

HAREKET VE ANTRENMAN BİLİMLERİ ALANINDA AKADEMİK TARTIŞMALAR

Editör: Doç.Dr. Meriç ÖDEMiŞ

yaz
yayınları

Hareket ve Antrenman Bilimleri Alanında Akademik Tartışmalar

Editör

Doç.Dr. Meriç ÖDEMiŞ

yaz
yayınları

2026

**Hareket ve Antrenman Bilimleri Alanında
Akademik Tartışmalar**

Editör: Doç.Dr. Meriç ÖDEMİŞ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-30-9

Haziran 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

**Tempo, Ritim ve Performans: Egzersiz Bilimlerinde
Yeni Yaklaşımlar1**
Yalçın AYDIN

**Integration of Energy Systems in Sport-Specific
Training: Implications for Performance Optimization ..38**
Burak YÜCEL, Bircan ÖĞRÜ

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

TEMPO, RİTİM VE PERFORMANS: EGZERSİZ BİLİMLERİNDE YENİ YAKLAŞIMLAR

Yalçın AYDIN¹

1. GİRİŞ

Tempo, ritim ve zamansal organizasyon kavramları, egzersiz bilimlerinde başlangıçta daha çok müzik ve hareket sanatları ile ilişkilendirilmiş olsa da, güncel literatürde bu kavramların motor kontrol, fizyolojik yüklenme ve spor performansı üzerinde belirleyici rol oynadığı açıkça ortaya konmuştur. Hareketin zamansal düzenlenmesi, performansın hem verimlilik hem de sürdürülebilirlik boyutlarını doğrudan etkileyen temel bir unsur olarak değerlendirilmektedir (Seifert et al., 2010; Tucker, 2009).

Tempo, egzersiz sırasında hareketlerin hızını ve frekansını ifade ederek özellikle aerobik ve anaerobik enerji sistemlerinin aktivasyonu ile yakından ilişkilidir. Dayanıklılık sporlarında tempo kontrolü, fizyolojik yüklenmenin düzenlenmesi ve yorgunluğun geciktirilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Billat, 2001). Ritim ise hareketlerin zaman içinde belirli bir düzen veya örüntü oluşturması olup, merkezi sinir sistemi tarafından organize edilen motor programların bir çıktısıdır (Zatorre et al., 2007). Bazal gangliyonlar ve serebellum gibi nörofizyolojik yapılar, ritmik hareketlerin planlanması ve sürdürülmesinde önemli rol oynayarak hareket ekonomisini ve otomatikleşmeyi desteklemektedir (Grahn & Brett, 2007; Schmidt & Lee, 2011).

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Egzersiz ve Spor Bilimleri Bölümü, ORCID: 0000-0003-0439-8899.

Spor performansı yalnızca fiziksel kapasite bileşenlerinin toplamı değil, bu bileşenlerin zaman içinde doğru şekilde organize edilmesiyle ortaya çıkan kompleks bir yapıdır. Bu bağlamda zamansal organizasyon; hareketlerin ne zaman, hangi hızda ve hangi sırayla gerçekleştirileceğini belirleyen temel bir performans belirleyicisidir (Newell, 1986; Davids et al., 2008). Özellikle dayanıklılık sporlarında pacing stratejileri, enerji dağılımının optimize edilmesini sağlayarak performansın sürdürülebilirliğini artırmaktadır (Abbiss & Laursen, 2008). Buna karşılık hatalı zamanlama, erken yorgunluk ve performans düşüşü ile sonuçlanabilmektedir.

Zamansal organizasyon aynı zamanda motor öğrenme, beceri edinimi ve nöromüsküler kontrol süreçleri ile yakından ilişkilidir. Açık beceri gerektiren sporlarda çevresel değişkenlere doğru zamanlamayla yanıt verebilme yeteneği performansın temel belirleyicilerinden biridir (Schmidt & Lee, 2011). Enerji metabolizması açısından optimal tempo ve doğru zamanlanmış yüklenme-dinlenme döngüleri, oksijen tüketiminin daha verimli kullanılmasını sağlarken laktat birikimini geciktirmektedir (Billat, 2001). Ayrıca algılanan efor (RPE), dikkat ve karar verme süreçleri de tempo ve ritim ile etkileşim içinde olup, özellikle uzun süreli egzersizlerde performansın düzenlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Tucker, 2009).

Güncel araştırmalar, tempo ve ritmin yalnızca motor kontrol değil; nöroplastisite, bilişsel süreçler ve psikofizyolojik mekanizmalarla da ilişkili olduğunu göstermektedir. Fonksiyonel görüntüleme çalışmaları ritim algısının beyindeki geniş ağlar tarafından yönetildiğini ortaya koyarken, giyilebilir teknolojiler tempo değişimlerinin hassas biçimde izlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca müzik ve dışsal ritmik uyarıların performansı artırdığı, yorgunluk algısını azalttığı ve motivasyonu desteklediği bilinmektedir. Bu doğrultuda tempo ve ritim, spor performansını çok boyutlu etkileyen temel değişkenler olup, bu alanın

teknolojik ve nörobilimsel gelişmelerle birlikte daha da önem kazanacağı öngörülmektedir.

2. TEMEL KAVRAMSAL ÇERÇEVE: TEMPO, RİTİM VE PEFORMANS

Tempo, ritim ve zamanlama; egzersiz bilimlerinde hareketin zamansal organizasyonunu belirleyen ve performansı çok boyutlu olarak etkileyen temel kavramlardır. Tempo, hareketin zamansal yoğunluğunu ve hızını; ritim, hareketlerin düzenli ve tekrarlanabilir örüntüsünü; zamanlama ise hareketlerin doğru anda başlatılması ve sonlandırılmasına ilişkin zamansal hassasiyeti ifade eder (Schmidt & Lee, 2011; Ivry & Spencer, 2004). Bu kavramlar birlikte, motor kontrol süreçlerinde zamansal doğruluk ve koordinasyonun temelini oluşturan bütüncül bir yapı meydana getirir.

Biyomekanik açıdan tempo, kinematik (hız, ivme, açı değişimleri) ve kinetik (kuvvet, tork, yer reaksiyon kuvveti) bileşenlerin etkileşimiyle belirlenir. Özellikle döngüsel hareketlerde tempo, adım frekansı ve adım uzunluğu arasındaki ilişkiyle ortaya çıkmakta olup, bu iki değişkenin çarpımı hareket hızını belirlemektedir (Cavanagh & Kram, 1985).

Tempo artışı genellikle adım frekansındaki yükselme ve yer temas süresindeki azalma ile ilişkilidir; bu durum belirli bir aralıkta enerji transferini daha ekonomik hale getirebilir. Ancak aşırı tempo artışı mekanik verimliliği düşürerek kas-iskelet sistemi üzerindeki yüklenmeyi artırabilmektedir. Kas fonksiyonu açısından tempo, kuvvet-hız ilişkisi kapsamında değerlendirilmekte; tempo arttıkça konsantrik kuvvet üretimi azalırken metabolik güç çıktısı artmaktadır (Hill, 1938). Direnç egzersizlerinde ise tempo, eksantrik, izometrik ve konsantrik fazların sürelerini içeren bir yapı olarak “zaman altındaki

gerilim” üzerinden mekanik stres ve metabolik yanıtı belirlemektedir (Schoenfeld, 2016).

Fizyolojik açıdan tempo ve ritim, enerji sistemlerinin kullanımını ve hareket ekonomisi ile doğrudan ilişkilidir. Optimal tempo aralığında oksijen tüketimi daha verimli gerçekleşirken, yüksek tempolarda anaerobik katkı ve laktat birikimi artmaktadır (Di Prampero, 1986; Billat, 2001). Ayrıca germe-kısalma döngüsünün etkin kullanımı, elastik enerji depolama ve geri kazanımını artırarak performans verimliliğini desteklemektedir (Komi, 2000). Nöromusküler düzeyde tempo ve ritim; motor ünite rekrutmanı, kas lif tipi aktivasyonu ve ateşleme frekansı ile ilişkilidir; düşük tempoda Tip I lifler baskınken, yüksek tempoda Tip II liflerin katılımı artmaktadır (Enoka & Duchateau, 2017).

Motor kontrol perspektifinden ritim, merkezi sinir sistemi tarafından geri bildirim (feedback) ve ileri besleme (feedforward) mekanizmalarıyla düzenlenir. Serebellum zamanlama doğruluğu ve hata düzeltmede, bazal gangliyonlar ritmik süreklilikte önemli rol oynarken; merkezi ritim üreticileri (CPG’ler) döngüsel hareketlerin otomatikliğini sağlar (Ivry & Spencer, 2004; Grillner & El Manira, 2015). Koordinasyon açısından ritim, kas gruplarının uygun zamanlama ile aktive edilmesini sağlayarak hareketler arası uyumu artırır ve karmaşık hareketlerin daha verimli organize edilmesine katkıda bulunur (Bernstein, 1967). Dinamik sistemler yaklaşımına göre ise ritim, organizma-görev-çevre etkileşimi sonucu kendiliğinden organize olan bir yapı olup değişen koşullara uyum sağlayabilmektedir (Kelso, 1995).

Spor performansı, fiziksel, fizyolojik ve bilişsel bileşenlerin etkileşimiyle şekillenen çok boyutlu bir yapıdır (Bishop, 2004; Williams et al., 2020). Fiziksel boyut; kuvvet, hız, dayanıklılık ve çeviklik gibi motor özellikleri kapsarken (Bompa & Haff, 2009), fizyolojik boyut; VO₂max, laktat eşiği ve kalp atım hızı gibi parametrelerle performansın sürdürülebilirliğini

belirler (Bassett & Howley, 2000; Faude et al., 2009). Bilişsel boyut ise dikkat, karar verme, reaksiyon süresi ve algılanan efor gibi süreçleri içerir ve özellikle açık beceri gerektiren sporlarda belirleyici rol oynar (Vickers, 2007; Marcora, 2009). Bu bağlamda performans, yalnızca fiziksel kapasiteye değil, aynı zamanda nöromüsküler koordinasyon ve bilişsel süreçlerin etkinliğine bağlıdır.

Tempo, ritim ve zamanlama arasındaki etkileşim performans üzerinde çok katmanlı bir etki yaratır. Makro düzeyde tempo egzersizin genel hızını ve enerji dağılımını belirlerken; mikro düzeyde ritim ve zamanlama, kas aktivasyon sıralaması, eklem senkronizasyonu ve motor ünite ateşleme düzenini kontrol eder (Enoka & Duchateau, 2017). Entrainment mekanizması ile içsel ritimler dışsal uyarımlarla senkronize olarak koordinasyonu artırır ve hareket değişkenliğini azaltır (Thaut et al., 2015). Bununla birlikte ritmik stabilitenin bozulması ve zamanlama hatalarının artması; yorgunluk, bilişsel yük ve sakatlık riskinde artışla ilişkilidir (Kibler et al., 2006; Hamill et al., 1999).

Tempo, ritim ve zamanlama; biyomekanik, nörofizyolojik ve bilişsel süreçlerin entegrasyonu yoluyla performansın optimize edilmesini sağlayan temel düzenleyicilerdir. Bu bileşenlerin uyumlu geliştirilmesi, hareket ekonomisinin artırılması, motor öğrenmenin hızlandırılması ve sakatlık riskinin azaltılması açısından modern egzersiz bilimlerinin temel kuramsal çerçevesini oluşturmaktadır (Davids et al., 2008).

3. FİZYOLOJİK TEMELLER: TEMPO, RİTİM VE PERFORMANS ETKİLEŞİMİ

Oksijen tüketimi (VO_2), egzersiz sırasında organizmanın aerobik enerji üretim kapasitesini yansıtan temel bir fizyolojik göstergedir ve tempo ile doğrudan ilişkilidir. Tempo, hareketin zamansal yoğunluğunu belirleyerek birim zamanda oluşan enerji

talebini düzenler ve bu doğrultuda VO₂ ile toplam enerji harcamasının temel belirleyicilerinden biri olarak kabul edilir (Bassett & Howley, 2000; Poole & Jones, 2012). Düşük ve orta şiddetli egzersizlerde tempo ile VO₂ arasında genellikle doğrusal bir ilişki gözlenirken, şiddet laktat eşiğini aştığında bu ilişki doğrusal olmaktan çıkar ve VO₂ kinetiğinde “yavaş bileşen” ortaya çıkar; bu durum enerji maliyetinin zamanla artmasına neden olur (Jones & Poole, 2005). Maksimal düzeye yaklaşıldığında VO₂ plato yapmakta ve anaerobik enerji sistemlerinin katkısı belirgin hale gelmektedir.

Enerji ekonomisi açısından tempo, belirli bir hızda minimum oksijen tüketimi ile maksimum mekanik verimlilik sağlayan “optimal tempo” kavramı ile açıklanır. Bu aralıkta organizma steady-state koşullarında çalışırken, temponun bu aralığın dışına çıkması enerji maliyetini artırarak hareket ekonomisini olumsuz etkiler (Cavanagh & Williams, 1982; Conley & Krahenbuhl, 1980). Tempo artışı aynı zamanda substrat kullanımını da değiştirmekte; yüksek tempolarda karbonhidrat oksidasyonu, anaerobik glikoliz, oksijen açığı ve egzersiz sonrası oksijen tüketimi (EPOC) artmaktadır (Gaesser & Brooks, 1984). Bu süreçte ventilasyon, kalp atım hızı ve laktat üretimi gibi parametreler de tempo değişimlerine duyarlıdır ve özellikle laktat eşiği civarında tempo kontrolü performansın sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Billat, 2001; Faude et al., 2009). Antrenman düzeyi yüksek bireylerde aynı tempoda daha düşük VO₂ gözlenmesi, gelişmiş hareket ekonomisi ve nöromüsküler koordinasyon ile açıklanmaktadır (Saunders et al., 2004).

Laktat eşiği (LT), laktat üretiminin uzaklaştırılmasını aştığı kritik noktayı ifade eder ve performansın sürdürülebilirliğinde temel bir belirleyicidir (Faude et al., 2009). Tempo, bu metabolik dengeyi belirleyen ana değişkenlerden biri iken, ritmik egzersiz yapısı laktat üretimi ve eliminasyonu arasındaki dengenin korunmasını destekler. Düşük ve orta

tempolarda organizma “maximal lactate steady state” (MLSS) düzeyinde çalışabilirken, yüksek tempolarda Tip II motor ünite aktivasyonunun artmasıyla birlikte glikolitik süreçler hızlanır ve laktat birikimi artar (Brooks, 2009). Ritmik kasılma–gevşeme döngüsü kas içi kan akışını artırarak laktat uzaklaştırılmasını kolaylaştırır ve “laktat mekiği” mekanizması ile yeniden enerji üretimine katkı sağlar (Brooks, 2009). Düzenli ritmik antrenmanlar; mitokondriyal yoğunluk, oksidatif enzim aktivitesi ve monokarboksilat taşıyıcı proteinlerin artışı ile daha yüksek tempolarda daha düşük laktat birikimi sağlayan adaptasyonlar oluşturur (Jones & Carter, 2000). Ayrıca stabil tempo dağılımı (pacing), metabolik asidozun geciktirilmesi ve enerji kullanımının optimize edilmesi açısından önemlidir (Abbiss & Laursen, 2008).

Kardiyovasküler sistem, artan metabolik talepleri karşılamak üzere oksijen ve besin taşınımını düzenler ve bu sistemin yanıtları kalp atım hızı (HR), atım hacmi (SV) ve kardiyak debi (\dot{Q}) ile değerlendirilir (Bassett & Howley, 2000). Tempo artışıyla birlikte HR ve \dot{Q} genellikle doğrusal olarak yükselirken, yüksek şiddetlerde atım hacminin plato yapması nedeniyle kardiyak çıktı artışı daha çok kalp atım hızındaki artışla sağlanır (Rowell, 1993). Sabit tempolu egzersizler daha stabil fizyolojik yanıtlar oluştururken, değişken tempolu yüklenmeler kardiyovasküler stresi artırarak adaptasyonu uyarır (Abbiss & Laursen, 2008). Özellikle interval antrenmanlar kardiyak debiyi ve VO_2max 'ı geliştirmede etkilidir (Buchheit & Laursen, 2013).

Otonom sinir sistemi, kardiyovasküler yanıtların düzenlenmesinde kritik rol oynar. Kalp atım hızı değişkenliği (HRV), sempatik ve parasempatik dengeyi yansıtır; düşük tempolu ritmik egzersizlerde parasempatik aktivite baskınken, yüksek tempolu yüklenmelerde sempatik aktivite artar. Solunum ile kalp atım hızı arasındaki senkronizasyon (respiratuvar sinüs aritmisi) ise kardiyovasküler verimliliği artırır (Lehrer et al.,

2003). Uzun süreli egzersizlerde görülen kardiyovasküler drift, tempo sabit olsa dahi kalp atım hızının artması ile karakterizedir ve genellikle termoregülasyon ve plazma hacmi değişimleri ile ilişkilidir (Coyle & González-Alonso, 2001). Elit sporcularda tempo değişkenliğinin daha etkin yönetilmesi, gelişmiş otonom kontrol ve aerobik kapasite ile açıklanmaktadır (Seiler, 2010; Plews et al., 2013).

Nöromüsküler yorgunluk, kasın kuvvet üretme kapasitesinde azalma ile birlikte merkezi ve periferik mekanizmaların etkileşimi sonucu ortaya çıkar (Enoka & Duchateau, 2017). Bu süreç, yalnızca kuvvet kaybına değil, aynı zamanda ritmik stabilitenin bozulmasına yol açarak hareketlerin zamansal organizasyonunu olumsuz etkiler. Periferik yorgunlukta metabolit birikimi ve Ca^{2+} kinetiğindeki değişimler kas kasılma-gevşeme döngüsünü yavaşlatırken (Allen et al., 2008), santral yorgunluk motor ünite ateşleme frekansını ve senkronizasyonunu bozarak hareketlerde düzensizlik oluşturur (Gandevia, 2001). Ayrıca proprioseptif geri bildirimdeki azalma, zamanlama doğruluğunu ve ritim algısını zayıflatır (Proske & Gandevia, 2012). Bu durum döngüsel hareketlerde artan varyabilite, koordinasyon kaybı ve performans düşüşü ile kendini gösterir (Hausdorff, 2005; Stergiou & Decker, 2011).

Ritmik stabilitenin bozulması, güncel literatürde nöromüsküler yorgunluğun erken bir göstergesi olarak kabul edilmekte ve hareket varyabilitesi performans izleme süreçlerinde önemli bir biyobelirteç olarak kullanılmaktadır (Thompson et al., 2022). Buna karşılık ritmik antrenmanlar motor ünite senkronizasyonunu geliştirerek yorgunluk altında dahi koordinasyonun korunmasına katkı sağlar. Sonuç olarak tempo ve ritim, oksijen tüketimi, laktat dinamikleri, kardiyovasküler yanıtlar ve nöromüsküler yorgunluk süreçleriyle bütünleşik bir şekilde çalışarak performansın sürdürülebilirliğini belirleyen temel fizyolojik mekanizmaları oluşturur. Bu nedenle antrenman

planlamasında tempo ve ritim kontrolünün bireysel özellikler, enerji sistemleri ve fizyolojik yanıtlar dikkate alınarak bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir.

4. BİYOMEKANİK VE MOTOR KONTROL PERSPEKTİFİ

Hareket ekonomisi, belirli bir iş yükünün minimum enerji maliyetiyle gerçekleştirilmesini ifade eden temel bir performans belirleyicisidir ve özellikle dayanıklılık sporlarında kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda optimal tempo, bireyin en düşük oksijen tüketimi (VO_2) ile en yüksek mekanik verimliliği sağlayabildiği, çoğunlukla kendiliğinden seçilen hareket hızını temsil eder. Biyomekanik açıdan hareket ekonomisi; adım frekansı, adım uzunluğu, yer temas süresi ve eklem kinematığı gibi parametrelerin optimal etkileşimiyle şekillenirken, merkezi sinir sisteminin geri bildirim mekanizmaları aracılığıyla bu örüntüyü zaman içinde optimize ettiği kabul edilmektedir. Mekanik olarak optimal tempo, vücudun doğal frekansı ile uyumlu bir “rezonans” noktasında ortaya çıkar; bu noktada elastik yapıların (tendon ve aponörozlar) etkin kullanımı sayesinde enerji transferi maksimize edilir ve kasların çalışma verimliliği artar. Germe-kısalma döngüsünün (SSC) optimal tempoda etkin kullanımı elastik enerji kaybını minimize ederken, çok düşük veya çok yüksek tempolar bu verimliliği azaltmaktadır.

Nöromüsküler açıdan optimal tempo, motor ünite rekrutman stratejileri ve kas lif tipi aktivasyonu ile ilişkilidir; düşük tempolarda Tip I lifler baskınken, tempo arttıkça Tip II liflerin devreye girmesi enerji maliyetini artırmaktadır. Bununla birlikte yüksek koordinasyon düzeyine sahip bireylerde kaslar arası senkronizasyonun gelişmiş olması, aynı tempoda daha düşük enerji harcaması ile performansın sürdürülmesini sağlar. Bu durum, hareket ekonomisinin yalnızca fizyolojik kapasiteye

değil, aynı zamanda motor kontrol etkinliğine bağlı olduğunu göstermektedir. Motor kontrol perspektifinden optimal tempo, yalnızca minimum VO₂ noktası değil, aynı zamanda hareket varyabilitesinin düşük ve ritmik stabilitenin yüksek olduğu frekans aralığıdır.

Motor öğrenme sürecinde ritim, hareketin zamansal şablonunu oluşturan temel bir düzenleyici olarak işlev görür. Ritmik geri bildirim mekanizmaları—özellikle işitsel uyarılar (metronom, müzik)—zamanlama doğruluğunu artırarak hata düzeltmeyi hızlandırır ve öğrenme sürecini optimize eder. İşitsel sistemin zamansal bilgiyi yüksek hassasiyetle işlemesi nedeniyle ritmik geri bildirim, görsel geri bildirimle kıyasla zamanlama hatalarının düzeltilmesinde daha etkilidir. Bu süreçte merkezi sinir sistemi, beklenen ve gerçekleşen hareket arasındaki farkı değerlendirerek motor programları günceller ve serebellum aracılığıyla milisaniyelik düzeyde hata düzeltmeleri gerçekleştirir. Ritmik geri bildirim, motor öğrenmenin bilişsel, ilişkisel ve otonom evrelerinde farklı düzeylerde katkı sağlayarak hareketin otomatikleşmesini ve bilişsel yükün azalmasını destekler (Schmidt & Lee, 2011).

Sinir–kas koordinasyonu ve zamanlama, hareketlerin doğru sıra ve zamanda gerçekleştirilmesini sağlayan temel mekanizmalardır. Motor ünite rekrutmanı, ateşleme frekansı ve kaslar arası senkronizasyon, kuvvet üretiminin ve hareket akıcılığının belirleyicileridir (Enoka & Duchateau, 2017). Agonist–antagonist kaslar arasındaki zamanlama ilişkisi, hareketin verimliliğini belirlerken; tri-fazik kasılma paterni hareketin başlatılması, kontrolü ve sonlandırılması süreçlerinde kritik rol oynar. Nörofizyolojik açıdan serebellum zamanlama doğruluğunu sağlarken, bazal gangliyonlar ritmik süreklilikte önemli rol oynar (Ivry & Spencer, 2004). Proprioseptif geri bildirim mekanizmaları ise hareketin sürekli izlenmesini ve anlık düzeltilmesini mümkün kılar (Proske & Gandevia, 2012).

Tempo ve ritim değişkenleri, sinir–kas koordinasyonunun zamansal organizasyonunu doğrudan etkiler. Sabit ritimli hareketler daha stabil aktivasyon örüntüleri oluştururken, değişken tempolu hareketler daha yüksek düzeyde adaptif kontrol gerektirir. Belirli düzeyde varyabilite motor sistemin esnekliği için gerekli olmakla birlikte, aşırı varyabilite koordinasyon bozulmasına ve performans düşüşüne yol açmaktadır (Stergiou & Decker, 2011). Özellikle yorgunluk durumunda motor ünite ateşleme düzenindeki değişimler ve afferent geri bildirimde azalma, zamanlama hatalarını artırarak ritmik stabilitenin bozulmasına neden olmaktadır.

Ritim, içsel ve dışsal kaynakların etkileşimiyle şekillenen çok katmanlı bir süreçtir. İçsel ritim mekanizmaları merkezi sinir sistemi tarafından üretilen zamanlama kapasitesine dayanırken, dışsal ritim kaynakları (metronom, müzik) işitsel-motor entegrasyon yoluyla zamanlama doğruluğunu artırır (Thaut, 2015). Sensörimotor senkronizasyon (SMS) sürecinde birey, içsel ritmini dışsal uyarımlarla öngörücü biçimde senkronize ederek hareket verimliliğini artırır. Motor öğrenme sürecinde dışsal ritim kaynaklarının etkisi başlangıçta daha belirgin iken, beceri gelişimi ile birlikte içsel zamanlama mekanizmaları baskın hale gelir ve performans otomatikleşir. Biyomekanik ve motor kontrol perspektifinde tempo, ritim ve zamanlama; hareket ekonomisi, koordinasyon, öğrenme ve nöromusküler kontrol süreçlerinin entegrasyonu yoluyla performansın optimize edilmesini sağlar. Bu bileşenlerin bireysel özellikler doğrultusunda bütüncül biçimde geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması, motor öğrenmenin hızlandırılması ve performansın sürdürülebilirliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

5. PSİKOFİZYOLOJİK YAKLAŞIMLAR: TEMPO, RİTİM VE PERFORMANSIN BÜTÜNLEŞİK DİNAMİKLERİ

Egzersiz bilimlerinde psikofizyolojik yaklaşımlar, performansın yalnızca fizyolojik kapasite ile değil; algısal, bilişsel ve duygusal süreçlerin bütünleşik etkileşimiyle şekillendiğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede tempo ve ritim, organizmanın hem fizyolojik yüklenme düzeyini hem de bu yüklenmenin algılanma ve yönetilme biçimini belirleyen temel düzenleyici değişkenlerdir. Algılanan efor (RPE), dikkat ve odaklanma mekanizmaları, motivasyonel süreçler ve akış (flow) durumu; tempo ve ritim ile doğrudan etkileşim içinde performansın sürdürülebilirliğini ve optimizasyonunu belirleyen başlıca psikofizyolojik bileşenlerdir.

Algılanan efor (RPE), egzersiz sırasında bireyin hissettiği toplam zorlanmanın öznel bir göstergesi olup, kardiyovasküler, solunumsal ve nöromusküler geri bildirimlerin merkezi sinir sistemi tarafından bütünleştirilmesiyle ortaya çıkar (Borg, 1998). Tempo ile RPE arasındaki ilişki doğrusal bir eğilim göstermekte; tempo arttıkça fizyolojik yüklenmenin artmasına paralel olarak algılanan efor da yükselmektedir. Bu bağlamda RPE, bireyin tempo düzenlemesinde kullandığı temel içsel geri bildirim mekanizmasıdır. Psikobiyolojik modele göre egzersizin sürdürülmesi, yalnızca fizyolojik sınırlarla değil, bireyin algıladığı efor ile motivasyon düzeyi arasındaki dengeye bağlıdır (Marcora, 2009). Benzer şekilde teleoanticipation yaklaşımı, beynin egzersiz süresini ve enerji kaynaklarını önceden planlayarak tempo kontrolünü düzenlediğini ve RPE'nin bu süreçte kritik bir sinyal işlevi gördüğünü ileri sürmektedir (Ulmer, 1996; Tucker, 2009). Ayrıca ritmik müzik gibi dışsal uyaranlar, dikkat odağını yorgunluk sinyallerinden uzaklaştırarak RPE'nin daha düşük algılanmasına ve aynı fizyolojik yükte daha

yüksek tempunun sürdürülebilmesine olanak tanımaktadır (Karageorghis & Priest, 2012).

Dikkat ve odaklanma süreçleri, ritim aracılığıyla motor performansın bilişsel kontrolünü doğrudan etkilemektedir. Ritmik uyum (entrainment), bireyin içsel ya da dışsal ritmik uyarılarla senkronize olabilme kapasitesi olarak, hareketin zamansal organizasyonunu optimize eder (Thaut et al., 2015). İşitsel sistemin zamansal bilgiyi yüksek hassasiyetle işlemesi, ritmik uyarıların motor sistemle güçlü bir entegrasyon kurmasını sağlar (Zatorre et al., 2007). Bu durum özellikle dışsal odaklanma stratejilerini güçlendirerek hareketin daha otomatik, akıcı ve ekonomik hale gelmesine katkıda bulunur (Wulf, 2013). Bilişsel yük teorisi açısından ritmik yapı, zamanlama kontrolüne yönelik bilinçli işleme ihtiyacını azaltarak dikkat kaynaklarının daha verimli kullanılmasını sağlar (Sweller, 2011). Böylece sporcu, hareketin zamansal düzenlenmesinden ziyade stratejik ve çevresel unsurlara odaklanabilir.

Motivasyon, tempo ve ritim ile çift yönlü etkileşim içinde olan bir diğer temel psikofizyolojik bileşendir. Öz-belirleme kuramına göre bireyin egzersize yönelik motivasyonu; özerklik, yeterlik ve ilişkili olma ihtiyaçlarının karşılanmasıyla şekillenir (Deci & Ryan, 2000). Ritmik müzik ve uyarılar, egzersizi daha keyifli ve sürdürülebilir hale getirerek içsel motivasyonu artırır. Nörofizyolojik düzeyde müzik, dopaminerjik ödül sistemini aktive ederek pozitif duygulanımı artırmakta ve efor toleransını yükseltmektedir (Salimpoor et al., 2011). Aynı zamanda ritmik senkronizasyon, hareketin stabilitesini artırarak enerji maliyetini düşürmekte ve algılanan eforu azaltmaktadır (Terry et al., 2020). Müzik temposunun da bu süreçte belirleyici olduğu; yüksek tempolu müziklerin uyarılmışlık düzeyini artırarak performansı desteklediği, düşük tempolu müziklerin ise toparlanma süreçlerine katkı sağladığı gösterilmiştir (Karageorghis et al., 2018). Ayrıca grup egzersizlerinde ritmik senkronizasyonun

sosyal bağlılığı artırarak kolektif motivasyonu güçlendirdiği bilinmektedir (Kirschner & Tomasello, 2010).

Akış (flow) durumu, tempo ve ritmin psikofizyolojik etkilerinin en üst düzeyde bütünleştiği optimal performans evresi olarak öne çıkmaktadır. Flow, bireyin tamamen göreve odaklandığı, zaman algısının değiştiği ve performansın en üst düzeye ulaştığı bir bilinç durumudur (Csikszentmihalyi, 1990). Bu durum, beceri düzeyi ile görev zorluğu arasındaki dengenin sağlanmasıyla ortaya çıkar ve bu denge büyük ölçüde uygun tempo ve ritim seçimine bağlıdır (Jackson & Marsh, 1996). Ritmik düzenlilik, bilişsel yükü azaltarak eylem ile farkındalığın birleşmesini kolaylaştırırken, hareketin otomatikleşmesini destekler. Nörofizyolojik olarak flow, prefrontal korteks aktivitesinde geçici bir azalma ile karakterize edilmekte ve bu durum otomatik motor kontrol süreçlerinin baskın hale gelmesini sağlamaktadır (Dietrich, 2004). Aynı zamanda dopaminerjik ödül sisteminin aktivasyonu, flow deneyimini hem motive edici hem de sürdürülebilir kılmaktadır (Keller & Bless, 2008). Özellikle sabit ve ritmik tempo, döngüsel sporlarda bu durumun devamlılığını destekleyerek performans istikrarını artırmaktadır.

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, tempo ve ritim; yalnızca hareketin fiziksel hızını ve düzenini belirleyen mekanik değişkenler değil, aynı zamanda algılanan efor, dikkat kontrolü, motivasyon ve bilinç durumları üzerinden performansı yöneten merkezi psikofizyolojik düzenleyiciler olarak karşımıza çıkmaktadır. RPE, organizmanın homeostatik dengesini koruyan bir geri bildirim mekanizması olarak tempo kontrolünü yönlendirirken; ritmik uyaranlar dikkat dağılımını optimize ederek motor kontrolü otomatikleştirir ve bilişsel yükü azaltır. Müzik ve ritim temelli uyaranlar motivasyonu artırarak performans sürekliliğini desteklerken, optimal tempo ve ritim kombinasyonu bireyin akış durumuna ulaşmasını kolaylaştırır.

Psikofizyolojik perspektiften tempo ve ritmin entegrasyonu; performansın yalnızca fizyolojik sınırlar içinde değil, algısal ve bilişsel süreçlerle birlikte yönetildiğini göstermektedir. Bu nedenle modern antrenman yaklaşımlarında tempo ve ritim düzenlemelerinin, bireysel farklılıklar, algılanan efor düzeyi, dikkat stratejileri ve motivasyonel faktörler dikkate alınarak sistematik biçimde planlanması gerekmektedir. Böyle bir bütüncül yaklaşım, performansın sürdürülebilirliğini artırmanın yanı sıra, sporcunun optimal performans durumuna (flow) daha tutarlı ve kontrollü biçimde ulaşmasını mümkün kılmaktadır.

6. SPOR BRANŞLARINA GÖRE TEMPO VE RİTİM KULLANIMI: BÜTÜNCÜL BİR YAKLAŞIM

Spor branşlarına göre tempo ve ritim kullanımı, performansın fizyolojik, biyomekanik ve nörobilişsel bileşenlerinin etkileşimiyle şekillenen çok boyutlu bir düzenleme mekanizmasıdır. Dayanıklılık sporlarından takım oyunlarına, raket sporlarından kuvvet ve patlayıcı güç gerektiren branşlara kadar farklı performans ortamlarında tempo ve ritim, enerji dağılımı, hareket ekonomisi, karar verme süreçleri ve nöromüsküler kontrol üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda tempo, yalnızca hareket hızının bir göstergesi değil; aynı zamanda organizmanın içsel geri bildirim sistemleri, çevresel koşullar ve taktiksel gereksinimlerle uyumlu şekilde performansı optimize eden dinamik bir kontrol değişkenidir.

Dayanıklılık sporlarında tempo stratejileri (pacing), sınırlı enerji kaynaklarının yarış süresine optimal biçimde dağıtılmasını sağlayarak performansın sürdürülebilirliğini belirleyen temel unsurlardan biridir (Abiss & Laursen, 2008). Sabit, pozitif, negatif ve değişken tempo modelleri; fizyolojik kapasite, çevresel koşullar ve algılanan efor (RPE) gibi faktörlerin etkileşimiyle

şekillenirken, özellikle negatif ve sabit tempo stratejilerinin enerji ekonomisini destekleyerek performans avantajı sağladığı görülmektedir (Foster et al., 2004; Joyner & Coyle, 2008). Bu süreçte merkezi sinir sistemi, RPE ve teleoanticipation mekanizmaları aracılığıyla tempo düzenlemesini yönlendirerek homeostatik dengeyi korumakta ve aşırı yüklenmeyi önlemektedir (Marcora, 2009; Tucker & Noakes, 2009). Ayrıca ritmik uyarılar (müzik, metronom), hareket frekansını stabilize ederek algılanan eforu düşürmekte ve daha uzun süre yüksek performansın sürdürülmesine katkı sağlamaktadır (Karageorghis & Priest, 2012). Dolayısıyla dayanıklılık sporlarında optimal tempo seçimi, fizyolojik verimlilik ile psikofizyolojik düzenleme mekanizmalarının bütünleştiği bir performans stratejisi olarak öne çıkmaktadır.

Takım sporlarında ise tempo ve ritim, bireysel performansın ötesinde kolektif organizasyonun zamansal yapısını belirleyen kritik unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Oyun temposu, hücum ve savunma aksiyonlarının hızını ifade ederken; ritim, bu aksiyonların zamansal düzenliliği ve oyuncular arası senkronizasyonu ile ilişkilidir (Garganta, 2009; Passos et al., 2016). Pas hızı, oyuncu hareketleri ve geçiş oyunları gibi değişkenler takım ritmini şekillendirirken, bu ritmin stratejik olarak değiştirilmesi rakip performansını bozmak için etkili bir araçtır (Rein & Memmert, 2016). Sosyal sürüklenme (social entrainment) mekanizması sayesinde oyuncuların hareketleri birbirine uyumlanarak kolektif performans artırılır (Schmidt et al., 2011). Bununla birlikte ritmik değişkenliğin kontrollü kullanımı, rakibin öngörü mekanizmalarını zayıflatarak taktiksel üstünlük sağlamaktadır (Davids et al., 2005). Yorgunluk ve çevresel faktörler ise bu ritmik organizasyonu bozarak performans düşüşüne neden olabilmektedir (Mohr et al., 2005; Bray, 2004). Bu nedenle takım sporlarında başarı, tempo ve ritmin dinamik ve stratejik yönetimine bağlıdır.

Raket sporlarında tempo ve ritim, milisaniyelik zamanlama hassasiyeti gerektiren algısal-motor entegrasyon süreçleri ile doğrudan ilişkilidir. Bu branşlarda ritim, sabit bir yapıdan ziyade sürekli güncellenen mikro-zamanlama dizileri şeklinde ortaya çıkmakta ve performans, vuruş hazırlığı, uygulama ve toparlanma fazları arasındaki zamansal uyuma bağlı olarak belirlenmektedir (Abernethy, 2001; Farrow & Abernethy, 2003). Elit sporcuların gelişmiş öngörüsül zamanlama becerileri sayesinde rakip hareketlerini erken analiz ederek motor yanıtlarını optimize edebildikleri bilinmektedir (Williams et al., 2004). Ayrıca üst ve alt ekstremite koordinasyonu ile footwork-vuruş senkronizasyonu, kinetik zincirin verimli çalışmasını sağlayarak hareket ekonomisini artırmaktadır (Lees, 2003). Ritim manipülasyonu yoluyla rakibin zamansal düzeninin bozulması ise taktiksel üstünlük sağlayan önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Phomsoupha & Laffaye, 2015). Bu bağlamda raket sporlarında tempo ve ritim, teknik beceri ile bilişsel öngörü süreçlerinin bütünleştiği kritik performans belirleyicileridir.

Kuvvet ve patlayıcı güç gerektiren sporlarda tempo kontrolü ise hareket süresinden ziyade kasılma fazlarının zamansal organizasyonu, kuvvet gelişim hızı (RFD) ve nöromüsküler koordinasyon üzerinden değerlendirilmektedir (Cormie et al., 2011; Aagaard et al., 2002). Eksantrik, izometrik ve konsantrik fazlar arasındaki geçişlerin doğru zamanlanması, özellikle olimpik kaldırışlar ve plyometrik hareketlerde performansın temelini oluşturmaktadır (Stone et al., 2006; Komi, 2000). Sprint performansında ise tempo, kuvvet-hız ilişkisinin zamansal bir yansıması olarak ivmelenme ve maksimal hız fazları arasındaki geçişlerle karakterizedir (Mero et al., 1992). Nörofizyolojik olarak yüksek eşikli motor ünitelerin senkronize aktivasyonu, patlayıcı kuvvet üretiminin temelini oluştururken, yorgunluk bu senkronizasyonu bozarak performansı olumsuz etkiler (Enoka & Duchateau, 2017). Antrenman süreçlerinde

tempo manipülasyonu (tempo training), zaman altında gerilim (TUT) ve hız tabanlı antrenman (VBT) gibi yaklaşımlar, tempo kontrolünü optimize ederek hem kuvvet hem de güç gelişimini desteklemektedir (Schoenfeld, 2010). Bu doğrultuda kuvvet sporlarında tempo, nöromüsküler sistemin zamansal hassasiyetini belirleyen temel bir performans parametresidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, farklı spor branşlarında tempo ve ritim kullanımı; enerji yönetimi, motor kontrol, bilişsel süreçler ve nöromüsküler koordinasyonun bütünleştiği bir performans çerçevesi sunmaktadır. Dayanıklılık sporlarında enerji ekonomisini optimize eden pacing stratejileri, takım sporlarında kolektif senkronizasyon ve taktiksel ritim yönetimi, raket sporlarında algısal-öngörüsül zamanlama ve kuvvet sporlarında patlayıcı nöromüsküler aktivasyon süreçleri, temponun branşa özgü ancak evrensel bir performans belirleyicisi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda tempo ve ritmin bilinçli ve bireyselleştirilmiş şekilde yönetilmesi, yalnızca performans çıktısını artırmakla kalmayıp aynı zamanda yorgunluk yönetimi, hareket ekonomisi ve performansın sürdürülebilirliği açısından da kritik bir rol oynamaktadır.

7. TEKNOLOJİK GELİŞMELER VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Spor bilimlerinde teknolojik gelişmeler, tempo ve ritmin analizini geleneksel gözlemsel yaklaşımlardan çıkararak objektif, sürekli ve çok boyutlu bir değerlendirme sürecine dönüştürmüştür. Özellikle giyilebilir teknolojiler, GPS ve akselerometre tabanlı sistemler ile yapay zekâ destekli analiz yöntemleri, hareketin zamansal organizasyonunu yüksek doğrulukla izleyerek performansın “zamansal mimarisinin” sayısallaştırılmasını mümkün kılmaktadır (Peake et al., 2018). Bu dönüşüm, tempo kavramını yalnızca hızla ilişkili bir değişken

olmaktan çıkarıp biyomekanik, fizyolojik ve nöromusküler süreçlerin bütünleştiği ölçülebilir bir performans parametresi haline getirmiştir.

Giyilebilir sensör sistemleri (ivmeölçer, jiroskop, GPS ve kalp atım hızı sensörleri), hareket frekansı, adım kadansı, yer temas süresi ve hız değişkenliği gibi temel tempo göstergelerini yüksek çözünürlükle analiz ederek bireysel performans profillerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır (Wang et al., 2019). Bu sistemlerin en önemli avantajlarından biri, saha içi koşullarda gerçek zamanlı veri sağlayarak antrenman sırasında anlık geri bildirim sunmasıdır. Böylece sporcular tempo düzenlemelerini dinamik olarak yapabilmekte ve motor öğrenme süreçleri hızlanmaktadır (Baca & Kornfeind, 2006). Dayanıklılık sporlarında GPS ve kalp atım hızı verilerinin entegrasyonu, pacing stratejilerinin hem mekanik hem de fizyolojik boyutlarıyla analiz edilmesini sağlarken; takım ve raket sporlarında sensör tabanlı sistemler ani hızlanma, yön değiştirme ve ritmik hareket değişimlerini ortaya koyarak oyun temposunun objektif değerlendirilmesine katkı sunmaktadır (Loades et al., 2020).

GPS ve akselerometre teknolojilerinin birlikte kullanımı, performans analizinde dışsal yük (mesafe, hız, ivmelenme) ile içsel yanıtların (kalp atım hızı, RPE) bütüncül olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır (Impellizzeri et al., 2005). GPS sistemleri özellikle açık alan sporlarında hız zonları, sprint sayıları ve toplam mesafe gibi makro düzey tempo göstergelerini sağlarken, akselerometreler mikro düzeydeki yüksek yoğunluklu hareketleri (ani duruşlar, yön değişimleri, sıçramalar) analiz ederek ritmik düzensizlikleri ve mekanik stresi ortaya koymaktadır (Boyd et al., 2011). Bu verilerden türetilen Player Load gibi indeksler, sporcunun maruz kaldığı toplam yüklenmenin zamansal dağılımını anlamada önemli bir araçtır. Ayrıca Elektronik Performans ve Takip Sistemleri (EPTS) kapsamında çoklu sensör entegrasyonu, yalnızca bireysel tempo

değişimlerini değil, aynı zamanda takım içi ritmik uyumu ve kolektif hareket senkronizasyonunu değerlendirmeye olanak tanımaktadır (Bourdon et al., 2017).

Yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi teknolojileri, bu büyük veri setlerini analiz ederek tempo ve ritim değerlendirmesini yeni bir boyuta taşımıştır. Özellikle zaman serisi analizine dayalı modeller (RNN, LSTM), hareket verilerindeki ritmik dalgalanmaları ve performans örüntülerini yüksek doğrulukla modelleyebilmektedir (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Bilgisayarlı görü ve poz kestirimi teknikleri ise sensör gerektirmeden video verileri üzerinden hareketin zamansal organizasyonunu analiz ederek teknik performansın mikro düzeyde incelenmesini mümkün kılmaktadır (Mathis et al., 2018). YZ tabanlı sistemler aynı zamanda prediktif analitik sayesinde ritmik sapmaları ve yorgunluk belirtilerini erken aşamada tespit ederek performans düşüşü ve sakatlık riskini öngörebilmektedir (Claudino et al., 2019). Bu yönüyle yapay zekâ, yalnızca mevcut performansı analiz eden değil, aynı zamanda geleceğe yönelik karar destek mekanizmaları sunan proaktif bir araç haline gelmiştir.

Bu teknolojik altyapının en önemli uygulama alanlarından biri veri temelli antrenman planlamasıdır. Bu yaklaşım, içsel ve dışsal yük verilerinin entegrasyonu ile antrenman süreçlerinin bireyselleştirilmesini ve bilimsel temelde yönetilmesini sağlamaktadır (Impellizzeri et al., 2005). Özellikle tempo ve ritim değişkenleri, yüklenmenin zamansal dağılımını belirleyen temel göstergeler olarak kullanılmakta ve sporcuya özgü optimal tempo profillerinin oluşturulmasına katkı sunmaktadır (Abbiss & Laursen, 2008). Akut:kronik iş yükü oranı (ACWR) gibi modeller, kısa ve uzun vadeli yüklenme dengesi üzerinden sakatlık riskini minimize etmeye yardımcı olurken (Gabbett, 2016), makine öğrenmesi algoritmaları performans tahmini ve adaptasyon süreçlerinin modellenmesinde önemli rol

oynamaktadır (Claudino et al., 2019). Daha ileri düzeyde dijital ikiz modelleri, sporcuların farklı antrenman senaryolarına vereceği tepkileri simüle ederek planlama sürecinde daha hassas ve kontrollü kararlar alınmasını mümkün kılmaktadır (Foster et al., 2017).

Bununla birlikte bu teknolojilerin kullanımında sensör doğruluğu, veri kalitesi, model genellenebilirliği ve veri yorumlama gereksinimi gibi sınırlılıklar göz önünde bulundurulmalıdır (Peake et al., 2018). Ayrıca aşırı veri bağımlılığı, antrenör deneyimi ve sezgisel karar mekanizmalarının geri planda kalmasına neden olabileceğinden, teknolojik verilerin uzman yorumuyla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Bourdon et al., 2017).

Genel olarak değerlendirildiğinde, teknolojik gelişmeler tempo ve ritim analizini çok boyutlu, objektif ve öngörücü bir yapıya dönüştürerek spor performansının anlaşılması ve geliştirilmesinde yeni bir paradigma oluşturmuştur. Giyilebilir teknolojilerden yapay zekâya uzanan bu bütüncül sistemler, performans optimizasyonu, yorgunluk yönetimi ve sakatlık riskinin azaltılması süreçlerinde kritik rol oynayarak modern egzersiz biliminin temel yapı taşları arasında yer almaktadır.

8. ANTRENMAN UYGULAMALARI

Antrenman uygulamalarında tempo ve ritim temelli yaklaşımlar, modern spor bilimlerinde performans gelişimi, motor öğrenme, yük yönetimi ve yorgunluk kontrolünün optimize edilmesinde temel bir yapı oluşturmaktadır. Tempo, hareketin zamansal organizasyonunu; ritim ise bu organizasyonun düzenli veya değişken örüntüsünü ifade ederek nöromüsküler, fizyolojik ve bilişsel süreçlerin bütünleşik biçimde yönetilmesini sağlamaktadır (Schmidt & Lee, 2011).

Tempo temelli antrenman programları, egzersizlerin eksantrik, izometrik ve konsantrik fazlarının süreleri ile tekrar ve dinlenme aralıklarının sistematik olarak düzenlenmesine dayanır. Bu yaklaşım, yalnızca yüklenme şiddetini değil, aynı zamanda zaman altında gerilim (time under tension, TUT) ve hareket hızını da manipüle ederek nöromusküler adaptasyonları hedefler (Schoenfeld, 2010). Özellikle yavaş eksantrik yüklenmeler kas-tendon yapılarında mekanik gerilimi artırarak hipertrofi ve doku adaptasyonunu desteklerken, hızlı konsantrik fazlar motor ünite aktivasyon hızını ve kuvvet üretim kapasitesini geliştirmektedir (Cormie, McGuigan & Newton, 2011). Hipertrofi odaklı çalışmalarda 30–60 saniyelik TUT aralıkları metabolik stres ve mekanik yüklenme dengesini optimize ederken, güç ve hız odaklı antrenmanlarda maksimal hızda konsantrik kasılma nöromusküler performansı artırmaktadır (Burd et al., 2012).

Ritim eğitimi ve metronom kullanımı, hareketin zamansal doğruluğunu ve koordinasyonunu geliştiren önemli yöntemlerdir. Metronom, sabit işitsel uyarılar aracılığıyla kadans stabilitesini artırarak hareket ekonomisini optimize eder ve özellikle döngüsel sporlarda enerji verimliliğine katkı sağlar (Thaut et al., 1999). İşitsel ritmik uyarılar, motor korteks ve serebellum arasındaki etkileşimi güçlendirerek kas aktivasyon zamanlamasını stabilize eder ve hareket değişkenliğini azaltır (Thaut, McIntosh & Rice, 1997). Bu süreç, motor öğrenmenin otomatikleşmesini desteklerken teknik stabiliteyi de artırmaktadır (Wulf & Lewthwaite, 2016). Takım sporlarında ise ritmik uyarılar kolektif senkronizasyonu geliştirerek taktiksel uyumu güçlendirmektedir (Sebanz, Bekkering & Knoblich, 2006).

Yüklenme–dinlenme oranlarının optimizasyonu, antrenman adaptasyonlarının yönlendirilmesinde kritik bir değişkendir. Enerji sistemlerine bağlı olarak farklı oranlar kullanılmaktadır: ATP-PCr sisteminde uzun dinlenme (1:12–1:20), glikolitik sistemde 1:2–1:3 ve aerobik sistemde 1:1–2:1

oranları fizyolojik adaptasyonları desteklemektedir (Buchheit & Laursen, 2013). Bu oranların etkinliği, tempo kontrolü ile doğrudan ilişkilidir; çünkü yüklenme temposu fizyolojik stres düzeyini belirlerken dinlenme süresi sonraki performansı şekillendirmektedir. Yetersiz toparlanma nöromusküler yorgunluğu artırarak ritmik stabiliteyi bozarken, uygun dinlenme teknik doğruluk ve performans sürekliliğini desteklemektedir (Gandevia, 2001). Dinlenme süreci aktif veya pasif olarak düzenlenebilir; aktif dinlenme laktat eliminasyonunu hızlandırırken, pasif dinlenme fosfajen resentezini destekler (Menzies et al., 2010).

Sporcu bireyselleştirilmiş tempo planlaması, antrenman süreçlerinin sporcunun fizyolojik, nöromusküler ve psikolojik özelliklerine göre özelleştirilmesini esas alır. VO_2max , laktat eşiği, kas lifi dağılımı ve algılanan efor gibi değişkenler bireysel tempo aralıklarını belirlerken, motivasyon ve dikkat odağı gibi psikolojik faktörler tempo kontrolünü doğrudan etkilemektedir (Cormie, McGuigan & Newton, 2011). Giyilebilir teknolojiler ve performans izleme sistemleri sayesinde bu değişkenler gerçek zamanlı analiz edilerek antrenman süreçleri bireyselleştirilebilmektedir (Bourdon et al., 2017). Yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmaları ise bireysel tempo profillerini modelleyerek optimal yüklenme stratejilerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır (Claudino et al., 2019).

Teknolojik gelişmeler antrenman uygulamalarının bilimsel temele dayanmasını güçlendirmiştir. GPS, akselerometre ve diğer sensör sistemleri aracılığıyla tempo, hız değişkenliği ve ritmik stabilite objektif olarak ölçülebilmekte; içsel (kalp atım hızı, RPE) ve dışsal yük (mesafe, hız, ivmelenme) birlikte değerlendirilebilmektedir (Impellizzeri et al., 2005). Bu sayede antrenman yükü daha hassas şekilde kontrol edilmekte ve performans optimizasyonu sağlanmaktadır. Tempo temelli antrenman, ritim eğitimi, yüklenme–dinlenme optimizasyonu ve

bireyselleştirilmiş planlama yaklaşımları; kuvvet, dayanıklılık, motor öğrenme ve teknik performansı bütüncül biçimde etkileyen modern spor biliminin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu yapı içerisinde tempo ve ritim, yalnızca performans değişkeni değil, aynı zamanda antrenman planlamasının merkezinde yer alan belirleyici bir kontrol mekanizmasıdır. Bu nedenle çağdaş antrenman biliminde başarı, büyük ölçüde bu değişkenlerin bilimsel, bireysel ve teknolojik temelli yönetimine bağlıdır.

9. GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE YENİ YAKLAŞIMLAR

Güncel egzersiz bilimi literatürü, tempo ve ritim kontrolünü yalnızca mekanik bir performans değişkeni olarak değil; merkezi sinir sistemi (MSS) regülasyonu, bilişsel süreçler, duygusal yanıtlar ve çevresel uyaranların etkileşimiyle şekillenen çok boyutlu bir olgu olarak ele almaktadır. Bu çerçevede modern araştırmalar, performansın açıklanmasında nörobilim, spor psikolojisi, biyomekanik ve veri bilimi gibi disiplinlerin entegrasyonunu zorunlu kılan bütüncül modeller geliştirmektedir (Abe et al., 2019).

Tempo kontrolü nörobilimsel açıdan motor korteks, serebellum, bazal gangliyonlar ve suplementer motor alan arasındaki dinamik etkileşimlerle açıklanmaktadır. Bazal gangliyonlar içsel ritmin oluşturulmasında ve hareket başlatılmasında rol oynarken, serebellum milisaniyelik hata düzeltmeleriyle zamansal hassasiyeti optimize etmektedir (Ivry & Spencer, 2004). Omurilik düzeyinde yer alan santral pattern jeneratörleri (CPG), ritmik hareketlerin otonom kontrolünü sağlayarak sürekliliği desteklemektedir (Marder & Bucher, 2001). Bu yapı, hareketin yalnızca periferik bir çıktı değil, merkezi sinir sistemi tarafından öngörülen ve düzenlenen bir süreç olduğunu göstermektedir.

Öngörülü kodlama yaklaşımı ve santral yönetici model çerçevesinde beyin, enerji korunumu ve performans optimizasyonu arasında denge kurarak “öngörülü tempo” stratejileri geliştirmektedir (Noakes, 2012). Dopaminerjik sistemler ise zaman algısı, motivasyon ve hareket başlatma süreçlerini modüle ederek ritmik performansın nörokimyasal temelini oluşturmaktadır (Buhusi & Meck, 2005). Nörogörüntüleme bulguları, ritmik egzersizlerin nöroplastisiteyi artırarak motor öğrenme ve zamansal koordinasyonu geliştirdiğini ortaya koymaktadır (Jancke et al., 2000).

Egzersiz sırasında müzik ve ritim entegrasyonu, hareketin dışsal uyaranlarla senkronizasyonunu sağlayarak performansı artıran önemli bir ergogenik strateji olarak değerlendirilmektedir. Ritmik işitsel uyarım, işitsel-motor entrainment mekanizması üzerinden motor sistem ile işitsel korteks arasında senkronizasyon oluşturarak hareketin zamansal kontrolünü optimize etmektedir (Thaut, 2015). Senkronize müzik kullanımı hareket ekonomisini artırmakta, oksijen tüketimini azaltmakta ve algılanan eforu düşürmektedir (Terry et al., 2020). Ayrıca giyilebilir teknolojilerle entegre edilen adaptif müzik sistemleri, sporcunun fizyolojik verilerine göre tempo ayarlayarak gerçek zamanlı performans optimizasyonu sağlamaktadır (Hutchinson et al., 2018).

Tempo ve ritim kontrolü aynı zamanda bilişsel yük ile doğrudan ilişkilidir. Bilişsel yük teorisine göre hareketin otomatikleşmesi, çalışma belleği üzerindeki yükü azaltarak sporcunun dikkat ve karar verme kaynaklarını daha verimli kullanmasını sağlar (Sweller, 1988). Ritmik yapıların stabil olması motor becerilerin prosedürel belleğe aktarımını kolaylaştırırken, çift görev koşullarında performansın sürdürülebilirliğini artırmaktadır (Beilock et al., 2002). Ayrıca ritmik uyaranlar prefrontal korteks aktivitesini düzenleyerek akış

durumunu (flow) desteklemekte ve zihinsel yorgunluğu geciktirmektedir (Bigliassi et al., 2017).

Multidisipliner yaklaşımlar, tempo ve ritim analizini biyomekanik, fizyolojik ve psikolojik bileşenlerin yanı sıra veri bilimi ile entegre etmektedir. Ekolojik dinamikler yaklaşımı, hareketin çevresel kısıtlamalarla etkileşim içinde şekillendiğini ve ritmik stabilitenin performans ekonomisi açısından kritik olduğunu göstermektedir (Seifert et al., 2016). Giyilebilir teknolojilerden elde edilen büyük veri setleri, makine öğrenmesi algoritmaları ile analiz edilerek bireyselleştirilmiş tempo modellerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Bourdon et al., 2017). Bu sistemler aynı zamanda akut-kronik iş yükü dengesini optimize ederek sürantrenman riskini azaltmaktadır.

Rehabilitasyon alanında ritmik işitsel stimülasyon (RAS), motor yeniden öğrenme süreçlerini hızlandırarak nörolojik iyileşmeyi destekleyen önemli bir klinik uygulama alanı oluşturmaktadır (Thaut et al., 2010). Bu durum, ritim temelli yaklaşımların yalnızca performans değil, aynı zamanda klinik rehabilitasyon süreçlerinde de etkili olduğunu göstermektedir.

Güncel araştırmalar, tempo ve ritim kontrolünün yalnızca biyomekanik bir değişken değil; merkezi sinir sistemi düzenlemeleri, bilişsel yük yönetimi, duygusal yanıtlar ve çevresel etkileşimlerin bütünlük bir çıktısı olduğunu ortaya koymaktadır. Nörobilim, psikoloji, biyomekanik ve veri bilimi temelli yaklaşımların entegrasyonu, spor performansının daha hassas, bireyselleştirilmiş ve öngörülebilir bir yapıya kavuşmasını sağlamakta ve modern egzersiz biliminin temel paradigma dönüşümünü temsil etmektedir.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tempo ve ritim, egzersiz bilimleri kapsamında yalnızca hareketin mekanik hızını belirleyen değişkenler olmaktan çıkarak, nörofizyolojik, biyomekanik, bilişsel ve psikolojik süreçlerin etkileşimiyle şekillenen çok katmanlı ve dinamik performans düzenleyicileri haline gelmiştir. Bu bağlamda yapılan kuramsal ve uygulamalı değerlendirmeler, tempo ve ritmin spor performansı üzerindeki etkisinin bütüncül ve çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular, tempo kontrolünün enerji sistemlerinin kullanımı, nöromüsküler aktivasyon düzeyi ve motor öğrenme süreçleri ile doğrudan ilişkili olduğunu; ritmin ise merkezi sinir sistemi düzeyinde zamanlama mekanizmalarıyla entegre çalışarak hareketin koordinasyon, doğruluk ve akıcılığını belirlediğini göstermektedir (Ivry & Spencer, 2004). Bu nedenle tempo ve ritim, birbirinden bağımsız değişkenler değil, performansı birlikte şekillendiren entegre bir sistemin bileşenleri olarak değerlendirilmelidir.

Ayrıca ritim ve müzik entegrasyonunun algılanan eforu azaltarak egzersiz performansını artırabildiği, bilişsel yükün ise tempo değişkenliği ile yakından ilişkili olduğu belirlenmiştir (Sweller, 1988). Bu durum, performansın yalnızca fizyolojik değil aynı zamanda bilişsel ve psikolojik boyutlarıyla birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Günümüzde giyilebilir teknolojiler, GPS sistemleri ve yapay zekâ tabanlı analiz araçları sayesinde tempo ve ritim analizleri daha objektif, hassas ve bireyselleştirilmiş bir yapıya kavuşmuştur. Bu teknolojiler, sporcuların anlık yüklenme profillerini ve performans değişkenliklerini gerçek zamanlı olarak analiz ederek antrenman süreçlerinin dinamik biçimde yönetilmesine olanak sağlamaktadır (Claudno et al., 2019).

Uygulamalı spor bilimleri açısından değerlendirildiğinde, tempo ve ritim temelli yaklaşımlar antrenman planlamasının temel bileşenleri arasında yer almalıdır. Özellikle yüklenme–dinlenme oranlarının doğru yapılandırılması, bireyselleştirilmiş tempo planlaması ve ritim temelli motor öğrenme stratejileri, performans gelişimini doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir (Buchheit & Laursen, 2013). Bununla birlikte antrenörlük pratiğinde yalnızca fiziksel yüklenme değil, algılanan efor, motivasyon ve dikkat gibi bilişsel-psikolojik değişkenler de performans yönetiminin ayrılmaz parçaları olarak ele alınmalıdır (Marcora, 2009).

Geleceğe yönelik araştırmalar, tempo ve ritim analizinin daha ileri teknolojilerle entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir. EEG, fMRI ve hareket sensörlerinin birlikte kullanıldığı çok modlu analiz sistemleri, motor zamanlama süreçlerinin daha ayrıntılı anlaşılmasına katkı sağlayacaktır (Zatorre et al., 2007). Ayrıca yapay zekâ ve makine öğrenmesi algoritmaları ile sporcuların bireysel tempo profilleri oluşturularak daha hassas, öngörülebilir ve dinamik antrenman reçeteleri geliştirilebilecektir (Claudino et al., 2019).

Bununla birlikte farklı spor branşlarında ritim değişkenliğinin uzun dönem performans adaptasyonlarına etkisinin boylamsal çalışmalarla incelenmesi önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca bilişsel yük, duygusal durum ve tempo arasındaki ilişkinin daha kapsamlı psikofizyolojik modellerle açıklanması, gelecekteki araştırmalar için kritik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Genel bir çerçevede değerlendirildiğinde egzersiz bilimlerinde tempo ve ritim kavramı, geleneksel mekanik yaklaşımlardan çıkarak nörobilim, veri bilimi ve yapay zekâ entegrasyonu ile şekillenen disiplinler arası bir yapıya evrilmiştir. Dinamik sistemler teorisi de bu dönüşümü destekleyerek tempo

ve ritmin sabit bir yapı değil, sürekli değişen ve çevresel-biyolojik etkileşimlere bağlı adaptif bir süreç olduğunu ortaya koymaktadır (Kelso, 1995). Gelecekte spor performansının yönetiminde gerçek zamanlı biyogeribildirim sistemleri, yapay zekâ destekli karar mekanizmaları ve nöro-adaptif ritim modelleri belirleyici olacaktır. Bu gelişmeler, yalnızca antrenman planlamasını değil, aynı zamanda performansın sınırlarını da yeniden tanımlayarak egzersiz bilimlerinde yeni bir paradigma oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- Aagaard, P., et al. (2002). Neural adaptation to resistance training. *Journal of Applied Physiology*, 93(4), 1318–1326.
- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2008). Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Medicine*, 38(3), 239–252.
- Abe, D., et al. (2019). Multidisciplinary approaches in sport science. *Sports Science Review*, 28(3–4), 123–140.
- Abernethy, B. (2001). Perception in sport. *Journal of Sport Sciences*, 19(6), 431–448.
- Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 88(1), 287–332.
- Baca, A., & Kornfeind, P. (2006). Rapid feedback systems. *Journal of Sports Sciences*, 24(11), 1191–1199.
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(1), 70–84.
- Beilock, S. L., et al. (2002). When paying attention becomes counterproductive: Implicit and explicit sensorimotor learning.
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*.
- Bigliassi, M., et al. (2017). Brain mechanisms of the ergogenic effects of music.
- Billat, V. L. (2001). Interval training for performance: A scientific and empirical practice. *Sports Medicine*, 31(1), 13–31.
- Bishop, D. (2004). Physiological predictors of performance. *Sports Medicine*, 34(12), 741–756.

- Bompa, T. O., & Haff, G. G. (2009). *Periodization: Theory and Methodology of Training*. Human Kinetics.
- Borg, G. (1998). Borg's Perceived Exertion and Pain Scales. Human Kinetics.
- Bourdon, P. C., et al. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement.
- Boyd, L. J., et al. (2011). Accelerometer analysis in sport. *Journal of Sports Sciences*, 29(3), 249–257.
- Bray, S. R. (2004). Collective efficacy and performance. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 26(4), 560–574.
- Brooks, G. A. (2009). The lactate shuttle. *Cell Metabolism*, 4(3), 197–208.
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013). High-intensity interval training. *Sports Medicine*, 43(5), 313–338.
- Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing.
- Burd, N. A., et al. (2012). Muscle time under tension during resistance exercise stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses.
- Cavanagh, P. R., & Williams, K. R. (1982). The complexity of maximum running speed.
- Claudino, J. G., et al. (2019). Artificial intelligence in sport. *Sports Medicine*, 49(11), 1725–1741.
- Conley, D. L., & Krahenbuhl, G. S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes.
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing maximal power. *Sports Medicine*, 41(1), 17–38.

- Coyle, E. F., & González-Alonso, J. (2001). Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives.
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The Psychology of Optimal Experience*. Harper & Row.
- Dauids, K., Button, C., & Bennett, S. (2008). Dynamics of Skill Acquisition: A Constraints-Led Approach. *Human Kinetics*.
- Dauids, K., et al. (2005). Movement systems as complex adaptive systems.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). Self-determination theory. *Psychological Inquiry*, 11(4), 227–268.
- Di Prampero, P. E. (1986). The energy cost of human locomotion. *International Journal of Sports Medicine*, 7(2), 55–72.
- Dietrich, A. (2004). Neurocognitive mechanisms of flow. *Consciousness and Cognition*, 13(4), 746–761.
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2017). Rate coding and motor unit control. *Journal of Physiology*, 595(7), 2087–2095.
- Farrow, D., & Abernethy, B. (2003). Training anticipatory skills. *Journal of Sports Sciences*, 21(9), 745–760.
- Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts. *Sports Medicine*, 39(6), 469–490.
- Gabbett, T. J. (2016). Training load and injury risk. *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 273–280.
- Gaesser, G. A., & Brooks, G. A. (1984). Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4), 1725–1789.
- Garganta, J. (2009). Tactical analysis. *Revista Portuguesa de Ciências do Desporto*, 9(1), 81–89.

- Grahn, J. A., & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(5), 893–906.
- Grillner, S., & El Manira, A. (2015). The intrinsic operative infrastructure of networks for locomotion.
- Hamill, J., van Emmerik, R. E. A., Heiderscheit, B. C., & Li, L. (1999). A dynamical systems approach to running injuries. *Clinical Biomechanics*, 14(5), 297–308.
- Hausdorff, J. M. (2005). Gait variability and motor control. *Journal of Applied Physiology*, 99(2), 469–470.
- Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle.
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780.
- Impellizzeri, F. M., et al. (2005). Internal vs external load. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(6), 1046–1052.
- Ivry, R. B., & Spencer, R. M. C. (2004). Cerebellar timing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 978, 84–93.
- Jackson, S. A., & Marsh, H. W. (1996). Development of flow state scale. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 18(1), 17–35.
- Jancke, L., et al. (2000). Cerebral control of timing of movements.
- Jones, A. M., & Carter, H. (2000). Endurance training adaptations. *Sports Medicine*, 29(6), 373–386.
- Jones, A. M., & Poole, D. C. (2005). Oxygen Uptake Kinetics in Sport and Exercise.

- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance. *Journal of Physiology*, 586(1), 35–44.
- Karageorghis, C. I., & Priest, D. L. (2012). Music in exercise. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 5(1), 44–66.
- Keller, J., & Bless, H. (2008). Flow and motivation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 95(2), 463–475.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*.
- Kibler, W. B., Press, J., & Sciascia, A. (2006). The role of core stability in athletic function. *Sports Medicine*, 36(3), 189–198.
- Kirschner, S., & Tomasello, M. (2010). Joint music making. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105(4), 361–375.
- Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle. *Strength and Conditioning Journal*, 22(2), 24–28.
- Lees, A. (2003). Biomechanics of racket sports. *Journal of Sports Sciences*, 21(9), 707–732.
- Lehrer, P. M., et al. (2003). Heart rate variability biofeedback effects on cardiovascular dysreflexia.
- Loades, M., et al. (2020). Wearable sensors in team sports. *Sensors*, 20(5), 1335.
- Marcora, S. M., et al. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans.
- Marder, E., & Bucher, D. (2001). Central pattern generators and the control of rhythmic movements.
- Mathis, A., et al. (2018). Pose estimation. *Nature Neuroscience*, 21(9), 1281–1289.

- Menzies, P., et al. (2010). Blood lactate clearance during active recovery after an intense running bout.
- Mero, A., Komi, P. V., & Gregor, R. J. (1992). Biomechanics of sprint running. *Sports Medicine*, 13(6), 376–392.
- Mohr, M., Krstrup, P., & Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer. *Journal of Sports Sciences*, 23(6), 593–599.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor Development in Children*. Martinus Nijhoff.
- Noakes, T. D. (2012). Fatigue is a brain-derived emotion that is a regulator of exercise performance to achieve goal-specific outcomes.
- Passos, P., Araújo, D., & Volossovitch, A. (2016). Interpersonal Coordination and Performance in Social Systems.
- Peake, J. M., Kerr, G., & Sullivan, J. P. (2018). Wearable technology in sport. *Sports Medicine*, 48(1), 1–16.
- Phomsoupha, M., & Laffaye, G. (2015). Shuttlecock dynamics and performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(8), 824–831.
- Plews, D. J., et al. (2013). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training?
- Poole, D. C., & Jones, A. M. (2012). Oxygen uptake kinetics. *Journal of Applied Physiology*, 113(6), 904–912.
- Proske, U., & Gandevia, S. C. (2012). Proprioception and motor control. *Physiological Reviews*, 92(4), 1651–1697.
- Rein, R., & Memmert, D. (2016). Team dynamics in sports. *Frontiers in Psychology*, 7, 1–12.
- Salimpoor, V. N., et al. (2011). Musical reward system. *Nature Neuroscience*, 14(2), 257–262.

- Saunders, P. U., et al. (2004). Running economy factors. *Sports Medicine*, 34(7), 465–485.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2011). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. Human Kinetics.
- Schmidt, R. C., et al. (2011). Dynamics of team coordination: Examining endpoint-based social synergies.
- Schoenfeld, B. J. (2010). Tempo training effects. *Strength and Conditioning Journal*, 32(5), 77–83.
- Schoenfeld, B. J. (2016). *Science and Development of Muscle Hypertrophy*.
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 70–76.
- Seifert, L., et al. (2010). Interacting constraints and coordination in movement. *Sports Medicine*, 40(10), 839–861.
- Seiler, S. (2010). Training intensity distribution. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 276–291.
- Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability. *Human Movement Science*, 30(5), 869–888.
- Stone, M. H., et al. (2006). Weightlifting performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(2), 510–523.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285.
- Sweller, J. (2011). Cognitive load theory. *Psychology of Learning and Motivation*, 55, 37–76.
- Terry, P. C., et al. (2020). Effects of music in exercise. *Frontiers in Psychology*, 11, 1–15.
- Thaut, M. H., & Abiru, M. (2010). Rhythmic auditory stimulation in rehabilitation of movement disorders.

- Thaut, M. H., et al. (2015). Rhythm and movement. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337, 58–66.
- Thompson, S. W., et al. (2022). Technical decay and variability in high-intensity functional training.
- Tucker, R. (2009). The anticipatory regulation of performance. *British Journal of Sports Medicine*, 43(6), 392–400.
- Ulmer, H. V. (1996). Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during graded exercise in humans by physiological feedback in a control loop.
- Vickers, J. N. (2007). Perception, Cognition, and Decision Training. *Human Kinetics*.
- Wang, L., et al. (2019). Gait and cadence analysis. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 66(9), 2634–2642.
- Williams, A. M., et al. (2020). Performance and Learning: Assessing Motor Skills.
- Wulf, G. (2013). Attentional focus and motor learning. *Human Movement Science*, 32(1), 77–84.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). Music and brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), 547–558.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), 547–558.

INTEGRATION OF ENERGY SYSTEMS IN SPORT-SPECIFIC TRAINING: IMPLICATIONS FOR PERFORMANCE OPTIMIZATION

Burak YÜCEL¹

Bircan ÖĞRÜ²

1. INTRODUCTION

One of the most important factors determining athletic performance is the efficiency of energy production processes occurring in muscle cells. The human body meets its energy needs during physical activity through various metabolic mechanisms. These systems are activated in varying degrees depending on the duration, intensity, and repetition pattern of the exercise. Consequently, training programs designed without considering the physiological characteristics of the sport may fail to deliver the desired performance gains.

Each sport possesses unique functional characteristics depending on variables such as its basic structure, the types of exercises performed, training duration, difficulty level, frequency, and intensity. During exercise, oxygen utilization, lactate accumulation leading to fatigue, and the required energy source, along with factors such as muscle fiber types and fiber distribution, result in differences in metabolic processes (Adıgüzel & Türker, 2020).

¹ Dr., Ağrı İbrahim Çeçen University, Faculty of Sport Sciences, Department of Coaching Education, ORCID: 0000-0003-4689-6036.

² Master Student, Ağrı İbrahim Çeçen University, Institute of Health Sciences, Department of Physical Education and Sports, ORCID: 0009-0006-6945-5136.

Today, exercise science requires that sport-specific performance requirements be evaluated based on energy systems. The supply of ATP required for muscle contraction occurs through three primary energy systems. Which energy system is predominantly utilized can be determined by considering the duration and intensity of the activity (Gök, 2025). In this context, a proper understanding of energy systems is of critical importance for grounding training programs in scientific principles and optimizing performance.

2. ENERGY SYSTEMS

The strength and endurance demonstrated by the human body during athletic performance depend on the energy production processes occurring within muscle cells. The resynthesis of ATP, which is essential for sustaining muscle contraction, is provided through three primary energy systems. These systems do not operate independently; depending on the duration and intensity of exercise, one system becomes dominant while the others continue to contribute.

Energy systems are classified as the phosphagen (ATP-PC), anaerobic glycolysis (lactic acid), and aerobic systems, and the activation level of these systems varies depending on the duration, intensity, and type of exercise (Gastin, 2001; Yıldız, 2012).

While the phosphagen system plays a dominant role in short-duration, high-intensity exercise, the anaerobic glycolysis system takes precedence in moderate-duration, high-intensity activities. In long-duration, low-to-moderate-intensity exercise, however, energy requirements are largely met by aerobic metabolism (Gastin, 2001).

However, energy systems are not sharply separated; they work simultaneously throughout exercise to meet the body's energy needs. This necessitates the joint consideration of energy systems in training planning.

2.1. Phosphagen System (ATP-PC)

The phosphagen system is the energy mechanism that is activated first during high-intensity, very short-duration activities. Weightlifting, short-distance sprints, or movements requiring explosive strength are examples of activities that rely on this system (Yıldız, 2012). The components stored in muscle cells—ATP and creatine phosphate (CP)—are referred to as the phosphagen system and serve as the primary energy source during maximal exercises lasting approximately 10–15 seconds (Tiryaki Sönmez et al., 2022; Tan, 2025).

In this system, energy is obtained by utilizing pre-existing ATP within the muscle and by breaking down CP to resynthesize ATP. To regenerate ATP, a phosphate group must be added to an ADP molecule. This reaction occurs via the creatine kinase enzyme, enabling energy production to occur extremely rapidly.

In muscle cells, CP stores are approximately two to three times the amount of ATP. The energy released during the breakdown of CP into its creatine and phosphate components is directly used in ATP synthesis (Civil and İç, 2020; Tan, 2025). However, the capacity of the phosphagen system is limited; as CP stores are depleted, energy production rapidly decreases, and the contribution of other energy systems increases (Hargreaves & Spriet, 2020).

This characteristic makes the phosphagen system indispensable for movements that require sudden and maximal power. Therefore, short-duration maximal efforts combined with adequate rest intervals during strength and power training are

critical for supporting the phosphagen system's capacity for resynthesis.

2.2. Anaerobic Glycolysis System (LACTIC ACID SYSTEM)

During moderate-duration and high-intensity exercise, energy production is primarily provided through anaerobic glycolysis. This system is particularly active during activities such as the 400-meter run or 100-meter swim (Yıldız, 2012). When exercise duration reaches approximately 2–3 minutes, anaerobic energy production becomes dominant.

In this process, glycogen stored in muscles and the liver is converted into glucose, broken down in an oxygen-free environment, and ATP is synthesized (Gastin, 2001; Özlük, 2024). Pyruvic acid formed under conditions where oxygen is insufficient is reduced to lactate.

This reaction occurs via the lactate dehydrogenase enzyme, enabling the regeneration of NAD^+ and thereby sustaining glycolysis.

Lactate accumulation increases intramuscular acidity, lowering pH levels and limiting the activity of certain enzymes; this leads to a decrease in performance and the onset of fatigue.

However, current research indicates that lactate is not merely a byproduct associated with fatigue but also serves as an important energy substrate and metabolic regulator (Brooks, 2020).

While approximately 3 moles of ATP are produced from 1 mole of glycogen via the anaerobic pathway, the same amount of glycogen can generate a much higher amount of ATP through aerobic metabolism (Ergen, 2017; Adıgüzel & Türker, 2020). Therefore, the anaerobic system plays a significant role in energy production during middle-distance running.

The anaerobic glycolytic system is critical for sustaining performance, particularly during repeated high-intensity exercises, and training can lead to significant improvements in lactate tolerance and buffering capacity (Hargreaves & Spriet, 2020).

2.3. Aerobic Energy System

When exercise duration exceeds a few minutes and continues for an extended period, energy requirements are largely met by aerobic metabolism. In endurance sports, energy production occurs through the use of oxygen, and this system provides sustainable energy during prolonged activities.

Aerobic metabolism enables the production of large amounts of ATP through the breakdown of carbohydrates and fatty acids in the presence of oxygen (McArdle et al., 2010).

The proportion of energy production in endurance exercises varies depending on the intensity of the activity. While the aerobic system dominates during low- and moderate-intensity exercises, the anaerobic contribution increases as exercise intensity rises (Joyner & Coyle, 2008).

The literature indicates that the contribution of aerobic metabolism can range from 50% to 95%, while that of anaerobic metabolism can range from 5% to 50% (Bassett, 2000).

Energy systems are not sharply demarcated but operate in a transitional manner depending on the characteristics of the exercise.

The aerobic system is also directly related to physiological adaptations such as mitochondrial density, capillaryization, and oxygen-carrying capacity, and these adaptations are among the key determinants of endurance performance (Hawley & Hopkins, 1995).

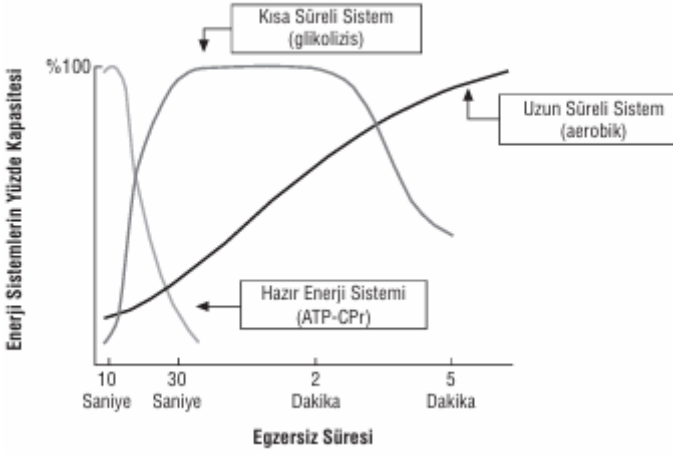


Figure 1. Different energy systems and their relative contributions during exercise (Yıldız, S. A. (2012))

3. SPORTS BASED ON BASIC PHYSICAL REQUIREMENTS

3.1. Strength and Power Sports

In strength and power sports, the phosphagen (ATP-PC) system is the primary energy source during short-duration, maximal-intensity efforts. These activities require rapid ATP resynthesis, which is supported by sufficient recovery intervals to allow for phosphagen replenishment. Accordingly, maximal strength and explosive power training constitute the fundamental components of performance development in these sports.

Gymnastics represents a complex discipline that integrates flexibility, strength, speed, and high-intensity performance sequences. The duration of routines varies across apparatuses, ranging from a few seconds (e.g., vault) to approximately 90 seconds (e.g., floor exercises). Due to the short-duration and high-intensity nature of these movements, energy production in gymnastics is predominantly anaerobic. It has been

reported that approximately 90% of the energy demand is met by the ATP-PC and anaerobic glycolytic systems, while the aerobic system contributes to a lesser extent (Mathews & Fox, 1976). Nevertheless, aerobic capacity remains important for facilitating recovery between routines and sustaining performance across repeated efforts (Suchomel et al., 2018).

Similarly, wrestling is characterized by high-intensity, intermittent efforts that rely heavily on anaerobic energy systems, particularly the ATP-PC and anaerobic glycolytic pathways. The sport requires a combination of maximal strength, rapid reaction time, agility, neuromuscular coordination, and high anaerobic capacity. Despite the predominance of anaerobic metabolism, aerobic capacity plays a supportive role by enhancing recovery processes and maintaining performance during repeated bouts (Chaabene et al., 2017).

Current literature highlights that performance improvements in strength and power sports are largely dependent on neuromuscular adaptations and the development of phosphagen system capacity (Cormie et al., 2011; Suchomel et al., 2016). Therefore, training programs should primarily focus on high-intensity, short-duration efforts, while also incorporating strategies to support recovery and sustain repeated performance.

3.2. Endurance Sports

Endurance performance is primarily determined by the ability of the muscular and cardiovascular systems to sustain energy production and utilization during prolonged exercise (Bassett & Howley, 2000). This capacity largely depends on the efficiency of the aerobic energy system, which supports continuous ATP resynthesis through oxygen-dependent metabolic processes (Joyner & Coyle, 2008).

Aerobic endurance training induces a range of physiological adaptations that enhance oxidative capacity. These

include increases in mitochondrial density, capillaryization, and oxidative enzyme activity, all of which contribute to improved energy production and delayed onset of fatigue (Hawley & Hopkins, 1995). As a result, athletes are able to maintain performance over extended periods and perform at higher relative intensities.

In endurance-based disciplines such as marathon running, triathlon, long-distance swimming, and cycling, the aerobic energy system serves as the dominant source of energy during prolonged, moderate-to-low-intensity exercise. Performance in these sports is closely associated with key physiological parameters, including maximal oxygen uptake (VO_{2max}), lactate threshold, and exercise economy (Seiler, 2012; Joyner, 2017).

Furthermore, long-term endurance training promotes significant improvements in oxygen transport and utilization capacity, supporting sustained muscle activity and enhancing overall performance. These adaptations are considered fundamental determinants of endurance performance and play a critical role in the athlete's ability to resist fatigue and maintain efficiency during prolonged exercise (Granata et al., 2018).

4. THE ROLE OF ENERGY SYSTEMS IN SPORTS

4.1. The Role of Energy Systems in Strength and Power Sports

Strength and power sports are characterized by short-duration, high-intensity muscle contractions that require rapid energy production. In these activities, the phosphagen (ATP-PC) system serves as the primary energy source, enabling immediate ATP resynthesis for maximal efforts (Yıldız, 2012; Tan, 2025). However, as effort duration increases, its contribution is complemented by anaerobic glycolysis.

Performance in these sports is closely associated with phosphagen system capacity and neuromuscular efficiency, including rapid ATP turnover, high motor unit recruitment, and the ability to generate maximal force in minimal time. Accordingly, training strategies should focus on enhancing both phosphagen system function and neuromuscular performance.

Training protocols should incorporate short-duration maximal efforts combined with sufficient recovery intervals to allow for phosphocreatine resynthesis, which is essential for sustaining repeated high-intensity performance (Tiryaki Sönmez et al., 2022). Therefore, variables such as intensity, duration, and work-to-rest ratio must be carefully structured to reflect physiological demands (Suchomel et al., 2020).

Although anaerobic systems predominate, the aerobic system contributes by supporting recovery and facilitating metabolic byproduct removal, highlighting the integrated nature of energy system function.

Current literature emphasizes that optimizing performance in strength and power sports requires a multidimensional approach involving maximal strength, explosive power, anaerobic capacity, and efficient recovery mechanisms (Pereira et al., 2024; Kumar, 2024).

4.2. The Role of Energy Systems in Endurance Sports

Endurance performance is primarily determined by the efficiency of the aerobic energy system in sustaining prolonged energy production. This depends on the ability to maintain continuous ATP resynthesis through oxygen-dependent metabolic processes (Bassett & Howley, 2000; Joyner & Coyle, 2008).

Beyond energy supply, the aerobic system also regulates fatigue and maintains metabolic stability during prolonged

exercise. Enhanced oxidative capacity allows athletes to sustain higher intensities through improved mitochondrial function, oxygen utilization, and lactate clearance.

Performance in endurance sports is influenced not only by aerobic capacity but also by key physiological parameters such as maximal oxygen uptake (VO_{2max}), lactate threshold, and exercise economy (Seiler, 2010; Joyner, 2017).

Although aerobic metabolism predominates, anaerobic energy systems contribute increasingly as exercise intensity rises, particularly during high-intensity phases such as accelerations and pacing variations. This reflects the dynamic interaction between energy systems.

Recent literature emphasizes that endurance performance is shaped by both physiological capacity and training-related factors, including intensity distribution, metabolic efficiency, and individual adaptations (Seiler & Tønnessen, 2009; Granata et al., 2021). Accordingly, training strategies should aim to optimize aerobic capacity while effectively integrating anaerobic contributions.

In summary, while the aerobic system is dominant in endurance sports, anaerobic systems provide essential complementary support, highlighting the integrative nature of energy metabolism during exercise.

5. PLANNING TRAINING SESSIONS BY SPORT

The systematic development of fundamental motor skills is essential for sustainable and balanced performance improvement. Contemporary training science emphasizes that endurance, strength, speed, and skill should be developed within a holistic and periodized framework rather than in isolation (Açıkada, 2021; Thomas, Erdman & Burke, 2016). Accordingly,

factors such as the athlete's age, training history, sport-specific physiological demands, and competition calendar must be considered during the planning process.

Training programs should be structured based on periodization principles, including preparation, competition, and transition phases, to ensure the systematic development of motor skills (Issurin, 2016). The interaction between endurance, strength, speed, and skill requires a balanced distribution of training load and effective recovery management, particularly in elite athletes (Turner, 2011).

In endurance training, workload variables such as intensity, duration, and frequency must be carefully adjusted to target both aerobic and anaerobic systems. While low-to-moderate intensity efforts enhance aerobic capacity, high-intensity interval training improves anaerobic capacity and lactate tolerance (Seiler, 2023).

Strength training should be designed according to specific performance goals, incorporating components such as maximal strength, explosive strength, and strength endurance through appropriate manipulation of training variables (Suchomel et al., 2018).

Speed training requires short-duration maximal efforts combined with full recovery intervals to optimize neuromuscular performance (Haugen et al., 2019).

Skill training should follow motor learning principles and be integrated into the training process to support continuous technical and tactical development, with an emphasis on repetition and variability of sport-specific movements (Williams & Hodges, 2023).

In conclusion, effective training planning requires a holistic approach that integrates all motor skills, ensures an

optimal balance between training load and recovery, and accounts for individual differences to support long-term performance development.

5.1. Planning Endurance Training

Endurance training is designed to develop both aerobic and anaerobic energy systems. Aerobic endurance training is typically performed at low-to-moderate intensity over prolonged durations and aims to enhance cardiovascular capacity (Jeukendrup, 2011; Seiler, 2010). These adaptations contribute to improvements in maximal oxygen consumption ($VO_2\text{max}$), mitochondrial density, and oxidative enzyme activity (Bassett & Howley, 2000; Granata et al., 2021).

In contrast, anaerobic endurance is primarily developed through high-intensity interval training (HIIT), where short-duration, high-intensity efforts improve lactate tolerance and the ability to sustain high-intensity performance (Seiler & Tønnessen, 2009). Current training approaches emphasize the importance of intensity distribution models, such as the polarized training model, in optimizing endurance performance (Seiler, 2010).

Given that endurance is a key determinant of performance across many sports, it plays a central role in training programs, particularly during the preparatory phase. However, training load must be individualized, and recovery strategies must be effectively managed to prevent overtraining and ensure long-term performance development (Joyner, 2017).

Accordingly, endurance training should be systematically structured by appropriately organizing duration, intensity, frequency, and work-to-rest ratios in line with the specific demands of the sport.

5.2. Planning Strength Training

Strength is a fundamental determinant of athletic performance and includes subcomponents such as maximal strength, explosive strength, strength endurance, and hypertrophy. The development of these components should be structured according to scientific training principles and periodization models (Suchomel et al., 2016; Grgic et al., 2023).

During the preparation phase, training primarily focuses on developing general strength and muscle balance, whereas the competition phase emphasizes sport-specific strength adaptations. Both linear and undulating periodization models have been shown to be effective in optimizing performance outcomes (Grgic et al., 2023).

Effective strength training requires the systematic manipulation of key loading parameters, including sets, repetitions, intensity (% 1RM), rest intervals, and total training volume. High loads (80–100% 1RM) with adequate rest periods are recommended for developing maximal strength and explosive power, while moderate loads (60–80% 1RM) combined with higher training volume are more suitable for hypertrophy (Schoenfeld, 2010; Schoenfeld et al., 2018).

Furthermore, maintaining an appropriate balance between training load and recovery is essential for maximizing performance and minimizing injury risk (Thomas et al., 2016). Insufficient recovery may lead to overtraining and subsequent performance decline (Kreher & Schwartz, 2012). Therefore, individual characteristics such as training history, recovery capacity, and performance goals must be considered when designing strength training programs.

5.3. Planning Speed Training

Speed refers to the ability to reach maximal velocity in a short time and is largely dependent on neuromuscular coordination. Key determinants of speed performance include reaction time, step frequency, and neuromuscular conduction velocity (Haugen et al., 2019).

Speed training should be structured as short-distance, high-intensity efforts performed with full recovery intervals to optimize neuromuscular function and maximize velocity development (Ross et al., 2001). Insufficient recovery may reduce speed capacity and shift the training stimulus toward metabolic adaptations, thereby limiting sprint performance improvements (Haugen et al., 2019).

Current literature emphasizes that speed development is closely associated with strength, power, and technical proficiency, with lower-body strength playing a critical role in sprint performance (Morin et al., 2012). Given its direct impact on competitive outcomes in many sports, speed should be maintained and developed systematically throughout the training cycle.

Accordingly, sprint training should be periodically integrated into the seasonal training plan and combined with other motor skill components to support overall performance development (Haugen et al., 2019).

5.4. Planning Skill Training

Skill training involves the systematic development and automation of sport-specific technical and tactical abilities. In line with motor learning principles, its effectiveness depends on factors such as repetition frequency, task variability, and similarity to game conditions (Williams & Hodges, 2023).

To ensure long-term retention of technical skills, training should be regularly incorporated into microcycles and supported by distributed practice, feedback mechanisms, and appropriately structured learning environments (Schmidt & Lee, 2025). Variability in practice enhances adaptability and decision-making, while different strategies are required for the development of open and closed skills (Renshaw et al., 2019).

Furthermore, perceptual-cognitive abilities such as anticipation and decision-making are critical components of skill performance, particularly in team sports (Williams & Hodges, 2023). Therefore, integrating skill training with other motor abilities supports multidimensional performance development.

In conclusion, although endurance, strength, speed, and skill are often examined separately, they function as interrelated components of performance. A holistic, periodized, and sport-specific training approach is essential for sustaining long-term performance development (Issurin, 2016; Thomas et al., 2016).

6. CONCLUSION

A comprehensive understanding of energy systems and their integration into sport-specific training models is essential for optimizing athletic performance. The phosphagen, anaerobic glycolytic, and aerobic systems contribute to energy production in varying proportions depending on exercise intensity and duration, and their interaction plays a fundamental role in performance outcomes.

In strength and power sports, short-duration, high-intensity efforts rely predominantly on phosphagen and anaerobic pathways, whereas endurance sports depend largely on aerobic metabolism. However, regardless of the sport type, energy systems function in an integrated and complementary manner,

contributing to both performance execution and recovery processes (Hargreaves & Spriet, 2020).

Effective training planning requires the holistic development of fundamental motor skills, including endurance, strength, speed, and skill, within a structured and periodized framework. Balancing training load and recovery, while accounting for individual variability, is critical for sustaining long-term performance adaptations (Issurin, 2016; Suchomel et al., 2016).

Contemporary training approaches emphasize that performance optimization depends on the integration of energy system demands with sport-specific training, supported by appropriate intensity distribution, metabolic adaptations, and neuromuscular development (Seiler, 2010; Granata et al., 2018).

In conclusion, maximizing athletic performance requires a scientifically grounded and individualized training approach that accurately reflects the interaction between energy systems and performance demands.

REFERENCES

- Açıkada, C. (2021). Antrenman bilimi ve performans planlaması. Ankara: Spor Yayınevi.
- Adıgüzel, S., & Türker, A. (2020). Spor branşlarında enerji sistemlerinin performansa etkisi. *Spor Bilimleri Dergisi*, 31(2), 85–98.
- Akbaş, A., Yılmaz, M., & Korkmaz, H. (2017). Sürat antrenmanlarının performans üzerine etkileri. *Uluslararası Spor Araştırmaları Dergisi*, 9(3), 45–53.
- Akyol, P., Bilgiç, M., & Ersoy, A. (2008). Motor öğrenme ilkeleri ve beceri gelişimi. *Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 10(1), 23–31.
- Alec Ross, Leveritt, M., & Riek, S. (2001). Neural influences on sprint running. *Sports Medicine*, 31(6), 409–425. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131060-00002>
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(1), 70–84. <https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00012>
- Baykara, M., Cana, M., Sarıkabak, M., & Aydemir, İ. (2019). Teknik ve taktik antrenman planlamasında mikro döngü uygulamaları. *Spor ve Performans Araştırmaları Dergisi*, 10(2), 112–120.
- Brooks, G. A. (2020). Lactate as a fulcrum of metabolism. *Redox Biology*, 35, 101454. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2020.101454>
- Burke, L. M., et al. (2018). Diet–exercise strategies for endurance sport. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 28(5), 451–463. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0289>

- Chaabene, H., et al. (2012). Profile of elite karate athletes. *Sports Medicine*, 42(10), 829–843. <https://doi.org/10.2165/11633050-000000000-00000>
- Civil, T., & İç, Y. (2020). Kas fizyolojisi ve enerji metabolizması. *Spor Sağlık Bilimleri Dergisi*, 5(1), 33–41.
- Ergen, E. (2017). Egzersiz fizyolojisinde enerji sistemleri. İstanbul: Akademi Yayıncılık.
- Esteve-Lanao, J., et al. (2007). Training intensity distribution. *J Strength Cond Res*, 21(3), 943–949. <https://doi.org/10.1519/R-19725.1>
- Gastin, P. B. (2001). Energy system interaction. *Sports Medicine*, 31(10), 725–741. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00003>
- Gençoğlu, C., & Çabuk, S. (2024). Sporda fizyolojik adaptasyonlar. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub487.c2021>
- Gök, B. (2025). Dar alan oyunlarında uygulanan manipülasyonların kadın futbolcularda nöromusküler yorgunluk, fizyolojik, fiziksel ve teknik parametrelere etkisi. (Doktora Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. İstanbul.
- Granata, C., et al. (2018). Mitochondrial adaptations. *Sports Medicine*, 48(8), 1809–1828. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0936-y>
- Granata, C., et al. (2021). Mitochondrial proteome. *Nature Communications*, 12, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27153-3>

- Grgic, J., & Grgic, I. (2023). Resistance training–induced gains in rate of force development are maintained during training cessation: A meta-analysis. *Strength & Conditioning Journal*, 45(3),325-332. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000740>
- Halil, U. Ç. A. R. Boks Branşında Dayanıklılık Ve Kondisyon Geliştirme. *Bireysel Sporlar ve Performansın*, 23.
- Hargreaves, M., & Spriet, L. L. (2020). Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nature metabolism*, 2(9), 817-828. <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4>
- Haugen, T., Seiler, S., Sandbakk, Ø., & Tønnessen, E. (2019). The training and development of elite sprint performance: an integration of scientific and best practice literature. *Sports medicine-open*, 5(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s40798-019-0221-0>
- Hawley, J. A., & Hopkins, W. G. (1995). Power systems paradigm. *Sports Medicine*, 19(4), 240–250. <https://doi.org/10.2165/00007256-199519040-00003>
- Issurin, V. B. (2016). Benefits and limitations of block periodized training approaches to athletes’ preparation: a review. *Sports medicine*, 46(3), 329-338. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0425-5>
- Jeukendrup, A. (2011). Nutrition for endurance sports. *J Sports Sci*,29(S1),S91–S99. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.610348>
- Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Physiology of champions. *J Physiol*,586(1),35–44. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.143834>
- Joyner, M. J. (2017). Physiological limits to endurance exercise performance: influence of sex. *The Journal of*

physiology, 595(9),2949-2954.

<https://doi.org/10.1113/JP272268>

Kıyıcı, F., & Yaşa, Ö. (t.y.). Dayanıklılık sporlarında aerobik performans parametreleri. Spor Bilimleri Araştırmaları Dergisi, 4(1), 55–63.

Kreher, J. B., & Schwartz, J. B. (2012). Overtraining syndrome: a practical guide. Sports health, 4(2), 128-138. <https://doi.org/10.1177/1941738111434406>

Kumar, M. (2024). The Impact of Strength, Power, and Anaerobic Training on Wrestling Performance Outcomes. INTESAB AALAMI, 12(5), 11-15.

Malsagova, K., Kopylov, P., & Petrov, A. (2021). Strength periodization models in competitive athletes. Journal of Human Sport and Exercise, 16(2), 345–356. Mathews, D. K., & Fox, E. L. (1976). The physiological basis of physical education and athletics. Philadelphia: Saunders.

McArdle, W. D., Katch, F. I., & Katch, V. L. (2010). Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance. Lippincott Williams & Wilkins.

Morin, J. B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P., & Lacour, J. R. (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. European journal of applied physiology, 112(11), 3921-3930. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2379-8>

Nøst, H. L., Aune, M. A., & van den Tillaar, R. (2024). The Effect of Polarized Training Intensity Distribution on Maximal Oxygen Uptake and Work Economy Among Endurance Athletes: A Systematic Review. Sports, 12(12), 326. <https://doi.org/10.3390/sports12120326>

- Özlük, M. S. (2024). Anaerobik metabolizma ve performans ilişkisi. *Spor Bilimleri ve Performans Dergisi*, 12(1), 14–22.
- Özlük, M. S. (2024). Tekrarlı sprint ve pliometrik antrenmanların aerobik ve anaerobik performansa etkilerinin karşılaştırması. (Yüksek Lisans Tezi). Erzurum Teknik Üniversitesi / Sağlık Bilimleri Enstitüsü / Beden Eğitimi ve Spor Ana Bilim Dalı. Erzurum.
- Pereira, W. R., et al. (2024). *Strength and Power Sports*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367766924-RESS188-1>
- Pınar, S. (1991). Cimnastikte enerji sistemlerinin değerlendirilmesi. Ankara: Gazi Üniversitesi Yayınları.
- Pınar, S. (1991). Üst seviyedeki Türk cimnastikçilerinde seri sonrası laktik asit miktarının ölçülmesi ve diğer parametrelerle (Seri Süresi, yorgunluğu, puanı) karşılaştırılması. *Journal of Physical Education and Sports Studies*, 2(5), 16-19.
- Renshaw, I., Davids, K., Araújo, D., Lucas, A., Roberts, W. M., Newcombe, D. J., & Franks, B. (2019). Evaluating weaknesses of “perceptual-cognitive training” and “brain training” methods in sport: An ecological dynamics critique. *Frontiers in psychology*, 9,2468. |<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02468>
- Rosenblat, M. A., Watt, J. A., Arnold, J. I., Treff, G., Sandbakk, Ø. B., Esteve-Lanao, J., ... & Seiler, S. (2025). Which training intensity distribution intervention will produce the greatest improvements in maximal oxygen uptake and time-trial performance in endurance athletes? A systematic review and network meta-analysis of

- individual participant data. *Sports Medicine*, 55(3), 655-673. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02149-3>.
- Schoenfeld, B. J. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2857–2872. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e840f3>
- Schoenfeld, B. J., Contreras, B., Krieger, J., Grgic, J., Delcastillo, K., Belliard, R., & Alto, A. (2018). Resistance training volume enhances muscle hypertrophy but not strength in trained men. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 51(1), 94–103. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001764>
- Seiler, S., & Tønnessen, E. (2009). Intervals, thresholds, and long slow distance: the role of intensity and duration in endurance training. *Sportscience*, 13.
- Seiler, S. (2010). What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 276–291. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.3.276>
- Seiler, S. (2012). Training intensity distribution. In *Endurance Training: Science and Practice*.
- Seiler, S. (2023). Training intensity distribution: The why behind the what. In *Endurance Training—Science and Practice* (2nd ed.).
- Suchomel, T. J., McKeever, S. M., McMahon, J. J., & Comfort, P. (2020). The effect of training with weightlifting catching or pulling derivatives on jump adaptations. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 5(2), 28. <https://doi.org/10.3390/jfmk5020028>
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). The importance of muscular strength in athletic performance.

Sports Medicine, 46(10), 1419–1449.
<https://doi.org/10.1007/s40279-016-0486-0>

Suchomel, T. J., Taber, C. B., Sole, C. J., & Stone, M. H. (2018). Force-time differences between ballistic and non-ballistic half-squats. *Sports*, 6(3), 79.
<https://doi.org/10.3390/sports6030079>

Stöggl, T. L., & Sperlich, B. (2015). The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 6, 295.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00295>

Tan, B. (2025). Yüksek şiddetli egzersizlerde fosfojen sistemin rolü. *Egzersiz ve Spor Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1–10.

Tan, B. (2025). Bireysel Sporlarda Performansı Sürdürebilme: Enerji Sistemlerinin Rolü (pp.27-38). In: Eken, Ö. (ed.) *Bireysel Sporlarda Performans Gelişimi ve Bilimsel Uygulamalar*. Efe Akademi.
<https://doi.org/10.59617/efepub20242355>

Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2016). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and athletic performance. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 116(3), 501–528.
<https://doi.org/10.1016/j.jand.2015.12.006>

Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2016). Nutrition and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc*, 48(3), 543-568. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2015.12.006>

Tiryaki Sönmez, G., Yılmaz, A., & Demir, H. (2022). Fosfojen sistem ve kısa süreli maksimal performans. *Türkiye Spor Bilimleri Dergisi*, 6(2), 77–84.

- Turner, A. (2011). The science and practice of periodization: a brief review. *Strength & Conditioning Journal*, 33(1), 34-46. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3182171cf5>
- Wax, B., Brown, S., & Smith, J. (2021). Resistance training variables and muscular adaptations. *Strength and Conditioning Journal*, 43(4), 1–12.
- Williams, A. M., & Hodges, N. J. (2023). Effective practice and instruction: A skill acquisition framework for excellence. *Journal of Sports Sciences*, 41(9), 833-849. <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2240630>
- Yaman, Ç. (2012). Güreşte enerji sistemleri ve performans belirleyicileri. *Beden Eğitimi ve Spor Araştırmaları Dergisi*, 6(3), 88–96.
- Yıldız, S. A. (2012). *Egzersiz fizyolojisinde enerji sistemleri*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Yıldız, S. A. (2012). Aerobik ve anaerobik kapasitenin anlamı nedir. *Solunum dergisi*, 14(1), 1-8.

HAREKET VE ANTRENMAN BİLİMLERİ ALANINDA
AKADEMİK TARTIŞMALAR

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com