

HAREKET VE ANTRENMAN BİLİMLERİ

ALANINDA ARAŞTIRMALAR
VE DEĞERLENDİRMELER

EKİM 2026



EDİTÖR

Prof. Dr. Erdil DURUKAN

gece
kitaplığı

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Ekim 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-301-5

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

0312 384 80 40

www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro

Sertifika No: 42488

**HAREKET VE ANTRENMAN
BİLİMLERİ
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

EKİM 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Erdil DURUKAN

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

LAKTAT PARADOKSU: YÜKSEK İRTİFADA METABOLİK ADAPTASYONLARIN GÜNCEL FİZYOLOJİK DEĞERLENDİRİLMESİ

Mürşit AKSOY, Ebubekir CAN 7

BÖLÜM 2

ANTRENMAN YÜKÜNÜN İZLENMESİ VE YÖNETİMİ: PERFORMANS VE TOPARLANMA PERSPEKTİFİ

Rifat SARI 27

BÖLÜM 3

YÜZME PERFORMANSINDA CORE ANTRENMANLARININ ROLÜ

Yusuf GÖZAÇIK 48

BÖLÜM 4

EGZERSİZ VE BAĞIŞIKLIK FİZYOLOJİSİ

Recep GÜNAY, Mehmet SERT 57

BÖLÜM 5

SPOR YARALANMALARINDA BİYOMEKANİK FAKTÖRLER

Beyza GÜLER, Erdil DURUKAN, Süleyman CAN 67

BÖLÜM 1

LAKTAT PARADOKSU: YÜKSEK İRTİFADA METABOLİK ADAPTASYONLARIN GÜNCEL FİZYOLOJİK DEĞERLENDİRİLMESİ

Mürşit AKSOY¹, Ebubekir CAN²

¹ Dr. Öğr. Üyesi Kurumu: Hakkari Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi E-mail: mursitaksoy@hakkari.edu.tr

² ebubkrenn1@gmail.com

Giriş

Egzersiz sırasında performansın sürdürülebilirliği, kas dokusunun artan enerji gereksinimini ne ölçüde karşılayabildiği ile yakından ilişkilidir. Bu gereksinim yalnızca ATP üretim hızıyla değil, aynı zamanda üretim ve kullanım arasındaki dengenin korunabilmesiyle belirlenir. Hücresel düzeyde enerji üretimi büyük ölçüde oksijen varlığına bağımlı olduğundan, oksijen sunumunu etkileyen her durum performans kapasitesini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle egzersiz fizyolojisi literatüründe performans sınırlayıcı faktörler genellikle kardiyovasküler sistem, ventilasyon, kas içi oksidatif kapasite ve metabolik düzenleme mekanizmaları çerçevesinde ele alınmıştır (Joyner & Dominelli, 2021; Staes ve ark., 2024; van Der Zwaard ve ark., 2021). Ancak bu sistemlerin birbirleriyle nasıl etkileştiği ve hangi koşullarda hangi bileşenin baskın hale geldiği, hâlen tartışılmaya devam eden bir konudur.

Oksijen sunumunun kısıtlandığı durumlar, bu tartışmayı daha görünür hale getirir. Hipoksik koşullar altında organizma, enerji üretim stratejilerini yeniden önceliklendirmek zorunda kalır (Midha ve ark., 2023). Akut hipoksi sırasında ventilatuvar yanıt artar, kardiyak debi yükselir ve periferik dokulara daha fazla oksijen ulaştırılmaya çalışılır (Theunissen ve ark., 2022). Ancak bu kompensatuvar mekanizmalar belirli bir sınırın ötesinde yetersiz kalabilir. Bu noktada metabolik sistemler devreye girer ve enerji üretim yolları arasındaki denge yeniden ayarlanır (Lee ve ark., 2020; Midha ve ark., 2023). Bu yeniden ayarlama süreci, yalnızca aerobik kapasitedeki azalma ile sınırlı kalmamakta; aynı zamanda substrat kullanımı, metabolit üretimi ve nöromüsküler aktivasyon paternlerinde ortaya çıkan değişimlerle de karakterize olmaktadır (Chicco ve ark., 2018; Wang ve ark., 2024).

Yüksek irtifa ortamı, hipoksinin organizma üzerindeki etkilerinin sistematik biçimde incelenemediği doğal bir model sunar. Deniz seviyesinden yükseldikçe barometrik basınç azalmakta; bunun sonucunda alveoler ve arteriyel oksijen parsiyel basıncı düşmekte ve maksimal oksijen tüketimi (VO_{2max}) belirgin şekilde azalmaktadır (Forrer ve ark., 2023; Ogawa ve ark., 2019). Bu azalma, dayanıklılık performansındaki düşüşün temel belirleyicisi olarak kabul edilir (Forrer ve ark., 2021). Ancak yüksek irtifada gözlenen fizyolojik yanıtlar yalnızca oksijen taşınımındaki azalmanın doğrudan bir sonucu değildir. Aklimatizasyon süreci boyunca hematolojik adaptasyonlar, ventilatuvar regülasyon değişiklikleri ve kas içi metabolik yeniden yapılanma gibi çok katmanlı fizyolojik yanıtlar ortaya çıkmaktadır (Mallet ve ark., 2023; Murray ve ark., 2018). Bu durum, yüksek irtifada gözlenen metabolik yanıtların tek bir fizyolojik sistem üzerinden değil, sistemler arası etkileşim ve entegrasyon çerçevesinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Egzersiz şiddeti arttıkça enerji üretim sistemleri arasındaki geçiş daha belirgin hale gelir. Oksidatif fosforilasyon kapasitesi sınırlandığında glikolitik akış hızlanır ve bunun sonucu olarak laktat üretimi artmaktadır. Kan laktat konsantrasyonu bu nedenle uzun yıllar boyunca egzersiz şiddetinin ve anaerobik katkının temel göstergelerinden biri olarak değerlendirilmiştir (Brooks, 1985; Cabrera ve ark., 1999). Spor bilimleri uygulamalarında laktat eşiği, performans analizi ve antrenman planlamasında yaygın olarak kullanılan temel fizyolojik parametrelerden biri haline gelmiştir (Casado ve ark., 2023; Heuberger ve ark.,

2018). Bu klasik fizyolojik modele göre, oksijen sunumunun sınırlandığı hipoksik koşullarda anaerobik metabolik katkının artması ve buna paralel olarak laktat üretiminin yükselmesi beklenmektedir (Arieff, 2013).

Ancak yüksek irtifada elde edilen bulgular, bu klasik fizyolojik beklenti ile her zaman örtüşmemiştir. Özellikle aklimatizasyon sonrasında gerçekleştirilen maksimal egzersiz testlerinde, maksimal oksijen tüketiminin azalmasına paralel olarak pik kan laktat değerlerinin de düştüğü bildirilmiştir (Hochachka ve ark., 2002; Mazzeo, 2007). Bu durum, akut hipoksi koşullarında artmış anaerobik katkıya bağlı olarak laktat birikiminin yükselmesi gerektiği yönündeki klasik yaklaşım ile çelişmektedir (West, 2007). Literatürde “laktat paradoksu” olarak adlandırılan bu fenomen, yüksek irtifada enerji üretiminin klasik fizyolojik modele kıyasla farklı biçimde düzenlenebileceğini düşündürmektedir (Hochachka ve ark., 2002). Daha sonraki çalışmalar, paradoksun varlığı ve mekanizması konusunda farklı sonuçlar bildirmiş; bazı araştırmacılar kas içi metabolik adaptasyonları ön plana çıkarırken, bazıları santral regülasyon süreçlerinin belirleyici olabileceğini ileri sürmüştür (Hochachka ve ark., 2002; Noakes, 2009; Van Hall ve ark., 2009).

Son yıllarda laktatın fizyolojik rolüne ilişkin anlayışın değişmesi, bu tartışmaya yeni bir boyut kazandırmıştır. Laktat artık yalnızca anaerobik metabolizmanın bir son ürünü olarak değil, aynı zamanda oksidatif metabolizmada kullanılabilen bir enerji substratı ve hücreler arası karbon taşıyıcısı olarak değerlendirilmektedir (Rabinowitz & Enerbäck, 2020). Bu yaklaşım, yüksek irtifada gözlenen düşük kan laktat değerlerinin üretim azalmasından mı, kullanım artışından mı, yoksa sistemik düzenlemedeki bir değişimden mi kaynaklandığı sorusunu gündeme getirmektedir. Dolayısıyla laktat paradoksu, yalnızca bir metabolit düzeyindeki değişimi değil; hipoksik ortamda enerji sistemlerinin nasıl yeniden organize edildiğini anlamaya yönelik daha geniş bir fizyolojik sorunu temsil etmektedir.

Bu kitap bölümünde laktat paradoksu, yüksek irtifa koşullarında ortaya çıkan metabolik adaptasyonlar ve güncel fizyolojik yaklaşımlar çerçevesinde ele alınacaktır. Öncelikle hipoksik ortamda organizmanın geliştirdiği metabolik adaptasyonlar açıklanacak, ardından laktat metabolizmasının temel fizyolojisi, laktat paradoksunun tarihsel gelişimi ve bu olguyu açıklamaya yönelik başlıca mekanizmalar güncel literatür doğrultusunda değerlendirilecektir. Böylece hipoksik stres altında enerji sistemlerinin nasıl yeniden düzenlendiği ve laktat paradoksunun altında yatan fizyolojik süreçlerin bütüncül bir bakış açısıyla açıklanması amaçlanmaktadır.

Hipoksiye Metabolik Adaptasyon

Hipoksik ortamda organizmanın temel fizyolojik önceliği, sınırlı oksijen sunumuna rağmen hücresel enerji üretiminin sürdürülebilmesidir. Bu nedenle hipoksiye verilen yanıt yalnızca solunum ve dolaşım sistemleriyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda hücresel metabolizmayı düzenleyen çok sayıda adaptif mekanizmayı da kapsamaktadır. Oksijen sunumunun azalmasıyla birlikte enerji üretim yolları yeniden düzenlenir ve hücresel enerji gereksinimi ile enerji üretimi arasındaki metabolik denge korunmaya çalışılır. Hipoksiye karşı gelişen sistemik ve hücresel metabolik adaptasyonların genel çerçevesi Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu çok düzeyli adaptasyonlar, egzersiz sırasında metabolik homeostazın sürdürülmesi ve enerji

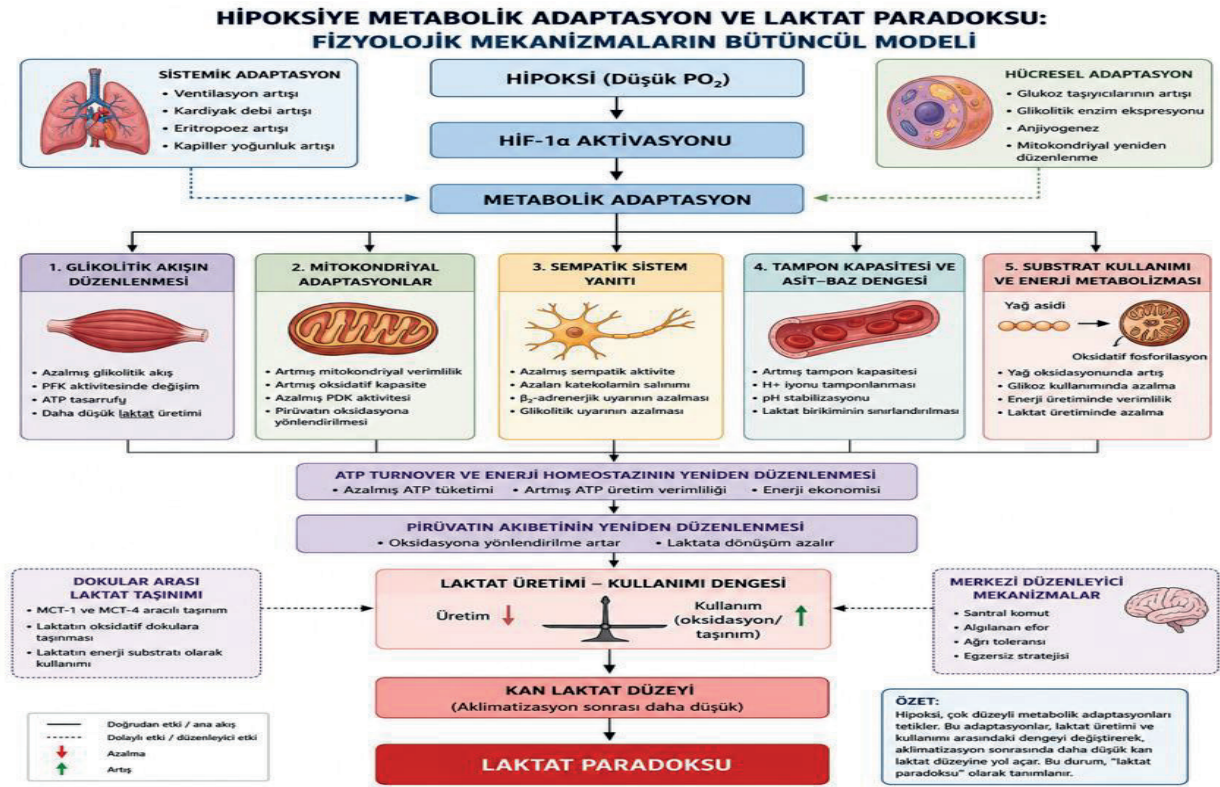
üretiminin değişen çevresel koşullara uyum sağlayabilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Kayser & Verges, 2013).

Hipoksiye karşı gelişen metabolik yanıtın temel düzenleyicilerinden biri, Hipoksi İndüklenebilir Faktör-1 (HIF-1) sinyal yoludur. Hücre içi oksijen düzeyinin azalmasıyla aktive olan HIF-1, glukoz taşınımı, glikolitik enzimlerin ekspresyonu, anjiyogenez ve mitokondriyal fonksiyonlarla ilişkili çok sayıda genin düzenlenmesinde görev almaktadır (Semenza, 2012). Böylece organizma, oksijen kullanımını daha verimli hâle getirmeye ve sınırlı oksijen koşullarında ATP üretimini sürdürebilmeye yönelik metabolik bir yeniden yapılanma sürecine girmektedir. Bununla birlikte bu yeniden düzenlenme yalnızca glikolizin artması şeklinde değerlendirilmemeli; enerji üretimi ile enerji tüketimi arasındaki metabolik dengenin yeniden organize edilmesi olarak ele alınmalıdır (Taylor & Scholz, 2022).

Aklimatizasyon süreci ilerledikçe metabolik adaptasyonlar daha karmaşık bir hâl almaktadır. Mitokondriyal fonksiyonların yeniden düzenlenmesi, substrat kullanımındaki değişimler ve hücrel enerji ekonomisinin iyileştirilmesine yönelik mekanizmalar, hipoksik stres altında ATP üretiminin daha etkin biçimde sürdürülmesine katkıda bulunmaktadır (Hochachka ve ark., 2002; Murray, 2009). Bu süreçte enerji metabolizmasının amacı yalnızca ATP üretimini artırmak değil, aynı zamanda ATP üretimi ile ATP tüketimi arasındaki metabolik uyumu koruyarak hücrel homeostazı sürdürebilmektir.

Hipoksiye bağlı gelişen metabolik adaptasyonlar, egzersiz sırasında gözlenen laktat yanıtının yorumlanmasında temel bir fizyolojik çerçeve sunmaktadır. Çünkü hipoksik koşullarda ortaya çıkan değişimler yalnızca glikolitik aktiviteyi değil, aynı zamanda laktatın üretimi, taşınımı, oksidasyonu ve kullanımını belirleyen süreçleri de etkilemektedir. Bu nedenle yüksek irtifada gözlenen laktat yanıtlarının doğru değerlendirilebilmesi, hipoksiye karşı gelişen bu metabolik adaptasyonların anlaşılmasını gerektirmektedir. Bu fizyolojik çerçeve doğrultusunda izleyen

bölümde, laktat metabolizmasının temel fizyolojisi ayrıntılı olarak ele alınacaktır.



Şekil 3. Hipoksiye metabolik adaptasyon ve laktat paradoksu: Fizyolojik mekanizmaların bütüncül modeli: Hipoksik uyarıya karşı gelişen sistemik ve hücresele adaptasyonların enerji metabolizması üzerindeki etkileri ve bu adaptasyonların laktat paradoksu ile ilişkisi şematik olarak gösterilmiştir. Hipoksiye bağlı HIF-1 α aktivasyonu ile başlayan metabolik yeniden düzenlenme; glükolitik akış, mitokondriyal fonksiyonlar, sempatik yanıt, tampon kapasitesi, substrat kullanımı ve laktat taşınımındaki değişiklikler aracılığıyla laktat üretimi ve kullanımı arasındaki dengeyi yeniden şekillendirmektedir. Bu bütüncül adaptasyon süreci, aklimatizasyon sonrasında gözlenen beklenenden düşük kan laktat düzeylerinin fizyolojik temelini oluşturmaktadır.

Laktat Metabolizmasının Temel Fizyolojisi

Laktat metabolizmasının doğru anlaşılması, yüksek irtifada gözlenen metabolik yanıtların yorumlanabilmesi için zorunlu bir başlangıç noktasıdır. Çünkü laktat paradoksu olarak tanımlanan olgu, temelde laktat üretimi ve kullanımındaki değişimlere dayanmaktadır (Hochachka ve ark., 2002). Bu nedenle öncelikle laktatın egzersiz sırasında nasıl üretildiği, nasıl taşındığı ve nasıl kullanıldığının açıklanması gerekmektedir. Laktat uzun yıllar boyunca anaerobik metabolizmanın bir son ürünü ve kas yorgunluğunun göstergesi olarak değerlendirilmiş olsa da günümüzde bu yaklaşımın eksik olduğu bilinmektedir. Nitekim laktat oluşumu, oksijen yetersizliğinin zorunlu bir sonucu değil; glükolitik akışın fizyolojik bir devamıdır (Brooks, 2020; Brooks ve ark., 2022).

Glükoliz sürecinde glukoz piruvada dönüştürülürken NAD^+ , $NADH$ 'a indirgenir. Hücresele redoks dengesinin korunabilmesi için $NADH$ 'ın yeniden NAD^+ 'a oksitlenmesi gerekir. Piruvadın laktata indirgenmesi, bu redoks dengesini sürdüren temel mekanizmalardan biridir ve laktat dehidrogenaz aracılığıyla gerçekleşir. Bu reaksiyon, özellikle yüksek enerji talebi sırasında glükolitik akışın devam edebilmesini sağlar (Kierans & Taylor, 2024). Dolayısıyla laktat üretimi, metabolik bir başarısızlık değil; enerji üretiminin sürekliliğini sağlayan

düzenleyici bir basamaktır. Oksijen varlığında da laktat oluşur ve üretim hızı büyük ölçüde kasın metabolik aktivitesine bağlıdır (Brooks, 2020).

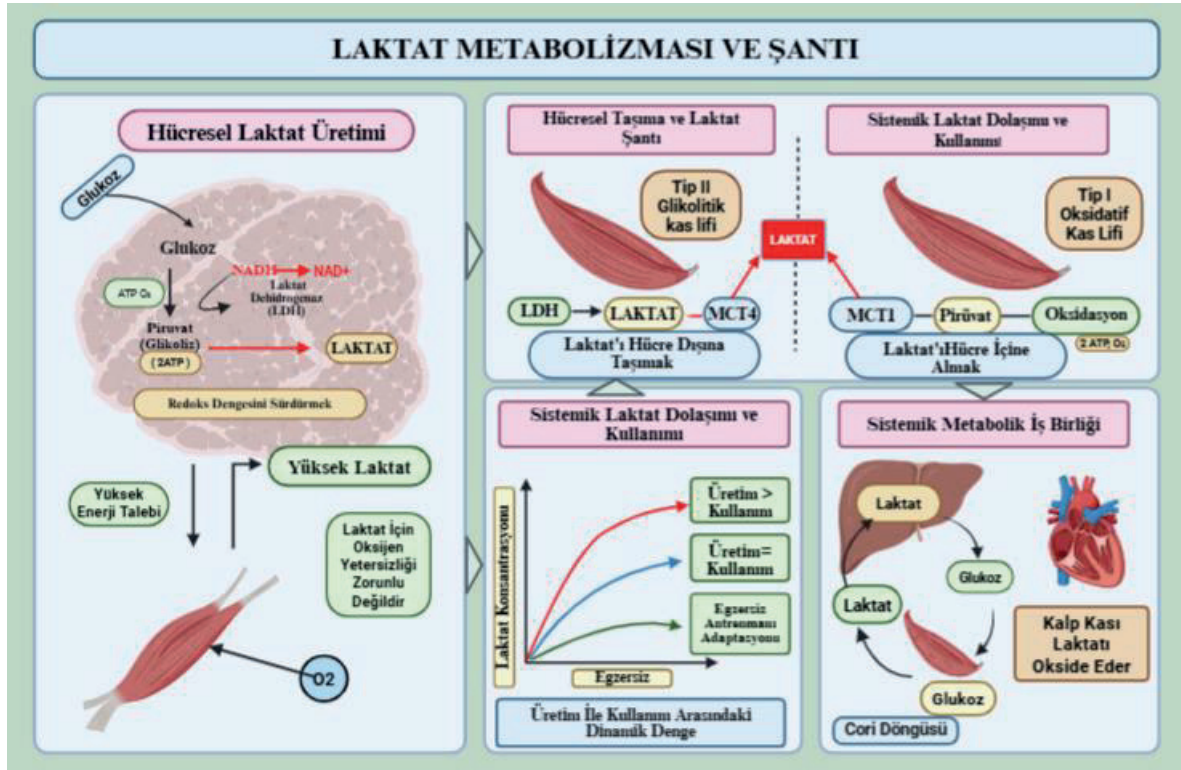
Egzersiz sırasında kan laktat konsantrasyonu, üretim ile kullanım arasındaki dinamik dengeyi yansıtır. Laktatın artışı her zaman aşırı üretim anlamına gelmez; üretim hızının kullanım hızını geçici olarak aşması yeterlidir (Emhoff & Messonnier, 2023). Bu dinamik süreç, laktatın üretimi, taşınımı ve kullanımını kapsayan laktat şantı modeli kapsamında değerlendirilmektedir (Şekil 1). Kas dokusunda üretilen laktat, hücre içinde kalmaz; mono karboksilat taşıyıcıları aracılığıyla hücre dışına taşınır ve dolaşıma katılır. Bu noktada laktatın kaderi, dokular arası metabolik iş birliğinin bir parçası haline gelir (Brooks ve ark., 2022; Kitaoka ve ark., 2012). Oksidatif kapasitesi yüksek kas lifleri ve özellikle kalp kası, dolaşımdaki laktatı etkin biçimde okside edebilir. Bu durum, laktatın yalnızca üretildiği kas liflerinde biriken bir metabolit olmadığını, farklı dokular arasında taşınan önemli bir enerji substratı olarak işlev gördüğünü ortaya koymaktadır. “Laktat şantı” modeli bu süreci açıklamak için geliştirilmiştir ve glikolitik liflerde üretilen laktatın oksidatif liflerde yakıt olarak kullanılabildiğini ortaya koymuştur (Brooks ve ark., 1986).

Laktatın sistemik düzeydeki rolü bununla sınırlı değildir. Dolaşıma geçen laktat karaciğere taşınarak glukoneogenez yoluyla yeniden glukoza dönüştürülebilir. Cori döngüsü olarak bilinen bu mekanizma, egzersiz sırasında karbon iskeletinin yeniden dağıtılmasını sağlar ve kan glukozunun korunmasına katkıda bulunur (Brooks, 2020; Messonnier ve ark., 2021). Böylece laktat, geçici bir metabolit olmaktan çıkarak enerji substratlarının dolaşımsal bütünlüğünde yer alan bir ara taşıyıcı işlevi görür. Bu süreç, özellikle uzun süreli egzersizlerde ve enerji talebinin arttığı durumlarda önem kazanır (Brooks, 2020).

Hücresel düzeyde laktat taşınımını düzenleyen MCT1 ve MCT4 gibi taşıyıcı proteinler, üretim ve kullanım arasındaki dengeyi belirleyen kritik unsurlardır (Halestrap, 2013; Payen ve ark., 2020). Oksidatif liflerde baskın olan MCT1, laktatın hücre içine alınarak oksidasyonunu kolaylaştırırken; glikolitik liflerde daha yoğun bulunan MCT4, laktatın hücre dışına taşınmasını destekler (Kobayashi, 2004; Zhang ve ark., 2024). Egzersiz antrenmanı MCT1 ve MCT4 ekspresyonunu artırarak laktatın taşınma ve kullanım kapasitesini geliştirir; böylece metabolik esnekliğin artmasına ve laktat üretimi ile kullanımı arasındaki dengenin daha etkin düzenlenmesine katkı sağlar (Benítez-Muñoz ve ark., 2024).

Bu fizyolojik altyapı, laktatın metabolik sistemler arasındaki entegrasyonun bir parçası olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Laktat üretimi, taşınımı ve oksidasyonu bir arada değerlendirildiğinde, kan laktat konsantrasyonu tek başına anaerobik katkının değil; enerji sistemleri arasındaki etkileşimin bir göstergesidir. Dolayısıyla yüksek irtifa gibi oksijen sunumunun sınırlı olduğu koşullarda laktat yanıtında ortaya çıkan değişimleri yorumlayabilmek için yalnızca üretim miktarına değil; klirens kapasitesine, taşıyıcı aktivitesine ve oksidatif kullanım potansiyeline de bakmak gerekir (Brooks, 2020). Dolayısıyla laktat paradoksunun doğru yorumlanabilmesi, laktat üretimi, taşınımı ve kullanımını birlikte ele alan bütüncül bir fizyolojik yaklaşımın benimsenmesini gerektirmektedir. Bu yaklaşım, yüksek irtifada gözlenen beklenmedik laktat yanıtlarının

anlaşılması için gerekli kavramsal çerçeveyi oluşturmaktadır. Bu nedenle bir sonraki bölümde laktat paradoksunun tarihsel gelişimi ele alınacaktır.



Şekil 1. Laktat metabolizması ve laktat şanti: Glikoliz sırasında pirüvattan laktat oluşumu, laktat dehidrogenaz (LDH) aracılığıyla redoks dengesinin sürdürülmesi, MCT1 ve MCT4 taşıyıcıları ile hücreler arası laktat taşınımı, oksidatif kas lifleri tarafından laktatın enerji substratı olarak kullanımı ve Cori döngüsü yoluyla sistemik karbon geri dönüşümü şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca egzersiz sırasında kan laktat düzeylerinin, laktat üretimi ile kullanım hızı arasındaki dinamik dengesi yansıttığı vurgulanmaktadır.

Laktat Paradoksunun Kavramsal Çerçevesi ve Tarihsel Gelişimi

Yüksek irtifada egzersiz metabolizmasının incelenmesi, 20. yüzyılın ilk yarısından itibaren hem çevresel fizyoloji hem de egzersiz fizyolojisi araştırmaları açısından önemli bir araştırma alanı olmuştur. Hipobarik hipoksinin organizma üzerindeki etkileri incelenirken, kas metabolizmasının ve özellikle laktat yanıtının beklenen fizyolojik örüntüden sapma göstermesi, literatürde "laktat paradoksu" olarak adlandırılan olgunun ortaya çıkmasına yol açmıştır. Paradoks kavramı burada, hipoksik ortamda egzersiz sırasında daha yüksek laktat birikimi beklenirken, aklimatizasyon sonrasında kan laktat düzeylerinin azalmasının gözlenmesi ile ilişkilidir (Hochachka ve ark., 2002). Laktat paradoksu kavramının tarihsel gelişimi ve günümüzde ulaşılan kavramsal çerçeve Şekil 2'de özetlenmiştir.

Laktat paradoksunun tarihsel kökenleri 1930'lu yıllara kadar uzanmaktadır. Edwards ve Dill'in yüksek irtifa ekspedisyenleri sırasında yaptıkları ölçümlerde, akut hipoksi koşullarında submaksimal egzersizde kan laktat düzeylerinin yükseldiği; ancak aklimatizasyon sonrasında aynı mutlak iş yükünde laktat konsantrasyonlarının düştüğü bildirilmiştir (West, 2007). Bu gözlemler, ilerleyen yıllarda sistematik biçimde yeniden ele alınmış ve özellikle Everest ekspedisyenleri sırasında elde edilen veriler, yüksek irtifada

maksimal egzersiz sırasında beklenenden daha düşük kan laktat düzeyleri görülebileceğini göstermiştir (Hochachka ve ark., 2002; West, 2007). Hochachka ve ark., yüksek irtifada egzersiz sırasında gözlenen bu beklenmedik laktat yanıtını “laktat paradoksu” çerçevesinde ele alarak olgunun fizyolojik mekanizmalarını ayrıntılı biçimde tartışmış ve literatürdeki kavramsal çerçevenin gelişmesine önemli katkı sağlamıştır (Hochachka ve ark., 2002).

Tanım konusunda literatürde tam bir birlik bulunmamaktadır. West (1986), paradoksu aklimatize bireylerde belirli bir iş yükünde kan laktat düzeylerinin deniz seviyesine benzer kalması ve maksimal laktat konsantrasyonunun azalması şeklinde tanımlamıştır. Reeves ve ark. (1992) ise akut hipoksi sırasında artan kan laktat birikiminin aklimatizasyon süreciyle birlikte azalmasını paradoks olarak ifade etmiştir. Kayser (1996) paradoksu daha fizyolojik bir çerçevede ele alarak, akut hipoksiye kıyasla aklimatizasyon sonrasında aynı mutlak oksijen tüketiminde daha düşük kan laktat düzeylerinin gözlenmesi şeklinde açıklamıştır. Bu farklı tanımlar, paradoksun hangi referans koşula göre değerlendirildiği sorusunu da beraberinde getirmiştir (Van Hall ve ark., 2009).

Akut ve kronik irtifa maruziyeti arasındaki ayrım, laktat yanıtının yorumlanmasında belirleyici bir unsurdur. Akut hipoksik maruziyette, submaksimal egzersiz sırasında kan laktat düzeylerinin genellikle daha yüksek olduğu bildirilmiş ve bu durum artmış sempatoadrenal yanıt ile glikojenoliz aktivitesiyle ilişkilendirilmiştir (Pronk ve ark., 2003). Buna karşılık, birkaç haftalık aklimatizasyonun ardından hem submaksimal hem de maksimal egzersiz sırasında kan laktat düzeylerinin azalabildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, daha uzun süreli hipoksik maruziyetlerde laktat yanıtının yeniden deniz seviyesindeki örüntüye yaklaşabileceğini bildiren çalışmalar da bulunmaktadır (Lundby ve ark., 2000). Bu bulgular, laktat paradoksunun kalıcı bir metabolik yeniden programlanmayı mı, yoksa geçici bir adaptif yanıtı mı yansıttığı sorusunu gündeme getirmiştir.

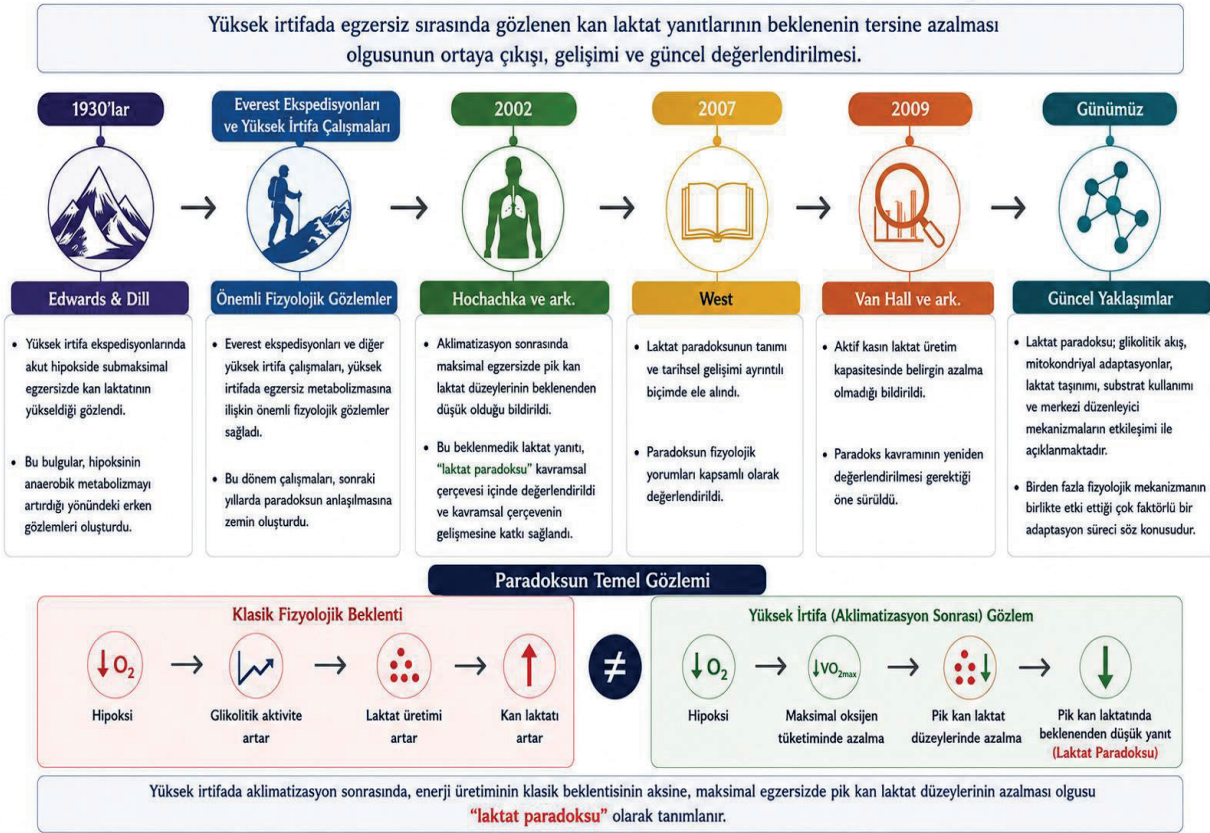
Egzersiz yoğunluğu da paradoksun gözlenme biçimini etkilemektedir. Literatürde paradoksun özellikle maksimal veya tükenmeye kadar yapılan artan yük testlerinde daha belirgin olduğu bildirilmiştir (Lundby ve ark., 2000). Bazı çalışmalarda ise, aktif kasın net laktat salınımında belirgin azalma saptanmadığı, hatta kronik hipoksi koşullarında kasın laktat üretim kapasitesinin korunabildiği gösterilmiştir (Van Hall ve ark., 2009). Bu bulgular, kan laktat konsantrasyonunun yalnızca üretimi değil, aynı zamanda kullanım ve dağılım dinamiklerini de yansıttığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla paradoksun değerlendirilmesi, mutlak iş yükü, göreceli yoğunluk ($VO_2\text{max}$ yüzdesi), kas kütlesi kaybı ve sempatik aktivite gibi değişkenler dikkate alınmadan yapılamaz.

Literatürde ayrıca laktat paradoksunun varlığı da tartışma konusu olmuştur. Van Hall ve ark. (2009), kontrollü deneysel çalışmalara dayanarak aklimatizasyon sonrasında aktif kasın laktat üretim kapasitesinde belirgin bir azalma olmadığını bildirmiş ve bu nedenle paradoks kavramının genellenebilirliğini sorgulamıştır. Bu bulgular, yüksek irtifada gözlenen düşük kan laktat düzeylerinin kas içi üretimdeki bir azalmadan ziyade dolaşım, kullanım veya ölçüm koşullarındaki farklılıklarla ilişkili olabileceği yönünde bir tartışma başlatmıştır (West, 2007). Nitekim bazı araştırmacılar paradoksun fizyolojik bir mekanizmayı yansıttığını

savunurken, bazıları ise bu olgunun metodolojik farklılıklar ve deneysel koşullar ile ilişkili olabileceğini ileri sürmüştür.

Bu tarihsel gelişim ve kavramsal çeşitlilik, laktat paradoksunun tek boyutlu bir fizyolojik olgu olarak değerlendirilemeyeceğini göstermektedir. Paradoks; akut hipoksik stres, aklimatizasyon süresi, egzersiz yoğunluğu ve metabolik yeniden düzenlenme süreçlerinin karşılıklı etkileşimi sonucunda ortaya çıkan dinamik bir adaptasyon olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu olgunun altında yatan fizyolojik mekanizmalar konusunda literatürde kesin bir görüş birliği bulunmamaktadır. Bu doğrultuda bir sonraki bölümde, laktat paradoksunun açıklanmasına yönelik öne sürülen başlıca fizyolojik mekanizmalar ele alınacaktır.

Laktat Paradoksu Kavramının Tarihsel Gelişimi



Şekil 2. Laktat paradoksu kavramının tarihsel gelişimi: Laktat paradoksu kavramının ortaya çıkışı, tarihsel gelişimi ve günümüzdeki fizyolojik yorumları kronolojik olarak özetlenmiştir. Şekilde, yüksek irtifada akut hipoksi ve aklimatizasyon sonrasında gözlenen laktat yanıtlarına ilişkin temel gözlemler ile paradoksun çok faktörlü fizyolojik bir adaptasyon modeli çerçevesinde değerlendirilmesine uzanan kavramsal gelişim gösterilmektedir. Ayrıca klasik fizyolojik beklenti ile aklimatizasyon sonrasında gözlenen beklenenden düşük pik kan laktat yanıtı arasındaki temel farklılık şematik olarak sunulmuştur.

4. Laktat Paradoksunun Olası Mekanizmaları

Önceki bölümlerde laktat metabolizmasının temel fizyolojisi ile yüksek irtifada gözlenen laktat yanıtının tarihsel gelişimi ele alınmıştır. Bu çerçevede, laktat paradoksunun

yalnızca gözlemsel bir fenomen olmadığını; aksine egzersiz metabolizmasının çok sayıda fizyolojik bileşeninin yeniden düzenlenmesi ile ilişkili olabileceğini göstermektedir. Günümüzde laktat paradoksunu açıklamak amacıyla farklı mekanizmalar öne sürülmüş olmakla birlikte, mevcut kanıtlar bu olgunun tek bir fizyolojik süreçle açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. Laktat paradoksunun ortaya çıkmasına katkı sağlayan başlıca fizyolojik mekanizmaların etkileşimi Şekil 4'te bütüncül olarak sunulmuştur. Bunun yerine, metabolik, hormonal ve nöromüsküler süreçlerin birlikte etkili olduğu çok faktörlü bir adaptasyon modeli daha olası görünmektedir (Hochachka ve ark., 2002; Van Hall ve ark., 2009). Bu bölümde laktat paradoksunu açıklamak amacıyla öne sürülen başlıca fizyolojik mekanizmalar mevcut bilimsel kanıtlar doğrultusunda değerlendirilecektir.

4.1 Azalmış glikolitik akış

Laktat paradoksunu açıklamak için öne sürülen en erken hipotezlerden biri, kronik hipoksi koşullarında egzersiz sırasında kas içi glikolitik akışın azalmasıdır. Bu yaklaşıma göre aklimatizasyon süreci, glikolitik metabolizmanın düzenlenmesinde değişimlere yol açarak pirüvat üretimini sınırlayabilir ve böylece laktat oluşumunun azalmasına katkı sağlayabilir. Bu mekanizma, özellikle Hochachka ve arkadaşları (2002) tarafından önerilen metabolik kontrol modeliyle ilişkilendirilmiş; hipoksi altında ATP üretimi ile ATP kullanımı arasındaki metabolik eşleşmenin daha sıkı hale gelebileceği ileri sürülmüştür.

Glikolitik akışın azalması, yalnızca substrat akışındaki değişimlerle değil aynı zamanda glikolitik enzim aktivitesindeki düzenlemelerle de ilişkilendirilmektedir. Örneğin fosfofruktokinaz ve pirüvat kinaz gibi anahtar glikolitik enzimlerin aktivitesindeki değişimler, glikolizin hızını doğrudan etkileyebilir. Bunun yanında laktat dehidrogenaz (LDH) aktivitesindeki değişimlerin de pirüvatın laktata dönüşüm oranını modüle edebileceği düşünülmektedir (Andersen ve ark., 2001; Costa Leite ve ark., 2007; Tanner ve ark., 2018). Kas glikojen kullanımındaki değişimler de bu süreçte rol oynayabilir; zira kronik hipoksi koşullarında glikojen metabolizmasının düzenlenmesinde farklılıklar gözlenebilmektedir (Parolin ve ark., 2000).

Bununla birlikte, bazı çalışmalar, aklimatizasyon sonrasında aktif kasın laktat üretim kapasitesinde belirgin bir azalma olmadığını göstermiştir. Bu bulgular, paradoksun yalnızca glikolitik akışın baskılanmasıyla açıklanamayabileceğini ve laktatın üretim ile kullanım arasındaki dengenin daha karmaşık fizyolojik düzenleme mekanizmaları tarafından kontrol edildiğini düşündürmektedir (Van Hall ve ark., 2009).

Azalmış glikolitik akış hipotezi, laktat paradoksunu üretim düzeyindeki değişimler üzerinden açıklayan önemli bir yaklaşım olmakla birlikte, mevcut kanıtlar bu mekanizmanın tek başına yeterli olmadığını göstermektedir.

4.2 Mitokondriyal adaptasyon

Laktat paradoksuna yönelik ikinci önemli açıklama, kronik hipoksi sırasında kas hücresinde meydana gelen metabolik ve mitokondriyal kontrol adaptasyonları ile ilişkilidir (Hochachka ve ark., 2002). Bu görüşe göre aklimatizasyon süreci, hücresel ATP üretim ve

ATP kullanım yolları arasındaki metabolik kontrolün yeniden düzenlenmesine yol açabilir. ATP arzı ile ATP talebi arasındaki bu daha sıkı eşleşme, egzersiz sırasında metabolit homeostazının daha iyi korunmasını sağlayarak glikolitik aktivasyonu sınırlayabilir. Bu durum, laktat üretim sinyalinin azalmasına ve egzersiz sırasında kan laktat birikiminin beklenenden daha düşük düzeylerde gerçekleşmesine katkıda bulunabilir.

Mitokondriyal adaptasyon hipotezi aynı zamanda ATP turnover ve hücresel enerji dengesi ile de ilişkilidir (Murray, 2009). Bu metabolik yeniden düzenlenme, egzersiz sırasında hücresel ADP/ATP oranının daha düşük düzeylerde korunmasına ve glikolitik metabolizmanın aşırı aktive olmamasına katkı sağlayabilir (Hochachka ve ark., 2002). Böyle bir metabolik düzenleme, pirüvatın oksidatif yollara yönlendirilmesini kolaylaştırarak laktat oluşumunu sınırlayabilir.

Ancak mitokondriyal adaptasyonların yönü ve büyüklüğü konusunda literatürde tam bir görüş birliği bulunmamaktadır. Bazı çalışmalar kronik hipoksinin oksidatif kapasiteyi koruduğunu veya artırdığını ileri sürerken, diğerleri belirgin bir değişim olmadığını bildirmiştir (Murray, 2009). Bu nedenle mitokondriyal mekanizmaların laktat paradoksuna katkısı, egzersiz protokolü, irtifa düzeyi ve aklimatizasyon süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir.

Mitokondriyal adaptasyonlar pirüvatın oksidatif kullanımını artırarak laktat oluşumunu sınırlayabilecek bir mekanizma sunmaktadır; ancak mevcut kanıtlar bu sürecin paradoksun tek belirleyicisi olmadığını göstermektedir.

4.3 Sempatik aktivite değişimi

Hipoksi koşullarında ortaya çıkan nöroendokrin yanıtlar da laktat paradoksunun açıklanmasında önemli bir rol oynayabilir. Akut hipoksi sırasında sempatik sinir sistemi aktivitesinin artması ve katekolamin düzeylerinin yükselmesi, kas glikojenolizini ve glikolitik metabolizmayı uyararak laktat üretimini artırabilir. Bu nedenle akut hipoksiye maruz kalındığında egzersiz sırasında kan laktat düzeylerinin yükselmesi beklenen bir durumdur (Parolin ve ark., 2000). Bununla birlikte aklimatizasyon süreci ilerledikçe sempatik yanıtın düzenlenmesinde değişimler ortaya çıkabilir (Calbet, 2003). Kronik hipoksi koşullarında hormonal yanıtın yeniden düzenlenmesi, aynı mutlak egzersiz yükünde glikolitik metabolizmanın daha düşük düzeyde aktive olmasına katkı sağlayabilir (Hochachka ve ark., 2002). Bu durum, akut ve kronik hipoksi koşullarında gözlenen farklı laktat yanıtlarını açıklamak için öne sürülen mekanizmalardan biridir (Van Hall ve ark., 2009). Ancak sempatik aktivitedeki değişimler tek başına laktat paradoksunu açıklamak için yeterli görünmemektedir. Çünkü laktat üretimi yalnızca hormonal faktörlerden değil, aynı zamanda kas rekrutmanı, oksidatif metabolizma ve substrat kullanımı gibi birçok fizyolojik süreçten etkilenmektedir (Brooks ve ark., 1986; Mazzeo ve ark., 1994).

Sempatik aktivitenin akut ve kronik hipoksi koşullarında farklılaşması, egzersiz sırasında glikolitik metabolizmanın düzenlenmesini etkileyerek laktat yanıtındaki değişimlere katkıda bulunabilir; ancak bu mekanizma diğer metabolik süreçlerle birlikte değerlendirilmelidir.

4.4 Kas tampon kapasitesi

Kas içi tampon kapasitesi, egzersiz sırasında ortaya çıkan metabolik asidozun düzenlenmesinde önemli rol oynayan bir faktördür. Yoğun egzersiz sırasında glikolitik metabolizmanın hızlanmasıyla birlikte hidrojen iyonlarının (H^+) birikimi artar ve kas içi pH düşebilir. Kas tampon sistemleri bu asidik yükün dengelenmesine katkı sağlayarak kas kasılmasının sürdürülebilirliğini destekler (Lancha Junior ve ark., 2015).

Yüksek irtifa koşullarında tampon kapasitesindeki değişimler, egzersiz toleransını ve egzersizin sonlanma noktasını etkileyebilir (Lancha Junior ve ark., 2015; van Hall ve ark., 2001). Eğer hipoksi koşullarında egzersiz daha erken sonlanıyorsa, maksimal egzersiz sırasında ölçülen pik laktat düzeyleri de daha düşük olabilir. Bu nedenle bazı araştırmacılar laktat paradoksunun bir kısmının egzersizin erken sonlanması ve buna bağlı olarak maksimal glikolitik yüklenmenin gerçekleşmemesi ile ilişkili olabileceğini öne sürmüştür (Grassi ve ark., 2001). Bununla birlikte tampon kapasitesi, paradoksun temel nedeni olmaktan ziyade egzersiz sırasında ortaya çıkan metabolik yanıtların büyüklüğünü etkileyen bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Kas tampon kapasitesi, egzersiz sırasında oluşan asidik yükün düzenlenmesinde rol oynayarak laktat yanıtının büyüklüğünü dolaylı biçimde etkileyebilir; ancak laktat paradoksunun temel belirleyicisi olarak kabul edilmemektedir.

4.5 Substrat kullanımı kaymaları

Yüksek irtifada egzersiz sırasında enerji üretiminde kullanılan substratların göreceli katkısı değişebilir. Özellikle karbonhidrat ve yağ oksidasyonu arasındaki denge, hipoksik ortamda farklı bir şekilde düzenlenebilir. Bu durum laktat üretimi ve kullanımını da etkileyebilir (Mazzeo, 2008).

Substrat kullanımı açısından önemli bir nokta, egzersiz yoğunluğunun mutlak ve göreceli olarak farklı şekillerde değerlendirilmesidir. Yüksek irtifada maksimal oksijen tüketimi (VO_{2max}) azaldığı için, deniz seviyesinde orta şiddette kabul edilen bir egzersiz yükü irtifada daha yüksek göreceli yoğunluğa karşılık gelebilir. Böyle bir göreceli yoğunluk artışı karbonhidrat kullanımını artırarak glikolitik metabolizmayı etkileyebilir (Griffiths ve ark., 2019). Bununla birlikte metabolik sistemler arasındaki yeniden düzenlenme, pirüvatın oksidatif metabolizmaya yönlendirilmesini kolaylaştırarak net laktat birikimini sınırlayabilir. Dolayısıyla substrat kullanımındaki değişimler, laktat paradoksunun oluşumunda tek yönlü bir mekanizma olarak değil, metabolik sistemler arasındaki etkileşimin bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Brooks ve ark., 2022).

Substrat kullanımı kaymaları, egzersiz yoğunluğu ve metabolik kontrol mekanizmaları ile değerlendirildiğinde laktat yanıtının düzenlenmesinde önemli bir rol oynayabilir.

4.6 Merkezi (santral) faktörler

Literatürde laktat paradoksunu açıklamak amacıyla öne sürülen yaklaşımlardan biri, egzersiz performansının yalnızca periferik metabolik süreçlerle değil, aynı zamanda merkezi

sinir sistemi kaynaklı sınırlayıcı mekanizmalar ile de ilişkili olabileceğini ileri sürmektedir. Bu çerçevede hipoksik stres altında merkezi sinir sisteminin, organizmanın homeostazını korumak amacıyla kas rekrutmanını sınırlayabileceği öne sürülmektedir. Eğer egzersiz sırasında daha az sayıda motor ünite aktive ediliyorsa, aktif kas kütlesi azalır ve buna bağlı olarak toplam laktat üretimi de daha düşük olabilir. Bu durum özellikle tükenmeye kadar yapılan egzersiz testlerinde ölçülen kan laktat düzeylerinin beklenenden düşük çıkmasına katkıda bulunabilir (Noakes, 2010).

Ancak merkezi faktörler hipotezi literatürde tartışmalıdır ve bu mekanizmanın laktat paradoksunun temel nedeni olup olmadığı konusunda kesin bir görüş birliği bulunmamaktadır. Bununla birlikte merkezi sinir sistemi, egzersiz performansı ve kas rekrutmanı üzerindeki etkileri nedeniyle paradoksun oluşumunda potansiyel bir modülatör olarak değerlendirilmektedir (Burnley & Jones, 2018; Noakes & Gibson, 2004).

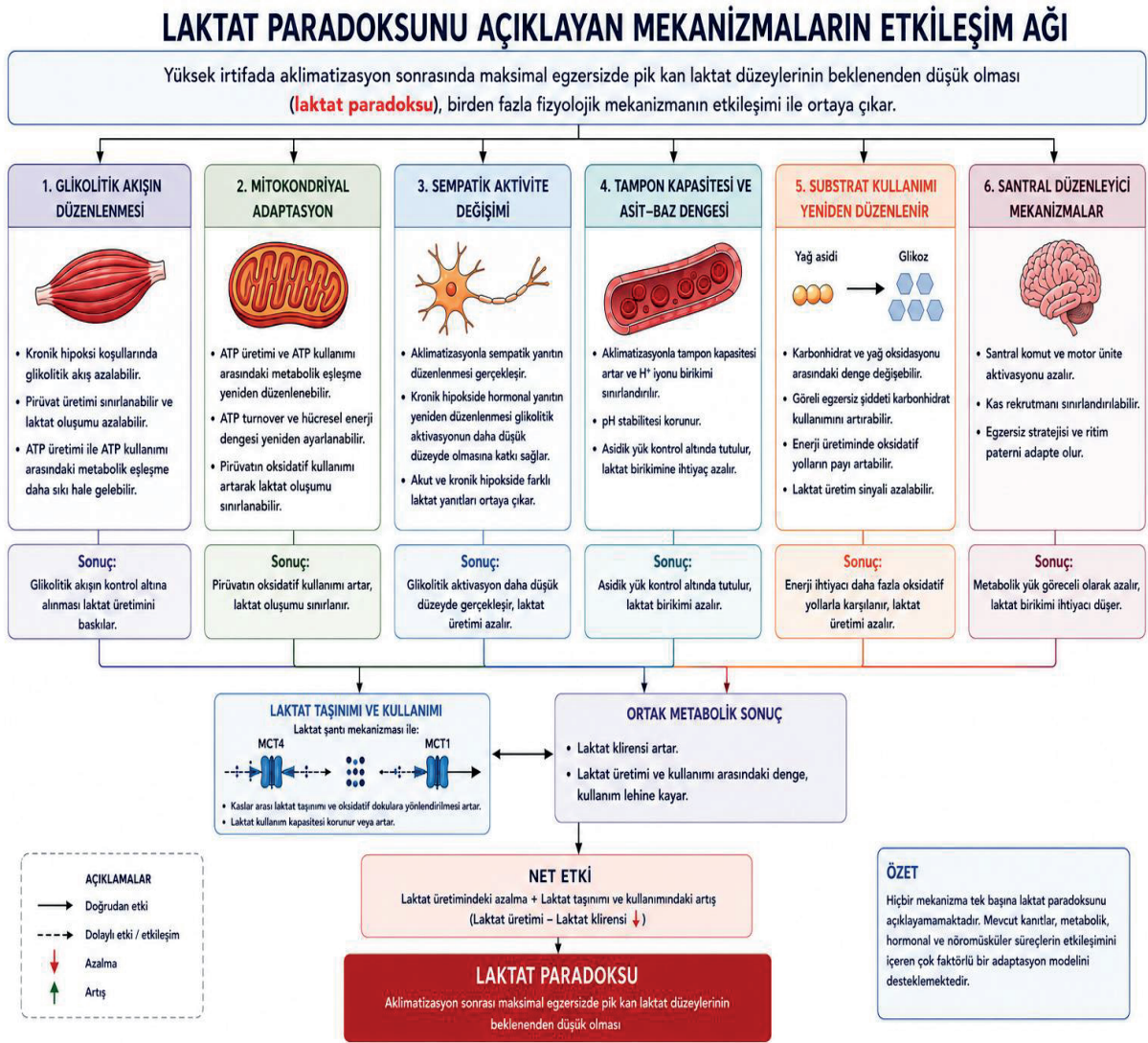
Merkezi faktörler, hipoksi koşullarında kas rekrutmanının sınırlanması yoluyla laktat üretimini dolaylı olarak etkileyebilir; ancak bu mekanizma hâlen tartışmalı olup diğer fizyolojik süreçlerle birlikte ele alınmalıdır.

Tablo 1. Laktat paradoksunu açıklamaya yönelik başlıca fizyolojik mekanizmaların genel özellikleri

Mekanizma	Hipoksiye bağlı temel değişim	Laktat paradoksuna olası katkısı
Glikolitik akışın düzenlenmesi	Glikolitik aktivitenin sınırlandırılması ve pirüvat oluşumunun azalması	Laktat üretiminin azalmasına katkı sağlayabilir.
Mitokondriyal adaptasyon	ATP üretimi ve ATP kullanımı arasındaki metabolik eşleşmenin yeniden düzenlenmesi	Pirüvatın oksidatif kullanımını destekleyerek laktat oluşumunu sınırlayabilir.
Sempatik aktivitedeki değişimler	Katekolamin yanıtında ve glikojenolizde meydana gelen değişiklikler	Egzersiz sırasında glikolitik uyarının azalmasına katkıda bulunabilir.
Tampon kapasitesi ve asit–baz dengesi	Hücre içi pH düzenlenmesi ve tamponlama kapasitesindeki değişimler	Kan laktat yanıtının farklılaşmasına katkı sağlayabilir.
Substrat kullanımındaki değişimler	Karbonhidrat ve yağ oksidasyonu arasındaki dengenin yeniden düzenlenmesi	Enerji metabolizmasının yeniden organize edilmesine katkıda bulunabilir.
Santral düzenleyici mekanizmalar	Merkezi sinir sistemi kaynaklı düzenleyici yanıtlar ve kas rekrutmanındaki değişimler	Egzersiz sırasında metabolik yükün sınırlandırılmasına katkı sağlayabilir.

4.7 Mekanizmaların Bütüncül Değerlendirilmesi

Bu bölümde ele alınan mekanizmalar, laktat paradoksunun tek bir fizyolojik süreçle açıklanamayacağını göstermektedir. Yüksek irtifaya aklimatizasyon sırasında ortaya çıkan metabolik yeniden düzenlenme; glikolitik metabolizmanın düzenlenmesi, oksidatif enerji üretiminin yeniden dengelenmesi, hormonal yanıtların değişmesi ve merkezi sinir sistemi kaynaklı sınırlayıcı mekanizmaların etkileşimi sonucunda şekillenmektedir. Bu nedenle laktat paradoksu, tek bir mekanizmanın sonucu olarak değil; metabolik, hormonal ve nöromusküler süreçlerin birlikte oluşturduğu çok faktörlü bir adaptasyonun yansıması olarak değerlendirilmelidir. Mevcut literatür, bu mekanizmaların birbirinden bağımsız değil, karşılıklı etkileşim içinde işlediğini göstermekte ve laktat paradoksunun ancak bu bütüncül fizyolojik yaklaşım çerçevesinde doğru yorumlanabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Laktat paradoksunu açıklayan mekanizmaların etkileşim ağı: Yüksek irtifada aklimatizasyon sonrasında gözlenen laktat paradoksunun ortaya çıkmasına katkıda bulunduğu öne sürülen başlıca fizyolojik mekanizmalar şematik olarak özetlenmiştir. Glikolitik akışın düzenlenmesi, mitokondriyal adaptasyonlar, sempatik aktivitedeki değişimler, tampon kapasitesi ve asit-baz dengesi, substrat kullanımının yeniden düzenlenmesi ile santral düzenleyici mekanizmaların karşılıklı etkileşimi; laktat taşınımı ve klirensindeki değişikliklerle birlikte değerlendirilerek net fizyolojik sonuca ulaşan bütüncül bir model sunulmaktadır. Şekil,

mevcut literatürde hiçbir mekanizmanın tek başına laktat paradoksunu açıklamak için yeterli olmadığını, olgunun çok faktörlü bir adaptasyon süreci olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Sonuç

Bu kitap bölümünde ele alınan fizyolojik kanıtlar birlikte değerlendirildiğinde, laktat paradoksunun tek bir metabolik mekanizma ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir adaptasyon sürecini yansıttığı anlaşılmaktadır. Yüksek irtifada gözlenen laktat yanıtı, yalnızca laktat üretimindeki artış ya da azalışla açıklanabilecek basit bir değişim değildir. Aksine, hipoksik stres altında enerji üretimi, substrat kullanımı, laktat taşınımı, oksidatif metabolizma, hormonal yanıtlar ve merkezi düzenleyici süreçler arasında yeniden kurulan dinamik bir dengeyi temsil etmektedir (Hochachka ve ark., 2002; Van Hall ve ark., 2009).

Laktat metabolizmasına ilişkin güncel yaklaşımlar, laktatın yalnızca anaerobik metabolizmanın son ürünü olarak değerlendirilmesinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Laktat; glikolitik akışın devamlılığını destekleyen, redoks dengesinin korunmasına katkı sağlayan, farklı dokular arasında taşınabilen ve oksidatif metabolizmada enerji substratı olarak kullanılabilen aktif bir metabolittir. Bu nedenle yüksek irtifa koşullarında kan laktat düzeylerinde ortaya çıkan değişimler yorumlanırken yalnızca üretim miktarına odaklanmak yeterli değildir. Laktatın oluşumu kadar taşınımı, oksidasyonu, klirensi ve dokular arası kullanımı da dikkate alınmalıdır (Brooks, 2020; Brooks ve ark., 2022).

Laktat paradoksunun tarihsel gelişimi, bu olgunun tanımı ve yorumlanması konusunda literatürde tam bir görüş birliği bulunmadığını göstermektedir. Akut hipoksi sırasında artan laktat yanıtı ile aklimatizasyon sonrasında gözlenen daha düşük kan laktat düzeyleri arasındaki farklılık, paradoksun temelini oluşturmaktadır. Ancak bu yanıtın hangi referans koşula göre değerlendirileceği, egzersiz yoğunluğunun mutlak ya da göreceli olarak nasıl ele alınacağı ve aklimatizasyon süresinin laktat yanıtını ne yönde değiştirdiği hâlen tartışmalı konular arasındadır. Bu nedenle laktat paradoksu, sabit ve tek biçimli bir fizyolojik yanıt olarak değil, hipoksik maruziyetin süresine, egzersiz şiddetine ve bireysel adaptasyon düzeyine göre değişebilen dinamik bir fenomen olarak değerlendirilmelidir (Van Hall ve ark., 2009; West, 2007).

Bu bölümde incelenen mekanizmalar, laktat paradoksunun çok faktörlü yapısını açık biçimde ortaya koymaktadır. Azalmış glikolitik akış, mitokondriyal adaptasyonlar, sempatik aktivitedeki değişimler, kas tampon kapasitesi, substrat kullanımındaki kaymalar ve merkezi sinir sistemi kaynaklı düzenleyici süreçler paradoksun açıklanmasında farklı düzeylerde katkı sağlayabilir. Bununla birlikte mevcut kanıtlar, bu mekanizmalardan herhangi birinin tek başına laktat paradoksunu bütünüyle açıklamak için yeterli olmadığını göstermektedir. Daha tutarlı açıklama, bu mekanizmaların birbirinden bağımsız değil, karşılıklı etkileşim içinde işlediği bütüncül bir fizyolojik model içinde mümkün görünmektedir (Hochachka ve ark., 2002; Murray, 2009; Noakes, 2010). Laktat paradoksunun ortaya çıkmasına katkı sağlayan başlıca fizyolojik mekanizmalar arasındaki bu etkileşim Şekil 4'te bütüncül olarak özetlenmiştir.

Bu bağlamda laktat paradoksu, hipoksik ortamda organizmanın enerji homeostazını korumaya yönelik adaptif yanıtlarından biri olarak değerlendirilebilir. Aklimatizasyon sürecinde glikolitik metabolizmanın düzenlenmesi, oksidatif enerji üretiminin yeniden dengelenmesi, hormonal yanıtların farklılaşması ve merkezi sınırlayıcı mekanizmaların devreye girmesi, laktat yanıtının beklenen klasik modelden sapmasına katkıda bulunabilir. Dolayısıyla düşük kan laktat düzeyleri her zaman düşük metabolik aktivite ya da azalmış enerji talebi anlamına gelmemektedir; bunun yerine, üretim ve kullanım süreçleri arasındaki dengenin farklı bir fizyolojik düzeyde yeniden kurulduğunu gösterebilir (Brooks ve ark., 2022; Van Hall ve ark., 2009).

Sonuç olarak laktat paradoksu, yüksek irtifa fizyolojisinin yalnızca tarihsel olarak ilgi çekici bir gözlemi değil, aynı zamanda hipoksi altında enerji metabolizmasının nasıl yeniden organize edildiğini anlamak açısından önemli bir kavramsal çerçevedir. Bu olgunun doğru yorumlanabilmesi için laktat üretimi, taşınımı, oksidasyonu, klirensi ve merkezi düzenleyici süreçlerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmaların kas içi metabolik akış, mono karboksilat taşıyıcıları, mitokondriyal fonksiyonlar, sempatik yanıtlar ve farklı hipoksi modellerini birlikte ele alan bütüncül araştırma tasarımlarına yönelmesi, laktat paradoksunun fizyolojik temellerinin daha kapsamlı biçimde açıklanmasına katkı sağlayacaktır. Bu yönüyle laktat paradoksu, yüksek irtifa fizyolojisinin yanı sıra egzersiz metabolizması ve hipoksik adaptasyon alanlarında da önemini koruyan çok boyutlu bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu yönüyle laktat paradoksu yalnızca yüksek irtifa fizyolojisinin açıklanmaya çalışılan bir olgusu değil; aynı zamanda hipoksi altında insan metabolizmasının bütüncül organizasyonunu anlamaya katkı sağlayan önemli bir araştırma modeli olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Andersen, H. W., Solem, C., Hammer, K., & Jensen, P. R. (2001). Twofold reduction of phosphofructokinase activity in *Lactococcus lactis* results in strong decreases in growth rate and in glycolytic flux. *Journal of Bacteriology*, 183(11), 3458-3467.
- Arieff, A. I. (2013). *Hypoxia, metabolic acidosis, and the circulation*. Springer.
- Benítez-Muñoz, J. A., Cupeiro, R., Rubio-Arias, J. Á., Amigo, T., & González-Lamuño, D. (2024). Exercise influence on monocarboxylate transporter 1 (MCT1) and 4 (MCT4) in the skeletal muscle: A systematic review. *Acta Physiologica*, 240(3), e14083.
- Brooks, G. (1985). Lactate: glycolytic end product and oxidative substrate during sustained exercise in mammals—the “lactate shuttle”. In *Circulation, respiration, and metabolism: current comparative approaches* (pp. 208-218). Springer.
- Brooks, G. A. (2020). Lactate as a fulcrum of metabolism. *Redox biology*, 35, 101454.
- Brooks, G. A., Arevalo, J. A., Osmond, A. D., Leija, R. G., Curl, C. C., & Tovar, A. P. (2022). Lactate in contemporary biology: a phoenix risen. *The Journal of physiology*, 600(5), 1229-1251.
- Brooks, G. A. J. M., sports, s. i., & exercise. (1986). The lactate shuttle during exercise and recovery. *Medicine science in sports exercise*, 18(3), 360-368.
- Burnley, M., & Jones, A. M. (2018). Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European journal of sport science*, 18(1), 1-12.
- Cabrera, M. E., Saidel, G. M., & Kalhan, S. (1999). Lactate metabolism during exercise: analysis by an integrative systems model. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative Comparative Physiology*, 277(5), R1522-R1536.
- Calbet, J. A. (2003). Chronic hypoxia increases blood pressure and noradrenaline spillover in healthy humans. *The Journal of physiology*, 551(1), 379-386.
- Casado, A., Foster, C., Bakken, M., & Tjelta, L. I. (2023). Does lactate-guided threshold interval training within a high-volume low-intensity approach represent the “next step” in the evolution of distance running training? *International Journal of Environmental Research Public Health*, 20(5), 3782.
- Chicco, A. J., Le, C. H., Gnaiger, E., Dreyer, H. C., Muyskens, J. B., D'Alessandro, A., Nemkov, T., Hocker, A. D., Prezzi, J. E., & Wolfe, L. M. (2018). Adaptive remodeling of skeletal muscle energy metabolism in high-altitude hypoxia: lessons from AltitudeOmics. *Journal of biological chemistry*, 293(18), 6659-6671.
- Costa Leite, T., Da Silva, D., Guimarães Coelho, R., Zancan, P., & Sola-Penna, M. (2007). Lactate favours the dissociation of skeletal muscle 6-phosphofructo-1-kinase tetramers down-regulating the enzyme and muscle glycolysis. *Biochemical Journal*, 408(1), 123-130.
- Emhoff, C.-A. W., & Messonnier, L. A. (2023). Concepts of lactate metabolic clearance rate and lactate clamp for metabolic inquiry: a mini-review. *Nutrients*, 15(14), 3213.
- Forrer, A., Gaisl, T., Sevik, A., Meyer, M., Senteler, L., Lichtblau, M., Bloch, K. E., Ulrich, S., & Furian, M. (2023). Partial pressure of arterial oxygen in healthy adults at high altitudes: a systematic review and meta-analysis. *JAMA network open*, 6(6), e2318036.
- Forrer, A., Scheiwiller, P. M., Mademilov, M., Lichtblau, M., Seraliev, U., Marazhapov, N. H., Saxer, S., Bader, P., Appenzeller, P., & Aydaraliev, S. (2021). Exercise performance in central Asian highlanders: a cross-sectional study. *High Altitude Medicine Biology*, 22(4), 386-394.
- Grassi, B., Mognoni, P., Marzorati, M., Mattiotti, S., Marconi, C., & Cerretelli, P. (2001). Power and peak blood lactate at 5050 m with 10 and 30 s ‘all out’cycling. *Acta physiologica scandinavica*, 172(3), 189-194.

- Griffiths, A., Shannon, O., Matu, J., King, R., Deighton, K., & O'Hara, J. P. (2019). Response: Commentary on the effects of hypoxia on energy substrate use during exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 16(1), 61.
- Halestrap, A. P. (2013). Monocarboxylic acid transport. *Comprehensive physiology*, 3(4), 1611-1643.
- Heuberger, J. A., Gal, P., Stuurman, F. E., de Muinck Keizer, W. A., Mejia Miranda, Y., & Cohen, A. F. (2018). Repeatability and predictive value of lactate threshold concepts in endurance sports. *PloS one*, 13(11), e0206846.
- Hochachka, P., Beatty, C., Burelle, Y., Trump, M., McKenzie, D., & Matheson, G. (2002). The lactate paradox in human high-altitude physiological performance. *Physiology*, 17(3), 122-126.
- Joyner, M. J., & Dominelli, P. B. (2021). Central cardiovascular system limits to aerobic capacity. *Experimental physiology*, 106(12), 2299-2303.
- Kayser, B. (1996). Lactate during exercise at high altitude. *European journal of applied physiology occupational physiology*, 74(3), 195-205.
- Kayser, B., & Verges, S. (2013). Hypoxia, energy balance and obesity: from pathophysiological mechanisms to new treatment strategies. *Obesity reviews*, 14(7), 579-592.
- Kierans, S. J., & Taylor, C. T. (2024). Glycolysis: A multifaceted metabolic pathway and signaling hub. *Journal of Biological Chemistry*, 300(11), 107906.
- Kitaoka, Y., Hoshino, D., & Hatta, H. (2012). Monocarboxylate transporter and lactate metabolism. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 1(2), 247-252.
- Kobayashi, M. (2004). Fiber type-specific localization of monocarboxylate transporters MCT1 and MCT4 in rat skeletal muscle. *The Kurume medical journal*, 51(3-4), 253-261.
- Lancha Junior, A. H., de Salles Painelli, V., Saunders, B., & Artioli, G. G. (2015). Nutritional strategies to modulate intracellular and extracellular buffering capacity during high-intensity exercise. *Sports medicine*, 45(Suppl 1), 71-81.
- Lee, P., Chandel, N. S., & Simon, M. C. (2020). Cellular adaptation to hypoxia through hypoxia inducible factors and beyond. *Nature reviews Molecular cell biology*, 21(5), 268-283.
- Lundby, C., Saltin, B., & Van Hall, G. (2000). The 'lactate paradox', evidence for a transient change in the course of acclimatization to severe hypoxia in lowlanders. *Acta Physiologica Scandinavica*, 170(4), 265-269.
- Mallet, R. T., Burtscher, J., Pialoux, V., Pasha, Q., Ahmad, Y., Millet, G. P., & Burtscher, M. (2023). Molecular mechanisms of high-altitude acclimatization. *International journal of molecular sciences*, 24(2), 1698.
- Mazzeo, R., Brooks, G., Butterfield, G., Cymerman, A., Roberts, A., Selland, M., Wolfel, E., & Reeves, J. (1994). Beta-adrenergic blockade does not prevent the lactate response to exercise after acclimatization to high altitude. *Journal of Applied Physiology*, 76(2), 610-615.
- Mazzeo, R. S. (2007). Comments on Point: Counterpoint: "The lactate paradox does/does not occur during exercise at high altitude". *Journal of Applied Physiology*, 102(6), 2403-2405.
- Mazzeo, R. S. (2008). Physiological responses to exercise at altitude: an update. *Sports medicine*, 38(1), 1-8.
- Messonnier, L. A., Chatel, B., Emhoff, C.-A. W., Blervaque, L., & Oyono-Enguélé, S. (2021). Delayed rebound of glycemia during recovery following short-duration high-intensity exercise: Are there lactate and glucose metabolism interactions? *Frontiers in Nutrition*, 8, 734152.
- Midha, A. D., Zhou, Y., Queliconi, B. B., Barrios, A. M., Haribowo, A. G., Chew, B. T., Fong, C. O., Blecha, J. E., VanBrocklin, H., & Seo, Y. (2023). Organ-specific fuel rewiring in acute and

- chronic hypoxia redistributes glucose and fatty acid metabolism. *Cell metabolism*, 35(3), 504-516. e505.
- Murray, A. J. (2009). Metabolic adaptation of skeletal muscle to high altitude hypoxia: how new technologies could resolve the controversies. *Genome medicine*, 1(12), 117.
- Murray, A. J., Montgomery, H. E., Feelisch, M., Grocott, M. P., & Martin, D. S. (2018). Metabolic adjustment to high-altitude hypoxia: from genetic signals to physiological implications. *Biochemical Society Transactions*, 46(3), 599-607.
- Noakes, T., & Gibson, A. S. C. (2004). Logical limitations to the “catastrophe” models of fatigue during exercise in humans. *British journal of sports medicine*, 38(5), 648-649.
- Noakes, T. D. (2009). Evidence that reduced skeletal muscle recruitment explains the lactate paradox during exercise at high altitude. *Journal of Applied Physiology*, 106(2), 737-738.
- Noakes, T. D. (2010). The central governor model and fatigue during exercise. *Regulation of fatigue in exercise*, 1-26.
- Ogawa, T., Fujii, N., Kurimoto, Y., & Nishiyasu, T. (2019). Effect of hypobaria on maximal ventilation, oxygen uptake, and exercise performance during running under hypobaric normoxic conditions. *Physiological reports*, 7(3), e14002.
- Parolin, M. L., Spriet, L. L., Hultman, E., Hollidge-Horvat, M. G., Jones, N. L., & Heigenhauser, G. J. (2000). Regulation of glycogen phosphorylase and PDH during exercise in human skeletal muscle during hypoxia. *American Journal of Physiology-Endocrinology Metabolism*, 278(3), E522-E534.
- Payen, V. L., Mina, E., Van Hée, V. F., Porporato, P. E., & Sonveaux, P. (2020). Monocarboxylate transporters in cancer. *Molecular metabolism*, 33, 48-66.
- Pronk, M., Tiemessen, I., Hupperets, M. D., Kennedy, B. P., Powell, F. L., Hopkins, S. R., & Wagner, P. D. (2003). Persistence of the lactate paradox over 8 weeks at 3800 m. *High Altitude Medicine Biology*, 4(4), 431-443.
- Rabinowitz, J. D., & Enerbäck, S. (2020). Lactate: the ugly duckling of energy metabolism. *Nature metabolism*, 2(7), 566-571.
- Reeves, J. T., WOLFEL, E. E., GREEN, H. J., MAZZEO, R. S., YOUNG, A. J., SUTTON, J. R., & BROOKS, G. A. (1992). 10: Oxygen Transport During Exercise at Altitude and the Lactate Paradox: Lessons from Operation Everest II and Pikes Peak. *Exercise Sport Sciences Reviews*, 20(1), 275-296.
- Semenza, G. L. (2012). Hypoxia-inducible factors in physiology and medicine. *Cell*, 148(3), 399-408.
- Staes, M., Gyselinck, I., Goetschalckx, K., Troosters, T., & Janssens, W. (2024). Identifying limitations to exercise with incremental cardiopulmonary exercise testing: a scoping review. *European Respiratory Review*, 33(173).
- Tanner, L. B., Goglia, A. G., Wei, M. H., Sehgal, T., Parsons, L. R., Park, J. O., White, E., Toettcher, J. E., & Rabinowitz, J. D. (2018). Four key steps control glycolytic flux in mammalian cells. *Cell systems*, 7(1), 49-62. e48.
- Taylor, C. T., & Scholz, C. C. (2022). The effect of HIF on metabolism and immunity. *Nature Reviews Nephrology*, 18(9), 573-587.
- Theunissen, S., Balestra, C., Bolognési, S., Borgers, G., Vissenaeken, D., Obeid, G., Germonpré, P., Honoré, P. M., & De Bels, D. (2022). Effects of acute hypobaric hypoxia exposure on cardiovascular function in unacclimatized healthy subjects: A “rapid ascent” hypobaric chamber study. *International Journal of Environmental Research Public Health*, 19(9), 5394.
- van Der Zwaard, S., Brocherie, F., & Jaspers, R. T. (2021). Under the hood: skeletal muscle determinants of endurance performance. *Frontiers in sports active living*, 3, 719434.

- van Hall, G., Calbet, J. A., Søndergaard, H., & Saltin, B. (2001). The re-establishment of the normal blood lactate response to exercise in humans after prolonged acclimatization to altitude. *The Journal of physiology*, 536(3), 963-975.
- Van Hall, G., Lundby, C., Araoz, M., Calbet, J., Sander, M., & Saltin, B. (2009). The lactate paradox revisited in lowlanders during acclimatization to 4100 m and in high-altitude natives. *The Journal of physiology*, 587(5), 1117-1129.
- Wang, Q.-H., Wu, R.-X., Ji, J.-N., Zhang, J., Niu, S.-F., Tang, B.-G., Miao, B.-B., & Liang, Z.-B. (2024). Integrated transcriptomics and metabolomics reveal changes in cell homeostasis and energy metabolism in *Trachinotus ovatus* in response to acute hypoxic stress. *International journal of molecular sciences*, 25(2), 1054.
- West, J. B. (1986). Everest: The Testing Place. In: American Lung Association.
- West, J. B. (2007). Point: the lactate paradox does/does not occur during exercise at high altitude. *Journal of Applied Physiology*, 102(6), 2398-2399.
- Zhang, L., Xin, C., Wang, S., Zhuo, S., Zhu, J., Li, Z., Liu, Y., Yang, L., & Chen, Y. (2024). Lactate transported by MCT1 plays an active role in promoting mitochondrial biogenesis and enhancing TCA flux in skeletal muscle. *Science Advances*, 10(26), eadn4508.

BÖLÜM 2

ANTRENMAN YÜKÜNÜN İZLENMESİ VE YÖNETİMİ: PERFORMANS VE TOPARLANMA PERSPEKTİFİ

Rifat SARI¹

¹ Öğr. Gör. Dr. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, rifat.sari@gop.edu.tr, orcid no: 0009-0000-8770-4091

GİRİŞ

Sportif performansın geliştirilmesi, sporcunun yalnızca antrenman uyaranlarına maruz bırakılmasıyla değil, uygulanan antrenman yükünün bireysel özellikler doğrultusunda planlanması, izlenmesi ve uygun toparlanma süreçleriyle birlikte yönetilmesiyle mümkündür. Antrenman, organizmada homeostatik dengenin geçici olarak bozulmasına ve buna bağlı olarak yorgunluk oluşmasına neden olurken, yeterli toparlanma koşullarının sağlanması durumunda fizyolojik ve psikolojik adaptasyonların ortaya çıkmasını ve performans kapasitesinin gelişmesini sağlar. Bu nedenle sportif performans açısından temel amaç, mümkün olan en yüksek antrenman yükünü uygulamak değil, sporcunun uyum sağlayabileceği ve toparlanabileceği **optimal antrenman yükünü** belirlemek ve sürdürülebilir biçimde yönetmektir (Kellmann et al., 2018; Soligard et al., 2016).

Antrenman yükü, sporcunun antrenman ve müsabaka sırasında maruz kaldığı fiziksel, fizyolojik ve psikolojik stresin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Literatürde antrenman yükünün değerlendirilmesinde genel olarak **dış yük (external load)** ve **iç yük (internal load)** ayrımından yararlanılmaktadır. Dış yük, sporcunun gerçekleştirdiği fiziksel çalışmanın ölçülebilir özelliklerini ifade ederken; iç yük, söz konusu fiziksel uyarana karşı organizmanın verdiği fizyolojik ve psikolojik yanıtı ifade etmektedir (Bourdon et al., 2017; Soligard et al., 2016). Kat edilen mesafe, koşu hızı, ivmelenme ve yavaşlama sayıları, tekrar sayısı, kaldırılan toplam ağırlık ve mekanik güç gibi değişkenler dış yükün belirlenmesinde kullanılabilirken; kalp atım hızı, kan laktatı, oksijen tüketimi ve algılanan efor düzeyi gibi göstergeler iç yükün değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

Dış ve iç yük arasındaki ayrım, antrenman yükünün bireyselleştirilmesi açısından özellikle önemlidir. Çünkü aynı dış yük, farklı sporcularda farklı düzeylerde fizyolojik ve psikolojik stres oluşturabilmektedir. Sporcunun antrenman geçmişi, fiziksel uygunluk düzeyi, yorgunluk durumu, uyku kalitesi, beslenme durumu, psikolojik stres düzeyi ve çevresel koşullar gibi birçok faktör, belirli bir antrenman uyaranına verilen bireysel yanıtı değiştirebilmektedir (Soligard et al., 2016). Bu nedenle yalnızca gerçekleştirilen işi veya antrenman hacmini değerlendirmek, sporcunun antrenmana verdiği gerçek yanıtın ortaya konulması açısından yetersiz kalabilir. Nitekim antrenman yüklerinin izlenmesine ilişkin uluslararası uzlaşma raporlarında, dış ve iç yük göstergelerinin birlikte değerlendirilmesi ve bireysel sporcu yanıtlarının dikkate alınması önerilmektedir (Bourdon et al., 2017).

Toparlanma, antrenman yükünün yönetilmesinde pasif bir süreç olarak değerlendirilmemelidir. Aksine toparlanma; antrenman sırasında oluşan yorgunluğun azaltılması, homeostatik dengenin yeniden oluşturulması ve organizmanın bir sonraki antrenman uyarısına hazırlanmasını kapsayan dinamik ve çok boyutlu bir süreçtir. Fizyolojik toparlanmanın yanı sıra psikolojik toparlanma, uyku, beslenme ve hidrasyon gibi faktörler de sporcunun antrenman yükünü tolere etme kapasitesini etkileyebilmektedir (Kellmann et al., 2018). Bu nedenle antrenman yükünün yönetimi yalnızca antrenman programının düzenlenmesini değil, aynı zamanda sporcunun toparlanma durumunun düzenli olarak değerlendirilmesini de gerektirmektedir.

Antrenman yükünün izlenmesi aynı zamanda sakatlık ve hastalık riskinin yönetimi açısından da önem taşımaktadır. Uluslararası Olimpiyat Komitesi'nin yük ve sakatlık konusundaki uzlaşı raporunda, özellikle yükte meydana gelen hızlı değişimlerin, yüksek rekabet yoğunluğunun ve yetersiz yük yönetiminin sporcu sağlığı açısından önemli riskler oluşturabileceği vurgulanmıştır (Soligard et al., 2016). Bununla birlikte, antrenman yükü ile sakatlık arasındaki ilişkinin karmaşık olduğu ve tek bir yük göstergesinin sakatlık riskini güvenilir biçimde öngörmesinin mümkün olmadığı belirtilmektedir (Anderson et al., 2017). Bu nedenle yük izleme sistemlerinin temel amacı yalnızca sakatlığı “tahmin etmek” değil; antrenman yanıtını anlamak, yorgunluk ve toparlanma durumundaki değişimleri belirlemek ve antrenman kararlarının bireyselleştirilmesine katkı sağlamaktır.

Son yıllarda giyilebilir teknolojiler, GPS tabanlı sistemler, ivmeölçerler, kalp atım hızı monitörleri ve mobil uygulamalar gibi teknolojik araçların yaygınlaşması, antrenman ve müsabaka yükünün yüksek frekansta izlenmesine olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, daha fazla verinin toplanması tek başına daha doğru antrenman kararları anlamına gelmemektedir. Sporcu izleme sürecinde asıl önemli olan, elde edilen verilerin güvenilir biçimde yorumlanması ve antrenman kararlarına dönüştürülmesidir. Sporcu izleme döngüsünde dış yükün belirlenmesi, sporcunun bu yüke verdiği iç yanıtın değerlendirilmesi, sporcunun yükü tolere edip etmediğinin incelenmesi ve bir sonraki antrenman uyarısına hazır olup olmadığının belirlenmesi birbirini tamamlayan aşamalar olarak ele alınmaktadır (Bourdon et al., 2017; Halson, 2014).

Bu noktada, antrenman yükünün izlenmesi ile antrenman yükünün yönetimi arasında önemli bir ayrım bulunmaktadır. **İzleme**, sporcunun maruz kaldığı yükün ve bu yüke verdiği yanıtın sistematik olarak ölçülmesini ifade ederken; **yönetim**, elde edilen bilgiler doğrultusunda

antrenman içeriği, hacmi, şiddeti, sıklığı ve toparlanma süreçlerinde gerekli düzenlemelerin yapılmasını ifade etmektedir. Dolayısıyla etkili bir yük yönetimi sistemi, yalnızca veri toplama sürecinden ibaret olmayıp, verilerin antrenör ve destek ekibi tarafından anlamlandırılarak antrenman kararlarına dönüştürülmesini gerektirmektedir (Halsen, 2014).

Sonuç olarak antrenman yükünün izlenmesi ve yönetimi, günümüz spor biliminde performans geliştirme ve sporcu sağlığının korunması açısından merkezi bir konuma sahiptir. Etkili bir yük yönetimi; **uygun yükün uygulanması, sporcunun bu yüke verdiği yanıtın izlenmesi, toparlanma durumunun değerlendirilmesi ve elde edilen bilgiler doğrultusunda antrenman programının yeniden düzenlenmesi** süreçlerinin bütünleşik biçimde yürütülmesini gerektirir. Bu yaklaşım, antrenman yükünü yalnızca nicel bir değişken olarak değil, performans, yorgunluk, toparlanma, adaptasyon ve sporcu sağlığı arasındaki dinamik etkileşimin bir parçası olarak değerlendirmektedir. Bu bölümde antrenman yükünün kavramsal temelleri, iç ve dış yük göstergeleri, yük izleme yöntemleri, toparlanmanın değerlendirilmesi, performans-yük ilişkisi ve antrenman yükünün bireyselleştirilerek yönetilmesine yönelik güncel yaklaşımlar ele alınacaktır.

1. Antrenman Yükünün Kavramsal Temelleri

Antrenman yükü, sportif performansın geliştirilmesi amacıyla uygulanan antrenman uyarılarının sporcu üzerinde oluşturduğu toplam stres olarak ele alınmaktadır. Bununla birlikte, antrenman yükü yalnızca gerçekleştirilen fiziksel iş miktarını ifade eden basit bir kavram değildir. Antrenman sürecinde ortaya çıkan yük; uygulanan egzersizin hacmi, şiddeti, süresi, sıklığı ve niteliğinin yanı sıra sporcunun bu uyarana verdiği fizyolojik, biyomekanik ve psikolojik yanıtları da kapsamaktadır. Bu nedenle antrenman yükü, birden fazla boyutu bulunan ve farklı ölçüm yöntemleriyle operasyonel olarak değerlendirilebilen çok boyutlu bir yapı olarak kabul edilmektedir (Impellizzeri et al., 2019, 2022).

Antrenman yükünün kavramsallaştırılmasında en yaygın yaklaşımlardan biri **iç antrenman yükü (internal training load)** ve **dış antrenman yükü (external training load)** ayrımıdır. Bu yaklaşım, antrenman sırasında sporcunun gerçekleştirdiği fiziksel iş ile bu işe karşı organizmanın verdiği yanıtı birbirinden ayırmaktadır. Dış yük, sporcunun gerçekleştirdiği antrenman faaliyetinin ölçülebilir özelliklerini ifade ederken, iç yük aynı antrenman uyarısına karşı sporcunun gösterdiği bireysel fizyolojik ve psikolojik yanıtı ifade etmektedir (Bourdon et al., 2017; Impellizzeri et al., 2019). Bu iki yapı birbirinden bağımsız değildir; aksine dış yük,

organizma üzerinde belirli bir iç yük oluşturmakta ve ortaya çıkan iç yanıt sporcunun bireysel özelliklerine göre değişebilmektedir.

Bu ayırım, antrenman yükünün neden yalnızca egzersizin fiziksel özellikleri üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini açıklamaktadır. Örneğin aynı mesafeyi aynı hızda koşan iki sporcu, antrenman geğmişleri, aerobik kapasiteleri, yorgunluk düzeyleri veya psikolojik durumları farklı olduğu için farklı kalp atım hızı ve algılanan efor yanıtları gösterebilir. Dolayısıyla aynı dış yük, farklı sporcularda farklı iç yükler oluşturabilmektedir. Bu durum, antrenman yükünün değerlendirilmesinde bireyselleştirmenin temel bir ilke olduğunu göstermektedir (Halsen, 2014; Impellizzeri et al., 2019).

Antrenman yükü aynı zamanda **uyaran (stimulus), stres ve adaptasyon** arasındaki ilişkinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Antrenman sırasında uygulanan yük organizmada çeşitli fizyolojik ve mekanik stresler oluşturmakta, bu stresler uygun toparlanma koşullarıyla birleştiğinde organizmanın antrenman uyarana uyum sağlamasına katkıda bulunmaktadır. Dolayısıyla antrenman yükünün temel amacı yalnızca sporcuyu yormak değil, uygun düzeyde stres oluşturarak uzun vadeli adaptasyonu ve performans gelişimini sağlamaktır (Bourdon et al., 2017; Impellizzeri et al., 2019).

Bu perspektiften bakıldığında antrenman yükünün yönetiminde temel sorun, “ne kadar yük uygulanmalıdır?” sorusundan ziyade, “belirli bir sporcu için hangi yük, hangi zamanda ve hangi koşullarda uygun adaptasyonu sağlayabilir?” sorusunun yanıtlanmasıdır. Çünkü antrenman yüküne verilen yanıt; sporcunun antrenman geğmişi, fiziksel kapasitesi, yaşı, cinsiyeti, uyku ve beslenme durumu, psikolojik stres düzeyi ve önceki yüklenmeleri gibi birçok faktörden etkilenebilmektedir (Halsen, 2014; Soligard et al., 2016). Bu nedenle modern antrenman yaklaşımında yükün niceliksel olarak belirlenmesinin yanında, sporcunun bu yüke verdiği yanıtın da düzenli biçimde izlenmesi gerekmektedir.

Antrenman yükünün değerlendirilmesinde bir diğer önemli konu, yükün tek bir göstergeyle açıklanamayacağıdır. Örneğin toplam koşu mesafesi sporcunun geręekleřtirdięi fiziksel iş hakkında bilgi verebilir; ancak bu mesafe içerisinde yüksek hızlı koşuların, ivmelenmelerin ve yön değiştirmelerin ne ölçüde yer aldığı hakkında tek başına yeterli bilgi sağlamayabilir. Benzer şekilde yalnızca kalp atım hızının izlenmesi de özellikle kısa süreli yüksek şiddetli aktivitelerde veya direnç antrenmanlarında kas-iskelet sistemine binen mekanik yükü tam olarak yansıtmayabilir. Bu nedenle farklı yük göstergelerinin bir arada

değerlendirilmesi, antrenman yükünün daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına olanak sağlamaktadır (Bourdon et al., 2017; Halson, 2014).

Literatürde ayrıca antrenman yükünün **maruziyet (exposure)** ve **doz (dose)** kavramlarıyla birlikte ele alınması önerilmektedir. Bu yaklaşıma göre dış yük, sporcunun antrenman sırasında maruz kaldığı fiziksel uyarıyı temsil ederken, iç yük söz konusu maruziyetin organizmada oluşturduğu bireysel yanıtı temsil etmektedir. Dolayısıyla antrenman yükü, yalnızca yapılan işin miktarı değil, bu işin sporcu üzerindeki etkisiyle birlikte değerlendirilmesi gereken bir yapı olarak ele alınmalıdır (Impellizzeri et al., 2022).

2. İç ve Dış Antrenman Yükü

2.1. Dış Antrenman Yükü

Dış antrenman yükü, sporcunun antrenman veya müsabaka sırasında gerçekleştirdiği fiziksel çalışmanın doğrudan ölçülebilen özelliklerini ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle dış yük, sporcunun “ne yaptığı” sorusuna yanıt vermektedir (Bourdon et al., 2017). Dış yük göstergeleri spor dalına göre farklılık gösterebilmekte ve özellikle takım sporlarında teknolojik gelişmeler sayesinde ayrıntılı biçimde ölçülebilmektedir.

Koşu temelli takım sporlarında toplam kat edilen mesafe, farklı hız bölgelerinde kat edilen mesafe, yüksek hızlı koşu mesafesi, sprint mesafesi, ivmelenme ve yavaşlama sayıları, maksimum hız ve oyuncu yükü gibi değişkenler dış yük göstergeleri arasında yer almaktadır. GPS ve benzeri konumlandırma sistemleri, ivmeölçerler ve diğer giyilebilir teknolojiler bu göstergelerin antrenman ve müsabaka sırasında sürekli olarak izlenmesine olanak sağlamaktadır (Bourdon et al., 2017). Özellikle futbol gibi yüksek yoğunluklu ve aralıklı hareketlerin bulunduğu spor dallarında toplam mesafenin yanı sıra yüksek hızlı koşular, sprintler ve ivmelenmelerin izlenmesi antrenman yükünün daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Dayanıklılık sporlarında ise dış yük; koşu veya bisiklet gibi aktivitelerde kat edilen mesafe, hız, süre, güç çıktısı veya çalışma hacmi üzerinden değerlendirilebilmektedir. Direnç antrenmanlarında ise set sayısı, tekrar sayısı, kullanılan yük, kaldırılan toplam hacim ve tekrar $\times$ yük gibi değişkenler dış yükün belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu nedenle dış yük göstergelerinin seçimi, spor dalının ve gerçekleştirilen antrenman türünün özelliklerine göre yapılmalıdır.

Dış yükün önemli avantajlarından biri, antrenmanın fiziksel bileşenlerinin objektif olarak izlenebilmesine olanak sağlamasıdır. Bununla birlikte dış yük tek başına sporcunun organizmasında oluşan gerçek stres düzeyini açıklamakta yetersiz kalabilir. Örneğin antrenman sırasında aynı mesafeyi ve aynı hızları gerçekleştiren iki sporcunun fizyolojik yanıtları farklı olabilir. Bu nedenle dış yük verilerinin i yk göstergeleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Impellizzeri et al., 2019). Takım sporları üzerine yapılan meta-analitik çalışmalar da i ve dış yük göstergeleri arasında anlamlı ilişkiler bulunabildiğini, ancak bu ilişkilerin kullanılan yük göstergesine ve antrenman türüne göre değişebildiğini göstermektedir (McLaren et al., 2018).

2.2. İ Antrenman Yükü

İ antrenman yükü, sporcunun uygulanan dış yüke karşı verdiği bireysel fizyolojik ve psikolojik yanıtı ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle i yk, sporcunun “yaptığı antrenmanı ne ölçüde zorlayıcı olarak deneyimlediği ve organizmasının bu yüke nasıl yanıt verdiği” ile ilişkilidir (Bourdon et al., 2017; Impellizzeri et al., 2019). Bu nedenle i yk, aynı antrenman programının farklı sporcularda neden farklı etkiler oluşturabileceğini anlamada önemli bir göstergedir.

İ yükün değerlendirilmesinde kalp atım hızı, kalp atım hızı bölgeleri, kalp atım hızından türetilen antrenman dürtüsü (TRIMP), kan laktatı, oksijen tüketimi ve algılanan efor düzeyi gibi göstergeler kullanılmaktadır (Halsen, 2014). Bunlar arasında **algılanan efor (Rating of Perceived Exertion; RPE)**, uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve farklı spor dallarında kullanılabilmesi nedeniyle antrenman yükünün izlenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Özellikle **seans algılanan eforu (session-RPE; sRPE)** yöntemi, antrenman yükünü belirlemek amacıyla kullanılan pratik yöntemlerden biridir. Bu yöntemde sporcunun antrenman sonrasındaki genel algılanan efor düzeyi ile antrenman süresi birlikte değerlendirilmekte ve genel olarak:

$$\text{Antrenman yükü} = \text{Antrenman süresi (dk)} \times \text{sRPE}$$

formülü kullanılmaktadır. Örneğin 60 dakika süren ve sporcunun 0–10 ölçeğinde 7 olarak değerlendirdiği bir antrenmanın sRPE yükü 420 AU olarak hesaplanabilir. sRPE yönteminin

farklı spor dallarında ve farklı sporcu gruplarında geçerli ve güvenilir bir antrenman yükü göstergesi olabileceğine ilişkin kanıtlar bulunmaktadır (Bertollo et al., 2018).

Kalp atım hızı da iç antrenman yükünün değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan objektif göstergelerden biridir. Kalp atım hızı, özellikle aerobik karakterli ve orta-yüksek şiddetteki antrenmanlarda organizmanın fizyolojik yanıtı hakkında önemli bilgiler sağlayabilmektedir. Bununla birlikte kalp atım hızı; sıcaklık, hidrasyon, psikolojik stres, uyku, kafein kullanımı ve yorgunluk gibi antrenman dışı faktörlerden de etkilenebildiği için tek başına değerlendirilmesi bazı durumlarda yanıltıcı olabilir (Halsen, 2014).

Kan laktatı ve oksijen tüketimi gibi fizyolojik göstergeler de iç yükün belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Ancak bu ölçümlerin bazıları laboratuvar veya saha koşullarında özel ekipman ve uzmanlık gerektirdiğinden günlük antrenman takibinde her zaman pratik olmayabilir. Bu nedenle yüksek performans ortamlarında farklı göstergelerin birlikte kullanılması ve elde edilen verilerin sporcunun bireysel profili içerisinde yorumlanması önerilmektedir (Bourdon et al., 2017; Halsen, 2014).

2.3. İç ve Dış Yükün Birlikte Değerlendirilmesi

İç ve dış yük arasındaki ilişki, antrenman yükünün izlenmesinin temel bileşenlerinden biridir. Dış yük, gerçekleştirilen fiziksel işi tanımlarken, iç yük bu işin organizmada oluşturduğu bireysel yanıtı ortaya koymaktadır. Bu nedenle iki yük türünün birlikte değerlendirilmesi, sporcunun antrenmana verdiği yanıtın daha bütüncül biçimde anlaşılmasını sağlamaktadır (Impellizzeri et al., 2019).

Örneğin bir sporcunun belirli bir antrenmanda gerçekleştirdiği dış yük önceki haftalara benzer düzeyde olmasına rağmen kalp atım hızının veya algılanan eforunun belirgin biçimde artması, sporcunun aynı fiziksel yükü daha yüksek bir fizyolojik veya algısal stresle gerçekleştirdiğini gösterebilir. Benzer biçimde, aynı iç yük düzeyinde daha yüksek dış yük gerçekleştirilebilmesi, sporcunun antrenman kapasitesinde veya fiziksel uygunluğunda olumlu bir gelişme olduğuna işaret edebilir. Bu nedenle iç ve dış yük arasındaki ilişkinin zaman içerisindeki değişimi, antrenmana uyumun ve yorgunluğun değerlendirilmesinde kullanılabilecek önemli bilgiler sağlayabilir (Halsen, 2014).

Bununla birlikte, iç ve dış yük arasında her zaman sabit ve güçlü bir ilişki bulunması beklenmemelidir. Yapılan çalışmalar, ilişkinin spor dalına, antrenman türüne, egzersizin

yoğunluğuna ve kullanılan ölçüm yöntemlerine göre değişebildiğini göstermektedir (McLaren et al., 2018). Bu durum, antrenman yükünün tek bir değişken üzerinden değerlendirilmesinin sınırlılıklarını ortaya koymaktadır.

Bu nedenle güncel antrenman izleme yaklaşımında, **dış yük + iç yük + toparlanma + performans** göstergelerinin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Nitekim antrenman yüklerinin izlenmesine ilişkin uzlaşı raporlarında, yük izleme sistemlerinin yalnızca veri toplama amacı taşımaması; elde edilen bilgilerin antrenman planlaması, sporcu sağlığı ve performans kararlarını destekleyecek şekilde yorumlanması gerektiği vurgulanmaktadır

3. Yük İzleme Yöntemleri

Antrenman yükünün izlenmesi, sporcunun maruz kaldığı antrenman ve müsabaka yükünün sistematik olarak ölçülmesi, kaydedilmesi ve zaman içerisinde yorumlanmasını içeren çok boyutlu bir süreçtir. Yük izleme sürecinin temel amacı yalnızca antrenman sırasında gerçekleştirilen fiziksel işi nicel olarak belirlemek değil, aynı zamanda sporcunun bu yüke verdiği fizyolojik ve algısal yanıtı değerlendirmek, yorgunluk ve toparlanma durumundaki değişimleri belirlemek ve antrenman kararlarını bilimsel verilerle desteklemektir (Halsen, 2014; Bourdon et al., 2017). Bu nedenle günümüzde antrenman yükünün izlenmesinde tek bir ölçüm yöntemine dayalı yaklaşımlar yerine, farklı yöntemlerden elde edilen bilgilerin birlikte değerlendirildiği çok boyutlu modeller ön plana çıkmaktadır.

Literatürde yük izleme yöntemleri genel olarak **subjektif yöntemler, fizyolojik yöntemler, performans temelli yöntemler ve teknolojik/objektif yöntemler** şeklinde sınıflandırılabilir. Bu yöntemlerin her birinin farklı avantajları ve sınırlılıkları bulunmaktadır. Dolayısıyla kullanılacak yöntemin seçimi; spor dalının özellikleri, sporcunun düzeyi, antrenman türü, ölçümün amacı, mevcut teknolojik olanaklar ve elde edilen verinin antrenman kararlarına ne ölçüde katkı sağlayacağı dikkate alınarak yapılmalıdır (Bourdon et al., 2017).

3.1. Algılanan Efor Düzeyi ve Seans-RPE Yöntemi

Antrenman yükünün izlenmesinde en kolay uygulanabilen ve düşük maliyetli yöntemlerden biri **algılanan efor düzeyinin (Rating of Perceived Exertion; RPE)** değerlendirilmesidir. RPE, sporcunun gerçekleştirdiği fiziksel aktivitenin subjektif olarak ne kadar zorlayıcı olduğunu ifade etmektedir. Geleneksel olarak 6–20 arasında derecelendirilen

Borg ölçeği kullanılmış olmakla birlikte, antrenman yükü takibinde özellikle 0–10 aralığındaki modifiye RPE ölçeği yaygın olarak kullanılmaktadır (Halsen, 2014).

RPE'nin antrenman yükü izleme amacıyla en önemli kullanım biçimlerinden biri **seans-RPE (session-RPE; sRPE)** yöntemidir. Bu yöntemde sporcudan antrenmanın tamamının genel zorluk düzeyini değerlendirmesi istenir ve bu değer antrenman süresi ile çarpılarak antrenman yükü hesaplanır:

$$\text{sRPE antrenman yükü} = \text{Antrenman süresi (dakika)} \times \text{Seans-RPE}$$

Örneğin 75 dakika süren bir antrenmanın genel zorluk düzeyi 0–10 ölçeğinde 6 olarak değerlendirildiğinde, antrenman yükü 450 AU olarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım, farklı spor dallarında ve farklı sporcu gruplarında uygulanabilmesi nedeniyle pratik bir yük izleme yöntemi olarak kabul edilmektedir. Seans-RPE yönteminin geçerlilik ve güvenilirliğini inceleyen çalışmalar, yöntemin çeşitli spor dallarında antrenman yükünü izlemek için kullanılabileceğini göstermektedir (Bertollo et al., 2018).

sRPE yönteminin önemli avantajlarından biri, herhangi bir laboratuvar ekipmanı veya pahalı teknoloji gerektirmemesidir. Ayrıca dayanıklılık, takım sporları, direnç antrenmanı ve farklı antrenman modalitelerinde kullanılabilmektedir. Bununla birlikte yöntemin subjektif bir değerlendirmeye dayanması, sporcunun RPE ölçeğini doğru anlamasını ve değerlendirmeyi tutarlı biçimde yapmasını gerektirmektedir. Antrenmanın farklı bileşenlerinin sporcunun genel algısını farklı biçimde etkileyebilmesi de yöntemin yorumlanmasında dikkate alınmalıdır (Halsen, 2014; Rago et al., 2020).

3.2. Kalp Atım Hızı Temelli Yük İzleme

Kalp atım hızı (KAH), özellikle dayanıklılık ve aerobik karakterli spor dallarında iç antrenman yükünün değerlendirilmesinde en sık kullanılan fizyolojik göstergelerden biridir. KAH'nin antrenman sırasında sürekli olarak ölçülebilmesi, sporcunun egzersize verdiği kardiyovasküler yanıtın zaman içerisindeki değişiminin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Halsen, 2014).

KAH temelli yük izleme yöntemlerinde antrenmanın ortalama kalp atım hızı, maksimum kalp atım hızına veya kalp atım hızı rezervine göre geçirilen süre, belirli kalp atım hızı bölgelerinde geçirilen süre ve bu verilerden türetilen antrenman dürtüsü (Training Impulse;

TRIMP) gibi değişkenler kullanılabilir. TRIMP yaklaşımı, antrenmanın süresi ile yoğunluğunu tek bir yük göstergesinde birleştirmeyi amaçlayan yöntemlerden biridir (Halsen, 2014).

3.3. GPS ve Mikro Teknoloji Tabanlı Yük İzleme

Özellikle futbol, rugby, hokey ve diğer takım sporlarında teknolojik gelişmeler, dış antrenman yükünün yüksek çözünürlükte izlenmesine olanak sağlamıştır. **Küresel konumlandırma sistemi (GPS)** ve diğer mikro teknoloji tabanlı sistemler aracılığıyla sporcunun kat ettiği toplam mesafe, farklı hız bölgelerinde gerçekteştirdiği koşular, yüksek hızlı koşu ve sprint mesafesi, ivmelenme ve yavaşlama sayıları gibi çok sayıda dış yük göstergesi elde edilebilmektedir (Bourdon et al., 2017).

Bununla birlikte GPS verilerinin yorumlanmasında cihazın örnekleme frekansı, kullanılan algoritmalar, sinyal koşulları, oyuncunun pozisyonu ve antrenmanın içeriği gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Ayrıca yalnızca dış yük verilerinin kullanılması, sporcunun bu yüke verdiği fizyolojik yanıtı ortaya koymamaktadır. Bu nedenle GPS verilerinin kalp atım hızı, RPE veya sRPE gibi iç yük göstergeleriyle birlikte kullanılması daha bütüncül bir değerlendirme sağlayabilir (Bourdon et al., 2017; McLaren et al., 2018).

3.4. İvmeölçer ve Mekanik Yük Göstergeleri

İvme ölçerler, sporcunun hareketlerindeki ivmelenme ve yavaşlamaları ölçerek özellikle takım sporlarında mekanik yükün değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. İvme ölçerlerden elde edilen veriler, oyuncunun gerçekteştirdiği hareketlerin yalnızca kat edilen mesafe veya hız açısından değil, hareketlerin mekanik özellikleri açısından da değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Özellikle sık yön değiştirme, hızlanma ve yavaşlama içeren spor dallarında toplam mesafe aynı olsa bile oyuncuların maruz kaldığı mekanik yük farklı olabilir. Bu nedenle ivmelenme ve yavaşlama sayıları, toplam mesafe ve yüksek hızlı koşu gibi geleneksel dış yük göstergelerini tamamlayıcı nitelikte olabilir (McLaren et al., 2018). Takım sporlarında yapılan meta-analitik çalışmalar, sRPE gibi iç yük göstergeleri ile toplam mesafe, ivmeölçer yükü ve yüksek hızlı koşu gibi dış yük göstergeleri arasında değişen düzeylerde ilişkiler bulunduğunu göstermektedir.

Ancak ivmeölçerlerden elde edilen “oyuncu yükü” veya benzeri bileşik göstergelerin yorumlanmasında dikkatli olunmalıdır. Bu göstergelerin hesaplanmasında kullanılan algoritmalar farklılık gösterebildiğinden, farklı cihazlardan elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılması her zaman uygun olmayabilir. Bu nedenle ölçüm cihazının teknik özellikleri ve kullanılan hesaplama yönteminin bilinmesi önemlidir.

3.5. Direnç Antrenmanında Yük İzleme

Direnç antrenmanlarında yük izleme, dayanıklılık ve takım sporlarından farklı olarak set, tekrar, kullanılan yük ve egzersiz seçimi gibi değişkenlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Direnç antrenmanının yükünü belirlemede kullanılan temel göstergelerden biri **hacim yüküdür (volume load)**. Hacim yükü basit biçimde:

$$\text{Hacim yükü} = \text{Set sayısı} \times \text{Tekrar sayısı} \times \text{Kullanılan yük}$$

şeklinde hesaplanabilir.

Örneğin 3 set $\times$ 10 tekrar $\times$ 60 kg şeklindeki bir egzersizde toplam hacim yükü 1800 kg olarak hesaplanabilir. Bununla birlikte direnç antrenmanının gerçek yükünü yalnızca kaldırılan toplam ağırlık üzerinden değerlendirmek yeterli değildir. Egzersiz türü, hareket hızı, setler arası dinlenme süresi, tekrarların tükenmeye yakınlığı ve kullanılan yükün sporcunun maksimum kapasitesine oranı da antrenman uyarısını etkileyebilmektedir (Suchomel et al., 2016).

Bu nedenle direnç antrenmanında hacim yükünün yanı sıra RPE, tekrar rezervi (repetitions in reserve; RIR), hareket hızı ve performans göstergelerinin de değerlendirilmesi önerilmektedir. Özellikle taşınabilir hız ölçüm sistemleri sayesinde barbell veya hareket hızının takip edilmesi, sporcunun günlük performansındaki değişimlerin ve antrenman yanıtının belirlenmesine katkı sağlayabilmektedir (Suchomel et al., 2016).

3.6. Performans Testleri ile Yük İzleme

Antrenman yükünün izlenmesinde yalnızca antrenman sırasında elde edilen yük göstergelerinin değil, sporcunun performans kapasitesindeki değişimlerin de değerlendirilmesi önemlidir. Performans testleri, uygulanan antrenman yükünün sporcu üzerinde oluşturduğu adaptasyon veya yorgunluk hakkında dolaylı bilgi sağlayabilir.

Performans testi seçilirken testin spor dalıyla ilişkili olması, güvenilir ve tekrarlanabilir olması ve sporcunun günlük performansındaki anlamlı değişimleri ortaya koyabilmesi önemlidir. Örneğin sıçrama yüksekliği, sprint zamanı, kuvvet ölçümleri, maksimal veya submaksimal dayanıklılık testleri ve teknik performans göstergeleri farklı spor dallarında kullanılabilir.

Performanstaki geçici düşüş her zaman olumsuz bir adaptasyon anlamına gelmemektedir. Yoğun bir antrenman döneminde performansın kısa süreli olarak azalması beklenen bir yorgunluk yanıtı olabilir. Bu nedenle performans ölçümleri, antrenman yükü ve toparlanma göstergeleriyle birlikte yorumlanmalıdır (Halsen, 2014).

3.7. Toparlanma ve znel İyi Oluş Göstergeleri

Yük izleme sürecinin yalnızca “yk” göstergelerine odaklanması, sporcunun yükü nasıl tolere ettiğinin gözden kaçmasına neden olabilir. Bu nedenle antrenman yüküyle birlikte toparlanma ve öznel iyi oluş göstergelerinin de izlenmesi önemlidir. Uyku kalitesi, kas ağrısı, genel yorgunluk, stres, motivasyon ve genel iyi oluş düzeyi bu amaçla kullanılabilecek subjektif göstergeler arasında yer almaktadır (Halsen, 2014).

Bu göstergelerin günlük veya düzenli olarak kısa anketlerle değerlendirilmesi, sporcunun antrenmana hazır olma durumundaki değişimlerin belirlenmesine yardımcı olabilir. Özellikle uzun süreli izlemelerde bireysel normal değerlerin oluşturulması ve sporcunun kendi geçmiş değerleriyle karşılaştırılması, tek bir günün mutlak değerinden daha anlamlı olabilir. Yüksek performans sporunda kullanılan izleme sistemlerinin incelendiği araştırmalar, antrenman yanıtının değerlendirilmesinde subjektif ölçümlerin uygulamada oldukça yaygın olduğunu göstermektedir (Halsen, 2014; Bourdon et al., 2017).

3.8. Kalp Atım Hızı Değişkenliği

Son yıllarda **kalp atım hızı değişkenliği (KHD/HRV)**, özellikle toparlanma ve otonom sinir sistemi yanıtının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri hline gelmiştir. KHD, ardışık kalp atımları arasındaki zaman aralıklarındaki değişkenliği ifade etmekte ve otonom sinir sistemi aktivitesi hakkında dolaylı bilgi sağlayabilmektedir.

KHD'nin özellikle sabah saatlerinde ve standartlaştırılmış koşullarda takip edilmesi, sporcunun toparlanma durumundaki bireysel değişimlerin değerlendirilmesine katkı

sağlayabilir. Bununla birlikte KHD'nin antrenman yükünün doğrudan bir ölçüsü olmadığı ve tek başına antrenman kararlarını belirlemek için kullanılmaması gerektiği unutulmamalıdır. Uyku, psikolojik stres, hastalık ve diğer çevresel faktörler KHD üzerinde etkili olabilmektedir. Bu nedenle KHD, antrenman yükü, performans ve subjektif iyi oluş göstergeleriyle birlikte değerlendirilmelidir (Halsen, 2014).

3.9. Biyokimyasal ve Hormonal Göstergeler

Kan laktatı, kreatin kinaz, kortizol, testosteron ve çeşitli inflamatuvar veya immünolojik belirteçler antrenman stresinin değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir. Bu göstergeler özellikle yüksek performans ortamlarında fizyolojik yanıtın daha ayrıntılı biçimde incelenmesine olanak sağlayabilir. Bununla birlikte birçok biyokimyasal belirteç günlük antrenman izleminde yüksek maliyet, ölçüm güçlüğü, biyolojik değişkenlik ve sonuçların yorumlanmasındaki belirsizlikler nedeniyle rutin kullanım için sınırlılıklara sahiptir (Halsen, 2014).

Bu nedenle biyokimyasal ölçümlerin çoğunlukla belirli araştırma amaçları veya özel sporcu grupları için kullanılması; günlük yük yönetiminde ise daha uygulanabilir subjektif, fizyolojik ve performans temelli göstergelerin tercih edilmesi daha gerçekçi bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir.

3.10. Yük İzleme Yöntemlerinin Birlikte Kullanılması

Günümüzde antrenman yükünün izlenmesinde en önemli yaklaşımlardan biri, farklı ölçüm yöntemlerinin **tek bir izleme sistemi içerisinde bütünleştirilmesidir**. Çünkü hiçbir tekil ölçüm yöntemi sporcunun maruz kaldığı toplam antrenman stresini eksiksiz biçimde açıklayamamaktadır. (Halsen, 2014), sporcu yükünün değerlendirilmesinde çok sayıda potansiyel göstergenin bulunmasına rağmen tek ve kesin bir yük göstergesinin henüz ortaya konulmadığını belirtmektedir.

Örneğin bir takım sporunda günlük izleme sistemi; sRPE, antrenman süresi, GPS kaynaklı toplam mesafe ve yüksek hızlı koşu, uyku kalitesi ve sabah yorgunluğu gibi sınırlı sayıda değişkenden oluşturulabilir. Bu göstergeler zaman içerisinde takip edilerek sporcunun bireysel normal aralığı belirlenebilir. Böylece tek bir ölçümün mutlak değerinden ziyade, sporcunun kendi geçmişine göre ortaya çıkan anlamlı değişimler dikkate alınabilir.

3.11. Yük İzleme Yöntemlerinin Seçiminde Temel İlkeler

Yük izleme yönteminin seçiminde öncelikle **geçerlilik, güvenilirlik, duyarlılık, uygulanabilirlik ve bireyselleştirme** ilkeleri dikkate alınmalıdır. Kullanılan yöntemin gerçekten ölçülmek istenen özelliği değerlendirmesi, tekrarlandığında benzer sonuçlar vermesi ve anlamlı değişimleri tespit edebilmesi gerekir. Bunun yanında yöntemin antrenman ortamında uygulanabilir olması ve elde edilen verilerin antrenör tarafından zamanında yorumlanabilmesi de önemlidir (Bourdon et al., 2017; Halson, 2014).

Özellikle teknolojik araçların yaygınlaşmasıyla birlikte veri miktarının artması, “daha fazla veri = daha iyi izleme” anlayışının sorgulanmasını gerekli kılmıştır. Çok sayıda değişkenin takip edilmesi, eğer bu değişkenler antrenman kararlarına katkı sağlamıyorsa, veri fazlalığına ve yorumlama güçlüğüne yol açabilir. Bu nedenle yük izleme sistemlerinde **veri toplamak yerine anlamlı veri üretmek** temel yaklaşım olmalıdır.

4. Yük İzleme Yöntemleri

Antrenman yükünün sistematik olarak izlenmesi, sporcunun antrenman uyarısına verdiği yanıtın anlaşılması, yorgunluk ve toparlanma durumunun değerlendirilmesi ve antrenman programının gerektiğinde yeniden düzenlenmesi açısından önemli bir süreçtir. Yük izleme yalnızca antrenman sırasında gerçekleştirilen fiziksel işin ölçülmesini değil, aynı zamanda bu yükün sporcu üzerindeki fizyolojik ve psikolojik etkilerinin takip edilmesini kapsamaktadır. Bu nedenle etkili bir yük izleme sistemi, dış yük, iç yük, performans ve toparlanma göstergelerinin birlikte değerlendirilmesine dayanmalıdır (Bourdon et al., 2017; Halson, 2014).

Yük izleme yöntemleri arasında algılanan efor düzeyi (RPE), seans-RPE (sRPE), kalp atım hızı, kalp atım hızı değişkenliği, GPS ve ivmeölçer tabanlı sistemler, performans testleri ve çeşitli biyokimyasal göstergeler yer almaktadır. Bu yöntemlerin her biri antrenman sürecinin farklı bir boyutunu değerlendirmekte ve hiçbir yöntem tek başına sporcunun toplam antrenman stresini açıklayamamaktadır (Impellizzeri et al., 2019). Dolayısıyla güncel yaklaşım, farklı göstergelerden elde edilen verilerin bütüncül olarak yorumlanmasını önermektedir.

Özellikle sRPE yöntemi, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle farklı spor dallarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde antrenman süresi ile sporcunun antrenman sonrasındaki algılanan efor düzeyi çarpılarak antrenman yükü hesaplanmaktadır.

Böylece farklı süre ve şiddetteki antrenmanların karşılaştırılması mümkün olmaktadır (Bertollo et al., 2018). Bunun yanında GPS ve mikro teknoloji tabanlı sistemler, özellikle takım sporlarında toplam mesafe, yüksek hızlı koşu, sprint, ivmelenme ve yavaşlama gibi dış yük göstergelerinin ayrıntılı olarak izlenmesini sağlamaktadır (Bourdon et al., 2017).

5. Toparlanmanın Değerlendirilmesi

Antrenman yükünün yönetiminde yüklenme kadar toparlanma da önem taşımaktadır. Toparlanma, antrenman veya müsabaka sonrasında oluşan yorgunluğun azaltılması, homeostatik dengenin yeniden oluşturulması ve sporcunun bir sonraki fiziksel veya psikolojik strese hazırlanması sürecidir. Bu süreç yalnızca fizyolojik mekanizmalarla sınırlı olmayıp psikolojik durum, uyku, beslenme ve sosyal çevre gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Kellmann et al., 2018).

Antrenman sonrasında ortaya çıkan yorgunluk, uygun düzeyde ve zamanlamada toparlanma sağlandığında adaptasyon sürecinin doğal bir parçası olarak değerlendirilebilir. Ancak toparlanma tamamlanmadan yeni bir yüksek yüklenmenin uygulanması, yorgunluğun birikmesine ve performans kapasitesinin azalmasına neden olabilir. Bu nedenle antrenman programının planlanmasında yüklenme ve toparlanma arasındaki ilişkinin sürekli olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Kellmann et al., 2018).

Toparlanmanın değerlendirilmesinde subjektif ve objektif göstergeler kullanılabilir. Subjektif göstergeler arasında algılanan yorgunluk, kas ağrısı, uyku kalitesi, stres, motivasyon ve genel iyi oluş düzeyi bulunmaktadır. Objektif göstergeler arasında ise kalp atım hızı, kalp atım hızı değişkenliği, nöromüsküler performans, sprint performansı, sıçrama yüksekliği ve bazı biyokimyasal belirteçler yer almaktadır (Halsen, 2014).

Uyku da toparlanma sürecinin temel bileşenlerinden biridir. Yetersiz veya kalitesiz uyku; fiziksel ve bilişsel performansın yanı sıra psikolojik durum ve antrenmana verilen yanıt üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Bu nedenle uyku süresi ve kalitesinin düzenli olarak takip edilmesi, özellikle yoğun antrenman ve müsabaka dönemlerinde yük yönetiminin önemli bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Halsen, 2014; Kellmann et al., 2018).

6. Performans-Yük İlişkisi

Antrenman yükünün temel amacı sportif performansı geliştirmektir. Bununla birlikte antrenman yükü ile performans arasındaki ilişki basit ve doğrusal değildir. Uygun düzeydeki antrenman uyaranları organizmada adaptasyon oluşturarak performans kapasitesini artırabilirken, aşırı veya yetersiz toparlanmayla birlikte uygulanan yükler performansın azalmasına neden olabilir (Impellizzeri et al., 2019).

Antrenman sürecinde geçici performans düşüşlerinin görölmesi her zaman olumsuz bir durum olarak değerlendirilmemelidir. Yüksek şiddetli veya yüksek hacimli antrenmanların ardından ortaya çıkan kısa süreli performans azalması, antrenmana bağlı yorgunluğın doğal bir sonucu olabilir. Yeterli toparlanmanın ardından performansın başlangıç düzeyine dönmesi ve daha yüksek bir düzeye ulaşması, antrenmana uyumun göstergesi olabilir (Kellmann et al., 2018).

Bununla birlikte yüklenme ve toparlanma arasındaki dengenin uzun süre bozulması durumunda performans düşüşü kalıcı hâle gelebilir. Bu nedenle performansın düzenli olarak değerlendirilmesi, antrenman yükünün etkisinin anlaşılmaya yardımcı olabilir. Sprint zamanı, sıçrama performansı, kuvvet, dayanıklılık ve spor dalına özü teknik veya taktik performans göstergeleri bu amaçla kullanılabilir (Halsen, 2014).

Performans-yük ilişkisinin değerlendirilmesinde yalnızca mutlak performans değerlerine odaklanmak yerine, performansın sporcunun bireysel yük geçmişiyle birlikte değerlendirilmesi önemlidir. Örneğin aynı performans düzeyinin daha düşük algılanan eforla veya daha düşük fizyolojik maliyetle gerçekleştirilebilmesi, sporcunun antrenman kapasitesindeki olumlu gelişmenin göstergesi olabilir. Benzer şekilde, normalde tolere edilebilen bir yükün giderek daha yüksek RPE veya daha düşük performansla gerçekleştirilmesi, yorgunluk veya yetersiz toparlanma açısından değerlendirilmesi gereken bir durum olabilir (Halsen, 2014).

Bu nedenle performans testleri, antrenman yükü ve toparlanma göstergeleriyle birlikte ele alınmalıdır. Antrenman yükü ile performans arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde sporcunun bireysel yanıtındaki değişimler, tek bir ölçüm değerinden daha anlamlı bilgiler sağlayabilir.

7. Antrenman Yükünün Bireyselleştirilerek Yönetilmesi

Antrenman yükünün bireyselleştirilmesi, modern antrenman yönetiminin temel ilkelerinden biridir. Aynı antrenman programının farklı sporcularda aynı fizyolojik ve psikolojik etkiyi oluşturması beklenmemektedir. Sporcuların antrenman geçmişleri, fiziksel kapasiteleri, yaşları, biyolojik özellikleri, spor deneyimleri, uyku ve beslenme durumları ve psikolojik stres düzeyleri birbirinden farklı olduğundan, aynı dış yük farklı iç yük yanıtlarına neden olabilmektedir (Impellizzeri et al., 2019; Soligard et al., 2016).

Bu nedenle antrenman planlamasında yalnızca önceden belirlenmiş programın uygulanması yerine, sporcunun günlük hazırbulunuşluk durumunun da dikkate alındığı **dinamik yük yönetimi** yaklaşımı önem kazanmaktadır. Dinamik yük yönetiminde antrenman programı tamamen değiştirilmek zorunda değildir; ancak sporcunun verdiği yanıtla göre antrenmanın hacmi, şiddeti, yoğunluğu, egzersiz seçimi veya toparlanma süresi düzenlenebilir.

Bireyselleştirilmiş yük yönetiminde sporcunun geçmiş yük verileri önemli bir referans noktasıdır. Sporcunun belirli bir yükü geçmişte nasıl tolere ettiği, sonraki yüklenmelerin planlanmasında kullanılabilecek önemli bilgiler sağlayabilir. Bu nedenle tek bir antrenmanın mutlak yük değerinden ziyade yükün zaman içerisindeki seyri ve sporcunun bu yüke verdiği yanıt değerlendirilmelidir (Bourdon et al., 2017).

Güncel yaklaşımda bireyselleştirilmiş yük yönetimi, **yük izleme → yanıtın değerlendirilmesi → toparlanmanın değerlendirilmesi → performansın izlenmesi → antrenmanın yeniden düzenlenmesi** şeklinde devam eden bir döngü olarak ele alınabilir. Bu döngüde elde edilen veriler bir sonraki antrenman kararının temelini oluşturur. Böylece antrenman programı statik bir plan olmaktan çıkarak sporcunun günlük ve haftalık yanıtlarına göre uyarlanabilen dinamik bir yapıya dönüşür.

Bu yaklaşımda sporcunun günlük durumunu değerlendirmek için sRPE, uyku kalitesi, algılanan yorgunluk, kas ağrısı ve genel iyi oluş gibi göstergeler; antrenman yükünü belirlemek için ise antrenman süresi, toplam mesafe, yüksek hızlı koşu, ivmelenme, kalp atım hızı veya direnç antrenmanına özgü hacim göstergeleri kullanılabilir. Performans testleri ise bu yüklerin sporcu üzerindeki fonksiyonel etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılabilir (Bourdon et al., 2017; Halson, 2014).

Bireyselleştirilmiş yk yönetiminde önemli bir diğer konu, **yük değişimlerinin kontrollü gerçekleştirilmesidir**. Antrenman yükünde ani ve gereksiz artışlardan kaçınılması, sporcunun yeni yüke uyum sağlayabilmesi için önemlidir. Bununla birlikte son yıllarda akut:kronik iş yükü oranı gibi belirli modellerin sakatlık riskini öngörmek amacıyla tek başına kullanılmasının önemli metodolojik sınırlılıkları olduğu vurgulanmaktadır (Impellizzeri et al., 2020). Bu nedenle güncel yaklaşım, belirli bir orana veya tek bir eşik değere bağlı kalmak yerine sporcunun yk geçmişini, bireysel yanıtını, performansını ve toparlanma göstergelerini birlikte değerlendirmektedir.

Sonuç olarak güncel antrenman yükü yönetimi, tek bir ölçüm aracına veya sabit bir yük reçetesine dayanmamaktadır. Bunun yerine **dış yük, i yk, performans ve toparlanma göstergelerinin bireysel sporcu bağlamında birlikte değerlendirilmesi** temel alınmaktadır. Yük izleme sisteminin amacı, sporcuyu mümkün olan en yüksek yükle çalıştırmak değil; sporcunun uyum sağlayabileceği, toparlanabileceği ve uzun vadede performansını geliştirebileceği uygun yk düzeyini belirlemektir. Bu yaklaşım, performans gelişimi ile sporcu sağlığının aynı anda korunmasına olanak sağlayan sürdürülebilir bir antrenman yönetimi modeli sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Anderson, L., Triplett-McBride, T., Foster, C., Doberstein, S., & Brice, G. (2003). Impact of training patterns on incidence of illness and injury during a 22-week season of competitive swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 24(2), 114–120.
- Bertollo, M., et al. (2018). *[Seans-RPE ve antrenman yükü izleme üzerine çalışma]*. *International Journal of Sports Physiology and Performance*.
- Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gatin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., Gabbett, T. J., Coutts, A. J., Burgess, D. J., Gregson, W., & Cable, N. T. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl. 2), S2-161–S2-170. <https://doi.org/10.1123/IJSP.2017-0208>
- Fox, J. L., Stanton, R., Sargent, C., Wintour, S.-A., & Scanlan, A. T. (2018). The association between training load and performance in team sports: A systematic review. *Sports Medicine*, 48(12), 2743–2774. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0982-5>
- Halsen, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44(Suppl. 2), S139–S147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>
- Impellizzeri, F. M., Tenan, M. S., Kempton, T., Novak, A., & Coutts, A. J. (2020). Acute:Chronic workload ratio: Conceptual issues and fundamental pitfalls. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(6), 907–913.
- Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., Erlacher, D., Halsen, S. L., Hecksteden, A., Heidari, J., Kallus, K. W., Meeusen, R., Mujika, I., Robazza, C., Skorski, S., Venter, R., & Beckmann, J. (2018). Recovery and performance in sport: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2), 240–245. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0759>
- McLaren, S. J., Macpherson, T. W., Coutts, A. J., Hurst, C., Spears, I. R., & Weston, M. (2018). The relationships between internal and external measures of training load and intensity in team sports: A meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(3), 641–658. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0830-z>

- Rago, V., et al. (2020). Methods to collect and interpret external training load using microtechnology incorporating GPS in professional football: A systematic review. *Journal of Sports Sciences*. <https://doi.org/10.1080/15438627.2019.1686703>
- Soligard, T., Schwellnus, M., Alonso, J.-M., Bahr, R., Clarsen, B., Dijkstra, H. P., Gabbett, T., Gleeson, M., Häggglund, M., Hutchinson, M. R., Janse van Rensburg, C., Khan, K. M., Meeusen, R., Orchard, J. W., Pluim, B. M., Raftery, M., Budgett, R., & Engebretsen, L. (2016). How much is too much? (Part 1) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of injury. *British Journal of Sports Medicine*, 50(17), 1030–1041. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096581>
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). Training monitoring for resistance exercise: Theory and applications. *Sports Medicine*, 46, 687–698. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0454-0>

BÖLÜM 3

YÜZME PERFORMANSINDA CORE ANTRENMANLARININ ROLÜ

*Yusuf GÖZAÇIK*¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu, Dicle Üniversitesi, ORCID: 0000-0003-3525-4847.

GİRİŞ

Yüzmede performansın ortaya çıkışı, yalnızca tek bir fiziksel özelliğın gelişimiyle değil, hareketin bütününü oluşturan unsurların birbiriyle uyumlu biçimde çalışmasıyla ilişkilendirilmektedir. Özellikle su içerisindeki hareketlerin sürekliliği, gövde ile ekstremiteler arasındaki uyum ve farklı yüzme stillerinin kendine özgü hareket yapıları, performansın değerlendirilmesinde dikkate alınan unsurlar arasında yer almaktadır. Bu çerçevede yüzme hareketlerinin temelini oluşturan gövde kontrolü ve core çalışmaları, performans sürecinin önemli bileşenleri arasında değerlendirilebilir.

1. Core Sisteminin Yüzme Performansı ile İlişkisi

Yüzme, farklı vücut segmentlerinin aynı hareket bütünü içerisinde koordineli biçimde kullanılmasını gerektiren ve hareketlerin su içerisindeki vücut pozisyonuyla birlikte sürdürüldüğü bir spor dalıdır. Yüzme sırasında kol ve bacakların gerçekleştirdiği hareketlerin gövdeyle uyumlu biçimde devam ettirilmesi, hareketin sürekliliği ve kontrolü açısından önem taşımaktadır. Bunun yanında gövdenin su içerisindeki pozisyonunun korunması ve hareket sırasında oluşan kuvvetlerin farklı segmentler arasında aktarılması da yüzme hareketlerinin bütünlüğü içerisinde ele alınmaktadır. Bu nedenle yüzme performansına ilişkin değerlendirmelerde yalnızca ekstremitelerin gerçekleştirdiği hareketlere değil, gövdenin bu hareketler içerisindeki kontrolüne de yer verilmektedir. Gövde çevresindeki kasların oluşturduğu core sisteminin de bu süreçte stabilizasyon ve kuvvet aktarımı açısından işlev gördüğü belirtilmektedir (Akuthota ve Nadler, 2004; Kibler ve ark., 2006; Willardson, 2007).

Core sistemi, yalnızca karın bölgesinde bulunan kaslarla sınırlandırılmamakta; omurga ve pelvis çevresinde yer alan ve gövdenin kontrolüne katkı sağlayan farklı kas gruplarının birlikte çalışmasıyla ele alınmaktadır. Bu kapsamda rectus abdominis, internal ve external oblique, transversus abdominis, multifidus, erector spinae, gluteal kaslar, pelvik taban kasları ve diyafram core sisteminin temel bileşenleri arasında değerlendirilmektedir. Söz konusu kasların farklı hareketler sırasında birlikte çalışması, gövdenin stabilizasyonunun korunmasına ve hareketlerin kontrollü biçimde gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır. Yüzme gibi gövdenin sabit bir pozisyonunda tutulmasının yanı sıra farklı yönlerde hareket ettirilmesini gerektiren aktivitelerde bu kas gruplarının koordineli çalışması daha belirgin hâle gelmektedir. Bu açıdan core sisteminin işlevi, yalnızca gövdeyi sabit tutmakla sınırlı olmayıp hareket sırasında gövde ile ekstremiteler arasındaki uyumun sürdürülmesiyle de ilişkilendirilmektedir (Akuthota ve Nadler, 2004; Kibler ve ark., 2006).

2. Core Sisteminin Fonksiyonel Temelleri

Core kasları fonksiyonel açıdan yüzeysel ve derin kas grupları içerisinde ele alınmaktadır. Yüzeysel grupta rectus abdominis, internal ve external oblique, erector spinae ve gluteal kaslar gibi gövde hareketlerine ve kuvvet aktarımına katkı sağlayan kaslar yer alırken; transversus abdominis, multifidus, pelvik taban kasları ve diyafram daha derin stabilizasyon sisteminin bileşenleri arasında değerlendirilmektedir. Bu kas grupları birbirinden bağımsız şekilde değil, farklı hareketlerin gerçekleştirilmesi sırasında birbirleriyle etkileşim içerisinde çalışmaktadır. Yüzeysel ve derin yapıların birlikte aktivasyonu, gövdenin kontrol edilmesi, omurga stabilizasyonunun korunması ve hareket sırasında oluşan kuvvetlerin koordineli biçimde aktarılması açısından önem taşımaktadır. Bu yönüyle core sisteminin işlevi, yalnızca belirli bir kas grubunun kuvvet üretmesi üzerinden değil, farklı kasların hareket sırasında oluşturduğu bütünlük üzerinden ele alınmaktadır (Akuthota ve Nadler, 2004; Kibler ve ark., 2006).

Core sisteminin fonksiyonel özellikleri yalnızca kas kuvveti ile sınırlı değildir. Kas dayanıklılığı, nöromüsküler koordinasyon, proprioseptif kontrol ve postüral stabilizasyon da gövdenin hareket sırasında kontrol edilmesiyle ilişkili özellikler arasında değerlendirilmektedir. Özellikle gövdenin stabilitesinin korunması ile ekstremitelerin serbest ve kontrollü biçimde hareket edebilmesi arasındaki ilişki, sportif hareketlerin uygulanmasında dikkate alınması gereken unsurlardan biridir. Bu nedenle core performansının değerlendirilmesinde yalnızca maksimal kuvvet kapasitesine odaklanmak yerine, gövdenin hareket boyunca kontrolünü sürdürebilme kapasitesinin de dikkate alınması gerekmektedir (Willardson, 2007).

Yüzme açısından değerlendirildiğinde bu özellikler, gövdenin su içerisindeki pozisyonunun korunması ve kol ile bacak hareketlerinin gövdeyle uyum içerisinde gerçekleştirilmesiyle birlikte ele alınmaktadır. Yüzme sırasında gövdenin tamamen hareketsiz tutulması söz konusu olmadığı gibi, hareketin farklı aşamalarında kontrollü rotasyon ve diğer gövde hareketleri de gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla yüzücünün ihtiyaç duyduğu gövde kontrolü, stabilizasyon ile hareketliliğin birlikte sürdürülmesini gerektirmektedir. Bu durum core sisteminin yüzme sırasında statik bir destek mekanizması olarak değil, hareketin farklı aşamalarında değişen düzeylerde görev alan dinamik bir sistem olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır (Kibler ve ark., 2006; Willardson, 2007).

3. Gövde Stabilizasyonu ve Kuvvet Aktarımı

Yüzme sırasında vücudun su içerisindeki pozisyonunun korunması, hareketlerin yönlendirilmesi ve ekstremitelerin oluşturduğu kuvvetlerin gövde üzerinden aktarılması core

sisteminin fonksiyonlarıyla ilişkilendirilmektedir. Özellikle yatay pozisyonda gerçekleştirilen yüzme hareketlerinde gövde stabilizasyonunun korunması, yüzme hareketlerinin koordinasyonunda önemli bir unsur olarak ele alınmaktadır (Anderson ve Behm, 2005).

Core sisteminin gövde stabilizasyonuna katkısının yanı sıra, üst ve alt ekstremiteler tarafından oluşturulan kuvvetlerin hareket zinciri içerisinde aktarılmasında da rol oynadığı belirtilmektedir. Yüzme sırasında kol çekişi ve bacak vuruşları ile oluşturulan hareketlerin gövdeyle bütünleşik biçimde gerçekleştirilmesi, core bölgesinin kinetik zincir içerisindeki işleviyle ilişkilendirilmektedir (Tong ve McConnell, 2016; Kibler ve ark., 2006).

Gövde stabilizasyonu ile kuvvet aktarımı arasındaki ilişki, core antrenmanlarının temel amaçları içerisinde de değerlendirilmektedir. Core çalışmalarının postüral kontrol, denge ve fonksiyonel kuvvetin geliştirilmesine yönelik olarak kullanılabileceği ve bu özelliklerin hareket zinciri içerisindeki kuvvet aktarımıyla ilişkili olduğu bildirilmektedir (Behm ve ark., 2010; Hibbs ve ark., 2008).

4. Core ve Yüzme Biyomekaniği

Yüzme biyomekaniği açısından core sisteminin işlevi, gövdenin uygun pozisyonda tutulması ile hareket sırasında gerekli kontrollü gövde hareketlerinin gerçekleştirilmesi arasındaki denge üzerinden ele alınmaktadır. Serbest, sırtüstü ve kelebek yüzme gibi stillerde vücudun su içerisindeki yatay pozisyonunun korunması, hareketin sürekliliği ve teknik bütünlüğü açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte yüzme sırasında gövdenin tamamen sabit tutulması söz konusu değildir. Kol ve bacak hareketlerinin özelliklerine bağlı olarak gövdenin farklı yönlerde kontrollü hareketler ve rotasyonlar gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu nedenle core sisteminin yüzme biyomekaniğindeki rolü yalnızca gövdenin stabilizasyonunu sağlamakla sınırlı olmayıp, hareket sırasında gövdenin uygun biçimde yönlendirilmesini ve farklı hareketlerin koordinasyonunu da kapsamaktadır. Gövdenin stabilitesinin korunması ile kontrollü hareket edebilme kapasitesinin birlikte sürdürölmesi, yüzme hareketlerinin daha bütüncül bir yapı içerisinde değerlendirilmesini sağlamaktadır (Kibler ve ark., 2006; Willardson, 2007).

Serbest ve sırtüstü yüzme sırasında gerçekleştirilen gövde rotasyonları, yüzme hareketlerinin önemli bileşenleri arasında yer almaktadır. Kol hareketlerinin ritmiyle birlikte ortaya çıkan bu rotasyonların kontrollü biçimde gerçekleştirilmesi, gövdenin su içerisindeki pozisyonunun korunması ve ekstremitelerin hareketleriyle uyumun sürdürölmesi açısından önem taşımaktadır. Bu süreçte gövde çevresindeki kasların koordineli aktivitesi, hem rotasyon hareketinin oluşturulmasına hem de hareket sırasında gövdenin kontrol edilmesine katkı

sağlamaktadır. Kelebek yüzmede ise gövdenin dalga hareketine katılımı daha belirgin hâle gelmekte ve core kaslarının hareket boyunca farklı düzeylerde aktif biçimde görev alması gerekmektedir. Dolayısıyla yüzme stilleri arasındaki teknik farklılıklar, core sisteminin yalnızca stabilizasyon amacıyla değil, hareketin gerektirdiği dinamik gövde kontrolünün sağlanması amacıyla da kullanılmasını gerektirmektedir (Pink ve Tibone, 2000).

Yüzme hareketleri sırasında omuz ve kalça hareketlerinin gövde kontrolüyle birlikte gerçekleştirilmesi, proksimal stabilizasyon ile distal hareketlilik arasındaki ilişki kapsamında değerlendirilmektedir. Gövdenin yeterli düzeyde kontrol edilmesi, kol ve bacak hareketlerinin gövdeyle uyumlu biçimde gerçekleştirilmesine ve hareket sırasında oluşan kuvvetlerin farklı vücut segmentleri arasında aktarılmasına katkı sağlayabilmektedir. Bu açıdan core sistemi, ekstremitelerin hareketlerini doğrudan gerçekleştiren bir yapıdan ziyade, bu hareketlerin kontrollü ve koordineli biçimde ortaya çıkmasına destek sağlayan bir sistem olarak değerlendirilmektedir. Özellikle yüzme sırasında kol ve bacakların tekrarlı hareketleri ile gövdenin pozisyonunun sürekli olarak birlikte düzenlenmesi gerektiğinden, proksimal stabilizasyonun korunması hareket bütünlüğü açısından önem taşımaktadır (Kibler ve ark., 2006; Willardson, 2007).

5. Yüzme Stillerine Göre Core Kullanımı

Yüzme stillerinin teknik yapılarındaki farklılıklar, hareket sırasında gövdenin kullanım biçimini ve buna bağlı olarak core sisteminin üstlendiği görevleri de farklılaştırmaktadır. Serbest ve sırtüstü yüzmede kol hareketlerinin ritmiyle birlikte ortaya çıkan gövde rotasyonları dikkat çekerken, kelebek yüzmede gövdenin dalga hareketine katılımı daha belirgin bir özellik göstermektedir. Kurbağalama yüzmede ise gövde, pelvis ve kalça hareketlerinin birbirleriyle uyum içerisinde gerçekleştirilmesi ön plana çıkmaktadır. Dolayısıyla yüzme stilleri arasında görülen bu teknik farklılıklar, gövdenin hem stabilizasyonunun korunmasını hem de hareketin gerektirdiği yönlerde kontrollü biçimde hareket ettirilmesini gerektirmektedir. Bu süreçte core sisteminin farklı hareket koşullarına uyum sağlayabilmesi, yüzme hareketlerinin bütünlüğü içerisinde değerlendirilmektedir (Pink ve Tibone, 2000; Kibler ve ark., 2006).

Yüzme sırasında gerçekleştirilen elektromiyografik değerlendirmelerde farklı core kaslarının hareketin çeşitli aşamalarında aktivite gösterdiği bildirilmektedir. Özellikle internal oblique ve transversus abdominis gibi kasların gövde kontrolünde görev aldığı ve kas aktivitesinin gerçekleştirilen yüzme hareketinin özelliklerine göre değişebildiği belirtilmektedir. Kelebek yüzmede gövdenin dalga hareketine daha fazla katılması, core bölgesindeki kasların hareket

boyunca farklı düzeylerde çalışmasını gerektiren bir özellik olarak ele alınmaktadır. Bu durum, yüzme sırasında core kaslarının yalnızca gövdeyi sabitlemek amacıyla değil, hareketin kendisine katılarak gövdenin kontrollü biçimde yönlendirilmesine de katkı sağladığını göstermektedir (Pink ve Tibone, 2000).

Bu farklı hareket özellikleri dikkate alındığında core antrenmanlarının tüm yüzücüler için aynı içerikte planlanması yerine, sporcunun uzmanlaştığı yüzme stilinin gerektirdiği hareket yapısıyla ilişkilendirilmesi daha uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Serbest ve sırtüstü yüzme için gövde rotasyonu ve rotasyon sırasında stabilizasyonu korumaya yönelik çalışmalar ne çıkarken, kelebek yüzmede dinamik gövde kontrolü; kurbağalama yüzmede ise gövde, pelvis ve kalça arasındaki koordinasyonun desteklenmesine yönelik uygulamalar değerlendirilebilir. Bu doğrultuda rotasyon, dinamik stabilizasyon ve gövde kontrolüne yönelik çalışmaların yüzücünün teknik gereksinimleri doğrultusunda antrenman programına dahil edilmesi önerilmektedir (Tong ve McConnell, 2016; Liu ve ark. 2026).

6. Core Antrenmanlarının Yüzme Performansına Yansıması

Core antrenmanları, gövde stabilizasyonu, hareket kontrolü ve kuvvet aktarımı gibi performansla ilişkili özelliklerin geliştirilmesine yönelik bir antrenman yaklaşımı olarak ele alınmaktadır. Core stabilitesinin geliştirilmesinin, hareket sırasında gövde kontrolünün sağlanması ve ekstremiter tarafından oluşturulan kuvvetlerin daha etkili biçimde aktarılmasıyla ilişkili olduğu belirtilmektedir (Hibbs ve ark., 2008; Kibler ve ark., 2006).

Yüzücüler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, core antrenmanlarının yüzme performansı ile ilişkili olabileceğini göstermektedir. Weston ve ark. (2015) tarafından gerçekleştirilen sekiz haftalık core antrenmanı uygulamasında 50 m serbest stil performansında anlamlı gelişme bildirilmiştir. Bu bulgu, core antrenmanlarının belirli yüzme performans göstergeleri üzerinde etkili olabileceğine ilişkin araştırma bulgularından biri olarak değerlendirilmektedir (Weston ve ark., 2015).

Core dayanıklılığının yüzme sırasında teknik özelliklerin ve performansın sürdürülmesiyle de ilişkili olduğu bildirilmektedir. Bu kapsamda gövde kontrolünün devam ettirilmesinin, yüzme hareketlerinin tekrarlar boyunca sürdürülebilmesi açısından dikkate alınması gereken özelliklerden biri olduğu belirtilmiştir (Tong ve McConnell, 2016).

Core antrenmanlarının performansa yönelik etkileri, özellikle gövde stabilizasyonu ve nöromüsküler kontrol açısından da ele alınmaktadır. Düzenli core çalışmalarının postüral

stabilizasyon, denge ve fonksiyonel kuvvet gibi özelliklerle ilişkili olduğu bildirilmiş ve bu özelliklerin sportif hareketlerin uygulanması açısından önemi vurgulanmıştır (Behm ve ark., 2010).

Bununla birlikte yüzme performansı çok sayıda fizyolojik, biyomekanik ve teknik değişkenin etkileşimiyle ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle core antrenmanlarının yüzme performansı üzerindeki etkisinin, yüzme antrenmanının diğer bileşenlerinden bağımsız olarak değerlendirilmemesi ve core çalışmalarının yüzme antrenmanını destekleyen tamamlayıcı uygulamalar içerisinde ele alınması gerektiği belirtilmektedir (Hibbs ve ark., 2008; Kibler ve ark., 2006).

7. Core Antrenmanlarının Programlanması

Core antrenmanlarının uygulanmasında farklı hareket özelliklerinin birlikte ele alınması, core sisteminin farklı koşullardaki fonksiyonlarının geliştirilmesine yönelik bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Plank, side plank ve dead bug gibi çalışmalar gövde stabilizasyonunun geliştirilmesine yönelik örnekler arasında yer alırken, squat, lunge, medicine ball slam ve ayakta gerçekleştirilen rotasyonel çalışmalar gövdenin ekstremitelerle birlikte çalışmasını gerektiren uygulamalar arasında değerlendirilmektedir (McGill, 2010; Kibler ve ark., 2006).

Yatay pozisyonda gerçekleştirilen core egzersizleri gövde stabilizasyonu ve yüzme sırasında gerekli olan yatay vücut pozisyonuyla ilişkilendirilirken, dikey pozisyonda gerçekleştirilen çok eklemlili ve rotasyonel hareketler dinamik stabilizasyon ve kuvvet aktarımının geliştirilmesi açısından ele alınmaktadır (Anderson ve Behm, 2005; Behm ve ark., 2010).

Core antrenmanlarının içeriğinin belirlenmesinde yüzücünün yaşının, gelişim düzeyinin, antrenman geçmişinin ve yüzme stilinin gerektirdiği hareket özelliklerinin dikkate alınması önerilmektedir. Özellikle gelişim dönemindeki sporcularda nöromüsküler kontrol ve postüral stabilizasyonun geliştirilmesine yönelik çalışmaların antrenman programında yer alabileceği belirtilmektedir (Siler ve Kernozek, 2009).

Antrenman içeriğinin ilerleyen dönemlerde yüzme hareketlerinin gerektirdiği stabilizasyon, rotasyon ve kuvvet aktarımı özellikleriyle daha fazla ilişkilendirilmesi mümkün görülmektedir. Bu kapsamda core çalışmalarının yüzme antrenmanından bağımsız bir uygulama olarak değil, yüzücünün teknik ve performans özelliklerini destekleyen bir antrenman bileşeni şeklinde planlanması önerilmektedir (Hibbs ve ark., 2008; Tong ve McConnell, 2016).

8. Sonuç ve neriler

Core sistemi; yüzme sırasında gövde kontrolünün sağlanması, hareketlerin koordinasyonu ve ekstremiteler tarafından oluşturulan kuvvetlerin hareket bütünlüğü içerisinde aktarılması açısından önemli bir bileşen olarak değerlendirilebilir. Yüzme stillerinin teknik özellikleri ve hareket yapıları dikkate alındığında, gövdenin stabilizasyonu ile kontrollü hareket edebilme kapasitesinin yüzme performansı ile birlikte ele alınması uygun görülmektedir.

Core antrenmanları, yüzme antrenmanlarını destekleyen tamamlayıcı bir uygulama olarak planlanabilir. Antrenman içeriğinde gövde stabilizasyonu, dinamik kontrol, rotasyonel hareketler ve kuvvet aktarımına yönelik farklı egzersizlere yer verilmesi; uygulamaların yüzücünün yaşına, gelişim düzeyine, antrenman geçmişine ve uzmanlaştığı yüzme stiline göre düzenlenmesi önerilmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı yüzme stillerinde core kapasitesinin performansla ilişkisi, farklı yaş ve performans düzeylerinde uygulanan core antrenmanlarının etkileri ve core gelişiminin yüzme tekniği ile performans göstergelerine yansımaları birlikte incelenebilir. Bunun yanında core antrenmanlarının yüzme antrenmanının diğer bileşenleriyle birlikte ele alındığı daha uzun süreli ve farklı performans düzeylerini kapsayan araştırmalara ihtiyaç olduğu değerlendirilmektedir.

Kaynakça

- Akuthota, V., & Nadler, S. F. (2004). Core strengthening. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85, 86–92.
- Anderson, K. G., & Behm, D. G. (2005). The impact of instability resistance training on balance and stability. *Sports Medicine*, 4, 45–48.
- Behm, D. G., Drinkwater, E. J., Willardson, J. M., & Cowley, P. M. (2010). The role of instability with resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24, 1–12.
- Hibbs, A. E., Thompson, K. G., French, D., Wrigley, A., & Spears, I. (2008). Optimizing performance by improving core stability and core strength. *Sports Medicine*, 38, 995–1018.
- Kibler, W. B., Press, J., & Sciascia, A. (2006). The role of core stability in athletic function. *Sports Medicine*, 36, 189–198.
- McGill, S. M. (2010). Core training: Evidence translating to better performance and injury prevention. *Strength & Conditioning Journal*, 9, 114–123.
- Pink, M., & Tibone, J. (2000). The painful shoulder in the swimming athlete. *Orthopedic Clinics of North America*, 31, 247–261.
- Liu, S., Dai, J., Gou, P., & Lin, M. (2025). The effects of core stability training on swimming performance in youth swimmers: A systematic review and meta-analysis. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1), 327.
- Tong, T. K., McConnell, A. K., Lin, H., Nie, J., Zhang, H., & Wang, J. (2016). “Functional” inspiratory and core muscle training enhances running performance and economy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(10), 2942–2951.
- Weston, M., Hibbs, A. E., Thompson, K. G., & Spears, I. R. (2015). Isolated core training improves sprint performance in national-level junior swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29, 343–348.
- Willardson, J. M. (2007). Core stability training: Applications to sports conditioning programs. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21, 979–985.

BÖLÜM 4

EGZERSİZ VE BAĞIŞIKLIK FİZYOLOJİSİ

Recep GÜNAY¹, Mehmet SERT²

¹ Bilim Uzmanı, Öğretmen Özel Akkol Koleji/Sur/DİYARBAKIR recep_emre2121@hotmail.com

² Bilim Uzmanı, Öğretmen Atatürk Ortaokulu/Bağlar/DİYARBAKIR mehmet.sertt21@gmail.com

Giriş

Bağışıklık sistemi, organizmanın dış ve iç kaynaklı tehditlere karşı korunmasını sağlayan, çok sayıda hücre, doku ve moleküler aracının etkileşimiyle çalışan dinamik bir savunma sistemidir. Doğal bağışıklık ve adaptif bağışıklık olmak üzere iki temel bileşenden oluşan bu sistem, yalnızca enfeksiyon etkenlerinin ortadan kaldırılmasında değil, inflamatuvar yanıtın düzenlenmesinde, doku bütünlüğünün korunmasında ve organizmanın homeostazının sürdürülmesinde de önemli rol üstlenmektedir. Egzersiz ise metabolik, hormonal, hemodinamik ve mekanik değişiklikleri aynı anda ortaya çıkaran sistemik bir uyarıcı olduğundan, bağışıklık sistemi üzerinde de çok yönlü etkiler oluşturmaktadır. Güncel literatürde egzersizin bağışıklık sistemi üzerindeki etkilerinin egzersizin türü, şiddeti, süresi ve bireyin fizyolojik özelliklerine bağlı olarak değişebildiği vurgulanmaktadır (Duran, 2023; Phelps & Meisel, 2026).

Egzersiz ve bağışıklık arasındaki ilişki, tek bir mekanizma üzerinden açıklanamayacak kadar karmaşıktır. Akut egzersiz sırasında dolaşımdaki bağışıklık hücrelerinin sayısı ve dağılımı geçici olarak değişebilirken, düzenli egzersiz ile bu hücrelerin fonksiyonel özelliklerinde daha uzun süreli adaptasyonlar ortaya çıkabilmektedir. Özellikle doğal öldürücü hücreler, nötrofiller, monositler ve T lenfositler gibi hücrelerin egzersiz sırasında dolaşıma katılması, bağışıklık gözetiminin önemli bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanında iskelet kasından salınan miyokinler, katekolaminler, sitokinler ve metabolik ürünler, egzersiz ile bağışıklık sistemi arasındaki iletişimde rol oynayan temel araçlar arasında gösterilmektedir (Clemente-Suárez ve ark., 2023; Phelps & Meisel, 2026).

Bu çerçevede egzersizin bağışıklık üzerindeki etkilerinin yalnızca “bağışıklığı güçlendirme” şeklinde açıklanması yeterli değildir. Daha doğru yaklaşım, egzersizi bağışıklık yanıtını düzenleyen ve farklı koşullarda farklı sonuçlar ortaya çıkarabilen fizyolojik bir uyarıcı olarak değerlendirmektir. Nitekim egzersizin bağışıklık hücrelerinin mobilizasyonu ve fonksiyonunu etkilediği, ancak bu etkinin egzersizin dozu ve bireysel özelliklere göre değişebildiği bildirilmektedir (Duran, 2023; Phelps & Meisel, 2026).

1. Egzersizin Bağışıklık Sistemi Üzerindeki Fizyolojik Etkileri

Bağışıklık sisteminin temel bileşenlerinden biri doğal bağışıklıktır. Doğal bağışıklık, organizmanın mikroorganizmalar ve diğer potansiyel tehditlerle karşılaşmasının ardından hızlı biçimde devreye giren savunma mekanizmalarını kapsamaktadır. Nötrofiller, monositler, makrofajlar ve doğal öldürücü hücreler bu yanıtın önemli hücresel bileşenlerini oluşturmaktadır. Makrofajlar, fagositozun yanı sıra sitokin üretimi, inflamatuvar yanıtın düzenlenmesi ve doku homeostazının sürdürülmesi açısından da işlev görmektedir. Bu nedenle egzersiz sırasında oluşan inflamatuvar ve metabolik değişikliklerin makrofajların aktivitesi ve fonksiyonel özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Kollipara & Perumal, 2010; Li ve ark., 2021).

Egzersizin doğal bağışıklık üzerindeki akut etkileri özellikle lökosit mobilizasyonu üzerinden belirginleşmektedir. Egzersiz sırasında sempatik sinir sistemi aktivitesindeki artış ve dolaşımdaki katekolamin düzeylerinin yükselmesi, bazı bağışıklık hücrelerinin dolaşıma geçişini kolaylaştırabilmektedir. Bu değişiklik, egzersiz sırasında bağışıklık hücrelerinin farklı dokulara ulaşabilmesini sağlayan geçici bir yeniden dağılım olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye'de yapılan bir çalışmada da farklı kuvvet egzersizi yöntemlerinin akut olarak lökosit değerlerinde değişiklik oluşturabildiği gösterilmiştir (Hazar & Ateşoğlu, 2010).

Düzenli egzersiz ise akut yanıtın tekrarlanması sonucunda bağışıklık sisteminin daha uzun süreli adaptasyonlar geliştirmesine katkıda bulunabilmektedir. Bu adaptasyonlar yalnızca dolaşımdaki hücre sayılarındaki değişikliklerle sınırlı olmayıp hücrelerin fonksiyonları, inflamatuvar yanıtın düzenlenmesi ve bağışıklık gözetiminin etkinliğiyle de ilişkili olabilmektedir. Düzenli egzersizin bağışıklık sistemindeki farklı hücresel mekanizmaları düzenleyebileceği ve bu etkinin egzersizin özelliklerine göre değişebileceği bildirilmektedir (Duran, 2023).

Egzersizin akut bağışıklık yanıtları üzerindeki etkileri, egzersizin süresi, şiddeti ve çevresel koşullar gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Farklı hava sıcaklıklarında yapılan aerobik egzersizlerin bağışıklık hücrelerine akut etkisinin incelendiği bir çalışmada, 0°C ve 12°C sıcaklıklarda yapılan egzersizlerde lökosit ve nötrofil sayılarının önemli derecede arttığı, 24°C sıcaklıkta ise yalnızca nötrofil sayılarında artış görüldüğü belirlenmiştir. Diğer kan hücrelerinde ise üç farklı sıcaklıkta yapılan egzersizlerde herhangi bir değişime rastlanmamıştır (Ulupınar ve ark., 2021). Bu bulgular, çevre sıcaklığının akut egzersiz sırasında ortaya çıkan bağışıklık yanıtlarının niteliğini etkileyebileceğini göstermektedir.

Adaptif bağışıklık sistemi ise daha özgül ve uzun süreli bağışıklık yanıtlarının oluşturulmasında görev almaktadır. T ve B lenfositleri bu sistemin temel hücresel bileşenleridir. T hücreleri enfekte veya değişime uğramış hücrelerin tanınması ve hücresel bağışıklık yanıtının düzenlenmesinde rol oynarken, B hücreleri antikor üretimi aracılığıyla hüморal bağışıklığın temelini oluşturmaktadır. Antijen sunan hücreler (antigen-presenting cells, APC) ise doğuştan gelen ve adaptif bağışıklık arasında önemli bir bağlantı oluşturarak antijenlerin T hücrelerine sunulmasına katkı sağlamaktadır (Ratajczak ve ark., 2018; Li ve ark., 2021).

Egzersizin bağışıklık sistemi üzerindeki etkileri yalnızca bağışıklık hücrelerinin sayısal değişimleriyle sınırlı olmayıp, egzersize bağlı sitokin yanıtları üzerinden de değerlendirilmektedir. Elit güreşçiler üzerinde yapılan bir çalışmada, sekiz hafta boyunca uygulanan maksimal kuvvet antrenmanları sonrasında IL-6 düzeylerinin her ölçümde antrenman öncesine göre daha yüksek olduğu, ancak haftalar ilerledikçe IL-6'nın antrenmanlara verdiği yanıtın azaldığı belirlenmiştir. Uzun süreli ağır antrenmanlara rağmen süreç içerisinde bağışıklık sistemi hücrelerinde istatistiksel olarak anlamlı bir olumsuzluk ortaya çıkmadığı bildirilmiştir (Özbay, 2017).

Egzersiz ile adaptif bağışıklık arasındaki ilişki, özellikle immünoglobulinler ve lenfosit fonksiyonları üzerinden değerlendirilmektedir. Türkiye'de sporcular üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada kısa ve uzun süreli egzersizlerin IgG alt gruplarının plazma düzeyleriyle ilişkili değişiklikler oluşturabildiği bildirilmiştir. Bu bulgular, egzersizin yalnızca akut dolaşım değişiklikleriyle sınırlı kalmayıp hüморal bağışıklığın bazı göstergeleri üzerinde de etkili olabileceğini düşündürmektedir (İriadam & Özbek, 2010). Aerobik ve anaerobik egzersize katılan deneklerin IgA, IgM, IgG, IgE, C3, C4 parametrelerindeki değişimler literatürle paralellik göstermesine karşın istatistiksel olarak bir farkın olmadığı tespit edilmiştir ($p>0,05$). Yapılan bu çalışmada, immünoglobulin değerlerinde herhangi bir değişmenin olmaması immünoglobulinlerin egzersize akut cevabıyla açıklanabilir (İbiş ve ark., 2010).

Egzersiz sırasında ortaya çıkan bağışıklık yanıtının önemli düzenleyicilerinden biri de iskelet kasıdır. Kas dokusu yalnızca mekanik hareketi sağlayan bir yapı olmayıp egzersiz sırasında çeşitli biyolojik sinyaller üreten aktif bir endokrin organ olarak değerlendirilmektedir. Kas kasılmasıyla birlikte ortaya çıkan miyokinler, dolaşım sistemi aracılığıyla farklı dokular üzerinde etkiler oluşturabilmekte ve bağışıklık sisteminin düzenlenmesine katkıda bulunabilmektedir. Özellikle interlökin-6 gibi egzersize duyarlı sinyaller ile katekolaminler, bağışıklık hücrelerinin mobilizasyonu ve fonksiyonunun düzenlenmesinde önemli araçlar arasında gösterilmektedir (Phelps & Meisel, 2026).

Egzersiz-bağışıklık ilişkisinin bir diğer önemli boyutu bağırsak mikrobiyotasındaki değişimlerdir. Düzenli fiziksel aktivitenin bağırsak mikrobiyotasının bileşimi ve metabolik aktivitesiyle ilişkili olabileceği, mikrobiyota kaynaklı metabolitlerin ise sistemik inflamasyon ve bağışıklık yanıtını etkileyebileceği bildirilmektedir. Bu nedenle günümüzde egzersizin bağışıklık üzerindeki etkileri yalnızca bağışıklık hücreleri ve sitokinler üzerinden değil, kas, yağ dokusu, damar sistemi ve bağırsak mikrobiyotası arasındaki çoklu etkileşimler üzerinden ele alınmaktadır (Phelps & Meisel, 2026).

Egzersiz sırasında oluşan bağışıklık yanıtının şiddeti ve yönü, egzersizin dozuna bağlı olarak değişebilmektedir. Orta düzeyde ve düzenli fiziksel aktivitenin bağışıklık sisteminin düzenlenmesi açısından olumlu adaptasyonlarla ilişkili olduğu bildirilirken, yoğun ve uzun süreli egzersiz yüklerinin bazı koşullarda geçici bağışıklık değişiklikleri oluşturabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle egzersiz ile bağışıklık arasındaki ilişki doğrusal bir “daha fazla egzersiz, daha güçlü bağışıklık” modeliyle açıklanamamaktadır (Reid & Danese, 2020).

2. Egzersiz ve Bağışıklık Sisteminin Hastalıklarla İlişkisi

Bağışıklık sisteminin temel işlevlerinden biri enfeksiyonlara karşı korunmayı sağlamak olmakla birlikte, bağışıklık yanıtının aşırı veya yetersiz olması çeşitli hastalık süreçleriyle ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle egzersizin bağışıklık sistemi üzerindeki etkileri enfeksiyon hastalıklarının yanı sıra kronik inflamasyon, metabolik hastalıklar, nörolojik hastalıklar ve kanser gibi farklı klinik durumlar açısından da değerlendirilmektedir. Güncel yaklaşımlar, egzersizin bu hastalıklardaki etkilerini doğrudan tek bir bağışıklık mekanizmasına bağlamak yerine inflamasyon, metabolizma, hormonlar ve bağışıklık hücreleri arasındaki etkileşimler üzerinden açıklamaktadır (Phelps & Meisel, 2026).

Kronik inflamasyon, uzun süre devam eden ve dokuların normal işlevlerini olumsuz etkileyebilen bir bağışıklık yanıtı olarak birçok kronik hastalığın ortak özelliklerinden biridir. Fiziksel aktivitenin düzenli olarak gerçekleştirilmesi, metabolik düzenleme ve inflamatuvar süreçler üzerinde değişiklikler oluşturabilmektedir. Özellikle fiziksel uygunluk düzeyi yüksek bireylerde bağışıklık hücrelerinin inflamatuvar uyarılara verdiği yanıtın farklılaşabildiği ve egzersizin inflamatuvar homeostazın düzenlenmesine katkı sağlayabileceği ileri sürülmektedir (Reid & Danese, 2020; Phelps & Meisel, 2026).

Bağışıklık sisteminin kronik inflamasyonla ilişkisi nörolojik hastalıklar açısından da önem taşımaktadır. Mikroglia ve diğer immün hücreler merkezi sinir sistemindeki inflamatuvar süreçlerde rol oynayabilmektedir. Egzersizin nöroinflamasyon üzerinde düzenleyici etkiler oluşturabileceğine ilişkin deneysel bulgular, fiziksel aktivitenin sinir sistemi ile bağışıklık sistemi arasındaki etkileşim açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Han ve

ark., 2023). Benzer biçimde fiziksel egzersizin bazı nörolojik hastalıklarda bağışıklık hücrelerinin davranışları ve inflamatuvar yanıtla ilişkili mekanizmalar üzerinden etkiler oluşturabileceği bildirilmektedir (Chen ve ark., 2022).

Solunum sistemi hastalıkları açısından değerlendirildiğinde de egzersiz ile bağışıklık arasında çift yönlü bir ilişki bulunmaktadır. Düzenli fiziksel aktivite, solunum sistemi fonksiyonlarının ve genel fiziksel uygunluğun desteklenmesiyle birlikte bağışıklık yanıtının düzenlenmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte çevresel koşullar, hava kalitesi, egzersiz yoğunluğu ve bireyin sağlık durumu gibi faktörler egzersiz sırasında ortaya çıkan fizyolojik yanıtları değiştirebildiğinden, egzersizin solunum yolu enfeksiyonları üzerindeki etkileri bağlamdan bağımsız biçimde değerlendirilmemelidir (Marek ve ark., 2025; Kurowski ve ark., 2022).

Kanser açısından bakıldığında egzersiz ile bağışıklık arasındaki ilişki son yıllarda daha fazla araştırılmaktadır. Egzersizin doğal öldürücü hücreler ve sitotoksik T hücreleri gibi antitümör bağışıklıkta görev alan hücrelerin mobilizasyonunu ve fonksiyonunu etkileyebileceği bildirilmektedir. Bunun yanında egzersiz sırasında ortaya çıkan metabolik ve hormonal sinyallerin tümör mikroçevresiyle etkileşebileceği gösterilmiştir. Ancak bu bulgular, egzersizin tek başına kanseri önlediği veya tedavi ettiği şeklinde yorumlanmamalı; fiziksel aktivitenin kanser biyolojisi ve bağışıklık yanıtı üzerindeki olası düzenleyici rolü çerçevesinde değerlendirilmelidir (Xia ve ark., 2026; Phelps & Meisel, 2026).

Egzersiz ve hastalık ilişkisi değerlendirilirken bireysel farklılıkların da dikkate alınması gerekmektedir. Yaş, cinsiyet, fiziksel uygunluk düzeyi, beslenme, uyku, stres, mevcut hastalıklar ve kullanılan ilaçlar bağışıklık yanıtını değiştirebilmektedir. Dolayısıyla aynı egzersiz programının farklı bireylerde aynı immünolojik sonucu ortaya çıkarması beklenmemelidir. Güncel egzersiz immünolojisi yaklaşımı da egzersizin bağışıklık üzerindeki etkilerinin bireyselleştirilmiş egzersiz dozları üzerinden değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir (Phelps & Meisel, 2026).

Fiziksel aktivitenin sağlık üzerindeki etkileri yalnızca biyolojik göstergelerle sınırlı değildir. Bireylerin sağlık bilgisi, hastalık risklerine ilişkin farkındalıkları ve koruyucu davranışları da sağlıkla ilişkili önemli unsurlar arasında değerlendirilmektedir. Nitekim sağlıkla ilişkili farkındalık düzeyinin, bireyin egzersize devamlılığından bağımsız olarak bazı kişisel özelliklerden etkilenebileceği ve egzersize devamlılık ile farkındalık arasında her zaman doğrudan bir ilişki bulunmayabileceği bildirilmiştir (Gözaçık, 2026). Sağlık davranışlarının değerlendirilmesinde bu tür bireysel farklılıkların dikkate alınması, fiziksel aktivite ile sağlık arasındaki ilişkinin daha kapsamlı biçimde ele alınmasına katkı sağlayabilir.

3. Egzersiz, Bağışıklık ve Enfeksiyonlardan Korunma

Enfeksiyonlardan korunma, bağışıklık sisteminin yeterli ve uygun yanıt oluşturabilmesine bağlı olmakla birlikte yalnızca immünolojik mekanizmalarla açıklanamayacak kadar çok boyutlu bir süreçtir. Patojenin özellikleri, maruziyet düzeyi, çevresel koşullar, hijyen, beslenme, uyku ve bireysel davranışlar enfeksiyon riskini etkileyebilmektedir. Egzersiz bu süreçte bağışıklık sisteminin çeşitli bileşenlerini düzenleyen fizyolojik bir unsur olarak değerlendirilebilir; ancak egzersiz tek başına enfeksiyonlardan korunmanın garantisi olarak görülmemelidir (Kurowski ve ark., 2022; Phelps & Meisel, 2026).

Orta düzeyde düzenli egzersizin bağışıklık gözetimini destekleyebileceğine ilişkin bulgular, özellikle doğal bağışıklık hücrelerinin dolaşımındaki geçici artışlar ve düzenli egzersizle ortaya çıkan adaptasyonlar üzerinden açıklanmaktadır. Egzersiz sırasında nötrofiller, doğal öldürücü hücreler ve bazı T hücrelerinin dolaşıma geçişi, organizmanın bağışıklık gözetim kapasitesinin geçici olarak artmasına katkıda bulunabilmektedir. Düzenli egzersizin tekrarlanan bu fizyolojik yanıtlar aracılığıyla daha uzun süreli immünolojik adaptasyonlara katkı sağlayabileceği düşünülmektedir (Ratajczak ve ark., 2018; Reid & Danese, 2020).

Bununla birlikte yüksek hacimli veya yüksek şiddetli egzersiz yükleri sonrasında oluşan geçici fizyolojik değişiklikler nedeniyle enfeksiyon riskinin bazı koşullarda farklılaşabileceği ileri sürülmüştür. Burada belirleyici olan yalnızca egzersizin şiddeti değil; egzersizin süresi, toparlanma düzeyi, uyku, enerji alımı ve çevresel koşulların birlikte değerlendirilmesidir. Bu nedenle egzersiz programlarının bağışıklık açısından değerlendirilmesinde antrenman yükü ile toparlanma arasındaki dengenin korunması önem taşımaktadır (Marek ve ark., 2025).

Enfeksiyonlardan korunma açısından egzersizin çevresel boyutu da önemlidir. Özellikle yüzme gibi bireyin su, hava ve ortak kullanım alanlarıyla doğrudan etkileşim içinde olduğu fiziksel aktivitelerde hijyen, tesis koşulları ve bireysel korunma davranışları enfeksiyon riskinin değerlendirilmesinde dikkate alınmalıdır. Bireylerin bulaşıcı hastalıklara yönelik bilgi ve bilinç düzeylerinin yanı sıra korunmaya ilişkin tutumlarının da kişisel özellikler doğrultusunda değişebilir ve bu durumlar bireyler açısından fizyolojik etkilere sebep olabilir (Gözaçık, 2025). Bu nedenle egzersiz yapılan ortamların enfeksiyon açısından güvenli hâle getirilmesinde fiziksel ve hijyenik koşullar kadar, bireylerin riskleri tanıma ve uygun korunma davranışlarını benimseme düzeylerinin de dikkate alınması önem taşımaktadır.

Aşılama da bağışıklık sisteminin enfeksiyonlara karşı korunmasında temel stratejilerden biridir. Egzersiz ile aşılama yanıtı arasındaki ilişki, fiziksel aktivitenin bağışıklık sistemi üzerindeki düzenleyici etkileri açısından önem taşımaktadır. Türkiye'de 2026 yılında yayımlanan bir çalışmada COVID-19 aşısı olmuş sağlık çalışanlarında egzersiz alışkanlığı ile antikor düzeyi arasındaki ilişki değerlendirilmiş ve bu konu egzersiz, bağışıklık ve aşı yanıtı arasındaki ilişkinin güncel bir araştırma alanı olduğunu ortaya koymuştur (Ateş ve ark., 2026).

Egzersiz ve enfeksiyon arasındaki ilişki değerlendirilirken davranışsal ve çevresel faktörlerin de bağışıklık fizyolojisiyle birlikte ele alınması gerekmektedir. Bireyin enfeksiyon riskine ilişkin bilgisi, hijyen davranışları, sağlık hizmetlerine başvurma eğilimi ve koruyucu uygulamalara uyumu, biyolojik savunma mekanizmalarının yanında enfeksiyonlardan korunmada önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle egzersiz yapan bireylerde enfeksiyonlardan korunma yaklaşımı yalnızca fizyolojik bağışıklık yanıtına değil, aynı zamanda sağlık okuryazarlığı ve koruyucu davranışlara da dayanmalıdır (Gözaçık, 2025; Ateş ve ark., 2026).

4. Sonuç

Egzersiz ve bağışıklık arasındaki ilişki, egzersizin türü, yoğunluğu, süresi ve sıklığı ile bireysel özelliklere bağlı olarak değişebilen çok yönlü bir süreçtir. Egzersiz sırasında ortaya çıkan fizyolojik yanıtlar, bağışıklık sisteminin farklı bileşenleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle düzenli ve uygun düzeyde gerçekleştirilen egzersizin organizmanın fizyolojik dengesinin sürdürülmesine katkı sağlayabileceği, egzersiz yükünün ve toparlanma süreçlerinin ise bu ilişkinin önemli belirleyicileri olduğu söylenebilir.

Egzersiz bağışıklık sistemi üzerindeki etkileri yalnızca bağışıklık hücreleriyle sınırlı olmayıp metabolik, hormonal ve diğer fizyolojik süreçlerle birlikte ele alınmalıdır. Bu nedenle egzersiz-bağışıklık ilişkisi, bağışıklığı doğrudan artıran tek yönlü bir etki olarak değil, organizmanın iç dengesini etkileyen bütüncül bir süreç olarak değerlendirilmelidir. Egzersizin sağlıklı yaşamın önemli bileşenlerinden biri olduğu dikkate alınmakla birlikte, bağışıklık ve enfeksiyonlarla ilişkili sonuçların değerlendirilmesinde beslenme, uyku, hijyen, stres yönetimi ve çevresel koşullar gibi diğer etkenlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Sonuç olarak, düzenli ve bireyin özelliklerine uygun şekilde planlanan egzersiz, bağışıklık sisteminin işleyişiyle ilişkili önemli fizyolojik süreçlerden biri olarak değerlendirilebilir. Bu ilişkinin ortaya konulmasında egzersiz dozunun, toparlanma düzeyinin ve bireysel farklılıkların birlikte ele alınması, egzersiz ile bağışıklık arasındaki ilişkinin daha doğru ve kapsamlı biçimde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

5. Öneriler

Egzersiz ve bağışıklık ilişkisine yönelik uygulamalarda öncelikle bireyin mevcut sağlık durumu, fiziksel uygunluk düzeyi ve egzersiz geçmişi dikkate alınmalıdır.

Egzersiz programlarında yüklenme ve toparlanma arasındaki denge korunmalı, yüksek egzersiz yüklerinin uzun süreli ve yetersiz toparlanma ile uygulanmasından kaçınılmalıdır.

Bağışıklık sistemi üzerindeki etkilerin yalnızca egzersizin şiddeti üzerinden değerlendirilmemesi; egzersizin süresi, sıklığı, türü, beslenme, uyku ve stres gibi faktörlerin birlikte ele alınması önerilmektedir.

Enfeksiyonlardan korunmaya yönelik egzersiz programlarında bireylere hijyen, çevresel riskler ve koruyucu sağlık davranışları konusunda eğitim verilmelidir.

Yüzme gibi çevresel maruziyetin yüksek olduğu egzersizlerde tesis hijyeni, su kalitesi ve bireysel korunma davranışlarına özel önem verilmelidir.

Aşılama gibi kanıta dayalı koruyucu sağlık uygulamaları egzersiz programlarının dışında bırakılmamalı, egzersiz bu uygulamaları tamamlayan bir sağlık davranışı olarak değerlendirilmelidir.

Gelecekte yapılacak araştırmalarda egzersizin bağışıklık üzerindeki etkilerini daha açık biçimde ortaya koyabilmek amacıyla inflamatuvar belirteçler, immünoglobulinler, lenfosit alt grupları, doğal öldürücü hücreler ve sitokinler gibi objektif immünolojik göstergelerin kullanılmasına ağırlık verilmelidir.

Farklı egzersiz türlerinin bağışıklık sistemi üzerindeki etkilerinin karşılaştırıldığı kontrollü çalışmaların artırılması, egzersiz dozunun bağışıklık yanıtıyla ilişkisini daha açık biçimde ortaya koyacaktır.

Özellikle farklı yaş grupları, kadın ve erkek bireyler, sporcular, kronik hastalığı bulunan bireyler ve farklı fiziksel uygunluk düzeylerine sahip gruplar üzerinde gerçekleştirilecek araştırmalar literatüre önemli katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

- Ateş, F., Demirgüç, A., Demirbakan, H., Ergun, N., Diril Ceylan, B., Kuzudişli, N., Günel, P., & Bayram, A. (2026). Covid 19 Aşısı Olan Sağlık Çalışanlarında Antikor Düzeyi İle Egzersiz Alışkanlığı Arasındaki İlişkinin Değerlendirilmesi. *Van Sağlık Bilimleri Dergisi*, 19(2), 56–60. <https://doi.org/10.52976/vansaglik.1741773>
- Clemente-Suárez, V. J., Mielgo-Ayuso, J., Ramos-Campo, D. J., Beltrán-Velasco, A. I., Martínez-Guardado, I., Navarro-Jiménez, E., Redondo-Flórez, L., Yañez-Sepúlveda, R., & Tornero-Aguilera, J. F. (2023). Basis of preventive and non-pharmacological interventions in asthma. *Frontiers in Public Health*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1172391>
- Duran, N. (2023). Egzersizin İmmünite Üzerindeki Etkisine Genel Bakış. *Türkiye Spor Bilimleri Dergisi*, 7(2), 102–110. <https://doi.org/10.32706/tusbid.1395894>
- Gözaçık, Y. (2025). Recreational swimming and infectious disease risks in young adults: An analysis of awareness and preventive measures. *Journal of ROL Sport Sciences*, 6(1), 156–169. <https://doi.org/10.70736/jrolss.537>
- Gözaçık, Y. (2026). Pilates and Health Awareness: The Relationship Between Exercise Commitment and Breast Cancer Awareness in Women. *Research in Sports Science*, 16, 1–8. <https://doi.org/10.5152/rss.2026.25079>
- Han, H., ve ark. (2023). Exercise improves cognitive dysfunction and neuroinflammation in mice through Histone H3 lactylation in microglia. *Immunity & Ageing*, 20, 63.
- Hazar, S., & Ateşoğlu, Ü. (2010). Farklı türdeki kuvvet egzersizlerinin bağışıklık sistemine akut etkisi. *Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 6(4).
- İbiş, S., Hazar, S., & Gökdemir, K. (2010). Aerobik ve anaerobik egzersizlerin hümmoral bağışıklığa akut etkisi. *Sport Sciences*, 5(2), 135-142.
- İriadam, M., & Özbek, S. (2010). Sporcularda kısa ve uzun süreli egzersizlerde Immunglobulin G alt gruplarının plazma değerleri. *Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi*, 1(4).
- Kurowski, M., ve ark. (2022). Physical exercise, immune response, and susceptibility to infections—current knowledge and growing research areas. *Allergy*, 77(9), 2653–2664. <https://doi.org/10.1111/all.15328>
- Li, J., Jiang, X., Li, H., Gelinsky, M., & Gu, Z. (2021). Tailoring Materials for Modulation of Macrophage Fate. *Advanced Materials*, 33(12). <https://doi.org/10.1002/adma.202004172>
- Marek, N., Wolff, A. S. B., Dongre, H., & Suliman, S. (2025). Optimizing monocyte-derived immune cell cultures: comparing xeno-free and xenogeneic conditions. *Frontiers in Immunology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1589553>
- Phelps, C. M., & Meisel, M. (2026). The immunology of exercise: Mechanisms, mediators, and therapeutic opportunities. *Immunity*, 59(7), 1794–1810. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2026.04.016>
- Ratajczak, M. Z., Pędzwiatr, D., Cymer, M., Kucia, M., Kucharska-Mazur, J., & Samochowiec, J. (2018). Sterile Inflammation of Brain, due to Activation of Innate

Immunity, as a Culprit in Psychiatric Disorders. *Frontiers in Psychiatry*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2018.00060>

Reid, B. M., & Danese, A. (2020). Challenges in researching the immune pathways between early life adversity and psychopathology. *Development and Psychopathology*, 32(5), 1597–1624. <https://doi.org/10.1017/s0954579420001157>

Ulupınar, S., Özbay, S., Altınkaynak, K., Şebin, E., & Gençoğlu, C. (2021). Farklı Hava Sıcaklıklarında Yapılan Aerobik Egzersizlerin Bağışıklık Hücrelerine Akut Etkisi. *Türkiye Klinikleri Journal of Sports Sciences*, 13(1), 1.

BÖLÜM 5

SPOR YARALANMALARINDA BİYOMEKANİK FAKTÖRLER

Beyza GÜLER¹, Erdil DURUKAN², Süleyman CAN³

¹ YL, Balıkesir Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Hareket ve Antrenman Anabilim Dalı, Balıkesir, Türkiye. ORCID: 0009-0004-8106-8417.

² Prof. Dr., Balıkesir Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, Balıkesir, Türkiye. ORCID: 0000-0002-1627-1388.

³ Prof. Dr., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Temel Eğitim Bölümü, Sınıf Eğitimi Anabilim Dalı, Muğla, Türkiye. ORCID: 0000-0003-3150-7843.

1. Spor Yaralanmalarına Biyomekanik Yaklaşım

1.1. Biyomekaniğin Spor Yaralanmalarındaki Rolü

Spor yaralanmalarının oluşumunda mekanik yüklenmeler, hareket tekniği ve antrenman koşulları gibi çeşitli faktörler etkili olabilmektedir (Güler & Durukan, 2025). Sportif hareketlerin karmaşık ve çok boyutlu yapısı, yaralanmalarla ilişkili biyomekanik faktörlerin değerlendirilmesinde ayrıntılı incelemelere ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Bu doğrultuda hareket sırasında ortaya çıkan mekanik özelliklerin yalnızca gözleme dayalı olarak değil, nesnel ve ölçülebilir veriler aracılığıyla da incelenmesi önem taşımaktadır (Yeadon & Pain, 2023; Yona ve ark., 2024).

Bu nedenle hareketin yalnızca gözleme dayalı olarak değerlendirilmesi yerine, hareket sırasında ortaya çıkan mekanik özelliklerin nesnel ve ölçülebilir veriler aracılığıyla incelenmesi önem taşımaktadır (Yeadon & Pain, 2023; Yona ve ark., 2024).

Hareket analizi; vücut segmentlerinin konum, hız ve ivme gibi kinematik özelliklerinin yanı sıra hareket sırasında ortaya çıkan kuvvet, eklem tepkileri ve güç gibi mekanik değişkenlerin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Dönmez ve ark., 2014; Zheng & Barrentine, 2000).

Teknolojik gelişmelerle birlikte hareketlerin sayısal ortamda kaydedilmesi ve analiz edilmesi, sporcuların hareket özelliklerinin daha ayrıntılı biçimde incelenmesini ve elde edilen veriler doğrultusunda nesnel geri bildirim sağlanmasını mümkün hâle getirmiştir (Suo ve ark., 2024). Bu yönüyle hareket analizi, sportif hareketlerin yapısının anlaşılmasının yanı sıra bireysel hareket farklılıklarının ve normal hareket örüntülerinden sapmaların belirlenmesinde önemli bir değerlendirme aracı olarak kullanılmaktadır (Dönmez ve ark., 2014).

Spor biyomekaniği, mekanik ilkeler ile insan vücudunun yapısal ve işlevsel özelliklerini bir arada ele alarak sportif hareketleri inceleyen disiplinler arası bir bilim alanıdır (Giustino & Patti, 2025; McGinnis, 2013). Bu doğrultuda kuvvet, hız ve eklem açıları gibi mekanik değişkenler; kasların, eklemlerin ve vücut segmentlerinin hareket sırasındaki davranışlarıyla birlikte değerlendirilmektedir (McGinnis, 2013).

Hareketten elde edilen biyomekanik verilerin ayrıntılı biçimde incelenmesi, karmaşık hareket örüntülerinin ve bu örüntüler arasındaki farklılıkların ortaya konulmasına olanak sağlamaktadır (Warmenhoven, 2026). Bu verilerin sportif tekniklerin değerlendirilmesinde kullanılması, hareketin daha iyi anlaşılmasının yanı sıra teknik becerilerin ve performansın geliştirilmesine yönelik uygulamalara da katkı sağlamaktadır (Giustino & Patti, 2025; Yao, 2023).

Bu yönüyle biyomekanik analiz, sportif bir hareketin nasıl gerçekleştirildiğini ortaya koymanın ötesinde, hareket sırasında oluşan mekanik özelliklerin teknik performansla olan ilişkisinin değerlendirilmesine de olanak tanımaktadır (Yao, 2023).

Bununla birlikte sportif hareketlerin biyomekanik açıdan incelenmesi, yalnızca performansın değerlendirilmesiyle sınırlı değildir. Hareket sırasında ortaya çıkan mekanik değişkenlerin sayısal verilerle belirlenmesi, performansı etkileyen hareket özelliklerinin yanı sıra yaralanma riskiyle ilişkili olabilecek biyomekanik unsurların ortaya konulmasına da katkı sağlamaktadır (Keogh, 2023; Rebelo ve ark., 2023).

Sportif hareketler sırasında vücut segmentlerinin konumu, eklem hareketleri ve kuvvetlerin uygulanma biçimi kas-iskelet sisteminin maruz kaldığı mekanik taleplerle ilişkili olup, bu süreçte gözlenen bazı kinematik ve kinetik özelliklerin eklem yüklenmesi ve yaralanma riskiyle ilişkili olabileceği bildirilmektedir (Belkhelladi ve ark., 2025; Donelon ve ark., 2024; Straub & Powers, 2025; Wang ve ark., 2024).

Yaralanma riski açısından biyomekanik değerlendirme yalnızca eklem hareketlerinin incelenmesiyle sınırlı olmayıp kuvvet ve tork gibi kinetik değişkenlerin değerlendirilmesini de kapsamaktadır (Pérez-Contreras ve ark., 2025; Ramachandran ve ark., 2024). Bu değişkenlerin incelenmesi, yaralanma riskiyle ilişkili olabilecek kuvvet eksikliklerinin ve kaslar arasındaki dengesizliklerin belirlenmesine katkı sağlayabilmektedir (Pérez-Contreras ve ark., 2025). Bununla birlikte yaralanmaların çok faktörlü yapısı nedeniyle biyomekanik değerlendirmelerden elde edilen bulguların diğer risk faktörleriyle birlikte ele alınması gerekmektedir (Alahaidib ve ark., 2025).

1.2. Mekanik Yüklenme ve Doku Hasarı

Sportif faaliyetler sırasında kas-iskelet sistemi, hareketin gerçekleştirilmesiyle birlikte çeşitli mekanik yüklere maruz kalmaktadır (Wearing ve ark., 2024). Mekanik yüklenme, dokulara etki eden kuvvetlerin oluşturduğu mekanik taleplerle ilişkili olup, bu kuvvetler dokularda şekil değişikliğine ve iç gerilim oluşumuna neden olabilmektedir (Wang ve ark., 2024).

Bununla birlikte mekanik yüklenme yalnızca doku hasarıyla ilişkili bir süreç olmayıp, uygun koşullarda kas-iskelet sistemi dokularının yapısal ve işlevsel uyumunu destekleyen önemli bir uyaran niteliği taşımaktadır (Gabbett & Oetter, 2025; Jin, 2026). Dokuların yüklenmeye verdiği yanıt, uygulanan yükün özellikleri ve toparlanma süreciyle ilişkili olduğundan, mekanik yüklenmenin etkilerinin dokuların mevcut yük taşıma kapasitesiyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Gabbett & Oetter, 2025; Wang ve ark., 2024).

Kas-iskelet sistemini oluşturan kas, tendon, bağ, kemik ve kıkırdak dokuları, yapısal ve biyomekanik özellikleri bakımından birbirinden farklılık göstermektedir (Chen ve ark., 2025). Bu farklılıklar, dokuların mekanik yükler karşısındaki davranışlarını ve yüklenmeye verdikleri biyolojik yanıtları etkileyebilmektedir (Jin, 2026; Ti ve ark., 2025). Özellikle tendon ve bağ dokularının mekanik özellikleri, maruz kaldıkları yüklerin türü ve uygulanma biçimiyle ilişkili olarak farklı yanıtlar gösterebilmektedir (Tam & Baar, 2025).

Bununla birlikte düzenli mekanik yüklenmelerin tendon dokusunun sertlik ve materyal özelliklerinde adaptasyon sağlayabildiği gösterilmiştir (Lazarczuk ve ark., 2022). Dolayısıyla mekanik yüklenmeye karşı gelişen yapısal ve işlevsel uyumun, dokuların kendilerine özgü özellikleri ve yüklenme koşulları doğrultusunda farklılaşabileceği anlaşılmaktadır (Ti ve ark., 2025).

. Mekanik yüklenmenin dokular üzerindeki etkileri, uygulanan yükün büyüklüğünün yanı sıra yüklenme hızı, sıklığı ve tekrarlanma sayısı gibi değişkenlere bağlı olarak farklılaşabilmektedir (Tsai ve ark., 2024; von Stengel ve ark., 2023).

Kemik dokusu üzerine yapılan araştırmalar, aynı düzeyde mekanik deformasyon oluşturan yüklenmelerin bile uygulanma özelliklerine göre farklı adaptasyon yanıtları meydana getirebildiğini göstermektedir (Wang ve ark., 2025). Bu doğrultuda mekanik yüklenmenin etkilerinin yalnızca uygulanan kuvvetin büyüklüğüyle açıklanamayacağı, yüklenmeler

arasındaki dinlenme sürelerinin ve yüklenme döngülerinin de dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir (Nepal ve ark., 2023).

Bu bağlamda tekrarlayan mekanik yüklenmelerin dokunun uyum kapasitesini aşması durumunda, özellikle kemik dokusunda mikrohasar birikimi ve buna bağlı yaralanma süreçleri gelişebilmektedir (Crunkhorn ve ark., 2025).

Mekanik yüklenmeye bağlı doku hasarı yalnızca kemik dokusunda değil, tendon ve bağ gibi kolajen bakımından zengin yapılarda da ortaya çıkabilmektedir (Matsushima & Hiroshi, 2024). Tekrarlayan mekanik yüklenmelerin bağ dokusundaki kolajen liflerinin yapısını etkileyebildiği ve dokunun mekanik özelliklerinde değişikliklere neden olabildiği gösterilmiştir (Putera ve ark., 2023). Mekanik yüklenmenin doku hasarına yol açması, uygulanan yük ile dokunun mevcut yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişkiye bağlıdır (Kalkhoven, 2024). Dokunun dayanıklılığını aşan yüklenmeler yapısal hasara neden olabilirken, uygun düzeydeki yüklenmeler ve yeterli toparlanma dokunun uyum sağlamasına katkıda bulunabilmektedir (Wang ve ark., 2024).

2. Spor Yaralanmalarının Biyomekanik Risk Faktörleri

2.1. Eklem Hareketleri ve Yüklenmeler

Sportif hareketler sırasında eklemlerin maruz kaldığı mekanik yüklenmeler, eklem çevresindeki kas, tendon ve bağ dokularının mekanik davranışlarıyla yakından ilişkilidir (Chen & Franklin, 2025; Kaya Keles & Ates, 2023).

Özellikle tendon ve bağ dokuları, hareket sırasında ortaya çıkan mekanik kuvvetlere yanıt veren ve bu uyarılar doğrultusunda yapısal özelliklerini düzenleyebilen yapılardır (Matsushima & Hiroshi, 2024). Bununla birlikte bağ dokularının maruz kaldığı yüklenmelerin özellikleri, dokuların mekanik bütünlüğü açısından önem taşımaktadır (Bleakley & Netterström-Wedin, 2023).

Nitekim ön çapraz bağ dokusu üzerinde gerçekleştirilen deneysel bir araştırmada, tekrarlayan mekanik yüklenmelerin kolajen yapısında bozulmalar ve dokunun mekanik özelliklerinde değişimlerle ilişkili olduğu gösterilmiştir (Putera ve ark., 2023). Ancak belirli bir mekanik değişkenin yaralanma riskiyle ilişkili olması, tek başına doğrudan nedensel bir ilişki bulunduğunu göstermemektedir. Bu nedenle eklem hareketleri ve yüklenmelerin yaralanma riski açısından değerlendirilmesinde, ilgili mekanik değişkenlerin yaralanmaya özgü mekanizmalar ve diğer etkenlerle birlikte ele alınması gerekmektedir (Kalkhoven, 2024).

Bu doğrultuda sportif hareketlerin gerçekleştirilme biçimi ve hareket sırasında ortaya çıkan biyomekanik özellikler, eklem yüklenmelerinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken unsurlardır (Bathe ve ark., 2023; Ebner ve ark., 2025). Özellikle sıçrama sonrası yere iniş gibi dinamik hareketlerde alt ekstremit eklemlerinin açıları ve eklem momentleri, yaralanma riski açısından incelenen biyomekanik değişkenler arasında yer almaktadır (Bathe ve ark., 2023).

Benzer şekilde yön değiştirme hareketlerine ilişkin araştırmalar, hareketin önceden planlanmış veya beklenmedik koşullarda gerçekleştirilmesinin diz eklemine kinematik ve kinetik özelliklerini etkileyebileceğini göstermektedir (Giesche ve ark., 2021). Bununla birlikte bu etkilerin bütün biyomekanik değişkenlerde aynı düzeyde ortaya çıkmadığı, hareketin gerçekleştirilme koşullarına ve incelenen mekanik değişkenlere göre farklılaşabildiği bildirilmektedir (Ebner ve ark., 2025).

Diz eklemının fleksiyon, abdüksiyon ve rotasyon hareketleri ile bu hareketlere eşlik eden eklem momentleri, ön çapraz bağ yaralanmaları açısından incelenen biyomekanik değişkenler arasında yer almaktadır (Beaulieu ve ark., 2023; Straub & Powers, 2025).

Ön çapraz bağ yaralanmalarına yönelik araştırmalarda, diz fleksiyon açısı, frontal ve transvers düzlemdeki eklem hareketleri ile bunlara eşlik eden momentler, yaralanma riski açısından değerlendirilen biyomekanik değişkenler arasında yer almaktadır (Straub & Powers, 2025). Ancak bu değişkenlerin yaralanmaları öngörmedeki rolüne ilişkin bulguların her zaman tutarlı olmadığı ve tek bir biyomekanik göstergenin yaralanma riskini açıklamak için yeterli olmayabileceği belirtilmektedir (Krosshaug ve ark., 2016).

Diz eklemındaki yüklenmelerin değerlendirilmesinde kalça eklemının hareket özellikleri de dikkate alınmalıdır (Howard ve ark., 2011). Yapılan bir sistematik derleme ve meta-analizde, sportif hareketler sırasında kalça abdüksiyonu ve iç rotasyon açılarının gruplar arasında farklılık gösterebildiği bildirilmiştir (Donelon ve ark., 2024). Kalça ve diz eklemleri arasındaki bu biyomekanik ilişki, alt ekstremitedeki hareket ve yüklenme düzeninin bir parçası olan ayak bileği eklemının de değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Koshino ve ark., 2024).

Özellikle yere iniş sırasında ayak bileğinin hareket özellikleri ile diz eklemının açıları ve momentleri arasında ilişkiler bulunduğu bildirilmiştir (Tait ve ark., 2022). Bu nedenle diz, kalça ve ayak bileği eklemlerinin birlikte değerlendirilmesi, sportif hareketler sırasında ortaya çıkan mekanik yüklenmelerin daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına katkı sağlayabilir.

2.2. Kas Kuvveti ve Kas Dengesizlikleri

Kas kuvveti, sportif hareketlerin gerçekleştirilmesinde, eklem stabilitesinin sağlanmasında ve hareket sırasında ortaya çıkan mekanik yüklenmelerin kontrol edilmesinde önemli faktörlerden bir diğeridir (Mulla & Keir, 2023). Bu süreçte kasların kuvvet üretme kapasitesi ve kas gruplarının birlikte çalışması, özellikle diz eklemındaki mekanik yüklenmelerin büyüklüğünü ve dağılımını etkileyebilmektedir (Maniar ve ark., 2022). Bu nedenle kas kuvvetinin yalnızca sportif performans açısından değil, spor yaralanmalarıyla ilişkili biyomekanik risk faktörleri kapsamında da ele alınması önem taşımaktadır.

Kas gruplarının karşılıklı aktivasyonu ve koordineli çalışması, eklem stabilitesinin sağlanmasında ve mekanik yüklenmelerin düzenlenmesinde etkili olabilmektedir (Baratta ve ark., 1988; Uhlrich ve ark., 2022).

Bu doğrultuda aynı eklem üzerinde farklı yönlerde kuvvet oluşturan kas gruplarının kuvvet özellikleri, yaralanma riski açısından araştırılmaktadır (Fousekis ve ark., 2011; Yeung ve ark., 2009).

Croisier ve ark. (2008) tarafından profesyonel futbolcular üzerinde gerçekleştirilen prospektif bir araştırmada, hamstring kas kuvveti dengesizliklerinin hamstring yaralanmalarıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir.

Benzer şekilde Opar ve ark. (2015) tarafından Avustralya futbolu sporcuları üzerinde yürütülen araştırmada, düşük eksantrik hamstring kuvvetinin sonraki dönemde meydana gelen hamstring yaralanmalarıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir. Aynı bilimsel çalışmada, iki bacak arasındaki kuvvet asimetrisinin yaralanma riskinde anlamlı bir artışla ilişkili olmadığı görülmüştür.

Bu bulgular, kas kuvvetinin yaralanma riski açısından değerlendirilmesinde yalnızca kuvvet dengesizliklerinin değil, kasların kuvvet üretme kapasitesinin de dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir (Lee ve ark., 2018).

Kas kuvveti özellikleri ile yaralanma riski arasındaki ilişkiye yönelik araştırmalarda ise her zaman tutarlı sonuçlar elde edilmediği görülmektedir. Nitekim Van Hooren (2025) tarafından gerçekleştirilen sistematik derleme ve meta-analizde, izokinetik kuvvet ölçümlerinin gelecekteki hamstring yaralanmalarını öngörmedeki geçerliliğinin sınırlı olduğu bildirilmiştir.

Green ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen sistematik derleme ve meta-analizde de hamstring yaralanmalarına ilişkin risk faktörleri incelenmiş ve kas kuvvetiyle ilişkili bulguların değerlendirilen değişkenlere göre farklılık gösterebildiği ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda kas kuvveti ve kuvvet dengesizliklerinin yaralanma riski açısından değerlendirilmesinde, tek bir kuvvet göstergesine dayanmak yerine farklı risk faktörlerinin birlikte ele alınması daha kapsamlı bir yaklaşım sağlayabilir.

3. Spor Yaralanmalarının Biyomekanik Mekanizmaları

3.1. Temas ve Temasa Bağlı Olmayan Yaralanmalar

Farklı spor branşlarına özgü hareketlerin gerçekleştirilmesinde, çeşitli kemik, eklem ve kas yapıları görev almaktadır (Caniberk ve ark., 2016). Sportif hareketler sırasında meydana gelen akut yaralanmalar ise oluşum mekanizmalarına göre temas ve temasa bağlı olmayan yaralanmalar şeklinde sınıflandırılabilir (Bahr ve ark., 2020).

Temas sonucu meydana gelen yaralanmalar, sporcuların diğer oyuncularla veya nesnelerle doğrudan ya da dolaylı etkileşimi sonucunda oluşabilmektedir (Marshall, 2010). Temas sonucu meydana gelen yaralanmaların biyomekanik açıdan değerlendirilmesinde, darbenin uygulandığı bölge, kuvvetin yönü ve büyüklüğü ile temas anındaki vücut pozisyonu önemli değişkenler arasında yer almaktadır (Seminati ve ark., 2023).

Temasın yaralanma mekanizmalarındaki rolü, spor branşına ve yaralanmanın meydana geldiği sportif duruma göre farklılık gösterebilmektedir (Sundberg ve ark., 2025).

Nitekim Buckthorpe ve ark. (2024) tarafından profesyonel erkek futbolcularda meydana gelen 115 ön çapraz bağ yaralanmasının video görüntüleri üzerinden gerçekleştirilen araştırmada, yaralanmaların %14'ünün doğrudan temas, %43'ünün dolaylı temas ve %43'ünün temassız mekanizmalarla oluştuğu belirlenmiştir. Benzer şekilde Buckthorpe ve ark. (2025) tarafından elit erkek futbolcularda meydana gelen 140 ayak bileği burkulmasının incelendiği araştırmada, yaralanmaların %50'sinin doğrudan temas, %30'unun dolaylı temas ve %20'sinin temassız mekanizmalarla gerçekleştiği bildirilmiştir.

Bu bulgular, temas mekanizmalarının yaralanmanın gerçekleştiği anatomik bölgeye ve sportif hareketin özelliklerine göre farklılaşabildiğini göstermektedir (Xiao ve ark., 2025).

Temasa bağlı olmayan yaralanmalar ise, başka bir sporcu veya nesneyle doğrudan temas gerçekleşmeksizin, sporcunun gerçekleştirdiği hareketler sırasında ortaya çıkabilmektedir (Krosshaug ve ark., 2007). Özellikle ani yön değiştirme, hızın azaltılması ve sıçrama sonrası yere iniş gibi hareketler, bu yaralanmaların meydana geldiği sportif durumlar arasında yer almaktadır (Sundberg ve ark., 2025). Bu tür hareketler sırasında meydana gelebilen

yaralanmalar arasında ön çapraz bağ yaralanmaları, hamstring kas zorlanmaları ve Aşil tendonu yırtılmaları bulunmaktadır (D'Ambrosi ve ark., 2026; Gopinath ve ark., 2025).

Bu yaralanmalar, başka bir sporcu veya nesneyle temas gerçekleşmeksizin ani yön değiştirme, hızın azaltılması, sıçrama sonrası yere iniş, sprint ve şut gibi sportif hareketler sırasında meydana gelebilmektedir (Della Villa ve ark., 2020; Pellegrini ve ark., 2025). Bu bağlamda temasa bağlı olmayan yaralanmaların oluşum süresince, sportif hareketlerin gerçekleştirilişi biçimi ve hareket sırasında ortaya çıkan mekanik yükler ile birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

3.2. Tekrarlayan Hareketler ve Aşırı Kullanım Yaralanmaları

Sportif faaliyetler sırasında belirli hareketlerin tekrarlanması, kas, tendon, kemik ve eklem yapılarının sürekli mekanik yüklenmelere maruz kalmasına neden olabilmektedir (Wang ve ark., 2024). Bu yüklenmelerin dokuların uyum ve toparlanma kapasitesini aşması durumunda, zaman içerisinde aşırı kullanım yaralanmaları meydana gelebilmektedir (Willwacher ve ark., 2022). Özellikle koşma, sıçrama ve fırlatma gibi hareketlerin gerçekleştirildiği atletizm branşlarında, kas-iskelet sistemi yaralanmaları farklı anatomik bölgelerde ortaya çıkabilmektedir (Edouard ve ark., 2026).

Koşucularda görülen tibial stres yaralanmaları, Aşil tendinopatisi ve patellofemoral ağrı gibi rahatsızlıklar, tekrarlayan yüklenmelerle ilişkili kas-iskelet sistemi sorunları arasında yer almaktadır (Trowell ve ark., 2025).

Sirls ve ark. (2026) tarafından 21 araştırmanın incelendiği derlemede, koşucularda meydana gelen kemik stres yaralanmalarıyla ilişkili biyomekanik değişkenler değerlendirilmiş; dikey yer tepki kuvveti, ayak bileği plantar fleksiyon momenti ve adım sıklığı gibi değişkenlerin bu yaralanmalarla ilişkili olabileceği bildirilmiştir.

Aşırı kullanım yaralanmalarının değerlendirilmesinde yalnızca hareketlerin tekrar sayısının değil, antrenman özelliklerinin, biyomekanik değişkenlerin ve bireysel risk faktörlerinin birlikte ele alınması gerekmektedir (Correia ve ark., 2024). Bu bağlamda, antrenman yükündeki değişimlerin ve koşu mekaniğine ilişkin özelliklerin değerlendirilmesi, yaralanma riskinin daha kapsamlı biçimde anlaşılmasına olanak tanımaktadır (Joachim ve ark., 2024).

4. Biyomekanik Değerlendirme ve Yaralanmaların Önlenmesi

4.1. Hareket Analizi ve Yaralanma Riskinin Değerlendirilmesi

Spor yaralanmalarının biyomekanik açıdan değerlendirilmesinde, sportif hareketler sırasında ortaya çıkan eklem hareketlerinin ve mekanik yüklenmelerin incelenmesi, hareketin yapısal özelliklerinin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır (Adlou ve ark., 2025). Bununla birlikte, hareketin yalnızca eklem düzeyinde değerlendirilmesiyle sınırlı kalınmayıp kas aktivasyonlarının da incelenmesi, sportif hareketlere eşlik eden nöromüsküler yanıtların daha kapsamlı biçimde ortaya konulmasına katkı sağlamaktadır (Topçu ve ark., 2026).

Hareket analizi yöntemleri, sportif hareketlerin nesnel verilerle incelenmesinde ve yaralanmalarla ilişkili hareket özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir (Arzehgar ve ark., 2025).

Biyomekanik değerlendirmelerde kamera tabanlı ve işaretleyicisiz hareket yakalama sistemleri gibi farklı ölçüm teknolojilerinden yararlanılmaktadır (Noorbhai ve ark., 2025). Bu yöntemler aracılığıyla eklem açıları, hareket açıklığı ve alt ekstremiteler ile gövdeye ilişkin kinematik değişkenler incelenebilmektedir (Yoma ve ark., 2025).

Hareket analizinden elde edilen biyomekanik veriler, özellikle sıçrama sonrası yere iniş ve ani yön değiştirme gibi dinamik hareketlerde gövde ve alt ekstremitelerdeki eklemlerine ilişkin kinematik ve kinetik değişkenlerin değerlendirilmesinde kullanılabilir (Xu ve ark., 2025). Alahaidib ve ark. (2025) tarafından sekiz araştırmanın incelendiği sistematik derlemede, üç boyutlu hareket analizi ve kuvvet platformlarıyla gerçekleştirilen değerlendirmelerin yere iniş mekaniği, ekstremiteler arası simetri ve rehabilitasyon sürecine ilişkin bilgiler sağladığı, ancak tek bir biyomekanik ölçümün yaralanma riskini güvenilir biçimde tahmin etmek için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Bu nedenle hareket analizinden elde edilen bulguların farklı fonksiyonel değerlendirme yöntemleriyle birlikte yorumlanması, yaralanma riskinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Cooke ve ark., 2025).

Spor yaralanmalarında risk değerlendirmesi, sporcuların yaralanmaya yatkınlığını etkileyebilecek biyomekanik, fiziksel ve antrenmanla ilişkili faktörlerin sistematik biçimde incelenmesini kapsamaktadır (Alahaidib ve ark., 2025). Bu süreçte hareket kontrolü, kas kuvveti, önceki yaralanma öyküsü ve antrenman yükü gibi değişkenlerin birlikte ele alınması, sporcuların bireysel özelliklerinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesini sağlayabilmektedir (Leckey ve ark., 2025).

Bu kapsamda risk değerlendirmesinden elde edilen verilerin, yaralanmanın kesin olarak öngörülmesinden ziyade, sporcuların izlenmesi ve bireysel antrenman düzenlemelerine yönelik kararların desteklenmesi amacıyla kullanılması daha uygun görülmektedir (Rebelo ve ark., 2023).

4.2. Biyomekanik Temelli Yaralanma Önleme Yaklaşımları

Spor yaralanmalarının önlenmesine yönelik biyomekanik yaklaşımlar, sportif hareketler sırasında ortaya çıkan yüklenmelerin düzenlenmesini ve nöromüsküler kontrolün geliştirilmesini hedefleyen antrenman uygulamalarını kapsamaktadır (Qin ve ark., 2024). Bu kapsamda kuvvet, denge, pliometrik egzersizler ve hareket tekniğine yönelik çalışmalar, sporcuların hareket özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan yöntemler arasında yer almaktadır (Ramachandran ve ark., 2025).

Önleyici antrenman programlarının planlanmasında, sporcularda meydana gelen yaralanmaların türlerinin ve görülme sıklıklarının belirlenmesi, uygulanacak yaklaşımların şekillendirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Alimoradi ve ark. (2026) tarafından 207 elit sporcunun 12 hafta boyunca izlendiği çalışmada, bildirilen sağlık sorunlarının %59,5'inin akut yaralanmalardan, %28,3'ünün aşırı kullanım yaralanmalarından ve %12,1'inin hastalıklardan oluştuğu belirlenmiştir.

Biyomekanik temelli yaralanma önleme programlarının etkileri, özellikle alt ekstremitelerdeki yaralanmaları üzerinde gerçekleştirilen araştırmalarla incelenmektedir (Li ve Zhu, 2025). Su ve ark. (2025) tarafından 20.336 futbolcuyu kapsayan sekiz araştırmanın değerlendirildiği meta-analizde, denge egzersizlerini içeren yaralanma önleme programlarının uygulandığı gruplarda

ön çapraz bağ yaralanması görülme sıklığının kontrol gruplarına kıyasla %58 daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Yaralanmaların nlenmesine yönelik antrenman programlarının yanı sıra sportif faaliyetlere hazırlık sürecinde uygulanan ısınma yöntemleri de antrenman uygulamalarının bir parçasını oluştırmaktadır. Bu doğrultuda Turan ve illi (2016) tarafından 15 okçu üzerinde gerçekleştirilen araştırmada, farklı ısınma yöntemlerinin atış performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve uygulanan ısınma protokollerinin atış sayısına bağlı olarak performans üzerinde farklı sonuçlar oluşturabildiği belirlenmiştir.

Bununla birlikte önleyici egzersiz programlarının etkileri spor branşına, uygulama özelliklerine ve katılımcıların programa uyumuna göre farklılık gösterebilmektedir. Wu ve ark. (2024) tarafından 1.904 katılımcıyı kapsayan dokuz araştırmanın incelendiği meta-analizde, dayanıklılık koşucularında egzersiz temelli nleme programlarının genel olarak yaralanma riskini anlamlı düzeyde azaltmadığı, ancak gözetim altında gerçekleştirilen uygulamaların değerlendirildiği alt analizde daha olumlu sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir.

Bu bulgular doğrultusunda, spor yaralanmalarının nlenmesine yönelik yaklaşımlarda yalnızca belirli egzersizlerin uygulanmasına değil, sporcuların bireysel özelliklerine, hareket örüntülerine ve sportif gereksinimlerine uygun antrenman programlarının geliştirilmesine de odaklanılması gerektiği söylenebilir (Maleki ve ark., 2025). Bu kapsamda, biyomekanik değerlendirmelerden elde edilen verilerin yaralanma kayıtları ve antrenman yüküne ilişkin bilgilerle birlikte ele alınması, önleyici uygulamaların planlanması ve sporcuların düzenli olarak izlenmesi açısından yol gösterici olabilmektedir (Sprouse ve ark., 2024).

KAYNAKÇA

- Adlou, B., Wilburn, C., & Weimar, W. (2025). Motion capture technologies for athletic performance enhancement and injury risk assessment: A review for multi-sport organizations. *Sensors*, 25(14), Article 4384.
- Alahaidib, A. A., Alyousef, H. Y., Sharif, M. A., Alsulaiman, A. K., Alharthi, T. S., Aljohani, H. I., ... & Almeshia, A. A. (2025). Biomechanical assessment tools for injury risk prediction and return-to-sport evaluation in athletes: A systematic review. *Cureus*, 17(9).
- Alimoradi, M., Kabak, S., Kara, T., Barut, Y., Daneshmandi, H., & Alghosi, M. (2026). Persian translation, cross-cultural adaptation, reliability, and validity of the updated Oslo sports trauma research centre questionnaire on health problems. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 18(1), 203.
- Arzehgar, A., Seyedhasani, S. N., Ahmadi, F. B., Bagheri Baravati, F., Sadeghi Hesar, A., Kachooei, A. R., & Aalaei, S. (2025). Sensor-based technologies for motion analysis in sports injuries: a scoping review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17(1), 15.
- Bahr, R., Clarsen, B., Derman, W., Dvorak, J., Emery, C. A., Finch, C. F., Häggglund, M., Junge, A., Kemp, S., Khan, K. M., Marshall, S. W., Meeuwisse, W., Mountjoy, M., Orchard, J. W., Pluim, B., Quarrie, K. L., Reider, B., Schwellnus, M., Soligard, T., ... Chamari, K. (2020). International Olympic Committee Consensus Statement: Methods for Recording and Reporting of Epidemiological Data on Injury and Illness in Sports 2020 (Including the STROBE Extension for Sports Injury and Illness Surveillance (STROBE-SIIS)). *Orthopaedic journal of sports medicine*, 8(2), 2325967120902908. <https://doi.org/10.1177/2325967120902908>
- Baratta, R., Solomonow, M., Zhou, B. H., Letson, D., Chuinard, R., & D'ambrosia, R. J. T. A. (1988). Muscular coactivation: the role of the antagonist musculature in maintaining knee stability. *The American journal of sports medicine*, 16(2), 113-122.
- Bathe, C., Fennen, L., Heering, T., Greif, A., & Dubbeldam, R. (2023). Training interventions to reduce the risk of injury to the lower extremity joints during landing movements in adult athletes: a systematic review and meta-analysis. *BMJ open sport & exercise medicine*, 9(2), e001508.
- Beaulieu, M. L., Ashton-Miller, J. A., & Wojtys, E. M. (2023). Loading mechanisms of the anterior cruciate ligament. *Sports biomechanics*, 22(1), 1-29.
- Belkheili, M., Cierson, T., & Martineau, P. A. (2025). Biomechanical risk factors for increased anterior cruciate ligament loading and injury: a systematic review. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 13(2), 23259671241312681.
- Bleakley, C., & Netterström-Wedin, F. (2023). Does mechanical loading restore ligament biomechanics after injury? A systematic review of studies using animal models. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 24(1), 511.
- Buckthorpe, M., Pirli Capitani, L., Olivares-Jabalera, J., Olmo, J., & Della Villa, F. (2024). Systematic video analysis of ACL injuries in professional Spanish male football (soccer): injury mechanisms, situational patterns, biomechanics and neurocognitive

- errors—a study on 115 consecutive cases. *BMJ open sport & exercise medicine*, 10(3), e002149.
- Buckthorpe, M., Verhagen, E., D'Hooghe, P., Osti, L., Di Paolo, S., & Della Villa, F. (2025). Systematic video analysis of ankle sprain injuries in elite male football (soccer): Injury mechanisms, situational patterns, biomechanics and neurocognitive errors study: A study on 140 consecutive players. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 33(11), 4035-4049.
- Caniberk, M., Sesli, F. A., & Çetin, C. (2016). Spor biyomekaniğinde ve üç boyutlu hareket analizinde sayısal fotogrametrinin kullanılması. *Spor Hekimliği Dergisi*, 51(4), 117-127.
- Chen, N., Wu, M., Williams, R., Yan, J., Zhou, J., Zhu, D., & Ding, Y. (2025). Strong living scaffolds for load-bearing musculoskeletal tissue regeneration. *Materials Today Bio*, 102571.
- Chen, Z., & Franklin, D. W. (2025). Joint moment–angle/velocity relations in the hip, knee, and ankle: A meta-visualization of datasets. *Journal of Biomechanics*, 183, 112621.
- Cooke, R., Rushton, A., Martin, J., Soundy, A., Herrington, L., & Heneghan, N. R. (2025). Lower extremity functional performance tests and their measurement properties in athletes: a systematic review and narrative synthesis. *BMJ open sport & exercise medicine*, 11(2), e002389.
- Correia, C. K., Machado, J. M., Dominski, F. H., de Castro, M. P., de Brito Fontana, H., & Ruschel, C. (2024). Risk factors for running-related injuries: An umbrella systematic review. *Journal of sport and health science*, 13(6), 793-804.
- Croisier, J. L., Ganteaume, S., Binet, J., Genty, M., & Ferret, J. M. (2008). Strength imbalances and prevention of hamstring injury in professional soccer players: a prospective study. *The American journal of sports medicine*, 36(8), 1469-1475.
- Crunkhorn, M. L., Etxebarria, N., Toohey, L. A., Charlton, P., Watson, K., & Drew, M. (2025). The Natural History of Bone Stress Injuries in Athletes: From Inception to Resolution. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 55(10), 2415–2428. <https://doi.org/10.1007/s40279-025-02280-9>
- Della Villa, F., Buckthorpe, M., Grassi, A., Nabiuzzi, A., Tosarelli, F., Zaffagnini, S., & Della Villa, S. (2020). Systematic video analysis of ACL injuries in professional male football (soccer): Injury mechanisms, situational patterns and biomechanics study on 134 consecutive cases. *British Journal of Sports Medicine*, 54(23), 1423–1432.
- Donelon, T. A., Edwards, J., Brown, M., Jones, P. A., O'Driscoll, J., & Dos' Santos, T. (2024). Differences in biomechanical determinants of ACL injury risk in change of direction tasks between males and females: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine-Open*, 10(1), 29.
- Dönmez, G., Ak, E., Ödek, U., Özberk, N., & Korkusuz, F. (2014). Sporda hareket analizi. *Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği (TOTBİD) Dergisi*, 13(4), 369-380.
- D'Ambrosi, R., Carrozzo, A., Monaco, E., Baumert, P., Ursino, C., Kambhampati, S. B., ... & Fink, C. (2026). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury across sports: A

- systematic review and meta-analysis of video-based studies. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*.
- Ebner, C., Granacher, U., & Gehring, D. (2025). Effects of Anticipation and Dual-Tasking on Lower Limb Biomechanics While Performing Change-of-Direction Tasks in Physically Active Individuals: A Systematic Review with Meta-Analysis: C. Ebner et al. *Sports Medicine*, 55(4), 857-876.
- Edouard, P., Tsukahara, Y., Mann, R. H., de Neve, N., Timpka, T., Iatropoulos, S., ... & Hollander, K. (2026). Prevalence, incidence and characteristics of musculoskeletal injuries in Athletics (track and field): a systematic review and meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 60(6), 450-464.
- Fousekis, K., Tsepis, E., Poulmedis, P., Athanasopoulos, S., & Vagenas, G. (2011). Intrinsic risk factors of non-contact quadriceps and hamstring strains in soccer: a prospective study of 100 professional players. *British journal of sports medicine*, 45(9), 709-714.
- Gabbett, T. J., & Oetter, E. (2025). From Tissue to System: What Constitutes an Appropriate Response to Loading? TJ Gabbett et al. *Sports Medicine*, 55(1), 17-35.
- Giesche, F., Stief, F., Groneberg, D. A., & Wilke, J. (2021). Effect of unplanned athletic movement on knee mechanics: a systematic review with multilevel meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 55(23), 1366-1378.
- Giustino, V., & Patti, A. (2025). Biomechanics and sports performances. *Sports*, 13(3), 73.
- Gopinath, V., Smith, M. V., Matava, M. J., Brophy, R. H., & Knapik, D. M. (2025). Most anterior cruciate ligament injuries in professional athletes occur without contact to the injured knee: a systematic review of video analysis studies. *Arthroscopy*, 41(4), 1155-1162.
- Green, B., Bourne, M. N., Van Dyk, N., & Pizzari, T. (2020). Recalibrating the risk of hamstring strain injury (HSI): A 2020 systematic review and meta-analysis of risk factors for index and recurrent hamstring strain injury in sport. *British journal of sports medicine*, 54(18), 1081-1088.
- Güler, B., & Durukan, E. (2025). Sporcu sağlığında yaralanma yönetimi. M. B. Demir (Ed.), *Spor bilimlerinde güncel yaklaşımlar: Performans, sağlık, psikoloji ve sosyal dönüşüm içinde* (ss. 110–118). Duvar Yayınları.
- Howard, J. S., Fazio, M. A., Mattacola, C. G., Uhl, T. L., & Jacobs, C. A. (2011). Structure, sex, and strength and knee and hip kinematics during landing. *Journal of athletic training*, 46(4), 376-385.
- Jin, G. Z. (2026). Exercise-based mechanotherapy: from biomechanical principles and mechanotransduction to precision regenerative rehabilitation. *International Journal of Molecular Sciences*, 27(2), 694.
- Joachim, M. R., Kuik, M. L., Krabak, B. J., Kraus, E. M., Rauh, M. J., & Heiderscheit, B. C. (2024). Risk factors for running-related injury in high school and collegiate cross-country runners: a systematic review. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 54(2), 120-132.

- Kalkhoven, J. T. (2024). Athletic Injury Research: Frameworks, Models and the Need for Causal Knowledge: JT Kalkhoven. *Sports Medicine*, 54(5), 1121-1137.
- Kaya Keles, C. S., & Ates, F. (2023). How mechanics of individual muscle-tendon units define knee and ankle joint function in health and cerebral palsy—a narrative review. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 11, 1287385.
- Keogh, J. A. (2023). *Longitudinal monitoring of biomechanical and psychological stress in collegiate female basketball athletes: Implications to sports performance and injury susceptibility* (Doctoral dissertation).
- Koshino, Y., Ishida, T., Taniguchi, S., Samukawa, M., Kasahara, S., & Tohyama, H. (2024). Hip and knee kinematics, center of pressure position, and ground reaction force are associated with Achilles tendon force during jump landing. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 34(1), e14510.
- Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B. P., Engebretsen, L., System, G., Slauterbeck, J. R., ... & Bahr, R. (2007). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *The American journal of sports medicine*, 35(3), 359-367.
- Krosshaug, T., Steffen, K., Kristianslund, E., Nilstad, A., Mok, K. M., Myklebust, G., ... & Bahr, R. (2016). The vertical drop jump is a poor screening test for ACL injuries in female elite soccer and handball players: a prospective cohort study of 710 athletes. *The American journal of sports medicine*, 44(4), 874-883.
- Lazarczuk, S. L., Maniar, N., Opar, D. A., Duhig, S. J., Shield, A., Barrett, R. S., & Bourne, M. N. (2022). Mechanical, Material and Morphological Adaptations of Healthy Lower Limb Tendons to Mechanical Loading: A Systematic Review and Meta-Analysis: SL Lazarczuk et al. *Sports medicine*, 52(10), 2405-2429.
- Leckey, C., Van Dyk, N., Doherty, C., Lawlor, A., & Delahunt, E. (2025). Machine learning approaches to injury risk prediction in sport: a scoping review with evidence synthesis. *British journal of sports medicine*, 59(7), 491-500.
- Lee, J. W., Mok, K. M., Chan, H. C., Yung, P. S., & Chan, K. M. (2018). Eccentric hamstring strength deficit and poor hamstring-to-quadriceps ratio are risk factors for hamstring strain injury in football: A prospective study of 146 professional players. *Journal of science and medicine in sport*, 21(8), 789-793.
- Maleki, A. A., Mousavi, S. H., Biabangard, M. A., & Minoonejad, H. (2025). Influence of exercise interventions on functional movement screen scores in athletes: A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 15, Article 26335.
- Maniar, N., Cole, M. H., Bryant, A. L., & Opar, D. A. (2022). Muscle Force Contributions to Anterior Cruciate Ligament Loading: N. Maniar et al. *Sports Medicine*, 52(8), 1737-1750.
- Marshall, S. W. (2010). Recommendations for defining and classifying anterior cruciate ligament injuries in epidemiologic studies. *Journal of athletic training*, 45(5), 516-518.
- Matsushima, T., & Hiroshi, A. (2024). Molecular mechanisms of mechanosensing and plasticity of tendons and ligaments. *The Journal of Biochemistry*, 176(4), 263-269.

- McGinnis, P. M. (2013). *Biomechanics of sport and exercise*. Human Kinetics.
- Mulla, D. M., & Keir, P. J. (2023). Neuromuscular control: from a biomechanist's perspective. *Frontiers in sports and active living*, 5, 1217009.
- Nepal, A. K., van Essen, H. W., de Jongh, R. T., van Schoor, N. M., Otten, R. H., Vanderschueren, D., ... & Bravenboer, N. (2023). Methodological aspects of in vivo axial loading in rodents: a systematic review. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 23(2), 236.
- Noorbhai, H., Moon, S., & Fukushima, T. (2025). A conceptual framework and review of multi-method approaches for 3D markerless motion capture in sports and exercise. *Journal of sports sciences*, 43(12), 1167-1174.
- Opar, D. A., Williams, M. D., Timmins, R. G., Duhig, S., & Shield, A. J. (2015). Eccentric hamstring strength and hamstring injury risk in Australian footballers [accepted manuscript].
- Pellegrini, A., Ranzini, A., Esposito, F., Della Villa, F., & Zago, M. (2025). Systematic video analysis of 57 hamstring injuries in women's football (soccer): injury mechanisms, situational patterns and biomechanics. *British Journal of Sports Medicine*, 59(18), 1278-1286.
- Qin, Z., Qin, Y., & Wang, J. (2024). Neuromuscular training effects on athletes' jumping and lower limb injury: A systematic review. *Journal of Motor Behavior*, 56(5), 600-613.
- Putera, K. H., Kim, J., Baek, S. Y., Schlecht, S. H., Beaulieu, M. L., Haritos, V., ... & Banaszak Holl, M. M. (2023). Fatigue-driven compliance increase and collagen unravelling in mechanically tested anterior cruciate ligament. *Communications Biology*, 6(1), 564.
- Pérez-Contreras, J., Loro-Ferrer, J. F., Inostroza-Ríos, F., Merino-Muñoz, P., Bustamante Garrido, A., Hermosilla-Palma, F., ... & Aedo-Muñoz, E. (2025). Kinetic Variables as Indicators of Lower Limb Indirect Injury Risk in Professional Soccer: A Systematic Review. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 10(2), 228.
- Ramachandran, A. K., Pedley, J. S., Moeskops, S., Oliver, J. L., Myer, G. D., Hsiao, H. I., & Lloyd, R. S. (2025). Influence of Neuromuscular Training Interventions on Jump-Landing Biomechanics and Implications for ACL Injuries in Youth Females: A Systematic Review and Meta-analysis: AK Ramachandran et al. *Sports Medicine*, 55(5), 1265-1292.
- Ramachandran, A. K., Pedley, J. S., Moeskops, S., Oliver, J. L., Myer, G. D., & Lloyd, R. S. (2024). Changes in Lower Limb Biomechanics Across Various Stages of Maturation and Implications for ACL Injury Risk in Female Athletes: a Systematic Review: AK Ramachandran et al. *Sports medicine*, 54(7), 1851-1876.
- Rebelo, A., Martinho, D. V., Valente-dos-Santos, J., Coelho-e-Silva, M. J., & Teixeira, D. S. (2023). From data to action: a scoping review of wearable technologies and biomechanical assessments informing injury prevention strategies in sport. *BMC sports science, medicine and rehabilitation*, 15(1), 169.

- Sirls, E. R., Roux, E. L., Gaudette, L. W., Bruneau, M. M., Willy, R. W., & Tenforde, A. S. (2026). Biomechanical associations with bone stress injuries in running: A scoping review. *PM&R*, 18, S60-S82.
- Sprouse, B., Chandran, A., Rao, N., Boltz, A. J., Johnson, M., Hennis, P., & Varley, I. (2024). Injury and illness surveillance monitoring in team sports: A framework for all. *Injury Epidemiology*, 11, Article 23.
- Straub, R. K., & Powers, C. M. (2025). Biomechanical predictors of primary ACL injury: A scoping review of prospective studies. *Gait & Posture*, 116, 22-29.
- Sundberg, A., Högberg, J., Tosarelli, F., Buckthorpe, M., Della Villa, F., Hägglund, M., ... & Hamrin Senorski, E. (2025). Sport-Specific Injury Mechanisms and Situational Patterns of ACL Injuries: A Comprehensive Systematic Review: A. Sundberg et al. *Sports Medicine*, 55(10), 2489-2527.
- Suo, X., Tang, W., & Li, Z. (2024). Motion capture technology in sports scenarios: a survey. *Sensors*, 24(9), 2947.
- Su, W., Wang, J., Ying, Y., Lu, B., Liu, H., Zhou, Z., ... & Yun, H. (2025). Injury risk reduction programs including balance training reduce the incidence of anterior cruciate ligament injuries in soccer players: a systematic review and meta-analysis. *Journal of orthopaedic surgery and research*, 20(1), 248.
- Tait, D. B., Newman, P., Ball, N. B., & Spratford, W. (2022). What did the ankle say to the knee? Estimating knee dynamics during landing—A systematic review and meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 25(2), 183-191.
- Tam, K. T., & Baar, K. (2025). Using load to improve tendon/ligament tissue engineering and develop novel treatments for tendinopathy. *Matrix Biology*, 135, 39-54.
- Ti, H., Zhang, Z., Yan, X., Hu, H., Zhang, K., Shi, S., ... & Li, X. (2025). Primary cilia as mechanosensors in musculoskeletal homeostasis and disease. *Pharmacological Research*, 107887.
- Topçu, H., Güngör, A. K., Yıldırım, Y., Şekir, U., Behm, D. G., & Aldhahi, M. I. (2026). Effects of rear-foot instability devices on lower-limb muscle activation during the Bulgarian split squat in male football players. *Scientific Reports*, 16(1), 2557.
- Trowell, D., Kenneally-Dabrowski, C., & Bonacci, J. (2025). Effects of running-induced fatigue on joint kinematics and kinetics during overground running: a systematic review and meta-analysis. *Sports Biomechanics*, 24(11), 3109-3135.
- Tsai, M. S., Domroes, T., Pentidis, N., Koschinski, S., Schroll, A., Bohm, S., ... & Mersmann, F. (2024). Effect of the temporal coordination and volume of cyclic mechanical loading on human Achilles tendon adaptation in men. *Scientific Reports*, 14(1), 6875.
- Turan, S., & Çilli, M. (2016). Farklı ısınma yöntemlerinin olimpiik okçulukta atış performansına etkisi. *Online Türk Sağlık Bilimleri Dergisi*, 1(1), 13–20.
- Uhlich, S. D., Jackson, R. W., Seth, A., Kolesar, J. A., & Delp, S. L. (2022). Muscle coordination retraining inspired by musculoskeletal simulations reduces knee contact force. *Scientific reports*, 12(1), 9842.

- Van Hooren, B. (2025). Rethinking acute sports injuries: evidence for an overuse mechanism in hamstring and ACL injuries. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 35(10), e70146.
- Von Stengel, S., Kohl, M., Jakob, F., Kerschán-Schindl, K., Lange, U., Peters, S., ... & Kemmler, W. (2023). (Trainings-) Methodische Empfehlungen eines körperlichen Trainings zur Verbesserung der Knochenfestigkeit. *Osteologie*, 32(03), 176-182.
- Wang, C., Fu, R., & Yang, H. (2025). Toward a clear relationship between mechanical signals and bone adaptation. *Mechanobiology in Medicine*, 3(1), 100115.
- Wang, C., Stovitz, S. D., Kaufman, J. S., Steele, R. J., & Shrier, I. (2024). Principles of musculoskeletal sport injuries for epidemiologists: a review. *Injury epidemiology*, 11(1), 21.
- Wang, Y., Mei, Q., Jiang, H., Hollander, K., Van den Berghe, P., Fernandez, J., & Gu, Y. (2024). The biomechanical influence of step width on typical locomotor activities: a systematic review. *Sports medicine-open*, 10(1), 83.
- Warmenhoven, J. (2026). 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*, 25(3), 311-342.
- Wearing, S. C., Hooper, S. L., Langton, C. M., Keiner, M., Horstmann, T., Crevier-Denoix, N., & Pourcelot, P. (2024, June). The biomechanics of musculoskeletal tissues during activities of daily living: Dynamic assessment using quantitative transmission-mode ultrasound techniques. In *Healthcare* (Vol. 12, No. 13, p. 1254). MDPI.
- Willwacher, S., Kurz, M., Robbin, J., Thelen, M., Hamill, J., Kelly, L., & Mai, P. (2022). Running-Related Biomechanical Risk Factors for Overuse Injuries in Distance Runners: A Systematic Review Considering Injury Specificity and the Potentials for Future Research: S. Willwacher et al. *Sports Medicine*, 52(8), 1863-1877.
- Wu, H., Brooke-Wavell, K., Fong, D. T. P., Paquette, M. R., & Blagrove, R. C. (2024). Do exercise-based prevention programs reduce injury in endurance runners? A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 54, 1249–1267.
- Xiao, M., Lee, J. J., Boissiere, J. C., Sherman, S. L., Safran, M. R., Abrams, G. D., & Hwang, C. E. (2025). Video analysis of acute lower extremity injury mechanisms in soccer demonstrates most anterior cruciate ligament, Achilles, and muscle injuries occur without direct contact: A systematic review and meta-analysis. *Arthroscopy*, 41(9), 3650–3662.e4.
- Xu, Y., Wang, R., Yuan, P., Yu, S., Chen, W., & Liu, J. (2025). Influence of unanticipated side-step cutting and landing on trunk and lower limb biomechanics: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Biomechanics*, 190, 112863.
- Yao, Y. (2023). Application of sports biomechanics in the technical analysis of taekwondo kicking. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*, 29, e2022_0379.
- Yeadon, M. R., & Pain, M. T. G. (2023). Fifty years of performance-related sports biomechanics research. *Journal of Biomechanics*, 155, 111666.

- Yeung, S. S., Suen, A. M., & Yeung, E. W. (2009). A prospective cohort study of hamstring injuries in competitive sprinters: preseason muscle imbalance as a possible risk factor. *British journal of sports medicine*, 43(8), 589-594.
- Yoma, M., Llurda-Almuzara, L., Herrington, L., & Jones, R. (2025). Reliability and validity of lower extremity and trunk kinematics measured with markerless motion capture during sports-related and functional tasks: A systematic review. *Journal of Sports Sciences*, 43(17), 1703–1730.
- Yona, T., Kamel, N., Cohen-Eick, G., Ovadia, I., & Fischer, A. (2024). One-dimension statistical parametric mapping in lower limb biomechanical analysis: A systematic scoping review. *Gait & posture*, 109, 133-146.
- Zheng, N., & Barrentine, S. W. (2000). Biomechanics and motion analysis applied to sports. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, 11(2), 309-322.