

EGZERSİZDEN PERFORMANSA:

SPORCU PERFORMANSININ
FİZYOLOJİK VE METABOLİK
TEMELLERİ



YAZARLAR

Dr. Sezgin HEPSERT
Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim GENÇ

EDİTÖR

Dr. Engin VURAL



EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ



Yazarlar:

Dr. Sezgin HEPSERT
Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim GENÇ



EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

Editör:
Dr. Engin VURAL



Genel Yayın Yönetmeni

Berkan Balpetek

Sayfa ve Kapak Tasarımı

Duvar Design

Yayın Tarihi

24 Eylül, 2026

Yayıncı Sertifika No

49837

ISBN: 978-625-8936-91-9



© Duvar Yayınları

853 Sokak No: 13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

Yazarlar:

Dr. Sezgin HEPSERT

Milli Eğitim Bakanlığı,
Beden Eğitimi ve Spor Öğretmeni, Elazığ, Türkiye
ORCID: 0000-0002-4299-8548
E-mail: sezginnepsert[at]gmail.com



Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim GENÇ

Sakarya Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Turizm
Fakültesi, Sakarya, Türkiye.
ORCID: 0000-0003-2303-0758
E-mail: halilgenc@subu.edu.tr

Editör



Dr. Engin VURAL

Milli Eğitim Bakanlığı,
Beden Eğitimi ve Spor Öğretmeni, Bitlis, Türkiye,
ORCID ID: 0000-0002-7717-4928
E-mail : enginvural06[at]gmail.com



ÖNSÖZ

Egzersiz ve sportif performans, insan organizmasında birbiriyle ilişkili çok sayıda fizyolojik ve metabolik sürecin ortak bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Enerji üretiminden kardiyovasküler ve solunumsal yanıtlara, iskelet kası ve nöromüsküler işlevlerden antrenmana bağlı adaptasyonlara kadar birçok mekanizma sporcu performansının şekillenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Egzersizden Performansa: Sporcu Performansının Fizyolojik ve Metabolik Temelleri adlı bu kitapta, egzersiz sırasında ortaya çıkan fizyolojik ve metabolik yanıtlar ile düzenli antrenman sonucunda gelişen adaptasyonlar güncel bilimsel bilgiler ışığında bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Kitabın; spor bilimleri öğrencileri, akademisyenler, antrenörler, sporcular ve alanla ilgilenen araştırmacılar için temel ve güncel bilgileri bir araya getiren yararlı bir kaynak olması amaçlanmıştır.

Bu eserin, egzersiz fizyolojisi ve sporcu performansının altında yatan mekanizmaların daha iyi anlaşılmasına ve bilimsel temelli antrenman yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlamasını temenni ediyoruz.

Dr. Sezgin HEPSERT

Dr. Öğr. Üyesi Halil İbrahim GENÇ

İçindekiler

ÖNSÖZ	1
1. GİRİŞ.....	3
2. Egzersiz Fizyolojisi ve Sporcu Performansına Genel Bakış.....	8
Yaş ve biyolojik gelişim	10
Boy ve antropometrik yapı	10
Vücut kompozisyonu	10
Antrenman geçmişi.....	11
Enerji kullanılabilirliği.....	11
Beslenme ve substrat kullanılabilirliği	11
Hidrasyon.....	12
Uyku	12
Toparlanma.....	12
Çevresel koşullar:.....	12
3. Egzersizde Enerji Sistemleri ve Metabolik Yanıtlar	15
4. Kardiyovasküler ve Solunum Sistemlerinin Egzersize Yanıtı	20
5. İskelet Kası, Nöromusküler Sistem ve Performans	23
6. Egzersize Akut Yanıtlar ve Kronik Fizyolojik Adaptasyonlar	27
7. Egzersiz, Metabolik Adaptasyonlar ve Sporcu Performansı	30
8. SONUÇ	33
9. KAYNAKÇA	36

1. GİRİŞ

Egzersiz, insan organizmasının sadece hareket kapasitesini ortaya koyan mekanik bir süreç değil, aynı zamanda çok sayıda fizyolojik sistemin eş zamanlı olarak devreye girdiği kompleks bir biyolojik uyarandır. Egzersizle birlikte kasılan kasların enerji ve oksijen gereksinimi artarken, kardiyovasküler sistemin dokulara kan akışını düzenlemesi, solunum sisteminin gaz değişimini artırması, metabolik sistemlerin ATP üretimini sürdürmesi ve nöroendokrin mekanizmaların bu süreçleri koordine etmesi gerekmektedir. Bu bağlamda egzersize verilen yanıt, tek bir organ veya sistem üzerinden açıklanamayacak şekilde bütüncül bir nitelik taşır. Özellikle egzersiz sırasında artan enerji gereksiniminin karşılanabilmesi adına iskelet kasında farklı enerji üretim yollarının eş güdümlü şekilde devreye girmesi, egzersiz fizyolojisinin temel konularından birini oluşturmaktadır. Kasın ATP depolarının sınırlı olmasından dolayı enerji üretim sistemleri, egzersizin süresi ve şiddetine bağlı şekilde farklı oranlarda katkı sağlayarak kas kontraksiyonunun sürdürülebilmesine zemin hazırlamaktadır (Hargreaves & Spriet, 2020).

Egzersiz organizma üzerindeki etkisinin anlaşılmasında noktasında önemli odaklardan biri, akut fizyolojik yanıtlar ile kronik adaptasyonların birbirinden ayrılmasıdır. Akut egzersizde kalp hızı, kardiyak output, ventilasyon, enerji tüketimi,

substrat kullanımı, hormonal aktivite ve metabolik süreçlerde meydana gelen değişiklikler akut yanıtlar olarak ele alınmaktadır. Buna karşın, egzersiz uyarısının düzenli şekilde tekrarlanması sonucunda oluşan ve organizmanın aynı veya benzer egzersiz yüküne daha etkili biçimde yanıt vermesini sağlayan değişimler kronik adaptasyonların oluşmasını sağlamaktadır. Aslında bu iki süreç birbirinden tamamen bağımsız değildir. Tekrarlanan egzersiz seanslarında gerçekleşen akut yanıtlar, zaman içerisinde hücresel ve sistemik seviyede biriken uyarılara dönüşerek uzun dönemli adaptasyonların gelişmesine yardımcı olmaktadır (Egan & Sharples, 2023; Iellamo, 2024). Bu bağlamda sporcu performansının fizyolojik temellerini anlamak, sadece egzersiz sırasında oluşan değişimleri değil, bu değişimlerin düzenli antrenman sürecinde nasıl kalıcı adaptasyonlara dönüştüğünü de değerlendirmeyi gerektirir.

Farklı bir perspektifte ise egzersize verilen fizyolojik yanıtların kapsamı kardiyovasküler ve solunum sistemleriyle sınırlı kalmamaktadır. İskelet kası, egzersiz uyarısının doğrudan hedeflerinden biri olmasından dolayı bu süreçte merkezi bir rol üstlenir. Kas dokusu, egzersizin enerji gereksinimini karşılamak amacıyla karbonhidrat ve yağ asitlerinin kullanımını değiştirirken paralel olarak kontraktıl fonksiyonunu sürdürebilmek için çok sayıda hücresel ve moleküler mekanizmayı aktive eder. Tekrarlanan egzersiz uyarıları sonucunda kasın yapısal ve fonksiyonel özelliklerinde gerçekleşen değişiklikler; kas kütlesi, kuvvet, dayanıklılık, kontraktıl özellikler, substrat kullanımı ve mitokondriyal kapasite gibi performansla doğrudan ilişkili birçok özelliği etkileyebilmektedir (Egan & Sharples, 2023; Smith ve diğ., 2023). Bu açıdan incelendiğinde iskelet kası, egzersizin sadece uygulandığı bir doku değil, aynı zamanda egzersiz uyarısını algılayan, metabolik sinyalleri düzenleyen ve sistemik adaptasyonlara katkıda bulunan dinamik bir yapı olarak ele alınmaktadır.

Güncel araştırmalar, egzersize verilen yanıtların hem çalışan kas dokusuyla hem de farklı dokular arasında karmaşık bir iletişim ağı bulunduğunu görünür kılmaktadır. Tek bir egzersiz müdahalesinde enerji gereksiniminin karşılanması amacıyla iskelet kası, karaciğer, yağ dokusu, kalp, pankreas, beyin ve diğer dokular arasında koordineli bir düzlemde metabolik yanıtlar oluşmaktadır. Egzersizin tekrarlanan müdahale protokolleri şeklinde gerçekleşmesi ise bu akut değişimlerin farklı dokularda uzun süreli adaptasyonlara dönüşmesini sağlayabilmektedir. İlgili adaptasyonlar kardiyorespiratuvar uygunluk, glisemik kontrol, fiziksel fonksiyon ve genel metabolik sağlık üzerinde olumlu sonuçlar doğurabilmektedir (Ashcroft ve diğ., 2024). Dolayısıyla egzersiz fizyolojisinin günümüzdeki yaklaşımı, organizmayı birbirinden bağımsız fizyolojik sistemler toplamı olarak değil, egzersiz uyarısına birlikte yanıt veren bütünlük bir biyolojik sistem şeklinde nitelendirmektedir. Bu bütünlük yanıtın önemli bileşenlerinden biri de enerji metabolizmasıdır. Sporcu performansının sürdürülebilmesi için kas kontraksiyonunun gerektirdiği ATP'nin sürekli olarak resentezi gerekir. Fosfajen sistem, glikolitik yollar ve oksidatif fosforilasyon bu süreçte farklı oranlarda katkı

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

sağlarken, egzersizin şiddeti ve süresi arttıkça kullanılan substratlar ve enerji üretim yollarının göreceli katkıları da değişim göstermektedir. Özellikle dayanıklılık egzersizlerinde oksidatif metabolizmanın önemi artarken, yüksek şiddetli egzersizlerde ATP'nin hızlı biçimde yeniden sentezlenmesini sağlayan anaerobik metabolik yolların katkısı belirginleşmektedir. Ek olarak bu sistemlerin birbirinden kesin sınırlarla ayrılması doğru olmamaktadır. Egzersiz sırasında enerji sistemleri eş zamanlı olarak çalışmakta ve performansın gerektirdiği enerji ihtiyacına farklı oranlarda katkıda bulunmaktadır (Hargreaves & Spriet, 2020; Smith ve diğ., 2023). Bu metabolik esneklik, farklı egzersiz türlerine ve yoğunluklarına uyum sağlanabilmesi noktasında temel bir fizyolojik özelliktir.

Düzenli antrenman sürecinde gerçekleşen adaptasyonların önemli bir bölümü mitokondriyal yapı ve fonksiyonla ilişki içerisindedir. Mitokondriler, özellikle dayanıklılık performansı açısından ATP üretiminin temel merkezlerinden biri olmakla beraber, egzersize bağlı adaptasyonların sadece enerji üretim kapasitesindeki artıştan ibaret olmadığı anlaşılmıştır. Egzersiz; mitokondriyal proteinlerin ekspresyonu, oksidatif kapasite, substrat kullanım özellikleri ve hücresel sinyalizasyon ağlarında çeşitli değişiklikler oluşturabilmektedir. İnsan iskelet kasında egzersiz antrenmanının mitokondriyal içerik ve kapillarizasyon üzerindeki etkilerini inceleyen geniş kapsamlı bir sistematik derleme araştırmasında, farklı dayanıklılık ve interval antrenman modellerinin mitokondriyal içerik ve VO₂max üzerinde anlamlı adaptasyonlarla ilişkili olduğu ileri sürmüştür (Mølmen ve diğ., 2025). Benzer şekilde, egzersiz tarafından düzenlenen mitokondriyal ve nükleer sinyal ağlarının değerlendirilmesi, egzersiz uyarısının hücresel enerji metabolizması ile gen ekspresyonu arasındaki bağlantıda önemli bir rol oynadığını raporlamıştır (Reisman ve diğ., 2024).

Egzersizin metabolik etkileri sadece enerji üretimi açısından değil, organizmanın farklı dokuları arasındaki iletişim açısından da önem arz etmektedir. Son yıllarda “exerkine” olarak tanımlanan ve egzersize yanıt olarak farklı dokulardan salınabilen moleküllere yönelik araştırmalar, egzersizin sistemik etkilerinin anlaşılmasına yeni bir bakış açısı sunmuştur. İskelet kası, kalp, karaciğer, yağ dokusu, beyin ve bağırsak gibi dokulardan kaynaklanan egzersizle ilişkili sinyallerin metabolik süreçler üzerinde etkili olabileceği ve dokular arası iletişime katkı sağlayabileceği ifade edilmektedir. Bu mekanizmalar, egzersizin kardiyometabolik sağlık üzerindeki etkilerini açıklamanın yanı sıra, bireylerin egzersize verdikleri yanıtların neden farklılaşabildiğini anlamak açısından da önem taşımaktadır (Jin ve diğ., 2024).

Sporcu performansı açısından değerlendirildiğinde ise fizyolojik adaptasyonların metabolik kapasite üzerinden ele alınmasına ek olarak kardiyovasküler sistemin oksijen taşınmasını destekleme kapasitesi, solunum sisteminin gaz değişimi, iskelet kasının oksijeni kullanma yeteneği, nöromusküler fonksiyon, enerji sistemlerinin kapasitesi ve

yorgunluğa karşı direnç gibi birçok faktör performansın belirlenmesine katkı sağladığı unutulmamalıdır. Egzersiz antrenmanına bağlı olarak mitokondriyal içerik, kapillarizasyon ve VO₂max gibi değişkenlerde meydana gelen gelişmelerin başlangıçtaki antrenman düzeyi ve uygulanan antrenmanın özelliklerinden etkilenmesi, performans adaptasyonlarının bireysel ve çok faktörlü niteliğini ortaya koymaktadır (Mølmen ve diğ., 2025). Ayrıca direnç ve dayanıklılık egzersizlerinin iskelet kasında oluşturduğu adaptasyonların aynı olmadığı; egzersizin türüne bağlı olarak kasın yapısal, metabolik ve moleküler özelliklerinde farklı yönlerde değişikliklerin oluşabileceği açıklanmaktadır (Thomas ve diğ., 2024).

Performansın fizyolojik temellerinin değerlendirilmesinde stres ve toparlanma süreçleri de dikkatle incelenmelidir. Sporcu organizması, antrenman yüküne sadece kas ve enerji metabolizması üzerinden yanıt vermemekte; nöroendokrin ve bağışıklık sistemleri de egzersiz uyarısına karşı çeşitli yanıtlar oluşturabilmektedir. Bu yanıtların büyüklüğü ve yönü egzersizin özelliklerinin yanı sıra sporcunun yaşı, antrenman düzeyi, toparlanma durumu ve psikolojik yükü gibi faktörlerden etkilenebilmektedir. Egzersiz, stresle başa çıkma süreçleri bağlamında da incelenmektedir (Çakır ve diğ., 2025b). Bu bağlamda kortizol, alfa-amilaz ve immünoglobulin A gibi biyobelirteçlerin incelenmesi, egzersizle ilişkili stres ve bağışıklık yanıtlarının değerlendirilmesinde tamamlayıcı bilgiler sağlayabilmektedir. Bu kapsamda, Yelken ve arkadaşlarının (2026) U14 kadın kros kayakçıları üzerinde gerçekleştirdiği sekiz haftalık çalışmada, Life Kinetics egzersiz programının tükürtük kortizolü, alfa-amilaz ve immünoglobulin A düzeyleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada kortizol düzeylerinde anlamlı bir değişiklik görülmezken, sIgA açısından anlamlı bir grup $\times$ zaman etkileşimi belirlenmiş ve deney grubunda müdahale sonrasında sIgA düzeylerinde artış gözlenmiştir. Bulgular, farklı fizyolojik sistemlerin aynı egzersiz müdahalesine aynı yönde yanıt vermeyebileceğini ve egzersiz adaptasyonlarının değerlendirilmesinde tek bir biyobelirtece odaklanmak yerine çok boyutlu bir yaklaşımın gerekli olduğunu göstermesi bakımından önemlidir (Yelken ve diğ., 2026). Benzer şekilde, sporcu performansında fiziksel ve psikolojik süreçlerin birbirinden tamamen bağımsız değerlendirilmesi de yeterli olmayabilir. Mental durum, stres ve toparlanma süreçleri, sporcunun fizyolojik yanıtlarının şekillenmesinde rol oynayabilmektedir. Fiziksel aktivite, teknoloji kullanımı ve yapay zekâ kaygısı da güncel araştırmalarda birlikte ele alınmaktadır (Yaman ve diğ., 2026). Empati ve sürekli kaygı da fiziksel etkinlik bağlamında incelenen psikososyal değişkenlerdendir (Öktem ve diğ., 2026). Fiziksel aktivite, teknoloji kullanımı ve kaygı gibi değişkenler farklı örneklemelerde birlikte incelenmektedir (Yaman ve diğ., 2026). Hepsert ve arkadaşlarının (2026) tenis sporcuları üzerinde gerçekleştirdiği randomize kontrollü çalışmada, altı haftalık mental antrenman programının kreatin kinaz, immünoglobulin A, alfa-amilaz ve aspartat aminotransferaz gibi kas hasarı, stres ve bağışıklık yanıtıyla ilişkili biyobelirteçlerde zaman içerisinde farklı değişim örüntüleri oluşturduğu bildirilmiştir.

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

Özellikle grup $\times$ zaman etkileşimlerinin anlamlı bulunması, müdahalenin etkisinin sadece tek bir zaman noktasındaki mutlak değerler üzerinden değil, süreç içerisindeki değişimlerin birlikte değerlendirilmesiyle daha iyi anlaşılabilmesine işaret etmektedir (Hepsert ve diğ., 2026). Bu çalışmalar, sporcu performansının fizyolojik temellerinin giderek daha geniş bir yelpazede ele alındığını göstermektedir. Günümüzde performans; kuvvet, dayanıklılık veya kardiyorespiratuvar kapasite gibi geleneksel göstergelere ek olarak, metabolik esneklik, mitokondriyal fonksiyon, hücresel sinyalizasyon, stres yanıtı, bağışıklık fonksiyonu ve toparlanma gibi çok sayıda süreç arasındaki etkileşim üzerinden ele alınmaktadır. İskelet kasında oluşan moleküler değişimler, enerji metabolizmasının yeniden düzenlenmesi ve farklı dokular arasındaki iletişim ağlarının aktivasyonu, egzersizin performans üzerindeki etkilerinin altında bulunan biyolojik mekanizmaların daha iyi anlaşılmasını imkan sunmaktadır (Egan & Sharples, 2023).

Sonuç olarak egzersizden performansa uzanan süreç, tek bir fizyolojik değişkenle açıklanamayacak kadar geniş kapsamlıdır. Egzersizin başlamasıyla birlikte enerji gereksiniminde gerçekleşen artış, kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin yanıtını, iskelet kasının metabolik aktivitesini ve nöroendokrin düzenlemeyi beraberinde getirmektedir. Tekrarlanan egzersiz protokolleri ise bu akut yanıtların birikimli etkisiyle hücresel, metabolik ve sistemik adaptasyonların gelişmesini sağlamaktadır. Bu adaptasyonların niteliği; egzersizin türü, şiddeti, süresi ve sıklığının yanı sıra bireyin başlangıç düzeyi ve toparlanma koşulları tarafından şekillendirilmektedir. Dolayısıyla sporcu performansının geliştirilmesi ve fizyolojik temellerinin anlaşılması, organizmanın farklı sistemlerinin birbirleriyle olan ilişkilerinin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Bu doğrultuda mevcut kitapta, egzersize verilen akut fizyolojik yanıtlar ile düzenli egzersiz sonucunda oluşan kronik adaptasyonlar bütüncül bir perspektifle irdelenmektedir. Kitabın ilerleyen bölümlerinde öncelikle egzersizde enerji sistemleri ve metabolik yanıtlar incelenecek; ardından kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin egzersize verdiği yanıtlar, iskelet kası ve nöromusküler süreçler, akut yanıtlar ve kronik adaptasyonlar ile egzersizin metabolik ve moleküler temelleri üzerinde durulacaktır. Böylece egzersizin organizmada oluşturduğu fizyolojik değişimlerden başlayarak, bu değişimlerin antrenman adaptasyonlarına ve nihayetinde sporcu performansına nasıl yansıdığı açıklanmaya çalışılacaktır.

2. Egzersiz Fizyolojisi ve Sporcu Performansına Genel Bakış

Egzersiz fizyolojisi, fiziksel egzersiz sırasında organizmanın verdiği akut yanıtları ve düzenli egzersiz sonucunda oluşan kronik fizyolojik adaptasyonları inceleyen temel bir spor bilimleri alanıdır. Egzersiz başladığında kasların enerji gereksinimi hızla yükselir ve bu gereksinimin karşılanabilmesi için kardiyovasküler, solunum, nöromusküler ve metabolik sistemlerde eş zamanlı değişimler oluşur. Egzersizin niteliği değiştikçe bu sistemlerin katkı düzeyleri de farklılaşır. Egzersiz şiddeti ve süresi, uygulanan kas kütlesi, antrenman durumu ve çevresel koşullar, ortaya çıkan fizyolojik yanıtın temel belirleyicileri arasında sayılmaktadır. Egzersiz uyarısının tekrarlanması ise akut yanıtların zaman içinde yapısal, metabolik ve fonksiyonel adaptasyonlara dönüşmesini sağlayarak fiziksel kapasitenin gelişimine katkı sunar (Hawley ve diğ., 2014; Egan & Sharples, 2023).

Sporcu performansı bu fizyolojik süreçlerin fonksiyonel bir çıktısı olarak nitelendirilebilir. Bu bağlamda sportif performans, tek bir fizyolojik kapasite tarafından belirlenmez. Dayanıklılık performansında oksijen taşınması, oksidatif metabolizma, laktat/ventilatuar eşik ve egzersiz ekonomisi önemli belirleyiciler oluştururken; kuvvet ve güç gerektiren branşlarda kasın yüksek kuvvet üretme kapasitesi, kuvvet gelişim hızı ve nöromusküler koordinasyon daha çok önem kazanır. Spor branşının gerektirdiği hareketlerin tekrar sayısı, efor süresi ve toparlanma aralıkları da performansın fizyolojik temelini etkiler. Bu yüzden egzersiz fizyolojisi açısından sportif performans, sporcunun

belirli bir görevi gerçekleştirebilmesi için sahip olduğu fizyolojik kaynakların ve bu kaynakları kullanma etkinliğinin birleşimi şeklinde tanımlanabilir (Joyner & Coyle, 2008).

Özellikle dayanıklılık performansında maksimal oksijen tüketimi ($VO_{2\text{maks}}$), metabolik veya ventilatuvar eşik ve egzersiz ekonomisi uzun süredir temel fizyolojik göstergeler arasında gösterilmektedir. $VO_{2\text{maks}}$ aerobik enerji üretimi için ulaşılabilen üst kapasite hakkında bilgi sağlarken, eşik değişkenleri yüksek aerobik kapasitenin hangi bölümünün uzun süre sürdürülebildiğini nitelemektedir. Egzersiz ekonomisi ise belirli bir hız veya güç çıktısının hangi oksijen maliyetiyle gerçekleştirildiğini yansıtır. Bu değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi, özellikle dayanıklılık sporcularının performans kapasitesinin daha doğru yorumlanmasına yardımcı olur (Joyner & Coyle, 2008; Staff ve diğ., 2024). Uzun dönemli elit dayanıklılık sporcusu verileri de performans gelişiminin her zaman $VO_{2\text{maks}}$ artışıyla paralel ilerlemediğini, submaksimal performans göstergelerindeki gelişmelerin performans üzerinde önemli bir belirleyici güce sahip olduğunu göstermektedir (Staff ve diğ., 2024).

Egzersizle birlikte organizma tarafından verilen yanıtın zaman boyutu da performansın anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Tek bir egzersiz müdahalesiyle ortaya çıkan kalp hızı, ventilasyon, kan akımı, metabolik substrat kullanımı ve vücut sıcaklığındaki değişiklikler akut egzersiz yanıtı olarak tanımlanabilir. Bu değişiklikler egzersizin sürdürülmesi için gerekli homeostatik düzenlemelerin bir parçasıdır. Egzersiz uyarını sonlandırıldığında birçok değişken dinlenim düzeylerine doğru geri dönerken, hücresel seviyede oluşan bazı sinyaller daha uzun süre devam eder. Özellikle kas kontraksiyonu, enerji stresi, mekanik yük ve metabolik değişiklikler; gen ekspresyonu ve protein senteziyle ilişkili süreçleri etkileyerek sonraki adaptasyonların oluşmasına zemin hazırlar (Mcardle ve diğ., 2010).

Düzenli antrenmanla birlikte ortaya çıkan kronik adaptasyonlar, egzersiz fizyolojisinin performans açısından en önemli sonuçlarından biridir. Dayanıklılık antrenmanı kasın oksidatif kapasitesini, mitokondriyal fonksiyonunu, kapiller ağını ve uzun süreli enerji üretme yeteneğinin gelişimini etkileyebilir. Direnç antrenmanı ise kas hipertrofisi, maksimal kuvvet ve yüksek kuvvet üretme kapasitesindeki artışlarla ilişkilidir. Bu adaptasyonların büyüklüğü ve yönü uygulanan antrenman uyarısının özellikleriyle ilişkilidir. Dolayısıyla antrenmanın fizyolojik etkisi, sadece egzersiz sırasında meydana gelen değişimlerle değil, egzersiz uyarısının haftalar ve aylar boyunca tekrarlanması sonucunda oluşan adaptasyonlarla birlikte değerlendirilmelidir (Hellsten & Nyberg, 2016).

Sporcu performansının bireyler arasında farklılık göstermesinde genetik özellikler, biyolojik gelişim, antrenman geçmişi, vücut kompozisyonu, beslenme, uyku ve çevresel koşullar gibi çok sayıda parametre rol sahibidir. Fiziksel aktivite, farklı psikososyal

tutumlarla ilişkili olarak da incelenmektedir (Çakır ve diğ., 2025a). Bu faktörlerin etkisi spor dalına göre değişebildiği için herhangi bir özelliğin bütün sporcular için aynı düzeyde performans belirleyicisi olduğu düşünülmemelidir. Özellikle aşağıdaki değişkenler sporcunun fizyolojik kapasitesinin değerlendirilmesinde göz önünde bulundurulmalıdır:

Yaş ve biyolojik gelişim

- Yaşla birlikte kas kütlesi, kardiyovasküler kapasite, nöromusküler işlev ve toparlanma süreçlerinde değişiklikler meydana gelir. Genç sporcularda kronolojik yaş ile biyolojik olgunlaşma arasında bireysel farklılıklar bulunması, performans karşılaştırmalarında önemli bir metodolojik sorun oluşturabilir. Bu nedenle çocuk ve adolesan sporcuların değerlendirilmesinde büyüme ve olgunlaşma düzeyinin dikkate alınması gerekir. Çocukluk döneminde fiziksel aktivite ve spor, gelişimsel açıdan da önem taşımaktadır (Akkuş, 2026).
- **Cinsiyet:** Biyolojik cinsiyet; vücut kompozisyonu, hemoglobin düzeyi, kalp ve damar özellikleri, kas kütlesi ve hormonal yapı üzerinden fiziksel performansla ilişkili olabilir. Hunter ve arkadaşlarının (2023) Amerikan Spor Hekimliği Koleji konsensüsünde, kadın ve erkek sporcular arasındaki performans farklılıklarının çoklu fizyolojik mekanizmaların etkileşimiyle değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu farklılıkların büyüklüğü ise spor dalına ve performansın hangi bileşeninin incelendiğine göre değişmektedir.

Boy ve antropometrik yapı

- Boy uzunluğu, ekstremite uzunlukları, segment oranları ve vücut kütesinin dağılımı belirli spor dallarında mekanik avantaj sağlayabilir. Bununla birlikte antropometrik özelliklerin performansla ilişkisi spor dalına özgüdür. Örneğin basketbol gibi branşlarda uzun boy ve ekstremite uzunlukları belirli teknik görevleri destekleyebilirken, farklı branşlarda daha düşük vücut kütlesi veya farklı segment oranları avantaj sağlayabilir. Sporcularda antropometrik ölçümlerin vücut kompozisyonu ve beden algısıyla ilişkisini inceleyen sistematik derleme, bu değişkenlerin spor dalı ve bireysel özellikler dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Webb ve diğ., 2024).

Vücut kompozisyonu

Yağ kütlesi, yağsız kütle ve kas kütesinin dağılımı performansın önemli bileşenleri arasında yer alabilir. Özellikle vücut kütesinin taşınmasının performans açısından önemli olduğu koşu, sıçrama ve bazı takım sporlarında vücut kompozisyonunun performansla ilişkisi daha belirgin hâle gelebilir.

Bununla birlikte sporcunun daha düşük vücut yağ oranına sahip olması tek başına performans avantajı olarak değerlendirilmemelidir. IOC'nin RED-S konsensüsü kapsamında yayımlanan değerlendirmede, vücut kompozisyonunun performansı etkileyen değişkenlerden biri olduğu; ancak belirli bir vücut kompozisyonunun bütün sporcular için evrensel bir performans avantajı sağlamadığı vurgulanmaktadır (Mountjoy ve diğ., 2023).

Antrenman geçmişi

- Aynı fiziksel yüklenme, farklı antrenman geçmişine sahip sporcularda farklı fizyolojik yanıtlar oluşturabilir. Düzenli antrenman sonucunda belirli iş yüklerinin fizyolojik maliyeti azalabilir ve daha yüksek iş yüklerinin sürdürülebilmesi mümkün hâle gelebilir. Elit dayanıklılık sporcularında uzun dönemli gelişimi inceleyen çalışmalar, performans belirleyicilerinin zaman içerisinde farklı oranlarda gelişebildiğini ve antrenman özelliklerinin bu değişimlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Staff ve diğ., 2023).

Enerji kullanılabilirliği

Sporcunun günlük enerji alımı ile egzersiz yoluyla harcadığı enerji arasındaki denge, performans ve sağlığın sürdürülebilmesi açısından önemlidir. Enerji kullanılabilirliğinin kronik olarak düşük olması, organizmanın fizyolojik işlevlerini sürdürmek için yeterli enerjiye sahip olmamasına yol açabilir. IOC'nin 2023 RED-S konsensüsünde düşük enerji kullanılabilirliğinin sağlık ve performans üzerinde olumsuz sonuçlara yol açabilecek bir durum olduğu ve etkilerinin bireyler arasında farklılaşabileceği belirtilmektedir (Mountjoy ve diğ., 2023).

Beslenme ve substrat kullanılabilirliği

Karbonhidrat, protein ve yağların yeterli miktarda alınması; enerji üretimi, kas protein sentezi, glikojen yenilenmesi ve toparlanma süreçlerinin sürdürülebilmesi açısından önem taşır. Özellikle yüksek yoğunluklu veya uzun süreli egzersizlerde karbonhidrat kullanılabilirliği performansın sürdürülmesi açısından önem kazanırken, yeterli protein alımı kas dokusunun yeniden yapılanmasına katkı sağlar. Beslenme gereksinimlerinin spor dalına, antrenman yüküne ve sporcunun bireysel özelliklerine göre düzenlenmesi bu nedenle önemlidir. Fiziksel aktivite ve beslenme, sağlıklı yaşam bağlamında birlikte ele alınmaktadır (Yel ve diğ., 2024).

Hidrasyon

Egzersiz sırasında terleme yoluyla meydana gelen sıvı kaybı, özellikle sıcak çevre koşullarında termoregülasyon ve kardiyovasküler işlev üzerinde ek stres oluşturabilir. Egzersiz öncesi oral hiperhidrasyonun etkilerini inceleyen meta-analizde, bazı dayanıklılık performansı ve termoregülasyon göstergelerinde olumlu etkiler bildirilmiş; ancak sonuçların egzersiz koşullarına göre değiştiği görülmüştür (McCubbin & Irwin, 2024). Bu nedenle hidrasyon stratejisinin her sporcu için aynı miktarda sıvı tüketimine indirgenmesi yerine, egzersiz süresi, çevre sıcaklığı, terleme hızı ve bireysel tolerans dikkate alınarak planlanması gerekir.

Uyku

Uyku, fiziksel ve bilişsel performansın sürdürülebilmesi ve toparlanmanın desteklenmesi açısından önemli bir fizyolojik süreçtir. Sporcularda uyku süresinin artırılmasını veya gündüz uykusunu değerlendiren sistematik derlemede, uyku süresinin uzatılması ve şekerlemelerin fiziksel veya bilişsel performans üzerinde olumlu sonuçlar sağlayabildiği bildirilmiştir. Akut uyku kaybına ilişkin meta-analitik bulgular da uyku kısıtlamasının dayanıklılık, kuvvet, anaerobik performans ve bazı beceri temelli görevlerde performans kaybıyla ilişkili olabileceğini göstermektedir (Cunha ve diğ., 2023).

Toparlanma

Antrenman uyarınının performans gelişimine dönüşebilmesi için yüklenme ile toparlanmanın dengelenmesi gerekir. Toparlanma sürecinin yetersiz olması, sonraki antrenmanlarda performans kapasitesinin düşmesine ve antrenman kalitesinin bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle antrenman planlamasında egzersiz yükü, uyku, beslenme, hidrasyon ve bireysel yorgunluk düzeyinin birlikte değerlendirilmesi gerekir.

Çevresel koşullar:

Sıcaklık, nem ve rakım gibi çevresel faktörler egzersiz sırasında oluşan fizyolojik zorlanmanın düzeyini değiştirebilir. Özellikle sıcak ortamda vücut sıcaklığının düzenlenmesi ve çalışan kaslara kan akımının sürdürülmesi kardiyovasküler sistem üzerinde ek bir yük oluşturur. Sıcaklığa alışma üzerine yapılan güncel bir sistematik derleme ve meta-analiz, ısıya alışma sonrasında dinlenik ve egzersiz sırasındaki çekirdek sıcaklık ile kalp hızı yanıtlarında azalma görülebildiğini göstermiştir. Daha kapsamlı bir meta-regresyon çalışmasında ise ısıya alışmanın plazma hacminde genişleme, egzersiz sırasında kalp hızında ve çekirdek sıcaklıkta azalma ve sıcak

koşullarda performansta artışla ilişkili olduğu bildirilmiştir (Brown ve diğ., 2024).

Bu değişkenlerin etkisi birbirinden bağımsız bir özellik taşımamaktadır. Örneğin sıcak ortamda uzun süreli egzersiz yapan bir sporcuda çevresel stres, terleme yoluyla sıvı kaybını artırabilir; sıvı kaybı ise kardiyovasküler zorlanmayı ve termoregülatuar gereksiniminde değişim oluşturabilir. Benzer şekilde yetersiz enerji kullanılabilirliği, toparlanma kapasitesini ve antrenmana verilen yanıtı etkileyebilir. Uyku yetersizliği de fiziksel performansın yanı sıra bilişsel işlevleri etkileyerek özellikle teknik ve karar verme gerektiren spor dallarında performansın farklı boyutlarını değiştirebilir. Bu nedenle sporcu performansının fizyolojik değerlendirilmesi, tek bir değişkenin ölçülmesinden çok, birbiriyle ilişkili sistemlerin birlikte ele alınmasını gerektirebilir (Halsen, 2014).

Performans değerlendirmesinde kullanılan fizyolojik ölçümlerin de spor dalının gereksinimlerine uygun seçilmesi gerekmektedir. Dayanıklılık performansında VO_2 maks, laktat veya ventilatuar eşik, egzersiz ekonomisi ve belirli bir hızdaki fizyolojik yanıt önemli bilgiler sunabilir. Buna karşın kısa süreli maksimal performans gerektiren branşlarda maksimal kuvvet, güç, kuvvet üretim hızı ve nöromusküler özellikler daha anlamlı belirteçler olabilir. Bu bağlamda performansın değerlendirilmesi esnasında “tek bir en iyi gösterge” arayışından ziyade, sporcunun branşına özgü performans gereksinimlerini karşılayan bir değerlendirme yaklaşımı kabul edilmelidir (Bassett, 2000).

Dayanıklılık sporcularında bu durum özellikle daha belirgindir. VO_2 maks yüksek seviyede aerobik kapasite hakkında önemli bilgi verse de aynı VO_2 maks değerine sahip iki sporcunun yarış performansı farklı olabilir. Kasların oksijeni kullanma kapasitesi, metabolik eşikler, koşu veya bisiklet ekonomisi ve yüksek aerobik kapasitenin ne kadarının uzun süre sürdürülebildiği performansın farklı boyutlarını temsil eder. Güncel uzun dönem verileri de elit sporcularda performans gelişiminin farklı fizyolojik göstergeler üzerinden gerçekleşebildiğini ve performans değerlendirmesinde maksimal değerlerin submaksimal göstergelerle birlikte ele alınmasının daha anlamlı olacağını ileri sürmektedir (Berger ve diğ., 2024).

Performansın zamana bağlı olarak değişmesi de egzersiz fizyolojisinin temel konularından birini oluşturmaktadır. Sporcunun performansı antrenman yükü, uyku, beslenme, hidrasyon, psikolojik stres, seyahat ve çevresel koşullara bağlı olarak dönemsel olarak değişebilir. Bu nedenle tek bir performans testi, sporcunun gerçek kapasitesini her zaman tam olarak yansıtmayabilir. Özellikle uzun süreli antrenman takviminde performans değişimlerinin düzenli olarak takip edilmesi ve bu değişimlerin antrenman yükü ile toparlanma göstergeleriyle birlikte yorumlanması tavsiye edilir. Egzersiz fizyolojisi açısından bu süreç, uyaran–yanıt–adaptasyon–performans ilişkisi

üzerinden ele alınır. Egzersiz sırasında oluşan fizyolojik stres, organizmada akut bir yanıt oluşturur. Uygun toparlanma koşullarında aynı uyarının tekrarlanması, hücrel ve sistemik adaptasyonların gelişmesine destek sağlar. Bu adaptasyonların sonucunda belirli bir iş yükünün daha düşük fizyolojik maliyetle gerçekleştirilmesi veya daha yüksek bir iş yükünün sürdürülebilmesi mümkün kılınır. Böylece egzersiz sırasında ortaya çıkan geçici fizyolojik değişimler, zamanla performans kapasitesindeki kalıcı gelişmelerin temelini sağlamlaştırır (Meeusen ve diğ., 2013; Bourdon ve diğ., 2017).

Sonuç olarak sporcu performansı; enerji üretim kapasitesi, kardiyorespiratuvar fonksiyon, iskelet kasının özellikleri, nöromüsküler kontrol, vücut kompozisyonu, antrenman geçmişi, enerji kullanılabilirliği, beslenme, hidrasyon, uyku, toparlanma ve çevresel koşulların etkileşimi sonucunda oluşan kompleks bir özellik taşır. Bu değişkenlerin her biri farklı bir fizyolojik mekanizmayı temsil ederken, gerçek performans bu mekanizmaların eş güdümlü çalışmasıyla şekil alır. Egzersiz fizyolojisinin temel katkısı, performans seviyesindeki değişimi tanımlamanın ötesinde, bu değişimin altında yatan fizyolojik ve metabolik süreçleri açıklayabilmesidir.

Bu çerçeve, mevcut kitabın sonraki bölümlerinin temelini oluşturmaktadır. Performansın sürdürülebilmesi için gereken enerjinin nasıl sağlandığı, farklı enerji sistemlerinin egzersizin şiddeti ve süresine göre nasıl katkı verdiğini bir sonraki bölümde ele alınacaktır. Daha sonraki bölümlerde ise kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin egzersize yanıtı, iskelet kası ve nöromüsküler sistemin performanstaki rolü ile tekrarlanan egzersiz uyarılarının oluşturduğu fizyolojik ve metabolik adaptasyonlar incelenecektir.

3. Egzersizde Enerji Sistemleri ve Metabolik Yanıtlar

Fiziksel egzersizin sürdürülebilmesi için kas kontraksiyonlarının gerektirdiği enerjinin sürekli olarak sağlanması gerekir. Hücresel düzeyde bu enerji doğrudan adenozin trifosfatın (ATP) hidroliz yoluyla gerçekleştirilir. Ancak kas hücresindeki ATP depoları sınırlıdır ve yüksek enerji gerektiren egzersizlere tepki olarak hızla tüketilebilir. Bu nedenle organizma ATP'yi yeniden sentezlemek amacıyla fosfajen sistemi, glikolitik yol ve oksidatif fosforilasyonu eş zamanlı olarak kullanır. Bu sistemler birbirini izleyen bağımsız mekanizmalar değil, egzersizin şiddeti ve süresine göre katkı oranları değişen bütünleşik enerji yollarıdır (Zignoli ve diğ., 2026).

Enerji sistemlerinin katkısını belirleyen temel değişkenlerden biri gerçekleştirilen egzersizin şiddetidir. Çok yüksek şiddetli ve kısa süreli egzersizlerde fosfokreatin (PCr) kullanımı ve anaerobik glikoliz öne çıkarken, egzersiz süresi uzadıkça oksidatif fosforilasyonun katkısı artar. Bununla birlikte hiçbir egzersiz sadece tek bir enerji sistemi tarafından desteklenmez. Yüksek şiddetli aktivitelerde dahi aerobik metabolizma ATP üretimine katkıda bulunurken, uzun süreli dayanıklılık egzersizlerinde anaerobik yollar tam olarak devre dışı kalmaz (Gastin, 2001).

ATP'nin doğrudan depolanabilen miktarının sınırlı olması nedeniyle egzersizin ilk saniyelerinde fosfokreatin sistemi hızlı ATP yenilenmesinin önemli kaynaklarından biri konumundadır. Kreatin kinaz reaksiyonu aracılığıyla fosfokreatinden ADP'ye fosfat

aktarılması ATP sentezinin hızlanmasını sağlar. Bu mekanizma özellikle sprint, atlama, fırlatma ve maksimal kuvvet uygulamaları gibi kısa süreli yüksek güçlü aktivitelerde önem taşır. Ancak kas içindeki PCr depoları sınırlı olduğundan bu sistem uzun süreli yüksek güç üretimini tek başına sürdürülebilir hale getiremez (Kuznetsov ve diğ., 2025). PCr depolarının resentezi büyük ölçüde oksidatif metabolizmaya bağlıdır. Bu bağlamda egzersiz sonrası PCr toparlanma kinetiği, kasın oksidatif kapasitesi hakkında bilgi sunabilir. Özellikle tekrarlı sprint ve yüksek yoğunluklu interval egzersizlerinde iki efor arasındaki toparlanma süresi, sonraki performansın sürdürülebilmesinde önemlidir (Haseler ve diğ., 1999).

Egzersiz şiddetinin yükselmesiyle karbonhidrat metabolizmasının enerji üretimindeki katkısı belirginleşir. Kas glikojeni ve kan glukozu, özellikle yüksek yoğunluklu egzersizlerde hızlı ATP üretimini destekleyen temel substratlardır. Glikojenin kas içerisinde depolanması, egzersiz esnasında glukozun hızlı bir şekilde kullanılmasına imkan tanır. Güncel bir sistematik derleme, direnç egzersizinin de kas glikojeninde anlamlı azalmaya yol açtığını ve bu azalmanın egzersiz hacmi arttıkça belirginleştiğini ileri sürmüştür (Schaeffer & Weisser., 2026).

Glikoliz, glukoz veya glikojenden pirüvat oluşumunu sağlayan ve oksijene doğrudan bağımlı olmadan ATP üretimine katkıda bulunan metabolik yoldur. Yüksek enerji talebinin kısa sürede ortaya çıktığı egzersizlerde glikolitik akış hızlanır. Pirüvatın bir bölümü mitokondriye taşınarak asetil-CoA üzerinden oksidatif metabolizmaya katılırken, yüksek glikolitik akış ve sınırlı oksidatif kapasite koşullarında laktat oluşumu artar. Böylece laktat oluşumu, glikolizin devamlılığını sağlayan NAD⁺ yenilenmesine yardımcı olur (Pataky ve diğ., 2025).

Laktatın egzersiz fizyolojisindeki rolü günümüzde “metabolik atık” anlayışının ötesinde değerlendirilmektedir. Egzersiz sırasında meydana gelen laktat farklı dokular tarafından yeniden kullanılabilir; oksidatif kas lifleri ve kalp gibi dokular tarafından enerji substratı olarak değerlendirilebilir ve karaciğerde glukoneogeneze katkı sunabilir. Ek olarak laktatın hücresel sinyalizasyon ve adaptif süreçlerle ilişkili olduğu bildirilmiştir (Brooks, 2020). Bu bağlamda kandaki laktat artışı sadece yorgunluğun göstergesi olarak yorumlanmamalıdır. Egzersizle birlikte oluşan laktatın tamamı dolaşımda birikmez. Bir bölümü aynı kas içinde oksidasyona uğrarken bir bölümü diğer dokulara taşınır. Karaciğere ulaşan laktat ise Cori döngüsü aracılığıyla yeniden glukozla dönüştürülebilir. Böylece egzersiz sırasında oluşan metabolitlerin yeniden kullanılması, enerji homeostazının sürdürülmesine yardımcı olur (Smith ve diğ., 2023).

Uzun süreli ve düşük-orta şiddette egzersizlerde yağ asitlerinin oksidasyonu enerji üretiminde daha büyük paya sahip olur. Serbest yağ asitleri adipoz dokudan dolaşıma salınarak çalışan kaslar tarafından kullanılabilir; kas içerisindeki intramiyoselüler trigliseritler de enerji kaynağı şeklinde değerlendirilebilir. Yağ oksidasyonunun seviyesi egzersiz şiddeti, süre, antrenman durumu, beslenme ve bireysel özellikler gibi

parametrelerden etkilenir. Sistematik derleme ve meta-regresyon bulguları maksimum yağ oksidasyonunun kardiyorespiratuvar uygunluk, beden kütlesi ve egzersiz protokolü gibi değişkenlerle ilişkili olduğunu raporlamıştır (Chávez-Guevara ve diğ., 2023).

Karbonhidrat ve yağ kullanımının oranı egzersizin şiddetine göre farklılaşabilir. Düşük şiddetlerde yağ oksidasyonunun katkısı görece yükseken, şiddetin yükselmesiyle karbonhidrat kullanımı belirginleşir. Bunun temel nedenlerinden biri karbonhidrat metabolizmasının yüksek ATP üretim hızlarını destekleyebilmesidir. Buna karşılık yağ oksidasyonu daha yüksek enerji kapasitesine sahip olmakla birlikte ATP'nin hızlı yenilenmesi açısından daha sınırlıdır (Hargreaves & Spriet, 2020).

Antrenman, enerji substratlarının kullanımını önemli düzeyde değiştirir. Düzenli dayanıklılık antrenmanı mitokondriyal yoğunluk, oksidatif enzim aktivitesi, kapiller ağ ve yağ asidi kullanım kapasitesindeki gelişmelerle ilişki içerisindedir. Bu adaptasyonlar, aynı mutlak egzersiz yükünün daha düşük fizyolojik maliyetle gerçekleştirilmesini destekleyebilir. Güncel bir sistematik derleme ve meta-regresyon, dayanıklılık antrenmanının iskelet kasındaki mitokondriyal ve kapiller adaptasyonları desteklediğini ifade etmiştir (Mølmen ve diğ., 2025).

Mitokondriler oksidatif enerji üretiminin merkezinde yer alır. Karbonhidrat ve yağlardan elde edilen indirgenmiş koenzimler elektron transport zincirine elektron sağlar ve oluşan proton gradyanı ATP sentaz aracılığıyla ATP sentezinde kullanılır. Mitokondriler bu nedenle sadece enerji üreten yapılar olarak isimlendirilmeyip, ayrıca egzersiz sırasında enerji talebine ve hücrel sinyallere göre yeniden düzenlenen dinamik organeller şeklinde değerlendirilmelidir (Reisman ve diğ., 2024).

Egzersiz sırasında ATP tüketiminin artması, hücrel enerji durumunda değişikliklere yol açar. AMP-activated protein kinase (AMPK) gibi enerji sensörleri bu değişiklikleri algılayarak glukoz alımı, yağ asidi oksidasyonu ve mitokondriyal adaptasyonla ilişkili metabolik süreçlerin düzenlenmesine katkı sunar. Böylece egzersiz sırasında gerçekleşen enerji stresi, yalnızca anlık ATP gereksiniminin karşılanmasına hizmet etmez; tekrarlandığında uzun dönemli metabolik adaptasyonların oluşmasına da yardımcı olur (Kjøbsted ve diğ., 2018).

Karbonhidrat metabolizması çalışan kasın glikojen depolarıyla sınırlı kalmamaktadır. Egzersiz sırasında karaciğer, kan glukozunun korunmasında önemli rol oynar. Hepatik glikojenoliz ve glukoneogenez yoluyla dolaşıma glukoz sağlanması, özellikle uzun süreli egzersizde kasların artan enerji gereksiniminin karşılanmasına yardımcı olur. Kaslardan dolaşıma çıkan laktat ve bazı metabolitler de karaciğer tarafından glukoneogenez için kullanılabilir (Wang & Wu, 2026). Proteinlerin egzersiz sırasındaki enerji katkısı karbonhidrat ve yağlara göre daha sınırlı kalmaktadır. Ayrıca uzun süreli dayanıklılık egzersizlerinde amino asit oksidasyonu artabilir. Güncel bir araştırmada, dayanıklılık egzersizi sırasında protein oksidasyonunun dinlenime kıyasla arttığı ve proteinlerin

toplam enerji harcamasına yaklaşık %3 düzeyinde katkı sunduğu raporlanmıştır (Clauss & Jensen, 2025). Egzersiz sonrası dönemde ise amino asitler kas protein sentezi ve doku yenilenmesi açısından önem taşır.

Enerji substratlarının kullanımındaki bireysel farklılıklar metabolik esneklik kavramıyla ilişki taşır. Metabolik esneklik, organizmanın enerji gereksinimi ve besin kullanılabilirliğindeki değişikliklere karşı karbonhidrat ve yağ kullanımını uygun biçimde değiştirebilme kapasitesini yansıtır. Antrenman düzeyi, kas lifi özellikleri, mitokondriyal kapasite, beslenme ve metabolik sağlık bu kapasiteyi etkileyebilir. Fiziksel aktivitenin metabolik esnekliği destekleyebildiği bildirilmektedir (Garthwaite ve diğ., 2024). Egzersiz sonlandırıldığında metabolik süreçlerde hemen dinlenim düzeyine dönme beklenmez. Egzersiz sonrası oksijen tüketiminin bir süre yüksek kalması EPOC olarak adlandırılır. Fosfokreatin depolarının yenilenmesi, glikojen sentezi, vücut sıcaklığının normale dönmesi, dolaşım ve ventilasyonun düzenlenmesi ile protein dönüşümü bu süreçte rol oynar. Özellikle yüksek yoğunluklu egzersizler sonrasında EPOC daha belirgin olabilir (Sindorf ve diğ., 2021). Egzersiz sonrası metabolik toparlanmanın önemli bir bileşeni kas glikojeninin resentezidir. Egzersiz sırasında azalan glikojen depolarının yenilenmesi, sonraki egzersiz seansında performansın sürdürülebilmesi açısından önem taşır. Kas kontraksiyonları sonrasında glukoz alımını kolaylaştıran mekanizmaların etkinleşmesi ve takip eden süreçte insülin aracılı yanıtların devreye girmesi glikojen sentezine yardımcı olur (Carling ve diğ., 2012).

Beslenme durumu da enerji sistemlerinin kullanımında değişim oluşturabilir. Karbonhidrat kullanılabilirliğinin azaltıldığı koşullarda yağ oksidasyonu ve bazı metabolik sinyal yanıtlarda artış yaşanabilir. Bu tür koşullar PGC-1 α , PDK4, GLUT4 ve UCP3 gibi metabolizma ile ilişkili genlerin ekspresyonunu etkileyebilir. Ancak moleküler düzeyde ortaya çıkan bu değişikliklerin her koşulda performans artışı anlamına gelmediğine dikkat edilmelidir. Metabolik sinyal ile fonksiyonel performans çıktısı birbirinden ayrı değerlendirilmelidir (Rahimi ve diğ., 2025). Enerji sistemlerinin katkısı egzersizin süresi ve şiddetine göre sürekli değişim gösterir. Birkaç saniyelik maksimal eforlarda fosfajen sisteminin hızlı ATP üretme kapasitesi öne çıkarken, yüksek şiddetli ve daha uzun süreli aktivitelerde glikolitik katkı belirginleşir. Uzun süreli egzersizlerde oksidatif fosforilasyon toplam enerji üretiminin temel bileşeni hâline gelir. Ancak bu süreler kesin sınırlar olarak değerlendirilmemelidir; enerji sistemleri egzersizin başlangıcından sonuna kadar birlikte çalışır ve katkı oranları sürekli olarak farklılaşabilir (Gastin & Suppiah, 2026). Antrenmanla birlikte enerji sistemlerinde gerçekleşen değişiklikler sporcu performansındaki gelişimin önemli mekanizmalarındandır. Dayanıklılık antrenmanı mitokondriyal kapasiteyi ve oksidatif ATP üretimini desteklerken, yüksek yoğunluklu antrenman glikolitik kapasite ve yüksek enerji talebine yanıt verme yeteneği üzerinde etkili sahibidir. Direnç egzersizi ise kas

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

kütlesi ve enerji depolama kapasitesindeki değişiklikler üzerinden metabolik sistemi etkiler. Bu adaptasyonlar birbirinden bağımsız değildir ve farklı antrenman modelleri aynı organizmada birden fazla enerji sistemini farklı düzeylerde etkileyebilir (Reisman ve diğ., 2024).

Sonuçla egzersizde enerji metabolizması, ATP'nin resenteziyle başlayan ve fosfokreatin kullanımı, glikojen metabolizması, glikoliz, laktat dönüşümü, yağ asidi oksidasyonu, mitokondriyal enerji üretimi ve egzersiz sonrası toparlanmayı kapsayan kompleks bir süreci oluşturur. Karbonhidrat, yağ ve protein metabolizmasının katkısı egzersizin şiddeti, süresi, antrenman durumu ve beslenme koşullarına göre değişim gösterebilir. Tekrarlanan egzersiz uyarınları ise bu enerji yollarında yapısal ve fonksiyonel adaptasyonlara yol açarak organizmanın enerji üretme ve kullanma kapasitesini geliştirir. Enerji metabolizmasının sürdürülebilmesi, oksijenin akciğerlerden alınması, dolaşım sistemi aracılığıyla çalışan kaslara taşınması ve mitokondrilerde kullanılmasını gerektirir. Bu bağlamda enerji sistemleri ile kardiyovasküler ve solunum sistemleri birbirinden ayrı düşünülmemelidir. Bir sonraki bölümde kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin egzersize akut yanıtları ve kronik adaptasyonları, oksijen taşınması ve egzersiz performansı arasındaki ilişki üzerinden ele alınacaktır.

4. Kardiyovasküler ve Solunum Sistemlerinin Egzersize Yanıtı

Egzersiz sırasında metabolik gereksinimin yükselmesi, çalışan kaslara daha fazla oksijen ulaştırılmasını ve metabolik ürünlerin uzaklaştırılmasını gerektirir. Bu süreçte kardiyovasküler ve solunum sistemleri koordineli bir şekilde çalışır. Solunum sistemi oksijenin alveollerden kana alınmasını ve karbondioksitin uzaklaştırılmasını sağlarken, kardiyovasküler sistem oksijenden zengin kanı aktif dokulara taşır. Bu nedenle egzersiz performansının kardiyorespiratuvar boyutu, kalp ve akciğerlerin ayrı işlevlerinden çok, oksijenin atmosferden çalışan kaslara ulaştırılmasını sağlayan bütünleşik süreç üzerinden değerlendirilmelidir (Panza ve diğ., 2024).

Egzersizin başlamasıyla birlikte kalp hızı artan bir prevelans eğilimi gösterir. Merkezi komut, kas ve eklemlerden gelen afferent sinyaller ve otonom sinir sistemi düzenlemeleri parasempatik etkinliğin azalmasına ve sempatik aktivitenin artmasına yardımcı olur. Buna bağlı olarak kalp hızı ve miyokardiyal kontraktilite artış gösterir. Kalp hızındaki yükselmeye atım hacmindeki değişikliklerin eşlik etmesi, kardiyak debinin artmasını ve çalışan kaslara daha fazla kan gönderilmesini sağlar. Kardiyak debi, oksijen taşınmasının temel bileşenlerinden biri olmakla birlikte, performans sadece kalbin pompaladığı kan miktarına bağlı değildir; dokuların bu kandan oksijen çekebilme kapasitesi de belirleyicidir. Nitekim dayanıklılık antrenmanlı bireylerde yüksek aerobik kapasiteye daha düşük maksimal kardiyak yük ve daha yüksek arteriyovenöz oksijen farkının eşlik edebildiği gösterilmiştir (Husaini & Emery, 2023). Kardiyak debide oluşan

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

artışın yanı sıra kan akımının dokular arasındaki dağılımı da egzersizin gereksinimlerine göre yeniden düzenlenir. Aktif iskelet kaslarında metabolik vazodilatasyon gelişirken, dolaşım sisteminin diğer bölgelerindeki kan akımı egzersizin şiddeti, süresi ve termoregülasyon gereksinimine göre şekil alır. Bu düzenleme sayesinde sınırlı dolaşım kapasitesi, metabolik açıdan daha yüksek gereksinime sahip dokulara yönlendirilir. Egzersiz sırasında sistolik kan basıncının yükselmesi de kardiyak debideki artışın önemli bir sonucudur; buna karşın aktif kas damar yatağındaki vazodilatasyon nedeniyle diyastolik basınç daha sınırlı değişebilir.

Tekrarlanan egzersiz uyarıları kardiyovasküler sistemde zamanla yapısal ve fonksiyonel adaptasyonlara zemin hazırlar. Özellikle dayanıklılık antrenmanı, kalbin dolum kapasitesi, atım hacmi ve yüksek egzersiz şiddetlerinde kardiyak debinin sürdürülebilmesi açısından önemli değişiklikler oluşturabilir. Bu adaptasyonlar “sporcu kalbi” olarak tanımlanan fizyolojik yeniden yapılanmanın temelini oluşturur. Ancak kardiyak adaptasyonların büyüklüğü ve niteliği antrenman türü, egzersiz hacmi, yaş, cinsiyet ve vücut özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişim gösterebileceği güncel çalışmalarca doğrulanmaktadır (Claessen ve diğ., 2024; Lasocka-Koriat ve diğ., 2024). Kardiyovasküler yanıtın bu şekilde artması, solunum sistemindeki değişikliklerle eş zamanlı gerçekleşir. Egzersizin başlamasıyla oksijen tüketimi ve karbondioksit üretimi yükselir; buna karşılık dakika ventilasyonunda da artış yaşanır. Düşük ve orta şiddetli egzersizde ventilasyon artışına tidal volümün yükselmesi önemli katkı sağlarken, şiddet arttıkça solunum frekansının katkısı belirginleşir. Egzersiz hiperapnesinin oluşumu tek bir mekanizmayla açıklanamaz; merkezi motor komutlar, çalışan kaslardan gelen afferent sinyaller ve kemoreseptörlerden kaynaklanan geri bildirimler ventilasyonun düzenlenmesine birlikte katkıda bulunur (Welch & Mitchell, 2024). Ventilasyondaki artışın temel amaçlarından biri alveoler gaz değişiminin metabolik gereksinime uyumlu biçimde sürdürülmesidir. Alveoller ile pulmoner kapillerler arasındaki gaz değişimi vasıtasıyla oksijen kana alınırken, metabolik olarak oluşan karbondioksit akciğerlere taşınarak dışarı salınır. Egzersiz sırasında pulmoner kan akımı ve ventilasyon birlikte yükseldiğinden, ventilasyon-perfüzyon ilişkisinin etkin biçimde sürdürülmesi gerekir. Bu nedenle ventilasyonun sadece solunum frekansındaki artış olarak değerlendirilmesi yetersizdir; gaz değişimi ve ventilasyonun metabolik gereksinime uygunluğu da egzersiz kapasitesinin önemli göstergeleridir (Panza ve diğ., 2024).

Egzersiz şiddetinin yükselmesi solunum kaslarının yükünde artış oluşturur. Özellikle yüksek ventilasyon gerektiren uzun süreli veya yoğun egzersizlerde diyafram ve diğer solunum kaslarının iş yükü belirginleşebilir. Solunum kaslarının yorgunluğu, ventilasyonun sürdürülmesini zorlaştırarak egzersiz toleransını etkileyebilecek faktörlerden biridir. Deneysel çalışmalar, egzersiz şiddeti ve sürdürülebilir egzersiz süresinin diyafram ve ekspiratuvar kas yorgunluğunun oluşumunda farklı etkiler

oluşturabildiğini göstermektedir (Hardy ve diğ., 2024). Kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin ortak amacı, oksijenin atmosferden çalışan kaslara ulaştırılmasıdır. Bu süreç akciğerlerdeki gaz değişiminden başlayarak hemoglobin aracılığıyla oksijenin taşınması, kardiyak debi yoluyla dokulara ulaştırılması ve son olarak çalışan kasların oksijeni kullanmasına kadar süregelir. Bu yüzden maksimal oksijen tüketimi ($VO_{2\text{maks}}/VO_{2\text{peak}}$), kardiyorespiratuvar sistemin bütünsel kapasitesini değerlendirmede önemli bir belirteçdir. Bununla birlikte $VO_{2\text{maks}}$ tek başına sportif performansın bütününe açıklamaz; kasların oksijen kullanım kapasitesi, hareket ekonomisi, nöromusküler özellikler ve spor dalına özgü performans gereksinimleri de sonucun belirlenmesinde etkili olur. Bu bütünsel yanıtın değerlendirilmesinde kardiyopulmoner egzersiz testi önemli bir yöntemdir. Oksijen tüketimi, karbondioksit üretimi, ventilasyon ve kalp hızı gibi değişkenlerin eş zamanlı ölçülmesi, egzersiz kapasitesinin kardiyovasküler ve solunum bileşenlerinin birlikte değerlendirilmesine imkan tanır. Özellikle ventilasyon etkinliği, egzersiz toleransının önemli belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmekte ve kardiyopulmoner egzersiz testinin temel değerlendirme değişkenleri arasında yer almaktadır (Panza ve diğ., 2024).

Çevresel koşullar da kardiyorespiratuvar yanıtın büyüklüğünü değiştirebilir. Özellikle sıcak ortamda uzun süreli egzersiz anında terleme ve cilt kan akımındaki artış dolaşım sistemi üzerindeki yükü artırır. Plazma hacmindeki azalma ile termoregülasyon için gerekli dolaşımın sürdürülmesi, çalışan kaslara yeterli kan akımının sağlanmasını güçleştirebilir. Bu nedenle çevresel stres, kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin egzersiz sırasında gösterdiği yanıtın değerlendirilmesinde önemli bir değişken olarak incelenmelidir.

Sonuç olarak kardiyovasküler ve solunum sistemleri, egzersiz sırasında artan metabolik gereksinimi karşılamak üzere koordineli biçimde çalışan iki temel sistemdir. Kalp hızının ve kardiyak debinin artması, kan akımının aktif kaslara yönlendirilmesi, ventilasyonun yükselmesi ve alveoler gaz değişiminin sürdürülmesi oksijen taşınmasının birbirini tamamlayan aşamalarını ihtiva eder. Tekrarlanan egzersiz uyarıları bu sistemlerde yapısal ve fonksiyonel adaptasyonlar oluşturarak sporcunun daha yüksek iş yüklerini sürdürebilmesine katkı sunar. Bu nedenle kardiyorespiratuvar performans, tek bir parametre üzerinden değil, oksijenin alınmasından çalışan kaslarda kullanılmasına kadar uzanan bütünsel fizyolojik süreç üzerinden değerlendirilmelidir.

5. İskelet Kası, Nöromüsküler Sistem ve Performans

İskelet kası, egzersiz sırasında kimyasal enerjiyi mekanik işe dönüştüren ve sportif performansın ortaya çıkmasında aktif olarak çalışan temel dokulardan biridir. Kasın kuvvet üretme kapasitesi sadece kas kütlesiyle açıklanamaz; kas liflerinin yapısı, enerji üretme özellikleri, sinirsel aktivasyon, kas-tendon özellikleri ve yorgunluğa karşı gösterilen yanıt birlikte belirleyicidir. İskelet kasının yüksek plastisiteye sahip olması, farklı egzersiz uyarılarına karşı kontraktıl, metabolik ve moleküler düzeylerde yeniden yapılanabilmesine olanak sağlar (Furrer & Handschin, 2024).

Kasın fonksiyonel özelliklerinin önemli bir belirleyicisi kas lifi kompozisyonudur. İnsan iskelet kasında genel olarak yavaş kasılan Tip I ve daha hızlı kasılan Tip II lifleri ayırt edilir. Tip I lifleri yüksek oksidatif kapasite ve yorgunluğa dirençleri nedeniyle uzun süreli dayanıklılık gerektiren aktivitelerde olumlu yönde yorumlanırken, Tip II lifleri daha yüksek kuvvet ve güç üretimi açısından önem taşır. Ek olarak lifler tamamen birbirinden bağımsız özellikler taşımaz; egzersiz türü ve antrenman geçmişiyle birlikte metabolik ve kontraktıl özelliklerinde değişiklikler oluşabilir. Güncel proteomik çalışmalar, farklı kas lifi alt gruplarının antrenman uyarılarına aynı biçimde yanıt vermediğini ve kas adaptasyonunun lif tipine özgü özellikler taşıyabildiğini göstermektedir (Scott ve diğ., 2001).

Kasın kuvvet üretmesi, sinir sisteminden gelen uyarının motor nöronlar aracılığıyla motor ünitelere aktarılmasıyla baş gösterir. Bir motor ünite, tek bir motor nöron ve onun innerve ettiği kas liflerinden meydana gelir. Gereksinim duyulan kuvvette artış yaşandıkça daha fazla motor ünitenin devreye girmesi ve aktif motor ünitelerin ateşleme özelliklerinin değiştirilmesi mümkün olur. Bu süreç, özellikle yüksek kuvvet ve hızlı hareket gerektiren sportif aktivitelerde önemlidir. Motor ünite davranışının egzersiz sırasında doğrudan incelenebilmesi, kuvvet üretiminin sadece kas dokusundaki değişikliklerle değil, sinirsel kontrol mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmesine yardımcı olur (Duchateau & Enoka, 2011). Bu nedenle direnç antrenmanlarının ilk dönemlerinde gerçekleşen kuvvet artışının tamamını kas hipertrofisiyle açıklamak doğru değildir. Antrenmanın erken dönemlerinde motor ünite aktivasyonu, sinirsel sürücü ve kuvvet üretiminin koordinasyonundaki değişiklikler önemli rol oynayabilir. Uzun süreli antrenmanla birlikte ise kas liflerinin kesit alanındaki artış ve kontraktıl proteinlerin yeniden düzenlenmesi gibi yapısal değişiklikler kuvvet kapasitesinin gelişimine daha fazla rol oynayabilir. Direnç egzersizine bağlı nöromusküler adaptasyonların antrenman görevinin özelliklerine özgü olabildiği ve kuvvet ile kuvveti geliştirme hızındaki değişimlerin farklı sinirsel mekanizmalar içerebildiği bildirilmektedir (Del Vecchio ve diğ., 2024).

Kas hipertrofisi, özellikle kuvvet ve güç gerektiren spor branşlarında performansın önemli bileşenleri arasındadır. Direnç egzersizi kas protein sentezini uyararak zaman içerisinde kas liflerinin büyümesine ve kasın kuvvet üretme kapasitesinin gelişmesine yardımcı olabilir. Bu adaptasyonun büyüklüğü antrenman hacmi, yoğunluğu, egzersiz seçimi, hareket aralığı ve bireyin antrenman geçmişi gibi birçok parametreden etkilenir. Güncel derlemeler, direnç antrenmanının kas hipertrofisinin yanı sıra maksimal kuvvet, güç ve çeşitli nöromusküler performans göstergelerinde gelişim sağlayabildiğini göstermektedir (Currier ve diğ., 2026).

Kasın antrenmana verdiği yanıt sadece mekanik yapıdaki değişikliklerle sınırlı kalmamaktadır. Tek bir egzersiz müdahalesinin ardından kas içerisinde enerji metabolizması, protein sentezi, hücresel sinyal yolları ve gen ekspresyonu ile ilişkili çok sayıda süreç aktive olur. Bu akut yanıtların tekrarlanması, zaman içerisinde kasın kontraktıl ve metabolik özelliklerinde daha kalıcı değişiklikler meydana getirir. Özellikle direnç ve dayanıklılık egzersizlerinin oluşturduğu sinyallerin farklılaşması, kasın antrenman uyarısının niteliğine özgü adaptasyon geliştirmesinin temel nedenleri arasındadır (Thomas ve diğ., 2024).

Kas liflerinin metabolik özellikleri de performansın sürdürülebilmesinde dikkat çekmektedir. Dayanıklılık antrenmanı mitokondriyal kapasite, oksidatif metabolizma ve kasın substrat kullanım özelliklerinde gelişmelere yol açabilirken, direnç antrenmanı daha çok kuvvet üretimi, hipertrofi ve nöromusküler kapasiteyi destekleyen adaptasyonları öne çıkarır. Bununla birlikte bu iki adaptasyon grubu tamamen

birbirinden bağımsız çalışmamaktadır. Sporcuların önemli bir bölümünde dayanıklılık ve kuvvet özelliklerinin birlikte geliştirilmesi gerekir ve uygulanan antrenmanın sıralaması ile toplam yükü, ortaya çıkan adaptasyonların niteliğini etkileyebilir.

Kas performansının önemli bir diğer bileşeni kuvvetin ne kadar hızlı üretilbildiğidir. Özellikle sprint, sıçrama, yön değiştirme ve fırlatma gibi aktivitelerde yalnızca maksimal kuvvet değil, kuvvetin kısa sürede ortaya çıkarılmasının da önemi göz ardı edilmemelidir. Bu özellik genellikle kuvvet gelişim hızıyla ilişkilendirilir ve kasın kontraktıl özellikleri kadar motor ünitelerin aktivasyonu, sinirsel sürücü ve hareketin koordinasyonu tarafından saptanır. Bu bağlamda sportif performansın değerlendirilmesinde maksimum kuvvet ölçümlerine odaklanmak kadar hızlı kuvvet üretimi gerektiren branşlarda performansın önemli bir bölümü de göz önünde bulundurulmalıdır (Del Vecchio ve diğ., 2024).

Nöromüsküler sistemin performanstaki rolü, yorgunluk geliştiğinde daha belirgin hâle gelir. Egzersize bağlı nöromüsküler yorgunluk, kasın kuvvet üretme kapasitesindeki azalmanın yanı sıra merkezi sinir sistemi, motor nöronlar, kas lifleri ve duyuşal geri bildirim mekanizmaları arasındaki etkileşimlerle şekillenir. Bu nedenle yorgunluk tek bir fizyolojik mekanizmanın sonucu olarak nitelendirilmemelidir. Özellikle uzun süreli veya yüksek şiddetli egzersizlerde hem periferik kas süreçleri hem de merkezi sinirsel kontrol performansın sürdürülmesini etkileyebilir. Nöromüsküler yorgunluğun değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerin spor dalına göre farklılaşması da bu çok bileşenli yapıyı yansıtmaktadır (Muñoz-Gracia ve diğ., 2025). Yorgunluğun ortaya çıkması, performansın mutlaka tamamen kaybedileceği anlamı taşımaz. Sporcu, egzersiz sırasında motor ünite aktivasyonunu ve hareket stratejilerini değiştirerek ortaya çıkan fizyolojik yükü belirli ölçüde dengeleyebilir. Ancak yorgunluk ilerledikçe kuvvet üretimi, hareket doğruluğu, reaksiyon kapasitesi ve teknik uygulama olumsuz etkilenebilir. Özellikle takım ve bireysel sporlar arasında yorgunluğun performans üzerindeki etkisi farklı olabilir; bu nedenle nöromüsküler yorgunluğun değerlendirilmesi, spor dalının gerektirdiği temel hareket ve performans özellikleriyle birlikte ele alınmalıdır.

İskelet kasının egzersize uyumunda antrenman sonrası toparlanma da kritik öneme sahiptir. Egzersiz sırasında oluşan mekanik ve metabolik stres, kas proteinlerinin yeniden sentezi, hücreşel yapıların onarımı ve enerji depolarının yenilenmesi gibi süreçlerle takip edilir. Yeterli toparlanma sağlandığında tekrarlanan egzersiz uyarıları kasın daha yüksek iş yüklerine uyum göstermesine olanak verir. Buna karşılık yüksek antrenman yüklerinin yetersiz toparlanmayla birleşmesi, performansın geçici olarak azalmasına ve nöromüsküler yorgunluğun birikmesine neden olabilir. Kasın egzersize verdiği moleküler yanıt, bu adaptasyonların altında bulunan biyolojik mekanizmaların anlaşılması açısından önemlidir. Mekanik gerilim, enerji durumu, kalsiyum sinyalleri,

oksidatif stres ve çeşitli hücrel sensörler kas hücresinde farklı sinyal yollarını aktive ederek protein sentezi, mitokondriyal fonksiyon ve kontraktıl yapıların yeniden düzenlenmesine katkı sağlar. Bu mekanizmaların birlikte çalışması, aynı kas dokusunun farklı egzersiz türlerine farklı biçimlerde uyum göstermesini mümkün kılar (Furrer & Handschin, 2024).

Sonuç olarak iskelet kası ve nöromüsküler sistem, sportif performansın ortaya çıkmasında birbirinden ayrı düşünölemeyecek iki temel bileşendir. Kasın lif kompozisyonu, kuvvet ve güç üretme kapasitesi, motor ünite aktivasyonu, metabolik özellikleri ve yorgunluğa karşı direnci performansın farklı boyutlarını belirler. Düzenli antrenman ise bu özelliklerde hem sinirsel hem de yapısal değişiklikler oluşturarak sporcunun fiziksel kapasitesini geliştirir. Bu adaptasyonların performansa dönüşebilmesi, yalnızca antrenman uyarınının büyüklüğüne değil, toparlanma ve sonraki egzersiz uyarılarının uygun biçimde planlanmasına da bağlıdır. Böylece akut egzersiz yanıtları, zaman içerisinde kronik nöromüsküler ve kas adaptasyonlarına dönüşerek sportif performansın fizyolojik temelini oluşturur.

6. Egzersize Akut Yanıtlar ve Kronik Fizyolojik Adaptasyonlar

Egzersiz sırasında oluşan fizyolojik değişiklikler, organizmanın artan enerji ve mekanik gereksinimlere verdiği kısa süreli yanıtları temsil eder. Tek bir egzersiz müdahalesiyle kardiyovasküler, solunum, metabolik, nöromusküler ve endokrin sistemlerde gerçekleşen değişimler homeostatik dengenin geçici olarak yeniden düzenlenmesini gerekli hale getirir. Egzersiz uyarınının düzenli şekilde tekrarlanması ise bu geçici yanıtların zaman içerisinde yapısal ve işlevsel adaptasyonlara dönüşmesini sağlar. Bu bağlamda kronik antrenman adaptasyonlarını daha iyi anlamak adına öncelikle tek bir egzersiz müdahalesinin oluşturduğu akut yanıtın niteliğini değerlendirmek gereklidir (Li ve diğ., 2024).

Akut yanıtın büyüklüğü egzersizin şiddeti, süresi, türü ve aktif kas kütesinin yanı sıra bireyin antrenman düzeyi gibi özelliklerden etkilenir. Egzersizin başlamasıyla birlikte artış gösteren enerji gereksinimini karşılamak üzere kalp-damar sistemi, solunum sistemi ve metabolik süreçler eş güdümlü bir şekilde düzenlenir. Otonom sinir sistemi, merkezi komut, aktif kaslardan gelen afferent sinyaller ve barorefleks mekanizmaları bu düzenlemenin önemli bileşenleri arasındadır. Aynı dış yükün sedanter ve iyi antrene olmuş bireylerde farklı fizyolojik stres oluşturabilmesi, egzersiz yanıtının bireysel özellikler dikkate alınarak değerlendirilmesi gerektiğini gözler önüne sermektedir (Bersaoui ve diğ., 2026).

Bu sistemik yanıtın önemli bir bölümü çalışan iskelet kasında gerçekleşir. Kasılma esnasında ATP tüketimi hızlanır; fosfokreatin kullanımı, glikojen yıkımı, kalsiyum döngüsü ve oksidatif metabolizma değişirken hücresel enerji ve redoks dengesi yeniden düzenlenir. Bu değişimler sadece enerji üretiminin sürdürülmesini sağlamaz; ek olarak egzersiz sonrasında oluşacak adaptasyonlar için biyolojik sinyal görevi görür. AMPK, CaMK ve mTOR gibi sinyal sistemleri ile transkripsiyonel düzenleyiciler, mekanik ve metabolik uyarıların daha uzun süreli hücresel değişikliklere aktarılmasında katkı sağlar (Furrer & Handschin, 2024).

Egzersizle birlikte oluşan akut stres, egzersizin tamamlanmasıyla birlikte tam anlamda ortadan kalkmaz. Toparlanma döneminde enerji depolarının yenilenmesi, sıvı-elektrolit dengesinin düzenlenmesi, protein dönüşümü ve hasar gören yapıların onarımı devam eder. Bu nedenle toparlanma, egzersizden sonra pasif bir bekleme süreci olarak değil, adaptasyonun olduğu fizyolojik dönemin bir parçası olarak ele alınmalıdır. Özellikle yüksek antrenman yüklerinde yetersiz toparlanma, sonraki egzersiz seansına verilen yanıtı ve performans gelişimini olumsuz etkileyebilir (Li ve diğ., 2024).

Tekrarlanan egzersiz uygulamalarıyla birlikte organizmanın aynı uyarılara verdiği yanıt değişim göstermeye başlar. Daha önce karşılaşılan bir egzersiz yükü, sonraki seanslarda daha düşük hücresel bozulma ve daha kontrollü fizyolojik stres oluşturabilir. İskelet kasında bu süreç, akut egzersiz yanıtlarının zaman içinde kalıcı yapısal ve

metabolik özelliklere dönüşmesiyle yakın ilişkidir. Nitekim antrenmanlı kas dokusunun tek bir egzersiz seansına verdiği moleküler yanıtın, antrenmansız kas dokusundaki yanıtın farklı olduğu gösterilmiştir (Booth & Thomason, 1991).

Kronik adaptasyon, düzenli olarak gerçekleştirilen egzersiz uygulaması sonucunda organizmanın benzer bir iş yükünü daha yüksek kapasite ve daha düşük fizyolojik maliyetle gerçekleştirebilmesini sağlayan yapısal ve işlevsel değişikliklerin bütünüdür. Adaptasyonun niteliği uygulanan egzersizin özelliklerine göre farklılaşır. Dayanıklılık antrenmanında oksidatif kapasite, mitokondriyal içerik, kapillarizasyon ve aerobik performans gelişimi öne çıkarken; direnç antrenmanında kas kütlesi, kuvvet üretimi ve nöromusküler kapasitedeki değişimler daha çok belirginleşir. Bununla birlikte bu iki antrenman biçimi tamamen birbirinden bağımsız değildir; her iki biçimde de başlangıçta enerji dengesi, mekanik stres ve hücrel sinyalleşme gibi ortak süreçler devreye girer (Brooks ve diğ., 2026).

Dayanıklılık antrenmanının önemli sonuçlarından biri, iskelet kasının oksidatif kapasitesinin gelişim göstermesidir. Mitokondriyal içerikteki artış ve kapillarizasyon, oksijenin kas dokusuna ulaştırılması ve kullanılmasını kolaylaştırarak aynı iş yükünün daha düşük metabolik maliyetle sürdürülebilmesine yardımcı olur. Mølmen ve arkadaşlarının (2025) yürüttüğü çalışmada, dayanıklılık, yüksek yoğunluklu interval ve sprint interval antrenmanlarının mitokondriyal içerikte artış sağladığı; antrenman hacmi ve yoğunluğunun bu adaptasyonun büyüklüğüyle ilişkili olduğu gösterilmiştir. Kapillarizasyon kazanımlarının ise özellikle antrenmanın erken dönemlerinde belirginleştiği ileri sürülmüştür (Mølmen ve diğ., 2025).

Bu adaptasyonların performansa yansımaları, sadece tek bir fizyolojik değişken üzerinden açıklanamaz. Dayanıklılık sporlarında oksijen taşıma ve kullanma kapasitesi, metabolik ekonomi ve yorgunluğa direnç birlikte önem taşırken; kuvvet ve güç gerektiren branşlarda kasın kuvvet üretme kapasitesi, nöromusküler koordinasyon ve güç gelişimi ön plana çıkar. Dolayısıyla antrenman adaptasyonunun değerlendirilmesi, sporcunun yürüttüğü branşa özgü performans gereksinimleriyle birlikte irdelenmelidir.

Adaptasyonun büyüklüğü bireyler arasında da farklılaşabilir. Başlangıçtaki fiziksel uygunluk seviyesi, antrenman hacmi ve yoğunluğu, antrenman sıklığı, beslenme ve toparlanma koşulları bu farklılığın önemli belirleyicileridir. Özellikle başlangıç uygunluk düzeyi yüksek sporcularda aynı uyaranla elde edilen kazanımlar zaman içerisinde azalabilir ve performans gelişimini sürdürürebilmek için antrenman yükünün bireyin mevcut kapasitesine göre yeniden düzenlenmesi gerekebilir. Mølmen ve arkadaşlarının (2025) bulguları da başlangıç uygunluk düzeyinin mitokondriyal ve aerobik adaptasyonların büyüklüğünde önemli bir belirleyici olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda egzersiz yükü ile toparlanma arasındaki denge, adaptasyonun sürdürülebilirliği açısından belirleyici bir unsur özelliği taşır. Uygun yüklenme, yeterli toparlanma ve zaman içinde planlanan ilerleme organizmanın yeni bir fizyolojik kapasite

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

geliştirmesine olanak sağlar. Buna karşılık yüksek yüklerin yeterli toparlanma olmadan art arda uygulanması, toparlanma süreçlerinin aksamasına ve performans kazanımlarının sınırlanmasına neden olabilir. Bu nedenle kronik adaptasyon, yalnızca antrenman sırasında uygulanan stresin değil, bu stres sonrasında organizmaya verilen toparlanma fırsatının da bir ürünüdür (Halsen & Jeukendrup, 2004).

Güncel egzersiz fizyolojisi araştırmaları, akut yanıt ile kronik adaptasyon arasındaki ilişkinin moleküler düzeyde oldukça karmaşık olduğunu ifade etmektedir. Tek bir egzersiz seansında gerçekleşen enerji değişiklikleri, mekanik stres ve hücresel sinyaller tekrarlanan uyaranlarla birlikte gen ekspresyonu, protein dönüşümü, mitokondriyal yapı ve metabolik fonksiyon üzerinde daha kalıcı değişikliklere dönüşebilir. Beraberinde bu süreç tek bir sinyal yoluyla açıklanamayacak kadar çok boyutludur; farklı dokular ve moleküler sistemler arasındaki etkileşimler adaptasyonun sonucunu şekillendirir (Katz et al., 2025).

Sonuçla akut egzersiz yanıtları ile kronik fizyolojik adaptasyonlar, performans gelişiminin birbirinden bağımsız iki olgusu değildir. Tek bir egzersiz müdahalesi homeostatik dengeyi geçici olarak değiştirirken, bu uyarının uygun yüklenme ve toparlanma döngüleri içerisinde tekrarlanması organizmanın yapısal, metabolik ve fonksiyonel kapasitesini geliştirir. Böylece sporcu aynı görevi daha düşük fizyolojik maliyetle gerçekleştirebilir veya daha yüksek bir iş yükünü sürdürebilir. Bu ilişki, egzersiz fizyolojisinde akut yanıtların neden kronik adaptasyonların temelini oluşturduğunu açıklamakta ve bir sonraki bölümde ele alınacak metabolik adaptasyonların sporcu performansına yansımaları için fizyolojik bir temel oluşturmaktadır.

7. Egzersiz, Metabolik Adaptasyonlar ve Sporcu Performansı

Egzersiz performansının sürdürülebilir olması, kas dokusunun enerji gereksinimini karşılayabilme ve farklı enerji substratlarını egzersizin özelliklerine göre kullanabilme kapasitesiyle yakın ilişkilidir. Bu süreçte karbonhidrat, yağ ve daha sınırlı ölçüde protein metabolizması birlikte çalışır; ancak kullanılan substratların katkısı egzersizin şiddeti, süresi, antrenman düzeyi ve beslenme durumuna bağlı olacak şekilde değişim gösterir. Düzenli egzersiz sonucunda ortaya çıkan metabolik adaptasyonlar, enerji üretiminin daha etkin gerçekleştirilmesini ve aynı iş yükünün daha düşük metabolik stresle sürdürülebilmesini sağlayarak performans kapasitesine katkıda bulunur (Smith ve diğ., 2023).

Bu adaptasyonların merkezinde iskelet kasının metabolik esnekliği yer alır. Egzersiz esnasında kas, enerji gereksinimine bağlı olarak karbonhidrat ve yağ kullanımını değişim gösterebilir. Düşük ve orta şiddetlerde yağ oksidasyonunun katkısı artarken, egzersiz şiddetinin yükselmesiyle karbonhidrat kullanımına olan bağımlılık belirginleşir. Antrenmanla birlikte mitokondriyal kapasitenin ve oksidatif enzim aktivitesinin gelişmesi, kasın farklı substratları kullanabilme yeteneğini artırarak enerji üretiminin daha etkin biçimde sürdürülmesine katkı sağlar (Goodpaster & Sparks, 2017).

Karbonhidrat metabolizması özellikle yüksek şiddetli ve uzun süreli performanslarda belirleyici bir role sahiptir. Kas glikojeni egzersiz sırasında önemli bir enerji kaynağıdır ve glikojenoliz ile karbonhidrat oksidasyonunun hızı egzersiz yoğunluğu, süresi,

antrenman düzeyi ve mevcut substrat miktarına bağlı olarak değişebilir. Ayrıca glikojen sadece bir enerji deposu olarak değerlendirilmemelidir; kas glikojen düzeyindeki değişimler, egzersize verilen hücrel sinyal yanıtlarını da etkileyerek metabolik adaptasyonların şekillenmesine katkıda bulunabilir (Hawley ve diğ., 2018).

Karbonhidrat metabolizmasının performans üzerindeki etkisi, egzersiz sırasında kan glukozunun kas tarafından kullanılabilmesiyle de ilişkilidir. İskelet kası egzersiz sırasında GLUT4 aracılığıyla glukoz alımını artırır ve bu süreç insülin bağımsız kasılma sinyalleri tarafından da düzenlenebilir. Düzenli olarak gerçekleştirilen egzersiz sonucunda GLUT4 salınım seviyelerinin ve kasın glukoz kullanım kapasitesinin artması, hem egzersiz sırasında enerji sağlanmasına hem de toparlanma döneminde glikojen depolarının yeniden oluşturulmasına yardımcı olur (Richter ve diğ., 2025).

Karbonhidrat kullanımındaki bu gelişmeler, mitokondriyal adaptasyonlarla birlikte değerlendirildiğinde performans açısından daha anlamlı hâle gelir. Düzenli antrenman mitokondriyal içerik, oksidatif kapasite ve enerji üretim mekanizmalarında gelişmelere yol açar. Mølmen ve arkadaşlarının (2025) yapmış olduğu araştırmada dayanıklılık, yüksek yoğunluklu interval ve sprint interval antrenmanlarının iskelet kasında mitokondriyal içerikte anlamlı artışlar oluşturduğu; antrenman hacmi ve yoğunluğunun bu değişimin büyüklüğüyle ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bu adaptasyonlar, aerobik enerji üretiminin sürdürülebilirliğini artırarak performans kapasitesinin fizyolojik temelini güçlendirir.

Mitokondriyal adaptasyonların sadece mitokondri sayısındaki artıştan ibaret olmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Mitokondriler enerji dönüşümünün yanı sıra hücrel sinyalleşme, kalsiyum homeostazı ve redoks düzenlenmesi gibi süreçlerde de görev alır. Bu nedenle egzersizle oluşan mitokondriyal değişimler, kasın enerji üretim kapasitesi ile hücrel streslere verdiği yanıtın birlikte yeniden düzenlenmesini ifade eder. Egzersiz türü, yoğunluğu, süresi ve sıklığı bu adaptasyonların niteliğini belirleyen temel antrenman değişkenleridir (Bishop et al., 2025).

Metabolik adaptasyonların performansa katkısında yağ metabolizmasının gelişmesi de önemlidir. Özellikle dayanıklılık sporlarında yağ oksidasyon kapasitesinin artması, sınırlı olan kas glikojeni ve karaciğer glikojeninin daha uzun süre korunmasına yardımcı olabilir. Bununla birlikte yüksek şiddetlerde karbonhidrat kullanımının artması nedeniyle yağ oksidasyonunun performans açısından katkısı egzersizin yoğunluğundan bağımsız değerlendirilemez. Dolayısıyla başarılı metabolik adaptasyon, tek bir substratın kullanımını maksimum düzeye çıkarmaktan çok, egzersizin gerektirdiği enerji üretim biçimine uygun substrat kullanımının geliştirilmesi olarak değerlendirilmelidir (Richter ve diğ., 2025).

Metabolik adaptasyonların önemli bir başka sonucu, egzersiz anında veya egzersiz sonrasındaki süreçte glukoz homeostazının daha etkin düzenlenmesidir. Düzenli

egzersiz kasın glukoz alımını, glikojen sentezini ve insülin duyarlılığını geliştirerek enerji metabolizmasının daha etkin kontrol edilmesine katkı sağlar. Gerçekleşen bu değişiklikler doğrudan sportif performans ölçütü olmasa da yüksek antrenman yüklerinin sürdürülebilmesi ve toparlanmanın desteklenmesi açısından metabolik altyapının önemli bileşenleridir (Zierath ve diğ., 2025).

Beslenme ve özellikle karbonhidrat kullanılabilirliği, metabolik adaptasyonların performansa yansımaları değişebilir. Karbonhidratın egzersiz öncesinde ve sırasında yeterli seviyede alınması, özellikle uzun süreli dayanıklılık egzersizlerinde performansın desteklenmesine yardımcı olabilir. Ayrıca düşük karbonhidrat kullanılabilirliğiyle gerçekleştirilen bazı antrenman modelleri, PGC-1 α , PDK4, GLUT4 ve diğer metabolik düzenleyicilerle ilişkili hücresel yanıtları değiştirebilmektedir. Ancak bu moleküler yanıtların daha büyük performans kazanımlarına otomatik olarak dönüşeceği söylenemez; metabolik sinyal ile gerçek performans çıktısı birbirinden ayrı değerlendirilmelidir (Ramos-Campo ve diğ., 2024).

Metabolik adaptasyonların performans üzerindeki etkisi, spor branşının enerji gereksinimleriyle birlikte irdelenmelidir. Uzun süreli dayanıklılık sporlarında mitokondriyal oksidatif kapasite, yağ ve karbonhidrat kullanımının düzenlenmesi ve glikojen yönetimi öne çıkarken; kısa süreli yüksek şiddetli aktivitelerde hızlı ATP üretimi ve karbonhidrat metabolizmasının kapasitesi daha belirleyici hâle gelir. Takım sporları ve raket sporları gibi aralıklı yüksek şiddetli aktivitelerde ise farklı enerji sistemlerinin hızlı biçimde devreye girebilmesi ve tekrar eden eforlar arasında metabolik toparlanmanın sağlanması önem taşır. Bu bağlamda metabolik adaptasyonun “iyi” ya da “kötü” biçimde değerlendirilmesinden ziyade, sporcunun branşının enerji gereksinimleriyle ne ölçüde uyumlu olduğunun incelenmesi gerekir.

Sonuç olarak egzersizle gelişen metabolik adaptasyonlar, enerji substratlarının kullanımından mitokondriyal fonksiyona, glukoz taşınmasından glikojen yönetimine kadar birbirine bağlı çok sayıda süreci temsil eder. Bu değişiklikler kasın enerji üretme kapasitesini artırırken beraberinde belirli bir iş yükünün daha ekonomik biçimde sürdürülmesine, yorgunluğun geciktirilmesine ve toparlanma kapasitesinin desteklenmesine zemin hazırlayabilir. Fakat performans, metabolik kapasitenin tek başına belirlediği bir sonuç değildir; kardiyovasküler, solunum, nöromusküler ve psikolojik faktörlerle birlikte ortaya çıkan bütüncül bir fenotiptir. Bu nedenle metabolik adaptasyonlar, sporcunun performansını oluşturan fizyolojik sistemlerin birbirleriyle bütünleşmesini sağlayan temel mekanizmalardan biri olarak değerlendirilmelidir.

8. SONUÇ

Egzersiz, organizmanın belirli bir hareket görevini yerine getirmesini sağlayan fiziksel bir uyaran olmanın ötesinde, çok sayıda fizyolojik sistemin organize işlemlerini gerektiren bütüncül bir yaklaşımdır. Bu kitap boyunca ele alınan konular, sporcu performansının tek bir fizyolojik özelliğin sonucu olmadığını; enerji üretimi, kardiyovasküler ve solunum sistemi, iskelet kası, nöromusküler yapı ve metabolik düzenleme gibi birçok mekanizmanın birbiriyle etkileşimi sonucunda gerçekleştiğini göstermektedir. Performansın fizyolojik temellerini anlamak, bu sistemlerin ayrı ayrı özelliklerini bilmenin yanı sıra, egzersiz esnasında nasıl birlikte çalıştıklarını ve antrenmanla nasıl değiştiklerini değerlendirmeyi gerektirir. Egzersizin başlamasıyla birlikte organizmanın enerji gereksinimi hızla yükselir. Bu gereksinimin karşılanabilmesi için fosfajen, glikolitik ve oksidatif enerji sistemleri eş zamanlı olarak devreye girer. Egzersizin şiddeti ve süresi değiştikçe bu sistemlerin toplam enerji üretimine katkıları da değişir. Kısa süreli ve yüksek şiddetli aktivitelerde hızlı enerji üretim mekanizmaları öne çıkarken, egzersiz süresi uzadıkça oksidatif metabolizmanın katkısı belirginleşir. Bununla birlikte performans sırasında enerji sistemleri arasında kesin sınırlar bulunmaz; farklı sistemler birbirini tamamlayarak kasın enerji gereksinimini karşılar. Enerji üretimindeki bu artışın sürdürülebilmesi, kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin egzersiz sırasında gösterdiği uyumla yakından ilişkilidir.

Kalbin pompalama kapasitesinin artması, kan akımının çalışan kaslara yönlendirilmesi, ventilasyonun yükselmesi ve oksijenin dokulara taşınması, artan metabolik gereksinimin karşılanmasını sağlar. Böylece akciğerlerden alınan oksijenin dolaşım yoluyla çalışan kaslara ulaştırılması ve kas tarafından kullanılabilmesi bir bütün olarak gerçekleşir. Bu zincirin herhangi bir aşamasındaki sınırlılık, özellikle yüksek düzeyde performans gerektiren egzersizlerde toplam kapasiteyi etkileyebilir. Bu süreçlerin merkezinde ise iskelet kası bulunmaktadır. Kas dokusu, hem mekanik işin gerçekleştirildiği hem de enerji metabolizmasının yoğun biçimde sürdürüldüğü temel dokudur. Kas liflerinin özellikleri, motor ünite aktivasyonu, nöromüsküler koordinasyon, kuvvet üretimi ve kasın metabolik kapasitesi, gerçekleştirilen hareketin niteliğini belirler. Antrenmanla birlikte kas dokusunun yapısal ve işlevsel özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, sporcunun uygulanan kuvveti daha etkili kullanmasına, yüksek şiddetli eforları sürdürebilmesine veya tekrarlanan aktiviteler sonrasında performansını koruyabilmesine katkı sağlar. Tek bir egzersiz seansında oluşan değişiklikler ise kronik adaptasyonların başlangıç noktasını oluşturur. Egzersizle birlikte baş gösteren metabolik stres, mekanik gerilim ve enerji gereksinimi; egzersiz sonrasında toparlanma süreçleriyle birlikte organizmanın kendisini yeniden düzenlemesine zemin hazırlar. Aynı uyarının uygun aralıklarla tekrarlanması sonucunda bu geçici yanıtlar zaman içerisinde daha kalıcı yapısal ve işlevsel değişikliklere dönüşür. Böylece organizma benzer bir egzersiz yüküyle karşılaştığında daha etkili ve daha ekonomik bir yanıt verebilir. Kronik adaptasyonların niteliği uygulanan antrenmanın özelliklerine göre farklılaşır. Dayanıklılık antrenmanlarında oksidatif kapasite, mitokondriyal fonksiyon, kapillarizasyon ve aerobik performans gelişirken; direnç antrenmanlarında kas kütlesi, kuvvet, güç ve nöromüsküler kapasitedeki değişimler daha belirgin hâle gelir. Ancak bu adaptasyonlar birbirinden tamamen bağımsız değildir. Farklı antrenman biçimleri, organizmada ortak bazı metabolik ve hücrel yanıtları harekete geçirirken zaman içinde uygulanan uyarının özelliklerine özgü adaptasyonların gelişmesini sağlar. Metabolik adaptasyonlar bu bütünlüğün önemli bir parçasını oluşturur. Antrenmanla birlikte kasın karbonhidrat ve yağ kullanımını egzersizin gerektirdiği enerjiye göre düzenleme kapasitesi gelişir. Mitokondriyal kapasitedeki artış, glikojen kullanımının daha etkin yönetilmesi ve enerji substratlarının daha uygun biçimde kullanılabilmesi, uzun süreli egzersizin sürdürülebilmesine katkı sağlar. Burada önemli olan tek bir enerji kaynağının kullanımını en yüksek düzeye çıkarmak değil, farklı enerji kaynaklarının egzersizin gerektirdiği koşullara uygun biçimde kullanılabilmesidir. Bütün bu adaptasyonların performansla dönüşebilmesi için yüklenme ve toparlanma arasındaki dengenin korunması gerekir. Antrenman uyarısı organizmayı geliştiren temel stres kaynağını oluştururken, toparlanma bu stresin adaptasyona dönüşebilmesi için gerekli zamanı sağlar. Yetersiz toparlanma durumunda biriken yorgunluk performans gelişimini sınırlayabilir; uygun toparlanma ile desteklenen düzenli ve ilerleyici yüklenme ise

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

fizyolojik kapasitenin gelişmesine olanak tanır. Bu nedenle başarılı bir antrenman süreci yalnızca egzersizin nasıl uygulandığıyla değil, egzersizler arasındaki dönemin nasıl yönetildiğiyle de ilişkilidir. Sporcu performansının değerlendirilmesinde bütün bu süreçlerin branşa özgü gereksinimlerle birlikte ele alınması gerekir. Bir dayanıklılık sporcusu için uzun süreli enerji üretimi, oksijen kullanımı ve yorgunluğa direnç ön plana çıkarken, kuvvet veya güç gerektiren branşlarda yüksek düzeyde kuvvet üretimi, kuvvet gelişim hızı ve nöromusküler koordinasyon daha belirleyici olabilir. Takım ve raket sporlarında ise farklı şiddetlerdeki eforların art arda gerçekleştirilebilmesi ve kısa toparlanma dönemlerinde yeniden performans üretilebilmesi önem kazanır. Dolayısıyla fizyolojik adaptasyonun anlamı, sporcunun hangi performans gereksinimini karşılamaya katkı sağladığı üzerinden değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak egzersizden performansa uzanan süreç, birbirini izleyen fakat birbirinden ayrılması mümkün olmayan fizyolojik aşamalardan oluşmaktadır. Enerji sistemlerinin çalışması, kardiyovasküler ve solunum yanıtlar, kas ve nöromusküler fonksiyon, akut egzersiz yanıtları, toparlanma ve kronik adaptasyonlar aynı bütünün farklı parçalarıdır. Bu parçaların uyumlu biçimde çalışması, sporcunun egzersiz yükünü sürdürebilmesini ve zaman içerisinde daha yüksek performans kapasitesine ulaşmasını sağlar.

Bu kitapta ele alınan temel yaklaşım doğrultusunda sporcu performansı, tek bir fizyolojik göstergenin geliştirilmesiyle açıklanabilecek kadar basit bir süreç değildir. Performans; enerji üretiminin yeterliliği, oksijenin taşınması ve kullanılması, kasın kuvvet ve güç üretme kapasitesi, metabolik düzenleme, yorgunluğa karşı direnç ve toparlanma süreçlerinin birlikte oluşturduğu sonuçtur. Antrenman ise bu sistemleri belirli bir amaç doğrultusunda uyaran ve zaman içerisinde yeniden şekillendiren temel araçtır. Bu nedenle egzersiz fizyolojisinin temel amacı yalnızca egzersiz sırasında organizmada meydana gelen değişiklikleri açıklamak değil, bu değişikliklerin nasıl adaptasyona ve nihayetinde performansa dönüştüğünü ortaya koymaktır.

Egzersizden performansa uzanan bu süreç, sürekli değişen ve bireye göre şekillenen dinamik bir yapıya sahiptir. Sporcunun mevcut kapasitesi, uygulanan antrenmanın özellikleri, beslenme, toparlanma ve çevresel koşullar değiştikçe fizyolojik yanıtın niteliği de değişebilir. Bu nedenle performans gelişimi, organizmanın verdiği yanıtların düzenli olarak izlenmesini ve antrenman uyaranlarının bu yanıtlara göre yeniden düzenlenmesini gerektirir. Sonuçta yüksek performans, yalnızca daha fazla antrenman yapmanın değil, doğru fizyolojik uyaranın uygun zamanda verilmesi, bu uyarana yeterli toparlanma süresinin sağlanması ve ortaya çıkan adaptasyonların sporun gerektirdiği performans özelliklerine dönüştürülmesi ile mümkün hâle gelir.

9. KAYNAKÇA

- Akkuş, R. (2026). Çocukluk döneminde fiziksel aktivite ve sporun gelişimsel temelleri. In İ. Uçan & Ü. Türker (Eds.), *Beden eğitimi ve sporda psikososyal dinamikler: Disiplinlerarası ve yeni nesil araştırmalar*. Duvar Yayınevi.
- Ashcroft, S. P., Stocks, B., Egan, B., & Zierath, J. R. (2024). Exercise induces tissue-specific adaptations to enhance cardiometabolic health. *Cell metabolism*, 36(2), 278-300.
- Bassett, D. R. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(1), 70.
- Berger, N. J., Best, R., Best, A. W., Lane, A. M., Millet, G. Y., Barwood, M., ... & Bearden, S. (2024). Limits of Ultra: Towards an Interdisciplinary Understanding of Ultra-Endurance Running Performance: NJA Berger et al. *Sports Medicine*, 54(1), 73-93.
- Bersaoui, M., Baldew, S. S., Van Der Hilst, K., Toelsie, J., & Cornelissen, V. (2026). Characteristics of post-exercise responders versus non-responders following aerobic or isometric exercise in physically inactive adults of African and South Asian Descent with high-normal blood pressure or grade I hypertension. *Blood Pressure*, (just-accepted), 1-26.
- Bishop, D. J., Lee, M. J. C., & Picard, M. (2025). Exercise as mitochondrial medicine: how does the exercise prescription affect mitochondrial adaptations to training?. *Annual review of physiology*, 87(1), 107-129.
- Booth, F. W., & Thomason, D. B. (1991). Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: perspectives of various models. *Physiological reviews*, 71(2), 541-585.
- Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., ... & Cable, N. T. (2017). Monitoring athlete training loads: consensus statement. *International journal of sports physiology and performance*, 12(s2), S2-161.
- Brooks, G. A. (2020). Lactate as a fulcrum of metabolism. *Redox biology*, 35, 101454.

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

- Brooks, G. A., Fahey, T. D., & Baldwin, K. M. (2026). *Exercise physiology: human bioenergetics and its applications*. Human Kinetics.
- Brown, H. A., Topham, T. H., Clark, B., Ioannou, L. G., Flouris, A. D., Smallcombe, J. W., ... & Periard, J. D. (2024). Quantifying Exercise Heat Acclimatisation in Athletes and Military Personnel: A Systematic Review and Meta-analysis: HA Brown et al. *Sports Medicine*, 54(3), 727-741.
- Carling, D., Thornton, C., Woods, A., & Sanders, M. J. (2012). AMP-activated protein kinase: new regulation, new roles?. *Biochemical Journal*, 445(1), 11-27.
- Chavez-Guevara, I. A., Amaro-Gahete, F. J., Ramos-Jimenez, A., & Brun, J. F. (2023). Toward Exercise Guidelines for Optimizing Fat Oxidation During Exercise in Obesity: A Systematic Review and Meta-Regression: IA Chávez-Guevara et al. *Sports Medicine*, 53(12), 2399-2416.
- Claessen, G., De Bosscher, R., Janssens, K., Young, P., Dausin, C., Claeys, M., ... & La Gerche, A. (2024). Reduced ejection fraction in elite endurance athletes: clinical and genetic overlap with dilated cardiomyopathy. *Circulation*, 149(18), 1405-1415.
- Clauss, M., & Jensen, J. (2025). Effect of exercise intensity, duration, and volume on protein oxidation during endurance exercise in humans: A systematic review with meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 35(4), e70038.
- Cunha, L. A., Costa, J. A., Marques, E. A., Brito, J., Lastella, M., & Figueiredo, P. (2023). The impact of sleep interventions on athletic performance: a systematic review. *Sports medicine-open*, 9(1), 58.
- Currier, B. S., D'SOUZA, A. C., Singh, M. A. F., Lowisz, C. V., Rawson, E. S., Schoenfeld, B. J., ... & Phillips, S. M. (2026). American College of Sports Medicine position stand. Resistance training prescription for muscle function, hypertrophy, and physical performance in healthy adults: an overview of reviews. *Medicine and science in sports and exercise*, 58(4), 851.
- Çakır, Z., Çatıkkaş, F., Türkmen, M., Şengönül, A., Yaman, M., Öktem, T., Gönen, M., Güzel, S., & Yel, K. (2025a). Preservice teachers' attitudes toward pedagogical humour: The role of physical activity, sociodemographic factors, and academic discipline. *BMC Psychology*, 13, 1423. <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03751-4>
- Çakır, Z., Erbaş, Ü., Gönen, M. A., Ceyhan, M., Öktem, T., Kul, M., Dilek, A. N., & Güzel, S. (2025b). Examination of trauma levels and earthquake stress coping strategies of university students who exercise and do not exercise after an earthquake. *BMC Psychology*, 13, 867. <https://doi.org/10.1186/s40359-025-03108-x>
- Del Vecchio, A., Enoka, R. M., & Farina, D. (2024). Specificity of early motor unit adaptations with resistive exercise training. *The Journal of Physiology*, 602(12), 2679-2688.
- Duchateau, J., & Enoka, R. M. (2011). Human motor unit recordings: origins and insight into the integrated motor system. *Brain research*, 1409, 42-61.
- Egan, B., & Sharples, A. P. (2023). Molecular responses to acute exercise and their relevance for adaptations in skeletal muscle to exercise training. *Physiological reviews*, 103(3), 2057-2170.
- Furrer, R., & Handschin, C. (2024). Molecular aspects of the exercise response and training adaptation in skeletal muscle. *Free Radical Biology and Medicine*, 223, 53-68.
- Garthwaite, T., Sjöros, T., Laine, S., Koivumäki, M., Vähä-Ypyä, H., Verho, T., ... & Heinonen, I. (2024). Sedentary time associates detrimentally and physical activity beneficially with metabolic flexibility in adults with metabolic syndrome. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 326(4), E503-E514.
- Gastin, P. B. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports medicine*, 31(10), 725-741.
- Gastin, P. B., & Suppiah, H. T. (2026). Anaerobic and aerobic energy system contribution during maximal exercise: A systematic review. *Sports Medicine*, 1-25.
- Goodpaster, B. H., & Sparks, L. M. (2017). Metabolic flexibility in health and disease. *Cell metabolism*, 25(5), 1027-1036.
- Halsón, S. L. (2014). Sleep in elite athletes and nutritional interventions to enhance sleep. *Sports medicine*, 44(Suppl 1), 13-23.
- Halsón, S. L., & Jeukendrup, A. E. (2004). Does overtraining exist? An analysis of overreaching and overtraining research. *Sports medicine*, 34(14), 967-981.

- Hardy, T. A., Chadwick, M. R., Ferguson, C., Cross, T. J., & Taylor, B. J. (2024). Differential effects of exercise intensity and tolerable duration on exercise-induced diaphragm and expiratory muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 136(6), 1591-1603.
- Hargreaves, M., & Spriet, L. L. (2020). Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nature metabolism*, 2(9), 817-828.
- Haseler, L. J., Hogan, M. C., & Richardson, R. S. (1999). Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *Journal of applied physiology*, 86(6), 2013-2018.
- Hawley, J. A., Hargreaves, M., Joyner, M. J., & Zierath, J. R. (2014). Integrative biology of exercise. *Cell*, 159(4), 738-749.
- Hawley, J. A., Lundby, C., Cotter, J. D., & Burke, L. M. (2018). Maximizing cellular adaptation to endurance exercise in skeletal muscle. *Cell metabolism*, 27(5), 962-976.
- Hellsten, Y., & Nyberg, M. (2016). Cardiovascular adaptations to exercise training. *Comprehensive physiology*, 6(1), 1-32.
- Hepsert, S., Sezer, B. S., Genç, H., Türkmen, M., Dalkılıç, S., & Kılıç, Y. (2026). The effect of mental training on muscle damage, stress, and immune response biomarkers in tennis athletes. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*.
- Hunter, S. K., Angadi, S. S., Bhargava, A., Harper, J., Hirschberg, A. L., Levine, B. D., ... & Berman, S. (2023). The biological basis of sex differences in athletic performance: consensus statement for the American College of Sports Medicine. *Translational Journal of the American College of Sports Medicine*, 8(4), 1-33.
- Husaini, M., & Emery, M. S. (2023). Cardiopulmonary exercise testing interpretation in athletes: what the cardiologist should know. *Cardiology clinics*, 41(1), 71-80.
- Iellamo, F. (2023). Acute responses and chronic adaptations to exercise in humans: a look from the autonomic nervous system window. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*.
- Jin, L., Diaz-Canestro, C., Wang, Y., Tse, M. A., & Xu, A. (2024). Exerkines and cardiometabolic benefits of exercise: from bench to clinic. *EMBO Molecular Medicine*, 16(3), 432-444.
- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: the physiology of champions. *The Journal of physiology*, 586(1), 35-44.
- Kjøbsted, R., Hingst, J. R., Fentz, J., Foretz, M., Sanz, M. N., Pehmøller, C., ... & Lantier, L. (2018). AMPK in skeletal muscle function and metabolism. *The FASEB journal*, 32(4), 1741.
- Kuznetsov, A. V., Margreiter, R., Hagenbuchner, J., & Ausserlechner, M. J. (2025). Energy metabolism in different skeletal muscles and muscle fibers: implications for injury and dietary supplementation. *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, 477(10), 1231-1240.
- Lasocka-Koriat, Z., Lewicka-Potocka, Z., Kaleta-Duss, A., Siekierzycka, A., Kalinowski, L., Lewicka, E., & Dąbrowska-Kugacka, A. (2024). Differences in cardiac adaptation to exercise in male and female athletes assessed by noninvasive techniques: a state-of-the-art review. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*.
- Li, S., Kempe, M., Brink, M., & Lemmink, K. (2024). Effectiveness of recovery strategies after training and competition in endurance athletes: an umbrella review. *Sports Medicine-Open*, 10(1), 55.
- McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2010). *Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance*. Lippincott Williams & Wilkins.
- McCubbin, A. J., & Irwin, C. (2024). The effect of pre-exercise oral hyperhydration on endurance exercise performance, heart rate, and thermoregulation: A meta-analytical review. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 49(5), 569-583.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., ... & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science (ECSS) and the American College of Sports Medicine (ACSM). *European Journal of Sport Science*, 13(1), 1-24.
- Mølmen, K. S., Almquist, N. W., & Skattebo, Ø. (2025). Effects of Exercise Training on Mitochondrial and Capillary Growth in Human Skeletal Muscle: A Systematic Review and Meta-Regression: KS Mølmen et al. *Sports Medicine*, 55(1), 115-144.

EGZERSİZDEN PERFORMANSA: SPORCU PERFORMANSININ FİZYOLOJİK VE METABOLİK TEMELLERİ

- Mountjoy, M., Ackerman, K. E., Bailey, D. M., Burke, L. M., Constantini, N., Hackney, A. C., ... & Erdener, U. (2023). 2023 International Olympic Committee's (IOC) consensus statement on relative energy deficiency in sport (REDs). *British journal of sports medicine*, 57(17), 1073-1098.
- Muñoz-Gracia, J. L., Alentorn-Geli, E., Casals, M., Hewett, T. E., & Baiget, E. (2025). Assessment methods of sport-induced neuromuscular fatigue: a scoping review. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 20(7), 943.
- Öktem, T., Akkuş, R., Öz, Ü., & Gök, U. D. (2026). Relationship between empathic tendencies and trait anxiety among individuals interested in folk dances. *Frontiers in Psychology*, 17, 1901484.
- Panza, L., Piamonti, D., & Palange, P. (2024). Pulmonary gas exchange and ventilatory efficiency during exercise in health and diseases. *Expert Review of Respiratory Medicine*, 18(6), 355-367.
- Pataky, M. W., Heppelmann, C. J., Sevits, K. J., Asokan, A. K., Kumar, A. P., Klaus, K. A., ... & Nair, K. S. (2025). Aerobic and resistance exercise-regulated phosphoproteome and acetylproteome modifications in human skeletal muscle. *Nature communications*, 16(1), 5700.
- Rahimi, S. G. (2025). Glycogen as A Regulator of Molecular Signaling for Muscle Adaptation in Endurance and Resistance Exercise. *International Journal of Sports Technology and Science*, 3(2), 245-257.
- Ramos-Campo, D. J., Clemente-Suarez, V. J., Cupeiro, R., Benitez-Munoz, J. A., Andreu Caravaca, L., & Rubio-Arias, J. Á. (2024). The ergogenic effects of acute carbohydrate feeding on endurance performance: a systematic review, meta-analysis and meta-regression. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(30), 11196-11205.
- Reisman, E. G., Hawley, J. A., & Hoffman, N. J. (2024). Exercise-Regulated Mitochondrial and Nuclear Signalling Networks in Skeletal Muscle: EG Reisman et al. *Sports Medicine*, 54(5), 1097-1119.
- Richter, E. A., Bilan, P. J., & Klip, A. (2025). A comprehensive view of muscle glucose uptake: regulation by insulin, contractile activity, and exercise. *Physiological reviews*, 105(3), 1867-1945.
- Schaeffer, E., & Weisser, B. (2026). Physical Inactivity as a Risk Factor for Neurodegeneration and Sports Medicine-based Recommendations. *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde*.
- Scott, W., Stevens, J., & Binder-Macleod, S. A. (2001). Human skeletal muscle fiber type classifications. *Physical Therapy*, 81(11), 1810-1816.
- Sindorf, M. A., D GERMANO, M. O. I. S. É. S., Dias, W. G., Batista, D. R., Braz, T. V., Moreno, M. A., & Lopes, C. R. (2021). Excess post-exercise oxygen consumption and substrate oxidation following high-intensity interval training: Effects of recovery manipulation. *International journal of exercise science*, 14(2), 1151.
- Smith, J. A., Murach, K. A., Dyar, K. A., & Zierath, J. R. (2023). Exercise metabolism and adaptation in skeletal muscle. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 24(9), 607-632.
- Staff, H. C., Solli, G. S., Osborne, J. O., & Sandbakk, Ø. (2023). Long-Term Development of Training Characteristics and Performance-Determining Factors in Elite/International and World-Class Endurance Athletes: A Scoping Review: H. Staff et al. *Sports Medicine*, 53(8), 1595-1607.
- Thomas, A. C., Stead, C. A., Burniston, J. G., & Phillips, S. M. (2024). Exercise-specific adaptations in human skeletal muscle: Molecular mechanisms of making muscles fit and mighty. *Free Radical Biology and Medicine*, 223, 341-356.
- Wang, J., & Wu, L. (2026). Exercise-Induced Extracellular Vesicles as Mediators of Mitochondrial Biogenesis and Insulin Sensitivity in Metabolic Adaptation. *Endocrinology, Diabetes & Metabolism*, 9(4), e70257.
- Webb, M. D., Melough, M. M., Earthman, C. P., Katz, S. E., & Pacanowski, C. R. (2024). Associations between anthropometry, body composition, and body image in athletes: A systematic review. *Frontiers in psychology*, 15, 1372331.
- Welch, J. F., & Mitchell, G. S. (2024). Inaugural Review Prize 2023: The exercise hyperpnoea dilemma: A 21st-century perspective. *Experimental Physiology*, 109(8), 1217-1237.
- Yaman, M. S., Çakır, Z., Çatıktaş, F., Türkmen, M., Şengönül, A., Gönen, M., Öktem, T., Güzel, S., & Yel, K. (2026). Physical activity, technology use, and AI anxiety among university students: Associations with academic integrity attitudes. *SAGE Open*, 16(3), 21582440261482059. <https://doi.org/10.1177/21582440261482059>

- Yel, K., Şencan, D., Güzel, S., & Erkalıç, A. O. (2024). Physical activity, nutrition, and healthy living. *International Journal of Health, Exercise, and Sport Sciences (IJOSS)*, 1(3), 15–28. <https://www.ijoss.org/Archive/ijoss-Volume1-issue3-02.pdf>
- Yelken, M. E., Sezer, B. S., Hepsert, S., Küçüksayan, H., Canikli Temel, N., Mugan, G., & Yılmaz, U. (2026). The effect of an 8-week Life Kinetics exercise program on salivary cortisol, alpha-amylase, and immunoglobulin-A in U14 female cross-country skiers. *Frontiers in Physiology*, 17, 1847163.
- Zierath, J. R., Brady, A. J., Macgregor, K. A., de Zavallos, J. O., & Stocks, B. (2025). Unlocking the secrets of exercise: A pathway to enhanced insulin sensitivity and skeletal muscle health in type 2 diabetes. *Journal of Sport and Health Science*, 14, 100980.
- Zignoli, A., Giorgi, A., Kolodziej, F., Martinez-Gonzalez, B., Leo, P., & Laursen, P. B. (2026). Tracking Performance Limits Using Multi-Timescale Maximal Mean Power Ratios. *European Journal of Sport Science*, 26(6), e70179.