balance trai-ning on balance performance in youth: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 2018;48(9):2067-89

92. Lesinski M, Hortobágyi T, Muehlbauer T, et al. Dose-response relationships of balance training in healthy young adults: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 2015;45(4):557-76
93. Lesinski M, Hortobágyi T, Muehlbauer T, et al. Effects of balance training on balance performance in healthy older adults: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 2015;45(12):1721-38

Bölüm 6

SPOR BİYOMEKANİĞİ

Zehra GÜÇHAN TOPCU¹

6.1. Giriş

Günümüzde spor, sağlık geliştirme girişimlerinde giderek daha fazla kullanılmakta ve hükümet kurumları, politika yapımcılar ve araştırmacılar tarafından nüfus sağlığını iyileştirmek için etkin ve ölçeklenebilir bir strateji olarak kabul görmektedir. Spor, sağlığın yanında rekreasyon ve meslek olarak da insanların yaşamında önemli yer tutmaktadır. Kültürel veya sosyoekonomik farklılıklardan bağımsız olarak spora katılım, zihinsel sağlığın geliştirilmesi için uygulanabilir bir müdahale stratejisi olarak ortaya çıkmıştır. Spora katılım fiziksel, bilişsel, duygusal ve sosyal faydalar sağlar (1).

Spor biyomekaniği, hareketin mekanik prensipleri (kuvvet, hız, açı vb.) ile biyolojik yapıları (kas, eklem, vücut segmentleri) birlikte inceleyen disiplinler arası bir bilim dalıdır. Amaç; spor hareketlerinin doğru anlaşılması, öğretilmesi, performansın geliştirilmesi ve teknik becerikliliğin artırılmasıdır. Yani hareket analizi hem hareketin nasıl yapıldığını hem de neden o şekilde hareket edildiğini ve edilmesi gerektiğini açıklar (2, 3). Bu bölümde spor biyomekaniği farklı yönlerden ele alınarak detaylı bir biçimde anlatılacaktır.

6.2. Spor Hareketlerinin Biyomekanik Analizi

Literatürdeki çalışmalara göre genellikle sporda incelenen biyomekanik parametreler açı, açısal hız, tork, hareket süresi, yer değiştirme ve hızdır. Bunlar spor biyomekaniğinde hareket analizinin temel bileşenleri olarak kabul edilirler (3).

6.2.1. Sporda Biyomekanik Açından Açının Önemi

Biyomekanik açıdan eklem açısı, iki komşu vücut segmenti (örneğin femur ve tibia arasında) arasındaki geometrik ilişkidir. Kemiklerin düzlemlere göre yaptığı

¹ Doç. Dr., Doğu Akdeniz Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Pr., zehra.guchan@emu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-8587-7407

KAYNAKLAR

1. Rocha AC, Noll M, Vieira CA, et al. Do team sports have positive effects on anxiety levels and mood disorders? A systematic review protocol. *Systematic Reviews*. 2026 Jan 22.
2. McGinnis PM. Biomechanics of sport and exercise. Human Kinetics; 2013.
3. Yao Y. Application of sports biomechanics in the technical analysis of taekwondo kicking. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*. 2023;29:e2022_0379.
4. Li J, Qian H. Biomechanical effects of different change of direction angles on lower limb joint load and injury risk in soccer players. *Scientific Reports*. 2025 Dec 22.
5. Hamill J, Knutzen KM. Biomechanical basis of human movement. Lippincott Williams & Wilkins; 2006 Oct 1.
6. Knudson D. Fundamentals of biomechanics. Boston, MA: Springer US; 2007 May 28.
7. Şahin İH, Kıvrak AO. The effect of the isokinetic shoulder strength on the phases of speed. *Turkish Journal of Sport and Exercise*. 2024 Aug 8;26(2):160-72.
8. Altan BK, Odabaş İ. Erkek sutopu oyuncularında alt ekstremitte izokinetik kuvvetinin rölatif kuvvet, esneklik ve patlayıcı güce etkisi: tanımlayıcı araştırma. *Türkiye Klinikleri Journal of Sports Sciences*. 2025;17(3):240-9.
9. Inkol KA, Brown C, McNally W, et al. Muscle torque generators in multibody dynamic simulations of optimal sports performance. *Multibody System Dynamics*. 2020 Dec;50(4):435-52.
10. Winter DA. Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley & sons; 2009 Oct 12.
11. Hay JG. The biomechanics of sports techniques. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ [Google Scholar]. 1993.
12. Wang Y, Zhang X, Li J. Analysis and optimization of basketball player's motion state based on sports biomechanics. *Journal of Biotech Research*. 2025 Apr 1;21.
13. Taborri J, Keogh J, Kos A, et al. Sport biomechanics applications using inertial, force, and EMG sensors: A literature overview. *Applied bionics and biomechanics*. 2020;2020(1):2041549
14. Ryan W, Harrison A, Hayes K. Functional data analysis of knee joint kinematics in the vertical jump. *Sports Biomechanics*. 2006 Jan 1;5(1):121-38.
15. Bartlett R, Wheat J, Robins M. Is movement variability important for sports biomechanists?. *Sports biomechanics*. 2007 May 1;6(2):224-43.
16. Enoka RM. Neuromechanics of human movement, 4th edn. Human Kinetics Publishers.
17. Smulligan KL, Smith AC, Esopenko C, et al. Using cervical spine proprioception and vestibular/oculomotor assessments to identify return-to-play clearance prognosis after adolescent concussion. *Journal of Sport Rehabilitation*. 2026 Jan 6;1(aop):1-7
18. Maffulli N, Longo UG, Gougoulas N, et al. Sport injuries: a review of outcomes. *British medical bulletin*. 2011 Mar 1;97(1):47-80.
19. Jabara SH, Ati JJ. The impact of biomechanical factors on enhancing sports performance and injury prevention. *Journal Olahraga Rekat (Rekreasi Masyarakat)*. 2025 Oct 25;4(2):191-202.
20. Lloyd D. The future of in-field sports biomechanics: wearables plus modelling compute real-time in vivo tissue loading to prevent and repair musculoskeletal injuries. *Sports Biomechanics*. 2024 Oct 2;23(10):1284-312.
21. Nigg BM, Baltich J, Hoerzer S, et al. Running shoes and running injuries: mythbusting and a proposal for two new paradigms: 'preferred movement path' and 'comfort filter'. *British Journal of Sports Medicine*. 2015 Oct 1;49(20):1290-4.
22. Brukner P. Brukner & Khan's clinical sports medicine. North Ryde: McGraw-Hill; 2012.
23. Sabir T, Allen T, Callaghan MJ, et al. Ten questions in sports engineering: knee brace efficacy for sports injuries. *Sports Engineering*. 2025 Dec;28(2):41.
24. Timothy E. Hewett TE, Myer GD, et al. Reducing knee and anterior cruciate ligament injuries among female athletes: A systematic review. *The American Journal of Sports Medicine*. 2005;33(4):492-501

25. Neumann DA. Kinesiology of the musculoskeletal system-e-Book: kinesiology of the musculoskeletal system-e-book. Elsevier Health Sciences; 2016 Nov 3.
26. Gurau TV, Gurau G, Musat CL, et al. Epidemiology of injuries in professional and amateur football men (part II). *Journal of Clinical Medicine*. 2023 Sep 29;12(19):6293.
27. Nicolini AP, Carvalho RT, Matsuda MM, et al. Common injuries in athletes' knee: experience of a specialized center. *Acta Ortopedica Brasileira*. 2014;22(03):127-31.
28. Cognetti DJ, Bedi A. Biomechanics of the meniscus and meniscal injury. *Operative Techniques in Orthopaedics*. 2025 Jun 1;35(2):101180.
29. Rašković B, Dimitrijević V, Viduka D, et al. Isokinetic hamstrings-to-quadriceps peak torque ratio in combat sports: a systematic review and meta-analysis. *Sport Mont*. 2023 Jun 1;21(2):129-37.
30. Bramah C, Mendiguchia J, Dos' Santos T, et al. Exploring the role of sprint biomechanics in hamstring strain injuries: a current opinion on existing concepts and evidence. *Sports Medicine*. 2024 Apr;54(4):783-93.
31. Glenn S. Fleisig, G. S., James R. et al. (1995). Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *The American Journal of Sports Medicine*, 23(2), 233–239.
32. Elliott B, Reid M, Crespo M. Technique development in tennis stroke production. International Tennis Federation; 2009.
33. Nahum AM, Melvin JW, editors. Accidental injury: biomechanics and prevention. Springer Science & Business Media; 2012 Nov 2.
34. Espregueira-Mendes J, Van Dijk CN, Neyret P, et al. Injuries and health problems in football. What everyone should know. 2017:6-7.
35. Knechtle B. Environmental factors for fatigue and injury in ultra-endurance sports. In *Routledge Handbook of Ergonomics in Sport and Exercise* 2013 Dec 4 (pp. 63-68). Routledge.
36. Kent R, Forman JL, Crandall J, et al. The mechanical interactions between an American football cleat and playing surfaces in-situ at loads and rates generated by elite athletes: a comparison of playing surfaces. *Sports Biomechanics*. 2015 Jan 2;14(1):1-7.
37. Mark D, Grabiner MD. (2011). Biomechanics and injury prevention: The role of movement analysis. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21(2), 201–205.
38. Khan A, Faridi M, Khan MK, et al. Sport-performance-based buying behaviour assessment of athletes for sports equipment: A quantitative study. *Int J Phys Educ Sports Health*. 2025;12(6):684-9.
39. Meaney DF, Smith DH. Biomechanics of concussion. *Clinics in sports medicine*. 2011 Jan 1;30(1):19-31.
40. Bartlett R. Introduction to sports biomechanics: Analysing human movement patterns. Routledge; 2014 Jan 15.
41. Lavigne A, Chicoine D, Esculier JF, et al. The role of footwear, foot orthosis, and training-related strategies in the prevention of bone stress injuries: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Exercise Science*. 2023 Jun 1;16(3):721.
42. Knapik JJ, Jones SB, Darakjy S, et al. Injury rates and injury risk factors among US Army wheel vehicle mechanics. *Military medicine*. 2007 Sep 1;172(9):988-96.
43. Willwacher S, Weir G. The future of footwear biomechanics research. *Footwear Science*. 2023 May 4;15(2):145-54.
44. Lin S, Song Y, Cen X, et al. The implications of sports biomechanics studies on the research and development of running shoes: A systematic review. *Bioengineering*. 2022 Sep 22;9(10):497.
45. Werd MB, Knight EL, Langer PR, editors. Athletic footwear and orthoses in sports medicine. New York: Springer; 2010 Jun 17.
46. Jor A, Lau NW, Daryabor A, et al. Effects of foot orthoses on running kinetics and kinematics: A systematic review and meta-analysis. *Gait & Posture*. 2024 Mar 1;109:240-58.
47. Messina G, Francavilla VC, Lima F, et al. Effects of proprioceptive insoles and specific core training on postural stability for preventing injuries in tennis. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*. 2024 Feb 19;9(1):34.

48. Sabir T, Allen T, Callaghan MJ, et al. Ten questions in sports engineering: knee brace efficacy for sports injuries. *Sports Engineering*. 2025 Dec;28(2):41.
49. Elliott B. Theory into practice: the key to acceptance of sport biomechanics. In ISBS-Conference Proceedings Archive 2009 Aug 29.
50. Zouzas IC, Hendra J, Stodelle J, et al. Golf injuries: epidemiology, pathophysiology, and treatment. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2018 Feb 15;26(4):116-23.
51. Baker HP, Krishnan P, Meghani O, et al. Protective sport bracing for athletes with mid-season shoulder instability. *Sports Health*. 2023 Jan;15(1):105-10.
52. Boykin RE, Stull JD, Giphart JE, et al. Femoroacetabular impingement in a professional soccer player. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2013 May;21(5):1203-11.
53. Arner JW, McClincy MP, Bradley JP. Hamstring injuries in athletes: evidence-based treatment. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. 2019 Dec 1;27(23):868-77.
54. Jiang T, Tian S, Wang L, et al. Multi-joint protective effects of lumbar brace on lumbar, hip, knee, and ankle in parachute landing with backpack load. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2023 Dec;61(12):3279-87.
55. Ball JR, Harris CB, Lee J, et al. Lumbar spine injuries in sports: review of the literature and current treatment recommendations. *Sports Medicine-Open*. 2019 Dec;5(1):26.
56. Leacox A, Fashingbauer L, Ferguson T, et al. The effect of running speed on cadence and running kinetics. *International Journal of Sports Physical Therapy*. 2025 Jul 2;20(7):957.
57. Atlı A, Kulunkoglu B. Yüzme sporunda çıkış aşaması: biyomekaniksel yaklaşım. *Mediterranean Journal of Sport Science*. 2021 Apr 4;4(1):51-60.
58. Harbili E, Arıtan S. Elit haltercilerde koparma tekniğinin karşılaştırmalı biyomekanik analizi. *Spor Bilimleri Dergisi*. 2005 Jan 6;16(3):124-34.
59. Lees, A., Nolan, L. (1998). The biomechanics of soccer: a review. *Journal of sports sciences*, 16(3), 211-234.).
60. Nunome H, Hennig E, Smith N. Football biomechanics. New York, NY: Routledge; 2017 Oct 31.
61. Robinson P, White LM. The biomechanics and imaging of soccer injuries. In seminars in musculoskeletal radiology 2005 Nov (Vol. 9, No. 04, pp. 397-420). Copyright© 2005 by Thieme Medical Publishers, Inc., 333 Seventh Avenue, New York, NY 10001, USA..)
62. Reeser JC, Fleisig GS, Bolt B, et al. Upper limb biomechanics during the volleyball serve and spike. *Sports Health*. 2010 Sep;2(5):368-74.
63. Shih YF, Wang YC. Spiking kinematics in volleyball players with shoulder pain. *Journal of Athletic Training*. 2019 Jan 1;54(1):90-8.
64. Bourbousson J, Sève C, McGarry T. Space-time coordination dynamics in basketball: Part 2. The interaction between the two teams. *Journal of Sports Sciences*. 2010 Feb 1;28(3):349-58.
65. McGarry T. Applied and theoretical perspectives of performance analysis in sport: scientific issues and challenges. *International Journal of Performance Analysis in Sport*. 2009 Apr 1;9(1):128-40.
66. Lambrich J, Muehlbauer T. Biomechanical analyses of different serve and groundstroke techniques in tennis: a systematic scoping review. *PLoS One*. 2023 Aug 17;18(8):e0290320
67. Bourgain M, Rouch P, Rouillon O, et al. Golf swing biomechanics: a systematic review and methodological recommendations for kinematics. *Sports*. 2022 Jun 9;10(6):91.
68. Warmenhoven, J. (2024). Over 30 years of using functional data analysis in human movement. What do we know, and is there more for sports biomechanics to learn?. *Sports Biomechanics*, 1-32.

Bölüm 7

BİYOMEKANİKTE ÖLÇÜM VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Merve KOYUNCU CENİKLİ¹

Zeynep Lide UZ²

Nilgün YILDIZ³

Tayfun EFE⁴

Sevdenur AKTAŞ⁵

Çilen TAVŞANOĞLU⁶

Rüstem MUSTAFAOĞLU⁷

7.1. Giriş

İnsan hareketini mekanik prensiplerle inceleyen biyomekanik, hareketin doğru değerlendirilebilmesi için objektif ve güvenilir ölçüm yöntemlerine ihtiyaç duyar. Geleneksel gözleme dayalı klinik değerlendirmelerin sınırlı doğruluk ve tekrarlanabilirliğine karşın, güncel biyomekanik ölçüm teknolojileri hareketi sayısal verilere dönüştürerek çok daha hassas analiz imkânı sunar.

Araştırma, rehabilitasyon ve spor bilimlerinde hareketin kinematik ve kinetik özelliklerini detaylıca değerlendirmek amacıyla; kuvvet ölçüm sistemleri, hareket analiz teknolojileri, elektromiyografi (EMG) ve bilgisayar tabanlı modellemeler yaygın olarak kullanılmaktadır.

¹ Uzm. Fzt., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, merve.cenikli@iuc.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-8066-9844

² Uzm. Fzt., İstinye Liv Hastanesi, Bahçeşehir Sağlık Uygulama ve Araştırma Merkezi, Neur-on Klinik, lide.uz@ogr.iuc.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-9010-1168

³ Uzm. Fzt., İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, yildiznilgunn@gmail.com, ORCID iD: 0000-0001-7632-9927

⁴ Uzm. Fzt., Kocaeli Şehir Hastanesi, tayfun.efe@ogr.iuc.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-7945-2944

⁵ Uzm. Fzt., İstanbul Gelişim Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Podoloji, snaktas@gelisim.edu.tr, ORCID iD: 0000-0002-7945-2944

⁶ Uzm. Fzt., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, avsanoglucilen@gmail.com, ORCID iD: 0009-0007-1127-8568

⁷ Doç. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, ustem.mustafaoglu@iuc.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-8549-4449

KAYNAKLAR

1. Knudson D. Fundamentals of Biomechanics. New York: Springer Science; 2007.
2. Joseph Hamill KMK, Timothy R. Derrick. Linear Kinetics. In: Lupash E, editor. Biomechanical Basis of Human Movement. China: Lippincott Williams & Wilkins; 2015. p. 346–90.
3. Thompson BJ. It's time to re-evaluate the reporting of common measures from isokinetic dynamometers: isokinetic for torque, isotonic for power. *Front Sports Act Living*. 2025;7:1472712. doi:10.3389/fspor.2025.1472712
4. Grace TG. Muscle imbalance and extremity injury. A perplexing relationship. *Sports Med*. 1985;2(2):77–82. doi:10.2165/00007256-198502020-00001
5. Stauber WT, Barill ER, Stauber RE, *et al*. Isotonic dynamometry for the assessment of power and fatigue in the knee extensor muscles of females. *Clin Physiol*. 2000;20(3):225–33. doi:10.1046/j.1365-2281.2000.00250.x
6. Schieb D. The biomechanics piezoelectric force plate. *Soma*. 1987;14:35–40.
7. Winter D. BIOMECHANICS AND MOTOR CONTROL OF HUMAN MOVEMENT. Canada: John Wiley & Sons, Inc.; 2009.
8. Elftman HO. FORCES AND ENERGY CHANGES IN THE LEG DURING WALKING. *American Journal of Physiology*. 1939;125:339–56.
9. Gage WH, Winter DA, Frank JS, *et al*. Kinematic and kinetic validity of the inverted pendulum model in quiet standing. *Gait Posture*. 2004;19(2):124–32. doi:10.1016/s0966-6362(03)00037-7
10. Razak AH, Zayegh A, Begg RK, *et al*. Foot plantar pressure measurement system: a review. *Sensors (Basel)*. 2012;12(7):9884–912. doi:10.3390/s120709884
11. Wade L, Needham L, McGuigan P, *et al*. Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. *PeerJ*. 2022;10:e12995. doi:10.7717/peerj.12995
12. Lu TW, Chang CF. Biomechanics of human movement and its clinical applications. *Kaohsiung J Med Sci*. 2012;28(2 Suppl):S13–25. doi:10.1016/j.kjms.2011.08.004
13. Song K, Hullfish TJ, Scatone Silva R, *et al*. Markerless motion capture estimates of lower extremity kinematics and kinetics are comparable to marker-based across 8 movements. *J Biomech*. 2023;157:111751. doi:10.1016/j.jbiomech.2023.111751
14. Das K, de Paula Oliveira T, Newell J. Comparison of markerless and marker-based motion capture systems using 95% functional limits of agreement in a linear mixed-effects modelling framework. *Scientific Reports*. 2023;13(1):22880. doi:10.1038/s41598-023-49360-2
15. Turner JA, Chaaban CR, Padua DA. Validation of OpenCap: A low-cost markerless motion capture system for lower-extremity kinematics during return-to-sport tasks. *J Biomech*. 2024;171:112200. doi:10.1016/j.jbiomech.2024.112200
16. Carlo Dindorf EB, Freya Gassmann, Michael Fröhlich. Artificial Intelligence in Sports, Movement, and Health: Springer Cham; 2024.
17. Lee CJ, Lee JK. Inertial Motion Capture-Based Wearable Systems for Estimation of Joint Kinetics: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2022;22(7). doi:10.3390/s22072507
18. Souaifi M, Dhahbi W, Jebabli N, *et al*. Artificial Intelligence in Sports Biomechanics: A Scoping Review on Wearable Technology, Motion Analysis, and Injury Prevention. *Bioengineering (Basel)*. 2025;12(8). doi:10.3390/bioengineering12080887
19. Prisco G, Pirozzi MA, Santone A, *et al*. Validity of Wearable Inertial Sensors for Gait Analysis: A Systematic Review. *Diagnostics*. 2025;15(1):36.
20. Ohmura T, Kojima S, Azuma T, *et al*. Assessing the Validity and Reliability of a Markerless Motion Capture System for Sagittal-Plane Gait Range of Motion. *Cureus*. 2025;17(12):e99875. doi:10.7759/cureus.99875
21. Song K, Hullfish TJ, Silva RS, *et al*. Markerless motion capture estimates of lower extremity kinematics and kinetics are comparable to marker-based across 8 movements. *bioRxiv*. 2023. doi:10.1101/2023.02.21.526496

22. Cereatti A, Gurchiek R, Mündermann A, *et al.* ISB recommendations on the definition, estimation, and reporting of joint kinematics in human motion analysis applications using wearable inertial measurement technology. *J Biomech.* 2024;173:112225.doi:10.1016/j.jbiomech.2024.112225
23. Scataglini S, Abts E, Van Bocxlaer C, *et al.* Accuracy, Validity, and Reliability of Markerless Camera-Based 3D Motion Capture Systems versus Marker-Based 3D Motion Capture Systems in Gait Analysis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sensors (Basel).* 2024;24(11).doi:10.3390/s24113686
24. Flaxman TE, Alkjaer T, Smale KB, *et al.* Differences in EMG-moment relationships between ACL-injured and uninjured adults during a weight-bearing multidirectional force control task. *J Orthop Res.* 2019;37(1):113–23.doi:10.1002/jor.24145
25. Preston DC, Shapiro BE. Electromyography and neuromuscular disorders : clinical-electrophysiologic-ultrasound correlations. Fourth edition. ed. Philadelphia, PA: Elsevier; 2021.
26. Papagiannis GI, Triantafyllou AI, Roupelakis IM, *et al.* Methodology of surface electromyography in gait analysis: review of the literature. *J Med Eng Technol.* 2019;43(1):59–65.doi:10.1080/03091902.2019.1609610
27. Hellig T, Rick V, Mertens A, *et al.* Investigation of observational methods assessing workload of static working postures based on surface electromyography. *Work.* 2019;62(2):185–95. doi:10.3233/wor-192854
28. Fernández-Lázaro D, Mielgo-Ayuso J, Adams DP, *et al.* Electromyography: A Simple and Accessible Tool to Assess Physical Performance and Health during Hypoxia Training. A Systematic Review. *Sustainability.* 2020;12(21):9137.
29. Fukuhara S, Kawashima T, Oka H. Indices reflecting muscle contraction performance during exercise based on a combined electromyography and mechanomyography approach. *Sci Rep.* 2021;11(1):21208.doi:10.1038/s41598-021-00671-2
30. Ficek K, Golaś A, Pietraszewski P, *et al.* The Effects of a Combined Pre- and Post-Operative Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Rehabilitation Program on Lower Extremity Muscle Imbalance. *Applied Sciences.* 2022;12(15):7411.
31. Lee K. EMG-Triggered Pedaling Training on Muscle Activation, Gait, and Motor Function for Stroke Patients. *Brain Sci.* 2022;12(1).doi:10.3390/brainsci12010076
32. Osborne JA, Botkin R, Colon-Semenza C, *et al.* Physical Therapist Management of Parkinson Disease: A Clinical Practice Guideline From the American Physical Therapy Association. *Phys Ther.* 2022;102(4).doi:10.1093/ptj/pzab302
33. Pillkar R, Momeni K, Ramanujam A, *et al.* Use of Surface EMG in Clinical Rehabilitation of Individuals With SCI: Barriers and Future Considerations. *Front Neurol.* 2020;11:578559. doi:10.3389/fneur.2020.578559
34. Campanini I, Disselhorst-Klug C, Rymer WZ, *et al.* Surface EMG in Clinical Assessment and Neurorehabilitation: Barriers Limiting Its Use. *Front Neurol.* 2020;11:934.doi:10.3389/fneur.2020.00934
35. Piyathilaka L, Sul J-H, Dunu Arachchige S, *et al.* Advances in EMG Signal Processing and Pattern Recognition: Techniques, Challenges, and Emerging Applications. *Electronics.* 2026;15(3):590.
36. Al-Ayyad M, Owida HA, De Fazio R, *et al.* Electromyography Monitoring Systems in Rehabilitation: A Review of Clinical Applications, Wearable Devices and Signal Acquisition Methodologies. *Electronics.* 2023;12(7):1520.
37. Karacan I, Türker KS. A comparison of electromyography techniques: surface versus intramuscular recording. *Eur J Appl Physiol.* 2025;125(1):7–23.doi:10.1007/s00421-024-05640-x
38. John V. Basmajian CJD. *Muscles Alive: Their Function Revealed by Electromyography.* Baltimore: Williams & Wilkins; 1985.
39. Ho T-Y, Chen Y-J, Hung W-C, *et al.* The Design of EMG Measurement System for Arm Strength Training Machine. *Mathematical Problems in Engineering.* 2015;2015(1):356028.doi:https://doi.org/10.1155/2015/356028

40. Tankisi H, Burke D, Cui L, *et al.* Standards of instrumentation of EMG. *Clin Neurophysiol.* 2020;131(1):243–58.doi:10.1016/j.clinph.2019.07.025
41. Muceli S, Merletti R. Tutorial. Frequency analysis of the surface EMG signal: Best practices. *J Electromyogr Kinesiol.* 2024;79:102937.doi:10.1016/j.jelekin.2024.102937
42. Potvin JR, Brown SH. Less is more: high pass filtering, to remove up to 99% of the surface EMG signal power, improves EMG-based biceps brachii muscle force estimates. *J Electromyogr Kinesiol.* 2004;14(3):389–99.doi:10.1016/j.jelekin.2003.10.005
43. Shields JE, Hernandez-Sarabia JA, Lanza MB, *et al.* A Comparison of Popular Filters for the Electromyography Beginner. *Measurement in Physical Education and Exercise Science.* 2025;1–10.doi:10.1080/1091367X.2025.2589872
44. Merletti R. Standards for Reporting EMG Data. *Journal of Electromyography and Kinesiology.* 2000.
45. Arteaga MV, Castiblanco JC, Mondragon IF, *et al.* EMG-driven hand model based on the classification of individual finger movements. *Biomedical Signal Processing and Control.* 2020;58:101834.doi:https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101834
46. Besomi M, Hodges PW, Clancy EA, *et al.* Consensus for experimental design in electromyography (CEDE) project: Amplitude normalization matrix. *J Electromyogr Kinesiol.* 2020;53:102438. doi:10.1016/j.jelekin.2020.102438
47. Konrad P. The abc of emg. *A practical introduction to kinesiological electromyography.* 2005;1.
48. The SENIAM Project [Available from: <http://www.seniam.org/>.
49. Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, *et al.* OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2007;54(11):1940–50.doi:10.1109/tbme.2007.901024
50. Erdemir A, McLean S, Herzog W, *et al.* Model-based estimation of muscle forces exerted during movements. *Clin Biomech (Bristol).* 2007;22(2):131–54.doi:10.1016/j.clinbiomech.2006.09.005
51. Robertson D, Caldwell G, Hamill J, *et al.* Research Methods in Biomechanics: Human Kinetics; 2015.
52. Myers CA, Laz PJ, Shelburne KB, *et al.* A Probabilistic Approach to Quantify the Impact of Uncertainty Propagation in Musculoskeletal Simulations. *Annals of Biomedical Engineering.* 2015;43(5):1098–111.doi:10.1007/s10439-014-1181-7
53. Ancillao A, Aertbeliën E, De Schutter J. Effect of the soft tissue artifact on marker measurements and on the calculation of the helical axis of the knee during a squat movement: A study on the CAMS-Knee dataset. *Med Eng Phys.* 2022;110:103915.doi:10.1016/j.medengphy.2022.103915
54. Crowninshield RD, Brand RA. A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion. *J Biomech.* 1981;14(11):793–801.doi:10.1016/0021-9290(81)90035-x
55. Rasmussen J. From Knowledge to Leverage: How to Use Musculoskeletal Simulation to Design Exoskeleton Concepts. *Applied Sciences.* 2025;15(11):5903.
56. Jianqiao -G, Yanbing -W, Qiang -T, *et al.* - Advances in flexible multibody dynamics of human musculoskeletal systems. - *Advances in Mechanics.* 2022;- 52(- 2):- 253.doi:- 10.6052/1000-0992-21-056
57. Xin H, Diao H. Computational biomechanical modelling of the spine, In: (ed.)^(eds.). p.
58. Lloyd DG, Besier TF. An EMG-driven musculoskeletal model to estimate muscle forces and knee joint moments in vivo. *J Biomech.* 2003;36(6):765–76.doi:10.1016/s0021-9290(03)00010-1
59. Akbaş M, Akbulut MB, Belli S. Sonlu Elemanlar Stres Analizi ve Endodontide Kullanımı. *European Journal of Research in Dentistry.* 2021;5(2):99–108.doi:10.29228/erd.15
60. Luis I, Afschrift M, Gutierrez-Farewik EM. Springs vs. motors: Ideal assistance in the lower limbs during walking at different speeds. *PLoS Comput Biol.* 2024;20(9):e1011837.doi:10.1371/journal.pcbi.1011837
61. He C, Fu H, Ma CZ. Biomechanics and Motion Analysis: From Human Performance to Clinical Practice. *Bioengineering (Basel).* 2025;12(10).doi:10.3390/bioengineering12101114

62. Moreira L, Figueiredo J, Fonseca P, *et al.* Lower limb kinematic, kinetic, and EMG data from young healthy humans during walking at controlled speeds. *Sci Data*. 2021;8(1):103. doi:10.1038/s41597-021-00881-3
63. Hensley CP, Millican D, Hamilton N, *et al.* Video-Based Motion Analysis Use: A National Survey of Orthopedic Physical Therapists. *Phys Ther*. 2020;100(10):1759–70. doi:10.1093/ptj/pzaa125
64. Halmich C, Höschler L, Schranz C, *et al.* Data augmentation of time-series data in human movement biomechanics: A scoping review. *PLoS One*. 2025;20(7):e0327038. doi:10.1371/journal.pone.0327038
65. Wei W, Tan F, Zhang H, *et al.* Surface electromyogram, kinematic, and kinetic dataset of lower limb walking for movement intent recognition. *Sci Data*. 2023;10(1):358. doi:10.1038/s41597-023-02263-3
66. Crenna F, Rossi GB, Berardengo M. Filtering Biomechanical Signals in Movement Analysis. *Sensors (Basel)*. 2021;21(13). doi:10.3390/s21134580
67. Williams JM, Frey M, Breen A, *et al.* Systematic analysis of different low-pass filter cut-off frequencies on lumbar spine kinematics data and the impact on the agreement between accelerometers and an optoelectronic system. *J Biomech*. 2022;145:111395. doi:10.1016/j.jbiomech.2022.111395
68. Baker R, McGinley JL, Schwartz MH, *et al.* The gait profile score and movement analysis profile. *Gait Posture*. 2009;30(3):265–9. doi:10.1016/j.gaitpost.2009.05.020
69. Hermens HJ, Freriks B, Disselhorst-Klug C, *et al.* Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *J Electromyogr Kinesiol*. 2000;10(5):361–74. doi:10.1016/s1050-6411(00)00027-4
70. Wonsetler EC, Bowden MG. A systematic review of mechanisms of gait speed change post-stroke. Part 2: exercise capacity, muscle activation, kinetics, and kinematics. *Top Stroke Rehabil*. 2017;24(5):394–403. doi:10.1080/10749357.2017.1282413
71. Allison K, Wrigley TV, Vicenzino B, *et al.* Kinematics and kinetics during walking in individuals with gluteal tendinopathy. *Clin Biomech (Bristol)*. 2016;32:56–63. doi:10.1016/j.clinbiomech.2016.01.003
72. McManus L, De Vito G, Lowery MM. Analysis and Biophysics of Surface EMG for Physiotherapists and Kinesiologists: Toward a Common Language With Rehabilitation Engineers. *Front Neurol*. 2020;11:576729. doi:10.3389/fneur.2020.576729
73. Jover-Jorge N, González-Rojo P, Amaya-Valero JV, *et al.* Comparative analysis of spatiotemporal gait parameters in patients with distal femoral megaprosthesis and healthy subjects using an inertial measurement unit (IMU). *Wearable Technol*. 2025;6:e25. doi:10.1017/wtc.2025.10009
74. Esmaeilpour F, Letafatkar A, Karimi MT, *et al.* Comparative analysis of ground reaction forces and spatiotemporal gait parameters in older adults with sway-back posture and chronic low back pain: a cross-sectional study. *BMC Sports Sci Med Rehabil*. 2025;17(1):71. doi:10.1186/s13102-025-01126-1
75. Ayvat F, Doğan M, Ayvat E, *et al.* Reduced physical activity in multiple sclerosis: The role of gait parameters, gait variability parameters and self-reported measure of gait. *Mult Scler Relat Disord*. 2025;98:106452. doi:10.1016/j.msard.2025.106452
76. Skvortsov DV, Kaurkin SN, Grebenkina NV, *et al.* Typical Changes in Gait Biomechanics in Patients with Subacute Ischemic Stroke. *Diagnostics (Basel)*. 2025;15(5). doi:10.3390/diagnostics15050511
77. Gaudette LW, Bradach MM, de Souza Junior JR, *et al.* Clinical Application of Gait Retraining in the Injured Runner. *J Clin Med*. 2022;11(21). doi:10.3390/jcm11216497

Bölüm 8

BİYOMALZEMELER

Arif GÖK¹

8.1. Biyomalzemeye Giriş

Biyomalzeme kavramı, tıp ve mühendislik bilimlerinde, canlı dokularla doğrudan temas edecek şekilde tasarlanmış doğal veya sentetik kökenli maddeleri ifade etmektedir. Bu maddeler, literatürde “biyomalzeme” olarak adlandırılmakta olup, temel olarak biyolojik bir sistemle kontrollü bir arayüz oluşturma amacı taşırlar (1). Biyomalzeme araştırmaları, malzeme bilimi, kimya, biyoloji ve tıp gibi farklı disiplinlerin kesişim noktasında yer alan ve son elli yılı aşkın süredir dinamik bir gelişim gösteren oldukça geniş bir çalışma sahasını temsil eder (1). Bu disiplinler arasında, mühendislik prensiplerinden beslenmekte ve günümüzde hem teşhis hem de tedaviye yönelik sayısız uygulamada kilit rol oynamaktadır. Biyomalzemelerin ilk dönemlerdeki kullanımı ağırlıklı olarak medikal implantlar ve cihazlar ile sınırlıyken, zaman içinde uygulama yelpazesi oldukça genişlemiştir. Günümüzde bu malzemeler, yalnızca implant yapımında değil, aynı zamanda hücre kültürü çalışmalarında hücre iskeleti görevi görerek doku modellerinin oluşturulmasında, klinik laboratuvarlarda tanıya yönelik biyomolekül analizlerinde ve biyoteknolojik üretim süreçlerinde kullanılan aygıtların üretiminde de kendine yer bulmaktadır. Tüm bu farklı uygulamaların ortak noktası, biyolojik ortam ile sentetik veya modifiye edilmiş doğal bir malzeme arasında güvenilir ve öngörülebilir bir etkileşim zincirinin tesis edilmesi zorunluluğudur. Pratik tıbbi kullanımlarda biyomalzemeler genellikle tek başına kullanılmaz; daha ziyade, tıbbi bir cihazın veya implantın fonksiyonel bir bileşenini oluştururlar. Bu noktada, malzemenin vücut üzerindeki etkisi kadar, biyolojik çevrenin malzeme veya cihaz üzerinde yarattığı aşınma, yıpranma ve bozulma etkileri de büyük önem taşır. Bu karşılıklı etkileşim, zamanla cihaz performansında düşüşlere veya beklenmedik arızalara yol açabilmektedir. Bu nedenle, bir biyomalzemenin değerlendirilmesi, malzemenin

¹ Prof. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Endüstriyel Tasarım AD, arif.gok@dpu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-2840-9601

KAYNAKLAR

1. Birkan AS, Gök A, İnal S, Gök K, *Biyomekanik*. Seçkin Yayıncılık; ISBN 9789750272905, 378 sf, 2021.
2. Ratner BD, Hoffman AS, Schoen FJ, Lemons JE, *Biomaterials Science An Introduction to Materials in Medicine*. 2nd Edition, Elsevier; ISBN: 0-12-582463-7, 2004.
3. Burdick JA, Mauck RL, *Biomaterials for tissue engineering applications*, Springer; ISBN 978-3-7091-0385-2, 2011.
4. Hollinger JO, *An introduction to biomaterials*, 2nd ed., CRC Press; ISBN 9781439812563, 2011.
5. Yüksel M, Meran C, *Malzeme Bilgisi*, Ankara: MMO yayını; Yayın No: MMO/545/3, Sayfa 591, Ekim 2023.
6. Billmeyer FW, *Textbook of Polymer Science*. John Wiley and Sons Inc.; New York, 1984.
7. Aran A, *Malzeme Bilgisi Ders Notları*, İTÜ Makine Fakültesi, (21.04.2026 tarihinde <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/dersnotlari.htm> adresinden ulaşılmıştır.)
8. Wagner WR, Sakiyama-Elbert SE, Zhang G, Yaszemski MJ, *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*, Elsevier; ISBN: 978-0-12-816137-1, 2013.
9. Williams DF, On the mechanisms of biocompatibility, *Biomaterials*. 2008;29(20):2941-2953. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.04.023>
10. Vroman L, Adams AL, Identification of rapid changes at plasma-solid interfaces, *Journal of Biomedical Materials Research*. 1969;3(1):43-67. <https://doi.org/10.1002/jbm.820030106>
11. Anderson JM, Rodriguez A, Chang DT, Foreign body reaction to biomaterials, *Seminars in Immunology*. 2008;20(2):86-100. <https://doi.org/10.1016/j.smim.2007.11.004>
12. Discher DE, Janmey P, Wang YL, Tissue cells feel and respond to the stiffness of their substrate, *Science*. 2005;310(5751):1139-1143. DOI: 10.1126/science.1116995
13. Huiskes R, Weinans H, Rietbergen BV, The relationship between stress shielding and bone resorption around total hip stems and the effects of flexible materials, *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 1992;274:124-134.
14. Fung YC, *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*, Springer; 1993.
15. Buser D, Schenk RK, Steinemann S, Fiorellini JP, Fox CH, Stich, H., Influence of surface characteristics on bone integration of titanium implants, *Journal of Biomedical Materials Research*. 1991;25(7):889-902. <https://doi.org/10.1002/jbm.820250708>
16. Anderson JM, Biological responses to materials, *Annual Review of Materials Research*. 2001;31:81-110. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.31.1.81>
17. Engler AJ, Sen S, Sweeney HL, Discher DE, Matrix elasticity directs stem cell lineage specification, *Cell*. 2006;126(4):677-689.
18. Özkaya N, Leger D, Goldsheyder D, Nordin M. Mechanical Properties of Biological Tissues. In: Özkaya N, Leger D, Goldsheyder D, Nordin M, (eds.). *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation*. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 361-87.
19. Mow VC, Gu WY, Chen FH. Structure and Function of Articular Cartilage and Meniscus. In: Mow VC, Huiskes R, (eds.). *Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-Biology*. 3 ed. Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
20. Nigg BM, Herzog W. *Biomechanics of the Musculo-skeletal System*. 3 ed. Wiley; 2007.
21. Williams DF, Definitions in Biomaterials. In: Progress in Biomedical Engineering, Elsevier. 1987;4:72.
22. Hallab NJ, Jacobs JJ, Biologic effects of implant debris. *Bulletin of the NYU Hospital for Joint Diseases*. 2009;67(2):182-188.
23. Eliaz N, Corrosion of Metallic Biomaterials: A Review, *Materials*. 2019;12(3):407. <https://doi.org/10.3390/ma12030407>.
24. Anderson JM, Shive MS, Biodegradation and biocompatibility of PLA and PLGA microspheres, *Advanced Drug Delivery Reviews*. 1997;28(1):5-24. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(97\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(97)00048-3).

25. Hench LL, Wilson J, *An Introduction to Bioceramics*. World Scientific, 1993.
26. ISO 10993-1. *Biological evaluation of medical devices – Part 1: Evaluation and testing within a risk management process*, International Organization for Standardization, 2018.
27. Park JB, Lakes RS, *Biomaterials: An Introduction*. Springer:2007.
28. Williams DF, *Essential Biomaterials Science*. Cambridge University Press:2008.
29. Hench LL, Jones JR, *Biomaterials, Artificial Organs and Tissue Engineering*. Woodhead Publishing: 2015.
30. Navarro M, Michiardi A, Castaño O, Planell JA, Biomaterials in orthopaedics. *Journal of the Royal Society Interface*. 2008;5(27):1137–1158. <https://doi.org/10.1098/rsif.2008.0151>.
31. VistaCreate, (21.04.2026 tarihinde <https://create.vista.com/tr/photos/stent/> adresinden ulaşılmıştır.).
32. Ingber DE, Cellular mechanotransduction: putting all the pieces together again. *FASEB Journal*. 2006;20(7):811–827. <https://doi.org/10.1096/fj.05-5424rev>.
33. Hollister SJ, Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*. 2005;4:518–524.

Bölüm 9

İMLANT/PROTEZ/ORTEZ TASARIMI

Kadir GÖK¹

9.1. İmplant/Protez/Ortez Nedir? Çeşitleri ve Arasındaki Farklar

Günlük hayatta herhangi bir kaza ya da travma sonucu kas iskelet sisteminde birtakım yaralanmalar, doku hasarları ve kemik kırıkları meydana gelebilmektedir. Bu kırıkların tedavileri konservatif ya da cerrahi yöntemler ile yapılmaktadır. Bu süreçte hekimler, sağlık teknisyenleri ve biyomedikal mühendis ve teknikerler aktif olarak rol almaktadırlar.

Kas iskelet sisteminde oluşan bu kırıklar, vücuda uyumlu biyomalzemeler kullanılarak sabitlenirler ve bu biyomalzemeler kırık iyileşme sürecine katkı sağlamaktadır. Bu kitapta biyomalzemeler; implantlar, protezler ve ortezler olmak üzere üç ana başlıkta ele alınacak ve bu kapsamda konunun önemi ayrıntılı olarak vurgulanacaktır (Şekil 9.1).

Öncelikle tanımı gereği, biyomalzeme kavramı, tıp alanında biyolojik sistemler ile temas halinde kullanılan doğal ya da yapay malzemelerin özelliklerini ve uygulamalarını ifade etmektedir. Sağlık hizmetlerinde tanı, tedavi ve doku işlevlerinin desteklenmesi amacıyla kullanılan bu malzemeler genel olarak biyomalzeme olarak adlandırılmaktadır.

50 yılı aşkın süredir, tıp, kimya, biyoloji ve malzeme bilimini kapsayan bir alan olarak biyomalzemeler gelişmektedir. Mühendislik kavramlarına dayandıkları için hem tedavi hem de tanı amaçlı kullanımları vardır. Biyomalzemeler başlangıçta sadece tıbbi uygulamalarda kullanılmaktaydı, ancak şimdi hücre kültürü cihazlarında, klinik laboratuvarlarda kan proteinlerinin analizinde ve biyoteknolojik uygulamalar için biyomoleküllerin işlenmesinde de kullanılmaktadır. Biyolojik sistemlerin sentetik veya değiştirilmiş doğal malzemelerle etkileşimi yoluyla, çeşitli endüstrilerde kullanılan bu malzemeler için ortak bir zemin oluşturulmuştur. Biyomalzemeler, bağımsız malzemeler

¹ Prof. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği AD, kadir.gok@bakircay.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-5736-1884

Bununla beraber, HAD analizleri ile kanın hareket şekli, sıvı ile katı arasındaki etkileşimler ve biyolojik çevre koşulları taklit edilerek, implantın vücut içindeki doğal ortama ne kadar uyum sağladığı ve işlevselliği araştırılmaktadır. Ayrıca ameliyatlara yönelik olarak kemikte delik açma, vida takma ve sabitleme işlemleri de simüle edilebilmekte ve bu sayede ameliyat öncesinde en etkili cerrahi planlar saptanabilmektedir.

Bu gelişmiş mühendislik metotları, implantın şeklinin en iyi hale getirilmesine, doğru biyolojik malzeme seçimine ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesine imkân vermektedir. Nihayetinde, kişiselleştirilmiş protezlerin işlevsellik düzeyi yükseltilmekte, kullanım süreleri uzatılmakta ve hastaya özel klinik sonuçlar kayda değer oranda iyileştirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ratner BD, Hoffman AS, Schoen FJ, Lemons JE. *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*: Academic Press; 2004.
2. Karip ZC, Gok K. Mechanical and numerical performance analysis of polyetheretherketone abutments according to manufacturing methods: Comparison of machining and three-dimensional printing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2026;0(0):09544089261442994.
3. Ottobock. Myo Plus TR 2026 (21.04.2026 tarihinde <https://www.ottobock.com/en-ca/product/13E520-61077> adresinden ulaşılmıştır.)
4. Ottobock. Bacak ve diz ortezleri 2026 (21.04.2026 tarihinde <https://www.ottobock.com/tr-tr/product/50K13-60871> adresinden ulaşılmıştır.)
5. Corporation NMU. (21.04.2026 tarihinde <https://www.orthopaedic-implants.com/small-fragment-system/standard-implants/screw.php> adresinden ulaşılmıştır.)
6. Innovation JoOE. (21.04.2026 tarihinde <https://journaloei.scholasticahq.com/article/143525-cementless-femoral-stems-in-primary-total-hip-arthroplasty> adresinden ulaşılmıştır.)
7. Gok K. *Artificial Intelligence Supported Design of Biomedical Materials and Devices*. The Impact of Artificial Intelligence on Healthcare Industry: CRC Press. p. 160-85.
8. Raizada K, Rani D. Ocular prosthesis. *Contact Lens and Anterior Eye*. 2007;30(3):152-62.
9. The University of Utah DoME. Utah Bionic Leg in Science Robotics (21.04.2026 tarihinde <https://www.mech.utah.edu/utah-bionic-leg-in-science-robotics/> adresinden ulaşılmıştır.)
10. Applications MDPTBH. (21.04.2026 tarihinde <https://all3dp.com/2/3d-printing-in-medicine-the-best-applications/> adresinden ulaşılmıştır.)
11. Total knee replacement (TEP) 2026 (21.04.2026 tarihinde <https://www.zagrebmed.com/en/services/orthopaedics/knee/knee-replacement> adresinden ulaşılmıştır.)
12. Washington Uo. Multiphase & Cardiovascular Flow Lab (21.04.2026 tarihinde <http://depts.washington.edu/fluidlab/circulation.shtml> adresinden ulaşılmıştır.)
13. Kuyubaşı SN, Urtekin L, Gok A, Inal S, Gok K. Influence of Wolff's law on the biomechanical and corrosion behavior of screws in femoral neck fixation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2025;0(0):09544089251390137.
14. Gok K. Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations. *Measurement*. 2015;75:57-68.

15. Gok K, Gok A, Kisioglu Y. Computer Aided Finite Element Simulation of the Developed Driller System for Bone Drilling Process in Orthopedic Surgery. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2019;18(04):583-94.
16. Erdem M, Gok K, Gokce B, Gok A. Numerical Analysis Of Temperature, Screwing Moment And Thrust Force Using Finite Element Method In Bone Screwing Process. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 2017;17(01):1750016.
17. Deniz Ada H, Erdem M, Gok K. Computational Fluid Dynamics Simulation Of Erosion-Corrosion In Abrasive Water Jet Machining. *Surface Review and Letters*. 2021;28(05):2150031.
18. Gok K, Gok A. Investigating the corrosion relationship and biomechanical effectiveness of Ti6Al4V screws Coated hBN and HA in triangular configuration for femoral neck fracture fixation using 3D modeling and numerical analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 0(0):09544089241311391.
19. Kılıçaslan N, Gök K, Çaşka S, Selçuk AB. Optimizing artificial neural network parameters using Taguchi method: An application of artificial heart pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 0(0):09544089251336834.
20. Kurt C, Gok A, Inal S, Urtekin L, Gok K. Using as Screw of PEEK in Femur Neck Fractures as an Alternative Biomaterial. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2025;78(9):231.
21. Gok A, Inal S, Taspınar F, Gulbandilar E, Gok K. Fatigue behaviors of different materials for schanz screws in femoral fracture model using finite element analysis. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*. 2014;8(May-June 2014):576-80.
22. Gok K. Investigation of the use of silicone pads to reduce the effects on the human face of classical face masks used to prevent from COVID-19 and other infections. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021;235(5):1742-7.

Bölüm 10

İNSAN HAREKETİ DİNAMİĞİ (KİNEMATİK/KİNETİK)

Nazlıhan KILIÇASLAN¹

Yasin ERDOĞAN²

10.1 İnsan Hareketinin Dinamik Davranışı

Biyomekanik, canlı organizmaların davranışlarını mekanik bilimi prensipleriyle inceleyen multidisipliner bir alandır (1). Mekanik bilimi, statik ve dinamik olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Statik, hareketsiz duran sistemleri veya sabit hızla giden ivmelenmeyen sistemleri incelerken, dinamik ise ivmenin var olduğu, hızlanan veya yavaşlayan sistemleri inceler. Dinamik sistemlerin incelenmesi de kinetik ve kinematik olarak iki sınıfa ayrılır (2, 3). Bu bölümde insan hareketi, kinetik ve kinematik prensipleri çerçevesinde değerlendirilecektir.

İnsan vücudundaki kas-iskelet sistemi bileşenleri birbirleriyle çalışan ve birbirlerini etkileyen mekanik sistemlerdir ve bu sistemler incelenirken dinamik bir sistem davranışı olarak değerlendirilmelidir (1, 4). İnsan vücudu hareketi, iç (kas-iskelet sistemi kaynaklı) ve dış (çevresel) kuvvetlerin birbirleriyle iç içe geçmiş dengesi sonucu meydana gelir. İç kuvvetler, vücudun ürettiği kas kasılmaları, doku hareketleridir. Dış kuvvetlere ise yer çekimi, sürtünmeler örnek olarak verilebilir (5). Bu dinamik sistem birçok bileşen ve serbestlik derecesi içermektedir ve bileşenler arasında kuvvetler ve momentler sürekli olarak değişmekte ve bu değişimler hareketin hızı ve yönü üzerinde belirleyici olmaktadır (6, 7). Kaslar, çekme üreterek iç kuvvetler sağlarlar da, dış kuvvetlerin etkisi olmadan sistemin kütle merkezi üzerinde herhangi bir hareket oluşturamazlar. Örneğin bir sporcu havadan gelen topu bloklamak için erkenden zıplarsa topu havada bekleyemez, yerçekimine karşı koyamaz ve yerçekimini dengelemek için ayaklarının yeniden yere basması gerekir. Daha sonra yeniden zıplamak istediğinde yere karşı dış bir itme kuvveti oluşturması gerekir (Şekil 10.1) (7).

¹ Arş. Gör., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği AD, nazlihan.yildirim@bakircay.edu.tr, ORCID iD: 0000-0001-8921-1207

² Arş. Gör., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği AD, yasin.erdogan@bakircay.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-3580-3965

KAYNAKLAR

1. Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 4 ed: John Wiley & Sons, Inc.; 2009.
2. Hall SJ. *Basic Biomechanics*. 6 ed: Mc Graw Hill; 2011.
3. Selçuk AB, Gök A, İnal S, Gök K. *Biyomekanik*. Ankara: Seçkin; 2021.
4. Nigg BM, Herzog W. *Biomechanics of the Musculo-skeletal System*. 3 ed: Wiley; 2007.
5. Andriacchi TP, Johnson TS, Hurwitz DE, Natarajan RN. *Musculoskeletal Dynamics, Locomotion, and Clinical Applications. Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-Biology*. 3 ed: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
6. Robertson DGE, Caldwell GE, Hamill J, Kamen G, Whittlesey SN. *Research Methods in Biomechanics: Human Kinetics*; 2004.
7. McGinnis PM. *Biomechanics of Sport and Exercise*. 3 ed: Human Kinetics; 2013.
8. Dao TT, Tho M-CHB. *Biomechanics of the Musculoskeletal System: Modeling of Data Uncertainty and Knowledge*: Wiley; 2014.
9. Prendergast PJ, Helm FCTVD, Duda GN. *Analysis of Muscle and Joint Loads*. In: Mow VC, Huiskes R, editors. *Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-Biology*. 3 ed: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
10. Özkaya N, Leger D, Goldsheyder D, Nordin M. *Mechanical Properties of Biological Tissues*. In: Özkaya N, Leger D, Goldsheyder D, Nordin M, editors. *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation*. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 361-87.
11. Holzapfel GA. SECTION 10.11 - *Biomechanics of Soft Tissue*. In: Lemaitre J, editor. *Handbook of Materials Behavior Models*. Burlington: Academic Press; 2001. p. 1057-71.
12. Huiskes R, Rietbergen BV. *Biomechanics of Bone*. In: Mow VC, Huiskes R, editors. *Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-Biology*. 3 ed: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
13. Gök K, Gök A. *Ansys Workbench*. 1 ed: Abaküs; 2018.
14. Gok K, Inal S, Gok A, Gulbandilar E. Comparison of effects of different screw materials in the triangle fixation of femoral neck fractures. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2017;28(5):81.
15. Mow VC, Gu WY, Chen FH. *Structure and Function of Articular Cartilage and Meniscus*. In: Mow VC, Huiskes R, editors. *Basic Orthopaedic Biomechanics and Mechano-Biology*. 3 ed: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
16. Dialysis Access Grafts Multiphase&Cardiovascular Flow Lab (25.04.2026 tarihinde <https://depts.washington.edu/fluidlab/circulation.shtml> adresinden ulaşılmıştır.)
17. Serway RA, Jewett JW. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. 10 ed: Cengage Learning; 2048.
18. Halliday D, Resnick R, Walker J. *Fundamentals of Physics*. 10 ed: John Wiley & Sons; 2014.
19. Meriam JL, Kraige LG, Bolton JN. *Engineering Mechanics: Dynamics*. 9ed: John Wiley & Sons; 2020.
20. Hibbeler RC. *Engineering Mechanics: Dynamics*. 14 ed: Pearson; 2016.
21. Taylor JR. *Classical Mechanics: University Science Books*; 2005.
22. Knudson D. *Fundamentals of Biomechanics*. 2ed: Springer; 2007.
23. Bartlett R. *Introduction to Sports Biomechanics*. 2 ed: Routledge 2007.
24. Hamill J, Knutzen KM, Derrick TR. *Biomechanical Basis of Human Movement*. 5 ed: Wolters Kluwer; 2021.
25. Zatsiorsky VM. *Kinematics of Human Motion: Human Kinetics*; 1998.
26. Nordin M, Frankel VH. *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*. 5 ed: Wolters Kluwer; 2021.
27. Özkaya N, Leger D, Goldsheyder D, Nordin M. *Fundamentals of Biomechanics*. New York: Springer; 2012.

Bölüm 11

BIYOMEKANİK UYGULAMALARDA YAPAY ZEKA KULLANIMI

Gülfem Ezgi ÖZALTIN¹

11.1. Giriş

Teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte sağlık bilimlerinde veri temelli yaklaşımların önemi giderek artmıştır. Özellikle son yıllarda yapay zekâ (YZ) teknolojilerindeki ilerlemeler; büyük veri setlerinin analiz edilmesi, karmaşık örüntülerin tanımlanması ve karar verme süreçlerinin desteklenmesi açısından birçok bilim alanında önemli dönüşümler oluşturmuştur (1, 2). Makine öğrenmesi, derin öğrenme, bilgisayarlı görü ve doğal dil işleme gibi yapay zekâ alt alanları; görüntü analizi, sinyal işleme, tahmin modellemeleri ve otomatik karar destek sistemleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (3, 4). Bu gelişmeler, yüksek miktarda ve çok boyutlu veri içeren biyomekanik alanında da yapay zekâ kullanımını ön plana çıkarmıştır.

Biyomekanik; insan hareketini mekanik prensipler doğrultusunda inceleyen, hareketin oluşumunu ve hareket sırasında ortaya çıkan kuvvetleri değerlendiren multidisipliner bir bilim dalıdır (5, 6). İnsan hareketinin objektif olarak analiz edilmesi; rehabilitasyon süreçlerinin planlanması, spor performansının değerlendirilmesi, yaralanmaların önlenmesi ve klinik karar verme açısından büyük önem taşımaktadır (7). Geleneksel biyomekanik analiz yöntemleri yüksek doğruluk sağlamasına rağmen çoğu zaman laboratuvar ortamına bağımlı, maliyetli ve uzmanlık gerektiren sistemlere dayanmaktadır (8). Bu durum, biyomekanik değerlendirmelerin günlük yaşam ortamlarında uygulanabilirliğini sınırlandırabilmektedir.

Yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar, biyomekanik analizlerin daha erişilebilir, hızlı ve otomatik hale gelmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle giyilebilir sensörler, akıllı telefon tabanlı sistemler ve marker'sız görüntü analizi yöntemleri sayesinde

¹ Dr.Öğr.Üyesi, İnönü Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, gulfemezgi.ozaltin@inonu.edu.tr, ORCID iD: 0000-0003-1591-4844

şekilde artırılmış gerçeklik tabanlı sistemlerin klinisyen ve antrenörlere gerçek zamanlı eklem açıları, postür değişiklikleri ve hareket kalitesi hakkında anlık geri bildirim sağlayarak karar verme süreçlerini desteklemesi beklenmektedir (89). Ayrıca derin pekiştirmeli öğrenme yöntemleri, nöromekanik simülasyonların geliştirilmesi ve daha karmaşık hareket stratejilerinin modellenmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bunun yanında üretici yapay zekâ yaklaşımlarıyla oluşturulan sentetik verilerin, biyomekanik araştırmalarda sık karşılaşılan veri yetersizliği problemini azaltarak yapay zekâ modellerinin eğitimini güçlendireceği öngörülmektedir (67).

Gelecekte biyomekanik uygulamalarında en önemli dönüşümün, veri temelli yapay zekâ modelleri ile fizik temelli biyomekanik modellerin birlikte kullanılmasıyla gerçekleşeceği düşünülmektedir. Bu yaklaşım sayesinde kas kuvvetleri, eklem momentleri ve hareket dinamiklerinin daha doğru tahmin edilmesi; klinik tanı, prognoz değerlendirmesi ve kişiselleştirilmiş rehabilitasyon uygulamalarının geliştirilmesi mümkün olabilecektir (90). Ancak bu hedeflere ulaşılabilmesi için açık veri paylaşımının teşvik edilmesi, ortak benchmark veri kümelerinin oluşturulması, standart değerlendirme protokollerinin geliştirilmesi ve disiplinler arası iş birliklerinin artırılması gerekmektedir (67, 76, 89). Bunun yanı sıra etik yönetim, veri sahipliği ve düzenleyici çerçevelerin güçlendirilmesi de yapay zekâ uygulamalarının güvenilir ve yaygın biçimde kullanılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (82).

Sonuç olarak, biyomekanik uygulamalarında yapay zekânın geleceği; daha erişilebilir, gerçek zamanlı ve kişiselleştirilmiş değerlendirme sistemlerinin geliştirilmesine doğru ilerlemektedir. Bununla birlikte, mevcut eğilimler yapay zekânın biyomekanik uzmanlarının, klinisyenlerin veya antrenörlerin yerini alacağından ziyade, onların karar verme süreçlerini daha hızlı, objektif ve kapsamlı verilerle destekleyen güçlü bir yardımcı teknoloji olarak konumlanacağını göstermektedir (91).

KAYNAKÇA

1. Abbass H. What is artificial intelligence? *IEEE Transactions on Artificial Intelligence* 2021, 2(2):94-5.
2. Kaul V, Enslin S, Gross SA. History of artificial intelligence in medicine. *Gastrointest Endosc* 2020, 92(4):807-12.
3. Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. Machine learning and deep learning: C. Janiesch et al. *Electronic markets* 2021, 31(3):685-95.
4. Taye MM. Understanding of machine learning with deep learning: architectures, workflow, applications and future directions. *Computers* 2023, 12(5):91.
5. Korkusuz F. *Musculoskeletal research and basic science*. Springer; 2016.

6. Lu T-W, Chang C-F. Biomechanics of human movement and its clinical applications. *The Kaohsiung journal of medical sciences* 2012, 28(2):S13-S25.
7. Giustino V, Patti A. Biomechanics and Sports Performances. 2025, 13(3):73.
8. Bonato P, Feipel V, Corniani G, Arin-Bal G, Leardini A. Position paper on how technology for human motion analysis and relevant clinical applications have evolved over the past decades: Striking a balance between accuracy and convenience. *Gait & Posture* 2024, 113:191-203.
9. Filippeschi A, Schmitz N, Miezal M, Bleser G, Ruffaldi E, Stricker D. Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion. *Sensors* 2017, 17(6):1257.
10. Song Y, Biro I. The Evolution of Marker-based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computational Methods: Application to Human Gait Biomechanics. Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Bioinformatics and Intelligent Computing; Harbin, China: Association for Computing Machinery; 2022. p. 201-5.
11. Garcia-de-Villa S, Casillas-Pérez D, Jiménez-Martín A, García-Domínguez JJ. Inertial sensors for human motion analysis: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2023, 72:1-39.
12. Roggio F, Trovato B, Sortino M, Musumeci G. A comprehensive analysis of the machine learning pose estimation models used in human movement and posture analyses: A narrative review. *Heliyon* 2024, 10(21).
13. Lauriola I, Lavelli A, Aioli F. An introduction to Deep Learning in Natural Language Processing: Models, techniques, and tools. *Neurocomputing* 2022, 470:443-56.
14. Moghadam SM, Yeung T, Choinsne J. A comparison of machine learning models' accuracy in predicting lower-limb joints' kinematics, kinetics, and muscle forces from wearable sensors. *Scientific reports* 2023, 13(1):5046.
15. Phellan R, Hachem B, Clin J, Mac-Thiong JM, Duong L. Real-time biomechanics using the finite element method and machine learning: Review and perspective. *Med Phys* 2021, 48(1):7-18.
16. Saxby DJ, Killen BA, Pizzolato C, Carty CP, Diamond LE, Modenese L, Fernandez J, Davico G, Barzan M, Lenton G. Machine learning methods to support personalized neuromusculoskeletal modelling. *Biomech Model Mechanobiol* 2020.
17. Mennella C, Maniscalco U, Pietro GD, Esposito M. The Role of Artificial Intelligence in Future Rehabilitation Services: A Systematic Literature Review. *IEEE Access* 2023, 11:11024-43.
18. Khera P, Kumar N. Role of machine learning in gait analysis: a review. *J Med Eng Technol* 2020, 44(8):441-67.
19. Hulleck AA, Menoth Mohan D, Abdallah N, El Rich M, Khalaf K. Present and future of gait assessment in clinical practice: Towards the application of novel trends and technologies. *Frontiers in medical technology* 2022, 4:901331.
20. Attah-Mensah E, Boujut A, Desmons M, Perrochon A. Artificial intelligence in personalized rehabilitation: current applications and a SWOT analysis. *Frontiers in Digital Health* 2025, 7:1606088.
21. Kim D, Yu MNSC, Arel EJM, Lim MJU, Velasquez AT, Lavadia WT, Vicerra RRP, editors. Understanding of the Biomechanics of Tendons and Ligaments and its Application in Designing Prosthetics2022: IEEE.
22. Bandejas C. Technology in Sports Biomechanics. *IEEE Potentials* 2019, 38(3):8-10.
23. Abdelmohsen AM. Artificial Intelligence in Biomechanics: A Narrative Review of Current Applications in Diagnostic and Physical Rehabilitation. *Physiother Res Int* 2025, 30(4):e70120.
24. Mouloudi S, Rahmanpanah H, Gohery S, Burvill C, Tse KM, Davies HMS. What can artificial intelligence and machine learning tell us? A review of applications to equine biomechanical research. *J Mech Behav Biomed Mater* 2021, 123:104728.
25. Molavian R, Fatahi A, Abbasi H, Khezri D. Artificial Intelligence Approach in Biomechanics of Gait and Sport: A Systematic Literature Review %J Journal of Biomedical Physics and Engineering. 2023, 13(5):383-402.

26. Souaifi M, Dhahbi W, Jebabli N, Ceylan H, Boujabli M, Muntean RI. Artificial Intelligence in Sports Biomechanics: A Scoping Review on Wearable Technology, Motion Analysis, and Injury Prevention. *Bioengineering*, 2025; 12 (8): 887.
27. Dhumale A, Shinde S, Ambali MP, Patil P. Integration of artificial intelligence for diagnostic methods in musculoskeletal conditions: a systematic review. *Cureus* 2025, 17(2).
28. Misir A, Yuce A. AI in orthopedic research: a comprehensive review. *Journal of Orthopaedic Research* 2025, 43(8):1508-27.
29. Wang L, Zhu Z. Applications and challenges of artificial intelligence-driven 3D vision in bio-medical engineering: A biomechanics perspective. *Mol Cell Biomech* 2025, 22(2):1006.
30. Zhang M, Yao N, He Y, Cao K, Chen Q. Real-time processing and intelligent analysis of biomechanical data based on 5G and artificial intelligence. *Mol Cell Biomech* 2025, 22(5).
31. Zhong H. Investigating AI technology use in English studies for the explanation and analysis of biomechanical studies' results. *Mol Cell Biomech* 2025, 22(4).
32. Chumakov E. History and definitions of AI. *Eur Psychiatry* 2025, 68(S1):S61-S.
33. Gil de Zúñiga H, Goyanes M, Durotoye T. A scholarly definition of artificial intelligence (AI): Advancing AI as a conceptual framework in communication research. *Political communication* 2024, 41(2):317-34.
34. Grzybowski A, Pawlikowska-Łagód K, Lambert WC. A History of Artificial Intelligence. *Clin Dermatol* 2024, 42(3):221-9.
35. Yashchenko V. From McCulloch to GPT-4: Stages of development of artificial intelligence. *Artif Intell* 2024, 1:31-44.
36. Muthukrishnan N, Maleki F, Ovens K, Reinhold C, Forghani B, Forghani R. Brief History of Artificial Intelligence. *Neuroimaging Clin N Am* 2020, 30(4):393-9.
37. Wu J, You H, Du J. AI generations: from AI 1.0 to AI 4.0. *Frontiers in Artificial Intelligence* 2025, 8:1585629.
38. Zha D, Bhat ZP, Lai K-H, Yang F, Jiang Z, Zhong S, Hu X. Data-centric artificial intelligence: A survey. *ACM Computing Surveys* 2025, 57(5):1-42.
39. Mumuni A, Mumuni F. Automated data processing and feature engineering for deep learning and big data applications: a survey. *Journal of Information and Intelligence* 2025, 3(2):113-53.
40. Nesterov V. Integration of artificial intelligence technologies in data engineering: Challenges and prospects in the modern information environment. *Вісник Черкаського державного технологічного університету Технічні науки* 2023, 28(4):82-90.
41. Liu H, Yin J, Luo X, Zhang S. Foreword to the special issue on recent advances on pattern recognition and artificial intelligence. *Neural Computing and Applications* 2018, 29(1):1-2.
42. Serey J, Alfaro M, Fuertes G, Vargas M, Duran C, Ternero R, Rivera R, Sabattin J. Pattern recognition and deep learning technologies, enablers of industry 4.0, and their role in engineering research. *Symmetry* 2023, 15(2):535.
43. Aldoseri A, Al-Khalifa KN, Hamouda AM. Re-thinking data strategy and integration for artificial intelligence: concepts, opportunities, and challenges. *Applied Sciences* 2023, 13(12):7082.
44. Shrestha A, Mahmood A. Review of Deep Learning Algorithms and Architectures. *IEEE Access* 2019, 7:53040-65.
45. Alom MZ, Taha TM, Yakopcic C, Westberg S, Sidike P, Nasrin MS, Hasan M, Van Essen BC, Awwal AAS, Asari VK. A State-of-the-Art Survey on Deep Learning Theory and Architectures. *Electronics* 2019, 8(3):292.
46. Zhao X, Wang L, Zhang Y, Han X, Deveci M, Parmar M. A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review* 2024, 57(4).
47. Alzubaidi L, Zhang J, Humaidi AJ, Al-Dujaili A, Duan Y, Al-Shamma O, Santamaría J, Fadhel MA, Al-Amidie M, Farhan L. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of big Data* 2021, 8(1):53.
48. Khan A, Sohail A, Zahoor U, Qureshi AS. A survey of the recent architectures of deep convolutional neural networks. *Artificial intelligence review* 2020, 53(8):5455-516.

49. Mienye ID, Swart TG. A Comprehensive Review of Deep Learning: Architectures, Recent Advances, and Applications. *Information* 2024, 15(12):755.
50. Manakitsa N, Maraslidis GS, Moysis L, Fragulis GF. A review of machine learning and deep learning for object detection, semantic segmentation, and human action recognition in machine and robotic vision. *Technologies* 2024, 12(2):15.
51. Tekir S, Bastanlar Y. Deep learning: Exemplar studies in natural language processing and computer vision. *Data Mining-Methods, Applications and Systems*, IntechOpen, 2020.
52. Kober J, Bagnell JA, Peters J. Reinforcement learning in robotics: A survey. *The International Journal of Robotics Research* 2013, 32(11):1238-74.
53. Vengerov D. A reinforcement learning approach to dynamic resource allocation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2007, 20(3):383-90.
54. Mousavi SS, Schukat M, Howley E, editors. Deep reinforcement learning: an overview2016: Springer.
55. Song Y, Bíró I, editors. The evolution of marker-based motion analysis and the integration of advanced computational methods: Application to human gait biomechanics2022.
56. Colyer SL, Evans M, Cosker DP, Salo AIT. A review of the evolution of vision-based motion analysis and the integration of advanced computer vision methods towards developing a markerless system. *Sports medicine-open* 2018, 4(1):24.
57. Niu Z, Lu K, Xue J, Qin X, Wang J, Shao L. From Methods to Applications: A Review of Deep 3D Human Motion Capture. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* 2024, 34(11):11340-59.
58. Hernandez V, Dadkhah D, Babakeshizadeh V, Kulić D. Lower body kinematics estimation from wearable sensors for walking and running: A deep learning approach. *Gait & posture* 2021, 83:185-93.
59. Sharifi Renani M, Eustace AM, Myers CA, Clary CW. The use of synthetic IMU signals in the training of deep learning models significantly improves the accuracy of joint kinematic predictions. *Sensors* 2021, 21(17):5876.
60. Nguyen KX, Zheng L, Hawke AL, Carey RE, Breloff SP, Li K, Peng X. Deep learning-based estimation of whole-body kinematics from multi-view images. *Computer Vision and Image Understanding* 2023, 235:103780.
61. Perrone M, Mell SP, Martin JT, Nho SJ, Simmons S, Malloy P. Synthetic data generation in motion analysis: A generative deep learning framework. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 2025, 239(2):202-11.
62. Giarmatzis G, Zacharaki EI, Moustakas K. Real-time prediction of joint forces by motion capture and machine learning. *Sensors* 2020, 20(23):6933.
63. Hossain MSB, Guo Z, Choi H. Estimation of lower extremity joint moments and 3d ground reaction forces using imu sensors in multiple walking conditions: A deep learning approach. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* 2023, 27(6):2829-40.
64. Iosa M, Picerno P, Paolucci S, Morone G. Wearable inertial sensors for human movement analysis. *Expert Rev Med Devices* 2016, 13(7):641-59.
65. Zhang J, Zhao Y, Shone F, Li Z, Frangi AF, Xie SQ, Zhang Z-Q. Physics-informed deep learning for musculoskeletal modeling: Predicting muscle forces and joint kinematics from surface EMG. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2022, 31:484-93.
66. Lee S, Park M, Lee K, Lee J. Scalable muscle-actuated human simulation and control. *ACM Transactions On Graphics (TOG)* 2019, 38(4):1-13.
67. Dindorf C, Dully J, Konradi J, Wolf C, Becker S, Simon S, Huthwelker J, Werthmann F, Kniepert J, Drees P. Enhancing biomechanical machine learning with limited data: generating realistic synthetic posture data using generative artificial intelligence. *Frontiers in bioengineering and biotechnology* 2024, 12:1350135.
68. Tang W, van Ooijen PMA, Sival DA, Maurits NM. Automatic two-dimensional & three-dimensional video analysis with deep learning for movement disorders: A systematic review. *Artif Intell Med* 2024, 156:102952.

69. Coser O, Tamantini C, Soda P, Zollo L. AI-based methodologies for exoskeleton-assisted rehabilitation of the lower limb: a review. *Frontiers in Robotics and AI* 2024, 11:1341580.
70. Olawade DB, Adeleye KK, Egbon E, Nwabuoku US, Clement David-Olawade A, Boussios S, Vanderbloemen LJAoTM. Enhancing home rehabilitation through AI-driven virtual assistants: a narrative review. 2025 2025, 13(5):61.
71. Ai Q, Liu Z, Meng W, Liu Q, Xie SQ. Machine Learning in Robot-Assisted Upper Limb Rehabilitation: A Focused Review. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* 2023, 15(4):2053-63.
72. Senadheera I, Hettiarachchi P, Haslam B, Nawaratne R, Sheehan J, Lockwood KJ, Alahakoon D, Carey LM. AI Applications in Adult Stroke Recovery and Rehabilitation: A Scoping Review Using AI. 2024, 24(20):6585.
73. Benyoucef Y, Melliti I, Harmouch J, Asadi B, Del Mastro A, Lapuente-Hernández D, Herrero P. Wearable Sensors and Artificial Intelligence for the Diagnosis of Parkinson's Disease. 2025, 14(12):4207.
74. Calderone A, Latella D, Bonanno M, Quartarone A, Mojdehdehbaher S, Celesti A, Calabrò RS. Towards Transforming Neurorehabilitation: The Impact of Artificial Intelligence on Diagnosis and Treatment of Neurological Disorders. 2024, 12(10):2415.
75. Ettetfagh A, Roshan Fekr A. Technological advances in lower-limb tele-rehabilitation: A review of literature. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering* 2024, 11:20556683241259256.
76. Halilaj E, Rajagopal A, Fiterau M, Hicks JL, Hastie TJ, Delp SL. Machine learning in human movement biomechanics: Best practices, common pitfalls, and new opportunities. *J Biomech* 2018, 81:1-11.
77. Dindorf C, Horst F, Slijepčević D, Dumphart B, Dully J, Zeppelzauer M, Horsak B, Fröhlich M. Machine learning in biomechanics: key applications and limitations in walking, running and sports movements. *Artificial intelligence, optimization, and data sciences in sports*, Springer, 2024: 91-148.
78. Deka J, Patar BB, Bhatia D. Artificial Intelligence in Human Gait and Sports Biomechanics: A Review of Methods and Applications and Future Directions. *International Journal of Engineering & Technology (IJET)* 2025;10.58885/ijet.v10i1.09.jd.
79. Mehta N, Henderson S, Mahajan G. AI Biomechanics Analysis Software. *Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science* 2026;10.66078/jmmbs.v3i1.010.
80. Arzani A, Wang J-X, Sacks M, Shadden S. Machine Learning for Cardiovascular Biomechanics Modeling: Challenges and Beyond. *Ann Biomed Eng* 2022, 50:615-27.
81. Ghezelbash F, Eskandari A, Robert-Lachaine X, Cao F, Pesteie M, Qiao Z, Shirazi-Adl A, Larivière C. Machine Learning Applications in Spine Biomechanics. *J Biomech* 2024;10.48550/arxiv.2401.06174:111967.
82. Souaifi M, Dhahbi W, Jebabli N, Ceylan H, Boujabli M, Muntean R, Dergaa I. Artificial Intelligence in Sports Biomechanics: A Scoping Review on Wearable Technology, Motion Analysis, and Injury Prevention. *Bioengineering* 2025, 12.
83. O'Dowling A, Rodriguez B, Gallagher T, Thorpe S. Machine learning and artificial intelligence: Enabling the clinical translation of atomic force microscopy-based biomarkers for cancer diagnosis. *Computational and Structural Biotechnology Journal* 2024, 24:661-71.
84. Mateus M, Alho I, Neves AL, Lopes H, Correia M. "First, do no harm" in the digital era: examining the practicality of the European Health Data Space proposal and ethical implications of artificial intelligence- A systematic literature review. *BMC Med Ethics* 2026, 27.
85. Kiwinda L, Kocher S, Bryniarski A, Pean C. Bioethical Considerations of Deploying Artificial Intelligence in Clinical Orthopedic Settings: A Narrative Review. *HSS Journal* 2025, 21:274-82.
86. Jaime F, Muñoz A, Rodríguez-Gómez F, Jerez-Calero A. Strengthening Privacy and Data Security in Biomedical Microelectromechanical Systems by IoT Communication Security and Protection in Smart Healthcare. *Sensors (Basel, Switzerland)* 2023, 23.

87. Harkey M, Costello K, Mehta B, Wen C, Malfait A, Madry H, Patterson B. Artificial intelligence in osteoarthritis research: summary of the 2025 OARSI pre-congress workshop. *Osteoarthritis and Cartilage Open* 2025, 7.
88. Cronin N. Using deep neural networks for kinematic analysis: Challenges and opportunities. *J Biomech* 2021, 123:110460.
89. Roggio F, Trovato B, Sortino M, Musumeci G. A comprehensive analysis of the machine learning pose estimation models used in human movement and posture analyses: A narrative review. *Heliyon* 2024, 10.
90. Xu E, Zhou J, Zhang Y, Luo Q, Song G, Lü S, Long M. Artificial intelligence application in multiscale biomechanics. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 2025;10.1016/j.taml.2025.100629.
91. Kurmis A, Ianunzio J. Artificial intelligence in orthopedic surgery: evolution, current state and future directions. *Arthroplasty* 2022, 4.

Bölüm 12

BİYOMEKANİK UYGULAMALARDA ETİK

Simay ÖZDEMİR¹

İrem YİĞİT²

Büşra CANDİRİ³

12.1. Giriş, Mesleki Sorumluluk ve Etik

Biyomekanik alanında uygulamalar, kas iskelet sistemin değerlendirilmesi, yaralanmaların önlenmesi ve farklı müdahalelerin etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla rehabilitasyon ve spor bilimleri alanlarında önemli yer tutmaktadır (1). Patolojilerin uzamsal-zamansal, kinematik, kinetik ve elektromiyografik olarak biyomekanik analizi, kas iskelet sistemi problemlerinin hareket ve motor kontrol açısından sapmalarını değerlendirmeye yardımcı olmaktadır (2). Biyomekanik; bilimsel araştırmaların yanında, klinik değerlendirmeler sırasında objektif hareket analizi, protezlerin tasarlanması veya rehabilitasyon alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır (3).

Biyomekanik alanı, fizyoterapistler, spor bilimciler ve biyomühendisler gibi sağlık ve teknik alanda farklı disiplinlerin bir arada bulunmasını gerektirmektedir (1). Sağlık alanındaki meslek grupları bireylerin sağlığının sürdürülmesi ve toplumdaki işleyişin devam ettirilmesi için önemli hizmetler sunmaktadır (4). Sağlık profesyonellerinin temel sorumlulukları ahlaki, etik, deontolojik ve yasal sorumluluklar başlıkları altında toplanabilir. Ahlaki sorumluluk, bireysel değerler ve vicdani algılar çerçevesinde ahlaki ilkelere göre yönlendirilmektedir. Etik sorumluluk, mesleğin doğası gereği topluluklar tarafından belirlenen ilkeleri ifade etmektedir. Deontolojik sorumluluk, mesleğin yönetmelikler gibi yazılı olarak ifade edilen kurallarına ve görevlerine uymayı temsil etmektedir. Yasal

¹ Fizyoterapist, İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Anabilimdalı, ozdemirsimay5@gmail.com, ORCID iD: 0009-0004-5602-034X

² Fizyoterapist, İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Anabilimdalı, irem44ahmet@gmail.com, ORCID iD: 0009-0002-9711-9042

³ Dr. Öğr. Üyesi, İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi, Fizyoterapi ve Rehabilitasyon AD, candiri_17@hotmail.com, ORCID iD: 0000-0001-7413-6371

süreçleri olumsuz etkilenmiştir. Algoritmanın, eğitim verilerinin çoğunlukla erkek futbolculardan oluşması nedeniyle farklı biyomekanik hareket sonuçlarını doğru yorumlayamadığı anlaşılmıştır.

Bu vaka, biyomekanik araştırmalarda yalnızca teknik doğruluğun yeterli olmadığını; kullanılan veri setlerinin temsiliyet, kapsayıcılık ve adalet ilkeleri açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Yapay zeka destekli sistemler, homojen olmayan veri setleri ile eğitildiğinde belirli gruplar için hatalı sonuçlar üretebilmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, yalnızca algoritmanın teknik performansından değil, aynı zamanda sistemin farklı popülasyonlar üzerindeki adil ve güvenilir çalışmasından da etik olarak sorumludur.

KAYNAKLAR

1. Tai W-H, Wu W, Yu H, et al. Interdisciplinary Innovations and Applications of Bionics and Bioengineering in Kinesiology. *Bioengineering*. 2024;11(10):1042.
2. Sacco ICN, Trombini-Souza F, Suda EY. Impact of biomechanics on therapeutic interventions and rehabilitation for major chronic musculoskeletal conditions: A 50-year perspective. *Journal of Biomechanics*. 2023;154:111604.
3. Fleischmann S, Kurz M, Richer R, et al. Investigating psychosocial stress arising from marker-based optical motion capture and subsequent effects on gait. *Scientific Reports*. 2025;15(1):43588.
4. Grace PJ, Peter E, Lachman VD, et al. Professional responsibility, nurses, and conscientious objection: A framework for ethical evaluation. *Nursing ethics*. 2024;31(2-3):243-55.
5. Gillon R. Defending the four principles approach as a good basis for good medical practice and therefore for good medical ethics. *J Med Ethics*. 2015;41(1):111-6.
6. Delany CM, Edwards I, Jensen GM, et al. Closing the Gap Between Ethics Knowledge and Practice Through Active Engagement: An Applied Model of Physical Therapy Ethics. *Physical Therapy*. 2010;90(7):1068-78.
7. Stolt M, Leino-Kilpi H, Ruokonen M, et al. Ethics interventions for healthcare professionals and students: A systematic review. *Nursing Ethics*. 2018;25(2):133-52.
8. Alzahrani A, Aljohany M, Alsirhani H. Real-time wearable biomechanics framework for sports injury prevention and rehabilitation optimization. *Scientific Reports*. 2026;16(1):4436.
9. Knudson D. Confidence crisis of results in biomechanics research. *Sports Biomechanics*. 2017;16(4):425-33.
10. Zhang B, Chen C, Lee I, et al. A survey on security and privacy issues in wearable health monitoring devices. *Computers & Security*. 2025;155:104453.
11. Laine C, Horton R, DeAngelis CD, et al. Clinical trial registration. *BMJ (Clinical research ed)*. 2007;334(7605):1177-8.
12. Kandi V, Vadakedath S. Ethical Considerations in Clinical Research: A Comprehensive Review. *American Journal of Public Health Research*. 2022;10:42-52.
13. King PH, Collins JC. Ethical and professional training of biomedical engineers. *International Journal of Engineering Education*. 2006;22(6):1173.
14. Beauchamp TL. *Principlism in bioethics. Bioethical decision making and argumentation*: Springer; 2016. p. 1-16.
15. Das NK, Sil A. Evolution of Ethics in Clinical Research and Ethics Committee. *Indian J Dermatol*. 2017;62(4):373-9.
16. Souaifi M, Dhahbi W, Jebabli N, et al. Artificial Intelligence in Sports Biomechanics: A Scoping Review on Wearable Technology, Motion Analysis, and Injury Prevention. *Bioengineering*. 2025;12(8):887.

17. Kelly AL, Williams CA, Cook R, et al. A multidisciplinary investigation into the talent development processes at an English football academy: A machine learning approach. *Sports*. 2022;10(10):159.
18. Varkey B. Principles of Clinical Ethics and Their Application to Practice. *Med Princ Pract*. 2021;30(1):17-28.
19. Cheraghi R, Valizadeh L, Zamanzadeh V, et al. Clarification of ethical principle of the beneficence in nursing care: an integrative review. *BMC Nurs*. 2023;22(1):89.
20. Della Croce Y. Epistemic Injustice and Nonmaleficence. *J Bioeth Inq*. 2023;20(3):447-56.
21. Emanuel EJ, Wendler D, Grady C. What makes clinical research ethical? *Jama*. 2000;283(20):2701-11.
22. Emanuel EJ. *The Oxford textbook of clinical research ethics*: Oxford University Press; 2008.
23. Khosravi MR. Sports Injuries: Biomechanical Data Analysis and Prevention. *Advanced Journal of Management, Humanity and Social Science*. 2025;1(9):559-78.
24. Mehta P, Zimba O, Gasparyan AY, et al. Ethics Committees: Structure, Roles, and Issues. *J Korean Med Sci*. 2023;38(25):e198.
25. Tsoka-Gwegweni JM, Wassenaar DR. Using the Emanuel et al. framework to assess ethical issues raised by a biomedical research ethics committee in South Africa. *J Empir Res Hum Res Ethics*. 2014;9(5):36-45.
26. Wen B, Zhang G, Zhan C, et al. The 2024 revision of the Declaration of Helsinki: a modern ethical framework for medical research. *Postgraduate Medical Journal*. 2025;101(1194):371-82.
27. Nashwan AJ, Joy GV. The 2024 Declaration of Helsinki revision: Relevance to nursing research. *Journal of Advanced Nursing*. 2026;82(4):3986-96.
28. Riis P. Thirty years of bioethics: the Helsinki Declaration 1964-2003. *New Review of Bioethics*. 2003;1(1):15-25.
29. Salas SP, Russo N. Analysis of the main ethical conflicts in the 2008 declaration of Helsinki and the proposed changes in the new version. *Revista Medica de Chile*. 2014;142(4):475-80.
30. Nathanson V. *Revising the declaration of Helsinki*. British Medical Journal Publishing Group; 2013.
31. Hellmann F, Verdi M, Junior BRS, et al. 50th anniversary of the Declaration of Helsinki: the double standard was introduced. *Archives of medical research*. 2014;45(7):600-1.
32. Payton CJ, Bartlett R. *Biomechanical evaluation of movement in sport and exercise*: Routledge Abingdon, Oxon, UK; 2007.
33. Harriss D, Jones C, MacSween A. Ethical standards in sport and exercise science research: 2022 update. *International journal of sports medicine*. 2022;43(13):1065-70.
34. Bloom L. Revisiting the Declaration of Helsinki—a patient-centered perspective. *JAMA*. 2025;333(1):22-3.
35. Vitti JN, Vitti R, Chu K, et al. The ethics of clinical research in the era of COVID-19. *Front Public Health*. 2024;12:1359654.
36. Biomedical USNCftPoHSO, Research B. *The Belmont report: ethical principles and guidelines for the protection of human subjects of research*: Department of Health, Education, and Welfare, National Commission for the ...; 1978.
37. Olugbade T, Bienkiewicz M, Barbareschi G, et al. Human movement datasets: An interdisciplinary scoping review. *ACM Computing Surveys*. 2022;55(6):1-29.
38. Zhang T. Protection of athletes' rights and interests: Application of biomechanics in sports law and legal issues. *Molecular & Cellular Biomechanics*. 2025;22:1698.
39. Viberg Johansson J, Bentzen HB, Mascalcioni D. What ethical approaches are used by scientists when sharing health data? An interview study. *BMC Med Ethics*. 2022;23(1):41.
40. Harriss DJ, Jones C, MacSween A. Ethical Standards in Sport and Exercise Science Research: 2022 Update. *Int J Sports Med*. 2022;43(13):1065-70.
41. Gefenas E, Lekstutiene J, Lukaseviciene V, et al. Controversies between regulations of research ethics and protection of personal data: informed consent at a cross-road. *Med Health Care Philos*. 2022;25(1):23-30.

42. Facca D, Smith MJ, Shelley J, et al. Exploring the ethical issues in research using digital data collection strategies with minors: A scoping review. *PLoS One*. 2020;15(8):e0237875.
43. Arnold JF, Sade RM. Wearable Technologies in Collegiate Sports: The Ethics of Collecting Biometric Data From Student-Athletes. *Am J Bioeth*. 2017;17(1):67-70.
44. Radanliev P. Privacy, ethics, transparency, and accountability in AI systems for wearable devices. *Front Digit Health*. 2025;7:1431246.
45. Stellingwerff T, Burke LM, Caldwell HG, et al. Integrative Field-Based Health and Performance Research: A Narrative Review on Experimental Methods and Logistics to Conduct Competition and Training Camp Studies in Athletes. *Sports Med*. 2025;55(6):1377-403.
46. Zhou L, Qiao Y, Cai Q, et al. Global trends and insights in ethical statements regarding the utilization of human cadaveric tissues for biomechanical research from 2017 to 2022: a bibliometric analysis. *Int J Surg*. 2025;111(1):1503-7.
47. Bernier A, Raven-Adams M, Zaccagnini D, et al. Recording the ethical provenance of data and automating data stewardship. *Big Data & Society*. 2023;10:205395172311631.
48. Ripic Z, Signorile JF, Best TM, et al. Validity of artificial intelligence-based markerless motion capture system for clinical gait analysis: Spatiotemporal results in healthy adults and adults with Parkinson's disease. *J Biomech*. 2023;155:111645.
49. Mouloudi S, Rahmanpanah H, Gohari S, et al. What can artificial intelligence and machine learning tell us? A review of applications to equine biomechanical research. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2021;123:104728.
50. Al-kfairy M, Mustafa D, Kshetri N, et al. Ethical Challenges and Solutions of Generative AI: An Interdisciplinary Perspective. *Informatics*. 2024;11(3):58.
51. Vijayan V, Connolly JP, Condell J, et al. Review of Wearable Devices and Data Collection Considerations for Connected Health. *Sensors (Basel)*. 2021;21(16).
52. Moore J, McMeekin P, Parkes T, et al. Contextualizing remote fall risk: Video data capture and implementing ethical AI. *NPJ Digit Med*. 2024;7(1):61.
53. Andrade C. HARKing, Cherry-Picking, P-Hacking, Fishing Expeditions, and Data Dredging and Mining as Questionable Research Practices. *J Clin Psychiatry*. 2021;82(1).
54. Rao KN, Mair M, Arora RD, et al. Misconducts in research and methods to uphold research integrity. *Indian J Cancer*. 2024;61(2):354-9.
55. Kitchin R, McArdle G. What makes Big Data, Big Data? Exploring the ontological characteristics of 26 datasets. *Big Data & Society*. 2016;3(1):2053951716631130.
56. Ausloos J. Conditions of the Right to Erasure. *The Right to Erasure in EU Data Protection Law*; Oxford University Press: Oxford, UK. 2020:196-274.
57. Faisal K. Applying the purpose limitation principle in smart-city data-processing practices: A European data protection law perspective. *Communication Law and Policy*. 2023;28(1):67-97.
58. Shanmugam D, Shabanian S, Diaz F, et al. Learning to limit data collection via scaling laws: Data minimization compliance in practice. *ACM FAccT*. 2022.
59. Enzmann M, Selzer A, Spsychalski D. Data Erasure under the GDPR-Steps towards Compliance. *Eur Data Prot L Rev*. 2019;5:416.
60. Lu T-W, Chang C-F. Biomechanics of human movement and its clinical applications. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*. 2012;28(2, Supplement):S13-S25.
61. Page K. The four principles: Can they be measured and do they predict ethical decision making? *BMC Medical Ethics*. 2012;13(1):10.
62. Balci IC, Sayin I, Salturk S, et al. Reliability assessment of markerless technologies in biomechanical motion analysis: a performance comparison. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2026;Volume 7 - 2025.
63. Hindle BR, Keogh JWL, Lorimer AV. Inertial-Based Human Motion Capture: A Technical Summary of Current Processing Methodologies for Spatiotemporal and Kinematic Measures. *Appl Bionics Biomech*. 2021;2021:6628320.

64. Evans M, Needham L, Wade L, et al. Synchronised Video, Motion Capture and Force Plate Dataset for Validating Markerless Human Movement Analysis. *Scientific Data*. 2024;11(1):1300.
65. Broyles LM, Tate JA, Happ MB. Videorecording in Clinical Research: Mapping the Ethical Terrain. *Nursing Research*. 2008;57(1).
66. Menikoff J, Kaneshiro J, Pritchard I. The Common Rule, Updated. *N Engl J Med*. 2017;376(7):613-5.
67. Harrison C, Kenny NP, Sidarous M, et al. Bioethics for clinicians: 9. Involving children in medical decisions. *Cmaj*. 1997;156(6):825-8.
68. Spriggs M. Children and bioethics: clarifying consent and assent in medical and research settings. *British Medical Bulletin*. 2023;145(1):110-9.
69. Schwartz MH, Trost JP, Werver RA. Measurement and management of errors in quantitative gait data. *Gait & Posture*. 2004;20(2):196-203.
70. Fonseca M, Bergere M, Candido J, et al. The Conventional Gait Model's sensitivity to lower-limb marker placement. *Scientific Reports*. 2022;12(1):14207.
71. Bent MA, Rethlefsen S, Beltran V, et al. Comprehensive computerized gait analysis: Barriers to access for children and adolescents. *Gait & Posture*. 2024;113:319-23.
72. Tai WH, Zhang R, Zhao L. Cutting-Edge Research in Sports Biomechanics: From Basic Science to Applied Technology. *Bioengineering (Basel)*. 2023;10(6).
73. Arora NK, Roehrken G, Crumbach S, et al. Good Scientific Practice and Ethics in Sports and Exercise Science: A Brief and Comprehensive Hands-on Appraisal for Sports Research. *Sports (Basel, Switzerland)*. 2023;11(2).
74. Harriss DJ, Atkinson G. International Journal of Sports Medicine - ethical standards in sport and exercise science research. *Int J Sports Med*. 2009;30(10):701-2.
75. Yeadon MR, Challis JH. The future of performance-related sports biomechanics research. *J Sports Sci*. 1994;12(1):3-32.
76. Dudek S, Koziak W, Makiela M, et al. Revolutionizing Sports: The Role of Wearable Technology and AI in Training and Performance Analysis. *Quality in Sport*. 2025;39:58456.
77. Seçkin AÇ, Ateş B, Seçkin M. Review on Wearable Technology in Sports: Concepts, Challenges and Opportunities. *Applied Sciences*. 2023;13(18):10399.
78. Casher C. Moneyball in the Era of Biometrics: Who Has Ownership over the Biometric Data of Professional Athletes. *Dalhousie J Legal Stud*. 2019;28:1.
79. Xue H, Han C, Zhu D. Limb biomechanics in combat sports: insights from wearable sensor technology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2025;Volume 13 - 2025.
80. Areskoug-Josefsson K PhD RPT, Kjellström SP. Ethics and sexual health: Exploration of the ethical code of conduct for physiotherapists concerning sexual health in clinical practice. *Physiother Theory Pract*. 2019;35(11):1015-26.
81. Nicholls DA, Gibson BE. The body and physiotherapy. *Physiother Theory Pract*. 2010;26(8):497-509.
82. Ramstrand N, Mussa A, Gigante I. Factors influencing satisfaction with prosthetic and orthotic services - a national cross-sectional study in Sweden. *Disabil Rehabil*. 2024;46(25):6213-20.
83. Barbosa I, Alves P, Silveira Z. Upper limbs' assistive devices for stroke rehabilitation: a systematic review on design engineering solutions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021;43.
84. Mahammed K, Das AK. Design, Development and Experimental Evaluation of a Transfer Assistive Device for Paraplegic Individuals Using Biomechanical Analysis. 2021. p. 471-83.
85. Ursin LO. Personal autonomy and informed consent. *Med Health Care Philos*. 2009;12(1):17-24.
86. Mitchell J, Shirota C, Clanchy K. Factors that influence the adoption of rehabilitation technologies: a multi-disciplinary qualitative exploration. *J Neuroeng Rehabil*. 2023;20(1):80.

87. Cheng CYM, Lee CCY, Chen CK, et al. Multidisciplinary collaboration on exoskeleton development adopting user-centered design: a systematic integrative review. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2024;19(3):909-37.
88. Hernández M, Jacinto Villegas J, Portillo-Rodríguez O, et al. User-Centered Design and Evaluation of an Upper Limb Rehabilitation System with a Virtual Environment. *Applied Sciences.* 2021;11.
89. Parums D. Editorial: The 2024 Revision of the Declaration of Helsinki and its Continued Role as a Code of Ethics to Guide Medical Research. *Medical Science Monitor.* 2024;30:e947428.
90. de Marzo G, Mastronardi V, Todaro M, et al. Sustainable Electronic Biomaterials for Body-Compliant Devices: Challenges and Perspectives for Wearable Bio-Mechanical Sensors and Body Energy Harvesters. *Nano Energy.* 2024;123:109336.
91. Gurova O, Merritt TR, Papachristos E, et al. Sustainable Solutions for Wearable Technologies: Mapping the Product Development Life Cycle. *Sustainability.* 2020;12(20):8444.
92. Liu X, Mei X, Guo J. The integration of biomechanics and the application of green materials in the construction of sports facilities under environmental sustainability. *Molecular & Cellular Biomechanics.* 2025.
93. Taborri J, Molinaro L, Santospagnuolo A, et al. A machine-learning approach to measure the anterior cruciate ligament injury risk in female basketball players. *Sensors.* 2021;21(9):3141.
94. Chithra N, Bhambri P. Ethics in sustainable technology. *Handbook of Technological Sustainability: CRC Press;* 2024. p. 245-56.
95. Zhang G, Wang S. Integrating sports industry development with national health promotion: A biomechanics-informed study of the healthy China strategy. *Molecular & Cellular Biomechanics.* 2025;22:807.