

Yüksek İrtifa Antrenmanlarının Sporcu Performansına Katkıları: “Yaşa-Yüksekte, Antrenman Yap-Alçakta (Lhtl)” Modelinin Analizi

Contributions Of High-Altitude Training To Athlete Performance: Analysis Of The “Live-High, Train-Low (Lhtl)” Model

Şahin Yakışan

*Correspondence:

Şahin Yakışan
sahanyakisan@hotmail.com
0000-0001-7019-4857

¹Atatürk Üniversitesi, Kış Sporları
ve Spor Bilimleri Enstitüsü



<https://doi.org/10.5281/zenodo.21251211>

Received / Gönderim: 02.04.2026

Accepted / Kabul: 12.06.2026

Published / Yayın: 23.06.2026

Volume 3, Issue 2, June, 2026

Cilt 3, Sayı 2, Haziran, 2026

How to Cite This Article

APA 7
Yakışan, Ş. (2026). Yüksek İrtifa
Antrenmanlarının Sporcu
Performansına Katkıları:
“Yaşa-Yüksekte, Antrenman
Yap-Alçakta (Lhtl)” Modelinin Analizi.
*International Journal of Health,
Exercise, and Sport Sciences (IJOSS)*,
3(2), 738–747.
<https://www.ijoss.org/Archive/v3-i2/ijoss-Volume3-issue2-23.pdf>

Vancouver

Yakışan Ş. Yüksek İrtifa
Antrenmanlarının Sporcu
Performansına Katkıları:
“Yaşa-Yüksekte, Antrenman
Yap-Alçakta (Lhtl)” Modelinin Analizi.
Int J Health Exerc Sport Sci (IJOSS).
2026;3(2):738–747. Available from:
<https://www.ijoss.org/Archive/v3-i2/ijoss-Volume3-issue2-23.pdf>

Öz

Yüksek irtifa ve/veya hipoksik antrenman, dayanıklılık başta olmak üzere çeşitli spor branşlarında performansı artırmak amacıyla sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. “Yaşa-Yüksekte, Antrenman Yap-Alçakta” (Live High-Train Low; LHTL) modeli, sporcuların gece/gündüz önemli bir kısmını orta irtifada (genellikle 1.800–2.500 m) geçirirken yüksek şiddetli antrenmanlarını deniz seviyesine yakın koşullarda sürdürmesini içerir (Levine & Stray-Gundersen, 1997; 2001). Bu derleme; LHTL’nin fizyolojik temellerini, uygulama parametrelerini (irtifa, maruziyet süresi ve dozu), performans çıktıları üzerindeki etkilerini, farklı spor branşlarına yansımalarını, yan etkilerini ve etik/tüzel boyutunu güncel kanıtlarla özetlemeyi amaçlamaktadır (Chapman, 2009; Millet et al., 2010; McLean et al., 2014; Hauser et al., 2023). Toplam hemoglobin kütlelerinde artış, eritropoietin yanıtı ve oksijen taşıma kapasitesindeki gelişmeler LHTL’nin başlıca mekanizmalarıdır (Ainslie et al., 2022). Son yıllardaki meta-analizler, LHTL ve diğer hipoksik paradigmalarda hemoglobin (ve hemoglobin kütleleri) üzerinde anlamlı artış sağlayabildiğini; VO₂maks üzerindeki etkinin ise bağlamsal ve heterojen olduğunu; buna karşın deneme/performans testlerinde küçük-orta büyüklükte gelişmelerin daha tutarlı görüldüğünü bildirmektedir (Park et al., 2023; Saugy et al., 2014).

Anahtar Kelimeler: Hipoksi, irtifa antrenmanı, LHTL, Hemoglobin kütlesi, Eritropoietin, VO₂maks, Dayanıklılık performansı.

Abstract

High-altitude and/or hypoxic training is a widely used method to improve performance, particularly in endurance sports. The “Live High-Train Low” (LHTL) model involves athletes spending a significant portion of their day and night at moderate altitude (usually 1,800–2,500 m), while maintaining high-intensity training sessions at or near sea level (Levine & Stray-Gundersen, 1997; 2001). This review aims to summarize the physiological basis of LHTL, application parameters (altitude, exposure duration and dose), effects on performance outcomes, implications across different sports disciplines, side effects, and ethical/legal considerations, based on current evidence (Chapman, 2009; Millet et al., 2010; McLean et al., 2014; Hauser et al., 2023). Increases in total hemoglobin mass, erythropoietin response, and improvements in oxygen transport capacity are the primary mechanisms of LHTL (Ainslie et al., 2022). Recent meta-analyses indicate that LHTL and other hypoxic paradigms can significantly increase hemoglobin mass, while effects on VO₂max are more context-dependent and heterogeneous; however, small-to-moderate improvements in trial/performance outcomes appear more consistent (Park et al., 2023; Saugy et al., 2014).

Keywords: Hypoxia, Altitude training, LHTL, Hemoglobin mass, Erythropoietin, VO₂max, Endurance performance

<https://www.ijoss.org/Archive/v3-i2/ijoss-Volume3-issue2-23.pdf>

GİRİŞ

Dayanıklılık performansını belirleyen temel sınırlayıcılardan biri, oksijenin akciğerlerden kas dokusuna taşınması ve burada oksidatif fosforilasyon için etkin biçimde kullanılabilmesidir (Wilber, 2007). Bu zincirin herhangi bir halkasındaki iyileşme—örneğin hemoglobin kütlelerinde artış, kardiyak debide yükselme, kılcak yoğunlukta artış veya mitokondriyal enzim aktivitesinde gelişme—yarış performansında ölçülebilir faydalar yaratabilir (Millet et al., 2010). Yüksek irtifa/hipoksik antrenman yaklaşımları, bu fizyolojik hedefleri sistematik bir hipoksik uyararla tetiklemeyi amaçlar ve özellikle dayanıklılık sporlarında onlarca yıldır uygulanmaktadır (Wilber, 2007).

1968 Mexico City Olimpiyatları, irtifanın performansa etkisini küresel ölçekte görünür kılan ilk “doğal deney” olmuş; kısa süreli, anaerobik branşlarda dünya rekorlarına yaklaşan sonuçlar görülürken, uzun süreli dayanıklılık yarışlarında performans düşüşleri rapor edilmiştir (Wilber, 2007). Bu gözlemler, hipoksinin enerji sistemlerine etkisine dair hipotezleri güçlendirmiş ve sistematik irtifa antrenmanı modellerinin geliştirilmesine ivme kazandırmıştır (Levine & Stray-Gundersen, 2005).

Hipoksik antrenman paradigmaları kabaca üç başlıkta toplanır: Yaşa-Yüksekte, Antrenman Yap-Yüksekte (LHTH), Yaşa-Yüksekte, Antrenman Yap-Alçakta (LHTL) ve Yaşa-Alçakta, Antrenman Yap-Yüksekte (LLTH) (Millet et al., 2010). LHTH güçlü bir hipoksik uyarar sunsa da yüksek yoğunluklu antrenman kalitesini sınırlayabilirken, LLTH antrenman sırasında hipoksi sağlar ancak günlük toplam hipoksi dozu eritropoietik yanıt için yetersiz kalabilir (Chapman, 2009). LHTL modeli ise günün büyük kısmında orta irtifada yaşayıp yüksek şiddetli antrenmanları düşük rakımda sürdürmeyi hedefleyerek hem hematolojik adaptasyonu hem de antrenman kalitesini aynı protokolde birleştirmeyi amaçlar (Levine & Stray-Gundersen, 1997).

LHTL'nin fizyolojik gerekçesi çok katmanlıdır: Hipoksiye maruziyet, HIF-1 α aracılı sinyal yollarıyla EPO üretimini artırır; bunu izleyen haftalarda eritrosit sayısı ve toplam hemoglobin kütlesi artar, böylece arteriyel oksijen taşıma kapasitesi yükselir (Ainslie et al., 2022). Aynı dönemde ventilatuvar aklimatizasyon, kemorefleks duyarlılığında değişimler ve olası plazma hacmi uyarlanmaları, dakika ventilasyonu ve oksijen yüklenmesini destekleyebilir (Ainslie et al., 2022). Periferde ise kapiller yoğunluk, mitokondriyal biyogenez ve oksidatif enzim aktivitesindeki artışlar oksijen kullanımını etkinleştirerek laktat eşiği ve koşu/ bisiklet ekonomisi gibi belirteçleri olumlu etkileyebilir (Millet et al., 2010).

Kanıt dayalı uygulama parametreleri, etkili bir “doz” için irtifa aralığının ~1.800–2.500 m, günlük hipoksi süresinin ≥ 12 –14 saat ve toplam kamp süresinin en az 3–4 hafta olmasını önermektedir (Levine & Stray-Gundersen, 2001). Bu sınırların ötesinde çok yüksek irtifalar (>3.000 m) uyku kalitesi ve toparlanmada bozulmaya, aşırı uzun günlük maruziyetler ise yorgunluk ve performans kayıplarına yol açabilir; dolayısıyla doz-yanıt ilişkisi doğrusal değildir ve “daha çok, daha iyi” olmayabilir (Millet et al., 2010). Uygulamada, yüksek irtifada geçirilen saatlerin büyük kısmının uykuda olması, hem davranışsal açıdan sürdürülebilirlik sağlar hem de eritropoietik uyarının toplam dozunu artırır (Levine & Stray-Gundersen, 2005).

Performans çıktıları açısından literatür, hemoglobin kütlesinde anlamlı artışların görece tutarlı olduğunu; VO_2 maks kazanımlarının ise protokol tasarımı, sporcunun antrenman geçmişi ve test zamanlamasına bağlı olarak heterojen dağıldığını göstermektedir (Park et al., 2023). Buna karşın deneme/yarış performanslarında—3.000–5.000 m koşu ve bisiklet zaman testleri gibi—küçük-orta büyüklükte, pratik olarak anlamlı gelişmeler daha istikrarlı rapor edilmiştir (Saugy et al., 2014). Takım sporlarında tekrar sprint yeteneği ve yüksek hızda kat edilen mesafe gibi belirteçlerde iyileşmeler bildirilmekle birlikte, maç içi performansa yansımının bağlama ve sezon dönemlemesine göre değiştiği vurgulanmıştır (McLean et al., 2014).

Bireysel yanıt farklılığı LHTL etkinliğinin belirleyici unsurlarındandır; ferritin düzeyleri, genetik varyasyonlar, uyku kalitesi, hastalık/allergi öyküsü ve antrenman yüklemesinin niteliği yanıt büyüklüğünü etkileyebilir (Chapman, 2009). Özellikle düşük demir depoları eritropoietik yanıtı sınırlandırdığı için, girişim öncesi ve sırasında demir durumunun taranması ve gerektiğinde destek verilmesi önerilir (Hauser et al., 2023). Yan etkiler arasında baş ağrısı, uyku bozukluğu, iştahsızlık, dehidratasyon ve aşırı yorgunluk bulunur; nadiren aşırı eritrositoz ve viskozite artışı kardiyovasküler riski artırabilir, bu nedenle medikal izlem ve yüklenme yönetimi esastır (Wilber, 2007).

Metodolojik açıdan, normobarik (hipoksik oda/çadır) ve hipobarik (dağ/gerçek irtifa) hipoksinin karşılaştırıldığı çalışmalar ortam fizyolojisi ve uygulama lojistiği bakımından farklı sonuçlar bildirmiş, bazı veriler hipobarik koşullarda performans aktarımının daha belirgin olabileceğini, diğer veriler ise benzer kazanımların mümkün olduğunu öne sürmüştür (Saugy et al., 2014). Sonuçların yorumlanmasında örneklem büyüklüğü, elit düzeydeki heterojenlik, körleme güçlükleri ve testlerin deniz seviyesine dönüşten sonraki zamanlaması gibi tasarım kısıtlılıkları dikkate alınmalıdır (Park et al., 2023).

Uygulama bilimi açısından LHTL genellikle makrodöngüde yarıya 3–6 hafta kala planlanır; en yüksek faydanın çoğu sporcuda deniz seviyesine dönüşten sonraki 7–21 gün penceresinde ortaya çıktığı, bu pencerenin bireysel değişkenlik gösterdiği bildirilmiştir (Levine & Stray-Gundersen, 2005). Rekabet takvimine, seyahat/jet-lag yönetimine, uyku hijyenine, hidrasyon-enerji dengesine ve yoğunluk dağılımına (yüksek yoğunluk-alçakta; düşük-orta yoğunluk-yüksekte) ilişkin ayrıntılı planlama performans aktarımı için kritik kabul edilir (Millet et al., 2010).

Etik ve düzenleyici açıdan doğal irtifa kampları serbest kabul edilirken, normobarik hipoksi sağlayan çadır/odaların kullanımı zaman zaman “teknolojik avantaj” tartışmalarına konu olmuş; ancak güncel çerçevede WADA tarafından yasaklı sayılmamıştır ve şeffaf, sağlık odaklı uygulamalar önerilmektedir (Wilber, 2007). Bu derlemenin amacı, söz konusu arka plan üzerinde LHTL’nin fizyolojik temellerini, doz-yanıt parametrelerini, performans çıktılarını, branş-özel etkilerini ve güvenlik/etik boyutunu güncel kanıtlar ışığında sentezlemek ve uygulayıcılara karar desteği sunmaktır (Hauser et al., 2023).

MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırma Modeli

Bu çalışma, yüksek irtifa antrenmanlarının sporcu performansına etkilerini değerlendirmek amacıyla hazırlanmış bir **geleneksel (narrative) derleme** çalışmasıdır.

Derleme kapsamında, yüksek irtifa ve hipoksik antrenman yöntemlerinin fizyolojik adaptasyonlar, performans çıktıları ve uygulama parametreleri üzerindeki etkilerini inceleyen güncel bilimsel araştırmalar sistematik bir yaklaşımla taranmış ve değerlendirilmiştir.

Literatür Tarama Süreci

Araştırma kapsamında, 1995–2025 yılları arasında yayımlanmış bilimsel çalışmalar incelenmiştir. Literatür taraması; PubMed, Web of Science, Scopus ve Google Scholar veri tabanlarında gerçekleştirilmiştir. Tarama sürecinde İngilizce anahtar kelimeler olarak *“live high-train low”*, *“altitude training”*, *“hypoxic training”*, *“erythropoietin”*, *“hemoglobin mass”* ve *“endurance performance”* ifadeleri kullanılmıştır. Ayrıca ilgili çalışmaların kaynakça bölümleri incelenerek konu ile ilişkili ek yayınlara ulaşılmıştır.

Çalışmaların Seçimi

Literatür taraması sonucunda elde edilen çalışmalar başlık ve özet düzeyinde değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamına dahil edilen çalışmalar aşağıdaki ölçütlere göre belirlenmiştir:

- Live High–Train Low (LHTL) veya diğer hipoksik antrenman yöntemlerini incelemiş olması,
- Elit sporcular veya düzenli antrenman yapan bireyler üzerinde gerçekleştirilmiş olması,
- Hemoglobin kütlesi (Hb-mass), maksimal oksijen tüketimi (VO₂maks), dayanıklılık performansı veya zaman denemesi sonuçları gibi performans göstergelerini raporlamış olması,
- Hakemli bilimsel dergilerde yayımlanmış olması.

Araştırma konusuyla doğrudan ilişkili olmayan çalışmalar, yalnızca teorik görüş içeren yayınlar, erişilemeyen tam metinler ve yinelenen kayıtlar değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Veri Değerlendirme ve Analiz

Seçilen çalışmalar; araştırma tasarımı, örneklem özellikleri, uygulanan hipoksik antrenman protokolü, maruziyet süresi, irtifa düzeyi ve raporlanan performans çıktıları açısından incelenmiştir. Elde edilen bulgular tematik olarak sınıflandırılarak; hematolojik adaptasyonlar, kardiyorespiratuvar değişiklikler, performans çıktıları, bireysel yanıt farklılıkları ve uygulama parametreleri başlıkları altında değerlendirilmiştir.

Kanıt düzeyinin artırılması amacıyla özellikle sistematik derlemeler, meta-analizler ve kontrollü deneysel çalışmalara öncelik verilmiştir (Hauser et al., 2023; Park et al., 2023). Bulgular karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve yüksek irtifa antrenmanlarının sporcu performansı üzerindeki etkileri güncel literatür doğrultusunda yorumlanmıştır.

Hipoksi ve Yüksek İrtifanın Fizyolojik Temeli

Yüksek irtifada parsiyel oksijen basıncının azalması, organizmada oksijen taşıma ve kullanım süreçlerini zorlar (Ainslie et al., 2022). Bu durum, kısa vadede ventilasyon artışı, kalp atım hızında yükselme ve doku oksijenlenmesinde azalma ile kendini gösterirken; uzun vadede eritropoietin (EPO) artışı, hemoglobin sentezinin artması ve hematolojik kapasitenin gelişimi ile adaptasyon sağlanır (Levine & Stray-Gundersen, 1997). Ayrıca hipoksi, kas hücrelerinde hipoksi ile indüklenebilir faktör-1 α (HIF-1 α) yoluyla mitokondriyal biyogenezi, kapiller yoğunluğu ve oksidatif enzim aktivitesini artırarak aerobik enerji üretim kapasitesini destekler (Hauser et al., 2023). Böylece kas oksijen kullanım verimliliği artar, laktat eşiği ileriye taşınır ve dayanıklılık performansı olumlu etkilenir (Millet et al., 2010).

Hipoksik Antrenman Paradigmaları: LHTL'nin Konumu

Klasik "Live High-Train High" (LHTH) modeli, sporcuların hem yaşam hem de antrenman süreçlerini yüksek rakımda gerçekleştirmesini içerir. Ancak bu yöntemde yüksek yoğunluklu antrenmanların kalitesi düşebilmektedir (Chapman, 2009). "Live Low-Train High" (LLTH) yaklaşımı ise deniz seviyesinde yaşayıp hipoksik odalarda antrenman yapılmasına dayanır, fakat maruziyet süresi sınırlı olduğundan hematolojik uyaran yetersiz kalabilir (Wilber, 2007). En yaygın kullanılan ve en etkili paradigma olarak tanımlanan "Live High-Train Low" (LHTL) modelinde sporcu, gündelik yaşamının büyük bölümünü orta irtifada geçirir, ancak yüksek şiddetli antrenmanlarını deniz seviyesine yakın koşullarda yapar (Levine & Stray-Gundersen, 2005). Bu sayede hem hematolojik adaptasyon sağlanır hem de antrenman kalitesi korunur (Saugy et al., 2014).

LHTL'de Doz-Yanıt: İrtifa, Süre ve Günlük Maruziyet (Detaylandırılmış)

LHTL uygulamalarında en kritik faktörlerden biri doz-yanıt ilişkisidir. Sporcu organizmasının hipoksiye verdiği yanıt; maruz kalınan irtifa düzeyi, günlük hipoksik maruziyet süresi ve toplam protokol süresine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Levine & Stray-Gundersen, 1997; Millet et al., 2010).

İrtifa Düzeyi

Optimal LHTL etkileri için önerilen yükseklik bandı genellikle 1.800–2.500 m aralığındadır. Bu irtifanın altında, hipoksik uyarı eritropoietin (EPO) sentezini tetiklemede yetersiz kalabilirken; 3.000 m'nin üzerinde ise uyku bozuklukları, iştah kaybı, aşırı yorgunluk ve immün baskılanma gibi olumsuz etkiler daha sık görülmektedir (Chapman, 2009; Wilber, 2007). Nitekim, 2.000–2.500 m arasındaki "orta irtifa" koşullarının hem güvenlik hem de adaptasyon açısından en uygun bölge olduğu rapor edilmiştir (Levine & Stray-Gundersen, 2005).

Günlük Hipoksik Maruziyet Süresi

LHTL'nin etkili olabilmesi için günlük maruziyet süresinin minimum 12 saat olması gerektiği vurgulanmaktadır (Levine & Stray-Gundersen, 2001). Bazı meta-analizler ise 14–16 saatin üzerinde geçirilen sürelerin hemoglobin kütlelerinde anlamlı artışlar

sağladığını göstermektedir (Saugy et al., 2014; Millet et al., 2010). Uyku döneminin hipoksiye maruz kalma süresine dâhil edilmesi, vücudun adaptif yanıtlarını optimize eden önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Toplam Protokol Süresi

LHTL'nin fayda sağlayabilmesi için toplam protokolün en az 3 hafta sürmesi gerektiği; optimal adaptasyon için ise 4 hafta ve üzerinin tercih edilmesi gerektiği bildirilmektedir (McLean et al., 2014; Hauser et al., 2023). Daha kısa süreli protokollerde hematolojik yanıtların (ör. Hbmass artışı) sınırlı kaldığı, ancak bazı sporcularda aerobik kapasite veya performans testlerinde küçük gelişmeler görülebileceği rapor edilmiştir (Park et al., 2023).

Doz-Adaptasyon Eğrisi

Araştırmalar, LHTL'nin doz-yanıt eğrisinin doğrusal olmadığını, yani daha fazla yükseklik veya daha uzun süreli maruziyetin her zaman daha fazla fayda getirmediğini göstermektedir (Ainslie et al., 2022). Çok yüksek irtifalar (>3.000 m) veya aşırı uzun maruziyetler (>20 saat/gün) performans üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu nedenle, "optimal doz" kavramı önemlidir ve bireysel farklılıkları dikkate alan, kontrollü bir yaklaşım gerektirir (Chapman, 2009).

Bireysel Faktörler

Demir depolarının yeterliliği, sporcunun genetik özellikleri, uyku kalitesi ve antrenman yoğunluğu gibi bireysel faktörler de LHTL'ye verilen yanıtı büyük ölçüde belirlemektedir (Millet et al., 2010; Hauser et al., 2023). Özellikle düşük ferritin düzeyleri, eritropoietik adaptasyonu sınırlayarak beklenen hemoglobin artışının gerçekleşmesini engelleyebilmektedir. Bu nedenle, protokoller öncesinde sporcuların hematolojik parametrelerinin değerlendirilmesi önerilmektedir.

Pratik Öneriler

- İrtifa: 2.000–2.500 m
- Günlük maruziyet: 12–16 saat
- Toplam süre: 3–4 hafta
- Destekleyici faktörler: demir takviyesi, uyku hijyeni, yeterli enerji ve sıvı alımı

Bu parametrelerin bütünsel olarak planlanması, LHTL'nin etkilerini maksimize etmenin anahtarıdır.

Performans Çıktıları: VO₂maks, Hemoglobin Kütlesi ve Deneme Testleri

Çeşitli meta-analizler LHTL'nin performans çıktıları üzerinde olumlu etkiler bildirmektedir (Park et al., 2023).

- VO₂maks: Çalışmaların bir kısmında %2–5'lik artışlar rapor edilirken, diğerlerinde anlamlı değişiklik bulunmamıştır (McLean et al., 2014). Bu farklılığın, bireysel yanıt değişkenliği ve uygulanan protokol farklarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Chapman, 2009).

- Hemoglobin kütlesi: Genellikle %3–7 oranında artış gözlemlenmiş, bu artışın deniz seviyesine döndükten sonra 2–3 hafta korunabildiği bildirilmiştir (Hauser et al., 2023).
- Performans testleri: 3.000 m ve 5.000 m koşu denemeleri ile bisiklet zaman testlerinde küçük-orta büyüklükte iyileşmeler rapor edilmiştir (Saugy et al., 2014).

Branşlara Göre Bulgular: Dayanıklılık ve Takım Sporları

LHTL özellikle dayanıklılık sporlarında yaygın kullanılmaktadır (Levine & Stray-Gundersen, 1997). Maraton, bisiklet ve triatlon sporcularında Hb-mass artışı doğrudan yarış performansına yansımaktadır (Millet et al., 2010). Takım sporlarında ise daha karmaşık bulgular elde edilmiştir. Futbol, basketbol ve rugby sporcularında tekrar sprint performansında gelişme rapor edilmiş, ancak bu gelişmenin maç performansına yansımaları sınırlı kalmıştır (Saugy et al., 2014). Ayrıca oyun temposunun yüksek olduğu sporlarda anaerobik enerji sistemlerinin baskın olması, LHTL'nin faydasını kısıtlayabilmektedir (Park et al., 2023).

Bireysel Yanıt Değişkenliği ve İzlem

LHTL'ye verilen yanıt bireyden bireye büyük farklılık göstermektedir (Chapman, 2009). Bazı sporcular belirgin hematolojik ve performans artışı yaşarken, bazıları hiç yanıt vermemektedir (Wilber, 2007). Bu durum “responder” ve “non-responder” kavramlarıyla açıklanmaktadır. Yanıt değişkenliğinin demir depoları, genetik farklılıklar, uyku kalitesi, hipoksi toleransı ve maruziyet süresinden etkilendiği belirtilmektedir (Millet et al., 2010). Bu nedenle sporcularda ferritin düzeyleri düzenli olarak kontrol edilmeli, gerektiğinde demir desteği verilmelidir (Hauser et al., 2023).

Güvenlik, Yan Etkiler ve Etik/Tüzel Boyut

Hipoksiye bağlı yan etkiler arasında uyku bozuklukları, baş ağrısı, iştah azalması, dehidratasyon ve yorgunluk yer almaktadır (Wilber, 2007). Uzun süreli veya yanlış uygulamalarda polisitemi, kan viskozitesinde artış ve kardiyovasküler risk oluşabilir (Levine & Stray-Gundersen, 2005). Etik açıdan doğal irtifa kampları serbest kabul edilirken, hipoksik çadır veya odaların kullanımı bazı federasyonlarca “teknolojik doping” olarak tartışılmaktadır (Ainslie et al., 2022). WADA (Dünya Anti-Doping Ajansı), hipoksik çadır kullanımını yasaklamamış olsa da etik tartışmalar halen sürmektedir (Wilber, 2007).

Pratik Uygulama Rehberi (Önerilen Protokoller)

- İrtifa: 2.000–2.500 m aralığı uygundur (Millet et al., 2010).
- Günlük maruziyet: ≥ 12 saat (Levine & Stray-Gundersen, 2005).
- Toplam süre: 3–4 hafta kamp önerilir (Saugy et al., 2014).
- Antrenman içeriği: Deniz seviyesinde yapılan yüksek yoğunluklu intervaller (örn. 6×3 dk %90 VO_2maks) ve düşük yoğunluklu uzun koşuların kombinasyonu uygundur (Park et al., 2023).

- Takip: Hb-mass, ferritin ve uyku kalitesi düzenli izlenmeli; aşırı yorgunluk ve sağlık riskleri gözlenmelidir (Hauser et al., 2023).

Sınırlılıklar ve Gelecek Araştırmalar

LHTL'nin en büyük sınırlılığı bireysel yanıt farklılığıdır (Chapman, 2009). Takım sporları için kanıtlar heterojen olup standart protokoller geliştirilmemiştir (Park et al., 2023). Kadın sporcular üzerinde yeterli çalışma yapılmamıştır (Millet et al., 2010). Ayrıca, hipoksiye kronik maruziyetin uzun vadeli sağlık etkileri belirsizdir (Hauser et al., 2023). Gelecek araştırmalar, genetik belirteçlerin yanıt tahmininde kullanımı, uyku kalitesini optimize eden protokoller ve yapay hipoksi sistemlerinin doğal irtifaya kıyasla etkinliği üzerine yoğunlaşmalıdır (Ainslie et al., 2022).

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu derlemede incelenen bulgular, “Yaşa-Yüksekte, Antrenman Yap-Alçakta” (LHTL) modelinin dayanıklılık performansı üzerinde önemli fizyolojik ve pratik etkiler yaratabileceğini göstermektedir. LHTL protokolü, hipoksinin eritropoietik ve periferik adaptasyonlarını devreye sokarken, antrenmanların deniz seviyesinde veya düşük irtifada yapılabilmesi sayesinde yüksek yoğunluklu egzersizlerin kalitesini korumaktadır (Levine & Stray-Gundersen, 1997; Millet et al., 2010). Bu çift yönlü etki, LHTL'yi günümüzde en sık kullanılan hipoksi temelli antrenman modellerinden biri haline getirmiştir.

Araştırmalar, LHTL'nin hemoglobin kütleğinde %1–4 arasında artış sağlayabildiğini ve bunun VO_{2max} üzerinde küçük-orta büyüklükte gelişmelere yansıyabildiğini ortaya koymuştur (Saugy et al., 2014; Park et al., 2023). Bununla birlikte, hematolojik yanıtta bireysel farklılıklar oldukça belirgindir; özellikle düşük ferritin düzeylerine sahip sporcularda eritropoietik adaptasyon sınırlı kalabilmektedir (Hauser et al., 2023). Bu durum, protokol öncesi ve sırasında demir depolarının izlenmesini ve gerektiğinde desteklenmesini kritik hale getirmektedir.

Performans çıktıları açısından bakıldığında, 3.000–5.000 m koşu ve bisiklet zaman testlerinde anlamlı iyileşmeler gözlemlenmiş, ancak mutlak VO_{2max} değerlerindeki değişimler tutarlı olmamıştır (Chapman, 2009). Takım sporlarında ise tekrar sprint yeteneği ve yüksek hızda koşu mesafesinde ilerlemeler rapor edilmekle birlikte, maç performansına aktarım spora özgü değişkenlik göstermektedir (McLean et al., 2014). Bu bulgular, LHTL'nin etkilerinin branşa, spor düzeyine ve uygulama parametrelerine göre değişebileceğini düşündürmektedir.

Metodolojik açıdan, normobarik (çadır/oda) ve hipobarik (dağ) hipoksinin farklı etkiler yaratabileceği konusu tartışmalıdır. Bazı çalışmalar hipobarik ortamların daha belirgin performans aktarımı sağladığını ileri sürerken, diğerleri normobarik koşullarda da benzer adaptasyonların mümkün olduğunu rapor etmektedir (Saugy et al., 2014). Bu farklılıkların, oksijen basıncı, hava yoğunluğu, uyku kalitesi ve psikolojik faktörler gibi çevresel değişkenlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Mevcut kanıtlar ışığında, LHTL'nin etkili olabilmesi için optimum koşullar şu şekilde özetlenebilir:

İrtifa aralığı: 1.800–2.500 m

Günlük hipoksi süresi: ≥ 12 –16 saat

Toplam protokol süresi: 3–4 hafta

Destekleyici önlemler: Demir takviyesi, uyku hijyeni, yeterli enerji ve sıvı alımı, uygun antrenman yük dağılımı

Sporcuların bireysel özellikleri, antrenman geçmişi ve yarışma takvimine göre uyarlanmış programlar, LHTL'nin etkinliğini artıracaktır. Ayrıca, dönüş sonrası performans penceresinin 7–21 gün arasında değişebileceği dikkate alınarak yarışma planlaması yapılmalıdır (Levine & Stray-Gundersen, 2005).

LHTL üzerine yapılan çalışmaların çoğu küçük örneklem büyüklüklerine sahiptir ve elit sporcular arasında bireysel farklılıklar oldukça yüksektir. Körleme zorlukları, antrenman yükü farklılıkları ve deniz seviyesine dönüşten sonraki test zamanlaması, bulguların genellenebilirliğini sınırlamaktadır (Park et al., 2023). Gelecek araştırmaların, farklı spor branşlarına özgü LHTL protokollerini karşılaştırması, kadın sporcular üzerine daha fazla veri sağlaması ve genetik/moleküler belirteçler üzerinden bireysel yanıt farklılıklarını incelemesi önemlidir (Hauser et al., 2023).

Sonuç olarak, LHTL modeli dayanıklılık sporcuları için hem hematolojik hem de periferik adaptasyonları tetikleyen, aynı zamanda antrenman kalitesini koruyan etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu etkinin büyüklüğü, uygulama parametrelerine ve bireysel yanıt farklılıklarına bağlıdır. Doğru dozda, kontrollü ve bireyselleştirilmiş uygulamalarla, LHTL'nin rekabet avantajı sağlayabileceği; buna karşın yetersiz planlama veya yanlış dozlamamanın adaptasyonu sınırlayabileceği görülmektedir. Dolayısıyla, LHTL'nin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için bilimsel kanıta dayalı protokol tasarımı, bireysel izlemler ve disiplinler arası bir destek ekibi gereklidir.

Beyanlar / Declarations

Etik Onay ve Katılım Onayı / Ethics approval and consent to participate

Bu çalışmanın hazırlanma ve yazım sürecinde "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında bilimsel, etik ve alıntı kurallarına uyulmuş olup; toplanan veriler üzerinde herhangi bir tahrifat yapılmamış ve bu çalışma herhangi başka bir akademik yayın ortamına değerlendirme için gönderilmemiştir. Bu makale ile ilgili doğabilecek her türlü ihlallerde sorumluluk yazara aittir.

During the preparation and writing of this study, scientific, ethical, and citation rules were followed in accordance with the 'Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Guidelines'; the data were not altered, and this study has not been submitted to any other academic publication medium. The author is solely responsible for any violations that may arise in relation to the publication of this manuscript.

Veri Ve Materyal Erişilebilirliği / Availability of data and material

Bu çalışmanın bulgularını destekleyen veriler, makul talepler üzerine sorumlu yazardan temin edilebilir. Veri seti yalnızca akademik amaçlar için erişilebilir olacak ve verilerin herhangi bir kullanımı, orijinal çalışmayı referans gösterecek ve katılımcıların gizliliğini koruyacaktır.

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request. The dataset will be accessible only for academic purposes, and any use of the data will recognize the original study and maintain the confidentiality of the participants.

Çıkar Çatışması / Competing interests

Yazarlar, bu makalede sunulan çalışmayı etkileyebilecek herhangi bir çıkar çatışması veya kişisel ilişkiye sahip olmadıklarını beyan etmektedirler.

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Yazar Katkıları / Authors' Contribution Statement

Yazar; çalışmanın kavramsallaştırılması, tasarımı ve planlanması, verilerin toplanması, analizi ve yorumlanması süreçlerini yürütmüş, makale taslağını hazırlamış ve bilimsel açıdan eleştirel olarak gözden geçirmiştir. Yazar, makalenin son hâlini okuyup onaylamıştır.

The author was responsible for the conceptualization, design, and planning of the study, as well as the collection, analysis, and interpretation of the data. The author drafted the manuscript, critically revised it for important intellectual content, and approved the final version of the manuscript.

Fon Desteği / Funding

Bu çalışma, kamu, özel veya kar amacı gütmeyen sektörlerdeki fon sağlayıcı kurumlardan herhangi bir özel destek almamıştır.

This research received no external funding.

Teşekkür / Acknowledgements

None.

References / Kaynaklar

- Ainslie, P. N., et al. (2022). Regulation of erythropoiesis and hemoglobin mass by hypoxia: Mechanistic insights. *Journal of Physiology*, 600(3), 451–466. <https://doi.org/10.1113/JP282412>
- Chapman, R. F. (2009). The individual response to training and competition at altitude. *British Journal of Sports Medicine*, 43(1), i45–i50. <https://doi.org/10.1136/bjbm.2008.051979>
- Hauser, A., Troesch, S., Saugy, J. J., & Millet, G. P. (2023). Live high–train low for sea-level performance: Current perspectives. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1142356. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1142356>
- Levine, B. D., & Stray-Gundersen, J. (1997). "Living high–training low": Effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology*, 83(1), 102–112. <https://doi.org/10.1152/jappl.1997.83.1.102>
- Levine, B. D., & Stray-Gundersen, J. (2001). The effects of altitude training are mediated primarily by acclimatization, not hypoxic exercise. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 11(5), 283–291. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2001.110502.x>
- Levine, B. D., & Stray-Gundersen, J. (2005). Point: Positive effects of intermittent hypoxia (live high low) on exercise performance are mediated primarily by augmented red cell volume. *Journal of Applied Physiology*, 99(5), 2053–2055. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00877.2005>
- McLean, B. D., Gore, C. J., & Kemp, J. (2014). Application of 'live high–train low' for enhancing normoxic exercise performance in team sport athletes. *Sports Medicine*, 44(9), 1275–1287. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0192-x>
- Millet, G. P., Roels, B., Schmitt, L., Woors, J., & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Medicine*, 40(1), 1–25. <https://doi.org/10.2165/11317920-000000000-00000>
- Park, H. Y., Kim, J., Lee, J. B., & Park, J. (2023). Effects of hypoxic training on maximal oxygen uptake: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 3732. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053732>
- Saugy, J. J., Schmitt, L., Hauser, A., Constantin, G., Cejuela, R., Faiss, R., Wehrin, J. P., & Millet, G. P. (2014). Comparison of "live high–train low" in normobaric versus hypobaric hypoxia. *PLoS ONE*, 9(12), e114418. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114418>
- Wilber, R. L. (2007). Application of altitude/hypoxic training by elite athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(9), 1610–1624. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180de49e6>

Disclaimer / Publisher's Note

The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and do not necessarily reflect the views of **IJOSS** and/or the editor(s). **IJOSS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content. **IJOSS** remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.