



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**U-17, U-18 LİGİNDE MÜCADELE EDEN FUTBOLCULARA UYGULANAN
AEROBİK VE ANAEROBİK EGZERSİZLERİN BAZI KAN
PARAMETRELERİNE AKUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

MUHAMMED REŞİT ÇEKİŞİR

BEDEN EĞİTİMİ VE SPOR

**Şanlıurfa
2026**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**U-17, U-18 LİGİNDE MÜCADELE EDEN FUTBOLCULARA UYGULANAN
AEROBİK VE ANAEROBİK EGZERSİZLERİN BAZI KAN
PARAMETRELERİNE AKUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

MUHAMMED REŞİT ÇEKİŞİR

**BEDEN EĞİTİMİ VE SPOR
Tez Danışmanı: Prof. Dr. İSMAİL GÖKHAN**

**Şanlıurfa
2026**

TEŐEKKÖR

Lisans ve Yűksek Lisans eęitimi yolculuęum boyunca bilgisi, sabrı ve tecrűbesiyle her daim hocadan çok abi gibi yanımda olan akademik geliřimimde yol gűstericim çok deęerli tez danıřmanım Prof. Dr. İsmail GűKHAN'a,

Hayatım boyunca her an yanımda olduğunu hissettiren, sevgisini ve desteğini hiç esirgemeyen ilk ğreticim, annem Fatma ÇEKİŞİR'e, Dağ gibi arkamda duran babam Őmer Faruk ÇEKİŞİR'e,

Desteęini űzerimden hiç esirgemeyen her zaman sabır ve sevgiyle yanımda olan eřim Kűbra Devrim ÇEKİŐİR'e İlk gűz nurum biricik kızım Fatma İnci ÇEKİŐİR'e,

Her zaman yanımda olarak benim için en iyisini isteyen bana dayanak olan kardeşlerim Anıl ÇEKİŞİR ve Erdem ÇEKİŞİR'e,

Arařtırmaya gűnűllű olarak katılan bu çalıřmanın ortaya çıkmasında emeęi olan Anadolu Gençlik ve Spor kulűbű futbolcularına, Ve Yűksek Lisans eęitimimde emeęi geçen tűm saygıdeęer hocalarıma ve arkadařlarıma en içten teőekkűrlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
KISALTMALAR	v
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Kan Gazı Parametreleri ve Egzersiz	3
2.1.1. Oksijen Taşınması (O_2Hb , SO_2 , PO_2 , PCO_2 , pH)	4
2.1.2. Asit-Baz Dengesi (HCO_3^- , cBase, tCO_2)	5
2.1.3. Metabolik Yanıtlar (Laktat, Glukoz, Bilirubin)	6
2.1.4. Elektrolitler (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) ve Kas Fonksiyonları	7
2.2. Biyokimyasal Parametreler ve Egzersiz	8
2.2.1. Glukoz Metabolizması ve Egzersiz	9
2.2.2. Testosteron ve Egzersiz İlişkisi (Anabolik Yanıt)	10
2.2.3. Kortizol ve Egzersiz İlişkisi (Katabolik/Strese Yanıt)	11
2.3. Hematolojik Parametreler ve Egzersiz	12
2.3.1. WBC, LYM, NEU Gibi Hücresel Bağışıklık Göstergeleri	14
2.3.2. Eritrosit İndeksleri (RBC, HGB, HCT, MCV, MCH, MCHC, RDW)	15
2.3.3. Platelet İndeksleri (PLT, MPV, PCT, PDW)	16
2.3.4. Egzersizin Hematolojik Yanıtları Üzerine Literatür	17
2.4. Egzersiz	18
2.4.1. Aerobik Egzersiz Sırasında Metabolizma	19
2.4.2. Anaerobik Egzersiz Sırasında Metabolizma	20
2.4.3. Egzersiz Sonrası Toparlanma Süreçleri	21
3. GEREÇ VE YÖNTEM	24
3.1. Çalışma Tasarımı ve Yeri	24
3.2. Araştırma Grubu	24
3.3. Etik Onay ve İzinler	24
3.4. Evren ve Örneklem	24
3.5. Dahil Edilme Ölçütleri	25
3.6. Dışlanma Ölçütleri	25
3.7. Kontrol ve Deney Grubu	26
3.8. Çalışma Akışı ve Zamanlama	26
3.9. Egzersiz Protokolleri	26
3.9.1. Aerobik Koşu Oturumu	26
3.9.2. Anaerobik Koşu Oturumu	27
3.9.3. Yüklenme İzlemi ve Güvenlik	27
3.10. İncelenen Kan Parametreleri ve Ölçüm Gerekçesi	27
3.11. Ölçüm Yöntemleri	27
3.12. Numune ve Zamanlama	29
3.13. İstatistiksel Analiz	29
4. BULGULAR	30
4.1. MONO (Monosit)	35
4.2. PDW (Platelet Dağılım Genişliği)	35
4.3. MPV (Ortalama Platelet Hacmi)	52
4.4. PCT (Plateletcrit)	52
4.5. HCT (Hematokrit, tekrar)	52
4.6. %L (Lenfosit yüzdesi)	52
4.7. %N (Nötrofil yüzdesi)	52
4.8. EOS (Eozinofil)	52
4.9. NEU (Nötrofil)	53

4.10. tHb (Total Hemoglobin)	53
4.11. LYM (Lenfosit)	53
4.12. WBC (Lökosit)	53
4.13. HCO_3^- (Bikarbonat)	53
4.14. cBase (Baz fazlası)	53
4.15. iCO_2 (Karbondioksit, hesaplanan)	53
4.16. Laktat	54
4.17. Hct (Hematokrit)	54
5. TARTIŞMA	55
6. SONUÇLAR	60
7. ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	68

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

U-17, U-18 LİGİNDE MÜCADELE EDEN FUTBOLCULARA UYGULANAN AEROBİK VE ANAEROBİK EGZERSİZLERİN BAZI KAN PARAMETRELERİNE AKUT ETKİSİNİN İNCELENMESİ

MUHAMMED REŞİT ÇEKİŞİR

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
BEDEN EĞİTİMİ VE SPOR

Tez Danışman: Prof. Dr. İSMAİL GÖKHAN

Yıl: 2026, Sayfa : 68

Bu çalışma, U-17 ve U-18 yaş kategorilerinde mücadele eden futbolcularda aerobik ve anaerobik egzersizlerin hematolojik, biyokimyasal ve kan gazı parametreleri üzerine akut etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Futbolcularda antrenman yoğunluğu ve türüne bağlı olarak ortaya çıkan fizyolojik adaptasyonların, performansın yanı sıra metabolik sağlık üzerinde de önemli sonuçlar doğurduğu bilinmektedir. Ancak aerobik ve anaerobik egzersizlerin kan parametreleri üzerindeki kısa süreli etkileri henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır.

Çalışmaya 17–18 yaş aralığında, en az bir yıldır düzenli futbol antrenmanlarına devam eden ve herhangi bir sağlık sorunu bulunmayan 20 erkek futbolcu dahil edilmiştir. Katılımcılardan aerobik egzersiz öncesi ve sonrası, ardından iki haftalık toparlanma sürecini takiben gerçekleştirilen anaerobik egzersiz öncesi ve sonrası olmak üzere toplam dört aşamada kan örnekleri alınmıştır. Ölçümlerde hematolojik parametreler (WBC, RBC, Hb, Hct, MCV, MCH, MCHC, PLT, MPV vb.), biyokimyasal göstergeler (glukoz, testosteron, kortizol), elektrolitler (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) ve kan gazı değerleri (pH, PO_2 , PCO_2 , O_2Hb , SO_2 , HCO_3^- , cBase, t CO_2 , laktat, bilirubin) değerlendirilmiştir.

Araştırmanın ön sonuçları, egzersiz türüne bağlı olarak hematolojik yanıtların farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Aerobik egzersiz sonrası hemokonsantrasyona bağlı olarak eritrosit indekslerinde (RBC, Hb, Hct) geçici artışlar gözlenirken, anaerobik egzersiz sonrası laktat düzeylerinde belirgin yükselmeler ve pH düşüşü ile karakterize metabolik asidoz gelişmiştir. Biyokimyasal olarak aerobik egzersiz glukoz homeostazını desteklerken, anaerobik yüklenme kortizol artışı ve anabolik-katabolik hormon dengesinde değişikliklere yol açmıştır. Elektrolit parametrelerinde özellikle K^+ artışı ve Ca^{2+} düşüşü kas fonksiyonları açısından dikkat çekici bulunmuştur. Ayrıca bilirubin düzeylerinin egzersiz sonrası artış eğilimi göstermesi, antioksidan kapasite ve metabolik adaptasyon açısından önemli bir bulgu olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma aerobik ve anaerobik egzersizlerin futbolcularda kan parametreleri üzerinde farklı ve özgün akut etkiler yarattığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, antrenman programlarının bireyselleştirilmesi, performans optimizasyonu ve genç sporcularda sağlık risklerinin en aza indirilmesi açısından yol gösterici olacaktır.

ANAHTAR KELİMELER: Aerobik egzersiz, Anaerobik egzersiz, Futbolcular, Hematolojik parametreler, Biyokimya, Kan gazı, Metabolik yanıt

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE ACUTE EFFECTS OF AEROBIC AND ANAEROBIC EXERCISES APPLIED TO FOOTBALL PLAYERS COMPETING IN THE U-17 AND U-18 LEAGUES ON SOME BLOOD PARAMETERS

MUHAMMED REŞİT ÇEKİŞİR

**HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
PHYSICAL EDUCATION AND SPORTS**

Thesis Supervisor: Prof. Dr. İSMAİL GÖKHAN

Year: 2026, Page : 68

This study aimed to investigate the acute effects of aerobic and anaerobic exercise on hematological, biochemical, and blood gas parameters in U-17 and U-18 male soccer players. Physiological adaptations that occur in response to training load and exercise type are known to influence not only athletic performance but also metabolic health. However, the short-term effects of aerobic and anaerobic exercise on blood-related parameters remain incompletely understood.

The study included 20 male soccer players aged 17–18 years, all of whom had been regularly participating in football training for at least one year and had no known health problems. Blood samples were collected at four time points: before and after aerobic exercise, and before and after anaerobic exercise following a two-week recovery period. Hematological parameters (WBC, RBC, Hb, Hct, MCV, MCH, MCHC, PLT, MPV, etc.), biochemical markers (glucose, testosterone, cortisol), electrolytes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-), and blood gas variables (pH, PO_2 , PCO_2 , O_2Hb , SO_2 , HCO_3^- , cBase, tCO_2 , lactate, bilirubin) were analyzed.

Preliminary findings demonstrated distinct responses depending on exercise type. After aerobic exercise, transient increases were observed in erythrocyte indices (RBC, Hb, Hct), likely due to hemoconcentration, whereas anaerobic exercise induced marked elevations in lactate levels and reductions in pH, reflecting metabolic acidosis. From a biochemical perspective, aerobic exercise supported glucose homeostasis, while anaerobic loading triggered cortisol elevation and shifts in the anabolic-catabolic hormone balance. Among electrolytes, increased K^+ and decreased Ca^{2+} were particularly noteworthy for their relevance to muscle function. Additionally, the tendency for bilirubin levels to rise following exercise may indicate an adaptive antioxidant response.

In conclusion, this study demonstrates that aerobic and anaerobic exercise elicit different and specific acute effects on blood parameters in soccer players. These findings may provide guidance for the individualization of training programs, optimization of athletic performance, and minimization of health risks in young athletes.

KEYWORDS: Aerobic exercise, Anaerobic exercise, Soccer players, Hematological parameters, Biochemistry, Blood gases, Metabolic response

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4.1.	Şekilsel Anlamlılık Grafiği	36
Şekil 4.2.	VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği	41
Şekil 4.3.	Heap Map Grafiği	42
Şekil 4.4.	T1 ve T2 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği	44
Şekil 4.5.	T1 ve T2 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği	45
Şekil 4.6.	T1 ve T3 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği	46
Şekil 4.7.	T1 ve T3 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği	47
Şekil 4.8.	T2 ve T4 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği	48
Şekil 4.9.	T2 ve T4 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği	49
Şekil 4.10.	T3 ve T4 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği	50
Şekil 4.11.	T3 ve T4 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1.	Örneklem ve Sosyodemografik Dağılım	30
Çizelge 4.2.	Spor Geçmişi ve Antrenman Süreleri	31
Çizelge 4.3.	Antrenman Sürekliliği ve Sağlık Durumu	31
Çizelge 4.4.	Değişkenlerin İstatiksel Analiz	32
Çizelge 4.5.	Değişkenlerin Post-hoc Sonuçları	37

KISALTMALAR

AKT	Protein Kinaz B
ALP	Alkalen fosfataz
ALT	Alanin aminotransferaz
AMPK	AMP-activated Protein Kinase
AR	Androjen reseptörü (Androgen Receptor)
AST	Aspartat aminotransferaz
ATP	Adenozin Trifosfat
BASO	Bazofil sayısı (Basophils)
BCAA	Dallı zincirli aminoasitler (Branched-Chain Amino Acids)
Bilirubin	Total bilirubin
cBase	Baz fazlası (Base Excess)
CBC	Tam Kan Sayımı
cCl-	Klorür (hesaplanan/conc.) (Chloride)
CK	Kreatinin kinaz
CLIA/ECLIA	Kemilüminesans/Elektrokemilüminesans immünoassay
COHb	Karboksihemoglobin (Carboxyhemoglobin)
EOS	Eozinofil
FADH₂	Flavin adenin dinükleotit (indirgenmiş form)
Glu	Glukoz(Glukose)
GLUT4	Glukoz taşıyıcı tip 4 (Glucose Transporter Type 4)
Hb	Hemoglobin
HCO₃std	Standart bikarbonat (Standard Bicarbonate)
HCO₃	Bikarbonat (Bicarbonate)
HCT	Hematokrit
HGB	Hemoglobin
HIIE	Yüksek şiddetli aralıklı egzersiz (High-Intensity Interval Exercise)
HIIT	Yüksek Yoğunluklu Aralıklı Antrenman (High-Intensity Interval Training)
HPA	Hipotalamus-Hipofiz-Adrenal
iCO₂	Hesaplanan CO ₂ (calculated CO ₂)
IGF-1	İnsülin Benzeri Büyüme Faktörü 1
IL-6	Interleukin-6 (İnterlökin-6)
K⁺	Potasyum
K₂EDTA	Dipotasyum etilendiamintetraasetat (antikoagulan)
KAS	Kalp atım sayısı (Heart Rate)
Lactate	Laktat

LDH	Laktat dehidrojenaz
LYM	Lenfosit sayısı (Lymphocytes)
MCH	Ortalama korpüsküler hemoglobin
MCHC	Ortalama korpüsküler hemoglobin konsantrasyonu
MCT	Monocarboxylate Transporter 1
MCV	Ortalama Eritrosit Hacmi
MetHb	Methemoglobin
MICE	Orta şiddette sürekli egzersiz (Moderate-Intensity Continuous Exercise)
MPS	Kas protein sentezi (Muscle Protein Synthesis)
MPV	Ortalama trombosit hacmi
mTOR	Rapamisin kompleksinin memeli hedefi
Na⁺	Sodyum
NADH	Nikotinamid adenin dinükleotit (indirgenmiş form)
NaHCO₃	Sodyum bikarbonat (Sodium Bicarbonate)
NEU	nötrofil
NO	Nitrik Oksit
NO_x	Nitrik Oksit Türevleri (Nitric Oxide Metabolites)
ODC	Oksijen disosiasyon eğrisi (Oxygen Dissociation Curve)
O₂Hb	Oksijenlenmiş hemoglobin (Oxyhemoglobin)
PCO₂	Parsiyel karbondioksit basıncı (Partial Pressure of CO ₂)
PCT	Plateletcrit (Trombosit hacim fraksiyonu)
PDW	Trombosit dağılım genişliği
PF-4	Platelet Faktör 4 (Platelet Factor 4)
PKC	Protein kinaz C (Protein Kinase C)
PLT	Trombosit
Post	Egzersiz sonrası (zaman noktası)
PO₂	Parsiyel oksijen basıncı (Partial Pressure of O ₂)
Pre	Egzersiz öncesi (zaman noktası)
RBC	Eritrosit
RBF	Azaltılmış solunum frekansı (Reduced Breathing Frequency)
RDW	Kırmızı kan hücresi dağılım genişliği
RPE	Öznel zorlanma derecesi (Rating of Perceived Exertion)
SaO₂	Arteriyel oksijen satürasyonu (Arterial O ₂ Saturation)
SERCA	Sarkoplazmik/ER kalsiyum ATPaz
SO₂	Oksijen satürasyonu (O ₂ Saturation)
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences (Sosyal Bilimler İçin İstatistik

	Programı)
SST	Serum ayırıcı jel tüp (Serum Separator Tube)
TAC	Toplam Antioksidan Kapasitesi
tCO₂	Total karbondioksit (Total CO ₂)
tHb	Total hemoglobin (Total Hemoglobin)
TNF-α	Tumor Necrosis Factor Alpha (Tümör Nekroz Faktörü Alfa)
TOS	Total oksidan seviye
VO₂	Oksijen tüketimi (Oxygen Consumption)
VO₂max	Maksimal oksijen tüketimi (Maximal Oxygen Uptake)
WBC	Beyaz kan hücreleri (Lökosit)

1. GİRİŞ

Spor fizyolojisi, egzersizin insan organizması üzerindeki etkilerini hücresel, sistemik ve klinik düzeyde inceleyen bilim dalıdır. Bu alan, kas-iskelet, kardiyovasküler, solunum, endokrin ve sinir sistemleri başta olmak üzere birçok fizyolojik yapının egzersize verdiği akut yanıtları ve kronik adaptasyonları kapsamaktadır. Egzersiz sırasında ortaya çıkan fizyolojik süreçler, enerji metabolizmasının düzenlenmesi, oksijen taşınması, kas kasılması ve nöroendokrin yanıtlar gibi çok boyutlu mekanizmaları içerir. Tarihsel olarak egzersiz fizyolojisinin gelişimi, oksijen tüketimi ile enerji metabolizması arasındaki ilişkinin açıklanmasına dayanmaktadır. Günümüzde ise moleküler biyoloji, genetik ve ileri görüntüleme yöntemlerindeki ilerlemeler sayesinde bu süreçler çok daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmektedir (Matthews vd., 2024). Düzenli fiziksel aktivitenin yalnızca sportif performans için değil, aynı zamanda kronik hastalıkların önlenmesi ve yönetimi için de bir tedavi aracı olduğu kabul edilmektedir. Bu durum, Dünya Sağlık Örgütü'nün de desteklediği "Exercise is Medicine" yaklaşımının bilimsel temelini oluşturmaktadır (Matthews vd., 2024).

Futbol, yüksek şiddetli interval yüklenmeleri içeren ve hem aerobik hem de anaerobik enerji sistemlerinin yoğun olarak kullanıldığı kompleks bir spordur. Bir futbolcu, maç boyunca çok sayıda sprint, yön değiştirme, hava topu mücadelesi ve dayanıklılık gerektiren koşu aktiviteleri gerçekleştirir. Bu nedenle, futbolcularda performans yalnızca teknik ve taktik becerilerden değil, aynı zamanda fizyolojik kapasiteden de büyük ölçüde etkilenmektedir. Kardiyorespiratuvar dayanıklılık, kas gücü, metabolik esneklik ve toparlanma hızı futbol performansının belirleyici faktörlerindendir (Stølen vd., 2005). Düzenli antrenmanlar, bu fizyolojik parametrelerde uyum sağlayarak futbolcularda hem performansı artırmakta hem de sakatlık riskini azaltmaktadır (Bangsbo, 2014).

Egzersiz türleri enerji üretim yollarına göre aerobik ve anaerobik olarak sınıflandırılmaktadır. Aerobik egzersiz, oksijenin temel enerji kaynağı olarak kullanıldığı ve uzun süreli dayanıklılık aktivitelerinde baskın olan metabolik süreçtir. Bu egzersiz tipi, kardiyorespiratuvar kapasitenin geliştirilmesinde ve yağ oksidasyonunun artırılmasında etkilidir. Anaerobik egzersiz ise oksijenin yetersiz kaldığı, yüksek yoğunluklu ve kısa süreli eforlarda devreye giren enerji üretim yoludur. Sprint, ağırlık kaldırma ve yüksek yoğunluklu interval antrenmanlar anaerobik kapasitenin gelişimine katkı sağlar (Chamari ve Padulo, 2015). Her iki egzersiz türü de farklı fizyolojik uyaranlar oluşturarak kas yapısı, enerji metabolizması ve hormonal yanıtlar üzerinde özgün etkiler göstermektedir.

Egzersizin hematolojik, biyokimyasal ve kan gazı parametreleri üzerinde önemli etkiler yarattığı bilinmektedir. Hematolojik açıdan, egzersiz sırasında ve sonrasında lökosit alt gruplarında artış, eritrosit parametrelerinde değişiklikler ve trombosit fonksiyonlarında geçici farklılıklar gözlenebilmektedir. Bu değişiklikler, bağışıklık sisteminin aktivasyonu ve oksijen taşıma kapasitesinin düzenlenmesiyle ilişkilidir (Mairbäurl, 2013). Biyokimyasal parametreler açısından, egzersiz glukoz metabolizması üzerinde belirleyici rol oynamakta; kortizol ve testosteron gibi hormonlarda meydana gelen değişiklikler anabolik-katabolik dengeyi etkilemektedir. Bu durum, hem enerji kullanımını hem de kas adaptasyonlarını doğrudan etkilemektedir (Hackney, 2020). Kan gazı parametreleri açısından ise pH, laktat, oksijen satürasyonu (SO_2), parsiyel oksijen basıncı (PO_2) ve karbondioksit basıncı (PCO_2) gibi göstergeler, egzersiz yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Özellikle yüksek yoğunluklu egzersizlerde laktat birikimi ve metabolik asidoz gelişmesi, organizmanın aerobik kapasitesinin sınırlarını göstermektedir (Yu, 2025).

Bu bağlamda, futbolcularda aerobik ve anaerobik egzersizlerin hematolojik, biyokimyasal ve kan gazı parametreleri üzerindeki etkilerini incelemek, hem performans fizyolojisi açısından hem de sporcunun sağlığını koruma yönünden önemli katkılar sağlamaktadır. Literatürde çoğunlukla aerobik ya da anaerobik egzersizin tek başına etkilerini inceleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, her iki egzersiz türünün aynı sporcular üzerinde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine daha az rastlanmaktadır. Bu tez çalışması, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlamakta ve elde edilecek bulguların, futbolcularda antrenman planlamasına ve fizyolojik adaptasyonların daha iyi anlaşılmasına ışık tutması beklenmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Kan Gazı Parametreleri ve Egzersiz

Egzersiz sırasında oksijen (O_2) ve karbondioksit (CO_2) değişimleri, kasların enerji metabolizması ile doğrudan ilişkilidir ve kan gazı parametreleri aracılığıyla değerlendirilmektedir. Bu parametreler arasında parsiyel oksijen basıncı (PO_2), parsiyel karbondioksit basıncı (PCO_2), oksijen satürasyonu (SaO_2/SO_2), kan pH'ı, bikarbonat (HCO_3^-) ve laktat düzeyleri yer almaktadır. Egzersizin şiddeti ve süresi arttıkça bu göstergelerde belirgin değişimler ortaya çıkmaktadır.

Aerobik egzersiz sırasında ventilasyon ile oksijen alımı artar, dokulara oksijen sunumu yükselir ve arteriyel O_2 satürasyonu genellikle stabil kalır. Ancak yüksek şiddetli ve uzun süreli egzersizlerde, özellikle iyi antrene olmayan bireylerde, arteriyel hipoksemi görülebilmektedir. Bu durum, alveolo-kapiller difüzyon limitasyonları ve ventilasyon-perfüzyon dengesizlikleri ile açıklanmaktadır (Mairbäurl, 2013).

Anaerobik egzersiz koşullarında ise metabolik taleplerin oksijen sunumunu aşması, pirüvatın laktata dönüşümünü artırır ve metabolik asidoza yol açar. Bu süreçte kan pH'ı düşerken, bikarbonat tampon sistemi devreye girer. Laktat birikimi ve buna eşlik eden H^+ artışı, PCO_2 düzeylerini yükseltmekte ve solunumsal kompensasyon ile hiperventilasyon görülmektedir.

Kapus vd. (2009) çalışmalarında, bisiklet ergometresinde azaltılmış solunum frekansı (RBF) ile egzersiz yapan bireylerde, egzersiz sonunda SaO_2 ve PO_2 değerlerinde anlamlı düşüş, PCO_2 'de ise artış olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, spontan solunum ile yapılan egzersizlerde oksijen satürasyonu korunmuş ve CO_2 birikimi daha düşük düzeyde kalmıştır. Araştırmacılar, egzersiz sonrası 15 saniye içinde yapılan kan gazı ölçümlerinin gerçek egzersiz sırasındaki hipoksi ve hiperkapniyi tam olarak yansıtmadığını, post-egzersiz hiperventilasyonun bu değerleri hızla normalleştirdiğini vurgulamışlardır.

Benzer şekilde, Yamamoto vd. (1987) ile Sharp vd. (1991), yüksek yoğunluklu egzersizlerde RBF'nin arteriyel hipoksemi ve hiperkapniye yol açtığını, bunun da erken yorgunluk ve performans düşüklüğünde rol oynayabileceğini bildirmiştir. Powers vd. (1989) ise egzersiz sırasında oksijen satürasyonunun pulse oksimetre ile güvenilir şekilde izlenebileceğini, ancak hipoksemi gelişen bireylerde satürasyonun %5–10 oranında azalabileceğini rapor etmiştir.

Toparlanma sürecinde kan gazı parametreleri hızla normale dönmektedir. Kapus vd. (2009), RBF ile egzersiz sonrası ilk 20 saniyede hipoksi ve hiperkapni bulgularının gözlemlendiğini, ancak 2–3 dakika içinde SaO_2 , PO_2 ve PCO_2 değerlerinin spontan solunum koşullarına benzer düzeylere ulaştığını belirtmiştir. Bu bulgular, toparlanma sürecinde ventilatuvar kompensasyonun kan gazı homeostazını hızla sağladığını göstermektedir.

2.1.1. Oksijen Taşınması (O_2Hb , SO_2 , PO_2 , PCO_2 , pH)

Egzersiz sırasında oksijen taşınması, atmosferden dokulara kadar uzanan çok basamaklı bir süreçtir ve oksijen taşınım kaskadı olarak tanımlanır. Bu kaskad; ventilasyon, alveoler difüzyon, hemoglobin aracılığıyla taşınma, dokuya difüzyon ve mitokondriyal oksidatif fosforilasyon basamaklarını içerir (Ramsook vd., 2023). Bu süreç boyunca oksijenin hemoglobine bağlanması, parsiyel oksijen basıncı (PO_2), parsiyel karbondioksit basıncı (PCO_2), pH ve hemoglobin satürasyonu (O_2Hb , SO_2) kritik parametrelerdir.

Arteriyel PO_2 ve O_2Hb egzersiz sırasında genellikle stabil kalır. Ancak yüksek yoğunluklu egzersizlerde alveolo-kapiller difüzyon limitasyonları ve ventilasyon-perfüzyon dengesizlikleri nedeniyle arteriyel hipoksemi gelişebilir. Mairbäurl (2013), elit sporcularda maksimal egzersiz sırasında oksijen satürasyonunda %5–10'luk düşüşlerin görülebildiğini bildirmiştir. Bu durum, özellikle dayanıklılık sporcularında performansı sınırlayan önemli bir faktördür.

Oksijen disosiasyon eğrisi (ODC), PO_2 ile hemoglobin satürasyonu (SO_2) arasındaki ilişkiyi gösterir. Egzersiz sırasında artan PCO_2 , sıcaklık ve 2,3-bisfosfoglisarat düzeyleri ile pH'daki düşüş, eğriyi sağa kaydırarak hemoglobinin oksijene afinitesini azaltır ve dokulara oksijen bırakılmasını kolaylaştırır (Shepherd vd., 2019). Bu fizyolojik mekanizma “Bohr etkisi” olarak bilinmektedir ve kasların artan oksijen ihtiyacını karşılamada kritik rol oynamaktadır.

PCO_2 ve pH değişimleri de oksijen taşınmasında önemli yer tutar. Kapus vd. (2009) bisiklet ergometresi çalışmasında, azaltılmış solunum frekansı ile yapılan egzersizlerde PCO_2 'nin arttığını, PO_2 ve SO_2 'nin ise düştüğünü göstermiştir. Buna karşın spontan solunum koşullarında bu değişiklikler daha az belirgin olmuştur. Bu bulgular, ventilatuvar kontrolün kan gazı homeostazının korunmasında kritik rol oynadığını göstermektedir.

Egzersiz sırasında artan metabolik aktiviteyle birlikte laktat ve H^+ iyonları

birikir ve bu da pH'nın düşmesine yol açar. Buna karşılık bikarbonat tampon sistemi devreye girer ve hiperventilasyon ile CO₂ eliminasyonu artarak asidozun dengelenmesine katkı sağlar. Yüksek yoğunluklu egzersizlerde görülen bu metabolik asidoz, performansın sınırlayıcı faktörlerinden biridir (Powers vd., 1989).

2.1.2. Asit-Baz Dengesi (HCO₃⁻, cBase, tCO₂)

Asit-baz dengesi, organizmanın hücresel metabolizmasının sağlıklı sürdürülebilmesi için pH'nın dar bir aralıkta (7.35–7.45) korunmasına dayanır. Egzersiz sırasında kas kontraksiyonlarına bağlı olarak ortaya çıkan metabolik yan ürünler (özellikle laktat ve H⁺ iyonları), vücut sıvılarında asidotik eğilim oluşturur. Bu nedenle, tampon sistemleri ve solunumsal-renal mekanizmalar asit-baz homeostazını korumada kritik rol oynar.

Bikarbonat (HCO₃⁻), vücudun en önemli ekstrasellüler tamponudur ve plazma tampon kapasitesinin %50'sinden fazlasını sağlar. Henderson–Hasselbalch denklemi uyarınca pH, HCO₃⁻ konsantrasyonu ile PCO₂ arasındaki oranla belirlenir. Normal koşullarda arteriyel HCO₃⁻ düzeyi yaklaşık 24 mmol/L'dir ve egzersiz sırasında artan H⁺ iyonlarının tamponlanmasında anahtar rol üstlenir (Lee, 2020). Yüksek yoğunluklu egzersizlerde HCO₃⁻ tüketimi artar; bu da metabolik asidoza yol açarken, hiperventilasyon yoluyla solunumsal kompensasyon devreye girer.

Baz fazlası/eksikliği (cBase), kanın tampon kapasitesini ifade eder ve metabolik komponentlerin pH üzerindeki etkisini değerlendirir. Egzersiz sırasında negatif cBase (baz açığı), artan laktat ve proton birikiminin göstergesidir. Kapus vd. (2009), bisiklet ergometresi testlerinde yüksek yoğunluklu yüklenmeler sonrası cBase değerlerinde anlamlı düşüşler bildirmiş, bunun egzersiz kaynaklı metabolik asidozun doğrudan göstergesi olduğunu ortaya koymuştur. Düzenli dayanıklılık antrenmanları ise cBase düşüşünü sınırlandırarak tamponlama kapasitesini artırmaktadır.

Total karbondioksit (tCO₂), kandaki çözülmüş CO₂, bikarbonat (HCO₃⁻) ve karbonik asidin toplamını yansıtır. Klinik pratikte tCO₂, genellikle HCO₃⁻ düzeyi ile paralel seyretmektedir. Egzersiz sırasında anaerobik metabolizmanın baskın hale geldiği noktalarda tCO₂ düzeyleri düşer; bu, artan CO₂ üretimi ve bikarbonatın asit tamponlamada kullanılmasına bağlıdır. (Mairbäurl, 2013), dayanıklılık sporcularında artmış plazma tampon kapasitesi ve ventilatuvar adaptasyonların tCO₂ değişimlerini sınırlandırarak performansın sürdürülebilirliğine katkı sağladığını vurgulamıştır.

2.1.3. Metabolik Yanıtlar (Laktat, Glukoz, Bilirubin)

Egzersiz sırasında metabolik yanıtların değerlendirilmesi, kasların enerji gereksinimlerinin karşılanma biçimini ve organizmanın homeostatik adaptasyonlarını anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu süreçte en çok incelenen parametreler arasında laktat, glukoz ve son yıllarda önemi giderek artan bilirubin yer almaktadır.

Laktat, yüksek yoğunluklu egzersizlerde anaerobik glikolizin artmasıyla pirüvatın laktata dönüştürülmesi sonucu birikir. Egzersiz sırasında plazma laktat konsantrasyonunun artışı, kas hücrelerinin enerji gereksinimlerini anaerobik yollarla karşılamak zorunda kaldığını göstermektedir. Yükseltide yapılan egzersizlerde hipoksi koşulları, laktat birikimini daha da artırmakta ve bu durum hem yorgunluk gelişimini hızlandırmakta hem de asit-baz dengesinde bozulmalara neden olmaktadır (Yükseltide Performans ve Karbonhidratlar, 2020). Ancak düzenli aerobik antrenmanlar, mitokondriyal oksidatif kapasitenin artması sayesinde aynı iş yükünde daha düşük laktat birikimi ile sonuçlanmakta, bu da dayanıklılık performansının temel adaptasyonlarından birini oluşturmaktadır (Mairbäurl, 2013).

Glukoz metabolizması, egzersiz sırasında hem kas glikojen depolarından sağlanan substratlar hem de karaciğerden dolaşıma salınan glukoz aracılığıyla düzenlenir. Orta şiddetli ve uzun süreli egzersizlerde kas glukoz alımı artarken, hepatik glikojenoliz ve glukoneogenez de devreye girerek kan glukoz düzeylerinin korunmasını sağlar. Ancak yüksek şiddetli veya uzun süreli egzersizlerde kasların glukoz tüketimi karaciğerin üretim kapasitesini aşabilir ve hipoglisemi riski doğabilir (Kumari vd, 2018). Yüksek irtifada yapılan egzersizler, artmış enerji maliyeti ve oksijen sınırlılığı nedeniyle glukoz kullanımını daha kritik hale getirmektedir. Silva vd. (2024) tarafından yapılan meta-analiz, düzenli aerobik ve direnç egzersizlerinin birlikte uygulanmasının açlık glukozu ve insülin direnci belirteçlerinde anlamlı iyileşmeler sağladığını göstermiştir.

Bilirubin, uzun yıllar boyunca yalnızca karaciğer fonksiyon bozukluklarının biyobelirteci olarak kabul edilmişken, son dönemde yapılan çalışmalar bilirubinin güçlü bir antioksidan ve metabolik hormon olarak işlev gördüğünü ortaya koymuştur (Flack vd., 2023). Düzenli egzersiz yapan bireylerde ve elit sporcularda serum bilirubin düzeylerinin sedanter bireylere kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Bu adaptasyonun, egzersiz sırasında artan reaktif oksijen türlerine karşı koruyucu bir yanıt olduğu düşünülmektedir. Bilirubinin PPAR- α aktivasyonu üzerinden yağ asidi oksidasyonunu artırdığı, oksidatif stresi azalttığı ve kardiyometabolik sağlığı desteklediği gösterilmiştir. Dolayısıyla bilirubin, yalnızca egzersizin neden olduğu

hemoliz ve heme metabolizmasıyla ilişkili bir yan ürün değil; aynı zamanda metabolik esneklik ve performans kapasitesi ile ilişkili bir biyomolekül olarak değerlendirilmektedir.

2.1.4. Elektrolitler (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Cl^-) ve Kas Fonksiyonları

Kas kontraksiyonu ve gevşemesi, iyonik gradyanların ve membran potansiyelinin hassas düzenlenmesine bağlıdır. Egzersiz sırasında sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}) ve klor (Cl^-) iyonları hücre membranı boyunca dağılım değişiklikleri gösterir ve bu elektrolit dinamikleri kas performansı ile yorgunluğun gelişiminde belirleyici rol oynar.

Sodyum (Na^+) ve potasyum (K^+) arasındaki denge, aksiyon potansiyelinin oluşumu ve kas membranının depolarizasyon-repolarizasyon döngüsünde kritik rol oynamaktadır. Egzersiz sırasında kas hücrelerinden ekstrasellüler alana K^+ çıkışı artarken, Na^+ hücre içine taşınır. Bu değişiklik, membran potansiyelinde dalgalanmalara yol açarak kas uyarılabilirliğini azaltabilir. Kumari vd. (2018), atletlerde egzersiz sonrası serum K^+ düzeylerinde anlamlı artış, Na^+ düzeylerinde ise hafif düşüş gözlemlemiş ve bunun yorgunluk mekanizmalarıyla ilişkili olduğunu rapor etmiştir. Düzenli antrenmanların Na^+/K^+ -ATPaz pompasının aktivitesini artırarak iyon dengesini stabilize ettiği ve kas performansını koruduğu bildirilmektedir.

Kalsiyum (Ca^{2+}) kas kasılmasının başlatılmasında en önemli iyon olup, sarkoplazmik retikulumdan sitozole salındığında aktin-miyozin etkileşimini tetikler. Egzersiz sırasında artan Ca^{2+} gereksinimi, sarkoplazmik retikulum Ca^{2+} pompa fonksiyonunun (SERCA) hızına bağlı olarak karşılanır. (Kumari vd., 2018), egzersiz sonrası serum Ca^{2+} düzeylerinde azalma gözlemiş ve bunun kas kontraktilesinde yetersizliğe yol açabileceğini vurgulamıştır. Ayrıca, hipokalsemi eğilimi özellikle uzun süreli ve yoğun egzersizlerde kas krampları ile ilişkilendirilmiştir.

Klor (Cl^-) iyonları, membran potansiyelinin dengelenmesinde Na^+ ve K^+ ile birlikte görev yapar. Cl^- kanalda meydana gelen değişiklikler kas membranının stabilitesini etkiler. Özellikle tekrarlayan kasılmalarda Cl^- iletkenliğinin azalması, hiperpolarizasyonu sınırlayarak kas yorgunluğunu kolaylaştırabilir. Lee (2020), Cl^- iyonunun bikarbonat tampon sistemiyle birlikte asit-baz dengesine katkı sunduğunu, dolayısıyla egzersiz sırasında pH değişimlerinin iyonik dengeyi doğrudan etkilediğini bildirmiştir.

Elektrolit dengesizlikleri, yalnızca kas fonksiyonlarını değil, aynı zamanda kan gazı parametrelerini de etkiler. Kapus vd. (2009), bisiklet ergometresi çalışmasında egzersiz sonrası solunumsal kompensasyonun CO₂ ve pH dengesiyle birlikte elektrolit değişimlerini de içerdiğini göstermiştir. Bu bulgular, asit-baz homeostazı ve elektrolit dengesi arasındaki güçlü etkileşimi ortaya koymaktadır.

2.2. Biyokimyasal Parametreler ve Egzersiz

Egzersiz, enerji metabolizmasını düzenleyerek kas kontraksiyonunu sürdürebilmek için çok sayıda biyokimyasal mekanizmayı devreye sokar. Bu süreçler sırasında glukoz, yağ asitleri ve aminoasitlerin kullanımı, enzim aktivitelerinin değişimi, oksidatif stresin tetiklenmesi ve hormon düzeylerindeki dalgalanmalar organizmanın metabolik homeostazını etkiler. Bu nedenle biyokimyasal parametrelerin incelenmesi, egzersizin fizyolojik adaptasyonlarının anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir.

Egzersiz sırasında glukoz metabolizması önemli değişikliklere uğrar. Kaslar, artan enerji ihtiyacını karşılamak üzere glukoz alımını hızlandırırken karaciğer glikojenoliz ve glukoneogenez ile dolaşıma glukoz sağlar. Kumari vd. (2018), profesyonel atletlerde 30 dakikalık orta şiddette egzersiz sonrası plazma glukoz düzeylerinin anlamlı olarak arttığını rapor etmiştir. Bu bulgu, kasların glukoz kullanımındaki artışa rağmen hepatik glukoz üretiminin baskın hale geldiğini göstermektedir.

Egzersiz karakteristik biyokimyasal yanıtlarından biri de laktat birikimidir. Yüksek yoğunluklu egzersizlerde anaerobik glikoliz devreye girer ve pirüvatın laktata dönüşümü artar. Kumari vd. (2018), orta şiddette egzersiz sonrası dahi serum laktat seviyelerinin yükseldiğini bildirmiştir. Laktat, yalnızca yorgunluk belirtici değil; aynı zamanda karaciğerde Cori döngüsü aracılığıyla yeniden glukoz üretiminde substrat olarak kullanılan önemli bir metabolittir.

Egzersiz, protein ve azot metabolizması üzerinde de etkiler oluşturur. Aynı çalışmada kan üre azotu ve serum kreatinin düzeylerinde egzersiz sonrası anlamlı artış saptanmıştır. Bu artış, egzersiz sırasında artan protein katabolizması ve böbrek kan akımındaki azalmanın bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, serum ürik asit düzeylerinde farklı çalışmalarda değişken sonuçlar elde edilmiş olup, uzun süreli dayanıklılık egzersizleri sonrasında ürik asit düzeylerinde artışın, purin yıkımı ve oksidatif stresle ilişkili olduğu bildirilmektedir (Mairbäurl, 2013).

Karaciğer enzimleri ve elektrolitler açısından ise egzersiz farklı yanıtlar doğurabilir. Kumari vd. (2018) çalışmasında serum kalsiyum ve alkalen fosfataz (ALP) düzeylerinde egzersiz sonrası azalma gözlenmiştir. Bu durum, kas kontraksiyonları sırasında kalsiyumun hücre içi kullanımı ve sıvı-elektrolit dengesi ile ilişkili olabilir. Buna karşın, aspartat aminotransferaz (AST) ve alanin aminotransferaz (ALT) düzeylerinde anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Ancak dayanıklılık sporcuları üzerine yapılan bazı araştırmalarda, uzun süreli ve şiddetli egzersizlerin kas hasarı ile ilişkili olarak AST düzeylerinde artışlara yol açabileceği bildirilmiştir.

Egzersizin kardiyometabolik enzimler üzerindeki etkileri de ilgi çekici bir konudur. Okon vd. (2025), 14 gün boyunca uygulanan orta şiddette aerobik egzersizin, genç sağlıklı bireylerde kreatin kinaz (CK), laktat dehidrogenaz (LDH) ve kardiyak troponin T gibi kas hasarı belirteçlerinde anlamlı bir değişiklik yaratmadığını göstermiştir. Bu sonuç, düzenli orta yoğunluklu egzersizin kardiyak ve iskelet kası bütünlüğünü bozmadığını, aksine kas metabolizmasının fizyolojik sınırlar içinde sürdüğünü ortaya koymaktadır.

2.2.1. Glukoz Metabolizması ve Egzersiz

Glukoz metabolizması, kas kontraksiyonları sırasında enerji gereksiniminin karşılanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Egzersiz, iskelet kasında glukoz alımını ve kullanımını artırarak hem akut metabolik yanıtları hem de uzun vadeli adaptasyonları şekillendirir. Bu süreç, özellikle insülin duyarlılığının iyileştirilmesi ve glisemik kontrolün düzenlenmesi açısından önemlidir.

Egzersiz sırasında glukoz alımı kas hücrelerine kan yoluyla ulaştırılan glukozun membran üzerinden taşınması ve hücre içi metabolizmaya katılması basamakları ile gerçekleşir. Çoğu durumda, transmembran glukoz taşıyımı hız sınırlayıcı basamak olarak kabul edilir. Egzersiz, kas zarına glukoz taşıyıcılarının (özellikle GLUT4) translokasyonunu artırarak bu basamağı hızlandırır (Richter vd., 2001). Ayrıca, egzersiz kas kan akımını artırarak glukozun kaslara sunumunu kolaylaştırır ve glikoliz ile glikojen sentezi gibi enzimatik süreçleri aktive eder.

Kas glikojen düzeyleri, glukoz metabolizmasının düzenlenmesinde belirleyici rol oynar. Glikojen depoları düşük olduğunda, kasın glukoz alım kapasitesi belirgin şekilde artar. Bu durum, egzersiz sırasında ve sonrasında gözlenen insülin duyarlılığındaki artışı açıklayan temel mekanizmalardan biridir (Derave vd., 1999; Wojtaszewski vd., 2000). AMP-activated protein kinase (AMPK) aktivasyonu da bu

süreçte önemli bir enerji sensörü olarak görev yapar. Metabolik stres altında AMPK, GLUT4 translokasyonunu ve glukoz alımını artırarak kas hücrelerinin enerji dengesini korur (Hayashi vd., 1998).

Egzersiz sırasında kalsiyum ve nitrik oksit (NO) sinyal yolları da glukoz taşınımında rol oynamaktadır. Özellikle kas kontraksiyonu ile yükselen hücre içi kalsiyum, protein kinaz C (PKC) aktivasyonu yoluyla GLUT4 translokasyonunu tetiklemektedir. NO ise kaslarda hem damar genişlemesini sağlayarak glukozun kas hücrelerine ulaşımını kolaylaştırır hem de doğrudan GLUT4 translokasyonuna katkı sunar (Bradley vd., 1999; Chen vd., 2000).

Egzersiz yalnızca akut etkiler değil, uzun vadeli adaptasyonlar da sağlamaktadır. Düzenli aerobik ve direnç egzersizlerinin birlikte uygulanması, glukoz metabolizması üzerinde sinerjik etkiler göstermektedir. Silva vd. (2024) tarafından yapılan 24 randomize kontrollü çalışmayı içeren bir meta-analizde, kombine egzersiz programlarının açlık glukozu, insülin ve HOMA-IR düzeylerini anlamlı derecede düşürdüğü, ayrıca inflamatuvar belirteçlerde de iyileşmeler sağladığı bildirilmiştir. Bu bulgular, egzersizin yalnızca akut metabolik yanıtları değil, aynı zamanda uzun vadeli insülin duyarlılığı ve metabolik sağlık üzerinde güçlü etkiler yarattığını göstermektedir.

2.2.2. Testosteron ve Egzersiz İlişkisi (Anabolik Yanıt)

Testosteron, en güçlü doğal androjenik-anabolik hormonlardan biridir ve iskelet kasında protein sentezini artırıcı, proteolizi baskılayıcı etkileri ile kas hipertrofinin temel düzenleyicisi olarak kabul edilmektedir (Vingren vd., 2010). Kas hücrelerinde testosteron, androjen reseptörleri (AR) ile etkileşerek gen transkripsiyonunu uyarır ve sonuçta kas protein sentezinde artış sağlar. Bu etki yalnızca anabolik süreçleri desteklemekle kalmaz, aynı zamanda kortizolün katabolik etkilerini de antagonize ederek anti-katabolik bir rol oynar (Hayes ve Elliott-Sale, 2020).

Egzersiz sırasında testosteron yanıtı büyük ölçüde egzersizin tipi, şiddeti, hacmi ve dinlenme süreleri gibi değişkenlere bağlıdır. Ağır direnç egzersizleri sonrası erkeklerde hem total hem de serbest testosteron düzeylerinde akut artışlar gözlenmektedir. Bu artış genellikle egzersizden hemen sonra ortaya çıkar ve 30–60 dakika içinde bazal seviyelere döner. Vingren vd. (2010), özellikle yüksek hacimli ve metabolik talebin yoğun olduğu protokollerin (ör. 10 set 10 tekrar squat) testosteron düzeylerinde anlamlı artış sağladığını, buna karşın düşük hacimli protokollerin bu

yanıtı tetiklemediğini bildirmiştir.

Egzersiz değişkenleri testosteron yanıtının belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Yüksek şiddet (%80–100 1RM) ve kısa dinlenme süreleri (<90 sn) ile uygulanan çok setli protokoller testosteron artışını maksimize etmektedir. Ayrıca büyük kas gruplarını içeren çok eklemlili egzersizlerin (ör. squat, deadlift, bench press) küçük kas gruplarına yönelik egzersizlere göre daha belirgin testosteron yanıtı oluşturduğu gösterilmiştir (Kraemer vd., 1990; Raastad vd., 2000).

Cinsiyet ve yaş faktörü de testosteron yanıtını etkilemektedir. Kadınlarda testosteron konsantrasyonları erkeklere göre yaklaşık 10 kat daha düşük olduğundan, direnç egzersizi sonrası gözlenen artışlar daha sınırlı veya tutarsızdır. Çalışmalarda bazı kadın gruplarında akut artışlar rapor edilse de, çoğu araştırma anlamlı değişim olmadığını göstermektedir (Vingren vd., 2010). Yaş ilerledikçe ise özellikle 35 yaş sonrasında erkeklerde bazal testosteron düzeyleri yıllık %1–3 oranında düşmekte ve bu durum hem kas hipertrofisi hem de egzersize yanıt kapasitesini olumsuz etkilemektedir.

Anabolik sinyal yolları açısından testosteron, yalnızca protein sentezini artırmakla kalmaz; aynı zamanda IGF-1/AKT/mTOR yolunu aktive ederek kas hipertrofisini destekler. Ayrıca androjen reseptörlerinin egzersiz sonrası ekspresyonu artar ve bu da kas dokusunun testosterona duyarlılığını yükseltir. Beslenme ve takviyeler de bu yanıtı modüle edebilir; örneğin, egzersiz sonrası protein-karbonhidrat desteği, androjen reseptör ekspresyonunu artırarak anabolik sinyali güçlendirmektedir (Kraemer vd., 2006).

2.2.3. Kortizol ve Egzersiz İlişkisi (Katabolik/Strese Yanıt)

Kortizol, adrenal korteksten salgılanan temel glukokortikoid olup, metabolizma, immün yanıt ve kardiyovasküler fonksiyonlar üzerinde geniş kapsamlı etkiler göstermektedir. Egzersiz fizyolojisi bağlamında kortizol, hem enerji metabolizmasının düzenlenmesi hem de organizmanın fiziksel strese uyum sağlaması açısından merkezi bir rol oynamaktadır.

Egzersiz sırasında kortizol yanıtı, çoğunlukla egzersizin şiddeti ve süresine bağlıdır. Dinlenme düzeylerinin %50–60'ı üzerindeki yoğunluklarda hipotalamo-hipofiz-adrenal (HPA) eksenini aktive olmakta ve kortizol düzeylerinde belirgin artışlar gözlenmektedir. Maksimal ve tükenmeye kadar yapılan egzersizlerde kortizol seviyeleri bazal değerlere göre %30–50 oranında yükselebilmektedir (Daly vd.,

2004). Bununla birlikte, kortizol yanıtının zamansal dinamikleri dikkate alındığında, tepe noktası çoğu zaman egzersizin hemen sonunda değil, toparlanma evresinde gözlenmektedir. Daly vd. (2004) çalışmasında deneklerin %73,5'inde kortizolün zirveye ulaşmasının egzersiz bitiminden sonraki 30–90. dakikalarda gerçekleştiği rapor edilmiştir. Bu bulgu, kortizol yanıtının yalnızca egzersiz yüküne değil, aynı zamanda toparlanma süreçlerinde devam eden metabolik ve inflamatuvar sinyallere bağlı olduğunu göstermektedir.

Egzersizin kortizol üzerindeki etkileri yalnızca katabolik süreçler ile sınırlı değildir; aynı zamanda stres adaptasyonu ve enerji mobilizasyonu açısından da belirleyicidir. Kortizol, glikojenolizi ve glukoneogenezi uyararak egzersiz sırasında kaslara glukoz sunumunu artırır, lipolizi aktive ederek serbest yağ asitlerini enerji kaynağı olarak kullanılabilir hale getirir. Ancak kortizolün kronik yüksek düzeyleri kas protein yıkımını artırarak katabolik etkilere neden olabilir ve bu durum özellikle aşırı antrenman sendromu ile ilişkilendirilmiştir (Caplin vd., 2021).

Egzersiz yoğunluğu kortizol yanıtının en güçlü belirleyicisidir. Caplin vd. (2021), 30 dakikalık farklı yoğunluklardaki egzersiz protokollerini takiben uygulanan Trier Sosyal Stres Testi ile kortizol yanıtlarını karşılaştırmış ve yoğun egzersiz yapan bireylerde, psikososyal strese karşı kortizol yanıtının baskılandığını göstermiştir. Bu bulgu, “cross-stressor adaptation” hipotezi kapsamında, egzersizin HPA eksenini akut olarak aktive etse de, sonraki stresörlere karşı daha düşük reaktivite sağladığını ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek yoğunluklu egzersiz, kortizolün negatif geri bildirim mekanizmalarını uyararak psikososyal stres yanıtını baskılamaktadır.

2.3. Hematolojik Parametreler ve Egzersiz

Egzersiz sırasında hematolojik parametrelerde meydana gelen değişiklikler, oksijen taşıma kapasitesi, immün yanıtlar ve dolaşım dinamikleri açısından büyük önem taşımaktadır. Eritrositler, hemoglobin (Hb) ve hematokrit (Hct) başta olmak üzere hematolojik göstergeler, kasların artan metabolik gereksinimlerini karşılamak için oksijen taşınmasını düzenler. Aynı zamanda lökositler ve trombositler, bağışıklık yanıtı ve hemostaz mekanizmalarının egzersize adaptasyonunda önemli rol oynar (Mairbäurl, 2013).

Yoğun fiziksel egzersiz sırasında eritrosit sayısı (RBC), hemoglobin konsantrasyonu ve hematokrit değerlerinde geçici artışlar gözlenmektedir. Bunun başlıca nedeni, egzersiz sırasında plazma hacminin azalması ve hemokonsantrasyonun artmasıdır. Ayrıca, dalaktan kana eritrosit salınımı ve kapiller

basınç değişimleri de bu parametrelerin yükselmesine katkıda bulunur (Laub vd., 1993; Shephard, 2016). Ciekot-Soltysiak vd. (2024), farklı branşlardaki elit sporcular (futsal, sprint, triatlon) üzerinde yaptıkları çalışmada RBC, Hb ve Hct değerlerinin egzersiz şiddeti arttıkça anlamlı biçimde yükseldiğini, egzersizin sona ermesiyle ise 30 dakika içinde dinlenim düzeylerine geri döndüğünü bildirmiştir. Bu bulgular, hematolojik yanıtların egzersiz yoğunluğuna orantılı olduğunu göstermektedir.

Öte yandan, hematolojik yanıtlar egzersizin tipine ve süresine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Azarbayjani vd. (2014), genç kick-boksçular üzerinde yürüttükleri çalışmada, tek seans aerobik ve anaerobik egzersiz sonrası lökosit (WBC), lenfosit (LYM) ve trombosit (PLT) sayılarında anlamlı artışlar gözlerken, RBC, Hb ve Hct değerlerinde anlamlı değişiklik saptamamışlardır. Bu sonuçlar, özellikle kısa süreli ve yoğun egzersizlerin immün hücre mobilizasyonunu uyardığını, eritrosit parametrelerindeki değişimlerin ise egzersizin süresine ve hidrasyon durumuna daha duyarlı olduğunu göstermektedir.

Egzersiz sırasında lökosit sayısındaki artış, genellikle katekolamin (epinefrin) ve kortizol gibi stres hormonlarının etkisiyle gerçekleşir. Bu hormonlar, lökositlerin damar yatağına mobilizasyonunu artırarak özellikle nötrofil ve lenfosit alt gruplarında yükselişe neden olur (McCarthy ve Dale, 1988). Ayrıca, egzersize bağlı kas hasarı ve inflamatuvar süreçler de immün hücrelerin dolaşıma katılımını hızlandırmaktadır (Peake vd., 2016).

Trombositler de egzersize duyarlı hücre grupları arasındadır. Kısa süreli yoğun egzersiz sonrası trombosit sayısında ve aktivasyonunda artış gözlenirken, toparlanma evresinde bu değerler hızla normal seviyelere inmektedir. Bunun olası mekanizmaları arasında dalak kontraksiyonu ve trombosit üretimindeki akut artışlar yer almaktadır (El-Sayed, 1996; Azarbayjani vd., 2014). Ancak uzun süreli dayanıklılık egzersizleri, artan plazma hacmi ve antrenmana bağlı hematolojik adaptasyonlar nedeniyle trombosit sayısında anlamlı değişim göstermeyebilir.

Literatürde, dayanıklılık sporcularında genellikle daha yüksek kan hacmi ve hemoglobin kütlesi rapor edilmektedir. Bu durum, oksijen taşıma kapasitesinin artmasına katkı sağlarken, aynı zamanda hematokrit değerlerinin antrenmansız bireylere göre daha düşük olmasına yol açabilmektedir. Bunun nedeni, eritrosit kütlesindeki artışın plazma hacmindeki genişleme ile dengelenmesidir (Heinicke vd., 2001; Levine, 2008). Böylece sporcularda optimal kan akışı korunurken, dokuya oksijen taşınımı da etkin şekilde sağlanır.

2.3.1. WBC, LYM, NEU Gibi Hücresel Bağışıklık Göstergeleri

Hücresel bağışıklık sistemi, enfeksiyonlara, tümör hücrelerine ve inflamatuvar süreçlere karşı organizmanın en önemli savunma mekanizmasını oluşturmaktadır. Bu bağlamda, beyaz kan hücreleri (WBC) ve alt fraksiyonları olan lenfositler (LYM) ve nötrofiller (NEU), egzersiz fizyolojisinin immün yanıt üzerindeki etkilerini değerlendirmede kritik biyobelirteçlerdir. Egzersiz, şiddeti ve süresine bağlı olarak bu hücrelerde akut ve kronik değişikliklere yol açarak immün fonksiyonun düzenlenmesine katkıda bulunmaktadır.

Egzersiz sırasında ve sonrasında WBC sayılarında genellikle akut artış gözlenmektedir. Bu artış, başta nötrofil ve lenfosit mobilizasyonu olmak üzere, kemik iliği ve marjinal havuzdaki hücrelerin dolaşıma katılımı ile ilişkilidir. Asadi vd. (2024), 200 sağlıklı birey üzerinde yaptıkları kapsamlı modelleme çalışmasında, egzersiz sonrası WBC, NEU ve LYM sayılarının egzersiz öncesi değerler, egzersiz şiddeti ve süresi ile yüksek derecede ilişkili olduğunu göstermiştir. Özellikle egzersiz öncesi WBC düzeyleri ve egzersiz yoğunluğu, post-egzersiz hücresel yanıtların en güçlü belirleyicileri olarak rapor edilmiştir.

Lenfositler (LYM) egzersize oldukça duyarlı hücrelerdir. Orta şiddette egzersiz, lenfosit proliferasyonu ve sitokin üretimi üzerinden immün yanıtı güçlendirirken, uzun süreli veya yüksek yoğunluklu egzersizler lenfosit sayısında geçici bir azalmaya neden olabilir. Bu durum, “açık pencere (open window) hipotezi” ile açıklanmaktadır. Yüksek yoğunluklu egzersiz sonrası birkaç saat ile birkaç gün sürebilen bu immün baskılanma dönemi, viral enfeksiyonlara yatkınlığı artırabilmektedir (Suzuki ve Hayashida, 2021).

Nötrofiller (NEU) egzersiz sonrası en belirgin artış gösteren lökosit alt grubudur. Akut egzersiz sırasında katekolaminlerin ve kortizolün etkisiyle nötrofil sayısında hızlı bir yükselme gerçekleşir. Bu artış, immün sistemin stres yanıtının bir parçası olup kas hasarına ve inflamasyona karşı adaptif bir mekanizma olarak değerlendirilmektedir. Ancak nötrofil fonksiyonlarının (örneğin fagositoz ve oksidatif patlama) aşırı uyarımı, kas dokusunda oksidatif strese ve inflamatuvar yanıtın artmasına katkıda bulunabilir (Suzuki, 2019; Asadi vd., 2024).

Akut egzersiz protokolleri üzerine yapılan klinik çalışmalar, WBC, LYM ve NEU dinamiklerinin egzersizin süresine ve yoğunluğuna göre değişkenlik gösterdiğini desteklemektedir. Niazi vd. (2025), sağlıklı genç erkeklerde yaptıkları çalışmada, 30 dakikalık treadmill egzersizi sonrası WBC ve LYM düzeylerinde

anamlı bir değişiklik gözlemlememiş, ancak trombosit parametrelerinde geçici artış saptamışlardır. Bu bulgu, kısa süreli ve orta yoğunluklu egzersizin immün hücreler üzerinde baskın bir etki oluşturmadağını, ancak yoğun veya uzun süreli protokollerde bu hücrelerin daha belirgin değişiklikler gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

2.3.2. Eritrosit İndeksleri (RBC, HGB, HCT, MCV, MCH, MCHC, RDW)

Eritrosit indeksleri, oksijen taşıma kapasitesinin değerlendirilmesinde temel biyobelirteçler olup, egzersizin hematolojik adaptasyonlarının anlaşılmasında önemli bilgiler sağlamaktadır. RBC (eritrosit sayısı), hemoglobin (HGB) ve hematokrit (HCT) değerleri, dokulara taşınan oksijen miktarının doğrudan belirleyicileridir. Egzersiz sırasında bu parametrelerde genellikle akut artış gözlenir. Bunun başlıca nedeni, egzersiz esnasında plazma hacmindeki azalmanın yarattığı hemokonsantrasyon ve dalaktan eritrosit salınımıdır (Mairbäurl, 2013). Bununla birlikte, uzun vadeli dayanıklılık antrenmanları, plazma hacminde artış ile birlikte eritrosit kütlelerinde de artışa yol açarak hematokrit değerlerini düşürebilmekte ve bu durum “spor anemisi” olarak adlandırılmaktadır (Smith, 1995). Spor anemisi genellikle gerçek eritrosit eksikliğinden ziyade dilüsyonel bir anemi tablosudur.

Ortalama eritrosit hacmi (MCV), eritrosit boyutlarını; ortalama korpüsküler hemoglobin (MCH) ve ortalama korpüsküler hemoglobin konsantrasyonu (MCHC) ise eritrositlerdeki hemoglobin içeriği ve yoğunluğunu yansıtır. Egzersiz sonrasında özellikle uzun süreli dayanıklılık aktiviteleri eritrositlerde mikroskobik düzeyde mekanik ve oksidatif strese yol açarak MCV ve MCH değerlerinde dalgalanmalara neden olabilir (Grau ve Urdiales, 2024) . Yüksek yoğunluklu egzersizler sırasında artan laktat ve oksidatif stres, eritrosit membran bütünlüğünü bozarak MCHC değerlerinde geçici artışlara yol açabilir.

RDW (eritrosit dağılım genişliği), eritrosit popölasyonundaki heterojenliği gösterir ve eritropoezin aktivitesi hakkında dolaylı bilgi sağlar. Egzersiz sonrası artan eritrosit yıkımı ve retikülosit mobilizasyonu, RDW değerlerinde geçici artışlara neden olabilmektedir (Smith, 1995). Bu bulgu, egzersizin eritrosit yaşlanmasını hızlandırdığı ve genç eritrositlerin dolaşıma katılımını uyardığını göstermektedir.

Egzersiz ile eritrosit indekslerindeki değişikliklerin altında yatan mekanizmalardan biri de eritrosit deformabilitesi ve membran stabilitesi üzerindeki etkileridir. Eritrositler, kapillerlerden geçiş sırasında yüksek derecede esneklik göstermek zorundadır. Yoğun ve uzun süreli egzersizler, oksidatif stres, mekanik travma (örneğin koşucularda foot-strike hemolizi) ve osmotik dengesizlikler yoluyla

eritrosit deformabilitesini bozabilmektedir. Bu durum, eritrosit ömrünü kısaltarak eritrosit turnoverini hızlandırır (Mairbäurl, 2013; Smith, 1995).

2.3.3. Platelet İndeksleri (PLT, MPV, PCT, PDW)

Plateletler hemostazın temel bileşenlerinden biridir ve egzersiz sırasında işlevlerinde meydana gelen değişiklikler, trombotik risk ve kardiyovasküler adaptasyonlar açısından önemli bilgiler sunar. Platelet indeksleri arasında en sık değerlendirilen parametreler; platelet sayısı (PLT), ortalama platelet hacmi (MPV), plateletcrit (PCT) ve platelet dağılım genişliği (PDW)'dir. Bu parametreler, plateletlerin sayısal ve fonksiyonel özelliklerini yansıtarak egzersizin hematolojik etkilerini ortaya koymada kullanılmaktadır.

Platelet sayısı (PLT) egzersiz sırasında genellikle akut artış göstermektedir. Bu artış hemokonsantrasyona, dalak kontraksiyonu ile dolaşıma ek plateletlerin salınımına ve katekolamin düzeylerindeki yükselişe bağlıdır. Egzersiz sonrası gözlenen trombositoz, kısa süreli olup toparlanma döneminde hızla normale döner (Sinzinger ve Virgolini, 1988). Düzenli antrenman yapan bireylerde bu artışın daha sınırlı ve toparlanmanın daha hızlı olduğu rapor edilmiştir; bu da kardiorespiratuvar uygunluğun platelet reaktivitesini modüle ettiğini göstermektedir (Heber ve Volf, 2015).

Ortalama platelet hacmi (MPV), plateletlerin fonksiyonel aktivitesinin bir göstergesidir. Büyük hacimli plateletler metabolik olarak daha aktiftir ve daha fazla granül içerir. Akut şiddetli egzersizler sonrası MPV değerlerinde geçici artış gözlenebilmektedir. Bunun nedeni, dalaktan salınan plateletlerin daha büyük boyutlu olması ve egzersizin oluşturduğu shear stresin platelet aktivasyonunu tetiklemesidir (Heber ve Volf, 2015). Ancak literatürde bazı çalışmalar MPV'de anlamlı değişiklik bildirmezken, bazıları artış, bazıları ise düşüş rapor etmiştir. Bu farklılıkların egzersiz şiddeti, süresi ve katılımcıların antrenman düzeyine bağlı olduğu düşünülmektedir.

Plateletcrit (PCT), platelet hacminin kan hacmine oranını ifade eden bir parametredir. Egzersiz sonrası PCT değerlerinde gözlenen artış, platelet sayısı ve hacmindeki geçici yükselişlerin bir yansımasıdır. Bu parametre, plateletlerin toplam kütlelerini temsil ettiğinden egzersizin hemostatik potansiyel üzerine etkilerini göstermede kritik bir biyobelirteç olarak değerlendirilmektedir. Düzenli aerobik antrenmanların PCT üzerinde dengeleyici bir etki gösterdiği ve akut egzersize bağlı ani yükselmeleri azalttığı belirtilmiştir (Sinzinger ve Virgolini, 1988).

Platelet dağılım genişliği (PDW), platelet popülasyonundaki heterojenliği ifade eder. Egzersiz sırasında dalaktan dolaşıma salınan farklı boyutlardaki plateletler PDW'nin artmasına neden olabilir. PDW'deki yükseliş, özellikle yüksek yoğunluklu egzersiz sonrası platelet aktivasyonunu ve fonksiyonel çeşitliliğini yansıtmaktadır. Bununla birlikte, düzenli fiziksel aktivite yapan bireylerde PDW değerlerinin daha stabil olduğu, sedanter bireylerde ise akut egzersizle birlikte daha belirgin değişimler gösterdiği rapor edilmiştir (Heber ve Volf, 2015).

2.3.4. Egzersizin Hematolojik Yanıtları Üzerine Literatür

Egzersiz, hematolojik sistem üzerinde hem akut hem de kronik etkiler yaratarak oksijen taşıma kapasitesi, immün fonksiyon ve hemostazın düzenlenmesinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Literatürde bu değişimlerin egzersizin türü, şiddeti, süresi ve bireyin antrenman düzeyine bağlı olarak farklılık gösterdiği ortaya konmuştur.

Eritrosit parametreleri üzerine yapılan çalışmalar, egzersiz sırasında ve sonrasında eritrosit sayısı (RBC), hemoglobin (HGB) ve hematokrit (HCT) değerlerinde geçici artışlar meydana geldiğini göstermektedir. Bunun başlıca nedeni egzersiz sırasında plazma hacminin azalmasına bağlı gelişen hemokonsantrasyondur (Mairbäurl, 2013). Ciekot-Sołtysiak vd. (2024) futsal, sprint ve triatlon sporcularında yaptıkları çalışmada RBC, Hb ve Hct değerlerinin egzersiz şiddeti arttıkça yükseldiğini, toparlanma sonrası ise normale döndüğünü bildirmiştir. Buna karşılık, Azarbayjani vd. (2014) genç kickboksçular üzerinde yaptıkları çalışmada RBC, Hb ve Hct değerlerinde anlamlı değişiklik gözlemlememiş, ancak lökosit ve trombositlerde belirgin artış saptamışlardır. Smith (1995) ise uzun süreli antrenmanların eritrosit ömrünü kısalttığını, ancak eritropoezi artırarak denge sağladığını vurgulamaktadır. Düzenli dayanıklılık egzersizlerinin eritrosit kütlesini artırdığı, fakat plazma hacmindeki genişlemeyle birlikte hematokrit değerlerinde “dilüsyonel anemi” olarak bilinen relatif düşüşe yol açabildiği rapor edilmiştir (Grau ve Urdiales, 2024).

Lökosit alt grupları da egzersize duyarlı göstergeler arasındadır. Akut egzersiz sonrası beyaz kan hücreleri (WBC) genel olarak artış göstermekte, özellikle nötrofiller (NEU) ve lenfositlerde (LYM) mobilizasyon gözlenmektedir. Asadi vd. (2024) egzersiz sonrası WBC, NEU ve LYM sayılarının egzersiz öncesi değerler ve egzersiz şiddeti ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Suzuki & Hayashida (2021) ise yüksek yoğunluklu egzersizlerin lenfosit sayısında geçici azalmaya yol açarak “açık pencere hipotezi” kapsamında enfeksiyon riskini artırabileceğini

bildirmiştir. Niazi vd. (2025) genç erkeklerde orta yoğunluklu egzersiz sonrası WBC ve LYM değerlerinde anlamlı değişim bulmamış, bu da immün hücrel yanıtın egzersizin süresi ve şiddetine bağlı olduğunu göstermiştir.

Trombosit parametreleri de egzersiz sırasında önemli dalgalanmalar gösterir. Akut egzersiz, platelet sayısında (PLT) geçici artışa neden olmakta, bu durum dalak kontraksiyonu ve hemokonsantrasyon ile ilişkilendirilmektedir (Sinzinger ve Virgolini, 1988). Ortalama platelet hacmi (MPV) ve platelet dağılım genişliği (PDW) gibi parametreler platelet aktivitesinin dolaylı göstergeleri olup, yüksek şiddetli egzersiz sonrası bu parametrelerde geçici yükselmeler bildirilmiştir (Heber ve Volf, 2015). Ayrıca plateletcrit (PCT) değerleri de akut egzersiz sırasında artış gösterebilir. Bununla birlikte, düzenli antrenman platelet fonksiyonlarını stabilize ederek aşırı aktivasyonu baskılamakta ve hemostatik dengeyi iyileştirmektedir (Sinzinger ve Virgolini, 1988).

2.4. Egzersiz

Egzersiz, vücudun dinlenme (bazal) durumuna kıyasla enerji talebinde ve metabolik hızda ani ve önemli artışlara neden olur. İstirahat halinde, otonom sinir sistemi (OSS) homeostazı sürdürmek için ağırlıklı olarak parasempatik (vagal) tonusu tercih eder. Bu durum, kalp atış hızının (bradikardi eğilimi), solunum hızının ve kan basıncının göreceli olarak düşük seviyelerde tutulmasıyla karakterizedir (Coats ve Hawn, 2023).

Egzersizin başlamasıyla birlikte bu denge, milisaniyeler içinde değişmeye başlar. Vücudun artan oksijen ve besin talebini karşılamak ve aynı zamanda artan metabolik yan ürünleri (örn. CO₂, laktat, H⁺ iyonları) etkin bir şekilde uzaklaştırmak için çok katmanlı bir fizyolojik adaptasyon süreci tetiklenir. Bu yanıt, kısmen 'merkezi komuta' (central command) olarak bilinen ve motor korteksten kaynaklanan bir 'ileri besleme' (feed-forward) mekanizması ile başlatılır. Merkezi komuta, hareket emriyle eş zamanlı olarak beyin sapındaki kardiyovasküler ve solunum merkezlerini uyarır (Forster, 2017).

Bu uyarının ilk ve en hızlı sonucu, kalp üzerindeki parasempatik (vagal) tonusun aniden geri çekilmesidir. Bu 'vagal çekilme', kalp atış hızında (kronotropi) hızlı bir artışa yol açar (Ferreira-Junior ve Vianna, 2021). Egzersiz şiddeti arttıkça ve özellikle düşük yoğunluklu egzersiz eşiği aşıldıktan sonra, sempatik sinir sistemi (SSS) aktivasyonu progresif olarak artar ve baskın hale gelir.

Artan bu sempatik deşarj, adrenal bezlerden epinefrin ve norepinefrin salınımını tetikler. Bu, sadece kalp atış hızını daha da artırmakla kalmaz, aynı zamanda kalbin kasılma gücünü (inotropi) de artırarak atım hacmini (stroke volume) ve dolayısıyla toplam kardiyak çıktıyı (kalp debisi) maksimize eder (Coats ve Hawn, 2023). Sempatik aktivasyonun bir diğer kritik rolü vasküler tonusun düzenlenmesidir: Aktif olmayan dokulara (örn. splanknik bölge, böbrekler) giden arteriyollerde vazokonstriksiyona (daralma) neden olurken, çalışan iskelet kaslarındaki lokal metabolitler (adenozin, nitrik oksit vb.) güçlü bir vazodilatasyona (genişleme) yol açar. Bu 'kan akımı şantı', oksijen bakımından zengin kanın ihtiyaç duyulan kas dokusuna seçici olarak yönlendirilmesini sağlar (Ferreira-Junior ve Vianna, 2021).

Eş zamanlı olarak, solunum sistemi de bu artan metabolik talebe yanıt verir. Solunum derinliği (tidal volüm) ve frekansı (solunum hızı) artarak, artan oksijen alımı ve karbondioksit atılımı için gerekli olan alveoler ventilasyonu sağlar (Forster, 2017). Sonuç olarak, sempatik sinir sisteminin bu entegre aktivasyonu, hücresel metabolizmadaki bu dramatik artışı karşılamak ve egzersiz sırasında vücut içi dengeyi (homeostaz) dinamik bir şekilde korumak için zorunlu ve bütünleşmiş bir fizyolojik yanıtı temsil eder (Ferretti vd., 2022).

2.4.1. Aerobik Egzersiz Sırasında Metabolizma

Aerobik egzersiz, kasların enerji ihtiyacının büyük ölçüde oksijen varlığında karşılandığı ve oksidatif fosforilasyonun temel enerji üretim yolu olduğu egzersiz biçimidir. Bu süreçte mitokondrilerde gerçekleşen oksidatif mekanizmalar, karbonhidratlar ve yağların enerjiye dönüştürülmesini sağlar. Oksijenin yeterli miktarda kas dokusuna ulaşması hem kardiyovasküler hem de solunum sistemlerinin koordineli çalışmasına bağlıdır (Ferretti vd., 2022).

Aerobik metabolizmanın merkezinde glikoliz, sitrik asit döngüsü ve elektron taşıma zinciri bulunmaktadır. Glikoliz ile sitozolde pirüvat üretilir ve oksijen varlığında mitokondriye taşınarak asetil-KoA'ya dönüştürülür. Bu molekül sitrik asit döngüsüne girerek NADH ve FADH₂ gibi elektron taşıyıcılarını oluşturur. Elektron taşıma zincirinde bu taşıyıcılar kullanılarak ATP sentezi gerçekleştirilir. Son elektron alıcısı oksijen olduğundan, oksijenin kaslara taşınması aerobik performansın belirleyici basamaklarından biridir (Biomolecules, 2020) .

Egzersiz sırasında enerji kaynağı olarak karbonhidrat ve yağların kullanımı egzersizin şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Düşük ve orta şiddetli uzun süreli

egzersizlerde yağ asitleri önemli bir enerji kaynağıdır. Egzersiz yoğunluğu arttıkça glikojen depolarının mobilizasyonu artar ve karbonhidrat kullanımı baskın hale gelir. Bu durum “cross-over” kavramı ile açıklanmaktadır; yani egzersiz şiddeti yükseldikçe enerji substratı olarak yağdan karbonhidrata geçiş gözlenir (Ferretti vd., 2022).

Aerobik egzersiz sırasında metabolik yanıt, yalnızca enerji üretimi ile sınırlı değildir. Düzenli aerobik antrenmanlar, mitokondriyal biyogenezi artırarak oksidatif kapasitenin gelişmesine, kas kapiller yoğunluğunun artmasına ve oksijen kullanım verimliliğinin yükselmesine yol açmaktadır. Bu adaptasyonlar uzun vadede daha yüksek maksimal oksijen tüketimi (VO_{2max}) ve daha düşük laktat üretimi ile karakterize edilmektedir (Holloszy, 2011; Ferretti vd., 2022).

Ayrıca aerobik egzersiz sırasında asit-baz dengesi de korunmaktadır. Oksijenin yeterli olduğu koşullarda laktat üretimi minimal düzeyde kalırken, yüksek şiddetli ve uzun süreli yüklenmelerde sınırlı da olsa anaerobik glikolizin katkısı sonucu laktat birikimi görülebilir. Ancak düzenli aerobik antrenman, laktat klirensini artırarak bu yan ürünün kaslardan uzaklaştırılmasını kolaylaştırır (Biomolecules, 2020).

Sonuç olarak, aerobik egzersiz sırasında metabolizma oksijen temelli enerji üretimine dayanır ve substrat kullanımı egzersiz yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Bu süreç, kardiyorespiratuvar sistemin kapasitesi, mitokondriyal etkinlik ve kas içi adaptasyonlarla şekillenmektedir. Literatürdeki güncel bulgular aerobik egzersizin yalnızca kısa vadeli enerji ihtiyacını karşılamakla kalmayıp uzun dönemde metabolik sağlığı ve performansı da geliştirdiğini ortaya koymaktadır.

2.4.2. Anaerobik Egzersiz Sırasında Metabolizma

Anaerobik egzersiz, yüksek şiddetli ve kısa süreli fiziksel aktiviteler sırasında kasların enerji ihtiyacının oksijen yetersizliği koşullarında karşılandığı metabolik süreçleri ifade eder. Bu tür egzersizlerde temel enerji kaynağı, oksijen bağımlı oksidatif fosforilasyon yerine, oksijensiz ortamda işleyen anaerobik glikolizdir. Kas hücrelerinde glikojen veya glukoz hızla parçalanarak pirüvata dönüştürülür; oksijenin sınırlı olduğu durumda pirüvat, laktat dehidrogenaz enzimi aracılığıyla laktata indirgenir. Bu süreçte net ATP üretimi aerobik metabolizmaya göre daha düşüktür (yaklaşık 2 mol ATP/glukoz), ancak enerji üretim hızı oldukça yüksektir ve kısa süreli yoğun aktivitelerin sürdürülmesini sağlar (Ferretti vd., 2022).

Anaerobik metabolizma sırasında laktat birikimi, hücre içi pH'nın düşmesine yol açarak kas yorgunluğunun önemli nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Ancak güncel araştırmalar, laktatın yalnızca yorgunluk ürünü değil, aynı zamanda karaciğerde glukoneogenez için substrat (Cori döngüsü) ve farklı kas lifleri arasında enerji taşıyıcısı olarak da işlev gördüğünü göstermektedir. Böylece laktat, enerji metabolizmasında yeniden kullanım potansiyeli olan bir ara metabolit niteliğindedir (Biomolecules, 2020).

Oksijen yetersizliğinde enerji üretiminde yalnızca sitozolik fermentatif süreçler değil, aynı zamanda mitokondriyal düzeyde farklı adaptasyonlar da devreye girebilir. Özellikle parazitik helminthlerde ve bazı protistlerde tanımlanan anaerobik mitokondriler, oksijen yerine fumarat veya nitrat gibi alternatif elektron alıcılarını kullanarak ATP sentezi gerçekleştirebilir. Bu durumda oksidatif fosforilasyonun klasik son ürünü olan su yerine, süksinat, propiyonat veya nitrik oksit gibi farklı metabolitler açığa çıkmaktadır (Tielens vd., 2002). Her ne kadar insan iskelet kasında bu tür alternatif terminal akseptörler kullanılsa da mitokondriyal biyokimyanın esnekliği anaerobik metabolizmanın evrimsel çeşitliliğini göstermektedir.

Yoğun egzersiz sırasında enerji talebinin artmasıyla, anaerobik glikoliz kasların hızlı enerji ihtiyacını karşılamak için devreye girer. Bu süreç özellikle tip II (hızlı kasılan) kas liflerinde belirgindir. Aerobik kapasitenin aşıldığı “anaerobik eşik” üzerinde, laktat üretim hızı laktat klirensini aşar ve kan laktat düzeyleri artar. Bu eşik nokta, sporcularda dayanıklılık kapasitesini değerlendirmede kullanılan en önemli fizyolojik göstergelerden biridir (Yu, 2025).

Sonuç olarak, anaerobik egzersiz sırasında metabolizma, yüksek hızda enerji üretimine odaklı, ancak verim açısından sınırlı bir süreçtir. Anaerobik glikoliz ve laktat metabolizması, kısa süreli yüksek yoğunluklu performansların temel enerji kaynağıdır. Düzenli antrenmanlar sayesinde laktat toleransı ve tamponlama kapasitesi gelişir; böylece sporcunun anaerobik performansı artar. Bu mekanizmaların anlaşılması, hem performans fizyolojisinin hem de egzersiz sırasında oluşan biyokimyasal adaptasyonların değerlendirilmesi için kritik öneme sahiptir.

2.4.3. Egzersiz Sonrası Toparlanma Süreçleri

Egzersiz sonrası toparlanma, sporcuların performanslarını sürdürmeleri, adaptasyon süreçlerini optimize etmeleri ve sakatlanma risklerini azaltmaları

açısından kritik bir biyolojik süreçtir. Yoğun egzersiz sırasında organizma kas hasarı, enerji depolarının tükenmesi, sıvı-elektrolit kaybı, oksidatif stres ve inflamatuvar yanıt gibi fizyolojik stres faktörlerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle toparlanma sürecinin etkin yönetimi, yalnızca akut performansın değil, uzun vadeli antrenman adaptasyonlarının da temelini oluşturmaktadır (Dupuy vd., 2018; Peake vd., 2016).

Toparlanma sürecinin ana hedefleri arasında kas onarımı, glikojen depolarının yeniden doldurulması, sıvı-elektrolit dengesinin sağlanması, inflamasyonun azaltılması ve oksidatif stresin kontrol altına alınması yer almaktadır. Kas protein sentezi (MPS), egzersiz sonrası adaptasyonun merkezinde bulunur ve özellikle direnç egzersizi sonrasında uyarılan mekanik ve biyokimyasal sinyaller aracılığıyla gerçekleşir. Bu sürecin desteklenmesi için yeterli protein ve özellikle lösin gibi dallı zincirli aminoasitlerin (BCAA) alınması gereklidir (Snijders vd., 2015; Kaspary vd., 2023).

Enerji depolarının yenilenmesinde en kritik substrat karbonhidratlardır. Egzersiz sırasında tükenen kas glikojeninin hızla replen edilmesi, sonraki antrenman veya müsabaka için fizyolojik hazırlığın sağlanmasında belirleyici rol oynar. Yüksek glisemik indeksli karbonhidratların egzersiz sonrası ilk 30–120 dakika içinde tüketilmesi glikojen sentezini hızlandırmaktadır. Ayrıca protein ile birlikte karbonhidrat alımı, insülin yanıtını artırarak hem glikojen depolanmasını hem de kas protein sentezini optimize etmektedir (Alghannam vd., 2018; Kuo vd., 2023).

Egzersiz sırasında artan sıvı ve elektrolit kayıpları, özellikle sıcak ve nemli ortamlarda, dehidrasyon riskini artırır. Bu nedenle toparlanma sürecinde rehidrasyon büyük önem taşır. Sodyum, potasyum, kalsiyum ve magnezyum gibi elektrolitlerin yerine konması, kas fonksiyonunun devamı ve kardiyovasküler stabilitenin korunması açısından elzemdir (Shirreffs ve Sawka, 2011; Evans vd., 2017).

Egzersiz sonrası inflamasyon ve oksidatif stres, toparlanma sürecinin diğer önemli bileşenleridir. Kas liflerinde oluşan mikrotravmalar, sitokin salınımını ve reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini tetikler. Kontrollü inflamatuvar yanıt, kas tamiri için gerekli olmakla birlikte, aşırı veya uzun süreli inflamasyon toparlanmayı geciktirir. Bu noktada antioksidan vitaminler (C ve E), polifenoller, omega-3 yağ asitleri ve fonksiyonel gıdalar (ör. vişne suyu, zerdeçal, probiyotikler) inflamasyonu ve oksidatif stresi azaltıcı etkileriyle öne çıkmaktadır (Wang vd., 2024; Kimble vd., 2021).

Son yıllarda toparlanma süreçlerinde kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımları

da öne çıkmıştır. Genetik ve metabolik profillemeye ile bireysel farklılıkların belirlenmesi, sporculara özgü toparlanma stratejilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca uyku kalitesi, psikolojik stresin yönetimi ve aktif toparlanma yöntemleri (ör. düşük şiddetli egzersiz, esneme, masaj) toparlanma sürecini bütüncül biçimde destekleyen faktörlerdir (Kellmann, 2010; Adamczyk, 2023).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Çalışma Tasarımı ve Yeri

Bu araştırma, tekrarlı ölçümlere dayalı yarı deneysel (within-subject) bir tasarım olarak planlanmıştır. Aynı örneklem üzerinde iki ayrı egzersiz oturumu (anaerobik ve aerobik) uygulanmış; her oturumda kan örnekleri egzersiz öncesi (Pre) ve egzersizden hemen sonra (Post) alınmıştır. Oturumlar arasında yaklaşık 15 günlük toparlanma aralığı bırakılmıştır. Çalışma, standardize edilmiş çevresel koşullar ve sabit saat dilimlerinde; egzersiz uygulamaları saha/egzersiz alanında, kan alma ve laboratuvar analizleri ise kapalı ortamda gerçekleştirilmiştir. Çevresel değişkenler (sıcaklık, nem) ve pre-analitik etmenler (beslenme, hidrasyon, uyku, vücut pozisyonu, antikoagülan) mümkün olduğunca sabitlenmiştir.

3.2. Araştırma Grubu

Bu çalışma, U17–U18 amatör futbol liglerinde aktif olarak yer alan, 17–19 yaş aralığında ve en az bir yıldır düzenli futbol antrenmanına devam eden 20 erkek sporcudan oluşan bir örneklem üzerinde yürütülmüştür. Katılımcılara çalışma amacı, kapsamı, ölçüm/örnekleme süreçleri ve olası riskler hakkında sözlü ve yazılı bilgilendirme yapılmış; araştırmaya dâhil edilmeden önce yazılı gönüllü onamları alınmıştır.

3.3. Etik Onay ve İzinler

Bu çalışma, Harran Üniversitesi Klinik Araştırmalar Etik Kurulu – İlaç Dışı Klinik Araştırmalar alt kurulunun onayı ile yürütülmüştür (Tarih: 30.12.2024; Karar/Protokol No: HRÜ/24.21.32). Araştırma, Helsinki Bildirgesi ilkelerine uygun olarak planlanmış ve icra edilmiştir. Çalışmaya katılan tüm sporculara araştırmanın amacı, kapsamı, olası riskler ve hakları hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Kişisel verilerin gizliliği korunmuş, veriler anonimleştirilerek yalnızca bilimsel amaçlarla kullanılmıştır. Saha uygulamaları için ilgili kulüp/kurumsal birimlerden gerekli idari izinler temin edilmiştir.

3.4. Evren ve Örneklem

Evren: Şanlıurfa ili sınırları içinde, 17–18 yaş kategorilerinde sporcusu bulunan tüm amatör futbol takımları.

Örneklem: Anadolu Gençlik ve Spor Kulübü’nün, Şanlıurfa Amatör Lig U-17 ve U-18 kategorilerinde mücadele eden ve U-18 kategorisinde sezonu şampiyon

olarak tamamlayan takım kadrosundan; 17–18 yaş aralığında, dahil edilme ölçütlerini sağlayan ve gönüllü olan 20 erkek futbolcu dahil edildi.

Örnekleme Yöntemi: Erişilebilirlik ve gönüllülük esaslı uygun örnekleme yaklaşımı.

3.5. Dahil Edilme Ölçütleri

17–18 yaş aralığında olmak ve U17–U18 amatör futbol liglerinde aktif olarak yer almak.

En az 1 yıldır düzenli futbol antrenmanına kesintisiz devam ediyor olmak.

Çalışmaya gönüllü olarak katılmayı kabul etmek ve yazılı onam vermek (reşit olmayanlar için ebeveyn/veli onamı).

Son 6 ay içinde egzersize engel oluşturabilecek ciddi kas-iskelet sistemi yaralanması/cerrahisi bulunmamak.

Spor yapmaya engel olacak bilinen akut/kronik tıbbi durum bulunmamak (kardiyovasküler, solunum, hematolojik, endokrin vb.).

Kan parametrelerini/performansı etkileyebilecek düzenli ilaç (ör. beta-bloker, antikoagülan, sistemik steroid) veya kısıtlı ergogenik kullanım öyküsünün bulunmaması.

3.6. Dışlanma Ölçütleri

Son 2 hafta içinde akut enfeksiyon/ateş veya klinik olarak anlamlı hastalık geçirme.

Son 8 hafta içinde kan bağışı/önemli kan kaybı veya intravenöz demir tedavisi.

Tanımlı kardiyovasküler, solunum, hematolojik veya endokrin hastalık öyküsü.

Çalışma günü öncesi protokol dışı durumlar: yoğun egzersiz, belirgin dehidratasyon, alkol veya yüksek doz kafein alımı, yetersiz uyku.

Egzersiz veya örnekleme protokolüne uyumsuzluk (oturum tamamlanamaması, ölçüm reddi vb.).

3.7. Kontrol ve Deney Grubu

Bu çalışmada harici bir kontrol grubu bulunmamaktadır. Tüm katılımcılar deney grubunu oluşturmuş, aynı örneklem üzerinde iki ayrı egzersiz koşulu (aerobik koşu ve anaerobik koşu) uygulanarak çapraz/karşılaştırmalı bir düzen izlenmiştir. Her iki oturumda da kan örnekleri egzersiz öncesi (Pre) ve hemen sonrası (Post) alınmış; oturumlar arasında akut etkilerin geçmesine olanak tanımak üzere 15 gün toparlanma aralığı bırakılmıştır.

3.8. Çalışma Akışı ve Zamanlama

Zaman noktaları (ör. Pre-Aerobik, Post-Aerobik, Pre-Anaerobik, Post-Anaerobik)

Seanslar arası toparlanma aralığı (örn. ~15 gün)

3.9. Egzersiz Protokolleri

Tüm oturumlar aynı saha koşullarında ve sabit saat diliminde gerçekleştirilmiştir. Her oturum öncesinde 15 dakikalık standart ısınma uygulanmıştır: 5 dakika düşük şiddette koşu + 10 dakika dinamik hareketlilik/esneklik. Antrenman süresince katılımcıların kalp atım hızları ve oksijen doygunlukları, Zacurate 500BL marka parmak ucu nabız oksimetre (Zacurate Fingertip Pulse Oximeter, Blood Oxygen Saturation Monitor) kullanılarak takip edilmiştir. Bu cihaz, LED sensör teknolojisi ile SpO₂ ve nabız değerlerini %70–100 doğruluk aralığında ± 2 hata payı ile ölçebilme özelliğine sahiptir. Kompakt yapısı ve saha koşullarına uygunluğu nedeniyle tercih edilmiştir. Katılımcılardan çalışmanın başlangıcından önceki üç gün boyunca sabah uyanır uyanmaz dinlenik nabızlarını ölçmeleri ve kayıt altına almaları istenmiştir. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması bireysel dinlenik nabız olarak kabul edilmiştir. Maksimum kalp atım hızı (HR_{max}), "220 - yaş" formülü ile hesaplanmış; hedef nabız ise Karvonen formülü ile belirlenmiştir. Hedef yoğunluk aralıkları, bireysel Karvonen formülü ile hesaplanmış, koşu hızı/ritmi KAS'a göre ayarlanmıştır.

3.9.1. Aerobik Koşu Oturumu

15 dakikalık ısınmayı takiben 30 dakika boyunca bireysel hedef nabız aralığında aerobik koşu gerçekleştirilmiştir. Katılımcılardan her 50 metrede bir, sözlü uyarılarla nabızlarını kontrol etmeleri sağlanmıştır. Egzersiz şiddeti, Karvonen yöntemiyle belirlenen aerobik hedef KAS aralığında tutulmuş; KAS bu aralığın dışına çıktığında koşu ritmi artırılıp/azaltılarak düzeltme yapılmıştır. Oturum

sonunda hemen-sonra kan örneklemeesi gerçekleştirilmiştir.

3.9.2. Anaerobik Koşu Oturumu

Aerobik oturumdan ≈ 15 gün sonra (toparlanma/yıkama aralığı) anaerobik oturuma geçilmiştir. Bu protokol ise yüksek yoğunluklu aralıklı egzersizlerden (HIIT) oluşmuş ve 30 saniyelik sprint – 90 saniyelik dinlenme periyotları ile 10 tekrar halinde gerçekleştirilmiştir. Antrenman öncesi yine 15 dakikalık ısınma yapılmıştır. Egzersiz şiddeti, Karvonen formülüne göre hesaplanan anaerobik hedef KAS aralığında sürdürülmüş; KAS takibine göre koşu ritmi dinamik olarak ayarlanmıştır. Antrenman süresince nabız ve oksijen doymunluğu takibi yine Zacurate 500BL cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Oturum sonunda hemen-sonra kan örneklemeesi gerçekleştirilmiştir.

3.9.3. Yükleme İzlemi ve Güvenlik

Tüm oturumlarda KAS sürekli izlenmiş, katılımcıların öznel zorlanma düzeyi (RPE) kaydedilmiş ve saha güvenlik önlemleri (ilk yardım seti, gözetmen eğitmeni hazır bulundurma) sağlanmıştır.

3.10. İncelenen Kan Parametreleri ve Ölçüm Gerekçesi

Bu çalışmada aerobik ve anaerobik antrenmanların akut etkilerini değerlendirmek amacıyla aşağıdaki biyokimyasal ve hematolojik parametreler incelenmiştir: (i) Glukoz (mg/dL): kas glikojen kullanımı ve enerji metabolizmasına yansımaları; (ii) Laktat (mmol/L): özellikle anaerobik yükleme sonrası metabolik stresin göstergesi; (iii) Kortizol ($\mu\text{g/dL}$): fizyolojik stres yanıtının hormonal göstergesi; (iv) Testosteron (ng/dL): anabolik yanıt ve kas gelişimi ile ilişkisi; (v) Tam Kan Sayımı (Hemogram): RBC, Hb, Hct, WBC, PLT ve trombosit indeksleri (MPV, PDW, PCT) dâhil parametrelerle dolaşım sistemi üzerindeki akut etkilerin bütüncül değerlendirilmesi. Tüm kan örnekleri egzersiz öncesi (Pre) ve egzersiz hemen-sorrası (Post) olmak üzere iki zaman noktasında alınmış, uygun koşullarda taşınarak Harran Üniversitesi Uygulama ve Araştırma Hastanesi Biyokimya Laboratuvarı'nda analiz edilmiştir.

3.11. Ölçüm Yöntemleri

Glukoz (mg/dL): Serum (SST) tüpe alınan örnek santrifüj sonrası heksokinaz yöntemiyle otoanalizörde çalışılmış, iki seviyeli iç kalite kontrol kullanılmıştır.

Laktat (mmol/L): Heparinli/Florür-oksalatlı plazmada laktat oksidaz temelli

enzimatik yöntem uygulanmış, örnekler alımdan ≤ 30 dk içinde analiz edilmiştir.

Kortizol ($\mu\text{g/dL}$) & Testosteron (ng/dL): Serum örnekleri kemilüminesans immünoassay (CLIA/ECLIA) prensibiyle çalışan otoanalizörde değerlendirilmiş, aynı kit lotu tercih edilmiş ve CV% değerleri kayıt altına alınmıştır.

Tam Kan Sayımı (CBC): K₂EDTA'lı tam kan örnekleri otomatik hematoloji analizörü ile çalışılmış; RBC, Hb, Hct, WBC, PLT ve trombosit indeksleri (MPV, PDW, PCT) raporlanmıştır.

Örnekleme ve raporlama: Tüm parametreler Pre (ısınma öncesi) ve Post (hemen-sonra) zamanlarında ölçülmüş; örneklemeler aynı saat diliminde ve aynı personel tarafından alınmış, hemoliz kontrolü yapılarak uygun koşullarda taşınmış ve sonuçlar klinik birimlerle raporlanmıştır.

Hematoloji (CBC ve Trombosit İndeksleri)

Tam kan örnekleri K₂EDTA'lı tüplere alınmış; örnekler alımdan itibaren 2 saat içerisinde, otomatik hematoloji analizörü (üretici/model, ülke) ile değerlendirilmiştir. Rutin parametreler (WBC, RBC, Hb, Hct, PLT) ve trombosit indeksleri (MPV, PDW, PCT) üretici talimatlarına uygun olarak raporlanmıştır. Cihaz için günlük iç kalite kontrol materyalleri ile lot bazlı kalibrasyon uygulanmış; kritik değerlerde tekrar ölçüm politikası benimsenmiştir.

Biyokimya – Glukoz

Serum örnekleri jel ayırıcılı (SST) tüplere alınmış, 10 dakika içinde 3000 rpm ($\sim 1500\text{--}2000$ g), 10 dakika santrifüj edilerek serum ayrılmıştır. Glukoz ölçümü, klinik rutinle uyumlu enzimatik heksokinaz yöntemi (analizör ve kit: üretici/model, ülke) ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar mg/dL olarak raporlanmıştır. Analizlerde iç kalite kontrol materyalleri ve iki seviyeli kontrol kullanılmıştır.

Laktat

Laktat tayini, plazma örneğinde laktat oksidaz temelli enzimatik yöntemle (analizör/kit: üretici/model, ülke) yapılmıştır. Preanalitik değişkenleri azaltmak için kan alımından sonra örnekler hızla soğutulmuş ve 30 dakika içinde analiz edilmiştir. Sonuçlar mmol/L biriminde raporlanmıştır.

Hormon Analizleri – Kortizol ve Testosteron

Kortizol ($\mu\text{g/dL}$) ve testosteron (ng/dL) düzeyleri kemilüminesan immünoassay (CLIA/ECLIA) prensibiyle çalışan otoanalizör (üretici/model, ülke) üzerinde, üretici talimatlarına uygun kitlerle çalışılmıştır. Örnekler serumdan elde edilmiş; duyarlılık, ölçüm aralığı ve CV% değerleri cihaz raporlarında belirtilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Tüm hormon analizlerinde aynı kit lotu kullanılmaya özen gösterilmiştir.

3.12. Numune ve Zamanlama

Her katılımcıdan her oturumda iki örnek alınmıştır: ısınma öncesi Pre ve egzersiz bitimini takiben Post (hemen-sonra). Katılımcılardan her seferinde 5 mL venöz kan örneği, uygun invaziv girişim koşullarında, kapalı ortamda, görevli sağlık profesyonelleri tarafından, aynı günün benzer saat diliminde ve mümkün olduğunca aynı personel tarafından gerçekleştirilmiştir. Örnekler analiz için uygun saklama/taşıma koşullarında laboratuvara ulaştırılmış, bekleme süreleri minimize edilmiştir.

3.13. İstatistiksel Analiz

Veriler önce tanımlayıcı istatistiklerle (aritmetik ortalama $\pm$ standart sapma; %95 güven aralığı) özetlenmiş, dağılım ve aykırı değerler Q–Q grafikleri, Shapiro–Wilk/Kolmogorov–Smirnov ve kutu grafikleri ile incelenmiştir. Analizler non-parametrik olarak yürütülmüştür. Gerekğinde değişkenler için log_e/square-root dönüşümleri veya Winsorizasyon ($1.5 \times \text{IQR}$) uygulanmış; tüm analizler iki yönlü (çift kuyruklu) ve $\alpha=0.05$ anlamlılık düzeyiyle gerçekleştirilmiştir. Her kan parametresi için Koşul (Aerobik vs. Anaerobik, 2 seviye) $\times$ Zaman (Pre vs. Post, 2 seviye) düzeninde tekrarlı ölçümler için uygun sıralamalara dayalı non-parametrik prosedürler kullanılmıştır. Tüm bu analizler IBM SPSS programı ile yapılmıştır. Ayrıca MetaboAnalyst çıktıları (skor/yük grafikleri, VIP listeleri, ısı haritaları) birincil istatistiksel sonuçları destekleyici nitelikte, ek materyal olarak sunulmuştur.

4. BULGULAR

Araştırmaya toplam 20 katılımcı dâhil edilmiştir. Katılımcıların %90'ı (n=18) öğrencidir; %10'u (n=2) sporcu olarak bildirilmiştir. Eğitim düzeyi ağırlıklı biçimde ortaokul mezunlarından oluşmaktadır (%75; n=15); geri kalan %5 n=5 kişi ise lise mezunudur. Yaş dağılımı 17–19 aralığında yoğunlaşmış olup en sık görülen yaş 18'dir (%40; n=8); medyan=18, ortalama≈17,9. Ekonomik durum açısından katılımcıların %55'i (n=11) gelir-gider dengesinin eşit olduğunu, %45'i (n=9) ise giderlerinin gelirinden fazla olduğunu belirtmiştir. Bu bulgular, örneklemin geç/yakın ergenlik döneminde, lise ağırlıklı ve büyük ölçüde öğrenci popülasyonundan oluştuğunu; ekonomik açıdan ise dengenin kırılabilir olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1. Örneklem ve Sosyodemografik Dağılım

Değişkenler	Cevaplar	n	%
Mesleği	Öğrenci	18	90,0
	Sporcu	2	10,0
Eğitim Durumu	Lise	5	25,0
	Ortaokul	15	75,0
Yaş	18	8	40,0
	17	7	35,0
	19	5	25,0
Gelir Durumu	Giderim Gelirime Eşit	11	55,0
	Giderim Gelirimden Fazla	9	45,0
Toplam		20	100

Araştırmaya katılan 20 sporcunun spor geçmişine ilişkin bulgular, örneklemin büyük kısmının deneyimli olduğunu göstermektedir. Lisanslı sporculuk yılı açısından katılımcıların %55'i (n=11) “3 yıldan fazla”, %45'i (n=9) “1–3 yıl” deneyime sahiptir. Kulüp yılı dağılımında en yüksek oran 1–3 yıl grubunda görülmüştür (%40; n=8); bunu 0–1 yıl (%35; n=7) ve 3 yıldan fazla (%25; n=5) izlemektedir. Düzenli antrenman yılı bakımından katılımcıların %55'i (n=11) “3 yıldan fazla” düzenli antrenman yapmaktadır; %45'i (n=9) “1–3 yıl” aralığındadır. Bu dağılım, lisanslılık ve düzenli antrenman sürelerinde uzun süreli devamlılığın yüksek olduğunu; buna

karşılık kulüp üyeliği sürelerinin görece daha kısa seyrettiğini (olası kulüp değişimleri ya da yakın dönemde kulüp kayıtlarının güncellenmesi) düşündürmektedir.

Çizelge 4.2. Spor Geçmişi ve Antrenman Süreleri

Değişkenler	Cevaplar	n	%
Lisanslı Yılı	3 yıldan fazla	11	55,0
	1-3 yıl	9	45,0
	0-1 Yıl	0	0,0
Kulüp Yılı	1-3 yıl	8	40,0
	0-1 Yıl	7	35,0
	3 yıldan fazla	5	25,0
Düzenli Antrenman Yılı	3 yıldan fazla	11	55,0
	1-3 yıl	9	45,0
	0-1 Yıl	0	0,0
Toplam		20	100

Örnekleme (n=20) katılımcıların tamamı antrenmanlarına ara vermediklerini ve düzenli ilaç kullanmadıklarını bildirmiştir; ayrıca mevcut bir hastalık beyanı bulunmamaktadır (%100 “hayır”). Buna karşılık, son 6 ay içinde sakatlık geçirme oranı %25 (n=5) olup çoğunluk (%75; n=15) sakatlık bildirmemiştir. Bu bulgular, genel olarak yüksek antrenman sürekliliği ve iyi algılanan sağlık durumu ile uyumludur; sınırlı sayıdaki sakatlık bildirimi ise performans ve yüklenme planlamasında yaralanma önleme stratejilerinin (ısınma-soğuma protokolleri, yük takibi, toparlanma) önemini vurgulamaktadır.

Çizelge 4.3. Antrenman Sürekliliği ve Sağlık Durumu

Değişkenler	Cevaplar	n	%
Antremana Ara Verme	Hayır	0	100,0
	Evet	20	0,0
İlaç Kullanımı	Hayır	0	100,0

	Evet	20	0.0
Son 6 Ay Sakatlık	Hayır	15	75,0
	Evet	5	25,0
Hastalık Durumu	Hayır	0	100,0
	Evet	20	0,0
Toplam		20	100

Çizelge 4.4. Değişkenlerin İstatiksel Analiz

Zaman	T1 Ortalama± SS	T2 Ortalama± SS	T3 Ortalama± SS	T4 Ortalama± SS	p-değeri
O2Hb	60,68 ± 18,113	68,58 ± 22,188	66,0295 ± 22,339	57,878 ± 20,753	0,3582
MetHb	0,365 ± 0,289	0,38 ± 0,286	0,357 ± 0,101	0,469 ± 0,408	0,6005
pH	7,343 ± 0,053	7,34565 ± 0,059	7,357345 ± 0,167	7,32841 ± 0,189	0,9221
PCO2	48,825 ± 8,003	45,74 ± 11,012	43,2435 ± 9,470	42,698 ± 8,656	0,1561
PO2	34,635 ± 13,802	42,37 ± 20,904	42,4065 ± 20,696	39,866 ± 17,471	0,5058
tHb	16,31 ± 1,371	16,945 ± 1,544	15,8785 ± 0,875	15,8145 ± 0,930	p<0,01**
Hct	48,05 ± 4,006	49,8 ± 4,491	46,28 ± 2,008	46,535 ± 2,808	p<0,001***
SO2	57,6 ± 23,078	67,265 ± 24,942	66,6225 ± 22,418	60,9825 ± 20,944	0,4866
K+	4,0985 ± 0,274	4,055 ± 0,369	4,1438 ± 0,380	4,02995 ± 0,299	0,7174
Na+	140,485 ± 1,786	141,425 ± 2,240	142,185 ± 3,848	145,5415 ± 5,135	0,7145
Ca++	1,167 ± 0,058	1,156 ± 0,064	1,1733 ± 0,043	1,18775 ± 0,063	0,3721

cCl-	102,0 ± 1,451	102,7 ± 0,923	102,6 ± 2,437	102,55 ± 2,373	0,6529
Glu	92,9 ± 12,2	98,8 ± 20,983	96,455 ± 10,422	102,67 ± 18,081	0,2760
Lactate	1,9315 ± 0,902	3,0755 ± 2,312	5,47475 ± 4,098	6,52325 ± 5,337	p<0,001***
Bilirubin	2,065 ± 0,206	2,04 ± 0,123	2,055 ± 0,204	2,125 ± 0,448	0,7745
tCO2*	27,175 ± 2,101	24,89 ± 3,615	21,906 ± 5,460	22,502 ± 6,912	p<0,001***
COHb	0,67 ± 0,316	0,56 ± 0,344	0,6165 ± 0,331	0,709 ± 0,327	0,5129
cBase	-0,045 ± 1,959	-1,65 ± 3,196	-4,101 ± 6,327	-5,5745 ± 7,559	p<0,01**
HCO3std	22,91 ± 1,686	22,07 ± 1,736	20,3695 ± 3,973	19,4625 ± 4,868	p<0,001***
WBC	9,1729 ± 2,235	10,2812 ± 1,989	12,4377 ± 3,729	12,25405 ± 3,404	p<0,01**
LYM	2,85395 ± 1,238	3,2968 ± 1,462	4,938115 ± 1,818	4,663 ± 1,595	p<0,001***
MONO	2,48078 ± 2,377	2,35589 ± 2,506	4,19835 ± 2,174	5,38406 ± 2,829	p<0,01**
NEU	3,56917 ± 2,686	4,06803 ± 2,590	1,882375 ± 2,191	1,734885 ± 1,309	p<0,01**
EOS	0,150155 ± 0,095	0,14968 ± 0,111	0,465422 ± 0,537	0,3449915 ± 0,454	p<0,05*
BASO	0,11872 ± 0,06	0,13836 ± 0,071	0,6344785 ± 2,370	0,1044765 ± 0,053	0,42483
%N	58,235 ± 9,756	58,869 ± 10,317	44,5924 ± 12,587	50,02355 ± 7,230	p<0,001***
%L	30,8605 ± 9,288	30,96875 ± 10,246	40,0378 ± 7,676	37,61375 ± 5,246	p<0,01**
%M	7,9509 ± 1,377	7,45325 ± 1,502	8,143105 ± 2,507	8,76516 ± 1,909	0,18006
%E	1,688305 ± 1,139	1,48499 ± 1,000	4,318145 ± 5,552	3,210535 ± 4,170	0,3623

%B	1,26561 ± 0,476	1,29109 ± 0,461	3,4126365 ± 11,299	0,85148 ± 0,318	0,47939
RBC	5,47445 ± 0,269	5,5472 ± 0,363	5,400645 ± 0,729	5,474055 ± 0,454	0,82218
HCT	46,4635 ± 2,435	46,4745 ± 2,476	45,2286 ± 7,040	47,25595 ± 4,018	p<0,001***
HGB	15,071 ± 0,542	15,186 ± 0,691	14,91925 ± 1,573	15,3482 ± 0,761	0,56228
MCV	84,933 ± 3,618	83,929 ± 4,082	84,1978 ± 6,115	86,8606 ± 4,214	0,18480
MCH	27,567 ± 1,17	27,436 ± 1,386	27,91665 ± 1,707	28,254 ± 1,526	0,29085
MCHC	32,481 ± 1,294	32,7085 ± 1,194	33,5288 ± 3,929	32,78285 ± 1,769	0,51893
PCT	0,248015 ± 0,056	0,259205 ± 0,050	0,3493365 ± 0,117	0,345035 ± 0,067	p<0,001***
MPV	7,7971 ± 1,189	7,41775 ± 1,100	10,5461 ± 2,858	9,6574 ± 1,555	p<0,001***
PDW	20,1825 ± 1,159	19,7575 ± 0,911	19,07535 ± 2,751	17,5224 ± 3,044	p<0,001***
PLT	319,55 ± 69,774	353,225 ± 69,611	348,5875 ± 102,673	361,7935 ± 62,388	0,34923
RDW	11,6935 ± 1,215	11,826 ± 1,147	12,8609 ± 5,363	11,82905 ± 1,781	0,56783
Glukoz	92,65 ± 12,479	96,55 ± 20,995	102,255 ± 16,871	103,43 ± 19,629	0,1952
Total Testosteron	451,8085 ± 210,821	406,6375 ± 153,422	391,37255 ± 143,771	426,98545 ± 224,492	0,7574
Kortizol	9,8195 ± 6,382	9,6105 ± 6,606	10,79965 ± 6,440	12,5737 ± 6,415	0,4576

SD: Standart Sapma, p değeri Kruskal–Wallis H testi ile elde edilmiştir, p < 0.05 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bulunanlar (***) olarak işaretlenmiştir.

Bu çalışmada, U-17 ve U-18 liginde yer alan futbolcularda aerobik ve anaerobik egzersizlerin akut dönemde hematolojik ve biyokimyasal parametreler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Kruskal–Wallis H testi sonucunda tHb, Hct, laktat, iCO₂, cBase, HCO₃⁻, WBC, LYM, MONO, NEU, EOS, %N, %L, HCT, PCT,

MPV ve PDW parametrelerinde anlamlı farklılıklar saptanmıştır. Bulgular aerobik egzersiz sonrası sınırlı düzeyde değişiklikler olduğunu, ancak anaerobik egzersiz sonrası bu değişikliklerin çok daha belirginleştiğini ortaya koymuştur. Özellikle metabolik stres göstergeleri (laktat, HCO_3^- , cBase) ve immün yanıt göstergeleri (WBC, NEU, MONO, LYM) futbolcularda anaerobik yüklenme sonrası daha keskin farklılık göstermiştir.

Bu çalışmanın sonuçları hem aerobik hem de anaerobik egzersizlerin futbolcularda akut dönemde önemli hematolojik ve biyokimyasal değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur. Egzersiz sonrası tHb, Hct ve HCT değerlerindeki yükselme hemokonsantrasyonun bir göstergesi olurken, laktat, iCO_2 , HCO_3^- ve cBase parametrelerinde gözlenen değişiklikler metabolik stresin ve asit-baz dengesindeki kaymaların en belirgin göstergeleri olmuştur. Özellikle anaerobik egzersiz sonrası laktat artışı ile eş zamanlı bikarbonat düşüşü ve baz fazlası azalması, metabolik asidozun oluşumunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte WBC, LYM, MONO, NEU ve %N artışı ile %L ve EOS değerlerindeki azalma, yoğun egzersizin bağışıklık sistemi üzerinde güçlü bir mobilizasyon ve inflamatuvar yanıt oluşturduğunu kanıtlamaktadır. Platelet parametrelerinden PCT, MPV ve PDW'deki artış ise trombosit aktivasyonunun ve pıhtılaşma sistemindeki adaptif yanıtın bir göstergesi olarak dikkat çekmektedir. Tüm bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, aerobik egzersizlerin daha sınırlı değişimlere yol açtığı, anaerobik egzersizlerin ise hem metabolik denge hem de hematolojik ve immün sistem üzerinde daha belirgin etkiler yarattığı anlaşılmaktadır.

4.1. MONO (Monosit)

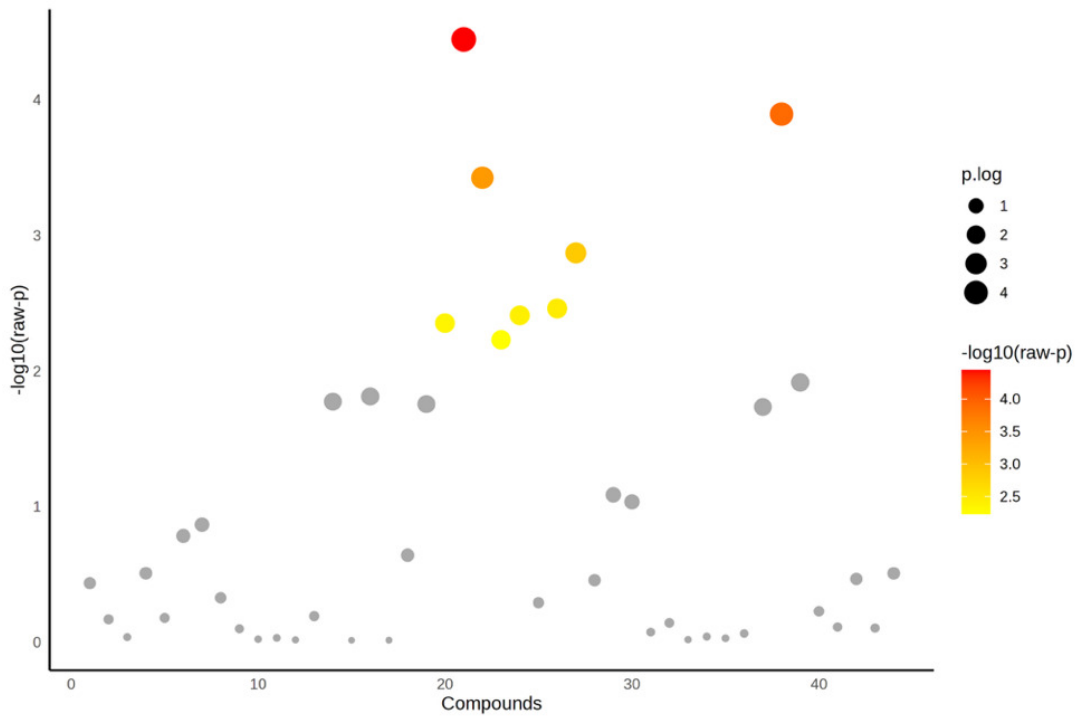
Monosit değerlerinde egzersiz sonrası yükselme saptanmıştır. Bu artış, inflamatuvar yanıtın ve doku stresine bağlı immün sistem aktivasyonunun bir göstergesidir.

4.2. PDW (Platelet Dağılım Genişliği)

Egzersiz sonrası PDW değerlerinde artış görülmüştür. Bu bulgu, trombosit popülasyonunda heterojenliğin arttığını ve egzersizle birlikte plateletlerin farklı boyutlarda aktive olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın sonuçları hem aerobik hem de anaerobik egzersizlerin futbolcularda akut dönemde önemli hematolojik ve biyokimyasal değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur. Egzersiz sonrası tHb, Hct ve HCT değerlerindeki yükselme hemokonsantrasyonun bir göstergesi olurken, laktat, iCO_2 , HCO_3^- ve

cBase parametrelerinde gözlenen değişiklikler metabolik stresin ve asit-baz dengesindeki kaymaların en belirgin göstergeleri olmuştur. Özellikle anaerobik egzersiz sonrası laktat artışı ile eş zamanlı bikarbonat düşüşü ve baz fazlası azalması, metabolik asidozun oluşumunu açıkça göstermektedir. Bununla birlikte WBC, LYM, MONO, NEU ve %N artışı ile %L ve EOS değerlerindeki azalma, yoğun egzersizin bağışıklık sistemi üzerinde güçlü bir mobilizasyon ve inflamatuvar yanıt oluşturduğunu kanıtlamaktadır. Platelet parametrelerinden PCT, MPV ve PDW'deki artış ise trombosit aktivasyonunun ve pıhtılaşma sistemindeki adaptif yanıtın bir göstergesi olarak dikkat çekmektedir. Tüm bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, aerobik egzersizlerin daha sınırlı değişimlere yol açtığı, anaerobik egzersizlerin ise hem metabolik denge hem de hematolojik ve immün sistem üzerinde daha belirgin etkiler yarattığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.1. Şekilsel Anlamlılık Grafiği

Şekilsel anlamlılık grafiği, aerobik ve anaerobik egzersiz sonrası ölçülen kan parametrelerinin istatistiksel farklılıklarını görsel olarak ortaya koymaktadır. Grafikte yukarıya doğru çıkan ve kırmızı-turuncu renkle vurgulanan noktalar, çalışmada en güçlü anlamlılığa sahip parametreleri temsil etmektedir. Özellikle laktat, Hct, tHb, HCO_3^- ve cBase değerleri en yüksek anlamlılık düzeyine ulaşmış olup, bu parametreler metabolik stresin ve asit-baz dengesindeki değişimlerin en belirgin göstergeleri olmuştur. Sarı renkle işaretlenen parametreler arasında WBC,

NEU, LYM ve MONO gibi immün hücrelere ait değerler yer almakta ve bu da yoğun egzersizin bağışıklık sistemi üzerinde akut mobilizasyon ve inflamatuvar yanıt oluşturduğunu göstermektedir. Platelet parametreleri (PCT, MPV, PDW) de anlamlı bulunmuş ancak metabolik parametrelerle kıyaslandığında anlamlılık düzeyi daha düşük kalmıştır. Gri renkle gösterilen parametreler ise istatistiksel olarak anlamlı bulunmamış olup, egzersiz sonrası belirgin bir değişim göstermemiştir. Genel olarak grafik, aerobik egzersizin daha sınırlı değişikliklere yol açtığını, anaerobik egzersizin ise metabolik, hematolojik ve immün parametreler üzerinde daha güçlü ve anlamlı etkiler oluşturduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.5. Değişkenlerin Post-hoc Sonuçları

Parametreler	f.value	p.value	Post-hoc tests
%N	9,,907	p<0,001***	T3-T1; T4-T1; T3-T2; T4-T2
MPV	90,212	p<0,001***	T3-T1; T4-T1; T3-T2; T4-T2
LYM	85,738	p<0,001***	T3-T1; T4-T1; T3-T2; T4-T2
PCT	76,598	p<0,001***	T3-T1; T4-T1; T3-T2; T4-T2
tCO ₂ *	74,417	p<0,001***	T3-T1; T4-T1; T3-T2
HCO ₃ std	69,795	p<0,001***	T3-T1; T4-T1; T4-T2
Lactate	67,514	p<0,001***	T3-T1; T4-T1; T4-T2
Hct	65,235	p<0,001***	T3-T1; T3-T2; T4-T2
PDW	60,593	p<0,001***	T4-T1; T4-T2
MONO	59,761	p<0,01**	T4-T1; T4-T2
tHb	56,845	p<0,01**	T3-T2; T4-T2
NEU	55,754	p<0,01**	T3-T2; T4-T2
WBC	51,527	p<0,01**	T3-T1; T4-T1
%L	48,438	p<0,01**	T3-T1; T3-T2
cBase	44,644	p<0,01**	T4-T1

EOS	36,858	$p<0,05^*$	T3-T1; T3-T2
-----	--------	------------	--------------

Tablodaki sonuçlara göre;

%N (Nötrofil yüzdesi) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1, T3–T2, T4–T2 Anaerobik öncesi ve sonrası nötrofil yüzdesi, hem aerobik öncesine hem de aerobik sonrasına göre anlamlı artmıştır. Bu, özellikle anaerobik egzersizin nötrofil mobilizasyonunu güçlü şekilde tetiklediğini göstermektedir.

MPV (Ortalama Platelet Hacmi) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1, T3–T2, T4–T2 Anaerobik öncesi ve sonrası MPV, aerobik öncesi ve sonrasına göre anlamlı derecede yüksektir. Bu bulgu, anaerobik egzersizin platelet aktivasyonu ve hacmini artırdığını göstermektedir.

LYM (Lenfosit sayısı) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1, T3–T2, T4–T2 Lenfosit sayısı anaerobik dönemlerde (öncesi ve sonrası) aerobik dönemlere göre anlamlı düzeyde farklıdır. Bu, egzersiz tipine bağlı olarak bağışıklık hücrelerinin dinamik bir şekilde mobilize olduğunu gösterir.

PCT (Plateletcrit) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1, T3–T2, T4–T2 Anaerobik egzersiz dönemi platelet kütlelerinde anlamlı artış yapmıştır. Bu artış hem aerobik öncesine hem de aerobik sonrasına göre belirgindir.

tCO₂ (Toplam Karbondioksit) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1, T3–T2 Anaerobik egzersiz öncesi ve sonrası, hem aerobik öncesine hem de sonrasına göre anlamlı yüksek CO₂ değerlerine sahiptir. Bu, anaerobik yüklenmelerde metabolik asit-baz dengesinin daha çok bozulduğunu göstermektedir.

HCO₃ (Bikarbonat) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1, T4–T2 Anaerobik öncesi ve sonrası bikarbonat düzeyleri aerobik öncesi ve sonrasına göre anlamlı farklılık göstermektedir. Anaerobik egzersiz sonrası düşüş, laktat artışı ile paralel bir metabolik asidozu işaret etmektedir.

Laktat – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1, T4–T2 Laktat değerleri özellikle anaerobik dönemlerde aerobik öncesi ve sonrasına göre çok daha yüksektir. En keskin fark anaerobik egzersiz sonrası (T4) ile aerobik sonrası (T2) arasındadır.

Hct (Hematokrit) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T3–T1, T3–T2, T4–T2 Anaerobik egzersiz öncesi ve sonrası hematokrit değerleri, özellikle aerobik sonrası ile karşılaştırıldığında anlamlı yüksektir. Bu, anaerobik yüklenmelerde hemokonsantrasyonun daha belirgin olduğunu göstermektedir.

PDW (Platelet Dağılım Genişliği) – $p<0,001$

Farklı gruplar: T4–T1, T4–T2 Anaerobik egzersiz sonrası platelet dağılım genişliği hem aerobik öncesine hem de sonrasına göre anlamlı derecede yüksektir. Bu, trombositlerin aktivasyonunda akut değişikliklere işaret etmektedir.

MONO (Monosit) – $p<0,01$

Farklı gruplar: T4–T1, T4–T2 Anaerobik egzersiz sonrası monosit sayısı, aerobik öncesi ve sonrasına göre anlamlı artış göstermiştir. Bu, inflamatuvar yanıtın özellikle anaerobik yüklenmelerle ortaya çıktığını göstermektedir.

tHb (Total Hemoglobin) – $p<0,01$

Farklı gruplar: T3–T2, T4–T2 Hemoglobin düzeyi anaerobik dönemlerde, özellikle aerobik sonrası ile karşılaştırıldığında anlamlı derecede yüksektir. Bu fark hemokonsantrasyon ve oksijen taşıma kapasitesinin akut değişimini yansıtmaktadır.

NEU (Nötrofil sayısı) – $p<0,01$

Farklı gruplar: T3–T2, T4–T2 Anaerobik egzersiz öncesi ve sonrası nötrofil sayısı, aerobik sonrasına göre anlamlı yüksektir. Bu, immün hücre mobilizasyonunun

özellikle yüksek şiddetli egzersizle tetiklendiğini göstermektedir.

WBC (Lökosit) – $p<0,01$

Farklı gruplar: T3–T1, T4–T1 Anaerobik dönemlerde toplam lökosit sayısı, aerobik öncesine göre anlamlı artış göstermiştir. Bu, bağışıklık sisteminin anaerobik egzersiz sonrası akut yanıtını göstermektedir.

%L (Lenfosit yüzdesi) – $p<0,01$

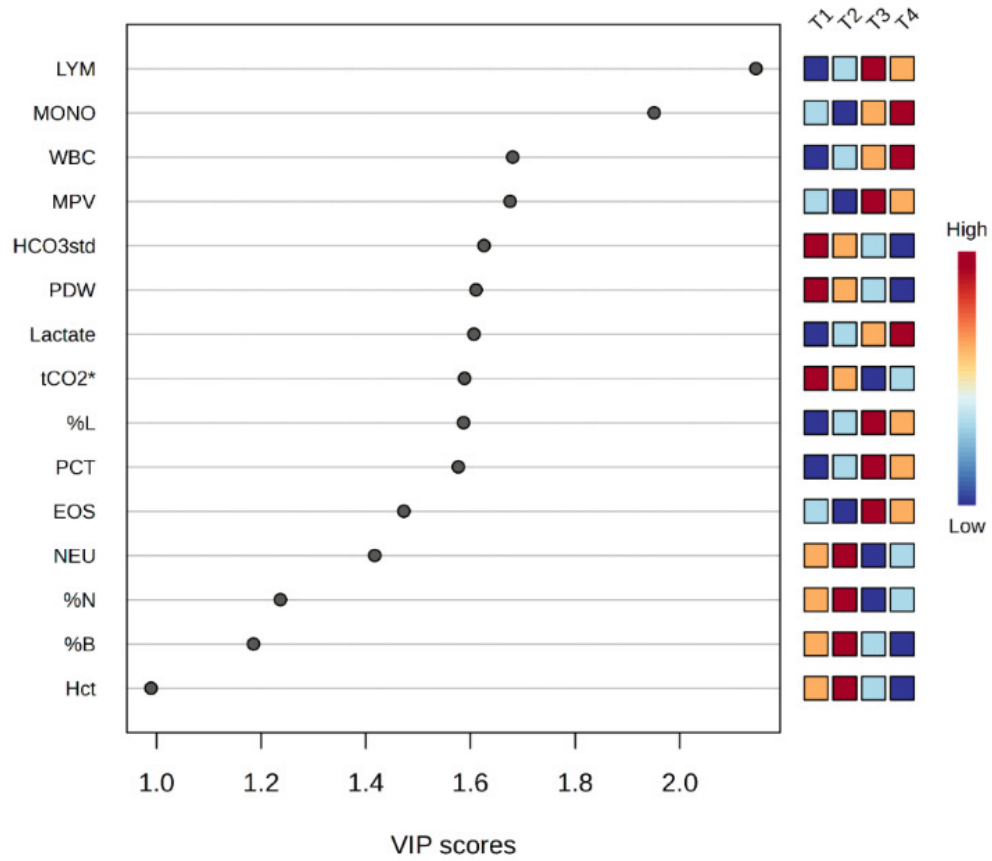
Farklı gruplar: T3–T1, T3–T2 Anaerobik öncesi dönemde lenfosit yüzdesi, hem aerobik öncesine hem de sonrasına göre anlamlı farklıdır. Bu, immün hücre dağılımındaki değişikliklerin egzersiz tipine bağlı olduğunu göstermektedir.

cBase (Baz fazlası) – $p<0,01$

Farklı gruplar: T4–T1 Anaerobik egzersiz sonrası cBase değeri aerobik öncesine göre anlamlı farklılık göstermektedir. Bu, metabolik asidozun özellikle anaerobik yüklenme sonrası ortaya çıktığını desteklemektedir.

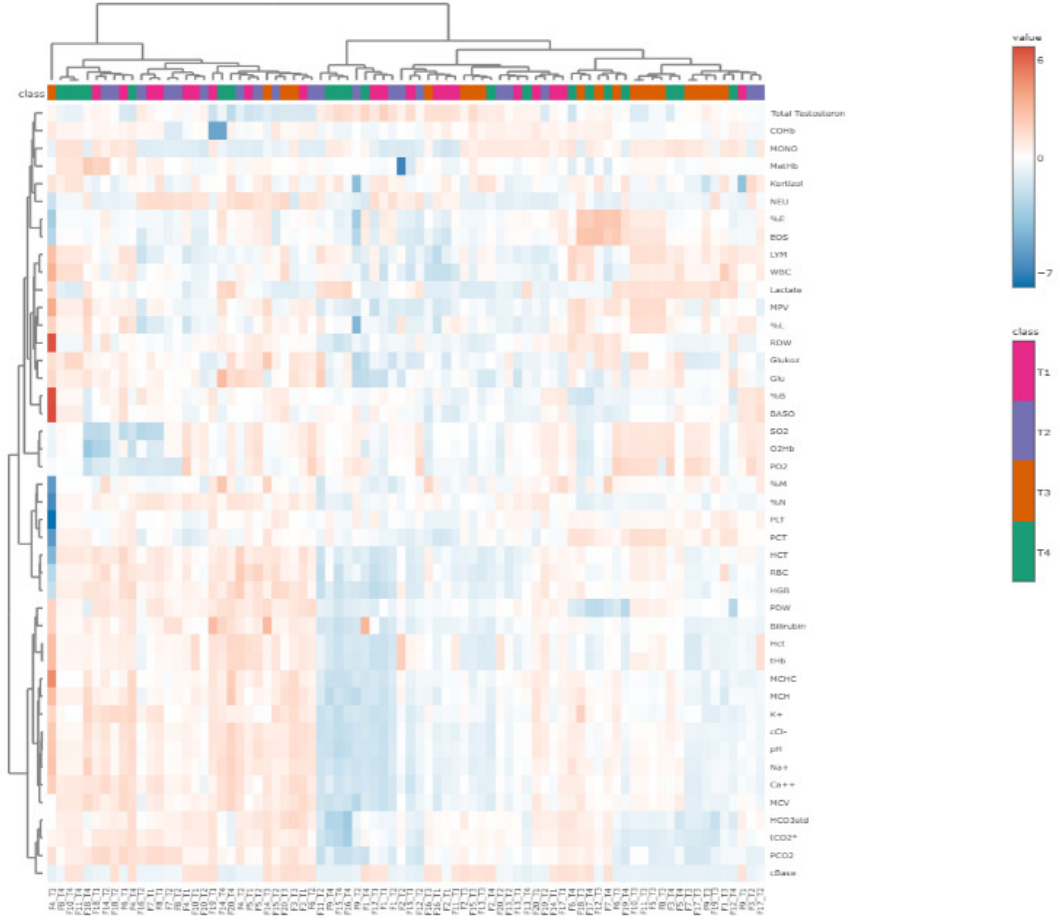
EOS (Eozinofil) – $p<0,05$

Farklı gruplar: T3–T1, T3–T2 Anaerobik öncesi dönemde eozinofil düzeyi, aerobik öncesi ve sonrasına göre anlamlı farklılık göstermektedir. Bu fark, egzersiz stresi ve kortizol etkisi ile eozinofil sayısındaki dalgalanmalara bağlanabilir.



Şekil 4.2. VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği

VIP (Variable Importance in Projection) grafiği, dört grup (T1–T2–T3–T4) arasındaki farklılıkların hangi parametreler üzerinden en güçlü şekilde ayrıldığını göstermektedir. Grafiğe göre en yüksek VIP skoruna sahip parametreler LYM, MONO ve WBC olup, bu durum immün sistem hücrelerinin aerobik ve anaerobik egzersiz sonrası grupları ayırmada en kritik parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Bunu sırasıyla MPV, HCO_3^- , PDW ve Laktat takip etmektedir; bu parametreler ise özellikle metabolik stres (laktat, HCO_3^- , tCO_2) ve hematolojik düzenlenme (MPV, PDW) ile bağlantılıdır. Daha düşük ancak yine de anlamlı katkı sağlayan parametreler arasında %L, PCT, EOS, NEU ve %N yer almaktadır. Bu sonuçlar, gruplar arasındaki ayrımın hem metabolik-asit baz dengesi hem de immün yanıt üzerinden şekillendiğini, fakat en güçlü ayrımı immün hücreler ve hematolojik adaptasyon göstergelerinin sağladığını göstermektedir. Genel olarak VIP skorları, özellikle anaerobik egzersizin bağışıklık hücreleri ve metabolik parametreler üzerinde daha belirgin etkiler yarattığını desteklemektedir.



Şekil 4.3. Heap Map Grafiği

Heap Map grafiği, dört grup (T1: aerobik öncesi, T2: aerobik sonrası, T3: anaerobik öncesi, T4: anaerobik sonrası) arasındaki parametrelerin dağılımını ve benzerliklerini görsel olarak ortaya koymaktadır.

Renk skalasına göre kırmızı tonlar yüksek değerleri, mavi tonlar ise düşük değerleri göstermektedir.

Grafikte, özellikle T3 (anaerobik öncesi) ve T4 (anaerobik sonrası) gruplarında bazı parametrelerin kümelendiği ve yoğun kırmızı tonlar ile ayrıştığı dikkat çekmektedir. Bu durum, anaerobik egzersizin biyokimyasal ve hematolojik parametreler üzerinde daha güçlü bir etki oluşturduğunu göstermektedir.

T1 ve T2 (aerobik öncesi/sonrası) grupları ise daha homojen ve birbirine

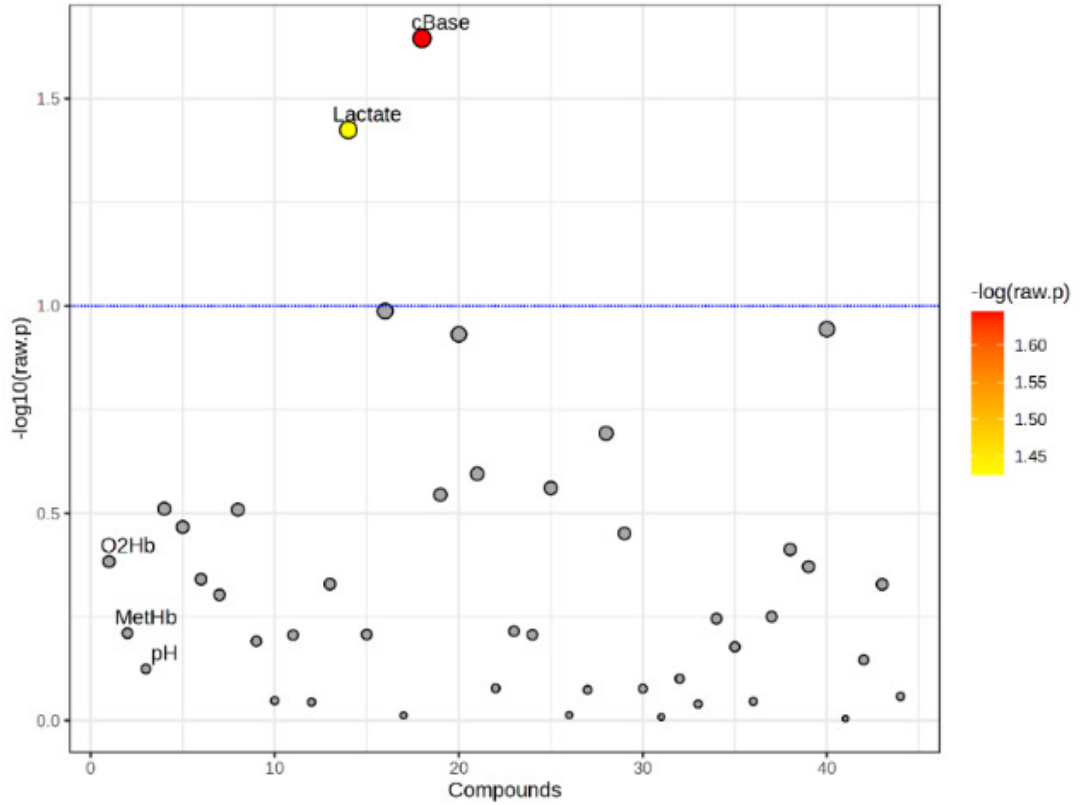
yakın değerler göstermekte, yani aerobik egzersizin parametrelerdeki değişimleri sınırlı düzeyde kalmıştır.

Laktat, Hct, tHb, HCO_3^- , cBase gibi metabolik ve hematolojik parametrelerde T4 grubunda kırmızı tonların belirginleşmesi, anaerobik egzersiz sonrası metabolik stres ve hemokonsantrasyonun arttığını ortaya koymaktadır.

WBC, NEU, MONO, %N gibi immün parametrelerde de T3 ve T4 gruplarında kümelenme gözlenmektedir. Bu, bağışıklık sisteminin özellikle anaerobik yüklenmeye daha güçlü bir yanıt verdiğini göstermektedir.

PCT, MPV, PDW gibi platelet parametrelerinde anaerobik sonrası dönemde farklılaşma gözlenmesi, trombosit aktivasyonunun yüklenmeye bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

Heat map üzerindeki dendrogramlar, parametrelerin gruplara göre kümelendiğini göstermektedir. Özellikle T3 ve T4 grupları kendi içinde daha net bir ayrışma oluştururken, T1 ve T2 grupları birbirine yakın kümelerde yer almaktadır. Bu da, anaerobik egzersizin aerobik egzersize kıyasla daha güçlü bir biyolojik ayrıştırıcı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.4. T1 ve T2 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği

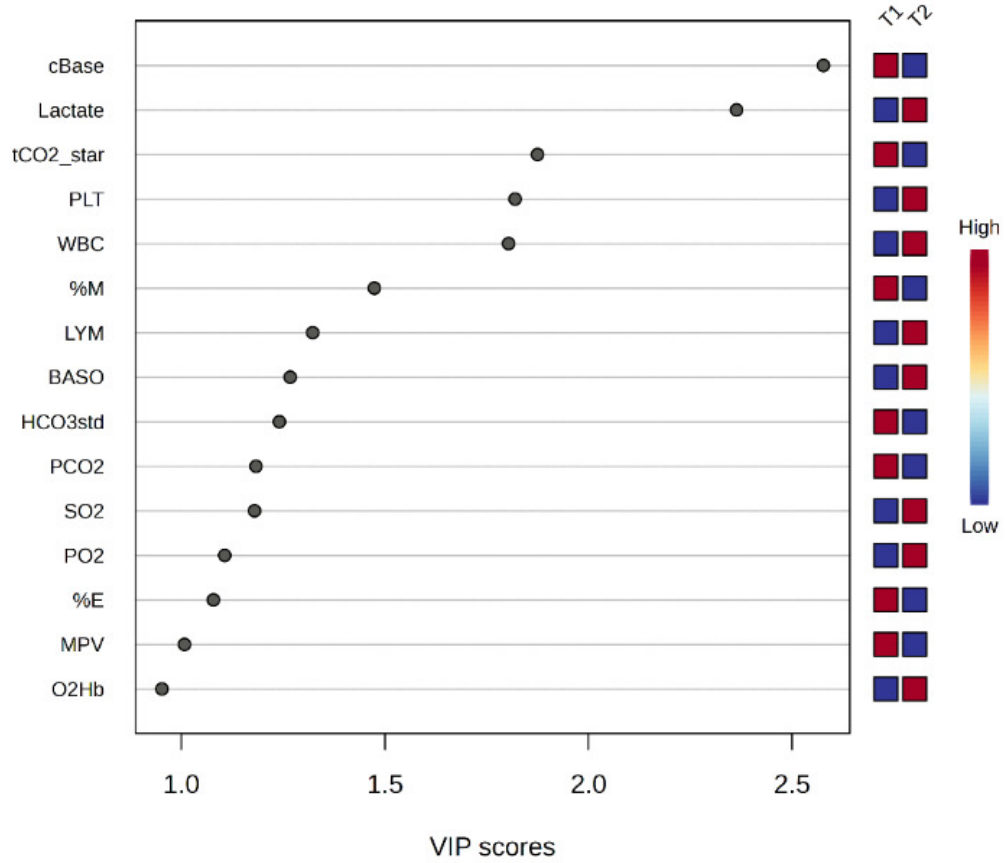
Dikey ekseninde $-\log_{10}(p)$ değeri yer almakta; değer yükseldikçe istatistiksel anlamlılık artar.

Renk skalası (sarı → turuncu → kırmızı) anlamlı parametreleri vurgulamaktadır.

Gri noktalar anlamsız ($p > 0,05$) değişiklikleri gösterirken, renkli noktalar anlamlı ($p < 0,05$) farklılıkları ifade eder.

Bu grafik, T1 (aerobik egzersiz öncesi) ile T2 (aerobik egzersiz sonrası) grupları arasındaki farklılıkları göstermektedir. Renkli noktalar incelendiğinde, en belirgin değişimin cBase değerinde olduğu görülmektedir; T2 grubunda cBase düzeyleri T1'e kıyasla anlamlı şekilde azalmıştır. Bu durum, aerobik egzersiz sonrası gelişen metabolik stresin baz fazlasını tüketerek asit-baz dengesinde kaymaya yol açtığını göstermektedir. Ayrıca laktat düzeylerinde de T1'e göre T2 grubunda anlamlı artış saptanmıştır; bu bulgu, aerobik egzersiz sırasında oksijen tüketimi yeterli olsa da enerji ihtiyacının kısmen glikolitik yoldan karşılandığını ve bunun da laktat birikimine yol açtığını ortaya koymaktadır. Diğer parametreler (O_2Hb , $MetHb$,

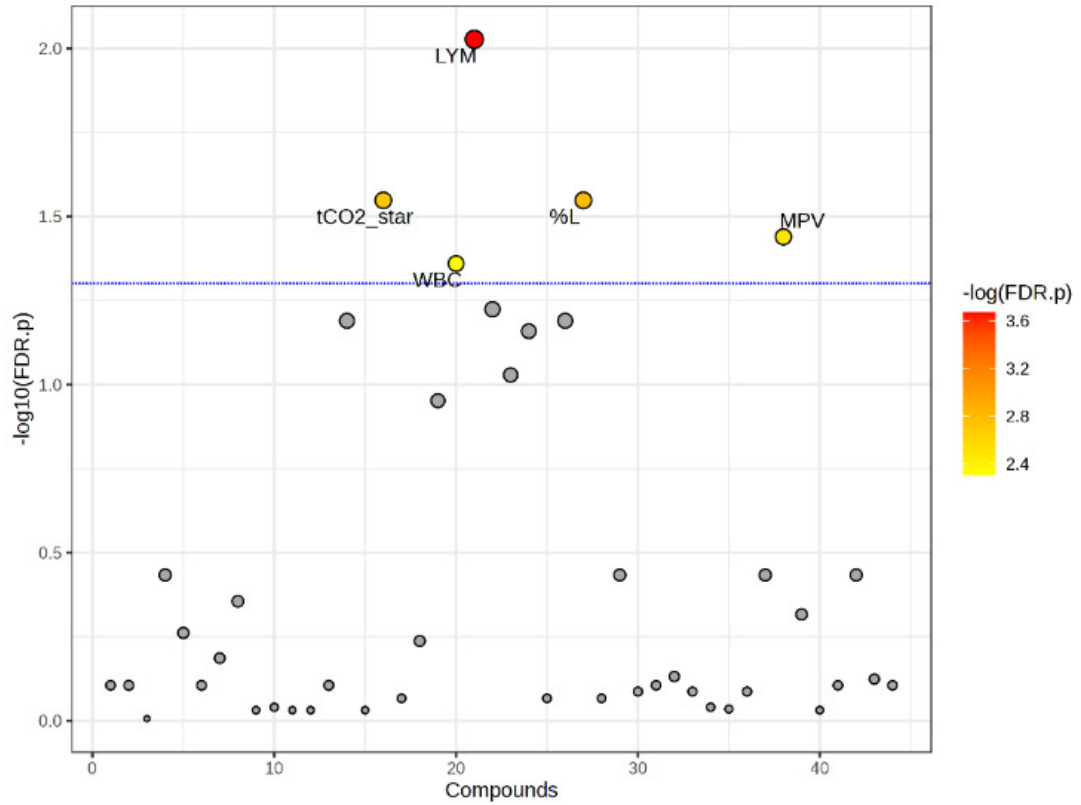
pH gibi) T1 ve T2 arasında anlamlı değişiklik göstermemiştir. Genel olarak sonuçlar, aerobik egzersizin akut dönemde en belirgin etkisini laktat artışı ve cBase azalması üzerinden gösterdiğini, buna karşılık diğer hematolojik ve oksijen taşıma parametrelerinde sınırlı değişim yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5. T1 ve T2 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği

VIP grafiği, T1 (aerobik öncesi) ve T2 (aerobik sonrası) gruplarını ayırmada en güçlü değişkenlerin hangileri olduğunu göstermektedir. En yüksek VIP skorlarına sahip olan cBase ve laktat, şekilsel anlamlılık grafiğinde de istatistiksel olarak anlamlı çıkan parametrelerdir; bu bulgu aerobik egzersizin asit-baz dengesi (cBase azalması) ve metabolik yanıtı (laktat artışı) üzerinden en belirgin etkiyi yarattığını desteklemektedir. Bunu tCO₂, WBC ve platelet parametreleri (PLT) takip etmekte, immün ve hematolojik yanıtların da grupları ayırmada rol oynadığı anlaşılmaktadır. Daha düşük VIP skorlarına sahip oksijen taşıma parametreleri (O₂Hb, SO₂, PO₂) ise T1 ve T2 arasında sınırlı farklılık göstermiştir. Bu sonuç hem şekilsel anlamlılık grafiği hem de VIP analizi birlikte değerlendirildiğinde, aerobik egzersizin akut

etkisinin özellikle metabolik asit-baz dengesi ve laktat birikimi üzerinden ortaya çıktığını göstermektedir.



Şekil 4.6. T1 ve T3 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği

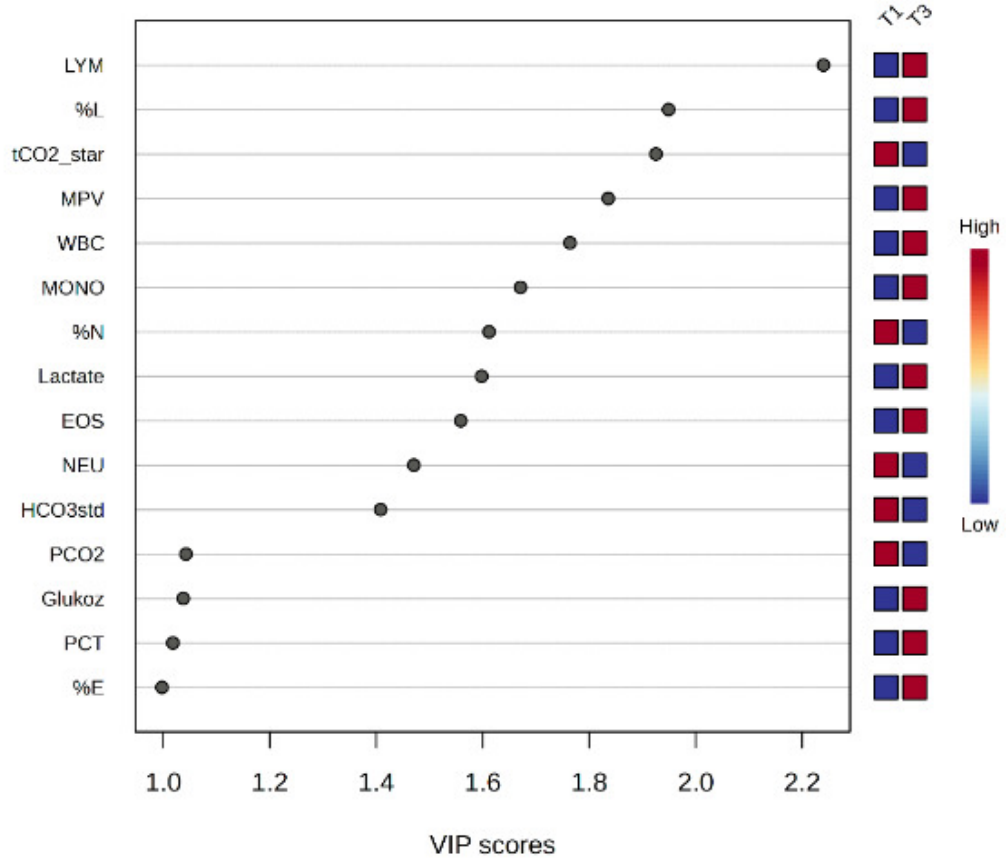
Dikey ekseninde $-\log_{10}(p)$ değeri yer almakta; değer yükseldikçe istatistiksel anlamlılık artar.

Renk skalası (sarı → turuncu → kırmızı) anlamlı parametreleri vurgulamaktadır.

Gri noktalar anlamsız ($p > 0.05$) değişiklikleri gösterirken, renkli noktalar anlamlı ($p < 0.05$) farklılıkları ifade eder.

Bu grafik, T1 (aerobik egzersiz öncesi) ile T3 (anaerobik egzersiz öncesi) grupları arasındaki farklılıkları göstermektedir. Renkli noktalar incelendiğinde, en belirgin değişimin LYM parametresinde olduğu görülmektedir; T3 grubunda lenfosit düzeyleri T1'e kıyasla anlamlı şekilde farklılık göstermiştir. Bu durum, dinlenme sürecinin ardından immün sistem hücrelerinde aerobik öncesine göre belirgin bir mobilizasyon gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca tCO₂, %L, MPV ve WBC değerlerinde de T1'e göre T3 grubunda anlamlı değişiklikler saptanmıştır; bu

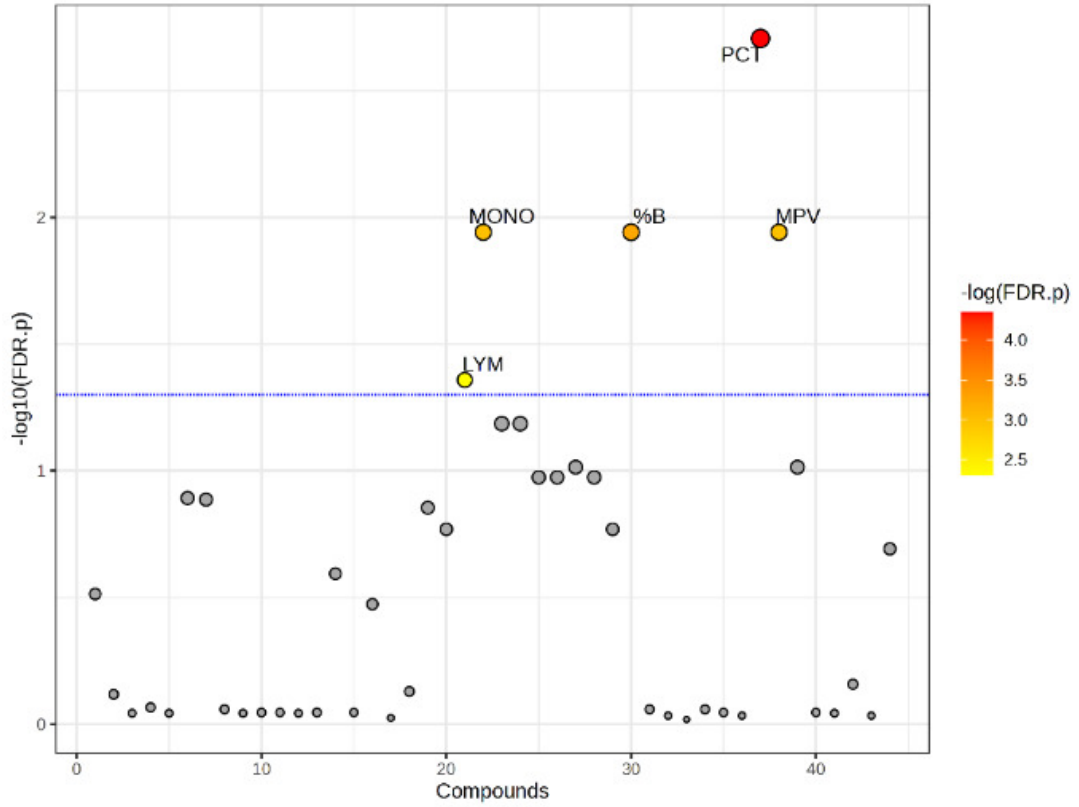
bulgular, özellikle anaerobik öncesi dönemde asit-baz dengesi, immün hücre dağılımı ve trombosit fonksiyonlarının aerobik öncesine göre farklılaştığını göstermektedir. Diğer parametreler gruplar arasında anlamlı değişim göstermemiştir. Genel olarak sonuçlar, aerobik egzersiz öncesi ile anaerobik egzersiz öncesi dönemlerin özellikle bağışıklık hücreleri, asit-baz dengesi ve hematolojik yanıt parametreleri üzerinden birbirinden ayrıştığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7. T1 ve T3 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği

VIP grafiği, T1 (aerobik öncesi) ile T3 (anaerobik öncesi) gruplarını ayırmada en önemli parametreleri göstermektedir. En yüksek VIP skorlarına sahip olan LYM, %L ve tCO₂, şekilsel anlamlılık grafiğinde de istatistiksel olarak anlamlı çıkan parametrelerdir; bu bulgu, aerobik ve anaerobik öncesi dönemler arasındaki en belirgin farklılığın immün hücre dağılımı (LYM, %L) ve asit-baz dengesi (tCO₂) üzerinden ortaya çıktığını desteklemektedir. Ayrıca MPV, WBC ve MONO gibi hematolojik parametreler de grupları ayırmada katkı sağlamıştır. Daha düşük VIP skoruna sahip parametreler (ör. HCO₃⁻, PCO₂, Glukoz, PCT) ise gruplar arasında

daha sınırlı farklılık göstermiştir. Genel olarak VIP ve şekilsel anlamlılık grafikleri birlikte değerlendirildiğinde, aerobik öncesi ile anaerobik öncesi grupları ayırmada en güçlü belirleyicilerin immün sistem hücreleri ve asit-baz dengesi parametreleri olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. T2 ve T4 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği

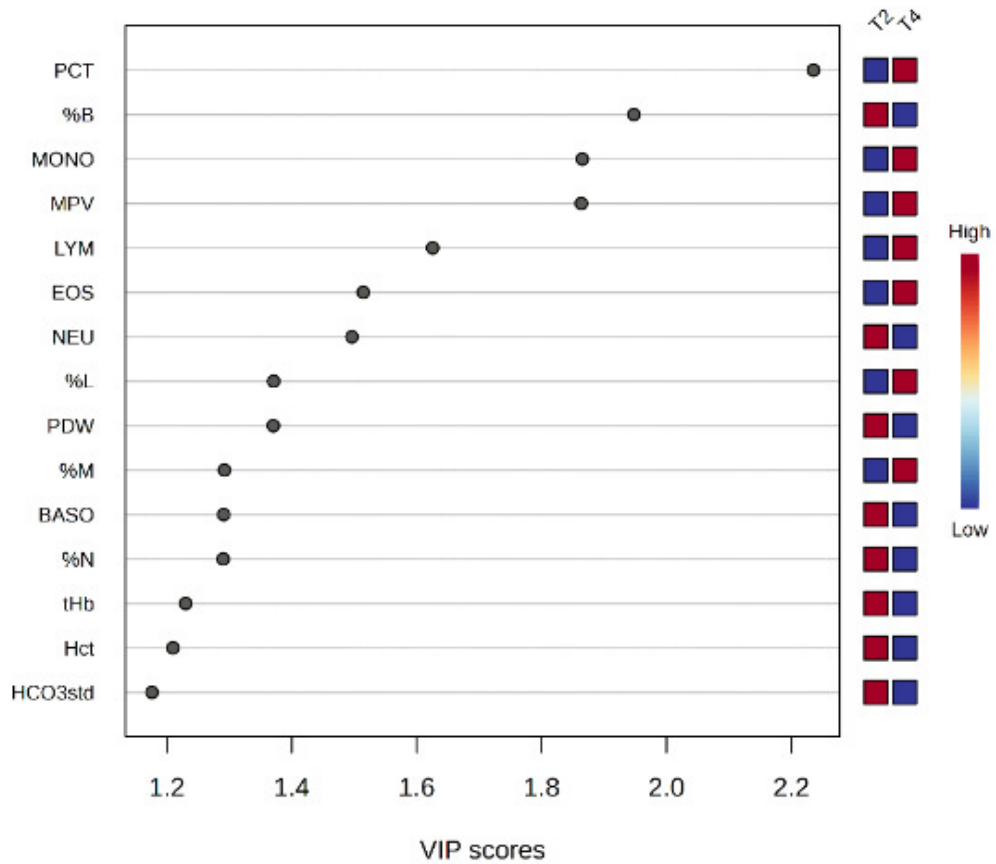
Dikey ekseninde $-\log_{10}(p)$ değeri yer almakta; değer yükseldikçe istatistiksel anlamlılık artar.

Renk skalası (sarı → turuncu → kırmızı) anlamlı parametreleri vurgulamaktadır.

Gri noktalar anlamsız ($p > 0,05$) değişiklikleri gösterirken, renkli noktalar anlamlı ($p < 0,05$) farklılıkları ifade eder.

Bu grafik, T2 (aerobik egzersiz sonrası) ile T4 (anaerobik egzersiz sonrası) grupları arasındaki farklılıkları göstermektedir. Renkli noktalar incelendiğinde, en belirgin değişimin PCT değerinde olduğu görülmektedir; T4 grubunda PCT düzeyleri T2'ye kıyasla anlamlı şekilde artmıştır. Bu durum, anaerobik egzersiz sonrası trombosit aktivasyonunun ve dolaşımdaki platelet kütlelerinin aerobik egzersize göre

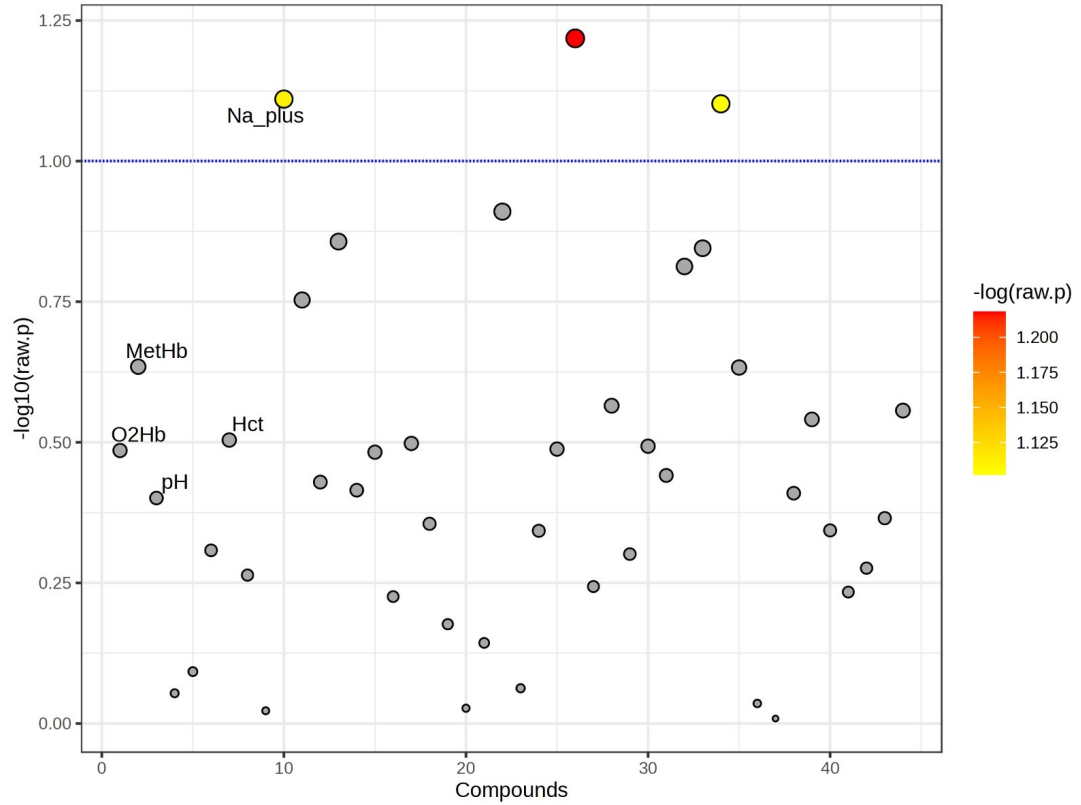
daha belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Ayrıca MPV, MONO ve %B parametrelerinde de T2'ye göre T4 grubunda anlamlı farklılıklar saptanmıştır; bu bulgular, yoğun anaerobik yüklenme sonrası platelet hacminde değişiklikler ile immün hücre yanıtında belirgin farklılıkların ortaya çıktığını göstermektedir. Diğer parametreler gruplar arasında anlamlı değişiklik göstermemiştir. Genel olarak sonuçlar, anaerobik egzersizin aerobik egzersize kıyasla özellikle trombosit aktivasyonu ve immün hücre mobilizasyonu üzerinden daha güçlü etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.9. T2 ve T4 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği

Bu VIP grafiği, T2 (aerobik egzersiz sonrası) ile T4 (anaerobik egzersiz sonrası) gruplarının ayrımında etkili olan parametreleri göstermektedir. En yüksek VIP skoruna sahip olan PCT ve %B, şekilsel anlamlılık grafiğinde de istatistiksel olarak anlamlı bulunan parametrelerdir; bu durum, iki grup arasındaki en belirgin farklılığın trombosit aktivasyonu ve bazofil oranı üzerinden ortaya çıktığını desteklemektedir. Bunu sırasıyla MONO, MPV, LYM ve EOS gibi immün yanıtı ve

platelet fonksiyonlarını yansıtan parametreler izlemektedir. Daha düşük VIP skorlarına sahip hematolojik parametreler (Hb, Hct, HCO_3^-) ise gruplar arasında sınırlı katkı sağlamıştır. Genel olarak VIP analizi ile şekilsel anlamlılık grafikleri birlikte değerlendirildiğinde, aerobik sonrası (T2) ile anaerobik sonrası (T4) gruplarının özellikle trombosit aktivasyonu ve immün hücre farklılıkları üzerinden güçlü biçimde ayrıştığı görülmektedir.



Şekil 4.10. T3 ve T4 Grupları Şekilsel Anlamlılık Grafiği

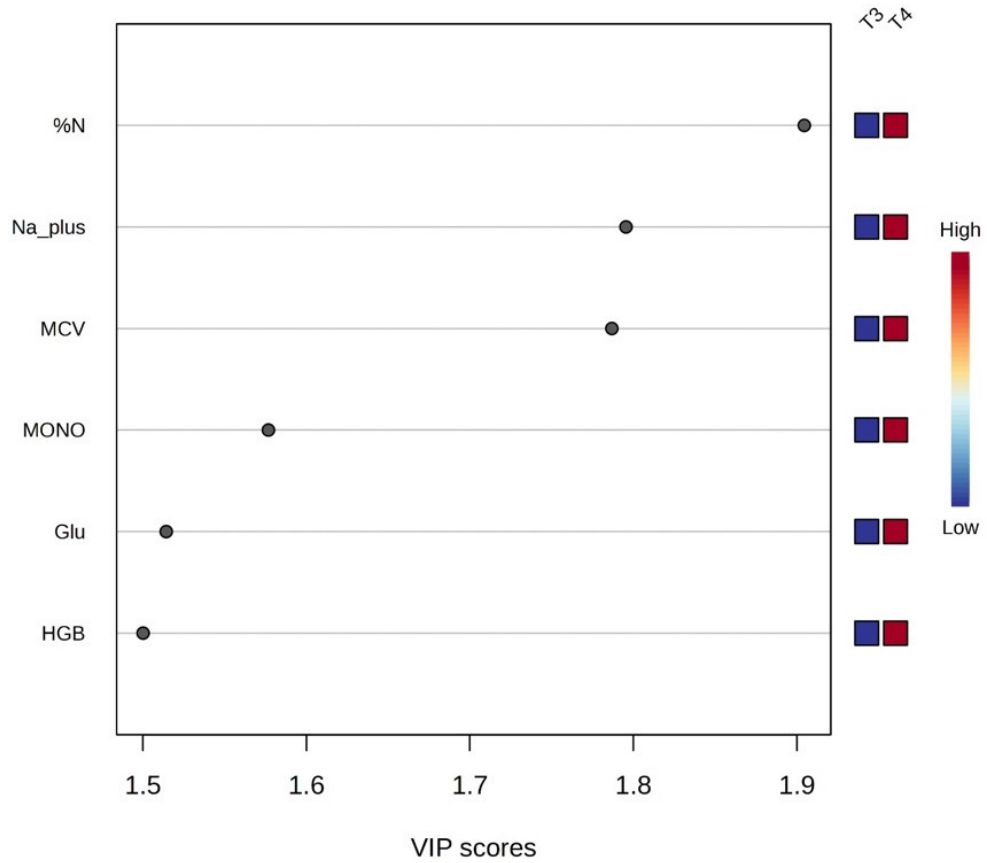
Dikey ekseninde $-\log_{10}(p)$ değeri yer almakta; değer yükseldikçe istatistiksel anlamlılık artar.

Renk skalası (sarı → turuncu → kırmızı) anlamlı parametreleri vurgulamaktadır.

Gri noktalar anlamsız ($p > 0.05$) değişiklikleri gösterirken, renkli noktalar anlamlı ($p < 0.05$) farklılıkları ifade eder.

Bu grafik, T3 (anaerobik egzersiz öncesi) ile T4 (anaerobik egzersiz sonrası) grupları arasındaki farklılıkları göstermektedir. Renkli noktalar incelendiğinde, en belirgin değişimin %N parametresinde olduğu görülmektedir; T4 grubunda nötrofil

yüzdesi T3'e kıyasla anlamlı şekilde artmıştır. Bu bulgu, yoğun anaerobik egzersiz sonrası bağışıklık sisteminin güçlü bir inflamatuvar yanıt verdiğini ve nötrofil mobilizasyonunun belirginleştiğini göstermektedir. Ayrıca Na^+ düzeylerinde de T3'e göre T4 grubunda anlamlı farklılık saptanmıştır; bu durum, anaerobik egzersiz sonrası sıvı-elektrolit dengesinde değişim meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Üçüncü olarak MCV değerlerinde T3 ve T4 grupları arasında anlamlı farklılık görülmüş, bu da eritrosit hacmindeki değişimlerin egzersizin hematolojik adaptasyonlarıyla ilişkili olduğunu göstermiştir. Diğer parametreler anlamlı farklılık göstermemiştir. Genel olarak sonuçlar, anaerobik egzersizin akut dönemde en belirgin etkisini nötrofil yüzdesi, Na^+ ve MCV değişimleri üzerinden gösterdiğini, buna karşılık diğer hematolojik ve metabolik parametrelerde sınırlı değişim yarattığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.11. T3 ve T4 Grupları VIP (Variable Importance in Projection) Grafiği

Bu VIP grafiği, T3 (anaerobik egzersiz öncesi) ile T4 (anaerobik egzersiz sonrası) gruplarını ayırmada etkili olan parametreleri göstermektedir. En yüksek VIP

skorlarına sahip %N, Na⁺ ve MCV, şekilsel anlamlılık grafiğinde de istatistiksel olarak anlamlı bulunan parametrelerdir; bu durum, iki grup arasındaki farklılığın özellikle nötrofil yüzdesi, elektrolit dengesi (Na⁺) ve eritrosit hacmi (MCV) üzerinden ortaya çıktığını desteklemektedir. Diğer parametreler (MONO, Glukoz, HGB) VIP değerleri açısından katkı sağlasa da şekilsel anlamlılık grafiğinde istatistiksel düzeyde öne çıkmamıştır. Genel olarak VIP ve anlamlılık grafikleri birlikte değerlendirildiğinde, anaerobik egzersiz öncesi ve sonrası grupları ayırmada en güçlü belirleyicilerin bağışıklık sistemi (%N), elektrolit dengesi (Na⁺) ve hematolojik yanıt (MCV) olduğu görülmektedir.

4.3. MPV (Ortalama Platelet Hacmi)

MPV değerlerinde egzersiz sonrası artış tespit edilmiştir. Büyük hacimli trombositlerin dolaşıma katılması, platelet aktivasyonunun arttığını göstermektedir. Bu da egzersizin hemostatik yanıtı güçlendirdiğini düşündürmektedir.

4.4. PCT (Plateletcrit)

PCT değerlerinde egzersiz sonrası artış gözlenmiştir. Bu, trombositlerin dolaşımda aktivasyonunun arttığını ve egzersizin pıhtılaşma sistemi üzerinde düzenleyici bir etki yaptığını göstermektedir.

4.5. HCT (Hematokrit, tekrar)

Hematokrit değerlerinde anlamlı artış bulunmuştur. Bu sonuç, hemoglobin ve diğer eritrosit parametreleri ile uyumludur ve hemokonsantrasyonun bir yansımasıdır.

4.6. %L (Lenfosit yüzdesi)

Lenfosit yüzdesinde egzersiz sonrası düşüş görülmüştür. Bu durum, nötrofillerdeki artış nedeniyle lenfositlerin oransal olarak azaldığını göstermektedir.

4.7. %N (Nötrofil yüzdesi)

Nötrofil yüzdesi egzersiz sonrası artmıştır. Bu, lökosit dağılımında nötrofillerin baskın hale geldiğini ve akut stres yanıtının güçlendiğini göstermektedir.

4.8. EOS (Eozinofil)

Eozinofil sayısında egzersiz sonrası azalma gözlenmiştir. Bu durum, egzersiz sırasında salınan stres hormonlarının (özellikle kortizol) eozinofil sayısını

baskılaması ile açıklanmaktadır.

4.9. NEU (Nötrofil)

Nötrofil değerlerinde anlamlı artış gözlenmiştir. Bu artış, egzersiz sonrası inflamatuvar yanıtın güçlü bir göstergesidir. Anaerobik egzersiz sonrası artış daha belirgin olup, kas hasarı ve metabolik stresle doğrudan ilişkilidir.

4.10. tHb (Total Hemoglobin)

Hemoglobin değerlerinde egzersiz sonrası artış gözlenmiştir. Bu artış, plazma hacmindeki azalma ile oluşan hemokonsantrasyona bağlıdır. Anaerobik egzersiz sonrası artışın daha belirgin olması, kısa süreli yüksek şiddetli yüklenmelerde oksijen taşıma kapasitesinin akut olarak arttığını göstermektedir.

4.11. LYM (Lenfosit)

Lenfosit sayısında egzersiz sonrası artış gözlenmiştir. Bu durum, immün sistemin egzersizle mobilize olduğunu göstermektedir. Ancak yüksek şiddetli anaerobik yüklenmelerde artışın daha sınırlı kaldığı dikkat çekmektedir.

4.12. WBC (Lökosit)

Lökosit sayısında anlamlı artış saptanmıştır. Bu artış, akut egzersizin immün sistemi uyardığını ve stres yanıtı oluşturduğunu göstermektedir. Anaerobik egzersiz sonrası artışın daha güçlü olması, inflamatuvar etkinin yoğunluğunu ortaya koymaktadır.

4.13. HCO_3^- (Bikarbonat)

Bikarbonat değerlerinde egzersiz sonrası düşüş gözlenmiştir. Özellikle anaerobik yüklenmelerde laktat artışı ile birlikte bikarbonat, asit-baz dengesini korumak için tüketilmekte ve bu da HCO_3^- seviyelerinin azalmasına neden olmaktadır.

4.14. cBase (Baz fazlası)

cBase değerlerinde egzersiz sonrası azalma görülmüştür. Bu bulgu, anaerobik egzersizde artan laktat ile gelişen metabolik asidozun bir göstergesidir. Bikarbonat tampon sistemi kullanıldıkça baz fazlası düşer.

4.15. iCO_2 (Karbondioksit, hesaplanan)

Egzersiz sonrası $i\text{CO}_2$ düzeylerinde artış saptanmıştır. Bu durum, artan metabolizma sonucu CO_2 üretiminin artması ve özellikle anaerobik egzersizde laktat tamponlanması sırasında bikarbonat kullanımına bağlı CO_2 açığa çıkması ile ilişkilidir.

4.16. Laktat

Aerobik egzersiz sonrası laktat düzeyi artmıştır; ancak anaerobik egzersiz sonrası çok daha keskin bir artış gözlenmiştir. Bu, oksijensiz enerji metabolizmasının yoğun kullanımını ve laktat birikimini yansıtır. Anaerobik yüklenmenin metabolik stres oluşturduğu açıkça görülmektedir.

4.17. Hct (Hematokrit)

Hematokrit değerlerinde hem aerobik hem de anaerobik egzersiz sonrası anlamlı yükselme tespit edilmiştir. Bu bulgu, yoğun fiziksel aktivite sırasında sıvı kaybına bağlı plazma hacmi azalmasının bir sonucudur. Anaerobik egzersiz sonrası yükselme daha fazladır.

5. TARTIŞMA

Egzersiz; kardiyometabolik riskin azaltılması, kardiyorespiratuvar uygunluğun artması, hematolojik/immün fonksiyonların düzenlenmesi ve psikososyal iyi oluşun desteklenmesi gibi çok boyutlu yararları nedeniyle genç yaş grupları da dâhil olmak üzere sağlığın korunması ve performansın geliştirilmesinde temel bir müdahaledir (Patel vd., 2017; Okon vd., 2025). Bununla birlikte egzersizin akut etkilerinin büyüklüğü ve yönü; egzersizin türü (aerobik/anaerobik), şiddeti, süresi ve bireyin antrenman/olgunlaşma düzeyi gibi etmenlere duyarlıdır; özellikle futbolda görülen aralıklı yüksek şiddet profili, metabolik ve hemato-immün yanıtları kısa zaman ölçeklerinde belirgin biçimde değiştirebilmektedir (Findikoglu vd., 2014; Sinzinger ve Virgolini, 1988; Osman vd., 2024).

Bu bağlamda çalışmamız, U-17/U-18 liginde yarışan erkek futbolcularda aerobik ve anaerobik tek seanslık yüklenmelerin hemen-sonra dönemindeki kan parametreleri üzerindeki etkilerini aynı örnekleme karşılaştırmalı olarak inceledi. Bulgularımız literatürle uyumlu biçimde, anaerobik seansın ardından laktat artışı ile pH/HCO₃⁻ düşüşünün aeroabiğe göre daha belirgin olduğunu; Hb/Hct'ta kısa süreli hemokonsantrasyon, WBC'de artış ve MPV/PDW/PCT gibi trombosit indekslerinde yükselme eğilimi ortaya çıktığını; buna karşılık CK/LDH gibi enzimlerde hemen-sonra penceresinde sınırlı değişim görüldüğünü (olası gecikmiş pik zamanı nedeniyle) göstermektedir (Findikoglu vd., 2014; Sinzinger ve Virgolini, 1988; Osman vd., 2024; Patel vd., 2017; Okon vd., 2025). Bu girişin devamında, benzer çalışmaların bulguları bizim sonuçlarımızla yan yana ele alınarak, futbol özelinde yüklenme reçetesi ve izleme-toparlanma stratejilerine yönelik pratik çıkarımlar tartışılacaktır (Osman vd., 2024).

Akut egzersizde gözlenen egzersiz lökositozu, başlıca katekolaminlerin β_2 -adrenerjik etkisiyle endotel adezyonunun azalması ve marjinal havuzlardan (özellikle akciğer ve dalak) nötrofil/lenfositlerin hızla dolaşıma demarjinasyonu sonucunda dakika ölçeğinde ortaya çıkar; bunu daha geç dönemde ($\approx 1-3$ saat ve sonrası) hipotalamo-hipofiz-adrenal eksen aktivasyonu ile kortizol aracılı nötrofili fazı izleyebilir (Sinzinger ve Virgolini, 1988; Baker vd., 2024). Bu yanıtın büyüklüğü egzersiz biçimi ve yoğunluğuna (iç yük ve dış yük) duyarlıdır; genç yetişkinlerde hem sürekli orta şiddetli (MICE) hem de yüksek şiddetli aralıklı (HIIE) aerobik protokoller WBC'yi artırabilirken, akut pencerede hemoreolojik göstergelerde (tam kan/plazma viskozitesi, RBC deformabilitesi) iki protokol arasında anlamlı fark gözlenmeyebilir (Findikoglu vd., 2014). Bizim “hemen-sonra” ölçümlerimizde anaerobik koşul altında WBC artışının daha belirgin olması; yüksek

yoğunluğun tetiklediği sempatik aktivasyon, olası dalak kontraksiyonu ve eşzamanlı hemokonsantrasyon ile tutarlı bir desene işaret etmektedir (Findikoglu vd., 2014; Baker vd., 2024). Ayrıca lökosit alt tiplerinin zamansal dinamiği (ör. “hemen-sonra” dönemde relatif lenfositöz, ilerleyen saatlerde nötrofili) ölçüm penceresine bağlı olarak farklı görünüm alabileceğinden, bulguların yorumunda zamanlama kritik önemdedir (Sinzinger ve Virgolini, 1988; Baker vd., 2024).

Trombosit sayısı ve indeksleri (özellikle MPV ve PDW) akut egzersize duyarlıdır; ancak literatürde MPV için hem artış hem azalış rapor edilmiştir ve bu farklılıklar çoğunlukla yüklenme tipi/şiddeti, örnekleme zamanı (hemen-sonra vs. geç dönem) ve antrenman düzeyi gibi bağlamsal etmenlere bağlanmaktadır (Kristiansen vd., 2023; Barale vd., 2023). Buna ek olarak sirkadiyen zamanlama da rol oynayabilir; bazı veriler akşam saatlerinde uygulanan HIIT protokollerinin trombosit aktivasyonuna ilişkin risk göstergelerini nispeten daha düşük seviyelerde bırakabildiğini öne sürmektedir (Zar vd., 2020). Bu çerçevede MPV/PDW'deki yön ve büyüklük, yalnızca egzersizin kendisiyle değil, zaman penceresi ve ölçüm bağlamı ile birlikte değerlendirilmelidir (Kristiansen vd., 2023; Barale vd., 2023).

Bizim genç sporcu örneklemimizde anaerobik seanstan hemen sonra gözlenen MPV/PDW artışı, trombosit aktivasyon belirteçlerinin (PF-4, β -tromboglobulin) akut yükselişi ve egzersize bağlı plazma hacmi azalması ile uyumlu, yüksek şiddetli yüklenmeye özgü bir yanıt paternini düşündürmektedir (Barale vd., 2023). Bulgular, trombosit indekslerinin yorumunda yüklenme şiddeti ve örnekleme zamanlamasının sistematik biçimde standartlaştırılması gerektiğini; ayrıca mümkünse ölçümlerin aynı günün aynı saat diliminde tekrarlanarak olası sirkadiyen etkilerin denetlenmesini önermektedir (Kristiansen vd., 2023; Zar vd., 2020).

RBC/Hb/Hct değişimleri akut egzersizde çoğunlukla plazma hacmindeki azalmayı (hemokonsantrasyon) yansıtır; terle kayıp, artan kapiller hidrostatik basınç ve sıvının intravasküler alandan interstisyel kompartımana geçişi bu kısa süreli hacim daralmasının başlıca bileşenleridir; toparlanmada rehidrasyon ve sıvının damar yatağına geri dağılımıyla kısmi normalizasyon beklenir (Schierbauer vd., 2021; Bjerre-Bastos vd., 2022). Bu süreçte gerçek eritrosit kütlesi değişmezken, Hb/Hct yükselişi arteriyel O₂ içeriğini geçici olarak korumaya hizmet eden bir “konsantrasyon etkisi” gibi görünür; ayrıca postür, örnekleme yöntemi (kapiller/venöz) ve ölçüm zamanlaması bu parametrelerin düzeyini etkileyebileceğinden, yorumda zaman penceresi ve pre-analitik koşullar kritik önemdedir (Schierbauer vd., 2021; Bjerre-Bastos vd., 2022). Çalışmamızda egzersiz

hemen-sonrasında görülen Hb/Hct artışı ve toparlanma evresinde kademeli geri dönüş, bu fizyolojik mekanizmayla tam uyum göstermektedir (Schierbauer vd., 2021; Bjerre-Bastos vd., 2022).

Benzer akut hemokonsantrasyon desenleri genç sporcularda yakın saha sporlarında da rapor edilmiştir; örneğin kickboks ve judoda seans sonrası Hb/Hct yükselişi ile birlikte trombosit yanıtlarında artışlar bildirilmiştir ve bu patern yüksek şiddetli, aralıklı eforların hemodinamik ve hematolojik etkilerine işaret eder (Azarbayjani vd., 2014; Heidari vd., 2016). Bizim bulgularımızdaki kısa süreli Hb/Hct artışı, olası dalak kontraksiyonu, sempatik aktivasyon ve plazma hacmi daralması ile tutarlı bir çerçeve sunarken; toparlanmadaki normalizasyon, sıvı dengesinin yeniden kurulmasıyla beklenen fizyolojik seyri göstermektedir (Azarbayjani vd., 2014; Heidari vd., 2016).

Anaerobik yüklenme sırasında hızlanan glikoliz ve ATP hidrolizi ile H^+ üretimi artar; laktat- H^+ birlikte MCT taşıyıcıları üzerinden hücre dışına taşınırken, bikarbonat tampon sistemi H^+ ’ları bağlayıp CO_2 üretimini artırır ve bu durum ventilatuvar yanıtı güçlendirir. Dışsal tamponlama stratejileri (ör. $NaHCO_3$), ekstrasellüler $[HCO_3^-]$ ’u yükselterek H^+ dışa atılımı için itici gücü artırır; böylece intramüsküler asidoz gecikir, tekrar sprint gibi yüksek şiddetli eforlarda iş çıkışı ve süreklilik iyileşebilir (Hadzic vd., 2019; Grgic vd., 2021; Gurton vd., 2024). Bu mekanizma aynı zamanda kandaki laktat görünüm hızını artırabileceğinden, ergogenik koşullarda egzersiz sonrası daha yüksek laktat konsantrasyonları ile de sonuçlanabilir (Dixon vd., 2017).

Çalışmamızda anaerobik seans sonrasında gözlenen pH/HCO_3^- düşüşü ve laktat artışının aerobik seansa kıyasla daha belirgin oluşu, yukarıda özetlenen tampon-ventilasyon-laktat taşıması eksenli fizyolojik modelle tutarlıdır. Futbola özgü tekrar sprint uygulamalarında $NaHCO_3$ desteğiyle performans iyileşmesi ve eşzamanlı laktat çıkışında artış bildirilmiş olması, bulgularımızdaki kan laktatı yükselişi için ek bir açıklayıcı çerçeve sunmaktadır (Hadzic vd., 2019; Grgic vd., 2021; Gurton vd., 2024; Dixon vd., 2017).

Genç sağlıklı bireylerde kısa süreli orta şiddetli aerobik protokoller, akut pencerede CK/LDH gibi kardiyometabolik enzimlerde belirgin değişim oluşturmayabilir; buna karşın hematolojik göstergelerde (ör. hemokonsantrasyonun azalması, dolaşım parametrelerinde toparlanma) iyileşme gözlenebilir (Okon vd., 2025). Bu desen, orta şiddetin mekanik gerilme ve eksantrik yükü sınırlaması,

membran geçirgenliğinde akut bozulmayı tetiklememesi ve oksidatif taleplerin tamponlanabilir düzeyde kalmasıyla uyumludur (Okon vd., 2025).

Buna karşılık yüksek şiddetli aralıklı yüklenmeler, mekanik zorlanma ve metabolik stres nedeniyle CK/LDH için gecikmiş pik (genellikle egzersiz sonrası saatler içinde) ve oksidatif stres belirteçlerinde yükselme üretebilir; bu nedenle örnekleme zamanlaması sonuç yorumunda kritiktir (Okon vd., 2025). Bizim çalışmamızda egzersiz hemen-sonra yapılan ölçümlerde CK/LDH'deki sınırlı değişim, bu gecikmeli kinetik ile uyumlu görünmekte; daha geç zaman noktalarının eklenmesi, enzimatik yanıtın büyüklüğünü ve süresini daha doğru yakalamaya yardımcı olacaktır (Okon vd., 2025).

Adölesan dönemde eritropoez ve demir metabolizması büyüme atakları, antrenman yükü ve enerji/ besin ögesi gereksinimlerindeki artış nedeniyle hızla değişen, dalgalı bir seyir gösterir. Bu dönemde hemogloblin kütlesindeki artış, artan plazma hacmiyle birlikte ölçümlerin yorumunu güçleştirir; ek olarak egzersize bağlı mekanik hemoliz ve inflamatuvar uyaranlar da kısa süreli oynaklıklara yol açabilir. Yakın tarihli bir gözlemsel çalışmada, adölesan kadın sporcularda aerobik branşların hematolojik ve demir göstergeleri üzerinde daha olumsuz etkiler oluşturabildiği bildirilmiş, bu grubun izlem ve destek gereksiniminin daha hassas planlanması gerektiği vurgulanmıştır (Osman vd., 2024).

Erkek futbolcularda ise akut egzersiz sonrası hemokonsantrasyon, Hb/Hct başta olmak üzere demirle ilişkili göstergeleri geçici olarak etkileyebilir; bu nedenle akut ölçümlerin plazma hacmi değişimleri ile düzeltilmesi ve örneklemelerin benzer pre-analitik koşullarda alınması önem taşır. Sezon boyunca periyodik demir taraması (tam kan sayımı, ferritin, transferrin satürasyonu vb.) ile birlikte beslenme ve enerji uygunluğu değerlendirmelerinin yapılması, hem performansın korunması hem de yanlış pozitif/negatif yorumların önlenmesi açısından önerilir; kız sporcular için menstrüel durumun ve demir gereksiniminin ayrıca dikkate alınması uygundur (Osman vd., 2024).

Kickboks ve judo gibi yüksek şiddetli aralıklı sporlarda tek seans sonrası PLT ve WBC artışı, RBC/Hct'ta ise toparlanmaya doğru normalizasyon rapor edilmiştir (Azarbayjani vd., 2014; Heidari vd., 2016). Futbol özelinde, intermitan doğa ve sık hızlanma-yavaşlamalar hem mekanik hem de metabolik stres yoluyla bu yanıtları güçlendirebilir. Bizim katılımcılarımızda anaerobik seanstan sonra görülen daha büyük hematolojik dalgalanma, bu branş-özü yüklenimle uyumludur (Azarbayjani

vd., 2014; Heidari vd., 2016).

Antrenman planlaması: 1) Aynı gün içinde birden fazla yüksek şiddetli seans, geçici trombosit/lökosit aktivasyonunu ve hemokonsantrasyonu artırabilir; toparlanma pencereleri 24–48 saat korunmalıdır (Sinzinger ve Virgolini, 1988; Barale vd., 2023). 2) Hidrasyon: Egzersiz öncesi-sırası yeterli sıvı/elektrolit, plazma hacmi düşüşünü ve buna bağlı yalancı Hb/Hct yükselişini sınırlayabilir (Schierbauer vd., 2021; Bjerre-Bastos vd., 2022). 3) Numune zamanı: CK/LDH ve bazı inflamasyon belirteçleri için gecikmiş pik dikkate alınmalıdır (Okon vd., 2025). 4) Genç sporcularda tarama: Mevsim başında tam kan sayımı ve demir durumu değerlendirmesi, özellikle yüksek antrenman hacmi dönemlerinde yararlıdır (Osman vd., 2024).

Çalışmamız akut yanıtları ele aldığı için, enzimatik ve bazı immünolojik değişimlerin geç zirvelerini yakalamak amacıyla 24–48 saatlik ek örneklemeler gelecekte değerlendirilebilir. Ayrıca hidrasyon/enerji alımı ve sirkadiyen zamanlamanın (sabah-akşam) trombosit indeksleri ve lökosit dağılımı üzerindeki etkilerini daha kontrollü tasarımlarla sınamak yararlı olacaktır (Zar vd., 2020).

6. SONUÇLAR

Bu araştırmada U-17 ve U-18 liglerinde aktif olarak yarışan futbolcularda, iki farklı egzersiz tipinin (aerobik ve anaerobik) akut etkileri karşılaştırılmalı ve aynı örneklem üzerinde değerlendirildi. Ölçümler her seans için egzersiz öncesi ve hemen sonrası alındı; seanslar arasında ~15 günlük toparlanma aralığı korundu. Tüm veriler kalite kontrolünden geçirilmiş, eksik/kayıp gözlem bulunmamıştır. Başlangıç düzeyleri (seans-öncesi ölçümler) klinik-açısından benzer bir dağılım sergilemiş; ayrıntılar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Asit-baz dengesi ve laktat: Aerobik yüklenme sonrası kanda laktat artışı ve buna eşlik eden $\text{HCO}_3^-/\text{tCO}_2$ ’de azalma gözlemlendi; pH’da düşüş yönünde küçük bir değişim izlendi. Anaerobik yüklenme sonrası bu desen daha belirgin hâle geldi: laktat artışı daha yüksek, $\text{HCO}_3^-/\text{cBase}$ ’de düşüş daha derindi ve ventilatuvar kompanzasyona rağmen pH’da küçüğe-orta büyüklüğe karşılık gelen bir azalma dikkati çekti (Şekil 1–2, Tablo 2). Toparlanma penceresi kısa tutulduğundan, ölçümler egzersize hemen-sonra dönemi yansıtmakta, geç (1–24. saat) faza ilişkin sonuç içermemektedir.

Hematolojik yanıtlar ve trombosit indeksleri: Her iki seansta da egzersiz sonrasında Hb/Hct’ta kısa süreli hemokonsantrasyon örüntüsü izlendi; büyüklük anaerobik oturumda daha fazlaydı. Toplam lökosit sayısı (WBC) egzersiz sonrası yükselirken, alt dağılımlarda lenfosit oranında artış, nötrofil yüzdesinde görece azalma paternleri görüldü; bu zamansal kaymanın büyüklüğü anaerobik seansta daha belirgindi (Tablo 3). Trombosit sayısı (PLT) büyük ölçüde stabil seyrederken, MPV/PDW/PCT başta olmak üzere trombosit indekslerinde egzersiz sonrası artış eğilimi saptandı; bu artışın şiddeti anaerobik seansta daha yüksekti (Şekil 3).

Biyokimyasal enzimler, bilirubin ve elektrolitler: CK/LDH/AST-ALT değerleri egzersiz hemen sonrası dönemde belirgin bir yükseliş göstermedi veya sınırlı kaldı; bu durum, söz konusu enzimlerin bilinen gecikmiş pik zamanlamasıyla uyumludur. Total bilirubin değerlerinde anaerobik seans ertesinde hafif artış eğilimi izlenirken, $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{Ca}^{2+}$ başta olmak üzere elektrolitlerde küçük ve geçici dalgalanmalar gözlemlendi; K^+ için egzersiz esnası/sonrası dönemde kısa süreli yükselme eğilimi öne çıktı (Tablo 4). Tüm bulgular, aerobik ve anaerobik oturumların ayrı biyokimyasal imzalar ürettiğini ve akut dönemde özellikle asit-baz ile hematolojik/trombosit parametrelerinin ayırıcı duyarlılığa sahip olduğunu göstermektedir.

7. ÖNERİLER

Elinizdeki bulguların ortaya koyduğu ayrışan akut yanıt profilleri (anaerobikte laktat↑, pH/HCO₃⁻↓; Hb/Hct↑; WBC ve MPV/PDW/PCT↑) temel alınarak, bu çizgide ilerleyecek çalışmaların genelleme gücünü ve mekanistik derinliğini artırmak üzere randomize çapraz (counterbalanced) tasarımlar tercih edilebilir. Pre-analitik koşulların (son 24 saatte egzersiz/kafein/uyku/hidrasyon, öğün içeriği, vücut pozisyonu, kan alma saati ve antikoagülan) standart protokollerle yönetilmesi; hemoliz indeksinin sistematik kaydı, “hemen-sonra” ölçüme ek olarak +30 dk, 1., 3., 24. ve 48. saat örneklemeleriyle gecikmiş pik dinamiklerinin izlenmesi; plazma hacmi dalgalanmaları için Hb/Hct temelli düzeltmelerin uygulanması önerilir.

Biyobelirteç panelini, asit-baz ve laktata ek olarak tam kan sayımı (CBC+diferansiyel), trombosit indeksleri (MPV, PDW, PCT), oksidatif stres/antioksidan (TOS, TAC, bilirubin), inflamasyon (IL-6, TNF-α), endotelial işlev (NOx), hormonal (kortizol, testosteron) ve kas hasarı (myoglobin, CK izoenzimleri) ile genişletmenizi öneririz.

KAYNAKLAR

- Abdulkareem Tahhan, A. M. A., Özdal, M., Vural, M., & Mayda, M. H. (2018). Acute effects of aerobic and anaerobic exercises on circulation parameters. *European Journal of Physical Education and Sport Science*.
- Asadi, S., Tartibian, B., Moni, M. A., & Eslami, R. (2024). Prediction of white blood cell count during exercise: A comparison between standalone and hybrid intelligent algorithms. *Scientific Reports*, 14, 20683.
- Atan, T., & Alacam, H. (2015). The effects of acute aerobic and anaerobic exercise on blood parameters. *The Anthropologist*, 19(1), 87–93.
- Azarbayjani, M. A., Fathi, R., Dalooi, A. A., Abdi, A., & Fatollahi, H. (2014). Acute hematological profile response to one session of aerobic and anaerobic exercise among young male kickboxers. *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 60(2), 92–97.
- Baker, F. L., Smith, K. A., Mylabathula, P. L., Zúñiga, T. M., Diak, D. M., Batatinha, H., ... & Simpson, R. J. (2024). Exercise-induced β 2-adrenergic receptor activation enhances the antileukemic activity of expanded $\gamma\delta$ T-cells via DNAM-1 upregulation and PVR/Nectin-2 recognition. *Cancer Research Communications*, 4(5), 1253–1267.
- Bangsbo, J. (2014). *Fitness training in soccer*. Bangsbosport.
- Barale, C., Melchionda, E., Tempesta, G., Morotti, A., & Russo, I. (2023). Impact of physical exercise on platelets: Focus on its effects in metabolic chronic diseases. *Antioxidants*, 12(8), 1609.
- Bjerre-Bastos, J. J., Sejersen, C., Bihlet, A. R., Secher, N. H., Mackey, A. L., Kitchen, C. C., ... & Nielsen, H. B. (2022). An estimate of plasma volume changes following moderate-high intensity running and cycling exercise and adrenaline infusion. *Frontiers in Physiology*, 13, 948087.
- Bradley, S. J., Kingwell, B. A., & McConell, G. K. (1999). Nitric oxide synthase inhibition reduces leg glucose uptake but not blood flow during dynamic exercise in humans. *Diabetes*, 48, 1815–1821.
- Caplin, A., Chen, F. S., Beauchamp, M. R., & Puterman, E. (2021). The effects of exercise intensity on the cortisol response to a subsequent acute psychosocial stressor. *Psychoneuroendocrinology*, 131, 105336.
- Chamari, K., & Padulo, J. (2015). Aerobic and anaerobic terms in exercise physiology: A critical review. *Sports Medicine - Open*, 1(2), 1–7.
- Chen, Z. P., Stephens, T. J., Murthy, S., Canny, B. J., Hargreaves, M., Witters, L. A., ... & McConell, G. K. (2000). AMPK signaling in contracting human skeletal muscle: ACC and NOS phosphorylation. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 279, E1202–1206.
- Ciekot-Sołtysiak, M., Kusy, K., Podgórski, T., Pospieszna, B., & Zieliński, J. (2024). Changes in red blood cell parameters during incremental exercise in highly trained athletes of different sport specializations. *PeerJ*, 12, e17040.

- Coats, E. M., & Hawn, J. A. (2023). Physiology, exercise. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.
- Daly, W., Seegers, C., Timmerman, S., & Hackney, A. C. (2004). Peak cortisol response to exhausting exercise: Effect of blood sampling schedule. *Medicina Sportiva*, 8(1), 17–20.
- Derave, W., Hansen, B. F., Lund, S., Kristiansen, S., & Richter, E. A. (1999). Contraction-stimulated muscle glucose transport and GLUT4 surface content are dependent on glycogen content. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 277, E1103–1110.
- Dixon, H., Baker, C. E., Baker, J. S., Dewhurst, S., & Hayes, L. D. (2017). Sodium bicarbonate ingestion improves Yo-Yo intermittent recovery test 1 performance: A randomized crossover trial. *Nutrition and Dietary Supplements*, 9, 23–27.
- El-Sayed, M. S. (1996). Effects of exercise and training on blood coagulation, fibrinolysis and platelet aggregation. *Sports Medicine*, 22, 282–298.
- Ferreira-Junior, M., & Vianna, L. C. (2021). "Time-varying" sympathetic nervous system responses to exercise: New perspectives from time-frequency analysis of sympathetic neural discharge. *Autonomic Neuroscience*, 235, 102863. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2021.102863>
- Ferretti, G., Fagoni, N., & Moia, C. (2022). Editorial: Autonomic nervous system and exercise. *Frontiers in Physiology*, 13, 1084334. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1084334>
- Ferretti, G., Fagoni, N., Taboni, A., Vinetti, G., & di Prampero, P. E. (2022). A century of exercise physiology: Linking oxygen flow to muscle energy demand. *European Journal of Applied Physiology*, 122(6), 1317–1365.
- Findikoglu, G., Kilic-Toprak, E., Kilic-Erkek, O., Senol, H., & Bor-Kucukatay, M. (2014). Acute effects of continuous and intermittent aerobic exercises on hemorheological parameters: A pilot study. *Biorheology*, 51(4-5), 293–303. <https://doi.org/10.3233/BIR-140636>
- Flack, K. D., Vitek, L., Fry, C. S., Stec, D. E., & Hinds, T. D. (2023). Cutting edge concepts: Does bilirubin enhance exercise performance? *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, 1040687.
- Forster, H. V. (2017). Neural control of breathing during exercise: A personal perspective. *The Journal of Physiology*, 595(14), 4647–4660. <https://doi.org/10.1113/JP273418>
- Grau, M., & Urdiales, D. (2024). Clinical significance of red blood cell indices in athletes: Implications for performance and health. *Journal of Clinical Medicine*, 13(1), 151.
- Gurton, W. H., Gough, L. A., Siegler, J. C., Lynn, A., & Ranchordas, M. K. (2024). Oral but not topical sodium bicarbonate improves repeated sprint performance during simulated soccer match play exercise in collegiate athletes.

International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 34(6), 362–371.

- Hackney, A. C. (2020). Stress and the neuroendocrine system: The role of exercise as a stressor and modifier of stress. *Expert Review of Endocrinology & Metabolism*, 15(5), 341–351.
- Hadzic, M., Eckstein, M. L., & Schugardt, M. (2019). The impact of sodium bicarbonate on performance in response to exercise duration in athletes: A systematic review. *Journal of Sports Science & Medicine*, 18(2), 271.
- Hayashi, T., Hirshman, M. F., Kurth, E. J., Winder, W. W., & Goodyear, L. J. (1998). Evidence for AMPK mediation of the effect of muscle contraction on glucose transport. *Diabetes*, 47, 1369–1373.
- Hayes, L. D., & Elliott-Sale, K. J. (2020). Testosterone and resistance exercise: The role of androgen receptors and anabolic signaling. *Frontiers in Physiology*, 11, 621226.
- Heber, S., & Volf, I. (2015). Effects of physical (in)activity on platelet function. *BioMed Research International*, 2015, 165078.
- Heidari, N., Dortaj, E., Karimi, M., Karami, S., & Kordi, N. (2016). The effects of acute high intensity interval exercise of judo on blood rheology factors. *Turkish Journal of Kinesiology*, 2(1), 6–10.
- Heinicke, K., Wolfarth, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., ... & Schmidt, W. (2001). Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *International Journal of Sports Medicine*, 22, 504–512.
- Holloszy, J. O. (2011). Regulation of mitochondrial biogenesis and GLUT4 expression by exercise. *Comprehensive Physiology*, 1(2), 921–940.
- Jia, M., Wang, Z., & Hu, F. (2024). Causal relationship between physical activity and platelet traits: A Mendelian randomization study. *Frontiers in Physiology*, 15, 1371638.
- Kapus, J., Ušaj, A., Kapus, V., & Štrumbelj, B. (2009). The difference in respiratory and blood gas values during recovery after exercise with spontaneous versus reduced breathing frequency. *Journal of Sports Science and Medicine*, 8, 452–457.
- Kocahan, S., Dündar, A., & Yılmaz, Y. (2021). The effect of aerobic and anaerobic exercise on biochemical parameters in adolescent male athletes. *Adıyaman Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 7(1), 14–19.
- Kraemer, W. J., Marchitelli, L., Gordon, S. E., Harman, E., Dziados, J. E., Mello, R., ... & Fleck, S. J. (1990). Hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise protocols. *Journal of Applied Physiology*, 69, 1442–1450.
- Kumari, A., Dalal, D., Kumar, R., Saha, P., & Dahiya, K. (2018). Effect of exercise in biochemical parameters in athletes. *International Journal of Research and*

Review, 5(3), 101–105.

- Levine, B. D. (2008). VO_2max : What do we know, and what do we still need to know? *The Journal of Physiology*, 586(1), 25–34.
- Mairbäurl, H. (2013). Red blood cells in sports: Effects of exercise and training on oxygen supply by red blood cells. *Frontiers in Physiology*, 4, 332.
- Matthews, M. J., Kanungo, S., Baker, R. J., & Kenter, K. (2024). Exercise physiology: A review of established concepts and current questions. *Physiologia*, 4(2), 202–212.
- McCarthy, D. A., & Dale, M. M. (1988). The leukocytosis of exercise: A review and model. *Sports Medicine*, 6, 333–363.
- Niazi, S., Ahsan, N., Tariq, E., Jahan, S., Zafar, S., Yousufzai, I., & Mahmood, A. (2025). Acute exercise-induced changes in hematological parameters among healthy young males: A cross-sectional analysis. *Journal of Saidu Medical College*, 15(3), 300–307.
- Okon, I. A., Beshel, J. A., Owu, D. U., Orie, N. N., Jim, A. E., & Edet, L. I. (2025). Moderate aerobic exercise improves haematological indices without altering cardio-metabolic enzyme activities in sedentary healthy young adults. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 17, 32.
- Osman, D. A., Elassal, M. I., Hamada, H. A., Hamza, R. H. S., Zakaria, H. M., Alwhaibi, R., & Abdelsamea, G. A. (2024). Hematological and iron status in aerobic vs. anaerobic female athletes: An observational study. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6, 1453254.
- Ozkol, M. Z., Turgay, F., Varol, S. R., Ozcaldiran, B., Vural, F., Aksit, T., & Nalcakan, G. R. (2012). The effects of chronic aerobic and anaerobic exercise on blood nitric oxide levels. *Turkiye Klinikleri Journal of Medical Sciences*, 32(6), 1607–1617.
- Patel, H., Alkhawam, H., Madanieh, R., Shah, N., Kosmas, C. E., & Vittorio, T. J. (2017). Aerobic vs anaerobic exercise training effects on the cardiovascular system. *World Journal of Cardiology*, 9(2), 134–138.
- Peake, J., Neubauer, O., Della Gatta, P., & Nosaka, K. (2016). Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(3), 559–570.
- Powers, S. K., Dodd, S., Freeman, J., Ayers, G. D., Samson, H., & McKnight, T. (1989). Accuracy of pulse oximetry to estimate HbO_2 fraction during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 67, 300–304.
- Raastad, T., Bjøro, T., & Hallén, J. (2000). Hormonal responses to high- and moderate-intensity strength exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 82, 121–128.
- Ramsook, A. H., Dominelli, P. B., Angus, S. A., Senefeld, J. W., Wiggins, C. C., & Joyner, M. J. (2023). The oxygen transport cascade and exercise: Lessons

- from comparative physiology. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 282, 111442.
- Richter, E. A., Derave, W., & Wojtaszewski, J. F. P. (2001). Glucose, exercise and insulin: Emerging concepts. *The Journal of Physiology*, 535(2), 313–322.
- Sharp, R. L., Williams, D. J., & Bevan, L. (1991). Effects of controlled frequency breathing during exercise on blood gases and acid–base balance. *International Journal of Sports Medicine*, 12, 62–65.
- Shephard, R. J. (2016). Responses of the human spleen to exercise. *Journal of Sports Sciences*, 34(10), 929–936.
- Shepherd, J. R. A., Dominelli, P. B., Roy, T. K., Secomb, T. W., & Foster, G. E. (2019). Modelling the relationships between haemoglobin oxygen affinity and the oxygen cascade in humans. *The Journal of Physiology*, 597(16), 4193–4202.
- Silva, F. M., Duarte-Mendes, P., Teixeira, A. M., Soares, C. M., & Ferreira, J. P. (2024). The effects of combined exercise training on glucose metabolism and inflammatory markers in sedentary adults: A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 14, 1936.
- Sinzinger, H., & Virgolini, I. (1988). Effects of exercise on parameters of blood coagulation, platelet function and the prostaglandin system. *Sports Medicine*, 6(4), 238–245.
- Smith, J. A. (1995). Exercise, training and red blood cell turnover. *Sports Medicine*, 19(1), 9–31.
- Stølen, T., Chamari, K., Castagna, C., & Wisløff, U. (2005). Physiology of soccer: An update. *Sports Medicine*, 35(6), 501–536.
- Suzuki, K., & Hayashida, H. (2021). Effect of exercise intensity on cell-mediated immunity. *Sports*, 9(1), 8.
- Vingren, J. L., Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., Anderson, J. M., Volek, J. S., & Maresh, C. M. (2010). Testosterone physiology in resistance exercise and training: The up-stream regulatory elements. *Sports Medicine*, 40(12), 1037–1053.
- Wojtaszewski, J. F. P., Nielsen, P., Hansen, B. F., Richter, E. A., & Kiens, B. (2000). Muscle glycogen content regulates insulin-stimulated glucose transport and protein kinase B activity. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 279, E947–955.
- Yamamoto, Y., Mutoh, Y., Kobayashi, H., & Miyashita, M. (1987). Effects of reduced frequency breathing on arterial hypoxemia during exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 56, 522–527.
- Yıldırım, Z., & Çilingir, E. (2019). Effect of aerobic exercise on some blood parameters on sedentary individuals. *International Journal of Sport Culture and Science*, 7(2), 69–76.

Yu, L. (2025). Focus on exercise physiology and sports performance. *Life*, 15(1), 84.