



Received / Makale Geliş Tarihi 02.02.2024
Published / Yayınlanma Tarihi 31.03.2024
Volume (Issue) Cilt (Sayı) 8 (40)
pp/ss 506-517

Review Article / Derleme Makale
10.5281/zenodo.11089913
Mail: editor@pejoss.com

Dr. Serdar Şerare

<https://orcid.org/0000-0001-8167-2121>

Gazi Üniversitesi, Spor Bilimler Enstitüsü, Ankara / TÜRKİYE

ROR Id: <https://ror.org/054xkpr46>

Yüksek İrtifa Antrenman Metodolojilerinin Metabolizma ve Atletik Performansa Etkisi

Effects of High Altitude Training Methodologies on Metabolism and Athletic Performance

ÖZET

Bireysel ve takım sporlarının antrenörleri uzun süredir sporcularının performansını artırmak için yüksek irtifa antrenmanlarını kullanmaktadırlar. Günümüzde farklı metodolojiler geliştirilmekte olup, hangi metodolojinin daha etkili olduğu belirsizliğini korur iken, metabolizmaya ve atletik performansa etkileri de netlik kazanmamıştır. Bu çalışmanın amacı ise yüksek irtifa antrenman metodolojilerinin, metabolizmaya ve atletik performansa muhtemel etkilerini ortaya koymaktır. Yüksek irtifa antrenmanları dayanıklılık sporlarında temel bir stratejisi haline gelmiş olup, günümüzde yüksek irtifada yaşa-düşük irtifada antrenman yap (YYDA), düşükte yaşa, yüksekte antrenman yap (DYAA) ya da yüksekte yaşa-yüksekte antrenman yap (YYAA) gibi farklı metotlar denenmektedir. En yaygın kullanılan metot'un YYDA olduğu öne sürülmekle, performansı geliştirmesi açısından en uygun metot hala belirsizliğini korumaktadır. Yüksek rakımda yapılan antrenmanların deniz seviyesindeki performansı olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir. Bu nedenle deniz seviyesindeki yarışmalar için YYDA, yüksek rakımdaki yarışmalar için ise YYAA veya DYAA metotları denenmelidir. Yüksek irtifa antrenmanlarının en az 2000 metre ve üzerinde uygulanması ve en az üç hafta kalınması uygun görünse de performansı artırmak için en uygun yükseklik ve süre konusundaki belirsizlikler devam etmektedir. Yüksek irtifada antrenmanlarının performansa etkisi için hipoksik koşulların, aklimatizasyonun, atmosfer basıncının ve hiperventilasyonun temel rol oynadığını; yüksek irtifada performans artışının azalan parsiyel oksijen basıncından (PO_2) dolayı yetersiz düzeyde oksijen (O_2) elde edilmesi ve dolayısıyla aklimatizasyon mekanizmasının etkilenmesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Yüksek irtifada 3 hafta içerisinde kalp atım hızında (KAH) artış, atım hacminde azalma, kırmızı kan hücrelerinin sayısında, hemoglobin (Hb) konsantrasyonunda ve mitokondri yoğunluğunda artış olduğu görülmüştür. Dolayısıyla eritropoietin (EPO) üretimi uyarılarak eritrosit miktarında artış meydana gelir ve bu da maksimum oksijen alımını (VO_{2max}) ve kanın oksijen taşıma kapasitesini artırır. Yüksek irtifada yapılan antrenmanların dayanıklılık performansına olumlu etkileri olabilir. Ayrıca, arteriyel karbondioksit (CO_2) seviyelerinin düşüğü ve kan glukozu, insülin ve kortizol konsantrasyonlarında belirgin bir artış yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu duruma ek olarak, kırmızı kan hücrelerinin sayısındaki artış, kasın kasılma mekanizması verimliliğinde artışa ve daha düşük laktik asit (LA) düzeyine neden olabilir. Yüksek irtifada antrenmanın anaerobik performansa olumsuz bir etkisinin olmadığı, dayanıklılık performansını artırabileceği doğrulanmakla deniz seviyesindeki performans için etkisi tartışmalıdır. Ayrıca yüksek Hb kütlesine sahip olan elit sporcuların O_2 taşıma kapasitelerini daha da artırmayacağı dolayısıyla performansı fazla etkilemeyeceği son zamanlarda sorgulandığı anlaşılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda çift kör, plasebo kontrollü, çapraz deneme önerilmesinin yanı sıra yükseltinin, kalınan sürenin, sporcuların mevcut performans düzeylerinin ve ayrıca mevsimsel farklılıkların da dikkate alınmasını önermekteyiz.

Anahtar Kelimeler: Yüksek İrtifa, Hipoksi, Aklimatizasyon, Kan Hemoglobini, Atletik Performansı.

ABSTRACT

Coaches of individual and team sports have long been using high-altitude training to enhance their athletes' performance. Currently, various methodologies are being developed, and while the effectiveness of each methodology remains uncertain, the effects of high-altitude training on metabolism and athletic performance have not been clearly elucidated. The aim of this study is to elucidate the potential effects of high-altitude training methodologies on metabolism and athletic performance. High-altitude training has become a fundamental strategy in endurance sports, and different methods such as live high-train low (LHTL), live low-train high (LLTH), and live high-train high (LHTH) are being experimented with. Although LHTL is purportedly the most commonly used method, the most suitable methodology for enhancing performance still remains uncertain. It is noted that training at high altitudes can adversely affect performance at sea level. Therefore, for competitions at sea level, LHTL may be preferable, whereas for competitions at high altitude, LHTH or LLTH methods should be considered. While it seems appropriate for high-altitude training to be conducted at least at 2000 meters for a minimum of three weeks for adaptation, uncertainties persist regarding the optimal altitude and duration to enhance performance. The impact of high-altitude training on performance is attributed to hypoxic conditions, acclimatization, atmospheric pressure, and hyperventilation. It is shown that the increase in heart rate (HR), decrease in stroke volume (SV), increase in red blood cell (RBC) count, hemoglobin (Hb) concentration, and mitochondrial density occur within three weeks at high altitudes. Consequently, an increase in erythropoietin (EPO) production leads to an increase in erythrocyte volume, thereby enhancing maximum oxygen uptake (VO_{2max}) and the oxygen-carrying capacity of the blood. In conclusion, high-altitude training may positively impact endurance performance. Additionally, a significant increase in arterial carbon dioxide (CO_2) levels, blood glucose, insulin, and cortisol concentrations has been observed. Furthermore, the increase in RBC count may contribute to enhanced muscle contraction efficiency and lower lactate levels. It has been confirmed that high-altitude training does not have a negative effect on anaerobic performance and may even enhance endurance performance, although its effect on performance at sea level is debatable. Additionally, recent inquiries have suggested that elite athletes with high hemoglobin mass may not further increase their oxygen carrying capacity, thus not significantly impacting performance. For future studies, we recommend considering double-blind, placebo-controlled, crossover trials, as well as taking into account the altitude, duration of stay, athletes' current performance levels, and seasonal variations.

Keywords: High Altitude, Hypoxia, Acclimatization, Blood Hemoglobin, Athletic Performance.

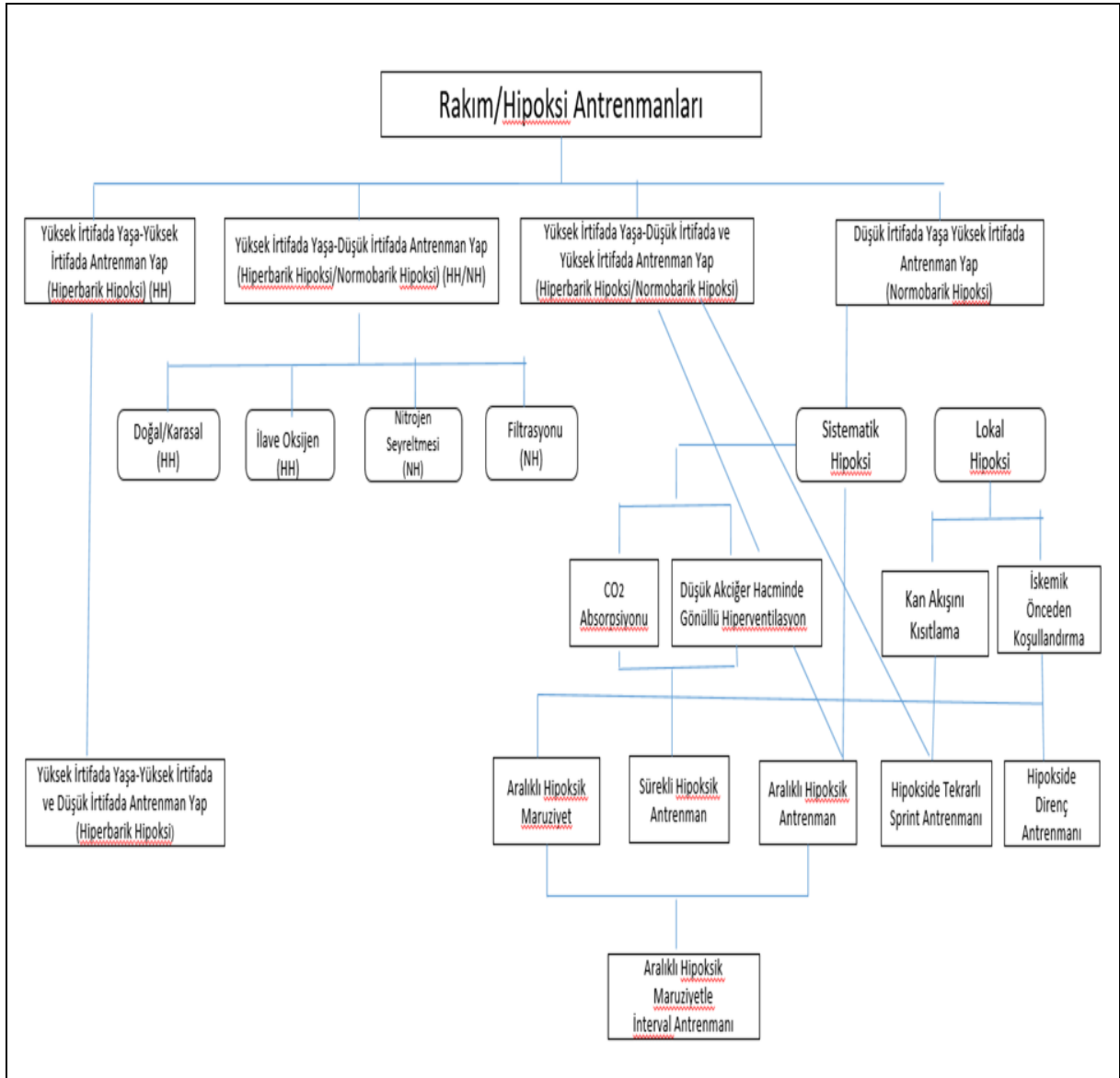
1. GİRİŞ

Sporcular, VO_2 maks düzeylerini artırmayı hedefleyerek serum eritropoietin seviyelerini yükseltmek amacıyla yapay veya doğal hipoksik ortamlarda yaşayarak atletik performanslarını artırmayı hedefler. Bunun için yüksek irtifa antrenman kavramı dayanıklılık sporlarında temel bir strateji haline gelmiş olup, günümüzde YYDA, DYDA ya da YYYA gibi birçok farklı antrenman metodolojisi üzerinde bilimsel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Yüksek irtifa ile ilgili ilk çalışmalardan birinde Reynafarje vd. (1959), deniz seviyesi yerlilerinde kırmızı kan hücresi hacmi ve plazma hacminin 4.500 m yükseklikte maruz kalma ile önemli ölçüde artabileceğini göstermişlerdir. O tarihten bu zaman kadar, hipoksik koşulların hematolojik değişikliklere yol açarak egzersiz kapasitesinde bir artışa neden olabileceği düşünülmüştür. Daha sonra yükseltinin atletik performansı etkileyebileceği yönündeki yaklaşımların 2300 metrede m gerçekleştirilen 1968 Meksika Olimpiyatları ile ortaya çıktığı görülmektedir. Bu olimpiyat da kısa mesafe gerektiren koşullarda başarılı sonuçlar elde edilir iken, aynı başarı uzun mesafe koşullarında görülememiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde atmosfer basıncının kısa mesafe gerektiren koşulları etkilemediği ancak uzun mesafe gerektiren koşulları negatif yönde etkilediği yönünde yaklaşımlar ortaya çıkmıştır (Wrynn, 2013). Literatür incelendiğinde 1000 m ve üzerindeki yükseltmeler yüksek rakım olarak kabul görmektedir. 1500 m'den sonraki her 300 m'de VO_2 maks düzeyinde %3-3,5 litre/dakika (L/dk) azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Dolayısıyla fiziksel performans 1500 m ve daha yukarı çıkıldıkça olumsuz düzeyde etkilenmekte, yüksekliğin artışına paralel olarak da atletik performans parametrelerinde değişimler görülmektedir (Murathan & Aktuğ, 2021). Günümüzde atletizm yarışlarında rakipler arasındaki zaman farkı o kadar azalmıştır ki, tüm yasal yöntemler bazen de yasa dışı yöntemler atletik performansı iyileştirmek için kullanılmaktadır. Sidney Olimpiyat Oyunları'ndaki 10.000 metre yarışında ikinci olan sporcu, performansını %0,005 artırabilmiş olsaydı, altın madalyayı kazanmış olacaktı. Üçüncü olan kişinin birincinin sadece %0,04 gerisinde tamamlaması atletik performansının önemini gösteren bir örnektir (de Paula & Niebauer, 2012). Atletik performansın ve metabolik verimliliğin oldukça önemli olduğu günümüzde birçok bireysel ve takım sporu antrenörü sporcularının atletik performansın geliştirilmesi planlanmış dönemlerde antrenman periyodizasyonlarının içerisine yüksek irtifa antrenmanlarını da koymaktadır (Birol vd., 2018). Marzorati (2020), yükseklik antrenmanının dayanıklılığı ve ultra-dayanıklılık performansını yüksek rakımda iyileştirdiğinin gösterildiğini, ancak elli yıldan fazla bir araştırma ve çalışmaya rağmen, yükseklik antrenmanının deniz seviyesinde yarışma için olası faydalarının hala tartışmalı bir konu olduğu ve henüz cevaplanmamış birçok sorunun olduğu. Oluşan farklılıkların ise atletlerin maruz kaldığı yükseklik, doğal veya simüle edilmiş ve yükseklikte geçirilen sürenin miktarı açısından kullanılan çeşitli protokollerden kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir. Şüphesiz ki günümüzde yüksek irtifa antrenmanları güncelliğini korur iken, antrenman metodolojileri, metabolik uyum süreçleri ve performansa etkileri üzerine güncel gelişmelerin takip edilmesine ihtiyaç vardır. Yüksek irtifa antrenmanları planlanır iken, metodolojilerin ve metabolik etkilerinin bilinmesi ve bilimsellik içerisinde planlanması antrenman bilimciler ve antrenörler açısından önemlidir. Dolayısıyla bu derleme ile farklı yüksek irtifa antrenman metodolojilerinin, metabolizmaya ve atletik performansa etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. YÜKSEK İRTİFA ANTRENMAN METODOLOJİLERİNİN METABOLİZMA VE ATLETİK PERFORMANSA ETKİSİ

2.1. Yüksek İrtifa Antrenmanları Metotları

Yüksek irtifa terimi, genellikle 1500 m yüksekliği aşan rakımları ifade eder. Bu yükseklik seviyesinin üzerine çıkıldıkça, vücudun adaptasyon süreçleri devreye girer. 1500-3500 m arası yüksek irtifa, 3500-5500 m arası ise çok yüksek irtifa olarak kabul edilir. 5500 m üzeri ise aşırı yüksek irtifa olarak sınıflandırılır (Paralıklar & Paralıklar, 2010). Yüksek irtifa antrenmanları, genellikle sporcuların dayanıklılık kazanmaları için ortalama 1.800-3.000 m yükseklikte yaşayıp antrenman yapmasını içerir (Saunders vd., 2009). Yüksek irtifa antrenmanları, uzun yıllardır dayanıklılık sporcuları tarafından deniz seviyesindeki performanslarını artırmak için kullanılmaktadır. Yaygın olarak bilinen aralıklı hipoksi antrenmanı, günlük kısa süreli maruziyet içerir ve bunlar genellikle şiddetli doğal veya yapay hipoksi koşulları altında gerçekleştirilir (örneğin, irtifa maruziyeti, azot evleri, hipoksi çadırları, solunum cihazları aracılığıyla inspiratuvar hipoksi) ve dinlenme veya egzersiz sırasında yapılır. Bu metodun amacı, EPO üretimini uyararak kan O_2 taşıma kapasitesini artırmaktır. Diğer bir geleneksel yaklaşım ise yüksek/orta rakımlarda yaşamak ve kırmızı kan hücresi hacmini artırmak için kullanılırken, düşük rakımlarda egzersiz yapmayı içerir. Bu stratejiye yüksek yerde yaşa, düşük yerde antrenman yap metodu denilmektedir (de Paula & Niebauer, 2012). YYDA, DYDA ve YYYA gibi metodlar ile ilişkilendirilen uygulamalar ve antrenmanlar aşağıdaki şekilde kategorize edilmiştir (Birol vd., 2018).



Şekil 1. Spor bilimciler ve antrenörler tarafından kullanılan hipoksi metotları ve antrenmanları (Girard vd., 2017). HH: hiperbarik hipoksi, NH: normobarik hipoksi, CO₂ absorpsiyonu: Karbonrioksit emilimi.

Yüksek irtifa için farklı metodolojiler uygulansa da YYYYA metodunun aşamalarını sırası ile belirtecek olursak;

1. Hazırlık aşaması: Bu aşama 4 ila 6 gün sürmekte olup sporculara uygulanan testleri ile fizyolojik ve aerobik düzeyleri belirlenmektedir. Bu aşamada genellikle aerobik düzeyde egzersizler uygulanmaktadır.
2. Yüksek irtifaya uyum (Aklimatizasyon) aşaması: Bu aşama 4 ila 6 gün sürmekte olup, aerobik egzersizlere ek olarak anaerobik eşik seviyesinin üzerinde çıkılan fakat yoğun olmayan egzersizler uygulanmaktadır.
3. Yoğun antrenman yükleme aşaması: Bu aşama 3 ila 6 hafta sürmekte olup, 2 ya da 3 günlük toparlanmayı içeren ortalama 10 gün uygulanan iki yüklenme periyodu uygulanmaktadır.
4. Deniz seviyesi irtifasına yeniden uyum aşaması: Bu aşama sporcuların psikolojik ve fizyolojik faktörlerine göre 5- 10 gün arasında değişiklik göstermekte olup, aerobik ve anaerobik dayanıklılık seviyesinde ayrıca orta yoğunlukta süratte devamlılık egzersizleri uygulanmaktadır.
5. Performansı artırma ve yarışmada (müsabakada) kullanım aşaması: Bu aşama deniz seviyesine geri dönüşten itibaren 7 ila 10 gün sonrası başlamakta olup yüksek irtifada antrenmanlarının süresine göre yüksek irtifanın etkisi 30 gün kadar sürebilir (Murathan & Aktuğ, 2021).

2.2. Yüksek İrtifa Antrenmanlarına Metabolik Adaptasyon Süreçleri

Yüksek irtifaya geçici olarak çıkan bireylerde, parsiyel oksijen basıncının PO_2 azalması için telafi mekanizmaları olarak belirgin bir kalp ve solunum hızında artışla benzer nörohormonall aklimatizasyon gösterir (Ramchandani vd., 2023). Aklimatizasyon yüksek irtifa açısından yüksekliğe adaptasyon süreçlerini kapsayan kavram olarak kullanılmakta olup, yüksek irtifa kalınan süre içerisindeki performans artışı aklimatizasyon olarak açıklanmaktadır. Sporcuların metabolik adaptasyonu açısından aklimatizasyonu kısa süreli ve uzun süreli adaptasyon olarak sınıflandırılır. Yüksek irtifaya metabolik adaptasyon sağlanabilmesi için gereken zaman dilimi bilim insanlarıncı farklı şekilde açıklanmakta olup metabolik adaptasyon ortalama gün sayıları şu şekildedir. 2700 m irtifaya adaptasyon süreci için ortalama 7 ile 10 gün, 3600 m irtifaya adaptasyon süreci için ortalama 15 ile 21 gün, 4500 m irtifaya adaptasyon süreci için ortalama 21 ile 25 gün gerekli olduğu bildirilmektedir. Her ne kadar sporcuların fizyolojik özelliklerine göre farklılıklar gösterse de 2300 m'ye kadar olan irtifalara adaptasyon sağlanabilmesi için 2 hafta, 2300 m'den ortalama 4500 metreye kadar artan her 610 m için ise ilave 1 hafta zaman gerektiği bildirilmiştir. Metabolik adaptasyon sürecindeki çevresel hipoksia koşullarındaki aklimatizasyon sürecinde O_2 taşınmasını ve tüketimini etkileyen solunumsal, dolaşım sal ve dolayısıyla metabolik adaptasyon süreci başlamaktadır. Yüksek İrtifada performans artırımının ana sebebi azalan PO_2 basıncından dolayı yetersiz düzeyde O_2 elde edilmesi dolayısıyla da aklimatizasyon mekanizmasının etkilenmesi ile ilişkilidir (Murathan & Aktuğ, 2021).

Yaklaşık 2000 m yüksek irtifa koşulundaki ilk bir kaç günlük metabolik adaptasyon süreci kısa süreli adaptasyon sürecini ifade eder. Deniz seviyesinden yüksek irtifalar çıktıkça atmosfer basıncı düşüş göstermekte olup havada 20.93 olan O_2 yüzdesinde, ünite hacmine düşen O_2 molekülleri azalmaktadır. Buda deniz seviyesine göre daha fazla O_2 solunması anlamına gelmektedir. Bu durum metabolizmada farklılıklar oluşturmaktadır. Yaklaşık 3 hafta içerisinde kalp atım hızında artış, atım hacminde azalma, kırmızı kan hücrelerinin sayısında, Hb konsantrasyonunda ve mitokondri yoğunluğunda artış, dolayısıyla eritrosit miktarında artışlar görüldüğü bildirilmektedir. Yüksek irtifa koşullarında yaşanmaya bağlı hiperventilasyon da artış göstermekte (Buzdağlı & Koz, 2019).

Sporcular yüksek irtifalara uzun süre maruz kaldıklarında, organizma zamanla düşük PO_2 seviyelerine uyum sağlamaktadır. Bu süreçte hiperventilasyon, daha fazla oksijen alımına yol açsa da aynı zamanda CO_2 atılımını artırır, bu da arter kanındaki CO_2 miktarının azalmasına ve alkali maddelerin azalmasına neden olur. Sonuç olarak, respiratuvar alkaloz denilen bir durum görülür. Uzun süre yüksek irtifada kalındığında, böbrekler alkali maddeleri atarak kan pH'ını normalleştirir. (Ergen, 2007). Ayrıca, yüksek rakımlarda O_2 eksikliği, böbreklerde EPO üretimini uyarır. İlk üç saatteki artan EPO üretimi birkaç gün devam eder, ancak EPO seviyeleri bir ay içinde normale dönerken, kırmızı kan hücresi artışı üç ay ve üç aydan uzun sürebilmektedir. 4000 m'de altı ay yaşayan bir kişinin toplam kan hacmi (kırmızı kan hücresi ve plazma volümü) yaklaşık %10 artar. Kırmızı kan hücrelerindeki 2,3-difosfogliserat konsantrasyonu da artar. Bu artış, düşük O_2 seviyelerinde Hb tarafından daha fazla O_2 serbest bırakılmasına yardımcı olur. Böylece dokularda O_2 alınımı artırılır (Kenny vd., 2012).

2.3. Yüksek İrtifa Antrenmanlarının Metabolik Etkileri

Yüksek irtifaya akut ve kronik maruziyete yanıtı ile oluşan fizyolojik adaptasyonlar bilimsel çalışmalarla tespit edilmiştir. Sonuçlar yüksek irtifanın kısa vadeli zararlı etkilerden irtifada ve deniz seviyesindeki yarışmalarda performansı artırabilecek uzun vadeli adaptasyonlara kadar çeşitlilik göstermektedir (Sinex & Chapman, 2015). Bilim insanları yüksek irtifadaki hipoksi ortamda azalan O_2 varlığının metabolik, kardiyovasküler, solunum, hemodinamik, sempatoadrenal ve benzeri gibi birçok fizyolojik sistemin hızlı ve daha yavaş adaptasyonları hakkındaki temel soruları yanıtlamak için çalışmaktadır. Hipoksinin, stres olarak temel fizyolojik süreçlerini anlamaya yardımcı olunmasının yanı sıra, hipobarik hipoksinin fizyolojik fonksiyonları nasıl etkilediğine dair geçerli bir bilgi, dayanıklılık sporcularının sağlığı ve sportif performansları için önemlidir (Braun, 2008). Yüksek irtifada, 1500 metre ve sonrasında her 300 metrelik yükseklik artışı, VO_{2max} üzerinde gözlemlenen yaklaşık %3 ila %3,5'lik bir azalmaya neden olur. Araştırmalar, performansı etkileyen faktörler arasında hipoksi, aklimatizasyon, atmosfer basıncı ve hiperventilasyonun temel rol oynadığını göstermektedir (Calbet vd., 2002).

Araştırmalar, sürekli yüksek rakımlarda yaşayan sağlıklı yaylacıların, pulmoner damar daralması, taşikardi ve yüksek irtifaya uyum sağlayan faydalı fizyolojik değişikliklerle ilişkilendirilen, kan basıncının artmasına sebep olan kronik yüksek sempatik tonusla karakterize olduğunu göstermektedir (Parodi vd., 2022). Yüksek rakımlarda, azalan arteriyel CO_2 seviyeleri, merkezi kemo reseptörlerin aktivitesini düşürerek alkalozu neden olur. Bu durum, kan bikarbonat (HCO_3^-) seviyelerindeki azalma ile dengelenir ve

asit-baz dengesi (pH) seviyesi normalde kalır. Alkalozu karşı bir adaptasyon olarak, pulmoner ventilasyon artar. Yüksek rakımlarda, submaksimal eforlarda kalp atımı ve kardiyak çıktı artarken, kalp atım hacmi sabit kalır. Kan akışındaki artış, düşen arteriyel O₂ seviyelerini kısmen telafi eder. Metabolik ve kardiyorespiratör sistemler, orta derecede eforlarda kardiyak çıktıyı artırarak azalan O₂ seviyelerini dengelemeye yardımcı olur. Yüksek rakımlarda hiperventilasyon, arteriyel CO₂ seviyelerini düşürür ve kanın alkalitesini artırır. Böbreklerin HCO³⁻ salgısı, pH dengesini düzenler. Kan HCO³⁻, hipoksiye adaptasyon sırasında Laktik asidin (LA) tamponlayıcısı olarak görev yapar. Solunumsal alkaloz vücudun hipoksiye uyum sağlaması için ventilasyonun artmasına yol açar (Cerit & Erdoğan, 2019). Egzersiz performansı ile yüksek düzeyde ilişkisi bulunan koşu ekonomisi, doğal veya simüle edilmiş yüksek irtifa şartlarına adaptasyonla submaksimal egzersiz sırasında artan oksidatif fosforilasyon, karbonhidrat kullanımı, azalan VO₂ maks ve kan LA seviyeleri nedeniyle artan aerobik glikoliz süreci ve mitokondrinin artan O₂ kullanımı ile belirlendiği bilinmektedir (Park, vd., 2016).

Yüksek rakımlarda hava basıncı azalarak dokulara O₂ taşınmasını güçleştirir. Bu durum, yüksek rakımlarda sadece hipoksinin değil, düşük arteriyel O₂ seviyelerinin, uygun bir adaptasyon sürecinden sonra bile devam eden yaygın bir özelliğidir. Kalp ve iskelet kaslarının enerji metabolizması da yüksek rakımlarda bulunan veya bu ortamdaki dönen bireylerde değişir. Kalpte, enerji rezervleri azalır ve bu daha düşük fosfokreatin-ATP oranlarıyla gösterilir. Buna neden olan reaksiyonlar bilinmemekle hipoksi koşullarındaki sıçan kalbinde, yağ asidi oksidasyonu ve solunum kapasitesinin azalmasına paralel olarak sürdürülen hipoksi maruziyetinden sonra pirüvat oksidasyonunun da azaldığı gözlenmiştir. İskelet kasında ise net bir fikir birliği bulunmamakla aşırı yüksek irtifaya uzun süre maruz kalındığında, kas mitokondrial yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Ancak bu, hipobarik odalarda ve Everest'e yapay olarak tırmanış yapıldığında gözlenmemiştir. Daha ılıman yüksek irtifada, mitokondrial hacim yoğunluğunda değişiklik olmadan solunum kapasitesinin azalması ve yağ oksidasyonunun düşmesi mümkündür, ancak bu tüm çalışmalarda görülmemiştir (Murray, 2016). Yüksek irtifadan elde edilen avantajlardan yararlanmak için metabolizma enzimlerinin uyum içinde çalışması gereklidir. Aksi takdirde, uyum sağlanmadan yapılan antrenmanlar özellikle fizyolojik kapasitenin üzerine çıkılan yüklenmelerin olumlu bir etkisi olmayacaktır. Başka bir ifadeyle, hücresel verimliliğin üzerinde veya altında kalan egzersizler, sporcuların fiziksel performansını ileriye taşımayacaktır (Cerit & Erdoğan, 2019). Yüksek irtifada yapılan egzersizin metabolik gereksinimleri hayati önem taşımaktadır. Yüksek irtifada antrenman yapan sporcular deniz seviyesine göre daha fazla enerji harcamakla enerji alımını önemli ölçüde aşabilir. Yüksek irtifada enerji alımı, azalmış erişilebilirlik, düşmüş iştah ve endokrin parametrelerindeki değişiklikler nedeniyle olumsuz etkilenir. Enerji dengesizliği ve vücut su kaybı, kilo kaybına yol açar; bu durum yüksek irtifada oldukça yaygındır. Yağ kaybı, yağsız kütle kaybını artırır. Bu durum, açlıkla benzerlik gösterir ve tercih edilen temel yakıt kaynağı karbonhidrattan yağa kayar, bu da performans verimliliğini düşürür. Ancak, bu olumsuz etkiler, yüksek karbonhidrat içeren bir diyetle enerji alımının artırılmasıyla hafifletilebileceği bildirilmektedir (Hill vd., 2011). Eski tarihli bir çalışmada Sawhney vd. (1991), 15 erkek gezgin, uyumlu düşük yerli (UYD) ve yüksek irtifa yerlilerinde (YIY) deniz seviyesinde, 3500 m ve 5080 m yüksekliklerde metabolik değişiklikleri izlenmiştir. Gezginlerde kan glukozu ve insulin konsantrasyonları yüksek irtifaya varışın ardından 3. ve 7. günlerde anlamlı bir artış göstermiş, daha sonra deniz seviyesi değerlerine geri dönmüş ve 3500 m'deki konaklama süreleri boyunca aynı kalmıştır. Daha sonra, daha yüksek irtifaya 5080 m irtifaya ulaşıncaya, glukoz konsantrasyonları önceki değerlerin üzerine çıkmış ve 5080 m'de 41. günde deniz seviyesi değerlerine geri dönmüştür. Kortizol konsantrasyonlarında belirgin bir artış, yüksek irtifaya varışın ardından 3. günde görülmüş ve artmış kortizol seviyeleri 3500 m'de 21. gün boyunca korunmuştur. 5080 m'ye varıştan sonra 30. günde kortizol konsantrasyonları deniz seviyesi değerlerine inmiş ve stabil kalmıştır. Yüksek irtifada serbest yağ asitlerinde dikkate değer bir değişiklik görülmemiştir. Öte yandan, kan LA konsantrasyonu önemli ölçüde azalmış. UYD 'de açlık glukoz konsantrasyonlarının, gezginlerin deniz seviyesindeki değerlerine kıyasla, 3500 m'de ve YIY'de 3500 m ve 4200 m'de hiçbir fark gözlenmemiştir. Ancak UYD'de 4200 m'de daha yüksek glukoz değerlerine ulaşılmıştır. UYD ve YIY'de plazma insulin ve Grofth hormonu konsantrasyonları, gezginlerin deniz seviyesindeki değerlerinden daha yüksek iken, kortizol değerlerinde herhangi bir fark saptanmamış. Bu gözlemler, yüksek irtifada glukoz değerlerinin, gözlenen insulin konsantrasyonu için yüksek olduğunu ve muhtemelen hipofiz bezinin artmış Grofth salgısı nedeniyle olabileceğini bildirmişlerdir.

Park vd. (2017), Kore Atletizm Federasyonu'na kayıtlı olan 20 orta ve uzun mesafeci erkek atlet üzerinde yaptıkları çalışmada 4 haftalık YYDA ile düşükte yaşam, düşükte antrenman (DYDA) metodlarının enerji metabolizması üzerindeki etkisini ve submaksimal egzersiz sırasında 3000 m ve 5000 m zaman denemesi üzerindeki etkisini belirlemek için yaptıkları çalışma da YYDA grubunun submaksimal egzersiz sırasında enerji metabolizmasını geliştirdiği ve zaman × grup etkileşiminde belirgin bir şekilde kalp hızı, oksijen

tüketimi ve karbondioksit atılımında azalma gösterdiği; bu değişkenlerin DYDA grubuna göre YYDY grubunda anlamlı bir şekilde azaldığı saptamışlardır. Ayrıca, her iki eğitim grubu da submaksimal egzersiz sırasında, 3000 m ve 5000 m zaman denemesi sırasında belirgin şekilde azalmış kan LA seviyeleri gösterdiğini belirtmişlerdir. Yüksek irtifalarda plazma hacminde azalma oluşur iken, kırmızı kan hücresi miktarındaki artışla beraber Hb'nin O₂ taşıma hızında artış gösterir (Hooper & Mellor, 2011). Yüksek irtifa antrenmanı, sporcuların kalp debisinde azalmaya, kırmızı kan hücrelerinin sayısında artışa, kasın kasılma mekaniği verimliliğinde artışa ve LA uzaklaştırma hızında artışa neden olabileceği bildirilmiştir (Köktaş, 2022). Yapılan bir çalışmada köpekler yüksek irtifada egzersiz yapıp, normal irtifaya maruz kaldıklarında olduğundan daha fazla kan glukozu kullanmışlardır (Zinker, 1994). Başka bir çalışmada ise insanlarda, akut hipobarik hipoksik koşullara (4300 m) keskin bir şekilde maruz kalındığında hem bütün vücut hem de bacak glukoz alımı yükselmiş ve 18 gün boyunca deniz seviyesi değerlerinin üstünde kalmıştır (Roberts vd.,1996). Anjiyotensin dönüştürücü enzim (ACE) genotipide, metabolik etkinlik ve hipoksik ortamlarda performans önemli etkisi vardır. Yüksek irtifada ortaya çıkan ve hipoksiye tepki olarak gelişen genlerden biri hipoksi uyarıcı faktör 1 alfa (HUF-1 α) genidir; bu gen, hipoksiye yanıt olarak indüklenen faktör (HIF-1 A) geni tarafından kodlanır. Hipoksik yanıtla ilgili olarak üretilen anjiyogenetik faktörlerden biri de vasküler endotel büyüme faktörü (VEGF-A) genidir, bu genin transkripsiyonu HIF-1 α geniyle ilişkilidir. Genetik miras, çevresel değişkenler ve uygulanan egzersiz yüklerinin niteliği, nöromusküler gelişim ve spor başarısını tetikleyen kültürel farklılıklar gibi faktörler, bireysel varyasyonları veya farklılıkları açığa çıkarabileceği bildirilmiştir (Cicavoğlu vd., 2021).

8000 m üzerindeki irtifalara maruz kalmada ise Acs vd. (2014), yaptıkları çalışmada Everest Dağı'na yapılan tırmanışla ilişkilendirilen fiziksel aktivitenin, insan iskelet kaslarında DNA onarım ve metabolik enzimlerin mRNA seviyelerini değiştirebileceğini ve oksidatif stresle ilişkili zorluklara neden olabileceğini bildirmişlerdir. Bu nedenle, 8000 m'nin üzerindeki zirvelere yapılan aktiviteleri içeren yüksek irtifa maruz kalma sürecinde 8 erkek dağcıyı iki hafta boyunca test etmişler. Vastus lateralis biyopsi örneklerinden elde edilen veriler 8000 m'nin üzerindeki yüksek irtifa maruz kalma gibi fiziksel aktivitenin birleşik etkilerinin, belirli kromozomun bütünlüğünü tehlikeye atabileceğini bildirilmişlerdir. YYYYA'nın, sporcuların irtifa performansını artırmasında açıkça faydalı olduğu bilinmektedir. Ancak, deniz seviyesindeki performansı artırmak için yapılan kontrollü çalışmalar tartışmalıdır. YYYYA ile YYDA yapmak metodları karşılaştırdığında, her ikisinin de, en azından belirli koşullar sağlandığında bazı sporcular için olumlu bir aklimatizasyon etkisi ve kanın oksijen taşıma kapasitesini artırma potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. YYYYA'da olumlu sonuçların alınmaması şu nedenle bağlı olabilir.1- Elit sporcular için kırmızı kan hücresi/Hb kütlelerinde artış teşvik etmek için aklimatizasyon etkisinin yetersiz olması, çünkü irtifanın çok düşük olması (5200-2200 m) ve/veya irtifa antrenman süresinin çok kısa olması (3-4 hafta); 2- İrtifada antrenman etkisinin, nöromusküler ve kardiyovasküler sistemlerin fonksiyonunu artırmak için yetersiz antrenman uyarıcıları nedeniyle bozulmuş olması; ve 3- Kronik hipoksi kaynaklı zararlı etkilerini asgariye indirmek için hipoksik maruziyetin antrenmanla kesilmesinin önemli olmasından kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Rusko vd., 2004).

2.4. Yüksek İrtifa Antrenmanlarının Atletik Performansa Etkisi

Yüksek irtifanın metabolik etkilerine ilişkin ilk çalışmaların 1878 yılında başladığı görülmekle bu yüksek irtifada antrenman konusu özellikle 1968 Meksika Olimpiyatlarından sonra sportif performans açısından spor bilimcilerin araştırmaları arasında yer almaya başlamıştır (Wrynn, 2013). Meksika Olimpiyatlarından sonra yapılan ilk çalışmalardan biri olan Adams vd. (1975), 12 orta mesafe koşucusunu 2300 m'lik yüksek irtifada ve deniz seviyesinde eş zamanlı olarak kontrol edilen 3 haftalık bir antrenman programına almışlar. Yükseklik antrenmanının, 2 mil koşu süresini 7 saniye azalttığı ancak VO₂maks düzeyleri için istatistiksel olarak bir farklar oluşturmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu sonucun aksine Ventura vd. (2000), yaptıkları çalışmada yüksek irtifa keşif gezisinin 6 bireyine, hipobarik odasında 17 gün boyunca, 3-5 saat 9 gün 4.000 m ile 5.500 m simüle irtifada aralıklı hipoksiye ve düşük yoğunluklu egzersize maruz bırakmışlar. Sonuç olarak hipobarik bir odada düşük yoğunluklu egzersizle birlikte kısa süreli aralıklı orta dereceli hipoksiye maruz kalmanın aerobik kapasiteyi geliştirmek ve irtifaya alışmayı sağlamak için yeterli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Yüksek irtifa antrenmanlarının performansa olan katkısı günümüzde hala tartışma konusu iken, dayanıklılık gerektiren spor branşlarında başarılı olan ülkelerde yüksek irtifa antrenmanlarının kullanıldığı görülmektedir. Olimpiyatlarda iki kez şampiyonluk yaşayan bir atletin olimpiyat öncesi yüksek irtifa antrenman yapmış olması da performansa olumlu etki gösterdiğini desteklemektedir (Açıkada, 1990). Nitekim yüksek irtifada antrenman yapan ve yarışma için düşük rakıma dönen sporcuları için artan alyuvar kütleli, dayanıklılık kapasitelerinin artmasına önemli bir katkıda bulunacağı bildirilmiştir (West vd., 2012).

Levine & Stray-Gundersen (1997), 39 kolej koşucusunu 2 haftalık bir hazırlık antrenmanı ve 4 haftalık kontrollü deniz seviyesi antrenmanına tabi tuttular. Daha sonra katılımcılar rastgele olarak 2500 m'de yaşayıp 2500-2700 m de YYYY (deney) ve deniz seviyesinde yaşayıp DYDA (Kontrol), ve 2500 m'de yaşayıp 1200 ile 1400 m YYDA (deney) şeklinde gruplara ayırmışlardır. Çeşitli antrenmanların ardından, YYYY ve YYDA ile VO₂maksın arttığı, ancak 5000 m koşu performansı sadece YYDA grubunda anlamlı şekilde arttı saptanmıştır. Bilim insanları, YYYY ile koşu performansında bir gelişme olmamasının nedeninin, yükseklik kaynaklı VO₂maksın azalmasına bağlı olarak zirve koşu hızlarında bir azalma olabileceğini, ancak aynı zamanda potansiyel plasebo yada nosebo etkilerinin de neden olabileceğini bildirmişlerdir. Stray-Gundersen vd. (2001), yaptıkları çalışmada sporcular DYDA, YYYY ve YYDA olmak üzere üç gruba ayırmışlar ve antrenman programına tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak, kırmızı kan hücresi sayıları ve VO₂maks, YYYY ve YYDA ile artmıştır. 5000 m zaman denemesinde ise sadece YYDA grubunda arttığı saptanmıştır. Ancak bu sonucun, YYDA grubunun YYYY grubuna kıyasla deniz seviyesinde veya yakınında aerobik egzersiz performansını artırmak için yüksek yoğunluklu aralıklı antrenman yapmasından kaynaklandığı bildirilmiştir. Bonetti vd. (2006), 10 erkek sprint kürekçisini, yüksek irtifa ve kontrol grubu olmak üzere iki gruba ayırmışlar. Hipoksi koşulları için bir nitrojen filtrasyon cihazı kullanarak 3 hafta (haftada 5 gün) aralıklı hipoksik maruziyet sağlanmıştır. Performans ölçümü için zirve gücü VO₂maks, egzersiz ekonomisini ve LA eşiğini tahmin etmek için artımlı adım testi; 500 m zaman denemesi ve 5 × 100 m sprintten kullanmışlardır. Sonuç olarak aralıklı hipoksik maruziyetin sprint kürekçilerinin performansını artırdığını ve bu etkiye O₂ taşınmasında değişikliklerin aracılık ediyor olabileceğini bildirmişlerdir.

Hamlin & Hellemans (2007), 22 elit olmayan çoklu spor branşına sahip sporcuları normobarik hipoksik gaz (aralıklı hipoksik) ve normal ortam havası içeren kontrol grubu olmak üzere iki gruba ayırmışlardır. Katılımcılar 3 haftalık bir süre boyunca haftada 5 gün, günde toplam 90 dakika boyunca 5 dakikalık aralıklarla normal oda havası içeren gaz karışımlarını soludular. Sonuç olarak aralıklı hipoksik antrenmanın 3 km performansı üzerindeki etkisinin faydalı olmasının muhtemel olduğu, elit olmayan çok sporlu sporcuların da bu tür antrenmanların performansı artırabileceklerini bildirmişlerdir. Hinckson vd. (2006), elit kürekçilerde deniz seviyesinde performansı artırmak için aralıklı hipoksik cihazı ile antrenman uygulamışlardır. Deney ve plasebo grubu olarak ikiye ayırdıkları sporculara 3 hafta boyunca günde 90 dakikalık gözetimli bir seansta 6 dakika açık ve 4 dakika kapalı dönüşümlü hipoksik maruziyeti uygulamışlar. Kontrol grubuna kıyasla, yüksek irtifa grubu 5000-m zaman denemesi için ortalama güçte hafif bir iyileşme (%0,6, %90 olasılık sınırları ±%3,7) ve 500-m deneme için ortalama güçte önemli bir bozulma (%2,2, ±%4,1) oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca her iki grupta da 4 mmol LA'da güç azalmıştır. Ancak genel olarak irtifa grubu, plasebo grubuna göre %0,4 (±%3,5) oranında iyileşmiştir. Hipoksi cihazının, yüksekliğe maruz kalmayı simüle etmenin pratik bir yolu olmakta olduğu, ancak bu şekilde bir antrenman metodunun elit kürekçilerin performansı üzerinde büyük etkilerinin muhtemel olmayacağını bildirmişlerdir.

Dufour vd. (2006), 6 haftalık aralıklı hipoksi antrenmanının mesafe koşucularının dayanıklılık-performans kapasitesini geliştirip geliştirmediği araştırılmıştır. 18 mesafe koşucusu randomize olarak normoksi ve aralıklı o hipoksi grubu olarak ikiye ayırmışlar. Sporcular normal normoksik antrenman programlarına haftada iki kez yüksek yoğunluklu ve orta süreli (24-40 dakika) antrenman seansları uygulanmıştır. Sonuç olarak spesifik yüksek yoğunluklu ve orta süreli hipoksik seansları içeren mevcut aralıklı hipoksi antrenman modelinin, antrenmanlı sporcular için antrenmanın metabolik uyarımını potansiyel hale getirebileceğini ve periferik kas adaptasyonlarını ortaya çıkararak dayanıklılık performans kapasitesinin artmasına neden olabileceğini bildirmişlerdir. Wang vd. (2022), profesyonel performans sporcularında yükseklik antrenmanının etkisini ve sporcuların fizyolojik ve biyokimyasal göstergelerini analiz etmek için yaptıkları çalışmada uzun mesafe koşucularına 8 haftalık bir yükseklik antrenmanı uygulamışlardır. Sonuç olarak farklı rakımlarda antrenman yapmak, sporcuların performansın da bir artış eğrisini artırabileceği ve dördüncü haftada bir platoya ulaşabileceğini bildirmişlerdir.

Bahenský vd. (2020), yüksek rakımda antrenman kampının aerobik ve anaerobik kondisyon üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada en az 2 yıl sürekli koşu antrenmanı yapan 20 ergen orta ve uzun mesafe koşucusunu (11 erkek ve 9 kadın), 8 kişi (4 kadın/4 erkek) kontrol grubu, 12 kişi (5 kadın/7 erkek) deney grubu olarak ikiye ayırmışlar. Deney grubu sporcularını yapılandırılmış 11 günlük yüksek rakım antrenman kampı uygulamışlar. Sonuç olarak kısa süreli yüksek rakımın, antrenmanlı ergen dayanıklılık koşucularında aerobik güçte anlamlı gelişmeler sağlandığı ancak anaerobik güçte anlamlı gelişmelerin sağlanmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Yüksek irtifa antrenmanlarının zorluğu, sporcuların deniz seviyesinde alışık oldukları yoğunluktaki egzersizlere devam etmelerini zorlaştırır. Ek olarak, yüksek

irtifada oksijenin azlığı nedeniyle, egzersizin yoğun anlarında anaerobik metabolizma daha fazla devreye girer. Bu durum, deniz seviyesi ve yüksek irtifadaki performans hedeflerinin farklılık gösterebileceği anlamına gelir; çünkü bu iki durum, enerji sistemlerindeki farklı oranlardaki değişiklikleri içerirler (Wolski & vd., 1996).

Morton & Cable (2005), kısa süreli aralıklı hipoksik antrenmanın, deniz seviyesi antrenmanıya kıyasla deniz seviyesinde aerobik ve anaerobik performansı artırıp artırmayacağını tespit için yaptıkları çalışmada, orta düzeyde antrenmanlı 8 takım sporcusundan oluşan deney ve kontrol gruplarına 4 hafta boyunca, haftada üç kez 30 dakikalık bisiklet egzersizi uygulamışlar. Grubun birisi 2750 m yüksek irtifada normobarik hipokside antrenman yaparken, diğer grup deniz seviyesinde antrenmanlarını gerçekleştirmişlerdir. Orta ila yüksek yoğunluklu aralıklı egzersizden oluşan kısa süreli bir antrenman programının orta düzeyde antrenmanlı sporcuların aerobik veya anaerobik performanslarına gelişmesine bir etkisinin olmadığını ancak deniz seviyesi performansı için hipokside antrenman yapmanın faydası varsa, bunun çalışmalarında kullandıkları kısa süreli protokolden kaynaklanmayabileceği sonucuna ulaşmışlardır. Hinckson vd. (2005), deniz seviyesi performansı üzerinde simüle edilmiş yükseklik maruziyetinin etkilerini inceledikleri çalışmada, yükseklik grubu ve kontrol grubu olarak belirlenen 10 koşucu deniz seviyesinden 2500-3500 m yükseklikte 24-30 gün boyunca ortalama günde 9 saat süren hipoksik bir çadırlarda uyudular ve normal antrenmanlarını gerçekleştirdiler. Maruziyetten bir hafta sonra, yükseklik grubunda dayanıklılık süresinde %16'lık bir artış gözlemlendiği, bu da zaman denemesinde %1.9 hız artışına eşdeğer olduğu sonucuna ulaşmışlar. Ayrıca performanstaki değişim, toplam yükseklik maruziyeti, anjiyotensin dönüştürücü enzim genotipi ve Hb konsantrasyonundaki değişikliklerle belirsiz bir ilişkiye sahip olduğu ve elde edilen bulgulara göre deniz seviyesi performansı üzerinde yükseklik çadırlarının az veya hiç etkisi olmadığını bildirmişlerdir. Rodríguez, vd. (2007), 23 antrenmanlı yüzücü ve koşucu plasebo kontrollü çalışmada, antrenman yapan sporcularda aralıklı hipobarik hipoksinin (günde 3 saat, haftada 5 gün, 4.000-5.500 m'de) veya deniz seviyesinde eğitimle birleştirilmiş normoksinin 4 haftalık dinlenme maruziyetinin etkilerini performans ve maksimum oksijen taşımını incelemişlerdir. Performans testleri olarak 100/400 m yüzme veya 3 km koşu uygulanmış ve VO_2 maks, ventilasyon (VE) ile kalp atış hızları KAH ölçülmüştür. Zaman denemesi sonucuna göre her iki grubun performansın da gelişmenin olmadığı. Gruplar arasında anlamlı bir fark tespit edilmediği ve aralıklı hipobarik hipoksinin heterojen grup sporcuların performansını veya oksijen taşımını artırmak için yeterli olmadığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca bu metodun belirli sporlar veya antrenman stratejileri için potansiyel faydalarının olup olmadığı, daha fazla çalışmayı gerektirebileceğini bildirmişlerdir. Park, vd., (2016) çalışmasında YYDA ile artan aerobik enerji metabolizması, antrenmanlar öncesine kıyasla antrenmanlar sonrasında uygulanan egzersiz sırasında göreceli egzersiz yoğunluğunu olan KAH azaltmıştır. Göreceli egzersiz yoğunluğu azaldığından, karbondioksit atılımı (VCO_2) ve kan anaerobik metabolizmanın göstergeleri olan LA seviyesi aynı mutlak yoğunluktaki egzersiz sırasında azaldığını bildirmişlerdir. Svedenhag vd. (1997), 1 aylık uzun süreli irtifa antrenman yapan kayakçılarda, egzersiz sırasında deniz seviyesine göre yüksek irtifada daha düşük kalp atış neden olduğu deniz seviyesine döndükten 11 gün sonra bile maksimum O_2 alımında artışın yaşandığını bildirilmişlerdir. Brugniaux vd. (2006), çalışmalarında 11 kros kayak, 18 yüzme ve 12 koşu sporcusuna 1.200 m yükseklikte 13 ila 18 günlük bir antrenman gerçekleştirmişler. Yüzücüler ve koşucular 2,500 m (yüzücüler için 5 gece, kayakçılar ve koşucular için 6 gece), 3,000 m (kayakçılar için 6 gece, yüzücüler için 8 gece ve koşucular için 12 gece) ve 3,500 m (kayakçılar için 6 gece) yüksekliğinde hipoksik odalarda uyurken, kros kayakçıları 3,000 m (6 gece) ve 3,500 m (6 gece) yüksekliklerinde konaklamışlar. Sonuç olarak, YYDA iyi tolere edilmiş ve aerobik antrenmanla uyumlu olmuştur. Üç antrenman modelinin karşılaştırılması, bir YYDA seansının en az 18 gün boyunca 3.000 m'yi aşmaması ve günde en az 12 saat maruz kalınması gerektiğini bildirmişlerdir. Sporcuların dayanıklılık performansı, eritrosit hacmindeki artışlar, maksimal aerobik egzersiz kapasitesi, kapiller yoğunluk ve koşu ekonomisi de dahil olmak üzere yüksek irtifa koşullarında antrenman yoluyla değişebilmektedir (Sinex & Chapman, 2015).

Nitekim hipoksik egzersizin antrenmanın kalitesini düşürdüğü (Levine & Stray-Gundersen, 1997) ve aklimatizasyon olmadığında performansın artırmadığı bildirilmiştir (Truijens vd., 2003). Bunun aksine genetik mirasla yüksek mitokondri sayısına sahip bireyler, düşük yoğunluklu uzun süreli eforlarda veya deniz seviyesinde daha fazla başarı elde edebilirler. Ayrıca, uzun süre yüksek irtifada yaşayanların fiziksel performans seviyesinin, kısa süreli konaklayıp sonra iniş yapanlara kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Sucec, 1996). Çelişkili sonuçlardan dolayı deniz seviyesindeki sporcuların performansını artırmak için yükseklik aklimatizasyonunun hangi yönlerinin sorumlu olabileceği konusunda, kabul görmüş bilimsel prensiplerin kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, yükseklik maruziyeti ile performans artışının etiyolojisini belirlemek için. Birincisi, yanıt VO_2 maks ve performansta iyileşme, mekanizma

(eritrosit hacminde artış) mevcut olduğunda ortaya çıkar. Eritrosit hacminde artış yoksa VO₂ maksta da artış olmaz ve aerobik performansta iyileşme olmaz. İkincisi, mekanizma izole edilebilir olmalı ve yükseklik maruziyeti ve iyileştirilmiş performans arasında açık bir ilişkiyi göstermelidir (Levine & Stray-Gundersen, 2005).

Garvican vd. (2011), YYDA sonrasında bisiklet performansında iyileşme olup olmadığını belirlemek için 11 yüksek elit kadın bisikletçi katılımcıya 26 gece simüle edilmiş YYDA 1300 m de günde 16 saat uygulamışlar. YYDA öncesinde ve sonrasında bisiklette maksimal 4 dakikalık efor ve ardından en yüksek güç çıkışında tükenme testine tabi tutulmuşlar. Sonuç olarak Hb kütlesinde %5'lik bir artışı engellemesine rağmen maksimal 4 dakikalık efor da %4'lük bir artış yaşandığı, hızlandırılmış eritropoezin YYDA'nın performansı artırdığı tek mekanizma olmadığını ayrıca, Hb kütlesindeki artışların, yüksek yoğunluklu egzersize aerobik katkı sağlıyor olabileceğini bildirmişlerdir. Robach vd. (2006), YYDA'nın sporcularda aerobik performansı artırıp artırmadığını ve etkisinin 2 hafta kadar sürüp sürmeyeceğini araştırmışlardır. 18 yüzücünün kontrol grubu normal irtifa havasında ve deney grubu, hipoksik odalarda uyurken/yaşarken 1.200 m'de 13 gün, 2.500 m simüle yükseklikte 5 gün ve ardından 3.000 m simüle yükseklikte 8 gün, ayrıca bir günde 16 saat boyunca antrenmana tabi tutulmuşlar ve yaşamışlardır. Aerobik performansı düzeyleri için, VO₂ maks ölçümü ve dayanıklılık performansını 2.000 m zaman denemesi şeklinde iki yüzme denemesine tabi tutmuşlar. Sonuç olarak YYDA'nın aerobik performansta eş zamanlı bir iyileşme olmaksızın kırmızı hücre üretimini uyurabileceğini göstermekte olup YYDA'nın uzun süreli faydasının oluşmamasından dolayı, kısa zaman dilimindeki hedefler için uygun ancak uzun vadeli hedefler için tavsiye edilmeyeceğini bildirmişlerdir. Yüksek irtifa antrenmana bireysel reaksiyonlarla ilişkili çeşitli faktörler belirlenmiştir ve hipoksik antrenmandan verim alma olasılığı en yüksek olan elit sporcuları belirlemeye yönelik metotlar araştırılmaya devam etmektedir.

Millet & Brocherie, (2020) araştırmalarında şu üç soruya yanıt aramışlardır 1. Elite sporcularda farklı hipoksik yöntemlerin kısa veya uzun vadede karşıt kötü adaptasyonun (maladaptasyon) faydalarını aştığına dair kanıtlar var mı?; 2. Elite sporcularda hipoksik eğitimin faydalı olduğunu destekleyen sağlam veriler var mı?; 3. elite sporcularda hipoksik eğitimin faydalı olmadığını gösteren sağlam veriler var mı?. Araştırmaları sonucunda yükseklik maruziyeti ile ilişkili bazı uyumsuz mekanizmaların olduğu, ancak çoğu elit sporcular tarafından önerilen ve kullanılan koşullar (yükseklik şiddeti, maruz kalma süresi, ...) ve yöntemlerle ilgili olmadığı, yükseklikten kaynaklanan alyuvar oluşumuna ait olan (eritropoetik) etkiler ve O₂ taşıma kapasitesindeki iyileşmeler, hipoksik doz yeterince önemli olduğu sürece çoğu sporda gözlemleneceği, aralıklı sporlarda yeni etkili hipoksik yöntemler bulunduğu ve yükseklik antrenmanının yalnızca yüksekte yaşa düşüğe antrenman yap yönteminin etkisizliğini rapor eden çoğu çelişkili çalışmanın sağlamlığının şüpheli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde en az 21 gün boyunca daha düşük irtifalarda antrenman yaparken günde 12 saatten fazla süreyle yeterince yüksek irtifada (2.000-3.000m) yaşamak önerilmektedir. Ancak yarışmayla ilgili irtifa antrenmanının zamanlaması hala tartışılmaktadır (Sinex & Chapman, 2015). Elde edilen bilgiler dikkate alındığında, sporcuların yarar sağlaması için 2000 m veya daha yüksek bir irtifada yaşamaları gerektiği görülmektedir (Bonetti & Hopkins, 2009). Gatterer (2020), yüksek rakımda antrenman yapmanın, yüksek rakımda yarışıldığında dayanıklılık performansını artırdığını ancak, deniz seviyesi performansını artırmak amaçlı ise literatür tartışmalı olduğunu, en yaygın kullanılan antrenman metodolojisinin de YYDA kavramı olduğunu bildirmişlerdir. Bu tür antrenman yapan sporcuların, yüksek rakımda (2000-2500 m) ortalama hafta 3-4 hafta boyunca yaşadıkları ve deniz seviyesine yakın rakımlarda antrenman yaptıklarını bildirmiştir. Bu kavramın zaten yüksek Hb kütlesine sahip olan elit sporcuların O₂ taşıma kapasitelerini daha da artırmayacağı ve dolayısıyla performanslarını artırmayacağı da son zamanlarda sorgulanmıştır. Literatürde son yıllarda, ek yüksek rakımda antrenman stratejileri olarak tekrarlayan sprint antrenmanı kavramının geliştirilmesine ve daha da ileri giderek YYDA ile tekrarlayan sprint antrenmanı birleştirilmiştir. Ancak, YYDA gibi, tekrarlayan sprint antrenmanı kavramı da son yıllarda sorgulanmış ve bu da kesin bir cevabı olmayan bir bilimsel tartışmaya yol açmıştır. Özetle, bilimsel bir bakış açısından, deniz seviyesi performansını artırmak için yüksek rakımda antrenman yapmanın verimliliği günümüzde net olarak ne doğrulanabilmiş ne de çürütülebilmştir.

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek irtifa antrenman metodolojileri dayanıklılık sporlarında temel bir stratejisi haline gelmiş olup, günümüzde yüksek irtifada yaşa-düşük irtifada antrenman yap YYDA, düşüğe yaşa, yüksekte antrenman yap DYYA ya da yüksekte yaşa-yüksekte antrenman yap YYA gibi farklı metotlar denenmekte olduğu en yaygın kullanılan metot'un ise YYDA olduğu görülmekle, performansın geliştirmesi açısından en uygun metot hala belirsizliğini koruduğu sonucun ulaşılmıştır. Ayrıca yüksek rakımda yapılan

antrenmanların deniz seviyesi performansını olumsuz yönde etkileyebileceği görülmektedir. Bu nedenle deniz seviyesindeki yarışmalar için YYDA, yüksek rakımdaki yarışmalar için ise YYYYA veya DYYA metotları denenmelidir. Yüksek irtifa antrenmanlarının en az 2000 metre ve üzerinde uygulanması ve en az üç hafta kalınması uygun görünse de performansı artırmak için en uygun yükseklik ve süre konusundaki belirsizlikler devam etmektedir. Yüksek irtifada antrenmanlarının performansa etkisi için hipoksik koşulların, aklimatizasyonun, atmosfer basıncının ve hiperventilasyonun temel rol oynadığını; yüksek irtifada performans artışının azalan parsiyel oksijen basıncından PO₂ dolayı yetersiz düzeyde oksijen O₂ elde edilmesi ve dolayısıyla aklimatizasyon mekanizmasının etkilenmesi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Yüksek irtifada 3 hafta içerisinde kalp atım hızında KH artış, atım hacminde azalma, kırmızı kan hücrelerinin sayısında, hemoglobin Hb konsantrasyonunda ve mitokondri yoğunluğunda artış olduğu görülmüştür. Dolayısıyla EPO üretimi uyarılarak eritrosit miktarında artış meydana gelir ve bu da maksimum oksijen alımını VO₂maks ve kanın oksijen taşıma kapasitesini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca arteriyel CO₂ seviyelerinin düştüğü ve kanın alkalitesini arttığı, kan glukozu, insulin ve kortizol konsantrasyonlarında belirgin bir artış yaşandığı, görülmekle kırmızı kan hücrelerinin sayısındaki artış, kasın kasılma mekaniği verimliliğinde artışa ve daha düşük LA düzeyine neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yüksek irtifada antrenmanın anaerobik performansa olumsuz bir etkisinin olmadığı, dayanıklılık performansını artırabileceğini doğrulanmakla deniz seviyesindeki performans için etkisi tartışmalıdır. Ayrıca yüksek irtifa antrenmanlarının yüksek Hb kütlesine sahip olan elit sporcuların O₂ taşıma kapasitelerini daha da artırmayacağı ve dolayısıyla performanslarını artırmayacağı da son zamanlarda sorgulanmıştır. Bundan sonraki yüksek irtifa metodolojileri üzerine yapılacak çalışmalarda çift kör, plasebo kontrollü, çapraz deneme önerilmesinin yanı sıra yükseltinin, kalınan sürenin, sporcuların mevcut performans düzeylerinin ve ayrıca mevsimsel farklılıkların da dikkate alınması önermekteyiz.

KAYNAKÇA

- Acs, Z., Bori, Z., Takeda, M., Osvath, P., Berkes, I., Taylor, A. W., ... & Radak, Z. (2014). High altitude exposure alters gene expression levels of DNA repair enzymes, and modulates fatty acid metabolism by SIRT4 induction in human skeletal muscle. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 196, 33-37.
- Açıkada C. & Ergen E. (1990). *Bilim ve spor*, Ankara, Büro-tek ofset matbaacılık, 67-69.
- Adams, W. C., Bernauer, E. M., Dill, D. B., & Bomar Jr, J. B. (1975). Effects of equivalent sea-level and altitude training on VO₂max and running performance. *Journal of Applied Physiology*, 39(2), 262-266.
- Bahenský, P., Bunc, V., Tlustý, P., & Grosicki, G. J. (2020). Effect of an eleven-day altitude training program on aerobic and anaerobic performance in adolescent runners. *Medicina*, 56(4), 184.
- Biol, A., Akalan, C., Akça F. & Dicle, A. (2018). Hipoksi ortamda akut ve kronik tekrarlı sprint uygulamalarının bazı fizyolojik parametreler ve performans üzerine etkileri. *Sportmetre Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 16(4), 61-81.
- Bonetti, D. L., Hopkins, W. G., & Kilding, A. E. (2006). High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(3), 246-260.
- Bonetti, D. L., & Hopkins, W. G. (2009). Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Medicine*, 39, 107-127.
- Braun, B. (2008). Effects of high altitude on substrate use and metabolic economy: cause and effect?. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(8), 1495-1500.
- Brugniaux, J. V., Schmitt, L., Robach, P., Jeanvoine, H., Zimmermann, H., Nicolet, G., ... & Richalet, J. P. (2006). Living high-training low: tolerance and acclimatization in elite endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 96, 66-77.
- Buzdağlı Y. & Koz M. (2019). Yükseltide spor ve fizyolojik etkileri. *Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 21(4), 52-68.
- Calbet, J. A., Rådegran, G., Boushel, R., Søndergaard, H., Saltin, B., & Wagner, P. D. (2002). Effect of blood haemoglobin concentration on VO₂, max and cardiovascular function in lowlanders acclimated to 5260 m. *The Journal of Physiology*, 545(2), 715-728.
- Cerit, M., & Erdoğan, M. (2019). Yüksek irtifa fizyolojisi ve adaptasyonun askerî fiziksel hazır bulunurluk seviyesine etkilerinin değerlendirilmesi. *Kara Harp Okulu Bilim Dergisi*, 29(1), 1-15.

- Cicavoğlu, H. E., Kaya, C., & Cerit, M. (2021). Effects of genetic factors on high altitude training performance. *Genetics & Applications*, 5(1), 2-9.
- Köktaş E. (2022). Yüksek irtifa ve antrenmanve performans. Kul M., Erbaş Ü., Ceylan M.A. (Ed.) , *Farklı boyutlarıyla spor araştırmaları -3*. (215-226). Akademisyen Kitabevi. Ankara.
- de Paula, P. & Niebauer, J. (2012). Effects of high altitude training on exercise capacity: fact or myth. *Sleep and Breathing*, 16, 233-239.
- Dufour, S. P., Ponsot, E., Zoll, J., Doutreleau, S., Lonsdorfer-Wolf, E., Geny, B., ... & Lonsdorfer, J. (2006). Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners. I. Improvement in aerobic performance capacity. *Journal of Applied Physiology*, 100(4), 1238-1248.
- Ergen, E. (Ed) (2007). *Egzersiz fizyolojisi ders kitabı*. Nobel yayın dağıtım. Ankara.
- Garvican, L. A., Pottgiesser, T., Martin, D. T., Schumacher, Y. O., Barras, M., & Gore, C. J. (2011). The contribution of haemoglobin mass to increases in cycling performance induced by simulated LH TL. *European Journal of Applied Physiology*, 111, 1089-1101.
- Girard O., Brocherie F. & Millet G.P. (2017). Effects of altitude/hypoxia on single- and multiplesprint performance: a comprehensive review. *Sports Medicine* 47, 931-1949.
- Hamlin, M. J., & Hellemans, J. (2007). Effect of intermittent normobaric hypoxic exposure at rest on haematological, physiological, and performance parameters in multi-sport athletes. *Journal of Sports Sciences*, 25(4), 431-441.
- Hill, N. E., Stacey, M. J., & Woods, D. (2011). Energy at high altitude. *BMJ Military Health*, 157(1), 43-48.
- Hinckson, E. A., Hopkins, W. G., Downey, B. M., & Smith, T. B. R. J. (2006). The effect of intermittent hypoxic training via a hypoxic inhaler on physiological and performance measures in rowers: a pilot study. *Journal of Science and Medicine In Sport*, 9(1-2), 177-180.
- Hinckson, E. A., Hopkins, W. G., Fleming, J. S., Edwards, T., Pfitzinger, P., & Hellemans, J. (2005). Sea-level performance in runners using altitude tents: a field study. *Journal of Science and Medicine In Sport*, 8(4), 451-457.
- Hooper, T., & Mellor, A. (2011). Cardiovascular physiology at high altitude. *BMJ Military Health*, 157(1), 23-28.
- Kenney, W. L., Wilmore, J. H. & Costill D. L. (2012). *Exercise at altitude. physiology of sport and exercise*. 5th ed. Champaign, IL: Human Kinetics; p.309-29.
- 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.
- Levine, B. D., & Stray-Gundersen, J. (2005). Point: positive effects of intermittent hypoxia (live high: train low) on exercise performance are mediated primarily by augmented red cell volume. *Journal of Applied Physiology*, 99(5), 2053-2055.
- Marzorati, M. (2020). Altitude training and endurance and ultra-endurance performance. *Muscles, Ligaments & Tendons Journal (MLTJ)*, 10(2).
- Millet, G. P., & Brocherie, F. (2020). Hypoxic training is beneficial in elite athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(2), 515-518.
- Morton, J. P., & Cable, N. T. (2005). The effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance. *Ergonomics*, 48(11-14), 1535-1546.
- Murathan, F. & Aktuğ, Z. B. (2021) Yüksek irtifa ve egzersiz. Azize Bingöl Diedhiou (Ed.), *Antrenman Yöntemleri* (91-111). Efa akademi yayınevi.
- Murray, A. J. (2016). Energy metabolism and the high-altitude environment. *Experimental Physiology*, 101(1), 23-27.
- Paralıklar S.J. & Paralıklar J.H. (2010). High-altitude medicine. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*,14(1), 6–12.
- Park, H. Y., Kim, S. & Nam, S. S. (2017). Four-week “living high training low” program enhances 3000-m and 5000-m time trials by improving energy metabolism during submaximal exercise in athletes. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 21(1), 1.

- Park, H. Y., Nam, S. S., Tanaka, H., & Lee, D. J. (2016). Hemodynamic, hematological, and hormonal responses to submaximal exercise in normobaric hypoxia in pubescent girls. *Pediatric Exercise Science*, 28(3), 417-422.
- Parodi, J. B., Ramchandani, R., Zhou, Z., Chango, D. X., Acunzo, R., Liblik, K., ... & Baranchuk, A. (2022). A systematic review of electrocardiographic changes in healthy high-altitude populations. *Trends In Cardiovascular Medicine*.
- Ramchandani, R., Zhou, Z., Parodi, J. B., Farina, J. M., Liblik, K., Sotomayor, J., ... & Baranchuk, A. (2023). A systematic review of electrocardiographic changes in populations temporarily ascending to high altitudes. *Current Problems In Cardiology*, 48(5), 101630.
- Reynafarje, C., Lozano, R. & Valdivieso J. (1959). The polycythemia of high altitudes: iron metabolism and related aspects. *Blood*, 14(4), 433-455.
- Robach, P., Schmitt, L., Brugniaux, J. V., Roels, B., Millet, G., Hellard, P., ... & Richalet, J. P. (2006). Living high–training low: effect on erythropoiesis and aerobic performance in highly-trained swimmers. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 423-433.
- Roberts, A. C., Reeves, J. T., Butterfield, G. E., Mazzeo, R. S., Sutton, J. R., Wolfel, E. E., & Brooks, G. A. (1996). Altitude and beta-blockade augment glucose utilization during submaximal exercise. *Journal of Applied Physiology*, 80(2), 605-615.
- Rodríguez, F. A., Truijens, M. J., Townsend, N. E., Stray-Gundersen, J., Gore, C. J., & Levine, B. D. (2007). Performance of runners and swimmers after four weeks of intermittent hypobaric hypoxic exposure plus sea level training. *Journal of Applied Physiology*, 103(5), 1523-1535.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., & Gore, C. J. (2009). Endurance training at altitude. *High Altitude Medicine & Biology*, 10(2), 135-148.
- Sawhney, R. C., Malhotra, A. S., & Singh, T. (1991). Glucoregulatory hormones in man at high altitude. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 62, 286-291.
- Sinex, J. A., & Chapman, R. F. (2015). Hypoxic training methods for improving endurance exercise performance. *Journal of Sport and Health Science*, 4(4), 325-332.
- Stray-Gundersen, J., Chapman, R. F., & Levine, B. D. (2001). “Living high-training low” altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *Journal of Applied Physiology*, 91(3), 1113-1120.
- Sucec, A. (1996). The effect of moderate altitude on endurance running events in the Mexico Olympics. A Paper presented at The 1996 International Pre Olympic Scientific Congress, Dallas, TX.
- Svedenhag, J., Piehlp-Aulin, K., Skog, C., & Saltin, B. (1997). Increased left ventricular muscle mass after long-term altitude training in athletes. *Acta Physiologica Scandinavica*, 161(1), 63-70.
- Ventura, M., Jordi, I., & Ferran, A. (2000). Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimation and improves the lactate threshold. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 71(2), 125-30.
- Wang, S., Shao, Z., & Li, J. (2022). The influence of variation in altitude on athletic performance in long-distance runners. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 28, 584-586.
- West, J., Schoene, R., Luks, A., & Milledge, J. (2012). *High altitude medicine and physiology 5E*. CRC press.
- Wolski, L.A., McKenzie, D.C. & Wenger, H.A. (1996). Altitude training for improvements in sea level performance: is there scientific evidence of benefit?. *Sports Medicine*, 22, 251-263.
- Wrynn A. M. (2013). *A debt was paid off in tears: Science, IOC politics and the debate about high altitude in the 1968 Mexico City Olympics*. In *Olympism: The global vision*. Routledge. 65-85.
- Zinker B.A., Namdaran K., Wilson R., Lacy D.B. & Wasserman D.H. (1994). Acute adaptation of carbohydrate metabolism to decreased arterial pO₂. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 266(6), 921-929.