

EGZERSİZ BİLİMİ VE METABOLİK ADAPTASYONLAR



Editör

Doç. Dr. Nigar Küçükkubaş

BİDGE Yayınları

Egzersiz Bilimi ve Metabolik Adaptasyonlar

Editör: Nigar Küçükkubaş

ISBN: 978-625-8673-55-5

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2025

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Modern yaşam tarzının bir sonucu olan sedanter yaşam biçimi ve değişen beslenme alışkanlıkları, kardiyovasküler hastalıkları ve metabolik bozuklukları küresel ölçekte en kritik halk sağlığı sorunlarından biri haline getirmiştir. Bu bağlamda egzersiz, yalnızca bir performans bileşeni değil; metabolik homeostazın korunması, patolojik süreçlerin önlenmesi ve başarılı yaşlanma stratejilerinin oluşturulmasında en güçlü biyolojik müdahalelerden biri olarak kabul edilmektedir. Elinizdeki bu eser; egzersizin insan organizması üzerindeki karmaşık etkilerini lipid metabolizması, metabolik esneklik ve beslenme-antrenman etkileşimi ekseninde, en güncel bilimsel veriler ve uluslararası klinik kılavuzlar ışığında ele almaktadır.

Kitabın açılış bölümlerinde, dislipideminin kardiyovasküler hastalık patogenezindeki merkezi rolü, klasik lipid parametrelerinin ötesine geçilerek incelenmektedir. Aerobik egzersizin; apolipoprotein yanıtları, lipoprotein alt fraksiyonları ve aterojenik oranlar gibi ileri biyobelirteçler üzerindeki düzenleyici etkisi, mekanistik ve klinik bir çerçevede tartışılmaktadır. Bu noktada çalışma, son yıllarda tıp ve spor bilimleri dünyasında giderek daha baskın bir paradigma haline gelen **"Exercise is Medicine" (Egzersiz İlaçtır)** yaklaşımını temel bir referans noktası olarak benimsemektedir. Egzersizin farmakolojik tedavilerin bir alternatifi değil, en az onlar kadar etkili ve bütünüleyici bir "terapötik ajan" olduğu gerçeği; ESC, AHA ve ACSM gibi otoritelerin güncel önerileriyle desteklenmektedir. "Egzersiz gerçekten işe yarıyor mu?" sorusuna yüksek kanıt düzeyine sahip sistematik derlemeler ve meta-analizler temelinde yanıt verilirken; egzersiz reçetelendirilmesinde tek tip öneriler yerine, doz-yanıt ilişkisini gözetken yaklaşımlı kişiselleştirilmiş stratejilerin önemi vurgulanmaktadır.

Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, organizmanın farklı fizyolojik koşullar altında enerji kaynakları arasında geçiş yapabilme yeteneği olarak tanımlanan "metabolik esneklik" kavramı derinlemesine analiz edilmektedir. Egzersiz şiddeti ve süresine bağlı olarak substrat seçiminin nasıl optimize edildiği ve bu süreçlerin antrenman adaptasyonları üzerindeki belirleyici rolü, moleküler düzeyden makro düzeye kadar detaylandırılmaktadır. Bu bölümler, egzersiz ve spor fizyolojisinin esasını oluşturan metabolik verimlilik kavramını, klinik sağlık çıktılarıyla ilişkilendirerek spor bilimciler ve sağlık profesyonelleri için kapsamlı bir rehber sunmaktadır.

Son bölümlerde ise, direnç egzersizlerinin kas-iskelet sistemi üzerindeki anabolik etkileri; hipertrofi, performans ve toparlanma süreçleri açısından değerlendirilmektedir. Bu etkilerin beslenme stratejileri, enerji yeterliliği ve kanıta dayalı ergojenik yaklaşımlarla nasıl modüle edildiği; kas kütlesinin korunmasının metabolik sağlık ve fonksiyonel bağımsızlık üzerindeki hayati rolüyle birlikte sunulmaktadır.

Bu eserin ortaya çıkmasında katkı sağlayan, akademik birikimlerini titizlikle paylaşan tüm yazarlara teşekkür ederim. Moleküler yanıtlardan klinik uygulamalara kadar uzanan bu geniş yelpazedeki içeriğin; spor bilimleri öğrencilerine, antrenörlere, egzersiz fizyologlarına ve egzersizi çağdaş bir tedavi modalitesi olarak kabul eden tüm araştırmacılara önemli bir katkı sağlamasını temenni ediyorum.

Editör

Dr. Nigar KÜÇÜKKUBAŞ

Aralık, 2025

İÇİNDEKİLER

AEROBİK EGZERSİZDEN LİPİD METABOLİZMASINA: APOLİPOPROTEİN YANITLARI VE KARDİOVASKÜLER RİSKİN YENİDEN TANIMLANMASI.....	6
NİGAR KÜÇÜKKUBAŞ	6
SULTAN HARBİLİ	6
EGZERSİZLE METABOLİK ESNEKLİĞİN DÜZENLENMESİ: SUBSTRAT KULLANIMI VE ANTRENMAN ADAPTASYONLARI.....	30
NİGAR KÜÇÜKKUBAŞ	30
SİNEM HAZIR AYTAZ	30
DİRENÇ EGZERSİZLERİ VE BESLENME: PERFORMANS, HİPERTROFİ VE TOPARLANMA PERSPEKTİFİ	56
Mehmet PENSE	56

AEROBİK EGZERSİZDEN LİPİD METABOLİZMASINA: APOLİPOPROTEİN YANITLARI VE KARDİYOVASKÜLER RİSKİN YENİDEN TANIMLANMASI

**NİGAR KÜÇÜKKUBAŞ¹
SULTAN HARBİLİ²**

Giriş

Kardiyovasküler hastalıklar, dünya genelinde en sık görülen ölüm nedeni olmaya devam etmekte olup, büyük ölçüde hareketsizlik, sağlıksız beslenme ve obezite gibi değiştirilebilir yaşam tarzı faktörleriyle ilişkilidir. Dünya Sağlık Örgütü'ne göre bu davranışsal risk faktörleri; yüksek kan basıncı, bozulmuş glikoz metabolizması ve yükselmiş kan lipid düzeyleri (total kolesterol, trigliseridler ve ilişkili lipoproteinler) gibi ölçülebilir ara biyobelirteçler üzerinden ateroskleroz gelişimini hızlandırmakta ve kardiyovasküler riskleri artırmaktadır. Bu bağlamda, kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi ve yönetiminde tedavi

¹ Doç. Dr., Yalova Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Rekreasyon Bölümü, Yalova, Türkiye Orcid: 0000-0003-0886-8923

² Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, Konya, Türkiye, ORCID: 0000-0003-4173-5516

yaklaşımının yalnızca farmakolojik stratejilerle sınırlandırılmaması; kan lipid profili dahil olmak üzere temel risk faktörlerini hedefleyen düzenli fiziksel aktivite ve yapılandırılmış egzersiz müdahalelerinin tedavi süreçlerine entegre edilmesi gerekmektedir. Egzersiz, lipid metabolizması üzerindeki düzenleyici etkileri sayesinde kardiyovasküler riskin azaltılmasında hem koruyucu hem de tamamlayıcı bir tedavi bileşeni olarak öne çıkmaktadır (World Health Organization [WHO], 2025).

Dislipideminin kardiyovasküler hastalık patogenezindeki bu belirleyici rolü, tedavi yaklaşımlarında yalnızca farmakolojik stratejilere odaklanılmasının yetersiz kalabileceğini göstermektedir. Son yıllarda artan sayıda epidemiyolojik ve boylamsal çalışma, dislipidemi riskinin fiziksel aktivite düzeyi ile ters yönde ilişkili olduğunu ve bu ilişkinin doğrusal olmayan bir doz–yanıt örüntüsü sergileyebileceğini bildirmektedir. Özellikle orta yaş ve yaşlı bireyleri kapsayan geniş ölçekli kohort ve epidemiyolojik analizler, orta–yüksek düzeyde fiziksel aktivitenin dislipidemi insidansında anlamlı bir azalma ile ilişkili olduğunu ve bu koruyucu etkinin belirli bir fiziksel aktivite eşiğine kadar artış gösteren, doğrusal olmayan bir doz–yanıt örüntüsü sergilediğini ortaya koymaktadır. Buna karşın, daha yüksek fiziksel aktivite düzeylerinde bu etkinin plato eğilimine girdiği, dolayısıyla “daha fazla aktivite her zaman daha fazla yarar sağlar” varsayımının geçerli olmayabileceği bildirilmektedir (Wan ve ark., 2025). Son yıllarda artan kanıtlar, dislipideminin yalnızca farmakolojik yaklaşımlarla değil, yaşam tarzı temelli müdahalelerle de etkili biçimde modifiye edilebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, sistematik inceleme ve meta-analizler, düzenli aerobik ve yüksek-şiddetli egzersiz protokollerinin trigliserid, total kolesterol ve düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterol düzeylerinde iyileşme ile ilişkili olduğunu; özellikle orta yaş ve yaşlı bireylerde aerobik egzersizin yüksek yoğunluklu lipoprotein kolesterol düzeylerini anlamlı

biçimde artırdığını göstermektedir (Smart ve ark., 2025; Liang, 2025).

YAŞLA BİRLİKTE LİPİD PROFİLİ DEĞİŞİMLERİ

Yaşlanma süreci, lipid metabolizmasının düzenlenmesinde belirgin bozulmalarla karakterizedir ve bu durum, dislipidemi, insülin direnci, kronik düşük dereceli inflamasyon ve mitokondriyal bozukluk gibi yaşa bağlı patofizyolojik süreçlerin ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktadır. Özellikle yaşlanmayla birlikte trigliserid düzeylerinde artış, lipoprotein alt gruplarındaa aterosklerotik risk oluşturan değişimler gözlenmektedir. Bu lipid türleri hücresel stres yanıtlarını aktive ederek hücresel yaşlanma ve organ fonksiyon kaybını hızlandırmaktadır (Zhao ve ark 2021). Çalışmalar lipaz enzimlerinin ve lipoprotein metabolizmasının yaşlanma ve yaşam süresinin düzenlenmesinde kritik rol oynadığını göstermektedir. Yaşlanma ile birlikte lipid Emilimi, kas dokusunda trigliserid alımı ve HDL kolesterol düzeylerinin düştüğü bildirilmektedir. Buna ek olarak, lipoproteinler ve apolipoproteinlerin yaşlanma sürecinde önemli düzenleyici rollere sahip olduğu bildirilmektedir. ApoD ekspresyonunun artışı stres direncini artırırken, yaşlanmayla birlikte LDL ve HDL reseptör ekspresyonunun azalması kolesterol homeostazını olumsuz etkilemektedir.

Dislipidemi, kan dolaşımındaki lipid profilinin anormal olması durumunu ifade eden genel bir tanımdır. Yaşlı popülasyonda dislipidemisinin en yaygın formu hiperlipidemi olup, kanda lipid düzeylerinin artışı ile karakterizedir. Hiperlipidemi genellikle total kolesterol (TK), düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterol (LDL-K) ve trigliserid (TG) düzeylerinin artması ve buna eşlik eden yüksek yoğunluklu lipoprotein kolesterol (HDL-K) düzeylerinin azalması ile tanımlanır (Morvaridzadeh ve ark 2021). Lipid profilindeki bu bozulmalar kolesterolün arter duvarlarına birikimi ve depolanmasına yol açtığını, ayrıca arter duvarının iç tabakasında düz kas hücreleri

ve fibroblastların çoğalmasını artırdığını göstermektedir. Bu nedenle yaşla birlikte ateroskleroz, koroner kalp hastalığı ve diğer kardiyovasküler ve serebrovasküler hastalıkların artışı gözlenmektedir (Zhao ve ark 2021).

Son yıllarda apolipoproteinler ve lipoprotein alt fraksiyonları, kardiyovasküler riskin değerlendirilmesinde daha duyarlı biyobelirteçler olarak öne çıkmaktadır. Apolipoproteinler, lipoprotein partiküllerinin yapısal bütünlüğünü sağlamanın yanı sıra lipid taşınması, reseptör etkileşimleri ve lipaz aktivitesinin düzenlenmesinde merkezi roller üstlenmektedir. Bu özellikleri sayesinde apolipoproteinler, aterojenik ve anti-aterojenik süreçlerin doğrudan biyokimyasal yansımalarını temsil etmekte ve standart lipid profiline kıyasla ek prognostik bilgi sunabilmektedir (Downes ve ark., 2025). Ancak apolipoprotein ölçümlerinin klinik uygulamalarda sınırlı kullanımı ve yaşam tarzı müdahalelerine verdikleri yanıtların yeterince sistematik biçimde özetlenmemiş olması, bu alandaki önemli bilgi boşluklarından biri olarak dikkat çekmektedir.

EGZERSİZİN LİPİD METABOLİZMASINDA ROLÜ

Egzersiz, dislipideminin tedavisinde temel bir yaşam tarzı müdahalesi olarak ele alınmaktadır. Düzenli aerobik egzersiz lipoprotein lipaz aktivitesinin artışı, hepatik lipid metabolizmasının düzenlenmesi, LDL partiküllerinin daha küçük ve yoğun yapılar yerine daha büyük ve metabolik olarak daha az zararlı formlara yönelmesini sağlayan bir etkiye neden olur. Buna ilaveten HDL'nin üretimini ve fonksiyonel etkinliğini artırarak lipid profilinde koruyucu adaptasyonların gelişmesine katkıda bulunmaktadır.

Güncel sistematik derleme ve meta-analizler, en az orta şiddette ve yeterli süreyle uygulanan aerobik antrenmanların yalnızca toplam kolesterol, LDL ve HDL gibi temel lipid göstergelerini değil; aynı zamanda ApoA-I ve ApoB düzeyleri, lipoprotein alt

fraksiyonları ve aterosjenik risk oranları gibi daha ayrıntılı biyobelirteçleri de olumlu yönde değiştirdiğini ortaya koymaktadır (Wood ve ark., 2023).

Düzenli egzersizin standart lipid profili üzerindeki olumlu etkileri uzun süredir bilinmesine rağmen, egzersizin apolipoproteinler ve HDL alt fraksiyonları üzerindeki etkilerine ilişkin bulgular sınırlı sayıda çalışma ile rapor edilmiş ve sonuçlar arasında uyumsuzluk gözlenmiştir. Bu durum, egzersizin lipid metabolizması üzerindeki etkilerinin yalnızca klasik lipid parametreleri üzerinden değil, aynı zamanda ileri lipid biyobelirteçleri temelinde de ele alınmasını gerekli kılmaktadır (Downes ve ark., 2025).

Düzenli aerobik egzersizin lipid profili üzerindeki olumlu etkileri uzun süredir bilinmekle birlikte, bu etkilerin altında yatan fizyolojik mekanizmalar ve ileri lipid biyobelirteçleri üzerindeki yansımaları son yıllarda daha ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır (Wood ve ark., 2023; Smart ve ark., 2025a). Egzersizin şiddeti, süresi ve sıklığı gibi temel parametreler; toplam enerji harcaması ve yağ oksidasyonunu belirleyerek lipid metabolizmasının düzenlenmesinde kritik rol oynamaktadır (Li ve ark., 2024). Artan enerji harcamasıyla birlikte lipoprotein lipaz aktivitesinin yükselmesi, trigliserid düzeylerinde azalma ve lipoprotein dönüşüm süreçlerinde iyileşmelerle sonuçlanmaktadır (Smart ve ark., 2025a). Bu metabolik adaptasyonlar, apolipoprotein A-I düzeylerinde artış, apolipoprotein B ve lipoprotein(a) düzeylerinde azalma gibi ateroskleroz açısından koruyucu değişimleri beraberinde getirmektedir (Downes ve ark., 2025). Ayrıca, HDL'nin alt fraksiyonları arasında özellikle HDL-2 düzeyindeki artışın, kardiyoprotektif etkinin güçlenmesiyle ilişkili olduğu bildirilmektedir (Downes ve ark., 2025). Sonuç olarak aerobik egzersiz, yalnızca tekil lipid parametrelerini değil, aynı zamanda ApoB/ApoA-I ve total kolesterol/HDL oranları gibi aterosjenik

indeksleri de olumlu yönde etkileyerek kardiyovasküler risk profilinin bütüncül biçimde iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Wood ve ark., 2023; Smart ve ark., 2025b).

Wood ve arkadaşlarının çok değişkenli meta-analizi, en az 12 hafta süreyle ve ≥ 40 $\dot{V}O_2\text{max}$ şiddetinde uygulanan aerobik egzersiz programlarının yalnızca tekil lipid parametrelerini değil, aynı zamanda aterosklerotik apolipoprotein ve lipid oranlarını da iyileştirdiğini ortaya koymuştur (Wood ve ark., 2023). Özellikle ApoB/ApoA-I ve TC/HDL oranlarında gözlenen düşüşler, aerobik egzersizin kardiyovasküler risk profilini daha bütüncül bir şekilde iyileştirdiğini düşündürmektedir. Meta-regresyon analizleri, egzersiz hacmi, süresi ve şiddetinin lipid yanıtının büyüklüğünü belirleyen temel faktörler olduğunu göstermiştir (Wood ve ark., 2023; Smart ve ark., 2025a).

Bununla birlikte, farklı egzersiz türlerinin yaşlı bireylerde kan lipid düzeyleri üzerindeki etkileri değişkenlik göstermektedir. Çeşitli çalışmalar, aerobik egzersiz (AE) yapan yaşlı bireylerin, lipid düzeylerinde belirgin iyileşmeler sağlandığını göstermektedir (Knight, ve ark., 1999; Leitão ve ark., 2021). Benzer bir şekilde aerobik egzersizin, özellikle orta yaş ve yaşlı bireylerde HDL-K düzeylerini anlamlı biçimde artırdığı; buna karşılık direnç ve esneklik temelli egzersizlerin HDL-K üzerinde sınırlı ya da istatistiksel olarak anlamsız etkilere sahip olduğu bildirilmiştir (Liang, 2025). Dolayısıyla, özellikle HDL-K düşüklüğü ve aterosklerotik lipid profili ön planda olan bireylerde aerobik egzersizin, farmakolojik tedaviyi tamamlayıcı ve kardiyovasküler riskin uzun dönemli azaltılmasına katkı sağlayan birincil yaşam tarzı müdahalelerinden biri olarak değerlendirilmesi bilimsel açıdan güçlü biçimde desteklenmektedir.

Diğer yandan direnç egzersizi (RE) ve aerobik egzersizin her ikisinin de yaşlı bireylerde kan lipid düzeylerini azaltmada ve lipid

profilini iyileştirmede etkili olduğu bildirilmiştir (Knight ve ark., 1999). Ayrıca aerobik egzersiz ile direnç egzersizinin birlikte uygulanmasının (AE+RE) total kolesterol (TK), trigliserid (TG) ve LDL-K düzeylerini düşürdüğü gösterilmiştir (Villareal ve ark., 2007, White, ve Jacques, 2006). Güncel kanıtlar, yüksek şiddetli aralıklı antrenmanın (HIIT), tip 2 diyabet, dislipidemi ve hiperglisemi ile ilişkili dislipidemiye sahip kadın popülasyonları da dâhil olmak üzere metabolik sağlığın iyileştirilmesi açısından umut verici bir yaklaşım olabileceğini düşündürmektedir. HIIT'in kadınlarda, TK, TG ve LDL-K düzeylerini etkili biçimde azalttığı ve HDL-K düzeylerini artırdığı gösterilmiştir

Egzersize verilen lipid cevaplarında Gliserol etkin bir rol oynamaktadır, gliserol lipid metabolizmasında temel bir yapı taşı ve enerji düzenleyici moleküldür. Trigliseridlerin omurgasını oluşturarak yağ asitlerinin depolanmasını sağlar; lipoliz sırasında yağ dokusundan serbestleşir ve karaciğerde glukoneogenez yoluyla glukozu dönüştürülerek enerji üretimine katkı sağlar. Ayrıca osmotik dengeyi destekler ve hücre içi metabolik süreçlerde ara madde olarak görev alır. Sıcak iklim şartlarında gliserol desteğinin aerobik egzersiz sırasında ve sonrasında vücut hidrasyonu ve performans üzerine etkisi önemli çalışma konulardandır (Pense ve Turnagöl, 2010).

Egzersize verilen kan lipid cevapları yaşa ve kişinin antrenman durumuna bağlı olarak değişim göstermektedir, genç ve sporcu gruplarında lipid profilinde bir patoloji yoksa egzersizden etkilenmediği söylenebilir. En az iki yıllık futbol geçmişi olan 21 amatör erkek futbolcuda sekiz haftalık kuvvet antrenmanına ek olarak yüksek şiddetli interval (HIIT) veya yüksek şiddetli fonksiyonel antrenman (HIFT) uygulamasının (Trigliserit, HDL, LDL ve Total Kolestrol) üzerinde etkisinin olmadığı gösterilmiştir (Arslan ve ark., 2025). Diğer yandan HDL düzeyi 1 önemli bir sorundur Düşük HDL-K düzeylerine sahip erkek bireylerde düzenli

aerobik koşu egzersizinin lipid profili ve vücut kompozisyonu üzerindeki etkileri araştırılan çalışmada antrenman grubuna 8 hafta boyunca haftada üç gün, %50–70 şiddetinde ve 45–60 dakika süreyle aerobik koşu programı uygulanmıştır. Antrenman sonrası antrenman grubunda vücut ağırlığı, toplam deri kıvrım kalınlığı ve trigliserid düzeyleri azalırken, VO₂maks ve HDL-K düzeyleri anlamlı biçimde artmış; toplam kolesterol ve LDL-K düzeylerinde ise anlamlı bir değişiklik görülmemiştir. Araştırmacılar, aerobik egzersizin vücut kompozisyonu ve lipid profili üzerinde olumlu etkiler sağladığını, ancak diyet desteği olmaksızın HDL-K'nin normal düzeylere ulaşmasının sınırlı kalabileceğini vurgulamıştır (Revan ve ark., 2011).

HİPERTANSİYON VE DİYABETTE KAN LİPİD DÜZEYİ EGZERSİZ İLİŞKİSİ

Hipertansiyon ve hiperlipidemi, yaşı bireylerin yaklaşık %70'ini etkilemektedir (Dalal ve ark., 2012; Go ve ark., 2013). Sürekli yüksek kan basıncı ile karakterize edilen hipertansiyon, inme ve kardiyak yapısal bozukluklar dâhil olmak üzere birçok olumsuz sağlık sonucu ile yakından ilişkilidir Hipertansiyon ile yüksek kolesterol sıklıkla birlikte görülmekte ve bu durum “hipertansif dislipidemi” (HD) olarak adlandırılmaktadır (Dalal ve ark., 2012; Kannel, 2000). Bu birlikteliğin obezite ve hormonal dengesizlikler gibi ortak risk faktörleriyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yüksek kolesterol düzeyleri arteriyel hasara yol açarak ateroskleroz gelişimini desteklemekte ve kan basıncı düzenlenmesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Otsuka ve ark., 2016).

Düzenli egzersiz ve sağlıklı yaşam alışkanlıkları, özellikle sistemik arteriyel hipertansiyon tanısı almış yaşı bireylerde kan basıncını düşürerek önemli yararlar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra düzenli fiziksel aktivite; vücut kompozisyonunu, kas kuvvetini ve

yaşlı bireylerde bağımsızlık ile yaşam kalitesini artıran diğer temel fonksiyonel özellikleri de iyileştirmektedir.

Yaşlı ve hipertansif bireyleri kapsayan daha güncel bir meta-analiz ise, aerobik egzersizin LDL ve trigliserid düzeylerini düşürdüğünü, HDL düzeylerini ise artırdığını göstermektedir (Hejazi ve ark., 2025). Bu çalışmada özellikle aerobik ve kombine egzersiz protokollerinin lipid profili üzerinde direnç egzersizlerine kıyasla daha belirgin etkiler oluşturduğu bildirilmiştir. Ayrıca cinsiyet ve beden kütle indeksinin egzersize verilen lipid yanıtını etkileyebileceği vurgulanmıştır (Hejazi ve ark., 2025). Meta-analiz bulguları daha ayrıntılı incelendiğinde, aerobik egzersiz, direnç egzersizi ve kombine egzersiz protokollerinin düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterol (LDL-K) ve trigliserid düzeylerinde anlamlı azalmalar sağladığı; buna karşılık yüksek yoğunluklu lipoprotein kolesterol (HDL-K) düzeylerindeki artışın özellikle aerobik ve kombine egzersiz uygulamalarında belirgin olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, egzersiz müdahalelerinin etkinliğinin cinsiyet ve beden kütle indeksi (BKİ) gibi bireysel faktörlerden etkilendiği; kan basıncı ve lipid profiline verilen yanıtların demografik gruplar arasında farklılık gösterebildiği bildirilmektedir. Söz konusu bulgular, egzersiz eğitiminin yaşlı bireylerde hipertansiyon ve dislipidemi yönetiminde etkili bir farmakolojik olmayan müdahale olduğunu desteklemekle birlikte, egzersiz reçetelerinin optimize edilebilmesi ve egzersiz sıklığı ile şiddeti gibi değişkenlerin lipid yanıtları üzerindeki özgül etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için ileri araştırmalara gereksinim olduğunu göstermektedir (Hejazi ve ark., 2025).

Yağ metabolizmasında etkin olan bir başka hormon ise Leptindir. Leptin, yağ asidi oksidasyonunu artırarak ve lipolizi uyararak trigliserid birikimini azaltan, lipid metabolizmasının önemli bir düzenleyicisidir. Karaciğerde VLDL üretimini baskılayarak plazma trigliserid düzeylerinin düşmesine katkı sağlar

ve periferik dokularda lipid kullanımını artırır. Ancak leptin direncinin görüldüğü durumlarda bu olumlu etkiler azalmakta ve olumsuz lipid profiliyle ilişki ortaya çıkabilmektedir. Leptinin besin alımı ve enerji harcaması üzerindeki düzenleyici etkileri nedeniyle leptin ile egzersiz arasındaki ilişki ilgi çekmektedir. 18–27 yaş aralığındaki 30 sağlıklı bireyde elit halterciler ile egzersiz yapmayan kontrol grubunun plazma leptin düzeyleri karşılaştırılan bir çalışmada elit haltercilerde leptin düzeylerinin kontrol grubuna göre anlamlı derecede düşük olduğunu ve düzenli fiziksel aktivitenin leptin salınımını etkilediğini göstermiştir (Arıkan ve ark., 2008)

Diyabet, özellikle tip 2 diyabet, karbonhidrat ve lipid metabolizmasında çok yönlü bozulmalarla karakterize kronik bir metabolik hastalıktır. Diyabetli bireylerde sık görülen dislipidemi paterni ; artmış trigliserid (TG) düzeyleri, düşük yüksek yoğunluklu lipoprotein kolesterol (HDL-K) düzeyleri ve normal ya da hafif yüksek düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterol (LDL-K) konsantrasyonlarına rağmen artmış küçük ve yoğun LDL partikülleri ile tanımlanmaktadır. Bu aterosjenik lipid profili, diyabetli bireylerde kardiyovasküler hastalık riskinin belirgin şekilde artmasına katkı sağlamaktadır (Taskinen, 2003; Vergès, 2015).

İnsülin direnci, diyabete eşlik eden lipid bozukluklarının temel patofizyolojik mekanizmalarından biri olarak kabul edilmektedir. İnsülinin adipoz dokuda lipolizi baskılayıcı etkisinin azalması, serbest yağ asidi akışını artırarak hepatik trigliserid sentezini ve çok düşük yoğunluklu lipoprotein (VLDL) üretimini hızlandırmaktadır. Bu nedenle diyabetli bireylerde lipid yönetimi, glisemik kontrol kadar önemli bir tedavi hedefi olarak kabul edilmektedir (Ginsberg, 2000; Adiels ve ark., 2008). Düzenli egzersiz, glisemik kontrolden bağımsız olarak lipid metabolizması üzerinde olumlu etkiler göstermekte; aerobik ve direnç egzersizlerinin lipoprotein lipaz aktivitesini artırarak trigliserid düzeylerini düşürdüğü, HDL-kolesterolü yükselttiği ve LDL partikül

dağılımını daha az aterojenik bir profile doğru kaydırıldığı bildirilmektedir. Ayrıca egzersizle artan iskelet kası yağ asidi oksidasyonu ve insülin duyarlılığı, hepatik lipid üretiminin azalmasına katkı sağlayarak diyabetli bireylerde kardiyovasküler riskin azaltılmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır (Leon & Sanchez, 2001).

Egzersiz ve Kan Lipid Profili: Güncel Kanıtların Entegrasyonu

Egzersiz lipid profili üzerindeki etkilerine ilişkin literatürdeki kuramsal ve derleme temelli bulgular, randomize kontrollü çalışmalarla desteklendiğinde klinik açıdan daha güçlü bir anlam kazanmaktadır. Bu bağlamda Špirtović ve arkadaşlarının (2025) randomize kontrollü çalışması, “egzersiz gerçekten işe yarıyor mu?” sorusuna yüksek kanıt düzeyiyle yanıt vermekte ve alana doğrudan uygulamaya dayalı kanıtlar sunmaktadır. Çalışmada, 12 hafta süreyle haftada üç gün uygulanan yapılandırılmış grup aerobik egzersiz programlarının, BKİ yüksek genç kadınlarda HDL kolesterol düzeylerinde anlamlı artış sağladığı; buna karşılık LDL kolesterol, total kolesterol ve trigliserid düzeylerinde belirgin azalmalarla sonuçlandığı gösterilmiştir. Özellikle karma aerobik egzersiz protokollerinin lipid profili üzerindeki etkilerinin daha belirgin olduğu bildirilmiştir. Bu bulgular aerobik egzersizin yalnızca teorik olarak önerilen değil, pratikte ölçülebilir ve klinik açıdan anlamlı sonuçlar üreten etkili bir farmakolojik olmayan müdahale olduğunu ortaya koymaktadır.

Egzersiz lipid metabolizması üzerindeki olumlu etkileri, yalnızca kardiyovasküler riskin azaltılmasıyla sınırlı olmayıp, yaşlanma sürecinde fiziksel bağımsızlığın ve fonksiyonel kapasitenin korunması açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Anton ve ark., (2015) başarılı yaşlanma kavramsallaştırmasına göre, düzenli fiziksel aktivite; inflamasyon, metabolik disfonksiyon ve sedanter yaşam tarzı gibi yaşlanmaya eşlik eden biyolojik ve

davranışsal risk faktörlerini modifiye ederek, sağlıklı yaşlanmanın temel belirleyicilerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda aerobik egzersiz, lipid profili ve apolipoproteinler üzerindeki düzenleyici etkileri aracılığıyla yalnızca aterosklerotik süreci baskılamakla kalmamakta, aynı zamanda ileri yaşlarda fiziksel işlevselliğin sürdürülmesine katkı sağlayan bütüncül bir sağlık stratejisi sunmaktadır.

Bu genel bulgular, aerobik egzersizin lipid profili üzerindeki etkilerinin yalnızca kontrollü deneysel koşullarla sınırlı olmadığını; yaş, başlangıç fiziksel aktivite düzeyi, sedanterlik durumu ve eşlik eden klinik risk faktörleri gibi bireysel değişkenler doğrultusunda farklı örüntüler sergileyebileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle, egzersizin lipid metabolizması üzerindeki etkilerinin daha bütüncül biçimde değerlendirilebilmesi için, farklı yaş gruplarını, klinik alt popülasyonları ve yaşam boyu fiziksel aktivite davranışlarını ele alan güncel epidemiyolojik ve meta-analitik kanıtların birlikte incelenmesi gerekmektedir. Aşağıda sunulan çalışmalar, aerobik egzersizin lipid profili üzerindeki etkilerini sedanterlik, yaşlanma ve komorbiditeler bağlamında ele alarak, klinik uygulama ve egzersiz reçetelendirilmesine yönelik çıkarımların derinleştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Sedanter bireylerde ve klinik risk gruplarında aerobik egzersizin lipid profili üzerindeki etkileri, son yıllarda yayımlanan sistematik derleme ve meta-analizlerle daha ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur. Özellikle başlangıç HDL-K düzeyleri düşük olan bireylerde, düzenli aerobik egzersizin relatif lipid yanıtının daha belirgin olabildiği bildirilmiştir. Japon yaşlı bireyleri kapsayan çalışmalarda, ev temelli ve orta şiddette uygulanan aerobik egzersiz programlarının HDL-K düzeylerinde anlamlı artış sağladığı; bu artışın inflamatuvar belirteçlerdeki azalma ile paralel seyrettiği gösterilmiştir (Nishida ve ark., 2025).

Yaşlı bireylerde aerobik egzersizin lipid profili üzerindeki etkilerini mekanizma temelli olarak inceleyen çalışmalardan biri olan Pourmontaseri ve arkadaşları (2024), denetimsiz ve ev temelli olarak uygulanan, laktat eşiği düzeyindeki bench step egzersizlerinin, başlangıç yüksek yoğunluklu lipoprotein kolesterol (HDL-K) düzeyleri düşük olan (<63 mg/dL) yaşlı kadınlarda HDL-K düzeylerinde anlamlı artış sağladığını bildirmiştir. Aynı çalışmada, egzersiz müdahalesine paralel olarak proinflamatuvar bir sitokin olan interferon-gama (IFN- γ) düzeylerinde anlamlı azalma gözlenmiş; egzersize bağlı inflamatuvar yanıtın baskılanmasının, dolaşımdaki HDL-K düzeylerindeki artışı kısmen açıklayabileceği ileri sürülmüştür. Bu bulgular, orta şiddette aerobik egzersizin lipid metabolizması üzerindeki etkilerinin yalnızca enerji harcaması ile sınırlı olmadığını; inflamasyonun modülasyonu yoluyla HDL metabolizmasının da desteklenebileceğini düşündürmektedir (Pourmontaseri ve ark., 2024).

Geniş ölçekli meta-analiz bulguları, egzersiz ile lipid yanıtları arasındaki ilişkinin doğrusal bir doz-yanıt örüntüsü sergilemediğini, ancak belirli bir egzersiz hacmi ve sürekliliğinin aşılmasıyla klinik olarak anlamlı adaptasyonların ortaya çıktığını göstermektedir. Jun ve arkadaşları, özellikle en az 12 haftalık aerobik egzersiz programlarının HDL-K ve ApoA-I düzeyleri üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu; buna karşın egzersiz şiddetinin tek başına belirleyici olmadığını vurgulamıştır (Jun ve ark., 2024).

Yaşam boyu perspektiften değerlendirildiğinde, genç erişkin ve sedanter bireylerde erken dönemde benimsenen fiziksel aktivite alışkanlıklarının lipid metabolizması üzerinde koruyucu etkiler sağlayabileceği bildirilmektedir. Ushula ve arkadaşlarının çalışması, fiziksel aktivite düzeyi düşük genç erişkinlerde dislipidemik profilin erken yaşlarda ortaya çıkabildiğini ve yaşam tarzı temelli

müdahalelerin bu süreci modifiye edebileceğini göstermektedir (Ushula ve ark., 2024).

Bununla birlikte, aerobik egzersizin lipid profili üzerindeki etkilerinin yalnızca egzersiz şiddeti ya da haftalık enerji harcamasıyla açıklanabilecek doğrusal bir doz–yanıt ilişkisi göstermediği, ancak belirli eşiklerin aşılmasıyla klinik olarak anlamlı adaptasyonların ortaya çıktığı görülmektedir. Leon ve Sanchez’in (2001) klasik derlemesinde de vurgulandığı üzere, orta–yüksek şiddette aerobik egzersiz protokollerinin HDL-K düzeylerini artırabildiğine dair kanıtlar mevcut olmakla birlikte, egzersiz şiddeti, süresi, haftalık toplam hacim ve program uzunluğu arasında net bir doz–yanıt ilişkisi kurmak için veriler sınırlıdır. Ayrıca HDL-K yanıtı ile egzersiz süresi, haftalık hacim ya da maksimal oksijen tüketimindeki ($\dot{V}O_2\text{max}$) artış arasında anlamlı bir ilişki saptanmamış olması, lipid yanıtlarının yalnızca kardiyorespiratuvar uygunluktaki gelişmelere indirgenemeyeceğini göstermektedir (Leon & Sanchez, 2001).

Klinik açıdan değerlendirildiğinde, orta yaş ve yaşlı bireylerde lipid profilinin iyileştirilmesine yönelik farmakolojik olmayan müdahaleler arasında aerobik egzersizin öncelikli bir konuma sahip olduğu görülmektedir. Mevcut kanıtlar, aerobik egzersizin HDL-K düzeylerinde anlamlı artış sağladığını; buna karşılık direnç ve esneklik temelli egzersiz türlerinin HDL-K üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığını göstermektedir (Liang, 2025). Bu durum, dislipidemi yönetiminde egzersiz reçetesi oluşturulurken egzersiz türünün yalnızca enerji harcaması temelinde değil, lipid alt fraksiyonlarına özgü yanıtlar dikkate alınarak planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle HDL-K düşüklüğünün ön planda olduğu bireylerde aerobik egzersizlerin yaşam tarzı temelli müdahaleler arasında birincil strateji olarak ele alınması, farmakolojik tedaviyi tamamlayıcı ve kardiyovasküler

riskin uzun dönemli azaltılmasına katkı sağlayabilecek rasyonel bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

KLİNİK VE UYGULAMAYA YÖNELİK EGZERSİZ REÇETESİNE ÖNERİLER

Mevcut bulgular ve uluslararası kılavuzlar doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulabilir:

Egzersiz reçetesi bireyselleştirilmelidir.

Aerobik egzersiz programları, bireyin başlangıç düzeyi, dislipidemi profili, kardiyovasküler risk durumu ve hedefleri doğrultusunda planlanmalıdır.

Aerobik egzersiz, dislipidemi yönetiminde temel yaklaşım olarak ele alınmalıdır.

Özellikle HDL-K düşüklüğü ve aterojenik lipid profili olan bireylerde aerobik egzersizler önceliklendirilmelidir.

Egzersiz süresi ve sürekliliği ön planda tutulmalıdır.

Kısa süreli veya düzensiz uygulamalardan ziyade, en az 12 hafta süren, sürdürülebilir ve düzenli programlar hedeflenmelidir.

Egzersiz şiddeti orta–yüksek düzeyde planlanmalıdır.

Çok yüksek şiddetlerin ek lipid yararı sağladığına dair kanıtlar sınırlı olduğundan, tolere edilebilir ve sürdürülebilir şiddetler tercih edilmelidir.

Direnç ve esneklik egzersizleri destekleyici bileşenler olarak programa entegre edilmelidir.

Bu egzersiz türleri doğrudan HDL-K artışı sağlamasa da kas kuvveti, fonksiyonel kapasite ve yaşam kalitesini desteklemektedir.

Egzersiz programları uygun ısınma ve soğuma evrelerini içermelidir.

Amaç, maksimum fizyolojik faydayı en düşük riskle sağlamak ve kalıcı yaşam tarzı değişikliklerini teşvik etmektir.

KILAVUZ TEMELLİ TAVSİYELER

ACSM (American College of Sports Medicine) kardiyorespiratuvar uygunluk ve vücut kompozisyonunun geliştirilmesi için:

Haftada 3–5 gün,

Orta–yüksek şiddette (%55–90 HRmax veya %40–85 VO₂R/HRR),

20–60 dakika süreli aerobik egzersizi önermektedir.

Ayrıca direnç egzersizlerinin haftada 2–3 gün tüm büyük kas gruplarını kapsayacak biçimde uygulanması ve esneklik egzersizlerinin düzenli olarak yapılması önerilmektedir (ACSM, 2011).

AHA Amerikan Kalp Derneği (American Heart Association) ve ASA Amerikan Felç/İnme Derneği (American Stroke Association),

Dislipidemi ve kardiyovasküler hastalıkların önlenmesinde fiziksel aktiviteyi farmakolojik tedavinin öncesinde veya onunla birlikte uygulanması gereken temel yaşam tarzı müdahalelerinden biri olarak tanımlamaktadır (AHA/ASA, 2018; 2019).

ESC Avrupa Kardiyoloji Derneği (European Society of Cardiology)

ESC kılavuzları, dislipidemi ve buna bağlı kardiyovasküler riskin azaltılmasında fiziksel aktiviteyi birincil yaşam tarzı müdahaleleri arasında konumlandırmakta ve egzersizin lipid profili üzerindeki düzenleyici etkilerini vurgulamaktadır. Düzenli fiziksel aktivitenin; total kolesterol, düşük yoğunluklu lipoprotein kolesterol

(LDL-K) ve trigliserid düzeylerinde azalma sağladığı, buna karşılık yüksek yoğunluklu lipoprotein kolesterol (HDL-K) düzeylerini artırdığı bildirilmektedir (ESC, 2019; ESC, 2020).

ESC'ye göre lipid metabolizması üzerinde klinik olarak anlamlı etkiler elde edebilmek için, aerobik egzersiz temel egzersiz türü olarak önerilmektedir. Haftada en az 150–300 dakika orta şiddette veya 75–150 dakika yüksek şiddette aerobik fiziksel aktivite, lipid profili üzerinde olumlu adaptasyonlar oluşturmak için yeterli kabul edilmektedir. Bu düzeylerin altındaki fiziksel aktivitenin lipid yanıtı sınırlı kalabilmekte; daha yüksek hacimlerde ise yararın plato eğilimi gösterebileceği belirtilmektedir (ESC, 2019).

Egzersiz şiddeti açısından ESC, orta–yüksek şiddette aerobik egzersizin HDL-K artışı ve trigliserid azalması açısından daha etkili olduğunu; ancak çok yüksek şiddetli egzersizlerin lipid profiline ek bir üstünlük sağlamadığına dair kanıtların sınırlı olduğunu bildirmektedir. Bu nedenle, lipid profili hedeflenerek planlanan egzersiz reçetelerinde sürdürülebilir ve bireyin tolere edebileceği şiddetlerin tercih edilmesi önerilmektedir (ESC, 2020). Ayrıca, direnç egzersizleri, ESC kılavuzlarında lipid profili üzerindeki etkileri açısından ikincil bir rol üstlenmektedir. Direnç antrenmanlarının tek başına LDL-K veya HDL-K üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamadığı, ancak yağsız vücut kütlesini artırarak ve insülin duyarlılığını geliştirerek dolaylı yollardan lipid metabolizmasına katkıda bulunabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle direnç egzersizleri, aerobik egzersizi tamamlayıcı bir bileşen olarak haftada 2–3 gün önerilmektedir (ESC, 2019).

Bu bilgilere ek olarak, ESC egzersizin lipid profili üzerindeki etkilerinin akut değil kronik adaptasyonlar yoluyla ortaya çıktığını vurgulamaktadır. Bu bağlamda, egzersizin süresi ve sürekliliği, akut yüklenme ya da tek bir egzersiz biriminin yoğunluğundan daha

belirleyici kabul edilmekte; akut, düzensiz veya kısa süreli egzersiz uygulamalarının lipid profili üzerinde sınırlı etkiye sahip olduğu ifade edilmektedir. Bu yaklaşım, egzersizin “dozlanabilir bir tedavi” olarak ele alınması gerektiği görüşüyle örtüşmektedir (ESC, 2020).

Sonuç olarak, ESC kılavuzları kan lipid profilinin iyileştirilmesine yönelik egzersiz stratejilerinin, aerobik egzersizi temel alan, yeterli toplam süre ve haftalık hacmi hedefleyen, bireyselleştirilmiş ve sürdürülebilir programlar şeklinde yapılandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, egzersizin lipid metabolizması üzerindeki etkilerinin akut egzersiz seanslarına verilen geçici yanıtlar üzerinden değil, tekrarlayan yüklenmeler sonucunda gelişen kronik fizyolojik adaptasyonlar aracılığıyla ortaya çıktığına ilişkin kuramsal çerçeve ile uyumludur. Dolayısıyla, egzersiz reçetelendirilirken toplam egzersiz dozu ve sürekliliğin, tekil bir egzersiz seansında uygulanan şiddetten daha belirleyici olduğu kabul edilmekte; bu da egzersizin farmakolojik tedavileri destekleyen ve uzun dönem kardiyovasküler riskin azaltılmasına katkı sağlayan bütüncül bir tedavi bileşeni olarak ele alınmasını gerektirmektedir.

Bu bütüncül çerçeve değerlendirildiğinde, aerobik egzersizin lipid profili ve apolipoproteinler üzerindeki düzenleyici etkilerinin, yalnızca kısa vadeli biyokimyasal iyileşmeler olarak ele alınmaması gerektiği açıktır. Egzersize bağlı lipid ve inflamasyon adaptasyonları, yaşlanma sürecinde kardiyovasküler riskin azaltılmasının ötesinde, fiziksel bağımsızlığın korunması ve metabolik esnekliğin sürdürülmesi açısından da belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda aerobik egzersiz, dislipidemi yönetiminde farmakolojik yaklaşımları destekleyen bir müdahale olmanın yanı sıra, başarılı yaşlanmanın biyolojik ve fonksiyonel temellerini güçlendiren sürdürülebilir bir yaşam tarzı stratejisi olarak değerlendirilmelidir.

Kaynakça

Adiels, M., Olofsson, S.-O., Taskinen, M.-R., & Borén, J. (2008). *Overproduction of very low-density lipoproteins is the hallmark of the dyslipidemia in the metabolic syndrome. Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 28(7), 1225–1236.

American Heart Association. (2019). Physical activity guidelines advisory committee scientific report.

American Stroke Association. (2018). Guidelines for the prevention of stroke in patients with stroke and transient ischemic attack.

American College of Sports Medicine. (2011). ACSM position stand: Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(7), 1334–1359.

Arikan, S., Akkus, H., Halifeoglu, I., & Baltaci, A. K. (2008). Comparison of plasma leptin and zinc levels in elite athletes and sedentary people. *Cell Biochemistry and Function: Cellular biochemistry and its modulation by active agents or disease*, 26(6), 655-658.

Arslan, B., Pinar, S., & Ciloglu, F. (2025). The effects of two different concurrent training programs on specific performance, physiological and biochemical parameters in soccer players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 20(2), 658-668.

Chen, Z., Zhou, R., Liu, X., Wang, J., Wang, L., Lv, Y., & Yu, L. (2025). Effects of aerobic exercise on blood lipids in people with overweight or obesity: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Life*, 15(2), 166.

Dalal, J. J., Padmanabhan, T. N., Jain, P., Patil, S., Vasnawala, H., & Gulati, A. (2012). LIPITENSION: Interplay between dyslipidemia and hypertension. *Indian Journal of Endocrinology and*

Downes, D., Goodman, S., van der Touw, T., Ahmed, K., Neto, M. A., Wolden, M. A., & Smart, N. A. (2025). Effect of exercise training on apolipoproteins: Meta-analysis and trial sequence analysis. *International Journal of Sports Medicine*. Advance online publication.

Ginsberg, H. N. (2000). Insulin resistance and cardiovascular disease. *Journal of Clinical Investigation*, 106(4), 453–458.

Go, A. S., Mozaffarian, D., Roger, V. L., Benjamin, E. J., Berry, J. D., Borden, W. B., Turner, M. B. (2013). Heart disease and stroke statistics–2013 update: A report from the American Heart Association. *Circulation*, 127(1), e6–e245.

Hejazi, K., Ataran Iraj, Z., Saeidi, A., Hackney, A. C., Laziri, F., Suzuki, K., Laher, I., & Hassane, Z. (2025). Differential effects of exercise training protocols on blood pressures and lipid profiles in older adults patients with hypertension: A systematic review and meta-analysis. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 131, 105737.

Kannel, W. B. (2000). Fifty years of Framingham Study contributions to understanding hypertension. *Journal of Human Hypertension*, 14(2), 83–90.

Knight, S., Bermingham, M. A., & Mahajan, D. (1999). Regular non-vigorous physical activity and cholesterol levels in the elderly. *Gerontology*, 45, 213–219.

Leitão, L., Marocolo, M., de Souza, H. L. R., , Arriel, R. A., Vieira, J. G., Mazini, M., Pereira, A. (2021). Multicomponent exercise program for improvement of functional capacity and lipidic profile of older women with high cholesterol and high triglycerides.

International Journal of Environmental Research and Public Health, 18, 10731.

Leon, A. S., & Sanchez, O. A. (2001). Response of blood lipids to exercise training alone or combined with dietary intervention. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(6), S502–S515.

Li, Y., Zhai, Q., Li, G., & Peng, W. (2024). Effects of different aerobic exercises on blood lipid levels in middle-aged and elderly people: a systematic review and bayesian network meta-analysis based on randomized controlled trials. In *Healthcare*, Vol. 12, No. 13, p. 1309.

Liang, L. (2025). Effects of exercise modalities on HDL cholesterol in middle-aged and older adults: A systematic review and meta-analysis. *Medicine*, 104(2), e2070.

Liang, L., Peng, F., Wang, L., Lin, C., & Chi, H. (2025). Effects of exercise on high-density lipoprotein levels in middle-aged and older individuals: A systematic review and meta-analysis. *Medicine*, 104(6), e41493.

Morvaridzadeh, M., Agah, S., Alibakhshi, P., et al. (2021). Effects of calcium and vitamin D co-supplementation on the lipid profile: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Therapeutics*, 43, 274–296.

Nishida, Y., Tanaka, K., Hara, M., Hirao, N., Tanaka, H., Tobina, T., Ikeda, M., Yamato, H., & Ohta, M. (2015). Effects of home-based bench step exercise on inflammatory cytokines and lipid profiles in elderly Japanese females: A randomized controlled trial. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 61(3), 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2015.06.017>

Otsuka, T., Takada, H., Nishiyama, Y., Kodani, E., Saiki, Y., Kato, K., & Kawada, T. (2016). Dyslipidemia and the risk of developing hypertension in a working-age male population. *Journal of the American Heart Association*, 5(3), Article e003053

Pense, M., & Turnagöl, H. (2010). Gliserol Hiperhidrasyonunun 30 C Sıcaklıkta Dayanıklılık Koşusu Süresince Vücut Sıvı ve Elektrolit Dengesine Etkisi. *Selçuk Üniversitesi, Beden Eğitimi ve Spor Bilim Dergisi*, 12(1), 50-62.

Pourmontaseri, H., Farjam, M., Dehghan, A., Karimi, A., Akbari, M., Shahabi, S., Nowrouzi-Sohrabi, P., Estakhr, M., Tabrizi, R., & Ahmadizar, F. (2024). The effects of aerobic and resistant exercises on the lipid profile in healthy women: a systematic review and meta-analysis. *Journal of physiology and biochemistry*, 80(4), 713-725.

Revan, S., Balcı, Ş. S., Pepe, H., Kurtoğlu, F., & Akkuş, H. (2011). Aerobik Egzersizlerin Düşük HDL-Kolesterol Seviyesine Sahip Erkeklerde Lipid Profili Üzerine Etkileri. *Türkiye Klinikleri Cardiovascular Sciences*, 23(1), 16-22.

Smart, N. A., Wood, G., Pearson, M., Dieberg, G., van der Touw, T., & Kostner, K. (2025a). Exercise training for the Management of Dyslipidaemia: A position statement from Exercise and sports science Australia (ESSA). *Journal of Science and Medicine in Sport*.

Smart, N. A., Downes, D., Van Der Touw, T., Hada, S., Dieberg, G., Pearson, M. J., Wolden, M., King, N., & Goodman, S. P. (2025b). The effect of exercise training on blood lipids: Systematic review, meta-analysis and meta-regression. *Sports Medicine*. 55, 67–78.

Şpirtović, O. (2025). Group aerobic exercise improves body composition and lipid profile. *Applied Sciences*, 15(13), 7489.

Špirtović, O., Čaprić, I., Katanić, B., Govindasamy, K., Geantă, V. A., Ardelean, V. P., Salihagić, Z., Ajdinović, A., & Stanković, M. (2025). Group Aerobic Exercise Improves Body Composition and Lipid Profile in Young Women with Elevated BMI: A Randomized Controlled Trial. *Applied Sciences*, 15(13), 7489.

Ushula, T. W., Mamun, A., Darssan, D., Wang, W. Y. S., Williams, G. M., Whiting, S. J., & Najman, J. M. (2022). Dietary patterns and the risk of abnormal blood lipids among young adults: A prospective cohort study. **Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases**, 32(5), 1165–1174.

Villareal, D. T., Miller, B. V., 3rd, Banks, M., Fontana, L., Sinacore, D. R., & Klein, S. (2006). *Effect of lifestyle intervention on metabolic coronary heart disease risk factors in obese older adults*. **The American Journal of**

Wan, K., Wang, R., Yan, H., Cheng, W., Ma, F., Jin, Y., & Wang, R. (2025). Physical activity dose-response and long-term effects on dyslipidemia in Chinese adults: a CHARLS study. *BMC Public Health*, 25, 3147.

White, K., & Jacques, P. H. (2007). *Combined diet and exercise intervention in the workplace: Effect on cardiovascular disease risk factors*. **AAOHN Journal**, 55(3), 109–114.

Wood, G., Taylor, E., Ng, V., Murrell, A., Patil, A., van der Touw, T., Wolden, M., Andronicos, N., & Smart, N. A. (2023). Estimating the effect of aerobic exercise training on novel lipid biomarkers: A systematic review and multivariate meta-analysis of randomized controlled trials. *Sports Medicine*, 53(4), 871–886.

Yun, H., Su, W., Zhao, H., Li, H., Wang, Z., Cui, X., Xi, C., Gao, R., Sun, Y., & Liu, C. (2023). Effects of different exercise modalities on lipid profile in the elderly population: A meta-analysis. **Medicine (Baltimore)**, 102(29), e33854.

Zhao, S., Zhong, J., Sun, C., et al. (2021). Effects of aerobic exercise on TC, HDL-C, LDL-C and TG in patients with hyperlipidemia: A protocol of systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*, 100, e25103.

EGZERSİZLE METABOLİK ESNEKLİĞİN DÜZENLENMESİ: SUBSTRAT KULLANIMI VE ANTRENMAN ADAPTASYONLARI

**NİGAR KÜÇÜKKUBAŞ¹
SİNEM HAZIR AYTA²**

Giriş

Enerji Regülasyonunun Temeli: Metabolik Esneklik ve Fizyolojik Önemi

Enerji metabolizması, organizmanın dinlenme, beslenme durumu ve egzersiz gibi farklı fizyolojik koşullar altında, enerji gereksinimini karşılamak üzere en uygun enerji substratını kullanabilme yeteneği üzerine kuruludur. Bu süreç, karbonhidratlar (CHO), yağ asitleri ve daha sınırlı ölçüde amino asitler arasında yapılan ve substrat seçimi (fuel selection) olarak tanımlanan dinamik bir düzenleme mekanizmasını ifade eder. Substrat seçimi, özellikle egzersiz fizyolojisi bağlamında, yalnızca enerji üretiminin niceliğini değil; aynı zamanda bu üretimin sürdürülebilirliğini, verimliliğini ve

¹ Doç. Dr., Yalova Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Rekreasyon Bölümü, Yalova, Türkiye Orcid: 0000-0003-0886-8923

² Doç. Dr., Başkent Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Egzersiz ve Spor Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye Orcid: 0000-0002-0389-6020

performansın devamlılığını belirleyen temel bir fizyolojik belirleyici olarak kabul edilmektedir (Powers & Howley, 2017). Egzersiz sırasında kullanılan enerji substratlarının göreceli katkısı, yüklenmenin şiddeti ve süresi ile yakından ilişkilidir. Dinlenme ve düşük şiddetli egzersiz koşullarında enerji üretimi büyük ölçüde yağ asidi oksidasyonuna dayanırken, egzersiz şiddeti arttıkça daha hızlı ATP üretim hızına olanak tanıyan CHO oksidasyonu giderek baskın hale gelir. Yüksek şiddetli yüklenmelerde ise oksidatif kapasitenin sınırlarına yaklaşılmasıyla birlikte anaerobik glikoliz enerji üretiminde daha önemli bir rol üstlenir. Buna karşılık, uzun süreli egzersizlerde kas glikojen depolarının azalmasına paralel olarak yağ asitlerinin enerji üretimine katkısı yeniden artmakta ve bu durum, enerji arzının sürdürülebilirliğini destekleyen temel bir adaptif mekanizma olarak öne çıkmaktadır (Brooks, 1997; Romijn ve ark., 1993).

Bu fizyolojik tablo, substrat seçiminin sabit bir özellik değil; aksine organizmanın metabolik ve hormonal ortamına duyarlı, sürekli yeniden ayarlanan bir süreç olduğunu göstermektedir. Tam da bu noktada metabolik esneklik kavramı devreye girmektedir. Metabolik esneklik, organizmanın değişen enerji taleplerine ve hormonal/metabolik koşullara yanıt olarak yağ asitleri ile glikoz/CHO oksidasyonu arasında zamanında ve uygun geçişler yapabilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (Goodpaster & Sparks, 2017). Bu kapasite, pratikte açlık–tokluk durumları arasında, dinlenme ile egzersiz veya düşük ve yüksek şiddetli yüklenmeler arasında substrat kullanımının bağlama uygun biçimde düzenlenebilmesiyle görünür hale gelir.

Metabolik esneklik yalnızca hangi substratın ne oranda kullanıldığını değil; aynı zamanda bu geçişlerin ne kadar etkin, hızlı ve koordineli gerçekleştirilebildiğini de yansıtır. Bu nedenle metabolik esneklik, iskelet kası başta olmak üzere metabolik olarak aktif dokularda mitokondriyal fonksiyon ve kapasitenin bütüncül bir

göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Yeterli mitokondriyal içerik ve oksidatif kapasite, hem yağ asitleri hem de CHO'nun koşula uygun biçimde okside edilebilmesini mümkün kılarak organizmanın enerji regülasyonunu optimize eder. Bu bağlamda metabolik esneklik, egzersiz performansının sürdürülebilirliği ile metabolik sağlığın korunması arasında köprü kuran temel bir fizyolojik özellik olarak kabul edilmektedir (Lovell ve ark., 2025).

Substrat seçiminin fizyolojik koşullara göre etkin biçimde düzenlenebilmesi, metabolik sağlığın korunması ve egzersize uyum açısından kritik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, bu düzenleyici kapasitenin kaybı durumunda enerji substratları arasındaki geçişler bozulmakta ve substrat kullanımı bağlama uygun biçimde ayarlanamamaktadır. Bu durum, özellikle insülin direnci ile karakterize klinik tablolarda belirginleşen metabolik esneklikte bozulma (Metabolik İnflexibilite) kavramının ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Aşağıdaki bölümde bu bozulmanın fizyolojik temelleri ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

Metabolik Esneklikte Bozulma (Metabolik İnflexibilite) ve İnsülin Direnci İlişkisi

Metabolik esneklik, ilk olarak açlık–tokluk geçişi bağlamında tanımlanmış; sağlıklı bireylerde açlık durumunda yağ oksidasyonunun, besin alımı ve insülin uyarımı sonrası ise glikoz oksidasyonunun baskın hale gelmesi beklenmiştir. Bu fizyolojik geçişin bozulması, özellikle obezite ve tip 2 diyabet gibi durumlarda tanımlanan metabolik inflexibilite (metabolik esneklikte bozulma) kavramının temelini oluşturmuştur (Kelley & Mandarino, 2000).

Klasik olarak bu substrat etkileşimi, glikoz–yağ asidi döngüsü (Randle döngüsü) çerçevesinde açıklanmış ve artmış yağ asidi oksidasyonunun glikoz kullanımını baskılayarak insülin direncine yol açabileceği öne sürülmüştür (Randle ve ark., 1963). Ancak daha sonraki çalışmalar, insülin direnci ve obezite

durumlarında iskelet kasının bazal koşullarda beklenenin aksine artmış glikoz oksidasyonu sergilediğini, insülin uyarımı altında ise glikoz oksidasyonunun yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, sorunun tek yönlü bir substrat baskılanmasından ziyade, kas dokusunun açlık–tokluk veya dinlenim–uyarılmış haller arasında uygun substrat geçişini gerçekleştirememesi ile karakterize bir metabolik esneklikte bozulma tablosuna işaret etmektedir (Goodpaster & Kelley, 2002; Kelley & Mandarino, 2000).

Bu bozulmuş substrat düzenlemesi, iskelet kasında trigliserid ve lipid ara ürünlerinin (ör. diasilgliserol, seramid) birikimi ile ilişkilendirilmekte; söz konusu lipotoksik ürünlerin insülin reseptör sinyal yollarını bozarak insülin direncini derinleştirdiği gösterilmektedir (Shulman, 2004; Holland & Summers, 2008). Bu nedenle güncel yaklaşım, insülin direncini yalnızca glikoz metabolizmasına özgü bir bozukluk olarak değil; substrat kullanımının bağlama uygun biçimde düzenlenememesiyle karakterize edilen daha geniş bir metabolik esneklik bozukluğu çerçevesinde ele almaktadır (Goodpaster & Sparks, 2017).

Metabolik esneklikte bozulma, sıklıkla düşük maksimal yağ oksidasyonu (MYO) ve mitokondriyal yağ asidi oksidasyon kapasitesinde sınırlılıkla birlikte görülmekte; obezite, sedanter yaşam, insülin direnci ve metabolik sendrom gibi klinik tablolarla güçlü biçimde ilişkilendirilmektedir (Prior ve ark., 2014; Galgani & Fernández-Verdejo, 2021; Lovell ve ark., 2025).

Antrenman Adaptasyonlarının Fizyolojik Temeli: Metabolik Esneklik ve Substrat Dinamiği

Substrat seçimi ve metabolik esneklik, önceki bölümlerde tanımlanan kavramsal çerçevenin ötesinde, organizmanın bu uyarlanabilir kapasiteyi hangi fizyolojik mekanizmalar aracılığıyla gerçekleştirdiğini açıklayan bir altyapıya sahiptir. Bu nedenle bu bölümde, metabolik esnekliğin tanımından ziyade, substrat

kullanımının hücresel ve sistemik düzeyde nasıl düzenlendiği üzerinde durulacaktır. Bu yaklaşım, spor bilimleri ve antrenman bilimi açısından, gözlenen performans ve adaptasyon farklarının altında yatan biyolojik mekanizmaların anlaşılmasına olanak tanır.

Metabolik esneklik, mitokondrinin değişen metabolik taleplere yanıt olarak yağ ve CHO oksidasyonu arasında uygun geçişler yapabilme kapasitesini ifade eder. Bu özellik, mitokondriyal sağlığın temel bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Goodpaster & Sparks, 2017). Spor bilimleri bağlamında bu durum, bir sporcunun farklı egzersiz şiddetlerinde substrat kullanımını ne ölçüde “uygun” biçimde ayarlayabildiğinin, yalnızca performansı değil, aynı zamanda toparlanma kapasitesini de belirlediği anlamına gelmektedir.

Substrat seçimi; substrat mevcudiyeti, hormonlar, kas lifi tipi dağılımı, mitokondriyal kapasite ve enzimatik düzenleme gibi çok sayıda faktörün etkileşimiyle belirlenmektedir. Bu faktörler arasında mitokondriyal içerik ve oksidatif fonksiyon, metabolik esnekliğin hücresel düzeydeki temel belirleyicisi olarak öne çıkmaktadır. Mitokondri sayısı, fonksiyonel kapasitesi ve oksidatif enzim aktivitesi, hem yağ asitleri hem de karbonhidratların koşula uygun biçimde okside edilebilmesini mümkün kılar. Mitokondriyal yağ asidi oksidasyon kapasitesinin azalması, metabolik esneklikte bozulma erken bir belirtici olabilir; zira bu durum, intramüsküler lipid ara ürünlerinin birikimine ve insülin direncinin gelişimine zemin hazırlayabilir (Petersen & Shulman, 2018; Lovell ve ark., 2025).

Antrenman bilimi açısından bu bulgu, dayanıklılık antrenmanlarının yalnızca “daha fazla enerji harcaması” yaratmadığını; mitokondriyal kapasiteyi artırarak sporcunun submaksimal yüklenmelerde daha ekonomik bir substrat kullanımı geliştirmesini sağladığını göstermektedir. Substrat seçiminin

sistemik düzeydeki düzenlenmesinde hormonal sinyalizasyon merkezi bir role sahiptir. İnsülin, lipolizi baskılayarak serbest yağ asidi arzını azaltırken, kas hücresine glikoz alımını artırarak karbonhidrat oksidasyonunu destekler. Buna karşılık egzersiz sırasında artan katekolaminler, yağ dokusundan serbest yağ asidi mobilizasyonunu uyarak yağ oksidasyonunu ön plana çıkarır. Bu karşıt hormonal etkiler, farklı egzersiz şiddetlerinde gözlenen substrat kullanım desenlerinin fizyolojik temelini oluşturur ve antrenman şiddeti ile beslenme zamanlaması arasındaki ilişkinin anlaşılması açısından önem taşır (Powers & Howley, 2017). Bu nedenle spor bilimciler için, egzersiz öncesi ve sonrası hormonal ortamın, planlanan antrenman uyarınının metabolik hedefleriyle uyumlu olması kritik bir değerlendirme noktasıdır.

Substrat seçiminin hücresel düzeydeki kontrolü, yağ asidi taşınımı ve mitokondriye giriş basamaklarında görev alan proteinler aracılığıyla daha da incelikli biçimde düzenlenmektedir. Uzun zincirli yağ asitlerinin mitokondri içine taşınmasında kritik rol oynayan karnitin palmitoiltransferaz-1 (CPT-1) ve hücre zarında ve mitokondriyal membranda yer alan FAT/CD36 gibi taşıyıcı proteinlerin ekspresyonu ve hücre içi lokalizasyonu, yağ oksidasyon kapasitesinin önemli belirleyicileridir. Dayanıklılık antrenmanı, bu taşıyıcı proteinlerin fonksiyonel düzenlenmesini, mitokondri sayısını ve oksidatif enzim aktivitesini artırarak substrat kullanımının daha etkin ve esnek biçimde gerçekleştirilmesini desteklemektedir (Holloszy & Coyle, 1984; Jeukendrup & Venables, 2008).

Antrenman bilimi perspektifinden bakıldığında bu mekanizmalar, uzun süreli düşük–orta şiddetli yüklenmelerin neden yağ oksidasyonu adaptasyonları açısından etkili olduğunu ve metabolik esnekliğin geliştirilmesinde neden temel bir araç olarak kullanıldığını açıklamaktadır.

Yukarıda özetlenen mitokondriyal, hormonal ve enzimatik düzenleme mekanizmaları, metabolik esnekliğin hücresel ve sistemik altyapısını oluşturmaktadır. Ancak bu altyapının işlevselliği, yalnızca dinlenim koşullarında değil; özellikle organizmanın artan enerji talebiyle karşı karşıya kaldığı egzersiz sırasında belirginleşmektedir. Bu nedenle egzersiz, metabolik esnekliği hem ortaya çıkaran hem de uzun vadede geliştiren en güçlü fizyolojik uyaranlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Egzersiz ve Metabolik Esneklik: Akut Yanıttan Kronik Adaptasyona

Egzersiz, metabolik esnekliği hem değerlendiren hem de geliştiren en güçlü fizyolojik uyaranlardan biridir. Egzersiz sırasında iskelet kası, artan ve değişken enerji gereksinimini karşılamak üzere farklı substrat kaynakları arasında hızlı ve etkili geçişler yapmak zorundadır. Bu nedenle egzersize verilen metabolik yanıt, organizmanın substrat seçimini koşula uygun biçimde düzenleyebilme kapasitesini yansıtan, metabolik esnekliğin en somut göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Hawley ve ark., 2014). Spor bilimleri açısından bu durum, egzersizin yalnızca bir “enerji harcama” süreci değil; aynı zamanda metabolik düzenleme kapasitesini test eden dinamik bir stres modeli olduğu anlamına gelmektedir.

Metabolik esnekliğin fizyolojik temeli, başta iskelet kası olmak üzere metabolik olarak aktif dokularda mitokondriyal kapasite, enzimatik düzenleme ve hormonal sinyalizasyonun koordineli etkileşimine dayanmaktadır. Sağlıklı bir metabolik yanıt durumunda, açlık veya düşük yoğunluklu egzersiz koşullarında yağ asidi oksidasyonu baskınken; beslenme sonrası veya yüksek şiddetli egzersiz sırasında glikoz oksidasyonu ön plana çıkmaktadır. Bu substrat geçişleri, insülin ve katekolaminler gibi hormonların yanı sıra AMP-aktif protein kinaz (AMPK) gibi hücresel enerji

sensörleri aracılığıyla düzenlenmektedir. Özellikle iskelet kasında artmış mitokondriyal yoğunluk ve oksidatif enzim kapasitesi, hem yağ asidi hem de glikoz kullanımının egzersizin şiddeti ve süresine uygun biçimde ayarlanabilmesini mümkün kılarak metabolik esnekliğin fizyolojik altyapısını oluşturmaktadır (Hawley ve ark., 2014; Goodpaster & Sparks, 2017). Bu mekanizma, antrenmanlı bireylerin farklı egzersiz yoğunluklarında substrat kullanımını daha geniş bir aralıkta sürdürebilmelerini ve metabolik açıdan daha “uyarlanabilir” bir profil sergilemelerini açıklar.

Düzenli antrenman, bu fizyolojik altyapıyı doğrudan etkileyerek metabolik esneklikte bozulmayı hedef alan temel bir müdahale olarak öne çıkmaktadır. Antrenman; insülin duyarlılığını artırarak açlık–tokluk geçişinde substrat kullanımının daha etkin biçimde düzenlenmesine katkı sağlarken, aynı zamanda kas glikojen depolama kapasitesinin artması ve yağ asidi oksidasyonunun iyileşmesi yoluyla metabolik esnekliği hem performans hem de sağlık açısından güçlendirmektedir (Goodpaster & Sparks, 2017). Antrenman bilimi perspektifinden bakıldığında bu adaptasyonlar, bir sporcunun yalnızca daha yüksek iş yüklerini tolere edebilmesini değil; aynı zamanda bu yüklenmeler arasında daha hızlı toparlanabilmesini ve uzun vadede metabolik dayanıklılığını koruyabilmesini de mümkün kılar. Buna karşılık obezite ve fiziksel inaktivite durumlarında metabolik esneklikte bozulma daha belirgin hale gelmekte; azalmış yağ oksidasyonu kapasitesi ve insülin duyarlılığındaki bozulma, substrat seçiminin koşula uygun biçimde ayarlanmasını sınırlamaktadır (Reaven, 1988). Bu durum, egzersizin özellikle sedanter ve metabolik risk taşıyan bireylerde, metabolik esnekliğin yeniden kazanılmasına yönelik temel bir fizyolojik araç olarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Egzersizin metabolik esneklik üzerindeki bu çok boyutlu etkileri, spor bilimleri ve antrenman planlaması açısından yalnızca akut metabolik yanıtlarla sınırlı değildir. Substrat seçiminin ve metabolik uyumların uzun

vadeli performans, toparlanma ve sağlık çıktılarıyla nasıl bütünleştiği, bir sonraki bölümde spor bilimleri ve antrenman perspektifinden bütüncül olarak ele alınacaktır.

Spor Bilimleri ve Antrenman Perspektifinden Metabolik Esneklik

Bu çok katmanlı etkiler göz önüne alındığında, metabolik esneklik, kitap bölümündeki lipid profili ve CHO metabolizması başlıkları arasında köprü işlevi gören bütünleştirici bir çatı kavram olarak değerlendirilmelidir. Spor bilimleri açısından substrat seçimi ve metabolik esneklik, yalnızca “hangi substratın ne kadar kullanıldığı” sorusuyla sınırlı değildir; aksine, antrenman adaptasyonları, toparlanma kapasitesi, performans sürdürülebilirliği ve uzun vadeli metabolik sağlık ile doğrudan ilişkilidir. Düzenli antrenmanla geliştirilen metabolik esneklik, iskelet kasının yağ asitleri ile karbonhidratlar (CHO) arasındaki geçişi bağlama uygun biçimde düzenleyebilmesini sağlayarak hem dayanıklılık performansını hem de metabolik sağlığı desteklemektedir (Holloşzy & Coyle, 1984; Hawley ve ark., 2014; Goodpaster & Sparks, 2017). Dayanıklılık antrenmanının mitokondriyal kapasiteyi artırması ve yağ oksidasyonunu iyileştirmesi, submaksimal egzersizde glikojen kullanımını azaltarak substrat ekonomisini geliştirmekte; bu durum performans sürekliliği ve toparlanma süreçleri açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır (Venables & Jeukendrup, 2008; Brooks & Mercier, 1994).

Bu çerçevede metabolik esnekliğin önemi iki temel boyutta ele alınmaktadır:

Performans Boyutu: Egzersiz şiddeti ve süresi arttıkça CHO kullanımının uygun biçimde yükselmesi; uzun süreli yüklenmelerde ise yağ oksidasyonunun daha büyük pay alabilmesi, dayanıklılık performansı ve glikojen korunumu açısından kritik bir adaptasyondur (Hawley ve ark., 2014).

Sağlık Boyutu: Metabolik esneklikte bozulma, yalnızca performansı sınırlayan bir unsur değil; aynı zamanda obezite ve tip 2 diyabet gibi durumlarda gözlenen artmış kardiyometabolik riskin fizyolojik bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Reaven, 1988).

Bu bağlamda metabolik esneklik, “egzersizde hangi substrat kullanılıyor?” sorusunun ötesinde; insülin duyarlılığı, lipid-CHO etkileşimi ve kronik hastalık riskini bütüncül biçimde açıklayan bir kavram niteliği taşımaktadır. Düzenli antrenman; kasın substrat depolama ve temin süreçlerini, mitokondriyal biyogenezi ve metabolik yolların düzenlenmesini etkileyerek, hem dinlenimde hem de yüklenme sırasında substrat kullanımının daha ekonomik ve koşula uygun biçimde ayarlanmasına katkı sağlayabilir (Goodpaster & Sparks, 2017).

Bu bölümde metabolik esneklik;

(i) yağ-CHO geçişi (substrat seçimi),

(ii) egzersiz şiddeti ve süresi ile substrat kullanımı arasındaki ilişki,

(iii) antrenmanın performans ve sağlığa yansıyan metabolik uyumları ekseninde bütüncül olarak ele alınmıştır.

Substrat Seçiminin İzlenmesi: RER, Maksimal Yağ Oksidasyonu ve Crossover Point

Metabolik esnekliğin pratikte izlenebilir yüzü, organizmanın yağ oksidasyonu ile CHO oksidasyonu arasındaki dengeyi; beslenme durumu (açlık-tokluk) ve yüklenme koşulları (dinlenim-egzersiz, şiddet-süre) değiştikçe uygun yönde değiştirebilmesidir. Bu nedenle metabolik esneklik, tek bir ölçüm değeriyle tanımlanabilen bir özellik olmaktan ziyade, farklı fizyolojik koşullar altında elde edilen göstergelerin birlikte değerlendirilmesini gerektiren dinamik bir kapasite olarak ele alınmalıdır. Bu yaklaşım doğrultusunda ölçüm stratejileri, substrat seçimini doğrudan ya da

dolaylı biçimde yansıtan parametrelerin standardize koşullarda değerlendirilmesine dayanmaktadır (Goodpaster & Sparks, 2017).

Solunumsal Değişim Oranı (RER/RQ) ile Substrat Oksidasyonu

Metabolik esnekliği yansıtan en yaygın saha ve laboratuvar göstergelerinden biri Solunumsal Değişim Oranı (RER; VCO_2/VO_2) ve buna dayalı substrat oksidasyon tahminleridir. RER değeri, okside edilen baskın substratın türü hakkında bilgi sunar; yağ oksidasyonu RER ≈ 0.70 değerine yakınken, saf CHO oksidasyonu RER =1.00 civarında gerçekleşir. Bu özellik, RER'i hem dinlenim hem de egzersiz koşullarında substrat seçiminin izlenmesine olanak tanıyan pratik bir gösterge hâline getirmektedir.

Solunumsal Değişim Oranı (RER) ve Substrat Oksidasyonu

Metabolik Esneklik Yorumu:

- **Açlık/Tokluk Geçişi:** Dinlenimde, açlıkta RER'in daha düşük olması (yağ oksidasyonu baskın); tokluk veya insülin uyarımıyla RER'in yükselmesi (CHO oksidasyonu artışı) "sağlıklı substrat geçişi" olarak yorumlanır (Goodpaster & Sparks, 2017).
- **Egzersiz Yanıtı:** Egzersizde ise RER'in şiddete duyarlı artışı, CHO katkısının yükselmesini gösterir; uzun süreli egzersizde ise yağ katkısının görece artışı beklenir (Hawley ve ark., 2014).

Bununla birlikte RER değerlerinin yorumlanmasında, bireyin son besin alımı, egzersiz öncesi glikojen durumu ve egzersiz şiddetinin ventilatuvar eşiklere yakınlığı gibi faktörlerin sonuçları etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Antrenman Bilimci Yorumu:

- **Substrat Kullanım Ekonomisi (Substrat Seçimi Perspektifi):** Aynı mutlak iş yükünde ölçülen daha düşük solunumsal değişim oranı (RER) değerleri, sporcunun egzersiz sırasında enerji üretimini daha yüksek oranda yağ oksidasyonuna dayandırıldığını göstermektedir. Bu substrat kullanım paterni, submaksimal egzersiz şiddetlerinde karbonhidrat tüketim hızını sınırlayarak kas glikojen depolarının korunmasına katkı sağlar. Dayanıklılık fizyolojisi kuramları çerçevesinde bu durum, enerji arzının daha ekonomik biçimde sürdürülebilmesini mümkün kılan temel bir metabolik adaptasyon olarak değerlendirilmektedir (Brooks & Mercier, 1994; Hawley ve ark., 2014).
- **Glikojen Yönetimi ve Enerji Arzının Sürekliliği:** Substrat kullanımının yağ oksidasyonu lehine kayması, uzun süreli yüklenmeler sırasında kas glikojen depolarının daha yavaş tükenmesine olanak tanır. Bu durum, egzersizin ilerleyen safhalarında karbonhidrat bağımlılığının gecikmesine ve enerji arzının sürekliliğinin korunmasına katkı sağlar. Antrenman bilimi açısından bu mekanizma, performansın yalnızca başlangıç şiddetiyle değil, yüklenme süresi boyunca sürdürülebilmesiyle ilişkili temel bir belirleyici olarak kabul edilmektedir.
- **Yüksek Şiddet Toleransı ve Karbonhidrat Kullanım Kapasitesi:** Metabolik esneklik yalnızca yağ oksidasyonuna dayalı bir substrat ekonomisi anlamına gelmez; aynı zamanda egzersiz şiddeti arttığında karbonhidrat oksidasyonunu uygun

biçimde artırabilme kapasitesini de içerir. Bu bağlamda, performans açısından kritik olan unsur, sporcunun hedeflenen yüksek şiddetlerde gerekli olan hızlı ATP üretimini sağlayacak karbonhidrat kullanımını sürdürebilmesidir. Düşük RER değerleri, bu geçiş kapasitesi ile birlikte değerlendirildiğinde anlam kazanmaktadır (Goodpaster & Sparks, 2017).

- **Performans Sürdürülebilirliği ve Toparlanma Dinamikleri:** Uzun süreli veya yüksek yoğunluklu yüklenmeler sonrasında glikojen depolarının etkin biçimde yeniden düzenlenebilmesi, performans sürdürülebilirliğinin önemli bir bileşenidir. Substrat kullanımının egzersiz sırasında ekonomik biçimde yönetilmesi, toparlanma sürecinde glikojen sentezi ve yeniden depolanması için daha elverişli bir metabolik ortam oluşturur. Bu nedenle RER profili, yalnızca egzersiz anındaki substrat seçimini değil; yüklenme–toparlanma döngüsünün bütüncül yönetimini yansıtan bir gösterge olarak ele alınmalıdır.

Antrenman bilimi perspektifinden bakıldığında, RER tek başına “düşük” veya “yüksek” olması gereken bir değer olarak değil; farklı egzersiz şiddetlerinde yağ ve karbonhidrat kullanımının nasıl yer değiştirdiğini ortaya koyan dinamik bir profil olarak yorumlanmalıdır. Bu yaklaşım, substrat kullanım ekonomisi ile yüksek şiddet toleransını birlikte değerlendirerek, metabolik esnekliğin performans sürdürülebilirliği üzerindeki belirleyici rolünü kuramsal bir bütünlük içinde açıklamaktadır.

Egzersizde Maksimal Yağ Oksidasyonu ve Crossover Point

Laboratuvar koşullarında uygulanan kademeli egzersiz testleri aracılığıyla, farklı egzersiz şiddetlerinde yağ oksidasyon hızı tahmin edilerek bireyin Maksimal Yağ Oksidasyonu (MYO) ve bu

değerin gözlendiği egzersiz şiddeti belirlenebilmektedir. MYO, bireyin egzersiz sırasında ulaşabildiği en yüksek yağ oksidasyon hızını temsil ederken; bu parametre, metabolik esnekliğin özellikle submaksimal egzersiz koşullarındaki işlevsel bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Substrat Geçiş Noktası (Crossover Point), egzersiz şiddeti arttıkça baskın enerji kaynağının yağ oksidasyonundan CHO oksidasyonuna geçtiği şiddet düzeyini tanımlar (Hawley ve ark., 2014). Metabolik esneklik perspektifinde bu kavram, bireyin orta şiddetli egzersizlerde yağ kullanım kapasitesini ve egzersiz şiddeti yükseldikçe CHO oksidasyonuna geçişin fizyolojik olarak uygun zamanlama ile gerçekleşip gerçekleşmediğini değerlendirmeye olanak tanır. Sağlıklı ve antrenmanlı bireylerde substrat geçiş noktasının daha yüksek egzersiz şiddetlerine kaymış olması, metabolik adaptasyonun önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Antrenman Planlamasına Bağlantısı:

- 1) **Yağ Metabolizmasının Geliştirilmesi (Submaksimal Dayanıklılık Adaptasyonları):** Dayanıklılık odaklı antrenman dönemlerinde, MYO çevresinde uygulanan düşük–orta şiddetli, sürekli yüklenmeler (örneğin Zone 2 veya temel dayanıklılık antrenmanları), yağ oksidasyonuna dayanma kapasitesinin artırılmasını hedefler. Bu tür yüklenmeler, submaksimal egzersiz sırasında yağ kullanımının artırılmasına ve buna bağlı olarak karbonhidrat tüketim hızının azaltılmasına katkı sağlayarak, substrat ekonomisinin geliştirilmesinde temel bir rol oynar.
- 2) **Yüksek Şiddet Toleransı ve Karbonhidrat Kullanımının Yönetimi:** Performans ve yarış odaklı

dönemlerde ise antrenman hedefi, daha yüksek egzersiz şiddetlerinde karbonhidrat kullanımının etkin biçimde sürdürülebilmesine yöneliktir. Bu bağlamda, yeterli kas glikojen depolarının sağlanması ve yağ-CHO geçişinin hızlı ve sorunsuz biçimde gerçekleşmesi, yüksek şiddetli yüklenmelerin toleransını belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Metabolik esneklik, bu noktada yalnızca yağ oksidasyon kapasitesiyle değil; egzersiz şiddeti arttığında karbonhidrat metabolizmasına geçişin etkinliğiyle birlikte değerlendirilmelidir.

- 3) MYO ve substrat geçiş noktası kavramları, metabolik esnekliğin antrenman bilimi açısından ölçülebilir ve yönlendirilebilir boyutlarını temsil etmektedir. Bu göstergeler, sporcunun hem submaksimal egzersizlerde substrat kullanım ekonomisini hem de yüksek şiddetli yüklenmelerde karbonhidrat bağımlılığını nasıl yönettiğini ortaya koyarak, performans sürdürülebilirliği ve antrenman adaptasyonlarının değerlendirilmesinde önemli bir çerçeve sunmaktadır.

MYO–RER ve Substrat Regülasyonu: Metabolik Esnekliğin Antrenman Bilimi Çerçevesi

Metabolik esneklik kavramı tarihsel olarak, açlık–tokluk geçişinde (veya hiperinsülinemik öglisemik klemp/insülin uyarımı) substrat seçiminin değişebilmesi üzerinden tartışılmıştır. Bu çerçevede, standardize koşullarda (örneğin, sabah açlık) ölçülen RER ile, kontrollü beslenme veya insülin uyarımı sonrası RER değişiminin karşılaştırılması, bireyin substrat geçiş kapasitesi hakkında bilgi sağlar (Goodpaster & Sparks, 2017). Metabolik

esneklikte bozulma, obezite ve tip 2 diyabette bu geçişlerin—açlıkta yağ kullanımına ve uyarım altında glikoz kullanımına geçişin—bozulabildiğini vurgulamaktadır (Reaven, 1988; Randle ve ark., 1963). Bu tarihsel ve klinik çerçeve, antrenman bilimi açısından metabolik esnekliğin yalnızca bir tanım problemi değil; egzersizle düzenlenebilen, izlenebilen ve geliştirilebilen dinamik bir fizyolojik özellik olarak ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Antrenman Adaptasyonları: Akut Yanıt mı Kronik Uyum mu?

Metabolik esneklik açısından tek bir test günü elde edilen sonuçlar, son antrenman yükü, beslenme durumu, uyku kalitesi, psikolojik stres, menstrual faz ve çevresel sıcaklık gibi çok sayıda akut değişkenden etkilenebilir. Bu nedenle antrenman biliminde daha güvenilir yaklaşım, metabolik yanıtların tekil ölçümlerden ziyade, aynı protokolün benzer koşullar altında tekrarlanmasıyla elde edilen zamana bağlı eğilimler üzerinden değerlendirilmesidir. Bu bağlamda solunumsal değişim oranı (RER) profili, belirli egzersiz şiddetlerinde yağ ve karbonhidrat katkılarının dağılımı ile toparlanma sürecinde gözlenen subjektif ve objektif göstergeler birlikte ele alınmalıdır. Kronik antrenman süreci, iskelet kası ve yağ dokusunda metabolik yolların ve mitokondriyal kapasitenin yeniden düzenlenmesine yol açarak substrat kullanımının daha uyarlanabilir ve koşula duyarlı hâle gelmesini sağlar (Goodpaster & Sparks, 2017; Hawley ve ark., 2014). Bu çerçevede metabolik esneklik, akut egzersiz yanıtlarından ziyade, antrenman sürecine bağlı olarak gelişen kronik metabolik uyumların bir yansıması olarak değerlendirilmelidir; bu özellik, sporcunun performans kapasitesiyle birlikte metabolik sağlığının uzun vadeli izlenmesinde işlevsel bir araç sunar.

Obezitede Egzersiz Şiddeti, Yağ Oksidasyonu ve İnsülin Duyarlılığı Arasındaki İlişki

Obezite ve fiziksel inaktivite, metabolik esneklikte bozulmanın çekirdek bileşenleri olan lipid oksidasyonuna olan bağımlılığın azalması ve insülin duyarlılığında bozulma ile karakterize edilmektedir. Mevcut kanıtlar, bu iki durumun yalnızca eş zamanlı görülmediğini; aynı zamanda fizyolojik düzeyde birbiriyle nedensel olarak ilişkili olabileceğini düşündürmektedir (Goodpaster & Sparks, 2017). Bu bağlamda, egzersiz antrenmanının ve özellikle egzersiz şiddetinin yağ oksidasyonu ve insülin duyarlılığı üzerindeki belirleyici rolü, metabolik sağlık stratejilerinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Düşük Şiddetli Sürekli Egzersizin Metabolik Üstünlüğü

Venables ve Jeukendrup'un (2008) obez, orta yaşlı erkeklerde yürüttüğü kontrollü bir çalışma, günlük egzersiz seanslarında toplam enerji harcaması sabit tutulduğunda, egzersiz şiddetinin adaptasyonlar açısından kritik bir değişken olduğunu göstermiştir.

- **Temel Bulgular:** Bireysel maksimal yağ oksidasyonu çevresinde uygulanan sürekli, düşük şiddetli egzersiz (LSEE) yalnızca dört haftalık bir sürede egzersiz sırasında yağ oksidasyonunu yaklaşık %44 artırmış ve buna paralel olarak insülin duyarlılığında anlamlı iyileşmeler sağlamıştır (Venables & Jeukendrup, 2008).
- **Korelasyon:** En dikkat çekici bulgu, yağ oksidasyonundaki artış ile insülin duyarlılığındaki iyileşme arasında pozitif bir ilişki bulunmasıdır. Bu durum, metabolik esnekliğin iki temel bileşeninin—uygun substrat seçimi ve insülin yanıtının—egzersizle eş zamanlı olarak geliştirilebileceğini göstermektedir (Goodpaster & Sparks, 2017).

Moleküler Mekanizmalar: Lipid Ara Ürünlerinin Yönetimi

Çalışmada gözlenen yağ oksidasyonundaki artışın, plazma serbest yağ asitlerinin oksidasyonundan ziyade non-plazma kaynaklı yağ asitlerinin, özellikle de intramüsküler trigliserid havuzunun kullanımındaki artıştan kaynaklandığı belirtilmiştir (Venables & Jeukendrup, 2008). Bu durum, obez bireylerde sıklıkla rapor edilen mitokondriyal fonksiyon bozuklukları ve lipid metabolizması kısıtları ile uyumludur (Kelley & Mandarino, 2000). Yağ oksidasyonu adaptasyonlarının altında yatan mekanizmalar şunlardır:

1. **CPT-1 Aktivitesi:** Obez bireylerin iskelet kasında düşük olan Karnitin Palmitoiltransferaz-1 (CPT-1) aktivitesi, dayanıklılık antrenmanı ile artırılabilir. CPT-1, uzun zincirli yağ asitlerinin mitokondriye girişini sağlayan anahtar sınırlayıcı basamaktır (Holloway ve ark., 2009; Shulman, 2004).
2. **FAT/CD36 (FAT/CD36);** uzun zincirli yağ asitlerinin (long-chain fatty acids) hücre zarından kas hücresinin içine ve ayrıca mitokondriyal membrana taşınmasında görev alan bir taşıyıcı proteindir) Lokalizasyonu: Dayanıklılık antrenmanı, yağ asidi taşıyıcısı olan FAT/CD36'nın mitokondriyal CPT-1 ile kolokalizasyonunu artırarak yağ oksidasyonundaki artışın moleküler temelini güçlendirmektedir (Bezire ve ark., 2006; Holloway ve ark., 2009).

Bu adaptasyonlar, obezitede insülin direnci ile ilişkilendirilen diasilgliserol gibi lipotoksik lipid ara ürünlerinin birikimini azaltarak insülin sinyal yollarını dolaylı biçimde iyileştirebilir (Shulman, 2004).

Metabolik İyileşmenin Anahtarı: Şiddet Seçimi ve Sürdürülebilirlik

Venables ve Jeukendrup (2008) çalışmasının dikkat çeken bir diğer bulgusu, toplam enerji harcaması eşit tutulan interval tipte, görece daha yüksek şiddetli egzersiz programının (TPINT), yağ oksidasyonu veya insülin duyarlılığı üzerinde anlamlı bir iyileşme sağlamamış olmasıdır. Bu adaptasyon eksikliği, interval protokol sırasında toplam okside edilen yağ miktarının, sürekli düşük şiddetli egzersize kıyasla belirgin biçimde daha düşük olmasıyla açıklanmaktadır (Venables & Jeukendrup, 2008).

Literatürde yüksek şiddetli interval antrenmanının (HIIT) insülin duyarlılığını artırabildiğini gösteren çalışmalar bulunmakla birlikte, bu çalışmalar genellikle yüksek egzersiz yoğunlukları, daha yüksek toplam enerji harcaması veya akut etkileri değerlendirmiştir (Goodpaster & Sparks, 2017). Ancak obez ve sedanter bireyler açısından, düşük şiddetli maksimal yağ oksidasyonu çevresi, hem sürdürülebilirlik hem de güvenlik açısından daha uygun bir başlangıç noktası sunmaktadır.

Sonuç: Bu bulgular, obez bireylerde metabolik iyileşmelerin yalnızca "daha yoğun egzersiz" ile değil; substrat kullanımını optimize eden, bireyselleştirilmiş şiddetlerde yapılan sürekli egzersizlerle de sağlanabileceğini göstermektedir. Egzersiz, bu çerçevede, yalnızca enerji harcaması yaratan bir araç değil; metabolik esneklikte bozulmayı hedef alan, kas dokusunun lipid-karbonhidrat geçişini yeniden düzenleyen ve mitokondriyal substrat seçimini iyileştiren güçlü bir fizyolojik müdahale olarak değerlendirilmelidir (Shulman, 2004; Kelley & Mandarino, 2000).

Dayanıklılık Antrenmanı ve Metabolik Esneklik: Kronik Adaptasyonlar ve Gelecek Perspektifi

Dayanıklılık antrenmanı, iskelet kasının metabolik kapasitesini artırarak uzun vadeli adaptasyonları tetikler. Klasik çalışmalar düzenli dayanıklılık egzersizinin kas hücresindeki mitokondri sayısını, boyutunu ve oksidatif enzim aktivitesini artırdığını, böylece yalnızca karbonhidrat değil, yağ asidi oksidasyonunun da yüksek hızda sürdürülebildiğini göstermiştir (Holloszy & Coyle, 1984). Bu temel iyileşme, hem enerji üretiminin verimliliğini yükseltir hem de kasın sürekli enerji talebine daha iyi yanıt vermesine olanak tanır.

Orta şiddetli egzersizlerde, antrenmanlı kas dokusu plazma serbest yağ asitlerini daha etkin kullanabilir ve kas içi trigliserid depolarını mobilize etme yeteneği kazanır (Bergman ve ark., 1999). Böylece yağ oksidasyon hızı artarken glikojen depoları korunur; bu da uzun süreli performansın sürdürülebilirliğini ve metabolik esnekliği destekler. Substrat ekonomisi ve glikojen yönetimi için bu adaptasyon kritik önemdedir.

Güncel bulgular ise adaptasyonun yalnızca mitokondri sayısındaki artışla açıklanamayacağını, aynı zamanda mitokondriyal kalite, yağ asidi taşınımı ve metabolik yolların koordinasyonundaki iyileşmelerle yakından ilişkili olduğunu vurguluyor. Dayanıklılık antrenmanı, AMPK–PGC-1 α eksenini gibi sinyal yollarını aktive ederek yağ asidi oksidasyonuna özgü enzimlerin ve taşıyıcı proteinlerin (CPT-1, FAT/CD36) ekspresyonunu artırır (Hawley ve ark., 2014; Lovell ve ark., 2025). Bu da daha iyi düzenlenmiş bir oksidatif sistem ve mitokondriye yağ asidi girişinin kolaylaşması anlamına gelir.

Araştırmalar ayrıca dayanıklılık antrenmanının MYO değerini ve buna karşılık gelen egzersiz şiddetini yukarı doğru kaydırabildiğini, bu sayede sporcuların daha geniş bir şiddet

aralığında yağ oksidasyonuna dayanabildiğini göstermektedir (Galgani & Fernández-Verdejo, 2021; Lovell ve ark., 2025). Bu adaptasyon, hem maraton gibi uzun yarışlarda hem de yoğun antrenman dönemlerinde karbonhidrat depolarının stratejik kullanımını mümkün kılarak performans sürdürülmesine katkı sağlar. Bu durum, yağ oksidasyonundaki artışın yalnızca “daha fazla substrat” değil, daha iyi organize edilmiş bir oksidatif sistem sonucu ortaya çıktığını düşündürmektedir.

Metabolik sağlığın ötesinde, yağ oksidasyon kapasitesindeki gelişmeler antrenman yoğunluğu toleransı, toparlanma kapasitesi ve yüklenme–dinlenme dengesinin korunması açısından da kritiktir. Metabolik esneklik, organizmanın yağ ve karbonhidrat oksidasyonu arasında geçiş yapabilme yeteneğidir ve Goodpaster ve Sparks’ın (2017) belirttiği gibi, bu geçişlerin akıcı bir şekilde gerçekleşmesi hem kardiyometabolik riskleri azaltır hem de egzersiz performansını destekler. Bu nedenle, dayanıklılık antrenmanına bağlı adaptasyonlar kas dokusunu sadece daha güçlü değil, aynı zamanda substrat kullanımında daha ekonomik ve esnek hâle getirir; performans fizyolojisi ile metabolik sağlık arasında güçlü bir köprü kurar.

Gelecek Yönelimler ve Araştırma Alanları

Dayanıklılık antrenmanının yağ oksidasyon kapasitesini artırması, metabolik esnekliğin gelişimi için temel bir mekanizmadır; kas hücresi mitokondri sayısında ve fonksiyonunda artış sağlayarak yağ ve karbonhidratlar arasında uygun geçiş yapabilme yeteneğini güçlendirir. Bu geçişlerin akıcı bir şekilde gerçekleşmesi hem kardiyometabolik risklerin azalmasına hem de egzersiz performansının sürdürülmesine katkı sağlar. Gelecekteki çalışmalar, farklı antrenman türleri, beslenme periyotlama stratejileri ve bireysel farklılıkların metabolik esneklik üzerindeki etkilerini inceleyerek, hem sporcular hem de genel popülasyon için daha

kişiselleştirilmiş ve etkili müdahaleler geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

Kaynakça

Bezaire, V., Bruce, C. R., Heigenhauser, G. J. F., Tandon, N. N., Glatz, J. F. C., Luiken, J. J. F. P., Bonen, A., & Spriet, L. L. (2006). Identification of fatty acid translocase on human skeletal muscle mitochondrial membranes: Essential role in fatty acid oxidation. *American Journal of Physiology–Endocrinology and Metabolism*, 290(3), E509–E515.

Bergman, B. C., Butterfield, G. E., Wolfel, E. E., Casazza, G. A., & Brooks, G. A. (1999). Muscle triglyceride turnover during exercise. *American Journal of Physiology–Endocrinology and Metabolism*, 276(1), E118–E125.

Brooks, G. A. (1997). Importance of the “crossover” concept in exercise metabolism. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 24(11), 889–895.

Brooks, G. A. (1997). Mammalian fuel utilization during sustained exercise. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 75(6), 579–587.

Brooks, G. A., & Mercier, J. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 22, 1–40.

Galgani, J. E., & Fernández-Verdejo, R. (2021). Pathophysiological role of metabolic flexibility on metabolic health. *Obesity Reviews*, 22(2), e13131.

Galgani, J., & Fernández-Verdejo, R. (2021). Substrate utilization and metabolic flexibility in the development of obesity and type 2 diabetes. *Experimental Physiology*, 106(3), 567–576.

Goodpaster, B. H., & Kelley, D. E. (2002). Impaired mitochondrial function and insulin resistance. *Experimental Physiology*, 87(6), 725–730.

Goodpaster, B. H., & Kelley, D. E. (2002). Skeletal muscle triglyceride: Marker or mediator of insulin resistance in type 2 diabetes mellitus? *Current Opinion in Endocrinology, Diabetes and Obesity*, 9(2), 112–118.

Goodpaster, B. H., & Sparks, L. M. (2017). Metabolic flexibility in health and disease. *Cell Metabolism*, 25(5), 1027–1036.

Hawley, J. A., Burke, L. M., Møller, D. E., & Gibala, M. J. (2014). Metabolic adaptations to short-term exercise training: implications for health and athletic performance. *Sports Medicine*, 44(Suppl 1), S31–S39.

Hawley, J. A., Hargreaves, M., Joyner, M. J., & Zierath, J. R. (2014). Integrative biology of exercise. *Cell*, 159(4), 738–749.

Holland, W. L., & Summers, S. A. (2008). Sphingolipids, lipotoxicity, and the heart. *Cell Metabolism*, 7(2), 114–117.

Holloszy, J. O., & Coyle, E. F. (1984). Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *Journal of Applied Physiology*, 56(4), 831–838.

Holloway, G. P., Benton, C. R., Mullen, K. L., Yoshida, Y., Snook, L. A., Han, X.-X., Glatz, J. F. C., Luiken, J. J. F. P., Lally, J., Dyck, D. J., & Bonen, A. (2009). Increased skeletal muscle mitochondrial fatty acid transport and oxidation following short-term endurance training. *American Journal of Physiology–Endocrinology and Metabolism*, 297(4), E978–E986.

Jeukendrup, A. E., & Venables, M. C. (2008). Fat oxidation during exercise: Physiological and methodological considerations. *Sports Medicine*, 38(10), 915–930.

Jeukendrup, A. E., & Venables, M. C. (2008). Fat oxidation during exercise: The role of CPT I and FAT/CD36. *The Journal of Physiology*, 586(9), 2379–2383.

Kelley, D. E., & Mandarino, L. J. (2000). Fuel selection in human skeletal muscle in insulin resistance: A reexamination. *Diabetes*, 49(5), 677–683.

Lovell, D. I., Stuelcken, M., & Eagles, A. (2025). Exercise testing for metabolic flexibility: Time for protocol standardization. *Sports Medicine – Open*, 11, 31.

Petersen, M. C., & Shulman, G. I. (2018). Mechanisms of insulin action and insulin resistance. *Physiological Reviews*, 98(4), 2133–2223.

Powers, S. K., & Howley, E. T. (2017). *Exercise physiology: Theory and application to fitness and performance* (10th ed.). McGraw-Hill Education.

Prior, S. J., King, D. S., & Amati, F. (2014). Metabolic inflexibility during submaximal aerobic exercise is associated with glucose intolerance. *Obesity*, 22(2), 403–409.

Prior, S. J., King, D. S., & Amati, F. (2014). The role of skeletal muscle in metabolic regulation: Implications for energy balance. *Endocrine Reviews*, 35(3), 444–474.

Randle, P. J., Garland, P. B., Hales, C. N., & Newsholme, E. A. (1963). The glucose fatty-acid cycle: Its role in insulin sensitivity and the metabolic disturbances of diabetes mellitus. *The Lancet*, 281(7285), 785–789.

Reaven, G. M. (1988). Role of insulin resistance in human disease (Banting Lecture 1988). *Diabetes*, 37(12), 1595–1607.

Romijn, J. A., Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Gastaldelli, A., Horowitz, J. F., Endert, E., & Wolfe, R. R. (1993). Regulation of

endogenous fat, carbohydrate, and protein metabolism in the exercise state. *The American Journal of Physiology: Endocrinology and Metabolism*, 265(3 Pt 1), E380–E391.

Shulman, G. I. (2004). Cellular mechanisms of insulin resistance. *The Journal of Clinical Investigation*, 114(12), 1677–1683.

Shulman, G. I. (2004). Unraveling the cellular mechanism of insulin resistance in humans: New insights from magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Clinical Investigation*, 113(12), 1716–1723.

Venables, M. C., & Jeukendrup, A. E. (2008). Endurance training and obesity: Effect on substrate metabolism. *Obesity Reviews*, 9(6), 523–536.

Venables, M. C., & Jeukendrup, A. E. (2008). Physical activity and health: the importance of training intensity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(6), 1089–1098.

DİRENÇ EGZERSİZLERİ VE BESLENME: PERFORMANS, HİPERTROFİ VE TOPARLANMA PERSPEKTİFİ

Mehmet PENSE¹

Giriş

Direnç egzersizleri, kas-iskelet sistemi fonksiyonlarını geliştirmede, fiziksel performansı artırmada ve uzun vadeli sağlık çıktılarının iyileştirilmesinde temel antrenman bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Geleneksel olarak direnç egzersizleri; kas kuvveti ve hipertrofisinin artırılması amacıyla kullanılmış olsa da son yıllarda bu egzersiz türünün metabolik sağlık, kemik yoğunluğu, fonksiyonel kapasite, sakatlanma riskinin azaltılması ve sağlıklı yaşlanma üzerindeki etkileri giderek daha fazla vurgulanmaktadır (ACSM, 2022; ACSM, 2024).

Bu geniş etki alanı, direnç egzersizlerinin yalnızca “antrenman programlaması” açısından değil, aynı zamanda beslenme stratejileriyle birlikte ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Güncel literatür, direnç antrenmanı uyaranının kas protein sentezi, nöromüsküler adaptasyonlar ve metabolik yanıtlar üzerindeki

¹ Doç. Dr. Selçuk Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, KONYA. Orcid: 0000-0001-8209-9080

etkilerinin, beslenme durumu tarafından güçlü biçimde modüle edildiğini ortaya koymaktadır (Morton ve ark., 2018; Phillips & Van Loon, 2011). Özellikle enerji yeterliliği, protein alımının miktarı ve dağılımı, karbonhidrat erişilebilirliği ve bazı kanıta dayalı ergojenik destekler; performans, hipertrofi ve toparlanma süreçlerinin merkezinde yer almaktadır.

Son yıllarda yayımlanan sistematik derlemeler ve pozisyon bildirileri, “antrenman mı beslenme mi daha önemli?” sorusunun bilimsel karşılığının “birlikte ve etkileşim içinde” olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Direnç egzersizi, kas hücresinde anabolik sinyalleme başlatan temel uyarandır; beslenme ise bu sinyallemenin yapısal ve metabolik karşılığını mümkün kılan unsurdur (Jäger ve ark., 2017; Schoenfeld ve ark., 2017).

Bu kitap bölümünün amacı;

Direnç egzersizlerini kavramsal, fizyolojik ve uygulamalı boyutlarıyla ele almak,

Direnç antrenmanlarına ilişkin güncel bilimsel yaklaşımları özetlemek,

Beslenmenin temel ilkelerini direnç egzersizi bağlamında yapılandırmak,

Performans, kas hipertrofisi ve toparlanma perspektifinden direnç egzersizi beslenme etkileşimini kanıta dayalı olarak tartışmaktır.

1. Direnç Egzersizlerinin Tanımı ve Evrimi

1.1. Direnç Egzersizlerinin Tanımı

Direnç egzersizi, iskelet kaslarının bir dış yüke karşı kasılması yoluyla kas kuvveti, güç, dayanıklılık, hipertrofi ve fonksiyonel performansın geliştirilmesini amaçlayan egzersiz türüdür. Bu dış yük; serbest ağırlıklar, ağırlık makineleri, elastik

bantlar, vücut ağırlığı veya izokinetik cihazlar aracılığıyla sağlanabilir (ACSM, 2022).

Direnç egzersizlerini diğer egzersiz türlerinden ayıran temel özellik, yüklenmenin kas-iskelet sistemi üzerinde doğrudan mekanik gerilim oluşturmasıdır. Bu mekanik gerilim, kas liflerinde ve bağ dokularda yapısal ve fonksiyonel adaptasyonları tetikleyen birincil uyaran olarak kabul edilmektedir. Ancak güncel yaklaşımlar, direnç egzersizine bağlı adaptasyonların yalnızca mekanik gerilimle açıklanamayacağını; metabolik stres ve kas hasarının da bu duruma bağlı olarak önemli rol oynayabileceğini göstermektedir (Schoenfeld, 2010; Schoenfeld, 2017).

1.2. Direnç Egzersizlerinin Temel Fizyolojik Uyaranları

Direnç egzersizlerinin kas adaptasyonlarını tetiklemesinde üç temel fizyolojik mekanizma öne çıkmaktadır:

1.2.1. Mekanik Gerilim

Mekanik gerilim, direnç egzersizine bağlı kas hipertrofisinin temel belirleyicilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Kas lifleri üzerine uygulanan dış yükler, kas-tendon ünitesinde gerilim oluşturarak hücresel düzeyde mekanosensitif sinyal yollarının aktivasyonunu tetikler. Bu süreç, özellikle mTORC1 (mechanistic target of rapamycin complex 1) yolu üzerinden protein sentezinin artışıyla sonuçlanmaktadır (Schoenfeld, 2010; Hornberger, 2011).

Mekanik gerilimin etkinliği; kullanılan yükün büyüklüğü, kasın aktif kaldığı süre (time under tension), hareket açıklığı ve kasılma tipi (konsantrik, eksantrik, izometrik) gibi değişkenlere bağlıdır. Özellikle eksantrik kasılmalar sırasında daha yüksek mekanik stres olduğu ve bunun hipertrofik adaptasyonları güçlendirdiği bildirilmektedir (Roig ve ark., 2009). Ayrıca mekanik gerilim, integrinler ve sitoskeletal proteinler aracılığıyla mekanik sinyallerin biyokimyasal yanıtlar hâline dönüştürülmesini

sağlayarak kas protein sentezini uzun vadede desteklemektedir (Wackerhage ve ark., 2019).

Sonuç olarak, direnç egzersizi programlarının hipertrofi ve performans hedefleri doğrultusunda planlanmasında, yeterli ve sürdürülebilir mekanik gerilimin sağlanması kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir (Schoenfeld ve ark., 2017).

1.2.2. Metabolik Stres

Metabolik stres; direnç egzersizi sırasında laktat, inorganik fosfat ve hidrojen iyonları gibi metabolitlerin birikimiyle karakterizedir. Daha kısa dinlenme aralıkları, yüksek tekrar sayıları ve tükenişe yakın setler metabolik stresi artırabilir. Güncel kanıtlar, metabolik stresin tek başına yeterli olmadığını; ancak mekanik gerilimle birlikte hipertrofik uyarıyı güçlendirebileceğini göstermektedir (Schoenfeld ve ark., 2017).

1.2.3. Kas Hasarı

Kas hasarı, özellikle alışılmadık veya yüksek yoğunluklu direnç egzersizleri sonrasında ortaya çıkan ve kas liflerinin yapısal bütünlüğünde geçici bozulmalarla karakterize edilen bir süreçtir. Bu hasar, özellikle eksantrik kasılmalar sırasında Z-disklerinde meydana gelen mikrotravmalarla ilişkilendirilmektedir (Proske & Morgan, 2001).

Egzersize bağlı kas hasarı; gecikmiş kas ağrısı (DOMS), kas kuvvetinde geçici azalma ve kreatin kinaz gibi kas hasarı belirteçlerinde artış ile kendini göstermektedir (Clarkson & Hubal, 2002). Geleneksel olarak kas hasarının hipertrofi için gerekli olduğu düşünülse de güncel literatür bu görüşü sorgulamakta ve kas hasarının hipertrofi için zorunlu bir ön koşul olmadığını vurgulamaktadır (Schoenfeld, 2012; Damas ve ark., 2016).

Aşırı düzeyde kas hasarı, protein sentezinden ziyade onarım süreçlerini ön plana çıkararak toparlanma süresini uzatabilir ve

antrenman sıklığını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, optimal hipertrofik adaptasyonlar için kas hasarının kontrollü düzeylerde tutulması ve uygun beslenme stratejileriyle toparlanmanın desteklenmesi önerilmektedir (Peake ve ark., 2017).

1.3. Direnç Egzersizlerinin Tarihsel Evrimi

Direnç egzersizleri, tarihsel olarak performans ve estetik odaklı uygulamalarla (halter ve vücut geliştirme gibi) özdeşleşmiş olsa da özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bilimsel temelli bir dönüşüm sürecine girmiştir. İlk dönemlerde daha çok spor performansını artırmaya yönelik kullanılan direnç egzersizleri, zamanla fizyoloji ve biyomekanik alanlarında yürütülen çalışmalar sayesinde sağlıkla ilişkili çıktılar açısından da değerlendirilmeye başlanmıştır (DeLorme, 1945; Kraemer ve ark., 2004). Özellikle 1990'lı yıllardan sonra yayımlanan randomize kontrollü çalışmalar, direnç egzersizlerinin yaşlanmaya bağlı kas kütlesi ve kuvvet kaybını (sarkopeni) yavaşlattığını, kemik mineral yoğunluğunu artırdığını ve metabolik hastalıklar için önemli bir koruyucu rol üstlendiğini ortaya koymuştur (Fiatarone ve ark., 1990; Hurley & Roth, 2000). Bu dönemde elde edilen bulgular, direnç egzersizlerinin yalnızca sporcular için değil, yaşlı bireyler ve klinik popülasyonlar için de etkili ve güvenli bir egzersiz yöntemi olduğunu göstermiştir.

Bu bilimsel birikimin sonucunda, günümüzde Amerikan Spor Hekimliği Koleji (ACSM) ve benzeri uluslararası kuruluşlar, direnç egzersizlerini temel bir sağlık davranışı olarak tanımlamakta ve haftada en az iki gün, tüm büyük kas gruplarını içeren direnç egzersizlerini önermektedir (ACSM, 2022; ACSM, 2024). Bu yaklaşım, direnç egzersizlerinin tarihsel olarak performans merkezli bir uygulamadan, toplum sağlığını önceleyen kanıta dayalı bir müdahaleye evrildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

1.4. Direnç Egzersizlerinin Performans Sağlık Ekseninde Konumlanması

Modern egzersiz bilimi perspektifinde direnç egzersizleri, performans ve sağlık arasında işlevsel bir köprü olarak değerlendirilmektedir. Sporcularda kuvvet, güç ve kas kütlesi gelişimini destekleyerek performans çıktılarının iyileştirilmesine katkı sağlarken; sedanter bireyler ve klinik popülasyonlarda fonksiyonel kapasiteyi artırmakta, düşme riskini azaltmakta ve yaşam kalitesini olumlu yönde etkilemektedir (Kraemer ve ark., 2002; Westcott, 2012).

Direnç egzersizlerinin bu çift yönlü etkisi, özellikle kardiyometabolik sağlık, kas-iskelet sistemi fonksiyonu ve günlük yaşam aktivitelerinin sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır. Düzenli direnç egzersizi uygulamalarının insülin duyarlılığını artırdığı, kan basıncını düzenlediği ve vücut kompozisyonunu iyileştirdiği bildirilmiştir (Strasser & Schobersberger, 2011; Phillips & Van Loon, 2011). Direnç egzersizlerinin, İnsülin düzeylerinde yol açtığı değişimleri inceleyen Harbili ve ark (2005)'ı, 6 hafta süren direnç antrenmanlarının ilk haftası sonrası insülin miktarında %61 oranında bir azalma tespit ederken, 6 haftanın son antrenmanında bu azalma oranının %39'lara düştüğünü belirlemişler ve bu düşüşü, glikoz metabolizmasının antrenmana adaptasyon gösterdiği şeklinde yorumlamışlardır

Bu bağlamda, direnç egzersizlerinin performans-sağlık ekseninde optimal etki sağlayabilmesi için beslenme stratejileriyle birlikte ele alınması kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Özellikle protein alımı, enerji dengesi ve toparlanma süreçlerinin doğru yönetilmesi hem atletik performansın hem de sağlıkla ilişkili adaptasyonların sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Phillips & Van Loon, 2011).

2. Direnç Egzersizlerine Güncel Bakış Açıları

Direnç egzersizlerine ilişkin bilimsel bakış açısı, son on yılda önemli bir dönüşüm geçirmiştir. Klasik antrenman modelleri daha çok sabit yük–tekrar aralıkları ve standart şablonlar üzerinden şekillenirken, güncel yaklaşımlar direnç egzersizlerini yük spektrumu, efor düzeyi, toplam hacim, toparlanma kapasitesi ve bireyselleştirme ekseninde ele almaktadır. Bu dönüşüm, özellikle sistematik derlemeler ve meta-analizlerin artmasıyla bilimsel bir zemin kazanmıştır (Schoenfeld ve ark., 2017; Grgic ve ark., 2022; Baz-Valle ve ark., 2022).

2.1. Yük Spektrumu ve Tükeniş Yakınlık Kavramı

Uzun yıllar boyunca kas hipertrofinin yalnızca orta–yüksek yüklerle (yaklaşık %65–85 1RM) ve belirli tekrar aralıklarında (6–12 tekrar) gerçekleştirilebileceği kabul edilmiştir. Bu geleneksel yaklaşım, erken dönem direnç egzersizi literatüründe mekanik gerilimin büyüklüğünü hipertrofik adaptasyonların temel belirleyicisi olarak ele alan çalışmalara dayanmaktadır (Kraemer & Ratamess, 2004). Ancak son yıllarda yayımlanan randomize kontrollü çalışmalar ve meta-analizler, kas hipertrofinin geniş bir yük spektrumunda mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle düşük yüklerle (%30–50 1RM) gerçekleştirilen direnç egzersizlerinin, setlerin tükenişe yakın veya gerçek tükeniş noktasına kadar sürdürülmesi koşuluyla, yüksek yüklerle yapılan antrenmanlara benzer hipertrofik adaptasyonlar sağlayabildiği gösterilmiştir (Schoenfeld ve ark., 2017; Morton ve ark., 2016). Bu durumun temel mekanizması, düşük yüklerde tükenişe yaklaşıldıkça artan motor ünite rekrutmanı (işe katılan lif sayısının artması) ve tip II kas liflerinin progresif olarak devreye girmesiyle açıklanmaktadır. Tükenişe yakın çalışma, Henneman’ın büyüklük prensibi doğrultusunda yüksek eşik motor ünitelerin aktivasyonunu artırarak kas protein sentezini uyaran metabolik ve mekanik sinyalleri

maksimize etmektedir (Schoenfeld, 2010; Vieira ve ark., 2021). Dolayısıyla güncel literatür, hipertrofik adaptasyonların yalnızca kullanılan mutlak yükle değil, setlerin tükeniše yakınlığı ve uygulanan toplam antrenman uyarısının niteliğıyle yakından ilişkili olduğunu vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, direnç egzersizlerinin bireysel kapasite, deneyim düzeyi ve klinik durumlara göre daha esnek biçimde programlanabilmesine olanak tanımaktadır (Grgic ve ark., 2018).

2.2. Antrenman Hacmi, Frekans ve Toparlanma Dengesi

Kas hipertrofisi ve kuvvet gelişimi açısından toplam antrenman hacmi, güncel literatürde en güçlü belirleyicilerden biri olarak kabul edilmektedir. Haftalık set sayısı, tekrar sayısı ve yükün birleşimiyle oluşan hacim; kas protein sentezi yanıtının büyüklüğünü ve sürekliliğini doğrudan etkilemektedir. Schoenfeld ve ark. (2017) meta-analizi, haftalık daha yüksek hacimlerin daha büyük hipertrofik kazanımlarla ilişkili olduğunu göstermiştir.

Bununla birlikte, hacim–adaptasyon ilişkisi doğrusal değildir. Çok yüksek hacimler, yeterli toparlanma sağlanamadığında performans düşüşü ve aşırı yorgunlukla sonuçlanabilmektedir. Baz-Valle ve ark. (2021; 2022), hacim artışının hipertrofiye katkısının bireyin antrenman geçmişi, enerji alımı ve toparlanma kapasitesine bağlı olarak değiştiğini vurgulamıştır. Bu bağlamda, hacim artışı beslenme stratejilerinden bağımsız ele alınamaz.

Antrenman sıklığı (frekans) açısından bakıldığında, kas grubunun haftada kaç kez çalıştırıldığı tek başına belirleyici değildir. Güncel sistematik derlemeler, eşit hacim koşullarında haftalık frekansın hipertrofi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu; belirleyici unsurun toplam hacmin dağılımı olduğunu bildirmektedir (Grgic ve ark., 2018; Schoenfeld ve ark., 2017). Bu durum, frekansın bireysel toparlanma ve program sürdürülebilirliği açısından optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

2.3. Efor Düzeyi, Tükeniştir Yakınlık ve Algılanan Zorlanma

Direnç egzersizlerinde efor düzeyi, yani setlerin kas tükeniştirine ne kadar yakın gerçekleştirildiğı, motor ünite aktivasyonu ve kas lifi katılımı açısından kritik bir değışkendir. Güncel literatür, özellikle hipertrofi hedefli antrenmanlarda setlerin tükeniştir yakın yapılmasının, düşük ve orta yüklerde bile yeterli hipertrofik uyararı sağlayabildiğini göstermektedir (Grgic ve ark., 2022).

Algılanan zorlanma (Rating of Perceived Exertion, RPE) ve “tükeniştir kalan tekrar sayısı” (Repetitions in Reserve, RIR) gibi ölçekler, bu efor düzeyinin pratikte yönetilmesini sağlayan araçlar olarak öne çıkmaktadır. Helms ve arkadaşları (2018), RIR temelli yaklaşımın hem kuvvet hem de hipertrofi programlamasında güvenilir bir otoreğılasyon yöntemi sunduğunu bildirmiştir. Ayrıca son yıllarda yayımlanan çalışmalar, sürekli tükeniştir kadar çalışmanın toparlanma süresini uzatabileceğini ve uzun vadede performans sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyebileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle modern yaklaşımlar, planlı tükeniştir ve değışken efor düzeyleri içeren modelleri önermektedir (Grgic ve ark., 2022).

2.4. Otoreğılasyon, Bireyselleştirme ve Performans Dalgalanmaları

Direnç egzersizlerinde bireyler arası yanıt farklılıkları; genetik yapı, antrenman geçmişi, uyku düzeni, psikolojik stres düzeyi ve beslenme durumu gibi çok sayıda fizyolojik ve çevresel faktörden etkilenmektedir. Bu değışkenler, bireylerin aynı antrenman uyararına verdikleri akut ve kronik adaptasyonları önemli ölçüde farklılaştırabilmektedir (Mann ve ark., 2014; Zourdos ve ark., 2016). Bu bağlamda, sabit yük ve tekrar şablonlarına dayalı geleneksel programlama yaklaşımlarının, her birey için optimal sonuç üretmediğini bildirilmiştir. Günlük performans dalgalanmaları, merkezi ve periferik yorgunluk düzeyleri ile toparlanma

durumundaki farklılıklar nedeniyle bireyin kaldırabileceği yük ve gerçekleştirebileceği tekrar sayısı günden güne değişebilmektedir (Helms ve ark., 2018). Otomatik olarak bireysel hazır oluş düzeyini dikkate alan otoregülasyon yaklaşımları (örneğin algılanan zorluk derecesi [RPE], tekrar rezervi [RIR] veya hız temelli antrenman), bu performans dalgalanmalarını dengelemeyi ve bireyselleştirilmiş yük ayarlamalarını mümkün kılmaktadır. Literatürde, otoregülasyon temelli direnç egzersizi programlarının hem kuvvet hem de hipertrofi adaptasyonları açısından sabit programlara kıyasla benzer veya daha üstün sonuçlar sağlayabildiği rapor edilmiştir (Zourdos ve ark., 2019). Dolayısıyla modern direnç egzersizi programlamasında, bireysel farklılıkların ve günlük performans değişkenliğinin dikkate alınması, antrenman etkinliği ve sürdürülebilirliği açısından temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Mann ve ark. (2015), otoregülasyon temelli yaklaşımların bireysel performans dalgalanmalarını yönetmede daha etkili olabileceğini bildirmektedirler.

Otoregülasyon, antrenman yükünün o güne özgü performans göstergelerine göre ayarlanmasını içerir. Bu yaklaşımda RPE/RIR, bar hızı (velocity-based training) veya öznel toparlanma ölçekleri kullanılabilir. Helms ve arkadaşları (2018), özellikle enerji alımının dalgalandığı dönemlerde (kilo kaybı süreçleri) otoregülasyonun aşırı yüklenmeyi önleyebileceğini vurgulamıştır. Bu bağlamda, beslenme durumu ile otoregülasyon arasında çift yönlü bir ilişki bulunmaktadır. Yetersiz enerji veya karbonhidrat alımı, algılanan zorlanmayı artırarak performansı düşürebilir; bu durum, antrenman yükünün o gün için yeniden ayarlanmasını gerektirir. Dolayısıyla modern direnç egzersizi anlayışı, beslenme ve antrenman planlamasını eş zamanlı ve dinamik bir süreç olarak ele almaktadır.

2.5. Direnç Egzersizlerinde Sağlık–Performans Bütünlüğü

Son yıllarda direnç egzersizlerinin yalnızca performans odaklı değil, aynı zamanda temel bir sağlık davranışı olarak ele alınması gerektiği yönünde güçlü bir bilimsel konsensüs oluşmuştur. ACSM’nin güncel rehberleri ve derleme çalışmaları, direnç egzersizlerinin kardiyometabolik sağlık, kemik mineral yoğunluğu, fonksiyonel kapasite ve mortalite riski ile ilişkili olduğunu göstermektedir (ACSM, 2022; ACSM, 2024). Bu yaklaşım, direnç egzersizlerinin sporcularla sınırlı olmadığını; sedanter bireyler, yaşlı popülasyonlar ve klinik gruplar için de merkezi bir müdahale olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu geniş uygulama alanı, beslenme stratejilerinin hedefe ve bireye özgü olarak uyarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Örneğin, performans hedefli sporcularda enerji fazlası ve yüksek protein alımı ön plandayken; sağlık odaklı bireylerde enerji dengesi ve sürdürülebilir beslenme modelleri daha uygun olabilir (Phillips & Van Loon, 2011; Jäger ve ark., 2017).

“Direnç egzersizleri yalnızca performansı artıran bir araç değil, doğru planlandığında sağlığı sürdürülebilir kılan temel”

3. Direnç Egzersizlerinde Beslenmenin Temel Bileşenleri

Direnç egzersizlerine verilen fizyolojik yanıtların büyüklüğü ve sürekliliği, antrenman uyarınının yanı sıra bireyin beslenme durumu tarafından belirlenmektedir. Enerji yeterliliği, makro besin dağılımı ve mikro besin durumu; performans çıktıları, kas hipertrofisi ve toparlanma süreçlerini doğrudan etkilemektedir. Güncel literatür, beslenmenin direnç egzersizi adaptasyonlarında “destekleyici” değil, belirleyici bir rol üstlendiğini vurgulamaktadır (Morton ve ark., 2018; Jäger ve ark., 2017).

3.1. Enerji Kullanılabilirliği ve Enerji Dengesi

Enerji kullanılabilirliği, alınan enerjiden egzersiz sırasında harcanan enerjinin çıkarılmasıyla kalan ve fizyolojik süreçleri desteklemek için vücutta “erişilebilir” olan enerji miktarıdır. Direnç antrenmanının hacmi ve yoğunluğu arttıkça, enerji kullanılabilirliğinin yeterli düzeyde tutulması giderek daha kritik hâle gelmektedir. Yetersiz enerji alımı; hormonal yanıtların baskılanması, toparlanmanın gecikmesi ve kas protein sentezinin azalması ile ilişkilidir. Son yıllarda “düşük enerji kullanılabilirliği” kavramı, yalnızca dayanıklılık sporcuları için değil, direnç antrenmanı yapan bireyler için de önemli bir risk faktörü olarak ele alınmaktadır. Özellikle yoğun hacimli antrenmanlar yapan ve aynı zamanda vücut ağırlığı/yağ oranını düşürmeyi hedefleyen bireylerde, enerji açığı kas hipertrofisini ve kuvvet gelişimini sınırlayabilmektedir (Mountjoy ve ark., 2018).

Direnç egzersizi bağlamında enerji dengesi, hedefe göre değişkenlik göstermelidir. Hipertrofi ve kuvvet artışı hedeflenen dönemlerde enerji dengesi veya hafif enerji fazlası, kas kütlesi kazanımını desteklerken; yağ kaybı hedeflenen dönemlerde kontrollü bir enerji açığı tercih edilebilir. Ancak enerji kısıtlaması altında direnç antrenmanı uygulanacaksa, protein alımının artırılması ve toparlanmanın yakından izlenmesi gereklidir (Jäger ve ark., 2017).

3.2. Protein: Miktar, Kalite ve Dağılım

Direnç egzersizleriyle ilişkili beslenme bileşenleri arasında protein, kas adaptasyonlarının merkezinde yer almaktadır. Protein alımı, kas protein sentezini (KPS) artırarak kas dokusunun onarımını ve yeniden yapılanmasını destekler. Büyük ölçekli meta-analizler, direnç antrenmanına eşlik eden protein takviyesinin yağsız kütle ve kuvvet kazanımlarını anlamlı düzeyde artırdığını göstermektedir (Morton ve ark., 2018).

3.2.1. Günlük Protein Gereksinimi

Ortaya konulan kanıtlar, düzenli direnç antrenmanı yapan bireylerde günlük protein alımının çoğu kişi için 1,4–2,0 g/kg/gün aralığında yeterli olduğunu; bazı bireylerde (ileri düzey sporcular, enerji kısıtlaması altında olanlar) bu aralığın üst sınırlarına ihtiyaç duyulabileceğini açıklamaktadır (Jager ve ark., 2017). Enerji açığı bulunan dönemlerde protein gereksiniminin artması, yağsız kütlenin korunması açısından özellikle önemlidir.

3.2.2. Protein Kalitesi ve Lösin İçeriği

Protein kalitesi, bir protein kaynağının amino asit profili, sindirilebilirliği ve özellikle esansiyel amino asit (EAA) içeriği ile ilişkilidir. Direnç egzersizi sonrası kas protein sentezinin (KPS) uyarılmasında lösin, kritik bir “tetikleyici” amino asit olarak kabul edilmektedir. Lösin, mTORC1 sinyal yolunu aktive ederek kas protein sentezini başlatan temel faktörlerden biridir (Phillips & Van Loon, 2011). Derleme ve deneysel çalışmalar, lösin açısından zengin protein kaynaklarının (whey proteini, süt proteinleri, yumurta ve et) direnç egzersizi sonrası kas protein sentezi yanıtını bitkisel ve lösin içeriği daha düşük protein kaynaklarına kıyasla daha güçlü biçimde uyardığını göstermektedir (Witard ve ark., 2019; Gorissen & Witard, 2018). Bununla birlikte, yeterli miktar ve uygun kombinasyonlarla tüketildiğinde bitkisel proteinlerin de direnç antrenmanı adaptasyonlarını destekleyebileceği bildirilmektedir (van Vliet ve ark., 2015).

3.2.3. Protein Dağılımı ve Zamanlaması

Toplam günlük protein alımı, direnç egzersizi adaptasyonlarının birincil belirleyicisi olarak kabul edilmekle birlikte, protein alımının gün içine dağılımı kas protein sentezinin tekrarlı biçimde uyarılması açısından önem taşımaktadır. Areta ve ark. (2013), eşit aralıklarla dağıtılan protein alımının, tek seferde

veya düzensiz dağıtılan protein alımına kıyasla 24 saatlik kas protein sentezini daha fazla artırabildiğini göstermiştir. Ayrıca direnç egzersizi sonrası dönemde kas dokusunun amino asitlere duyarlılığının arttığı ve bu dönemde protein alımının kas protein sentezini desteklediği bildirilmiştir. Bununla birlikte, güncel bakış açısı “anabolik pencere” kavramını katı bir zaman aralığı olarak değil, egzersiz sonrası saatlere yayılan geniş bir fırsat penceresi olarak ele almaktadır (Schoenfeld ve ark., 2013). Bu yaklaşım, protein zamanlamasının faydasını reddetmemekte; ancak toplam günlük alımın önceliğini vurgulamaktadır.

3.3. Karbonhidrat: Performans ve Antrenman Kalitesi

Direnç egzersizleri, enerji sistemleri açısından ağırlıklı olarak fosfojen ve glikolitik sistemleri kullanmakla birlikte, özellikle yüksek hacimli ve çok setli antrenmanlarda kas glikojeninin anlamlı ölçüde azalabildiği gösterilmiştir. Bu durum, karbonhidrat alımının direnç egzersizi performansı açısından dolayı fakat önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Haff & Triplett, 2016). Slater ve Phillips (2013), karbonhidrat yeterliliğinin direnç antrenmanlarında set sayısı, tekrar kalitesi ve toplam hacmin korunmasına katkı sağladığını bildirmiştir. Güncel derlemeler, karbonhidrat alımının doğrudan kas hipertrofisini artırmadığını; ancak antrenman kalitesini koruyarak mekanik gerilim ve toplam hacmi sürdürmeye yardımcı olduğunu vurgulamaktadır (Escobar ve ark., 2016). Bu bağlamda karbonhidrat alımı, direnç egzersizi adaptasyonlarını dolayı yoldan destekleyen bir beslenme bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

3.4. Yağ Alımı ve Hormonal Denge

Yağ alımı, enerji dengesinin sağlanmasının yanı sıra steroid hormon sentezi ve hücresel membran bütünlüğü açısından önemlidir. Uzun süreli çok düşük yağlı diyetlerin testosteron düzeylerinde düşüşle ilişkili olabileceği bildirilmiştir (Volek ve ark., 1997). Her

ne kadar bu bulgular daha eski çalışmalara dayansa da güncel derlemeler yağ alımının aşır kısıtlanmasının direnç antrenmanı adaptasyonları açısından potansiyel riskler taşıyabileceğini belirtmektedir (Iraki ve ark., 2019). Direnç egzersizi yapan bireylerde yağ alımının genellikle toplam enerjinin yaklaşık %20–35'i aralığında tutulması hem enerji yeterliliği hem de hormonal fonksiyonların korunması açısından önerilmektedir (Iraki ve ark., 2019).

3.5. Mikro Besinler ve Destekleyici Faktörler

Mikro besinler, kas fonksiyonu, enerji metabolizması ve toparlanma süreçlerinde tamamlayıcı rol üstlenmektedir. Özellikle D vitamini, kas kuvveti ve fonksiyonuyla ilişkilendirilmiş; eksikliğinin kas performansını olumsuz etkileyebileceği bildirilmiştir (Owens ve ark., 2018). Demir, oksijen taşınması ve enerji metabolizması açısından kritik olup; eksikliği performans düşüşüne yol açabilmektedir. Magnezyum ve çinko gibi mineraller ise protein sentezi, sinir-kas iletimi ve toparlanma süreçleriyle ilişkilidir. Close ve ark. (2016), mikro besin eksikliklerinin direnç antrenmanı adaptasyonlarını sınırlayabileceğini ve bu nedenle beslenme değerlendirmelerinin yalnızca makro besinlere odaklanmaması gerektiğini ifade etmişlerdir.

3.6. Bölüm zeti ve Bilimsel ıkarımlar

Direnç egzersizlerinde beslenmenin temel bileşenleri; enerji kullanılabilirliği, protein miktarı–kalitesi–dağılımı, karbondhidrat erişilebilirliği ve mikro besin yeterliliği etrafında şekillenmektedir. Alan yazında, bu bileşenlerin her birinin tek başına değil, birlikte ve bağlama özgü olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir (Morton ve ark., 2018; Jger ve ark., 2017). Bu bulgular, direnç egzersizi ve beslenme entegrasyonunun, performans, hipertrofi ve toparlanma hedeflerine ulaşmada vazgeçilmez olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

4. Direnç Egzersizi ve Beslenme Etkileşimi

Direnç egzersizi ile beslenme arasındaki ilişki, tek yönlü bir destek mekanizmasından ziyade iki yönlü ve sinerjik bir etkileşim olarak değerlendirilmelidir. Direnç egzersizi, kas hücresinde anabolik sinyalleme başlatan temel uyandırıcıdır; beslenme ise bu sinyallerin yapısal ve fonksiyonel adaptasyonlara dönüşmesini mümkün kılar. Bu etkileşim, özellikle kas protein sentezi (KPS), nöromusküler adaptasyonlar ve toparlanma süreçleri üzerinden şekillenmektedir (Phillips & Van Loon, 2011; Morton ve ark., 2018).

4.1. “Anabolik Pencere” Tartışması: Mit Mi, Bağlama Bağlı Gerçek Mi?

Uzun yıllar boyunca direnç egzersizi sonrası kısa bir “anabolik pencere” bulunduğu ve bu pencere içinde protein alınmadığı takdirde kas gelişiminin sekteye uğrayacağı ileri sürülmüştür. Ancak bu yaklaşım, daha sonra yapılan sistematik derlemelerle yeniden değerlendirilmiştir. Schoenfeld ve ark. (2013), protein zamanlamasının etkisini inceleyen meta-analizlerinde, toplam günlük protein alımının zamanlamadan daha belirleyici olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte, güncel bakış açısı anabolik pencere kavramını tamamen reddetmemekte; onu bağlama bağlı bir fenomen olarak ele almaktadır. Direnç egzersizi sonrası kas dokusunun amino asitlere duyarlılığının arttığı ve bu duyarlılığın birkaç saate yayıldığı gösterilmiştir (Phillips & Van Loon, 2011). Bu nedenle egzersiz sonrası protein alımı, özellikle gün içinde uzun süre protein tüketilmemişse veya açlık durumunda yapılan antrenmanlarda pratik ve anlamlı bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Schoenfeld ve ark., 2018)7

Dolayısıyla güncel konsensüs; “zamanlama önemsizdir” veya “mutlaka 30 dakika içinde protein alınmalıdır” gibi uç yaklaşımlar yerine, yeterli toplam protein alımı + makul zamanlama kombinasyonunu önermektedir.

4.2. Lösin EŖiĐi ve Protein Dozlaması

Kas protein sentezinin uyarılmasında lösin, kritik bir tetikleyici amino asit olarak kabul edilmektedir. Lösin, mTORC1 yolunu aktive ederek KPS'yi başlatan sinyali tetikler. Bu nedenle protein alımının yalnızca gram cinsinden miktarı değil, lösin içeriği de önem taşımaktadır (Phillips & Van Loon, 2011). Areta ve ark. (2013) alışması, direnç egzersizi sonrası protein alımının doz ve dağılımının, 24 saatlik KPS yanıtını anlamlı biçimde etkilediğini göstermiştir. Güncel derlemeler, tek öğünde yaklaşık 20–40 g yüksek kaliteli protein alımının (bireyin vücut kütlesi ve antrenman durumuna bağlı olarak) KPS'yi maksimize edebileceğini bildirmektedir (Morton ve ark., 2018; Witard ve ark., 2019). Ayrıca ileri yaş bireylerde “anabolik direnç” nedeniyle daha yüksek protein ve lösin dozlarının gerekebileceği; bu durumun direnç egzersizi ile birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Phillips & Van Loon, 2011). Bu bulgular, protein dozlamasının bireyselleştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.3. Karbonhidrat-Protein Etkileşimi ve İnsülin Yanıtı

Direnç egzersizi sonrası karbonhidrat ve protein birlikte alımının, kas glikojeninin yenilenmesini hızlandırdığı ve insülin yanıtını artırdığı bilinmektedir. İnsülin, kas protein yıkımını baskılayan bir hormon olarak değerlendirilmektedir; ancak tek başına yüksek insülin düzeylerinin KPS'yi protein alımı olmaksızın artırmadığı gösterilmiştir (Phillips & Van Loon, 2011). Bu nedenle güncel literatür, karbonhidrat–protein kombinasyonunun özellikle yüksek hacimli veya günde birden fazla antrenman yapılan durumlarda anlamlı olduğunu; hipertrofi açısından temel belirleyicinin yine yeterli protein alımı olduğunu vurgulamaktadır (Slater & Phillips, 2013; Escobar ve ark., 2016). Karbonhidratın asıl katkısı, antrenman performansını ve toparlanmayı destekleyerek dolaylı bir hipertrofik avantaj sağlamasıdır.

4.4. Kreatin monohidrat: direnç egzersizi ile sinerji

Kreatin monohidrat, direnç egzersizi ve beslenme etkileşiminin en güçlü örneklerinden biridir. Kreatin, fosfokreatin depolarını artırarak kısa süreli yüksek yoğunluklu eforlarda performansı destekler; bu durum daha yüksek antrenman hacmi ve mekanik gerilim üretimine olanak tanır (Kreider ve ark., 2017). 2023 yılında yayımlanan bir sistematik derleme ve meta-analiz, kreatin suplementasyonu ile birlikte uygulanan direnç antrenmanının, özellikle bölgesel kas hipertrofisi ölçümlerinde anlamlı artışlar sağlayabildiğini bildirmiştir (Burke ve ark., 2023). Bunu takiben 2024 tarihli bir meta-analiz, kreatinin direnç egzersizi sırasında kuvvet kazanımlarını artırdığını ve bu etkinin genç ve yaşlı bireylerde gözlenebildiğini raporlamıştır (Wang ve ark., 2024). Kreider ve ark. (2017), kreatin monohidratın önerilen dozlarda (genellikle 3–5 g/gün) güvenli ve etkili olduğunu; uzun dönem kullanımda ciddi yan etkilere dair kanıt bulunmadığını belirtmişlerdir. Bu bulgular, kreatinin direnç egzersizi–beslenme etkileşiminde kanıta dayalı bir araç olduğunu göstermektedir.

4.5. Kafein ve Beta-Alanin: Performans ve Dolaylı Adaptasyonlar

Kafein, merkezi sinir sistemi üzerindeki etkileri ve algılanan zorlanmayı azaltıcı özellikleri nedeniyle direnç egzersizi performansını artırabilmektedir. Guest ve ark. (2021), kafeinin 3–6 mg/kg doz aralığında, çoğu bireyde kuvvet ve güç çıktılarında küçük–orta düzeyde artış sağlayabildiğini bildirmişlerdir. Bu performans artışı, daha yüksek antrenman kalitesi ve hacmi yoluyla dolaylı adaptasyonları destekleyebilir.

Beta-alanin takviyesi, kas karnosin düzeylerini artırarak egzersiz sırasında oluşan hidrojen iyonlarının tamponlanmasına katkı sağlamakta ve bu yolla metabolik stresin yüksek olduğu direnç egzersizi protokollerinde yorgunluğun gecikmesine ve performansın

korunmasına yardımcı olmaktadır (Trexler ve ark., 2015; Saunders ve ark., 2017). Trexler ve ark. (2015), beta-alanin takviyesinin direnç egzersizi performansına olan katkısının egzersizin süresi, set yapısı, dinlenme aralıkları ve metabolik stres düzeyi gibi bağlamsal faktörlere bağlı olduğunu belirtmektedir. Buna göre beta-alanin, özellikle 30–240 saniye aralığında yüksek glikolitik stres oluşturan, yüksek tekrar sayılı ve kısa dinlenme aralıklarıyla gerçekleştirilen direnç egzersizi protokollerinde daha belirgin ergojenik etki göstermektedir. Buna karşılık, düşük tekrar sayılı, uzun dinlenme aralıklı ve yüksek mekanik gerilim odaklı direnç egzersizi protokollerinde beta-alanin takviyesinin performans katkısının sınırlı olduğu bildirilmektedir. Yazarlar, bu farklılığın temel nedenini beta-alaninin kas içi karnosin düzeylerini artırarak esas olarak hidrojen iyonu tamponlama kapasitesini geliştirmesi ve bu mekanizmanın kısa süreli maksimal kuvvet üretiminden ziyade metabolik stresin baskın olduğu egzersiz türlerinde daha işlevsel olmasıyla açıklamaktadır (Trexler ve ark., 2015). Bu desteklerin ortak noktası, doğrudan hipertrofi yaratmaktan ziyade, antrenman kapasitesini artırarak direnç egzersizi uyaranını güçlendirmeleridir. Dolayısıyla etkileri, temel beslenme ve programlama ilkeleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

4.6. Bölüm özeti

Direnç egzersizi ve beslenme etkileşimi, basit bir “takviye ekleme” yaklaşımının ötesinde, uyaran–substrat–toparlanma ekseninde çok boyutlu bir süreçtir. Güncel kanıtlar, yeterli enerji ve protein alımı sağlanmadan en gelişmiş antrenman programlarının dahi optimal adaptasyon üretmesinin zor olduğunu göstermektedir (Morton ve ark., 2018; Jäger ve ark., 2017). Bu nedenle modern yaklaşım, direnç egzersizi ve beslenmenin ayrı değil, birlikte planlanmasını önermektedir.

“Direnç egzersizi ve beslenme, takviye temelli bir destekten ziyade, uyaran, substrat ve toparlanmanın birlikte yönetildiği

5. Direnç Egzersizi ve Beslenmenin Kas Hipertrofisine Etkileri

Kas hipertrofisi, direnç egzersizlerinin en çok incelenen adaptasyonlarından biri olup, temelde kas protein sentezi (KPS) ile kas protein yıkımı (KPY) arasındaki dengenin uzun süreli olarak pozitif yönde değişmesiyle ortaya çıkar. Direnç egzersizi bu dengeyi mekanik ve metabolik uyaranlar aracılığıyla etkilerken, beslenme özellikle amino asit ve enerji temini yoluyla hipertrofik yanıtın büyüklüğünü belirlemektedir (Schoenfeld, 2010; Morton ve ark., 2018).

5.1. Hipertrofinin Fizyolojik ve Moleküler Temelleri

Direnç egzersizi sonrası kas liflerinde meydana gelen hipertrofik adaptasyonlar, çok sayıda hücrel sinyal yolunun etkileşimiyle düzenlenmektedir. Bu süreçte en çok vurgulanan mekanizma, mammalian target of rapamycin complex 1 (mTORC1) yolunun aktivasyonudur. mTORC1, mekanik gerilim ve amino asit mevcudiyetine duyarlı bir merkez olarak kas protein sentezinin başlatılmasında kritik rol oynamaktadır (Phillips & Van Loon, 2011).

Mekanik gerilim, kas liflerinde integrinler ve sitoskeletal yapılar aracılığıyla mekanotransdüksiyon sinyallerini tetiklerken; özellikle lösin gibi amino asitler mTORC1 aktivasyonunu güçlendirerek KPS yanıtını artırmaktadır. Bu nedenle hipertrofik adaptasyonlar, yalnızca egzersiz uyarısına değil, egzersiz + beslenme etkileşimine bağlıdır (Witard ve ark., 2019).

5.2. Kas Lif Tipi ve Hipertrofi Yanıtı

İnsan iskelet kası, temel olarak tip I (yavaş kasılan) ve tip II (hızlı kasılan) liflerden oluşmaktadır. Direnç egzersizleri, özellikle

tip II liflerde daha belirgin hipertrofik adaptasyonlar oluşturma eğilimindedir. Bununla birlikte, güncel çalışmalar, yeterli efor düzeyi ve hacim sağlandığında tip I liflerin de hipertrofiye anlamlı katkı sağlayabildiğini göstermektedir (Schoenfeld ve ark., 2017). Beslenme bu noktada lif tipi farklarından bağımsız olarak etkili bir modülatördür. Yeterli protein ve enerji alımı, her iki lif tipinde de kas protein sentezinin sürdürülmesine katkı sağlar. Özellikle yüksek hacimli ve tükenişe yakın çalışmalarda, enerji yetersizliği tip II liflerde hipertrofi yanıtını daha belirgin biçimde sınırlayabilmektedir (Morton ve ark., 2018).

5.3. Enerji Fazlası, Enerji Dengesi ve Hipertrofi

Hipertrofi hedefli direnç antrenmanlarında enerji durumu, kas kütlesi kazanımının büyüklüğünü belirleyen temel faktörlerden biridir. Pozitif enerji dengesi, kas protein sentezi için gerekli olan enerji ve substratların sağlanmasını kolaylaştırmakta; aynı zamanda anabolik süreçleri destekleyen hormonal ortamın sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Phillips & Van Loon, 2011; Slater & Phillips, 2013).

Enerji fazlası koşullarında, direnç egzersiziyle uyarılan kas protein sentezinin baskılanmadan devam edebildiği; buna karşılık enerji kısıtlamasının protein sentezini sınırlayarak hipertrofik adaptasyonları olumsuz etkileyebileceği bildirilmektedir (Areta ve ark., 2013). Bu nedenle klasik ve güncel literatür, hipertrofi dönemlerinde hafif-orta düzeyde enerji fazlasını (yaklaşık %5–15) önermektedir (Slater ve ark., 2019). Bununla birlikte, aşırı enerji fazlasının yağ kütlesi artışı riskini beraberinde getirdiği; optimal hipertrofi için enerji alımının bireysel antrenman yükü, vücut kompozisyonu ve toparlanma kapasitesi dikkate alınarak planlanması gerektiği vurgulanmaktadır (Helms ve ark., 2014; Garthe ve ark., 2011).

5.4. Protein Alımı ve Hipertrofi İlişkisi

Protein alımı ile hipertrofi arasındaki ilişki, direnç egzersizi literatüründe en güçlü kanıt tabanına sahip alanlardan biridir. Morton ve ark. (2018) kapsamlı meta-analizinde, protein suplementasyonunun direnç antrenmanına eşlik ettiğinde yağsız kütle artışını anlamlı düzeyde artırdığı açıklanmıştır. Bu etkinin özellikle protein alımı düşük olan bireylerde daha belirgin olduğu bildirilmiştir. Alan yazında, hipertrofi için optimal protein alımının bireyler arasında değişkenlik gösterdiğini; ancak çoğu aktif birey için 1,6 g/kg/gün civarında plato etkisi görüldüğünü öne sürmektedir. Bununla birlikte ileri düzey sporcular, yaşlı bireyler veya enerji açığı altında olanlar için daha yüksek alımlar gerekebilir (Jäger ve ark., 2017; Phillips & Van Loon, 2011).

5.5. Kilo Kaybı Dönemlerinde Hipertrofi ve Yağsız Kütlenin Korunması

Kilo kaybı hedeflenen dönemlerde hipertrofi elde etmek daha zor olmakla birlikte, yağsız kütlenin korunması mümkündür ve klinik açıdan büyük önem taşır. Enerji açığı altında uygulanan direnç antrenmanı, kas protein sentezini uyararak kas kaybını sınırlayabilir; ancak bu etkinin sürdürülebilmesi için protein alımının artırılması gerekmektedir (Helms ve ark., 2014). Helms ve ark (2014), enerji kısıtlaması altındaki sporcularda protein alımının 2,3–3,1 g/kg yağsız kütle aralığında tutulmasının kas kaybını minimize edebileceğini bildirmiştir. Literatür, bu stratejinin yalnızca sporcular için değil, kilo kaybı sürecindeki aktif bireyler için de uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Murphy ve ark., 2015).

Bu bağlamda, direnç egzersizi ve beslenme entegrasyonu, kilo kaybı dönemlerinde yalnızca estetik değil, metabolik ve fonksiyonel sağlık açısından da kritik bir rol oynamaktadır.

5.6. Hipertrofi Sürecinin Değerlendirilmesinde Vücut Kompozisyonu Ölçüm Yöntemlerinin Metodolojik Önemi

Vücut kompozisyonu analiz yöntemlerinin seçimi, kas kütlesi kazanım süreçlerinin objektif olarak değerlendirilmesi ve ergojenik planlamanın optimize edilmesi açısından belirleyici bir rol oynamaktadır; zira sporcularda uygulanan metodolojinin hassasiyeti, hipertrofik doku artışının niteliğini ve kas protein sentezi odaklı gelişimin doğruluğunu doğrudan tayin eder (Küçükkubaş ve ark., 2021).

Vücut kompozisyonu ölçüm yöntemleri, hipertrofinin biyolojik gerçekliğini farklı düzeylerde ve farklı hata kaynaklarıyla temsil eder. Örneğin DXA, toplam ve bölgesel “lean mass” (yağsız kütle) ölçerek direnç antrenmanı sonrası oluşan değişimleri takipte yaygın bir araçtır; fakat DXA’nın yakaladığı “lean” bileşen kas dokusuyla sınırlı değildir (su, glikojen vb. dâhil) ve özellikle müdahale çalışmalarında DXA ile ölçülen Yağsız kütle değişimleri ile MRI ile ölçülen kas hacmi değişimleri birebir örtüşmeyebilir (Küçükkubaş, 2025; Tavoian ve ark., 2019). Bu nedenle hipertrofi takibinde DXA kullanılırken cihazın precision error’u ve buna bağlı least significant change (LSC) yaklaşımıyla “gerçek değişim” eşiğinin belirlenmesi önerilir (Barlow ve ark., 2015; Slart ve ark., 2025). Ayrıca ACSM’nin direnç antrenmanı ilerleme modelleri, hipertrofi hedeflerinde çoklu set/hacim gibi program değişkenlerinin önemini vurgularken, ölçüm tarafında da izlenen çıktının (kas boyutu mu, yağsız kütle mi) yöneme göre değişebileceğini dolaylı olarak hatırlatır (ACSM 2009). Hipertrofiye daha “doku-odaklı” yaklaşmak için kas kalınlığı/alanı gibi lokal ölçümler tercih edildiğinde ultrasonografi, erişilebilirliği yüksek ve maliyeti görece düşük bir seçenek olarak öne çıkar: Sistematik derlemeler ultrasonun kas boyutunu değerlendirmede güvenilir ve geçerli olabildiğini; bazı çalışmalarda da uzun dönem direnç antrenmanı yanıtını izleyebildiğini göstermektedir (Nijholt ve ark., 2017; Franchi ve

ark., 2017; Stokes ve ark., 2021). Bununla birlikte ultrason, bölgesel hipertrofi farklılıkları nedeniyle kasın tüm hacmini tek bir noktadan “tahmin etme” açısından sınırlı olabilir (Franchi ve ark., 2017). Saha uygulamalarında sık kullanılan BIA ise maliyet/kolaylık avantajına rağmen özellikle hidrasyon ve ölçüm koşullarındaki değişkenlik nedeniyle kısa-orta vadeli yağ harici kütle değişimlerini izlerken hataya açık olabilir; bu yüzden hipertrofi sürecini izlerken BIA verilerinin standart protokollerle (aynı saat, benzer hidrasyon, benzer beslenme/egzersiz aralığı) ve mümkünse DXA/ultrason gibi yöntemlerle desteklenmesi önerilir (Langer ve ark., 2018, Küçükkubaş, 2021; Küçükkubaş, 2025).

Bunların yanında mevcut literatürde, obez veya aşırı zayıf bireylerde yaygın olarak kullanılan deri kıvrım kalınlığı (skinfold) regresyon formülleri yağ kütlesi arttıkça doku sıkıştırılabilirliği ve hidrasyon varyasyonları nedeniyle geçerliliğini yitirdiği ve bu kısıtlılıkların hatalı sonuçlara yol açtığı vurgulanmaktadır. Bu metodolojik sınırlamalar karşısında, hipertrofi odaklı sporcu ölçümlerinde toplam vücut kompozisyonundan ziyade doku bazlı değişimlere odaklanılması gerekliliği ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, enerji fazlası dönemlerinde kas-yağ dengesini hassas bir şekilde izlemek adına bel, kalça ve ekstremitte çevresi gibi antropometrik ölçümlerin kullanılması, bölgesel hipertrofiyi değerlendirmede daha güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, sporcuların mezomorfik bileşen değişimlerini takip eden somatotip analizleri ile deri altı yağ dokusundan bağımsız olarak kas kesit alanını doğrudan ölçebilen ultrasonografik yöntemlerin kullanımı, gelişim takibinde yüksek doğruluk payı sağlamaktadır. Stratejik açıdan değerlendirildiğinde, hipertrofi evrelerinde gerçek kas artışının ödem veya adipoz doku birikiminden ayırt edilmesi, antrenman yükü ve enerji alımının mikro düzeyde regülasyonuna olanak tanıyarak performans kapasitesinin korunmasını ve estetik

hedeflerin sürdürülebilirliğini optimize etmektedir (Küçukkubaş ve ark 2021)

5.7. Bölüm Özeti

Kas hipertrofisi, direnç egzersizi ve beslenmenin ayrılmaz biçimde etkileştiği karmaşık bir adaptasyon sürecidir. Mekanik gerilim, anabolik sinyalleme ve amino asit mevcudiyeti, hipertrofik yanıtın temel belirleyicileri olarak öne çıkmaktadır (Schoenfeld, 2010; Phillips & Van Loon, 2011). Yukarıda verilen kanıtlarda, yeterli protein alımı ve uygun enerji stratejileri olmaksızın direnç egzersizinden elde edilecek hipertrofik kazanımların sınırlı kalacağını açıkça göstermektedir. Bu nedenle hipertrofi hedefli programlar, antrenman ve beslenmenin eş zamanlı ve bireyselleştirilmiş biçimde planlanmasını gerektirmektedir.

“Kas hipertrofisi, yalnızca antrenman uyarınının değil; mekanik gerilim, anabolik sinyalleme ve yeterli besin mevcudiyetinin eş zamanlı yönetimiyle şekillenen çok boyutlu bir adaptasyon sürecidir”

6. Toparlanma ve Yeniden Hazır Oluş: Beslenmenin Rolü

Toparlanma, direnç egzersizine bağlı fizyolojik adaptasyonların sürekliliğini ve kalitesini belirleye temel süreçlerden biri olarak kabul edilmektedir (Kellmann ve ark., 2018; Peake ve ark., 2017). Yetersiz toparlanma, bir sonraki antrenmanın performansını düşürmekle kalmaz; uzun vadede kuvvet ve hipertrofi kazanımlarını da sınırlar ve aşırı yüklenme riskini artırmaktadır (Meeusen ve ark., 2013).

Alan yazındaki yaklaşımlar toparlanmayı yalnızca “dinlenme süresi” olarak değil, antrenman–beslenme–uyku–psikolojik stres etkileşimi içerisinde çok boyutlu bir süreç olarak ele almaktadır. Bu

çerçeve de beslenme, toparlanma sürecinin merkezinde yer almakta; kas protein sentezinin yeniden uyarılması, glikojen depolarının yenilenmesi ve egzersize bağı l inflamatuvar yanıtın düzenlenmesinde kritik rol oynamaktadır (Dupuy ve ark., 2018; Kellmann ve ark., 2018).

6.1. Direnç Egzersizi Sonrası Toparlanmanın Fizyolojik Temelleri

Direnç egzersizi sonrasında kas dokusunda metabolik yorgunluk, mikro yapısal bozulmalar ve geçici nöromüsküler fonksiyon kayıpları ortaya çıkabilmektedir. Bu akut yanıtlar, mekanik gerilim ve metabolik stresin tetiklediği hücre sel sinyal yollarının aktivasyonu ile birlikte toparlanma fazına geçilmesini sağlar. Güncel literatür, toparlanma sürecinin kas protein sentezinin yeniden uyarılması, inflamatuvar yanıtların düzenlenmesi ve nöromüsküler fonksiyonun restorasyonu gibi çok boyutlu fizyolojik mekanizmaları içerdiğini ortaya koymaktadır (Peake ve ark., 2019; Damas ve ark., 2018).

Egzersiz sonrası dönemde kas protein sentezindeki artış, kas onarımı ve yeniden yapılanma süreçleri için kritik bir fizyolojik pencere oluşturmaktadır. Ancak bu adaptif yanıtın büyüklüğü ve süresi, yalnızca egzersiz uyarana na de ğil; aynı zamanda amino asit mevcudiyeti, enerji dengesi ve toplam beslenme durumuna da doğrudan bağı lıdır (Phillips & Van Loon, 2011). Yetersiz enerji veya protein alımı koşullarında, egzersizle uyarılan kas protein sentezinin baskılandığı ve toparlanma sürecinin uzadı ğı bildirilmektedir (Moore ve ark., 2015).

Güncel toparlanma modelleri, bu süreci yalnızca “egzersiz sonrası dinlenme” olarak de ğil; antrenman yükü, beslenme stratejileri, uyku kalitesi ve psikolojik stresin etkileşimi içinde de ğerlendirmektedir. Bu bağlamda beslenme, özellikle kas protein sentezinin sürdürülmesi, glikojen yenilenmesi ve inflamatuvar

yanıtların kontrolü yoluyla toparlanma sürecinin merkezinde yer almaktadır (Kellmann ve ark., 2018; Peake ve ark., 2019). Dolayısıyla direnç egzersizi sonrası toparlanma, fizyolojik adaptasyonların sürekliliği açısından egzersiz–beslenme etkileşiminin en belirgin şekilde gözlemlendiği süreçlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

6.2. Protein Alımı ve Toparlanma

Protein alımı, direnç egzersizi sonrası toparlanmanın ve yeniden hazır oluşun merkezinde yer alan temel beslenme bileşenlerinden biridir. Güncel çalışmalar, yeterli protein alımının egzersizle uyarılan kas protein sentezini artırarak kas hasarının onarımını desteklediğini ve bu etkinin yalnızca akut toparlanma üzerinde değil, uzun vadeli kuvvet ve hipertrofi adaptasyonları üzerinde de belirleyici olduğunu göstermektedir (Murphy ve ark., 2015). Direnç egzersizi sonrası yaklaşık 0.25–0.40 g/kg protein alımının, kas protein sentezini maksimize etmek için yeterli olduğu ve bu etkinin protein kalitesi, özellikle lösin içeriği ile yakından ilişkili olduğu bildirilmektedir (Phillips & Van Loon, 2011; Moore ve ark., 2015).

Protein alımının toparlanma üzerindeki etkisinin yalnızca egzersiz sonrası kısa zaman dilimiyle sınırlı olmadığını; gün içine dengeli biçimde dağıtılan protein alımının (her öğünde ~0.3 g/kg) kas protein dengesinin korunması ve toparlanmanın sürekliliği açısından daha etkili olduğunu vurgulamaktadır (Hudson ve ark., 2020; Snijders ve ark., 2019). Ayrıca yakın dönem derleme ve deneysel çalışmalar, yeterli protein alımının egzersize bağlı kas ağrısı (DOMS) ve geçici performans düşüşü üzerinde dolaylı ancak anlamlı olumlu etkiler sağlayabildiğini; bu etkinin özellikle enerji dengesi korunmuş bireylerde daha belirgin olduğunu bildirmektedir (Kouw ve ark., 2017). Bu bulgular, protein alımının toparlanma

sürecinde beslenme–antrenman etkileşiminin ayrılmaz bir parçası olduğunu desteklemektedir.

6.3. Karbonhidrat, Glikojen Yenilenmesi ve Performansın Sürdürülmesi

Direnç egzersizleri, klasik dayanıklılık egzersizlerine kıyasla daha sınırlı glikojen tüketimi oluşturabilse de yüksek hacimli seanslar, kısa dinlenme aralıkları, çoklu seanslı günler ve yüksek antrenman sıklığı gibi koşullarda kas glikojeninin yenilenmesi toparlanma ve performansın sürdürülmesi açısından belirgin biçimde önem kazanır (Henselmans, 2022). Yetersiz karbonhidrat alımı veya toparlanma penceresinde karbonhidratın geciktirilmesi, glikojen resentez hızını düşürebilir ve sonraki seanslarda performans çıktıları ile algılanan zorlanmayı olumsuz etkileyebilir (Gonzalez, 2021; Díaz-Lara ve ark., 2024).

Güncel toparlanma beslenmesi literatürü, aynı gün içinde birden fazla antrenman yapılan ya da antrenman hacminin yüksek olduğu durumlarda erken dönemde karbonhidrat alımının glikojen yenilenmesini ve tekrar performans kapasitesini destekleyebileceğini; ancak etkinin büyüklüğünün antrenmanın yapısı, enerji dengesi, toplam karbonhidrat miktarı ve zamanlamaya bağlı olarak değiştiğini vurgulamaktadır (Wang ve ark., 2024). Bu nedenle karbonhidrat stratejileri, “herkese tek doz” yaklaşımından ziyade antrenman gününün yüküne (tek seans / çift seans), toplam hacme ve toparlanma süresinin kısalığına göre bağlamsal biçimde planlanmalıdır (Henselmans, 2022; Gonzalez, 2021).

6.4. Egzersize Bağlı Kas Hasarı ve Beslenme

Egzersize bağlı kas hasarı, özellikle alışılmadık yüklenmeler ve yüksek eksantrik gerilim içeren direnç egzersizleri sonrasında ortaya çıkabilen fizyolojik bir süreçtir. Güncel literatür, kas hasarının hipertrofik adaptasyonlar için tamamen ortadan kaldırılması gereken

bir durum olmadığını; ancak aşırı düzeyde kas hasarının toparlanmayı geciktirerek antrenman sıklığını ve performans sürekliliğini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir (Damas ve ark., 2018; Peake ve ark., 2019).

Bu noktada beslenme, kas hasarının onarımı ve inflamatuvar yanıtların düzenlenmesi açısından destekleyici bir rol üstlenmektedir. Özellikle yeterli protein ve enerji alımı, kas protein sentezinin sürdürülmesi ve doku onarım süreçlerinin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir (Murphy ve ark., 2015). Bununla birlikte mikro besinler, özellikle D vitamini ve antioksidan kapasiteye sahip besin öğeleri, bağışıklık fonksiyonu ve inflamatuvar yanıtın kontrolü yoluyla toparlanmayı dolaylı olarak etkileyebilmektedir (Owens ve ark., 2018).

Ancak güncel kanıtlar, yüksek doz antioksidan suplementasyonunun (C ve E vitaminleri gibi) egzersize bağlı hücresel sinyalleri baskılayarak uzun vadeli adaptasyonları olumsuz etkileyebileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle antioksidan stratejilerinin, suplementasyon yerine dengeli ve besin temelli yaklaşımlar çerçevesinde ele alınması önerilmektedir (Merry & Ristow, 2016).

6.5. Kreatin, Toparlanma ve Yeniden Hazır Oluş (2020+ Güncellenmiş)

Kreatin monohidrat, direnç egzersizi literatüründe yalnızca performans artışıyla değil, toparlanma ve yeniden hazır oluş süreçleriyle de ilişkilendirilen en güçlü ergojenik desteklerden biridir. Kreatinin kas içi fosfokreatin depolarını artırması, yüksek yoğunluklu tekrar eden eforlar arasında ATP yeniden sentezini hızlandırarak toparlanma kapasitesini iyileştirebilmektedir (Kreider ve ark., 2017).

2020 sonrası meta-analizler ve sistematik derlemeler, kreatin suplementasyonunun direnç egzersizi performansı, maksimal kuvvet ve yağsız vücut kütlesi kazanımları üzerinde anlamlı olumlu etkiler sağladığını; bu kazanımların dolaylı olarak toparlanma–performans döngüsünü desteklediğini bildirmektedir (Burke ve ark., 2023; Candow ve ark., 2025).

Bu doğrultuda kreatin, toparlanmayı doğrudan değil; enerji sistemleri ve antrenman kalitesi üzerinden dolaylı biçimde destekleyen, kanıta dayalı bir beslenme stratejisi olarak değerlendirilmektedir.

6.6. Uyku–Beslenme–Toparlanma Etkileşimi (2020+ Güncellenmiş)

Toparlanma süreçleri yalnızca egzersiz ve beslenme ile sınırlı değildir; uyku, kas protein sentezi, hormonal yanıtlar ve nöromusküler fonksiyonların restorasyonu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Güncel çalışmalar, yetersiz uyku süresi veya kalitesinin kas protein sentezini baskıladığını, enerji dengesini bozduğunu ve direnç egzersizi adaptasyonlarını sınırladığını göstermektedir (Saner ve ark., 2020; Knowles ve ark., 2018).

Beslenme ve uyku arasındaki etkileşim çift yönlüdür. Yetersiz enerji veya protein alımı uyku kalitesini olumsuz etkileyebilirken; kronik uyku kısıtlaması da besin seçimi, iştah düzeni ve toparlanma kapasitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir (St-Onge ve ark., 2016). Bu nedenle toparlanma, tek bir değişkene odaklanmak yerine antrenman–beslenme–uyku–stres bileşenlerinin birlikte ele alındığı bütüncül bir yaklaşım çerçevesinde değerlendirilmelidir (Kellmann ve ark., 2018).

6.7. Bölüm Özeti

Toparlanma ve yeniden hazır oluş, direnç egzersizi adaptasyonlarının sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez

süreçlerdir. Güncel kanıtlar; yeterli protein alımı, enerji dengesi, bağlama uygun karbonhidrat stratejileri, kanıta dayalı ergojenik destekler ve yeterli uyku süresinin, toparlanma süreçlerini doğrudan veya dolaylı olarak etkilediğini göstermektedir (Kreider ve ark., 2017).

Bu bulgular, direnç egzersizi ve beslenmenin yalnızca performans ve hipertrofi değil, toparlanma ve adaptasyon sürekliliği açısından da birlikte ve bütüncül biçimde planlanması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

“Toparlanma, direnç egzersizi adaptasyonlarının tamamlayıcısı değil; performans, hipertrofi ve sürdürülebilir gelişimin belirleyici temel bileşenidir”

7. Genel Sonuç ve Uygulamaya Yönelik Çıkarımlar

Bu kitap bölümünde ele alınan güncel ve kanıta dayalı bulgular, direnç egzersizleri ile beslenme arasındaki ilişkinin ayrılmaz, dinamik ve bağlama duyarlı bir yapı sergilediğini göstermektedir. Performans, kas hipertrofisi ve toparlanma hedefleri; yalnızca antrenman değişkenleriyle değil, enerji yeterliliği, protein stratejileri, karbonhidrat erişilebilirliği ve bireyselleştirilmiş beslenme planlaması ile birlikte optimize edilebilmektedir.

Uygulamaya Yönelik Temel Çıkarımlar

- Hipertrofi ve toparlanma için hafif–orta enerji fazlası ve yeterli protein alımı esastır.
- Protein alımı zamanlama kadar gün içi dağılım açısından da planlanmalıdır.
- Karbonhidrat stratejileri, antrenman hacmi ve seans sayısına bağlı olarak düzenlenmelidir.
- Kreatin monohidrat, toparlanmayı dolaylı ve güvenli biçimde destekleyen en güçlü ergojenik desteklerden biridir.

- Aşırı antioksidan suplementasyonundan kaçınılmalı, besin temelli yaklaşımlar tercih edilmelidir.
- Uyku, beslenme ve antrenman yükü tek bir sistem olarak ele alınmalıdır

Sonuç olarak, direnç egzersizi ve beslenmenin entegrasyonu; yalnızca kısa vadeli performans kazanımları değil, uzun vadeli adaptasyonlar, sakatlanma riskinin azaltılması ve sürdürülebilir antrenman başarısı açısından da temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

“Direnç egzersizi ve beslenme, performans, hipertrofi ve toparlanmayı birlikte şekillendiren; bağlama duyarlı ve bütüncül biçimde planlanması gereken dinamik bir adaptasyon sistemidir”

8. Kaynakça

American College of Sports Medicine. (2022). *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription* (11. baskı). Wolters Kluwer.

American College of Sports Medicine. (2024). Resistance exercise for health. *ACSM's Health & Fitness Journal*, 28(3), 14–20.

American College of Sports Medicine. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine and science in sports and exercise*, 41(3), 687-708.

Areta, J. L., Burke, L. M., Ross, M. L. R., Camera, D. M., West, D. W. D., Broad, E. M., Jeacocke, N. A., Moore, D. R., Stellingwerff, T., Phillips, S. M., Hawley, J. A., ve ark. (2013). Timing and distribution of protein ingestion during prolonged recovery from resistance exercise alters myofibrillar protein synthesis. *The Journal of Physiology*, 591(9), 2319–2331. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.244897>

Barlow, M. J., Oldroyd, B., Smith, D., Lees, M. J., Brightmore, A., Till, K., ... & Hind, K. (2015). Precision error in dual-energy X-ray absorptiometry body composition measurements in elite male rugby league players. *Journal of Clinical Densitometry*, 18(4), 546-550.

Baz-Valle, E., Fontes-Villalba, M., & Santos-Concejero, J. (2021). Total number of sets as a training volume quantification method for muscle hypertrophy: a systematic review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(3). <https://doi.org/870-878.10.1519/JSC.0000000000002776>

Baz-Valle, E., Balsalobre-Fernández, C., Alix-Fages, C., & Santos-Concejero, J. (2022). A systematic review of the effects of different resistance training volumes on muscle

hypertrophy. *Journal of human kinetics*, 81, 199.
<https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0017>

Burke, R., Piñero, A., Coleman, M., Mohan, A., Sapuppo, M., Augustin, F., ... & Schoenfeld, B. J. (2023). The effects of creatine supplementation combined with resistance training on regional measures of muscle hypertrophy: a systematic review with meta-analysis. *Nutrients*, 15(9), 2116.
<https://doi.org/10.3390/nu15092116>

Candow, D. G., & Moriarty, T. (2025). Effects of creatine monohydrate supplementation on muscle, bone and brain-hope or hype for older adults? *Current Osteoporosis Reports*, 23(1), 1.
<https://doi.org/10.1007/s11914-024-00895-x>

Clarkson, P. M., & Hubal, M. J. (2002). Exercise-induced muscle damage in humans. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 81(11 Suppl), S52–S69.
<https://doi.org/10.1097/00002060-200211001-00007>

Close, G. L., Hamilton, D. L., Philp, A., Burke, L. M., & Morton, J. P. (2016). New strategies in sport nutrition to increase exercise performance. *Free radical biology and medicine*, 98, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.01.016>.

Damas, F., Libardi, C. A., & Ugrinowitsch, C. (2018). The development of skeletal muscle hypertrophy through resistance training: the role of muscle damage and muscle protein synthesis. *European journal of applied physiology*, 118(3), 485–500.
<https://doi.org/10.1007/s00421-017-3792-9>

Damas, F., Phillips, S. M., Libardi, C. A., Vechin, F. C., Lixandrão, M. E., Jannig, P. R., ... & Ugrinowitsch, C. (2016). Resistance training-induced changes in integrated myofibrillar protein synthesis are related to hypertrophy only after attenuation of

muscle damage. *The Journal of physiology*, 594(18), 5209-5222.
<https://doi.org/10.1113/JP272472>

DeLorme, T. L. (1945). Restoration of muscle power by heavy-resistance exercises. *JBJS*, 27(4), 645-667.

Díaz-Lara, J., Reisman, E., Botella, J., Probert, B., Burke, L. M., Bishop, D. J., & Lee, M. J. (2024). Delaying post-exercise carbohydrate intake impairs next-day exercise capacity but not muscle glycogen or molecular responses. *Acta Physiologica*, 240(10), e14215. <https://doi.org/10.1111/apha.14215>

Dupuy, O., Douzi, W., Theurot, D., Bosquet, L., & Dugué, B. (2018). An evidence-based approach for choosing post-exercise recovery techniques to reduce markers of muscle damage, soreness, fatigue, and inflammation: a systematic review with meta-analysis. *Frontiers in physiology*, 9, 312968.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00403>

Escobar, K. A., VanDusseldorp, T. A., & Kerkick, C. M. (2016). Carbohydrate intake and resistance-based exercise: are current recommendations reflective of actual need?. *British Journal of Nutrition*, 116(12), 2053-2065.
<https://doi.org/10.1017/S0007114516003949>.

Fiatarone, M. A., Marks, E. C., Ryan, N. D., Meredith, C. N., Lipsitz, L. A., & Evans, W. J. (1990). High-intensity strength training in nonagenarians: effects on skeletal muscle. *Jama*, 263(22), 3029-3034. <https://doi.org/10.1001/jama.1990.03440220053029>

Franchi, M. V., Longo, S., Mallinson, J., Quinlan, J. I., Taylor, T., Greenhaff, P. L., & Narici, M. V. (2018). Muscle thickness correlates to muscle cross-sectional area in the assessment of strength training-induced hypertrophy. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 28(3), 846-853.

Garthe, I., Raastad, T., Refsnes, P. E., Koivisto, A., & Sundgot-Borgen, J. (2011). Effect of two different weight-loss rates on body composition and strength and power-related performance in elite athletes. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 21(2), 97-104. [https://doi.org/ 10.1123/ijnsnem.21.2.97](https://doi.org/10.1123/ijnsnem.21.2.97)

Gonzalez, J. T., & Wallis, G. A. (2021). Carb-conscious: the role of carbohydrate intake in recovery from exercise. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 24(4), 364-371. <https://doi.org/10.1097/MCO.0000000000000761>.

Gorissen, S. H., & Witard, O. C. (2018). Characterising the muscle anabolic potential of dairy, meat and plant-based protein sources in older adults. *Proceedings of the Nutrition Society*, 77(1), 20-31. <https://doi.org/10.1017/S002966511700194X>.

Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Orazem, J., & Sabol, F. (2022). Effects of resistance training performed to repetition failure or non-failure on muscular strength and hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *Journal of sport and health science*, 11(2), 202-211. [https://doi.org/ 10.1016/j.jshs.2021.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.01.007).

Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Davies, T. B., Lazinica, B., Krieger, J. W., & Pedisic, Z. (2018). Effect of resistance training frequency on gains in muscular strength: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(5), 1207-1220. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0872-x>.

Guest, N. S., VanDusseldorp, T. A., Nelson, M. T., Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Jenkins, N. D., ... & Campbell, B. I. (2021). International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00383-4>.

Haff, G. G., & Triplett, N. T. (Eds.). (2016). *Essentials of strength training and conditioning* (4th ed.). Human Kinetics.

Harbili, S., Özergin, U., Harbili, E., & Akkuş, H. (2005). Kuvvet Antrenmanının Vücut Kompozisyonu ve Bazı Hormonlar Üzerine Etkisi. *Spor Bilimleri Dergisi*, 16(2), 64-76.

Helms, E. R., Aragon, A. A., & Fitschen, P. J. (2014). Evidence-based recommendations for natural bodybuilding contest preparation: nutrition and supplementation. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 11(1), 20. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-11-20>.

Helms, E. R., Cronin, J., Storey, A., & Zourdos, M. C. (2016). Application of the repetitions in reserve-based rating of perceived exertion scale for resistance training. *Strength & Conditioning Journal*, 38(4), 42-49. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000218>.

Helms, E. R., Zinn, C., Rowlands, D. S., & Brown, S. R. (2014). A systematic review of dietary protein during caloric restriction in resistance trained lean athletes: a case for higher intakes. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 24(2), 127-138.. <https://doi.org/10.1123/ijnsnem.2013-0054>.

Henselmans, M., Bjørnsen, T., Hedderman, R., & Vårvik, F. T. (2022). The effect of carbohydrate intake on strength and resistance training performance: a systematic review. *Nutrients*, 14(4), 856. <https://doi.org/10.3390/nu14040856>.

Hornberger, T. A. (2011). Mechanotransduction and the regulation of mTORC1 signaling in skeletal muscle. *The international journal of biochemistry & cell biology*, 43(9), 1267-1276. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2011.05.007>.

Hudson, J. L., Bergia III, R. E., & Campbell, W. W. (2020). Protein distribution and muscle-related outcomes: does the evidence

support the concept?. *Nutrients*, 12(5), 1441.
<https://doi.org/10.3390/nu12051441>.

Hurley, B. F., & Roth, S. M. (2000). Strength training in the elderly: effects on risk factors for age-related diseases. *Sports medicine*, 30(4), 249-268.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200030040-00002>.

Iraki, J., Fitschen, P., Espinar, S., & Helms, E. (2019). Nutrition recommendations for bodybuilders in the off-season: A narrative review. *Sports*, 7(7), 154.
<https://doi.org/10.3390/sports7070154>.

Jäger, R., Kerksick, C. M., Campbell, B. I., Cribb, P. J., Wells, S. D., Skwiat, T. M., ... & Antonio, J. (2017). International society of sports nutrition position stand: protein and exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 14(1), 20.
<https://doi.org/10.1186/s12970-017-0177-8>

Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., ... & Beckmann, J. (2018). Recovery and performance in sport: consensus statement. *International journal of sports physiology and performance*, 13(2), 240-245.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0759>.

Knowles, O. E., Drinkwater, E. J., Urwin, C. S., Lamon, S., & Aisbett, B. (2018). Inadequate sleep and muscle strength: Implications for resistance training. *Journal of science and medicine in sport*, 21(9), 959-968.
<https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.01.012>.

Kouw, I. W., Holwerda, A. M., Trommelen, J., Kramer, I. F., Bastiaanse, J., Halson, S. L., ... & van Loon, L. J. (2017). Protein ingestion before sleep increases overnight muscle protein synthesis rates in healthy older men: a randomized controlled trial. *The*

Journal of nutrition, 147(12), 2252-2261.
<https://doi.org/10.3945/jn.117.254532>.

Kraemer, W. (2004). Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Medicine & science in sports & exercise*. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000121945.36635.61>.

Kraemer, W. J., Adams, K., Cafarelli, E., Dudley, G. A., Dooly, C., Feigenbaum, M. S., ... & Triplett-McBride, T. (2002). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(2), 364-380.
<https://doi.org/10.1097/00005768-200202000-00027>.

Kreider, R. B., Kalman, D. S., Antonio, J., Ziegenfuss, T. N., Wildman, R., Collins, R., ... & Lopez, H. L. (2017). International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 14(1), 18.
<https://doi.org/10.1186/s12970-017-0173>.

Küçükkubaş, N. (2025). Vücut Kompozisyonu Belirlenmesinde Altın Standart Densitometri Teknikleri Kullanımı. *Yalova Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi*, 4(2), 295-316.
<https://doi.org/10.70007/yalovaspor.1753807>

Küçükkubaş, N. (2021). Vücut Kompozisyonun Belirlenmesi ve Çok Bileşenli Modeller. *Başkent Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi*, 6(1), 31-49.

Langer, R. D., Matias, C. N., Borges, J. H., Cirolini, V. X., Páscoa, M. A., Guerra-Júnior, G., & Gonçalves, E. M. (2018). Accuracy of bioelectrical impedance analysis in estimated longitudinal fat-free mass changes in male army cadets. *Military Medicine*, 183(7-8), e324-e331.

Mann, S., Beedie, C., & Jimenez, A. (2014). Differential effects of aerobic exercise, resistance training and combined exercise modalities on cholesterol and the lipid profile: review, synthesis and recommendations. *Sports medicine*, 44(2), 211-221. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0110-5>.

Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., ... & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine and science in sports and exercise*, 45(1), 186-205. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318279a10a>

Merry, T. L., & Ristow, M. (2016). Mitohormesis in exercise training. *Free Radical Biology and Medicine*, 98, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.11.032>.

Moore, D. R., Churchward-Venne, T. A., Witard, O., Breen, L., Burd, N. A., Tipton, K. D., & Phillips, S. M. (2015). Protein ingestion to stimulate myofibrillar protein synthesis requires greater relative protein intakes in healthy older versus younger men. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, 70(1), 57-62. <https://doi.org/10.1093/gerona/glu103>.

Morton, R. W., Murphy, K. T., McKellar, S. R., Schoenfeld, B. J., Henselmans, M., Helms, E., ... & Phillips, S. M. (2018). A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *British journal of sports medicine*, 52(6), 376-384. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2017-097608>.

Morton, R. W., Oikawa, S. Y., Wavell, C. G., Mazara, N., McGlory, C., Quadrilatero, J., ... & Phillips, S. M. (2016). Neither

load nor systemic hormones determine resistance training-mediated hypertrophy or strength gains in resistance-trained young men. *Journal of applied physiology*, 121(1),129-138. [https://doi.org/ 10.1152/jappphysiol.00154.2016](https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00154.2016).

Mountjoy, M. L., Burke, L. M., Stellingwerff, T., & Sundgot-Borgen, J. (2018). Relative energy deficiency in sport: The tip of an iceberg. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 28(4), 313-315.

Murphy, C. H., Churchward-Venne, T. A., Mitchell, C. J., Kolar, N. M., Kassis, A., Karagounis, L. G., ... & Phillips, S. M. (2015). Hypoenergetic diet-induced reductions in myofibrillar protein synthesis are restored with resistance training and balanced daily protein ingestion in older men. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 308(9),734-743. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00550.2014>.

Nijholt, W., Scafoglieri, A., Jager-Wittenaar, H., Hobbelen, J. S., & van der Schans, C. P. (2017). The reliability and validity of ultrasound to quantify muscles in older adults: a systematic review. *Journal of cachexia, sarcopenia and muscle*, 8(5), 702-712.

Owens, D. J., Allison, R., & Close, G. L. (2018). Vitamin D and the athlete: current perspectives and new challenges. *Sports medicine*, 48(Suppl 1), 3-16. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0841-9>.

Peake, J. M., Neubauer, O., Della Gatta, P. A., & Nosaka, K. (2017). Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *Journal of applied physiology*. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00971.2016>.

Peake, J. M. (2019). Recovery after exercise: what is the current state of play?. *Current Opinion in Physiology*, 10, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.cophys.2019.03.007>

Phillips, S. M., & Van Loon, L. J. (2011). Dietary protein for athletes: from requirements to optimum adaptation. *Food, Nutrition and Sports Performance III*, 29-38. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.619204>

Proske, U., & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of physiology*, 537(2), 333-345. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00333>

Roig, M., O'Brien, K., Kirk, G., Murray, R., McKinnon, P., Shadgan, B., & Reid, W. D. (2009). The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 43(8), 556-568. <https://doi.org/10.1136/bjism.2008.051417>

Saner, N. J., Lee, M. J. C., Pitchford, N. W., Kuang, J., Roach, G. D., Garnham, A., ... & Bartlett, J. D. (2020). The effect of sleep restriction, with or without high-intensity interval exercise, on myofibrillar protein synthesis in healthy young men. *The Journal of physiology*, 598(8), 1523-1536. <https://doi.org/10.1113/JP278828>.

Saunders, B., Elliott-Sale, K., Artioli, G. G., Swinton, P. A., Dolan, E., Roschel, H., ... & Gualano, B. (2017). β -alanine supplementation to improve exercise capacity and performance: a systematic review and meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 51(8), 658-669. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096396>.

Schoenfeld, B. J. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(10), 2857-2872. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e840f3>.

Schoenfeld, B. J. (2012). Does exercise-induced muscle damage play a role in skeletal muscle hypertrophy? *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(5), 1441-1453. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31824f207e>.

Schoenfeld, B. J., Aragon, A. A., & Krieger, J. W. (2013). The effect of protein timing on muscle strength and hypertrophy: a meta-analysis. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 10(1), 53. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-10-53>.

Schoenfeld, B. J., Grgic, J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Strength and hypertrophy adaptations between low-vs. high-load resistance training: a systematic review and meta-analysis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(12), 3508-3523. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002200>

Slart, R. H., Punda, M., Ali, D. S., Bazzocchi, A., Bock, O., Camacho, P., ... & International Working Group on DXA Best Practices. (2025). Updated practice guideline for dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 52(2), 539-563.

Slater, G., & Phillips, S. M. (2013). Nutrition guidelines for strength sports: sprinting, weightlifting, throwing events, and bodybuilding. In *Food, Nutrition and Sports Performance III* (67-77). Routledge. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.574722>

Slater, G. J., Dieter, B. P., Marsh, D. J., Helms, E. R., Shaw, G., & Iraki, J. (2019). Is an energy surplus required to maximize skeletal muscle hypertrophy associated with resistance training. *Frontiers in nutrition*, 6, 131. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00131>

Snijders, T., Trommelen, J., Kouw, I. W., Holwerda, A. M., Verdijk, L. B., & Van Loon, L. J. (2019). The impact of pre-sleep

protein ingestion on the skeletal muscle adaptive response to exercise in humans: an update. *Frontiers in nutrition*, 6, 436442. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00017>.

St-Onge, M. P., Grandner, M. A., Brown, D., Conroy, M. B., Jean-Louis, G., Coons, M., & Bhatt, D. L. (2016). Sleep duration and quality: impact on lifestyle behaviors and cardiometabolic health: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 134(18), 367-386. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000444>.

Strasser, B., & Schobersberger, W. (2011). Evidence for resistance training as a treatment therapy in obesity. *Journal of obesity*, 2011(1), 482564. <https://doi.org/10.1155/2011/482564>.

Stokes, T., Tripp, T. R., Murphy, K., Morton, R. W., Oikawa, S. Y., Lam Choi, H., ... & Phillips, S. M. (2021). Methodological considerations for and validation of the ultrasonographic determination of human skeletal muscle hypertrophy and atrophy. *Physiological reports*, 9(1), e14683.

Trexler, E. T., Smith-Ryan, A. E., Stout, J. R., Hoffman, J. R., Wilborn, C. D., Sale, C., ... & Antonio, J. (2015). International society of sports nutrition position stand: Beta-Alanine. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 12(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s12970-015-0090-y>.

Tavoian, D., Ampomah, K., Amano, S., Law, T. D., & Clark, B. C. (2019). Changes in DXA-derived lean mass and MRI-derived cross-sectional area of the thigh are modestly associated. *Scientific reports*, 9(1), 10028.

Vieira, A. F., Umpierre, D., Teodoro, J. L., Lisboa, S. C., Baroni, B. M., Izquierdo, M., & Cadore, E. L. (2021). Effects of resistance training performed to failure or not to failure on muscle strength, hypertrophy, and power output: a systematic review with

meta-analysis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(4), 1165-1175.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003936>.

Wackerhage, H., Schoenfeld, B. J., Hamilton, D. L., Lehti, M., & Hulmi, J. J. (2019). Stimuli and sensors that initiate skeletal muscle hypertrophy following resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 126(1), 30–43.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00685.2018>

Van Vliet, S., Burd, N. A., & Van Loon, L. J. (2015). The skeletal muscle anabolic response to plant-versus animal-based protein consumption. *The Journal of nutrition*, 145(9), 1981-1991.
<https://doi.org/10.3945/jn.114.204305>.

Volek, J. S., Kraemer, W. J., Bush, J. A., Incledon, T., & Boetes, M. (1997). Testosterone and cortisol in relationship to dietary nutrients and resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*. <https://doi.org/10.1152/jappl.1997.82.1.49>.

Wang, L., Meng, Q., & Su, C. H. (2024). From food supplements to functional foods: Emerging perspectives on post-exercise recovery nutrition. *Nutrients*, 16(23), 4081.
<https://doi.org/10.3390/nu16234081>

Westcott, W. L. (2012). Resistance training is medicine: effects of strength training on health. *Current sports medicine reports*, 11(4), 209-216.
<https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e31825dabb8>

Witard, O. C., Garthe, I., & Phillips, S. M. (2019). Dietary protein for training adaptation and body composition manipulation in track and field athletes. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 29(2), 165-174.
<https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0267>.

Zourdos, M. C., Dolan, C., Quiles, J. M., Klemp, A., Jo, E., Loenneke, J. P., ... & Whitehurst, M. (2016). Efficacy of daily one-repetition maximum training in well-trained powerlifters and weightlifters: a case series. *Nutricion hospitalaria*, 33(2), 437-443.

