

Matematiksel Kritik Eşik Kavramı

Mathematical Critical Threshold Concepts

Derleme Makale

Özgür ÖZKAYA, Görkem Aybars BALCI, Muzaffer ÇOLAKOĞLU
Ege Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü

ÖZ

Direnç egzersizlerinde kritik tork (KT) ve bu değerlerin zaman-tork hiperbolik modelindeki eğim sabitini veren anaerobik iş kapasitesi (T'), egzersiz şiddeti ve bitkinlik süresi arasındaki ters ilişkiyi ortaya koymuştur. Sonraki yıllarda, bu parametrelerin büyük kas gruplarının katılımıyla gerçekleştirilen egzersizlere uyarlanmasıyla kritik güç (KG) ve kritik hız (KH) ile bu kriterlere ait fonksiyonlar (sırasıyla W' ve D') tanımlanmıştır. Bu kavramlar "kritik bir metabolik oran" olarak bilinen kritik eşik (KE) değerini verir. Matematiksel temelli bu KE, "yorgunluk oluşmadan uzun süreler devam ettirilebilen en yüksek oran" olarak nitelendirilir. Bu değer " $\dot{V}O_2$ 'nin stabil tutulabildiği en yüksek egzersiz şiddeti" olarak fizyolojik bir temele oturtulmuştur. Dolayısıyla KE, çok ağırdan (-very heavy) şiddetli (-severe) egzersiz alanına geçişin sınırı olarak kabul edilir. KE belirlemede kullanılan sabit şiddetli egzersiz sayıları genellikle üç ile yedi arasında değişir. Güvenilir ve geçerli bir KE tahmin etmede seçilecek egzersiz şiddetlerinin, şiddetli egzersiz alanına ait olup, 1-2 dakikadan 10-12 dakikaya değişen sürelerde bitkinlik yaratacak düzeylerde olması gerekir. Ancak matematiksel teorilerle açıklanan KE bir miktar düşük geçerliliğe sahip bir performans bileşenidir. KE üzeri egzersiz şiddetlerinde bitkinliğe kadar $\dot{V}O_2$ 'de izlenen yavaş komponentin her durumda $\dot{V}O_{2max}$ ile sonlanmayabileceği gösterilmiştir. Bu derleme, ilgili

ABSTRACT

Critical torque during resistance trainings and its asymptotic slope constant of time-torque hyperbolic equation as anaerobic work capacity (T'), manifested an inverse relationship between exercise intensity and time limit. In the following years, by means of the adaptations of these parameters to exercises performed with large muscle involvements, critical power, critical velocity, and their mathematical functions were identified as W' and D' . Those concepts have given critical threshold (CT) known as a "critical metabolic rate". Mathematically based CT is identified as "the highest rate that can be sustained for a very long time without fatigue". CT has been based upon a physiological basis by "the highest exercise intensity that can be remained a stable $\dot{V}O_2$ ". Thereby, CT represents a boundary that separates exercise intensity domains between very heavy and severe. The number of constant-intensity exhausted exercises to define the CT mostly vary between three and seven. A number of exercises within the severe zone that can be caused exhaustion within 1-2 to 10-12 minutes, should be adjusted in order to evaluate a reliable and valid CT. On the other hand, mathematically based CT as a performance criterion has a lack of accuracy. It was shown that slow component of $\dot{V}O_2$ may not always reach to $\dot{V}O_{2max}$ via exercises to volitional exhaustion performed with supra-critical threshold. This review was prepared to

kavramların teorik ve pratik temellerini açıkladıktan sonra, gerçek bir kritik eşik belirlemenin inceliklerini aktarmak amacıyla hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

VO_2 'de denge, Yavaş komponent.

Key Words

VO_2 Steady-state, Slow component.

GİRİŞ

Bilindiği gibi egzersiz şiddeti ve kapsamı ters orantılıdır. Uygulanan tork, yapılan iş, güç üretimi ya da hız gibi şiddet kavramlarıyla bitkinlik zamanına ($t_{lim} = T'/$ (Tork – KT) ait hiperbolik ilişki; eşitliğiyle ortaya konmuştur (Monod ve Scherrer, 1965). Burada KT, kritik tork değerini, T' (T prime) ise anaerobik iş kapasitesini verir. Sonrasında büyük kas gruplarının işe dahil olduğu egzersizler için kritik güç (KG) ve yine bu ilişkinin eğim sabiti olarak anaerobik iş kapasitesi yani W' (W prime) (Moritani ve diğ., 1981) ile kritik hız (KH) ve anaerobik koşu kapasitesi yani D' (D prime) (Hughson ve diğ., 1984) önemli performans parametreleri olarak gösterilmiştir. Bu şiddet düzeyleri kritik bir metabolik eşiği (KE) işaret eder. Matematiksel KE “yorgunluk oluşmadan uzun süreler devam ettirilebilen en yüksek oran” olarak değerlendirilmiştir. Bu da egzersizin yorgunluk oluşmadan uzun süre devam ettirilebileceği en yüksek metabolizma düzeyidir (Poole ve diğ., 2016). Diğer yandan KE kavramı, “ $\dot{V}O_2$ 'nin stabil tutulabildiği en yüksek egzersiz şiddeti” olarak fizyolojik bir temele dayandırılmıştır (Poole ve diğ., 1988). KE geçildiğinde $\dot{V}O_2$ 'nin yavaş komponentinde denge koşulları ortadan kalkar ve $\dot{V}O_{2maks}$ 'a gidilir (Barstow ve Mole, 1991; Billat ve diğ., 1998; Poole ve diğ., 1988; Roston ve diğ., 1987; Sawyer ve diğ., 2012). Şiddetli egzersiz alanında ATP'nin yeniden sentezinde fosforjen sistem ve glikolizin toplam enerji üretimine oransal katkı payları ciddi oranda artar, verim bozulur ve iş yapabilme kapasitesi dramatik bir şekilde düşer (Jones ve diğ., 2010; Poole ve diğ., 1988; Whipp, 1994). Dolayısıyla KE kavramı günümüze kadar maksimal laktat dengesi (MLD), laktat dönüm (kırılma) noktası (LDN), 4 mmol sabit laktat eşiği ($LE_{4\text{-mmol}}$), ikinci solunumsal (anaerobik) eşik (SE_2), deoksi-hemoglobinde kı-

rlama noktası ($[HHb]_{KN}$), solunum kompanzasyon noktası (SKN), EMG'ye dayalı yorgunluk eşiği, VO_{2maks} veren ilk hız olan maksimal aerobik hız (MAH), vb. kriterlerle ilişkilendirilmiştir (Billat ve diğ., 1998; Keir ve diğ., 2015; Hill, 1993; Jones ve diğ., 2010; Poole ve diğ., 1988; Poole ve diğ., 2016; Poole ve Jones, 2017). KE iyi antrene bireylerde genellikle ~%80-90 $\dot{V}O_{2maks}$ dolaylarında görülürken, fiziksel olarak aktif bireylerde ~%70-80 $\dot{V}O_{2maks}$ dolaylarına karşılık gelir (Poole ve diğ., 2016). Bu düzeyler VO_2 cinsinden solunumsal anaerobik eşikle karakterize VCO_2 - VO_2 'de kırılma (v-slope) ve VO_{2maks} arası farkın (Δ) %50'si dolaylarıdır ($\Delta\%50 VO_2$). Kademe- li bir testten elde edilebilen ve aslı V_E - VCO_2 'de kırılmayla karakterize solunumsal kompanzasyon noktası (SKN) değerinin ~KE'ye karşılık geldiğini gösteren önemli bulgular mevcuttur (Bergstrom ve diğ., 2013^a; Bergstrom ve diğ., 2013^b; Dekerle ve diğ., 2003). Diğer yandan büyük kas gruplarına ait egzersizlerde, W' (anaerobik iş kapasitesi) ve D' (anaerobik koşu kapasitesi) değerleri efor sonu zirve total kan laktatı, en büyük egzersiz sonu O_2 borcu ve 30 saniye maksimal yüklenmeli Wingate testine ait ortalama güç üretimiyle ilişkilidir (Hill, 1993; Jones ve diğ., 2010; Poole ve diğ., 2016). Geçerli ve güvenilir kriterler belirlemede kullanılacak tüketici egzersizler genellikle 1-2 dakikadan 10-12 dakikaya değişen t_{lim} düzeylerinde uygulanır (Hill, 1993). Genellikle 3'den 7'ye kadar değişen sayıda bitkinlikle sonlanan şiddetli egzersiz yeterli kabul edilir (Hughson ve diğ., 1984). Üst düzey antrene dayanıklılık sporcularının saha performanslarına göre KH düzeyleri 30 dakika dolaylarında t_{lim} oluşturan 10000 metre koşu hızıyla, bisikletçilerde ise zamana karşı 60 dakika performansıyla (time-trial; TT) ilişkili bulunmuştur (Vandewalle ve diğ., 1997).

Ancak KG belirlemede kullanılan matematiksel model farklılığının, saptanan güç değerlerini ~%20 farklılaştırdığı rapor edilmiştir (Gaesser ve diğ., 1995). Benzer şekilde KH belirlemede kullanılan matematiksel model değiştiğinde bulunan hızlar %30'a kadar değişebilir (Housh ve diğ., 2001). KT için rapor edilen değişim oranları ise, farklılığın %50'ye kadar çıkabileceğini gösterir türdedir (Hendrix ve diğ., 2009). Diğer yandan bu kavramların anaerobik kapasiteye ait fonksiyonlarındaki farklılık daha da derindir. Örneğin, aynı çalışma grubu için açıklanan W' ortalamalarına ait değerler bir çalışmada ~20 kJ'den ~60 kJ'e kadar (%300) değişmiştir (Gaesser ve diğ., 1995). Kullanılan matematiksel modelin türü dışında, yapılan tüketici testlere konsantrasyon düzeyi, bu testler için seçilecek hızlar ve aktivite paterni değiştiğinde, elde edilen değerler de farklılaşır (Vandewalle ve diğ., 1997). Yapılan önemli birkaç çalışmada, matematiksel eşitliklerle bulunan KE'nin üzerindeki egzersiz şiddetlerinde bitkinlikle sonlanan testlerde bile $\dot{V}O_2$ 'de yavaş komponentin her zaman $\dot{V}O_{2maks}$ 'a gitmeyebileceği gösterilmiştir (Billat ve diğ., 1998^a; Billat ve diğ., 1998^b; Saweyer ve diğ., 2017). Dolayısıyla çok sayıda tüketici egzersiz yaparak düşük geçerliliğe sahip matematiksel bir eşik değer bulmak yerine, egzersiz $\dot{V}O_2$ 'sinin $\dot{V}O_{2maks}$ 'a gitmeden stabil tutulabildiği en yüksek egzersiz şiddetine odaklanarak şüphelenilen şiddetlerde bitkinliğe kadar $\dot{V}O_2$ kinetiklerini analiz etmek daha doğru bir sonuç verebilir. Yapılacak bu tarz doğrulama testleri için, tek seansta kademeli bir testten elde edilebilen verilere dayalı olarak (i) $\dot{V}O_{2maks}$ 'ın fraksiyonel kullanım düzeylerini temel almak, (ii) VCO_2 - VO_2 'de kırılma ve VO_{2maks} arası $\Delta\%50$ VO_2 'ye karşılık gelen egzersiz şiddetini kullanmak ya da (iii) V_E - VCO_2 'de kırılma üzerinden SKN belirlemek referans alınabilir. Bu derleme, kritik eşik kavramlarını kısaca tanımlayarak bu parametrelerin belirlenmesinde kullanılan matematiksel modelleri tartışmaya açmak ve daha geçerli bir kritik eşik belirlemede kullanılabilecek yöntemleri tanıtarak doğrulama protokollerinin önemi vurgulamak amacıyla hazırlanmıştır.

Kritik Eşik Kavramına Tarihsel Bir Bakış

Jones ve diğerlerinin (2010) aktardığı kadarıyla, 2000 yıl önce dönemin en büyük askeri gücü olarak kabul edilen Romalı Lejyonerler intikallerinde ~19,6 kg ağırlığında yük taşıyarak askeri adımla 4,6 km·sa⁻¹ hızla yürütülürlerdi. Whipp ve diğerlerinin (1996 ve 1998) yaptığı analizlerde bu eforun 1,4-1,7 L O₂·dk⁻¹ dolaylarında bir fizyolojik yükte askerlerin kritik eşiklerinin hemen altında bir düzeye karşılık geldiği gösterildi. Bu düzeyler askerlerin kritik eşik değerlerinin hemen altıydı. O yıllarda bile, saatlerce sürdürülebilir bir efor için kritik bir üst sınır olduğu ve bu sınır aşıldığında iş yapabilme kapasitesinin önemli ölçüde düşeceği biliniyordu. Modern dünyada kritik eşik kavramının temelleri, 1900'lü yılların başlarına dünya rekorlarının analiz edildiği çalışmalarla atıldı (Henry, 1955; Hill, 1925; Kennelly, 1906; Meade, 1916). Bu raporlarda aktivite şiddeti ve kapsamı arasında doğrusal olmayan hiperbolik bir ilişki olduğu gösterildi. 1927 yılında Hill, sürdürülebilir en yüksek hızın; maksimum oksijen kullanım düzeyi ve tolere edilebilir en yüksek oksijen borcu gibi kavramlarla ilişkili olduğunu göstermiştir. KT ve KG kavramlarına ait ilk orijinal yayın Monod ve Scherrer tarafından (1965) yapılmıştır. Bu çalışmada, statik ve dinamik direnç uygulamalarına ait hiperbolik eşitliğin kavuşmazı (asymptote) KT ve bu eşitliğin bir fonksiyonu olarak eğim sabiti T' olarak değerlendirilmiştir. Burada KT, yorgunluk oluşmadan uzun süre sürdürülebilir maksimal izometrik tork değeridir. Diğer yandan aynı hiperbolik ilişkiyle direnç egzersizlerinde yapılan maksimum iş ve iş zamanlarına dayalı KG ve W' hesaplanmıştır. Burada ilişkinin kavuşmazı KG'yi verirken, aynı ilişkinin eğim sabiti W' (maksimum iş kapasitesi) değerini verir. KG kavramını genişleterek tüm vücut egzersizleri için önemini vurgulayan ilk çalışma, Moritani ve diğerleri tarafından 1981 yılında yayımlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, KG altındaki eforlara ait bitkinlik glikojen kullanımı ve dehidrasyon ile yakından ilişki-liyken, KG üzerindeki hızlarda tükenmeye etkili dominant faktörün asidoz olduğu belirlenmiştir. Burada KG; solunumsal anaerobik eşiği işaret

ederken, W' ; anaerobik kapasiteye ait bir veri sunmaktaydı. Yine aynı çalışmadan elde edilen bilgiye göre, hipoksik koşullar W' değerini etkilemiyordu. Hughson ve diğerleri 1984 yılında, KG kavramını koşuya uyarlayarak KH'yi ve bu hıza ait anaerobik koşu kapasitesi yani D' değerini hesaplamışlardır. Bu araştırmada KH, aerobik enerji katkısıyla sürdürülebilir en yüksek hız olarak tanımlanmıştır. KH'yi göstermede kullanılan ilk model, hıza karşı 1/zaman eşitliğidir ($v = KH + (D' \times 1/t_{lim})$) (Hughson ve diğ., 1984). Günümüzde direnç (Monod ve Scherrer, 1965), kürek (Hill ve diğ., 2003), bisiklet (Moritani ve diğ., 1981), vb. egzersizlerde KT ve KG; yüzme (Wakayoshi ve diğ., 1992^a; Wakayoshi ve diğ., 1992^b), koşu (Housh ve diğ., 1984) vb. tipte egzersizlerdeyse KH oldukça önemli bir performans kriteri olarak değerlendirilmektedir.

Kritik Eşik Belirlemede Kullanılan Matematiksel Modeller

KT'yi belirleyebilmek için sabit yüklü bitkinlikle sonlanan maksimum istemli izometrik kasılma egzersizlerinden elde edilen bitkinlik süreleri (s), tork (Nm) ya da yapılan toplam iş (kJ) gibi parametreler kullanılır. Statik egzersizlerde iş (W), tork ve t_{lim} 'in çarpımıyla bulunur. KT ve T' değerini belirlemede kullanılan beş temel eşitlik aşağıda gösterilmiştir (Hendrix ve diğ., 2009).

(i) Lineer toplam izometrik iş modeli

(Lineer İş Modeli)

$$W = T' + (KT \times t_{lim}) \quad \text{Eşitlik 1}$$

ilişkinin eğimi KT ve lineer ilişkinin y-ekseni uzantısı T' değeridir;

(ii) Lineer tork-1/zaman modeli

(Lineer Tork Modeli)

$$\text{Tork} = KT + (T' \times 1/t_{lim}) \quad \text{Eşitlik 2}$$

lineer ilişkinin y-ekseni uzantısı KT ve bu ilişkinin eğimi T' değeridir;

(iii) Non-linear zaman-tork modeli

(2-Parametrelili Non-linear Model)

$$t_{lim} = T' / (\text{Tork} - KT) \quad \text{Eşitlik 3}$$

modelde gösterilen ilişkinin kavuşmazı KT ve ilişkinin eğrilik derecesi T' değeridir;

(iv) Non-linear maksimum tork modeli

(3-Parametrelili Non-linear Model)

$$t_{lim} = T' / (\text{Tork} - KT) + \text{Tork}_{maks} \quad \text{Eşitlik 4}$$

ilişkinin kavuşmazı KT ve ilişkinin eğrilik derecesi T' değeridir; $t=0$ anında x-ekseni Tork_{maks} 'ı verir;

(v) Non-linear üstel model (Üstel Model)

$$\text{Tork} = KT + (\text{Tork}_{maks} - KT) + \exp(-t_{lim}/\text{tau}) \quad \text{Eşitlik 5}$$

ilişkinin kavuşmazı KT ve ilişkinin eğrilik derecesi T' değeridir; "tau" sabit zaman, " Tork_{maks} " güç ekseninin x-ekseni kesişimidir.

KG'yi belirleyebilmek için sabit yüklü tüketici egzersizden elde edilen bitkinlik süreleri (s), güç üretim düzeyleri (Watt) ya da yapılan toplam iş (kJ) gibi parametreler kullanılır. KG ve W' değerini belirlemede kullanılan beş temel eşitlik aşağıda gösterilmiştir (Gaesser ve diğ., 1995).

(i) Lineer iş-zaman modeli

(Lineer İş Modeli)

$$W = W' + (KG \times t_{lim}) \quad \text{Eşitlik 6}$$

ilişkinin eğimi, KG ve lineer ilişkinin y-ekseni uzantısı W' değeridir;

(ii) Lineer güç-1/zaman modeli

(Lineer Güç Modeli)

$$P = KG + (W' \times 1/t_{lim}) \quad \text{Eşitlik 7}$$

lineer ilişkinin y-ekseni uzantısı, KG ve bu ilişkinin eğimi W' değeridir;

(iii) Non-linear zaman-güç modeli

(2-Parametrelili Non-linear Model)

$$t_{lim} = W' / (P - KG) \quad \text{Eşitlik 8}$$

modelde gösterilen ilişkinin kavuşmazı KG ve ilişkinin eğrilik derecesi W' değeridir;

(iv) Non-linear maksimum güç modeli

(3-Parametrelili Non-linear Model)

$$t_{lim} = W' / (P - KG) + P_{maks} \quad \text{Eşitlik 9}$$

ilişkinin kavuşmazı KG ve ilişkinin eğrilik derecesi W' değeridir; $t=0$ anında x-ekseni P_{maks} 'ı verir;

(v) Non-linear üstel model (Üstel Model)

$$P = KG + (P_{maks} - KG) \times \exp(-t_{lim}/\tau) \quad \text{Eşitlik 10}$$

ilişkinin kavuşmazı KG ve ilişkinin eğrilik derecesi W' değeridir; " τ " sabit zaman, " P_{maks} " güç ekseninin x-ekseni kesişimidir.

KH ve D' belirlemede kullanılan modeller de aynı temellere dayanır. Ancak KH'ye ait veri girişinde sırasıyla güç yerine hız (v) ve iş yerine kat edilen toplam mesafe (d_{lim}) değeri kullanılır. KH ve D' değerini belirlemede kullanılan beş temel eşitlik aşağıda gösterilmiştir (Housh ve diğ., 2001).

(i) Linear hız-zaman modeli

(Linear Mesafe Modeli)

$$d = D' + (KH \times t_{lim}) \quad \text{Eşitlik 11}$$

ilişkinin eğimi, KH ve linear ilişkinin y-ekseni uzantısı D' değeridir;

(ii) Linear hız-1/zaman modeli

(Linear Hız Modeli)

$$v = KH + (D' \times 1 / t_{lim}) \quad \text{Eşitlik 12}$$

linear ilişkinin y-ekseni uzantısı, KH ve bu ilişkinin eğimi D' değeridir;

(iii) Non-linear zaman-hız modeli

(2-Parametrelili Non-linear Model)

$$t_{lim} = D' / (v - KH) \quad \text{Eşitlik 13}$$

modelde gösterilen ilişkinin kavuşmazı KH ve ilişkinin eğrilik derecesi D' değeridir;

(iv) Non-linear maksimum hız modeli

(3-Parametrelili Non-linear Model)

$$t_{lim} = D' / (v - KH) + v_{maks} \quad \text{Eşitlik 14}$$

ilişkinin kavuşmazı KH ve ilişkinin eğrilik derecesi D' değeridir; $t=0$ anında x-ekseni v_{maks} 'ı verir;

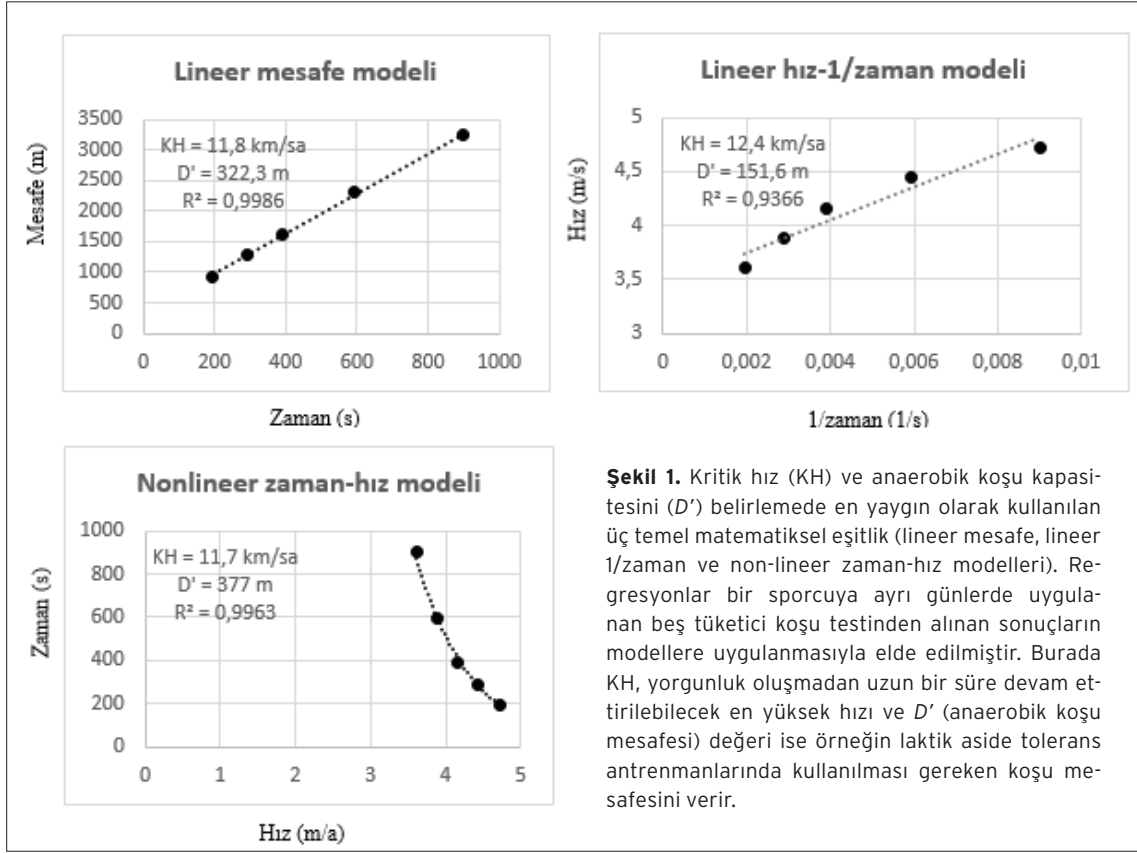
(v) Non-linear üstel model (Üstel Model)

$$v = KH + (v_{maks} - KH) \times \exp(-t_{lim}/\tau) \quad \text{Eşitlik 15}$$

ilişkinin kavuşmazı KH ve ilişkinin eğrilik derecesi D' değeridir; " τ " sabit zaman, " v_{maks} " hız ekseninin x-ekseni kesişimidir.

Modellerde Kullanılan Parametrelerin Elde Edilmesi

Bu kavramları belirlemede kullanılan matematiksel eşitliklerin güvenilirlik ve geçerlilik düzeylerini arttırmada en önemli faktörler; regresyonların elde edilmesinde kullanılacak egzersiz şiddetleri, egzersiz şiddetleriyle doğrudan ilintili tükenme süreleri ve kullanılacak tüketici egzersiz sayılarıdır (Vandewalle ve diğ., 1997). Geçerli ve güvenilir bir KT belirlemede kullanılacak egzersizler %30-80 maksimal istemli kasılma süresi dolaylarında uygulanırken (Hendrix ve diğ., 2009), KG için; ~%90-%130 PVO_{2maks} , KH için; ~%90-%120 vVO_{2maks} düzeylerinde, 1-2 dakikadan 10-12 dakikaya değişen t_{lim} değerleri veren egzersiz şiddetlerinde uygulanmalıdır (Billat ve diğ., 1998a; Gaesser ve diğ., 1995; Hill, 1993; Housh ve diğ., 2001). Söz konusu bitkinlik süreleri, VO_{2maks} ya da VO_{2pik} (doğrulanmış VO_{2maks} 'a %3-5 kadar yakın değer) veren "şiddetli" egzersizlere ait yelpazeyi işaret ettiğinden, VO_{2pik} 'e girilen en düşük ve halen VO_{2pik} veren en yüksek egzersiz şiddetlerinin kestirilmesi oldukça önemlidir. Genellikle üçten yediye kadar değişen sayılarda bitkinlikle sonlanan efor yeterli kabul edilir (Hughson ve diğ., 1984). İyi antrene bir sporcunun farklı günlerde beş farklı hızda tüketmeyle sonlanan testinden elde edilen verilerin üç temel matematiksel modele uygulanmasıyla bulunan KH ve D' değerleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kritik hız (KH) ve anaerobik koşu kapasitesini (D') belirlemede en yaygın olarak kullanılan üç temel matematiksel eşitlik (lineer mesafe, lineer 1/zaman ve non-lineer zaman-hız modelleri). Regresyonlar bir sporcuya ayrı günlerde uygulanan beş tüketici koşu testinden alınan sonuçların modellere uygulanmasıyla elde edilmiştir. Burada KH, yorgunluk oluşmadan uzun bir süre devam ettirilebilecek en yüksek hızı ve D' (anaerobik koşu mesafesi) değeri ise örneğin laktik aside tolerans antrenmanlarında kullanılması gereken koşu mesafesini verir.

Kullanılan Matematiksel Modellerin Geçerlilik Düzeyleri

İyi bir regresyon modeli için yüksek bir r^2 ve düşük bir kestirim standart hatası (KSH) gereklidir. Daha çok sayıda test, KSH'yi düşürür. Non-lineer modellerde kabul edilebilir KSH $<10\%$ iken, lineer modeller için bu değer $<5\%$ olarak kabul edilir (Hill, 1993). Lineer zaman, lineer 1/zaman, non-lineer zaman, non-lineer 3-parametrelili ve non-lineer üstel modelin geçerlilik göstergeleri sırasıyla $r^2=0,99-1,0$; $r^2=0,94-0,99$; $r^2=0,94-0,99$; $r^2=0,95-0,99$ ve $r^2=0,92-0,98$ olarak rapor edilmiştir (Housh ve diğ., 2001). Gaesser ve diğerlerinin 1995 yılında yayımladıkları önemli bir çalışmada KG'yi en düşük tahmin eden model 3-parametrelili non-lineer modelken (grup ortalaması 197 Watt), en yüksek KG veren model non-lineer üstel model (grup ortalaması 242 Watt) olarak gösterilmiştir. Benzer bir şekilde Housh ve diğerlerinin 2001 yılında yayımladıkları çalışmalarında,

KH'yi en düşük tahmin eden model non-lineer 3-parametrelili modelken (grup ortalaması $12,8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), en yüksek KH veren model yine non-lineer üstel model (grup ortalaması $15,3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$) olmuştur. Hem KG hem de KH'yi modelleyen çalışmalardan derlenen ortak sonuç, aynı test sonuçlarına uygulanan matematiksel model farklılaştıkça elde edilen KG ya da KH'nin $20-30\%$ farklılaşabildiğidir. Kademeli testlerde kullanılan güç ya da hız artışlarının her kademede $25-30 \text{ Watt}$ ve/veya $0,6-0,8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ dolaylarında yapıldığı düşünülürse, farklılaşan sonuçların nedeni önemli olabileceği görülür.

Performans Parametrelerinin Güvenilirlik ve Geçerlilik Düzeyleri

Genel olarak KG ya da KH kavramlarına ait güvenilirlik korelasyonu değerleri, W' ya da D' için rapor edilenlerden daha yüksektir. Örneğin beş farklı güç üretim düzeyinde tükenmeyle sonuçlanan egzersizlerin test-tekrar test sonuçlarının

değerlendirildiği bir çalışma, KG için 0,96 ve W' için 0,76 düzeylerinde sınıf içi korelasyon katsayısı (ICC) rapor etmiştir (Gaesser ve Wilson, 1988). Benzer çalışmalardan aktarılan güvenilirlik korelasyonları kritik eşikler ve bu eşiklere ait anaerobik fonksiyonları için genellikle $>0,90$ ve $>0,70$ olarak rapor edilmiştir (Hill, 1993; Smith ve Jones, 2001). Kritik eşik kavramlarına ait geçerlilik korelasyonları güvenilirlik ölçütlerine kıyasla daha düşük bulunur. Özellikle KG ve KH adına rapor edilen çelişkili bulgular mevcuttur. Jones ve diğerleri (2010) tarafından yayımlanmış bir derlemeye göre, önemli bir fizyolog olan Douglas R. Wilkie için; KG, VO_{2maks} 'in üzerinde bir güç değerini işaret ederken, aksine Moritani ve diğerlerine göre; KG, anaerobik eşik dolaylarında bir düzeyi verir. Aslına bakılırsa matematiksel temelli teorilere dayalı olarak saptanan kritik eşikler; direnç, bisiklet, yüzme ya da koşu egzersizlerinin aktivite yapılarındaki farklılıklar, matematiksel modellerden elde edilen sonuçların model değişikçe hatırı sayılır ölçüde değişiyor olması ve modele uygulanacak egzersiz şiddetlerinin seçiminde çok net standartlar olmamasına bağlı olarak sapar (Vandewalle ve diğ., 1997). Örneğin, KG belirlemede kullanılan tüketici egzersizlerde benimsenen farklı stratejilerin, sonuçları hatırı sayılır ölçüde değiştirdiğini göstermiştir (Black ve diğ., 2016; Leo ve diğ. 2017). Sporcuların tercihine bırakılan hız stratejilerinin (self pacing), sabit kadans ya da zamana karşı pedal çevirme stratejilerine kıyasla daha yüksek bir KG'ye neden olduğu bulunmuştur (Black ve diğ., 2015). Doğal olarak bu sonuçlar, KG'deki t_{lim} zamanlarına da doğrudan etkilidir. Genel olarak KG ve KH'nin test edilen aerobik kapasite göstergeleriyle korelasyonu $r=0,65-0,70$ aralığına kadar düşerken (Jenkins ve Quigley, 1991), W' ve D' değerlerinin anaerobik kapasite göstergeleriyle ilişkisi $r=0,70-0,75$ dolaylarındadır (Jenkins ve Quigley, 1991; Vandewalle ve diğ., 1989). Tüm çelişkilere rağmen, iyi antrene bisikletçilerde KG için açıklanan t_{lim} değerleri $\sim 50-60$ dakika dolaylarıdır (Vandewalle ve diğ., 1997). Diğer yandan elitlerde KH ile en ilişkili koşu performansı yaklaşık 30 dakikalık

efor süresiyle 10000 metre koşusu olarak kabul edilir (Billat ve diğ., 1998; Poole ve diğ., 1998; McLellan ve Cheung, 1992). Ancak elit olmayan gruplarda KH yaklaşık ~ 20 dakika dolaylarında sürdürülebilir. KT'nin sürdürülebilirliğiyle ilgili bilgi daha sınırlı olsa da, açıklanan t_{lim} zamanları ~ 50 dakika dolaylarıdır (Burnley ve diğ., 2012). KH ve KG düzeylerinde bitkinlik sonrası kan laktatı yanıtları $\sim 8-9$ $mmol \cdot L^{-1}$ olarak açıklanmıştır (Jenkins ve Quigley, 1990; Overend ve diğ., 1992). Kademeli testlerde 1-4 dakikalık kademe artışları sırasında KE'ye karşılık gelen şiddetlere ait kan laktatı yanıtlarının yaklaşık 5-6 $mmol \cdot L^{-1}$ aralığında olabileceği söylenebilir.

Kritik Eşik Belirlemede Kullanılan Endirekt Yöntemler

3-dakika maksimal yüklenmeli kritik güç

testi: 3-dakika maksimal yüklenmeli kritik güç testinin orijinali, doğrusal (linear) mod özelliğine sahip elektromanyetik dirençli bir bisiklet ergometresiyle uygulanır. Doğrusal modda ergometre volanına uygulanacak direnç, pedal çevrim sayısı ve bisiklet ergometresinin yazılımına girilen doğrusal faktöre bağlı olarak değişir. Doğrusal faktör; $(kadans^2) \times \Delta 50$ güç çıktısı formülüyle hesaplanır (Vanhatalo ve diğ., 2007). Burada kadans; aerobik güç testinde tercih edilen ortalama pedal çevrim sayısını, $\Delta 50$ ise; laktat eşikleriyle aerobik güç düzeylerinin ortalama güç çıktısını ifade eder. Yöntemin daha da pratik bir şekilde uygulanabilmesi adına bu faktörün hesaplanma şekli sırasıyla Bergstrom ve diğ., (2012); Clark ve diğ., (2012) ve Constantini ve diğ., (2014) tarafından modifiye edilmiştir (sırasıyla %4,5 VK; %3-5 VK ve $\Delta 50$ %kadans²). Teste aerobik güç düzeylerinin belirlendiği daha önceki test seansında sporcuların ortalama kadans tercihleri ile üç dakika süresince yüksüz pedal çevirerek başlanır. Sporculardan üç dakikalık yüksüz periyodun son 10 saniyesinde pedal çevrim hızını 110-120 rpm düzeyine çıkarması istenir. Üç dakikalık testin başlamasıyla birlikte testin sonuna kadar mümkün olan en yüksek rpm düzeylerinde kalınması gerekir. Üç dakikalık süre boyunca yüksek

düzeyde sözel teşvik desteği, testin protokol esaslarındandır. Test sırasında belirli bir tempo stratejisi uygulanmaması için katılımcılara test süresi ya da pedal çevrim hızı hakkında bilgi verilmmez. Testin son 30 saniyesindeki ortalama güç çıktısı indirekt KG değerini verir. Son 30 saniyeye ait bu değer, üç dakikalık test periyodu süresince en düşük güç üretim düzeyi olması gerekir. Testin orijinalinden elde edilen KG ve W' değerleri, beş farklı hızda bitkinlikle sonuçlanan testlerden elde edilen verilerin $W \cdot t$ ve $P \cdot 1/t$ lineer eşitliklerine uygulanmasıyla elde edilen KG ve W' değerleriyle ilişkilendirilmiştir. KG için açıklanan istatistikler 287 ± 55 'e kıyasla 287 ± 56 Watt ($p=0,37$; $r=0,99$; $KSH < 6$ Watt) ve W' içinse $15 \pm 4,7$ 'ye kıyasla $15 \pm 3,8$ kJ ($p=0,35$; $r=0,84$; $KSH < 2$ kJ) olarak rapor edilmiştir. Test ve tekrar-teste ait üç dakikalık baştan sona yüklenmeli uygulamalardan alınan KG ($ICC=0,93$; $CV \%7$; değişim 15 Watt) ve W' ($ICC=0,76$; $CV \%28$; değişim 2,9 kJ) değerleri oldukça güvenilir bulunmuştur (Johnson ve diğ., 2011).

Bitkinliğe kadar sürekli ve lineer arttırmalı kademeli testlerle kritik güç belirleme: Morton 1994 yılında bitkinliğe kadar sürekli ve lineer arttırmalı kademeli (ramp) testlerden elde edilen değişkenlere dayalı olarak, KG ve W' değerini tahmin etmek için alternatif bir yol önerilmiştir. Bu yöntemde ramp testi sırasında gerçekleştirilen toplam mekanik iş miktarı, testin sonlanma zamanı (t_{lim}) ve artan dirençle (S) ilişkilidir: $t_{lim}(s) = KG (Watt)/S (s) + \sqrt{2W' (j)/S (s)}$ Bu protokol oldukça hassas ve saniyelik yük artışları gerektirdiğinden, test yalnızca bilgisayar kontrollü ve elektromanyetik dirençli bir bisiklet ergometresi kullanılarak yapılabilmektedir. Teste sporcular yüksüz pedal çevirerek başlar. Yavaş testlerde yük artışları $0,25 W \cdot s^{-1}$ ($15 W \cdot dk^{-1}$), normal testlerde $0,50 W \cdot s^{-1}$ ($30 W \cdot dk^{-1}$) ve hızlı testlerde $0,75 W \cdot s^{-1}$ ($45 W \cdot dk^{-1}$) olacak şekilde ayarlanır (Leo ve diğ. 2017). Genellikle tercih edilen yük artışları $0,50 W \cdot s^{-1}$ dolaylarındadır (Black ve diğ., 2016). Testlerin başından sonuna verilen sözel motivasyon desteğinin geçerliliği arttırdığı rapor edilmiştir (Morton, 1994; Morton ve diğ., 1997). Bu pratik uygulamalardan

alınan KG değerlerinin, geleneksel yollarla belirlenen matematiksel eşitliklerle elde edilen KG değerleriyle yüksek ilişkili olduğu gösterilmiştir (Morton ve diğ., 1997; Black ve diğ., 2016). Ancak benzer şekillerde elde edilen W' değerlerinin ilişki düzeyi daha düşük bulunmuştur (Morton ve diğ., 1997; Black ve diğ. 2016). W' değerine ait düşük geçerlilik düzeyleri, bitkinliğe kadar sürekli ve lineer artan protokollerde kullanılan yüklerin aerobik metabolizmaya ait yükler olması ve dolayısıyla anaerobik metabolizmayı daha düşük değerlerle yansıttığı şeklinde açıklanabilmiştir (Black ve diğ., 2016; Vandewalle, 1995). Bitkinliğe kadar sürekli ve lineer yük artışı kademeli testlerde, hızlıca geçilen kademelere dayalı olarak oluşan kümülatif etkiler ve oksidatif inersinin sonuçları nasıl etkilediği ya da yöntemin tekrar test güvenilirliği etrafıca araştırılmamış konulardır.

Bitkinliğe kadar yapılan basamak (step) testleriyle kritik hız ya da güç belirleme: Bu değerlendirme, anaerobik eşiği geçerek bitkinliğe kadar yapılan kademeli bir testten elde edilen VO_2 'ye dayalı veriler üzerinden KH ya da KG için bir kestirim yapma imkânı sunar. Basitçe, kademeli bir testle değerlendirilebilen VCO_2 - VO_2 'de kırılma ya da diğer herhangi bir gaz değişim parametresine (V_E - VO_2 'de kırılma, vb.) dayalı olarak bulunan laktat eşiğiyle karşılık gelen VO_2 ile testin sonunda ulaşılan en yüksek 30 saniye ortalamasına ait VO_{2pik} arasındaki farkın (Δ) %50'si ($\Delta\%50$) kritik eşik olarak kabul edilebilir (Barstow ve diğ., 1996). Step testlerde oluşan oksidatif inersi ve önceki kademelerin birikim etkileri lineer yük artışı testlere kıyasla daha az olacağından, bu yöntem daha tercih edilir gibi görünmektedir. Gerçekten de ~2 dakikalık kademe artışlarının kullanıldığı bir basamak testi yapısında ulaşılan fizyolojik düzey, kullanılan egzersiz kademesini sürekli-lineer arttırmalı teste kıyasla daha doğru yansıtabilir.

Sabit mesafeli ya da sabit süreli testlerle kritik sürat belirleme: Laursen ve diğerleri (2007) dayanıklılık konusunda antrenmanlı uzun mesafe koşucularının 5000 ve 1500 metre zaman karşı performanslarını (sabit me-

safe) ve bu koşulların ortalama süratlerinde tükenene kadar alınan test sonuçlarını (sabit sürat) analiz etmişlerdir. Elde edilen bulgular da 5-km ve 1,5-km TT performanslarının değişim katsayıları sırasıyla %2 ve %3,3 olarak açıklanırken, tükenene kadar testlerde bu oranlar %15,1 ve 13,2'ye çıkmıştır. Dolayısıyla tempo duygusu gelişmiş sporcularda zamana karşı test sonuçları, belirli bir ortalama süratle tükenene kadar gitmeye kıyasla daha iyi bulunmuştur. Bu testlerde sonuçların yön değişiminden etkilenmemesi için, 400 metrelik olimpik (oval) koşu parkurları ya da olimpik yüzme havuzları kullanılır. Dolayısıyla bu tip testlerden elde edilen kriteri açıklamada öne çıkan kavram "hız" yerine "sürat" olduğundan, bu eşiği açıklamada tercih edilen terminoloji genellikle "kritik hız" yerine "kritik sürat" (KS) olmuştur, çünkü "aynı başlangıç noktasına geri dönen sporcunun hızı teorik olarak sıfır kabul edilir" (Galbraith ve diğ., 2011). KS belirleme testlerinde koşu için genellikle üç dakikadan 12 dakikaya (örneğin 1500 ve 3000 metre), yüzme için 30 saniyeden iki dakikaya (örneğin 200 ve 400 metre), bisiklet içinse üç dakikadan yine 12 dakikaya (örneğin 3 ve 12 dakikalık TT) kadar bitkinlikle sonlanan iki ya da daha fazla test yapılır (Dekerle ve diğ., 2002; Gaesse ve diğ. 1995; Galbraith ve diğ., 2014; Jenkins ve Quigley, 1991; Simpson ve Kordi, 2016; Wakayoshi ve diğ., 1992^a, Wakayoshi ve diğ., 1992^b). Testler sırasında sporculardan belirlenen her bir mesafeyi mümkün olan en kısa sürede tamamlamaları ya da belirli bir sürede mümkün olan en yüksek mesafeyi kat etmeleri istenir. Sporcuların hem aktivitenin yapılacağı ortama (örneğin; koşu pisti, yüzme havuzu, vb.) hem de ilgili mesafeleri tamamlayacakları hızlar ya da bitkinlik zamanlarına adapte olmaları oldukça önemlidir. Aksi takdirde yanlış tempoyla tamamlanan mesafelere ait süreler, yanlış bir kritik değer saptamayla sonuçlanabilir. Ayrıca, iki mesafe kullanılarak kritik bir eşik belirlenecekse, yapılacak testlerin sonlanma süreleri farkının en az beş dakika olmasına dikkat edilmesi gerektiği önerilmektedir (Housh ve diğ. 1990). Kat edilen mesafelerin farkının

(m) t_{lim} farkına (s) oranı, $m \cdot s^{-1}$ cinsinden kritik sürati verir (Dekerle ve diğ., 2002; Wakayoshi ve diğ., 1992^a). İlgili çalışmalar testlerin hassas bir şekilde uygulanması koşuluyla, yöntemin yüksek güvenilirlik ve geçerlilik düzeyleri verdiğini gösterilmiştir (Dekerle ve diğ., 2002; Galbraith ve diğ., 2011; Galbraith ve diğ., 2014). Bu testlerin ortam koşullarının standart olduğu iki farklı günde uygulanmasının daha doğru sonuç verebileceği iddia edilse de (de Lucas ve diğ., 2012), iyi antrene mesafecilerden alınan aynı güne ait tekrarlanan ölçüm sonuçları benzerdir (KS %1,7; D' %14,1 değişim) (Galbraith ve diğ., 2014). Yüzücülerde yapılan bir çalışmada KS ve matematiksel modellerden elde edilen KH ($>0,98$; $p<0,01$), 400 metre yüzme hızı ($r=0,998$; $p<0,01$), LE_{4-mmol} ($r=0,898$; $p<0,01$) yüksek ilişkili bulunmuştur (Wakayoshi ve diğ., 1992^a).

Geleneksel Kritik Hız'ın, VO_{2maks} 'da Kalınan En Uzun Zamanı Veren Hız (KH') Kavramına Uyarlanması

Billat ve diğerleri 1999 yılında yayımladıkları bir çalışmalarında, KH belirlemede kullanılan geleneksel ilişkiyi modifiye ederek VO_{2maks} 'da en uzun süre kalınan hızı (KH') bulmayı amaçlamışlardır. Çalışma VO_{2maks} 'da en çok vakit geçirilen hız, kademeli bir testin VO_{2maks} veren ilk kademesine karşılık gelen hız ($v_{VO2maks}$) olarak dikkate alınmıştır (Billat ve Koralsztejn, 1996). Diğer yandan standart KH belirlemede kullanılan tüketici egzersizler sırasında VO_{2maks} 'da kalınan toplam zaman ($t_{limVO2maks}$) ve bu zamanlarda kat edilen toplam mesafe ($d_{limVO2maks}$) arasında kurulacak ilişkinin KH' değerini vereceği varsayılmıştır. Bu doğrultuda altı erkek beden eğitimi öğrencisinin kademeli testlerde verdiği bireysel $v_{VO2maks}$ değerleri bulunduktan sonra, %90, %100, %120 ve %140 $v_{VO2maks}$ 'da bitkinlikle sonlanan dört testten alınan standart t_{lim} , d_{lim} ve devamında $t_{limVO_{2maks}}$ ve $d_{limVO_{2maks}}$ değerleri lineer hız-zaman eşitliğine uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, grubun ortalama KH ve D' değerleri sırasıyla $14 \text{ km} \cdot \text{sa}^{-1}$ ve 216 m olarak belirlenmiştir (anaerobik eşikle ilişkili $LDN = 13 \text{ km} \cdot \text{sa}^{-1}$). Bu testlerde kullanılan hızlara ait t_{lim} değerleri 12,2 dk, 5,6 dk, 2 dk

ve 1 dk; d_{lim} değerleri 3087 m, 1580 m, 696 m ve 481 m olarak hesaplanmıştır. Buna karşın t_{limVO_2maks} ortalamaları aynı testler için sırasıyla 15,8 s, 190 s, 73 s ve 18 s ve bu zamanlara ait d_{limVO_2maks} değerleri sırasıyla 70 m, 907 m, 425 m ve 113 m olarak bulunmuştur. Çalışmadan elde edilen veriler, KH' ile v_{VO_2maks} 'ın yüksek düzeyde ilişkili olduğunu ortaya koymuştur ($16,96 \pm 0,92$ 'ye kıyasla $17,22 \pm 1,12$ $km \cdot sa^{-1}$; $p=0,2$; $r=0,88$). Çalışmadan aktarılan KH' değerine ait anaerobik fonksiyon değeri olarak hesaplanan (modifiye) anaerobik koşu kapasitesi (D'') ortalaması 29 metre olarak bulunmuştur. Ancak sonraki yıllarda bu yönetime ait kapsamlı bir geçerlilik ya da güvenilirlik çalışması yapılmamıştır.

VO₂'de Yavaş Komponent ve Kritik Eşik

Egzersiz sırası (on) ve sonrası (off) toparlanma periyoduna ait O₂ kullanım kinetikleri, zamana göre VO₂ yanıtlarında saptanan kırılmalara ait a (amplitude) ve τ (tau) değerleri üzerinden analiz edilir. Bu analizlerde üstel ya da lineer olarak artan (ya da azalan) eğri yapılarında ~%63'lük trend aranır (Manns ve diğ., 2010). Egzersize ait nefesten nefese VO₂ yanıtları yapısal olarak incelendiğinde düşük egzersiz şiddetlerinde (-low) yanıtların mono-eksponensiyel olduğu ancak orta şiddetli egzersizlerde (-moderate) daha çok bi-eksponansiyel modellere uygun bir özellik kazandığı gösterilmiştir. Burada düşük ve orta şiddetli egzersiz alanları arasındaki belirleyici fark, egzersizin hemen başında görülen "kardiyo-dinamik faz" olmuştur.

$$VO_{2(t)} = VO_{2(ist)} + A_1 (1 - e^{-(t-TD_1)/\tau_{u1}}) \quad \text{Eşitlik 16}$$

Mono-eksponensiyel "single-three parametres" modeli; $VO_{2(t)}$; herhangi bir zamana ait VO_{2t} , VO_{ist} ; istirahat VO_{2} ölçümlerine ait son 30 saniye ya da bir dakika ortalaması, A_1 ; bakılan komponentin VO_{2} amplitüdü, TD_1 ; bu komponente ait ertelenmiş zaman değeri ve τ_{u1} ; TD'den sonraki sabit zaman olarak değerlendirilir.

$$VO_{2(t)} = VO_{2(ist)} + A_1 (1 - e^{-(t-TD_1)/\tau_{u1}}) + A_2 (1 - e^{-(t-TD_2)/\tau_{u2}}) \quad \text{Eşitlik 17}$$

Bi-eksponensiyel "double-five parametres" modeli; $VO_{2(t)}$; herhangi bir zamana ait VO_{2t} , VO_{ist} ; istirahat VO_{2} ölçümlerinde son 30 saniye ya da bir dakika ortalaması, A_1 ; bakılan ilk komponentin VO_{2} amplitüdü, TD_1 ; bu komponente ait ertelenmiş zaman değeri ve τ_{u1} ; TD_1 'den sonraki sabit zaman, A_2 ; bakılan ikinci komponentin VO_{2} amplitüdü, TD_2 ; ikinci komponente ait ertelenmiş zaman ve τ_{u2} ; TD_2 'den sonraki sabit zaman olarak değerlendirilir.

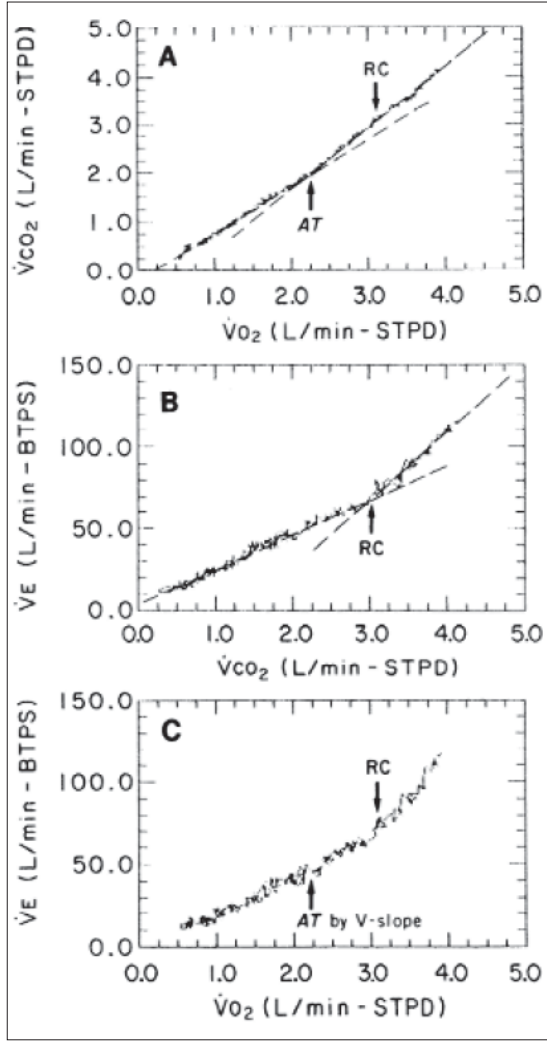
Kardiyo-dinamik faz çoğu zaman "venöz dönüş fazı" olarak da isimlendirilir (Robergs, 2014). Bu faz egzersize ait VO_{2} artışının ilk 20-30 saniyelik evresidir. Bu evrenin oluşma nedenleri, egzersizin hemen başında ilk 10-15 saniyelerde artan O₂ ihtiyacının periferin artan ihtiyacını karşılamaktan ziyade, oksijenin vücuda sokulması noktasında daha öncelikli faaliyeti gereken merkezde yani kardiyak ve solunum kaslarının oksijene ihtiyaç duyması (Grassi ve diğ., 1996) ve yine bu etmenlerle birlikte gelişen venöz dönüştaki gecikme (Bearden ve Moffatt, 2000) şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan egzersizin ilk saniyelerinde intra-müsküler fosfokreatin kullanımındaki artışın da bu fazın oluşumunda etkili olduğu bilinir. Kardiyo-dinamik fazın hemen ardından 2-3 dakika süresince hızlıca bir VO_{2} artışıyla karakterize primer faz (hızlı faz) görülür (Whipp ve diğ., 1982). Primer faz, VO_{2} 'nin periferik komponentidir ve aktif iskelet kaslarında oksidatif metabolizma artışıyla yakından ilişkilidir. Bu fazın devamında orta şiddetli egzersizlerde çok net bir denge (steady-state) fazı oluşur. LE geçildiğinde (ağır egzersizlerde) VO_{2} 'de görülen erken denge yerini ertelenmiş bir dengeye bırakır (3. dakikalar civarında) (Bearden ve Moffatt, 2000; McGawley, 2010). Bu faz "yavaş komponent" olarak isimlendirilir. Yavaş komponentin büyüklüğü, egzersizin üçüncü dakikası ve tükenme anının son dakika O₂ ortalaması arasındaki farka bakılarak değerlendirilebilir (Billat ve diğ., 1998). Ancak egzersiz tükenmeye kadar alınmayacaksa, efor süresinin ~10 dakikalar civarı tutulması gerekir (Ozyener ve diğ., 2001). MLD aşıldığında yavaş fazın büyüklüğü de artar. MLD geçildiğinde (çok ağır egzersiz alanında) VO_{2} 'de

gecikmeli bir denge görülürken artık laktat birikimi denge sınırlarını aşmıştır (Endo et al., 2007; Neder et al., 2000b; Ozyener et al., 2001; Ozyener et al., 2003; Smith & Jones, 2001; Whipp et al., 2005). Doku oksijenasyonunun non-invaziv olarak değerlendirildiği near-infrared spektroskopik çalışmaları (Belardinelli ve diğ., 1995), direkt olarak venöz kandan oksihemoglobin ölçümü yapılan araştırma sonuçları (Stringer ve diğ., 1994) ve yavaş komponentin büyüklüğü ile kan laktatı konsantrasyonu değişimleri arasında ilişki arayan çalışma bulgularına göre (Roston ve diğ., 1987), yavaş faza etkili faktörler dolaşımda katekolamin artışı, artan ventilasyon hızına bağlı olarak artan ekstra VO_2 düzeyi, artan vücut iç sıcaklığı ve belirgin bir düzeyde artmış olan laktat katabolizmasıdır. Diğer yandan tip II fibril katılımının işe dahil olma düzeyi arttıkça, yavaş komponent daha da belirginleşir (delayed onset steady-state) (Barstow ve diğ., 1996). Dolayısıyla KE aşıldığında t_{lim} 'in dramatik düşüşü, şiddetli egzersizlerde artan tip II katılımına bağlı olarak kassal verimin düşmesiyle ilişkilendirilmiştir. Ek olarak şiddetli egzersizlerde yorgunluğun oluşmasıyla ilgili önemli bir diğer yaklaşıma göre, KE üzeri hızlarda oluşan yorgunluk miyokardın anaerobiyosiziyle ilişkilidir. Bu teoriye göre şiddetli egzersizlere ait yorgunluğun esas sebebi periferik ait yetersizlik değil, kalbi koruma altına alabilmek için beyin yani merkeze bağlı düzenlemelerdir (Noakes, 1998). Burnley ve diğerlerinin (2012) yayımladığı bir EMG çalışmasının sonuçları, KT üzeri şiddetlerde bitkinlikle sonlanan egzersizlerde yorgunluk oluşumunun (<18 dakika) merkezi kaynaklı olduğunu, ancak KT'nin %10 ve daha altında yapılan egzersizlerdeki yorgunluğun (≥ 60 dakika) daha çok periferik etkilere dayalı olduğunu ortaya koymuştur. Burada KT, merkezi (nöromusküler) ve periferik (kassal) yorgunluğun sınırı olarak gösterilmiştir.

Solunumsal Kompanzasyon Noktası ve Kritik Eşik ile İlişkisi

Kademeli bir testten alınan gaz değişimi parametrelerine dayalı olarak saptanabilen iki solunumsal eşik üzerinde sıklıkla durulmuştur. Bu

eşiklerden ilki aerobik ve diğeri ise anaerobik solunumsal eşik olarak bilinir (SE_1 ve SE_2). Uygun yüklerden başlanarak yine uygun kademe artışları ve kademe sürelerinin kullanıldığı arttırımlı testlerde önce SE_1 ve daha sonrasında SE_2 belirlenebilir. Eşik değerleri belirlemede, her biri için öne çıkan başka bir solunumsal ölçüt kullanılır (Binder ve diğ., 2008). Laktat eşiği (LE) ile karakterize SE_1 geçildiğinde, CO_2 atımında önemli sayılabilecek bir artışa rağmen hipoksik koşullar çok da ciddileşmez (izokapnik tampon). Ancak SE_2 geçildiğinde, aktif kaslarda aerobik eşiğe kıyasla çok daha yüksek bir asidoz ve non-oksidatif CO_2 üretiminde artışa dayalı olarak derinleşen bir V_E yanıtı görülür (hipoksik ventilasyon yanıtı). Solunumsal aerobik eşik olarak nitelendirilebileceğimiz SE_1 'i saptamada öne çıkan kriterler; V_E/VO_2 'ye göre hız/yük ya da $\%VO_{2maks}$ 'a ait regresyonda yukarı yönlü kırılma, zamana göre RER'in yukarı doğru kırılması ve yine zamana göre $PetO_2$ 'de lineer bir artışın başlaması olarak gösterilebilir (Yeh ve diğ., 1983; Dickstein ve diğ., 1990). Diğer yandan solunumsal anaerobik eşikle karakterize SE_2 'yi belirlemede önemli sayılabilecek kriterler; oksijenin ventilasyon eşitliği (V_E-VO_2) (Reinhard ve diğ., 1979) ve VCO_2-VO_2 (v-slope) (Beaver ve diğ., 1986) regresyonlarında yukarı yönlü kırılma olarak bilinir. Ancak hem SE_1 hem de SE_2 geçilirken V_E-VCO_2 regresyonu doğrusal bir artış trendi izleyecektir, çünkü iki değer arasında bir sebep sonuç ilişkisi vardır ve birbiri ile pozitif lineer bir ilişki içindedirler (bkz. Şekil 2). V_E-VCO_2 regresyonu, MLD'nin en önemli non-invaziv göstergesi olarak kabul edilen SE_2 üzerinde bir yerde kırılır (Beaver ve diğ., 1986; Wasserman ve diğ., 1973). Bu düzey Wasserman ve diğerleri (1973) tarafından SKN olarak tanımlanmıştır. SKN aslında üçüncü bir solunumsal eşik değeri verir (SE_3) ve "ventilasyonun hızlanmadan kompanze edilebildiği en yüksek metabolik düzey" olarak tanımlanır (Whipp ve diğ., 1989). Dolayısıyla SKN, solunumun artık dengelenemediği ve hiperventilasyonun arttığı fakat VCO_2 'nin aynı oranda artmadığı kritik bir aşamadır. Bu düzey geçildiğinde solunum sıklığındaki artışa bağlı olarak ekspirasyon süresinin kıaldığı ve $PetCO_2$ 'nin dramatik bir



Şekil 2. A panelinde, anaerobik eşik kavramıyla karakterize ikinci solunumsal eşik (şekilde AT) ve bunu göstermede kullanılan v-slope (\dot{V}_{CO_2} - \dot{V}_{O_2}); B panelinde ise \dot{V}_E - \dot{V}_{CO_2} 'de kırılmayla gösterilen solunumsal kompanzasyon noktası (şekilde RC) gösterilmiştir. Diğer yandan C panelinde \dot{V}_E - \dot{V}_{O_2} 'de, hem anaerobik eşik hem de solunumsal kompanzasyon noktası geçilirken bir kırılma oluşmamıştır. Figür Beaver ve diğerlerinin 1986 yılında yayımladıkları makalenin orijinalinden modifiye edilmiştir.

şekilde düşmeye başladığı bilinir (Whipp ve diğ., 1989). Beaver ve diğerlerine göre (1986) SKN'yi saptamada kullanılabilecek en ayırt edici yöntem \dot{V}_E - \dot{V}_{CO_2} 'nin regresyonundaki kırılmadır. Buna ek olarak \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} 'de zamana göre kırılma ve yine \dot{V}_{CO_2} - \dot{V}_{O_2} 'de dramatik düşüşün başlaması gibi kriterler de SKN'yi göstermede kullanılan ikincil kriterlerdir (Keir ve diğ., 2015).

Konuyla ilgili ilk önemli çalışma Dekerle ve diğerleri (2003) tarafından yapılmıştır.

Çalışmanın sonuçlarına göre; SKN, KG ile yüksek ilişkili bulunmuştur (sırasıyla, 286 Watt ve %85,3 $\dot{V}_{O_{2maks}}$ ve 278 Watt ve %85,3 $\dot{V}_{O_{2maks}}$; $r=0.96$). Yine aynı çalışmada KG, MLD'yi (239 Watt ve %74,3 $\dot{V}_{O_{2maks}}$) yüksek tahmin eden bir parametre olarak değerlendirilmiştir ($\dot{V}_{O_{2maks}}$ 'ın fraksiyonel kullanımında %10 farkla). Benzer şekilde SKN ve KE'yi araştıran sekiz önemli deneysel çalışma raporu taranabilmiştir (Bergstrom ve diğ., 2013^a; Bergstrom ve diğ., 2013^b; Black ve diğ., 2014; Broxterman ve diğ., 2015^a; Broxterman ve diğ., 2015^b; Dekerle ve diğ., 2003; Keir ve diğ., 2015; Leo ve diğ., 2017). Bu araştırmalardan üçü SKN ve KE'nin anaerobik eşik üzerindeki farklı bir eşik düzeyi gösterdiklerini ve birbirleri yerine kullanılabileceklerini (Bergstrom ve diğ., 2013^a; Bergstrom ve diğ., 2013^b; Dekerle ve diğ., 2003), ancak beşi bu iki kriterin benzer fizyolojik koşulları gösterse de ($p>0,05$) birbiri yerine kullanılamayacağını rapor etmiştir (Black ve diğ., 2014; Broxterman ve diğ., 2015^a; Broxterman ve diğ., 2015^b; Keir ve diğ., 2015; Leo ve diğ., 2017).

Matematiksel Kritik Eşiğe Ait Çelişkili Bulgular

Aynı denek grubunda aynı matematiksel eşitlikler kullanılarak saptanan bireysel KG düzeyini bir bisikletçi 2,5 dakika sürdürebiliyorken, bir diğer bisikletçi 30 dakika sürdürebilmiştir (Jenkins ve Quigley, 1990). Housh ve diğerleri (1989) tarafından yayımlanan bir çalışmada tükenme sürelerine ait grup ortalaması 30 dakikayken, üç sporcunun KG'lerini 60 dakikaya kadar sürdürebildiği rapor edilmiştir. McLellan ve Cheung (1992) tarafından yapılan önemli bir çalışmada aynı deney grubunda tükenme süreleri 12 dakikadan 28 dakikaya kadar değişmiştir. Dahası, Billat ve diğerlerinin 1998 yılında yayımladıkları bir çalışmanın sonuçlarına göre, matematiksel modellere dayalı olarak belirlenen KH'leri, ~%85-90 $\dot{V}_{O_{2maks}}$ 'a karşılık gelen (~75 ml·dk⁻¹·kg⁻¹ $\dot{V}_{O_{2maks}}$ düzeyine sahip) iyi antrene uzun mesafe koşucuları, +%3-5 KH'de (%90 $\dot{V}_{O_{2maks}}$ 'da) koşturulduklarında bile, gecikmiş bir denge \dot{V}_{O_2} 'sinde (%93 $\dot{V}_{O_{2maks}}$ 'da) tükenmişlerdir. Dolayısıyla, sporcuların tükenme anında ulaş-

tıkları $\dot{V}O_2$ düzeyleri ($69,5 \pm 5$ ml·dk⁻¹·kg⁻¹), bireysel $\dot{V}O_{2maks}$ 'larından oldukça uzak saptanmıştır (>%5 $\Delta\dot{V}O_2$). Benzer olarak Sawyer ve diğerlerinin 2012 yılında yayımladıkları çalışmalarında, sporcuların bireysel KG yüklerinin üzerindeki yüklerde bitkinliğe kadar $\dot{V}O_{2maks}$ düzeylerine ulaşamadıkları rapor edilmiştir. En yüksek KG verisi sunan model için bile zamana göre $\dot{V}O_2$ yanıtlarında denge gösterilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, aşıldığında $\dot{V}O_{2maks}$ 'a gidilebilecek güç üretim düzeyinin üst sınırları (şiddetli egzersiz alanına girmeden hemen önce) $\dot{V}O_{2maks}$ 'a %95 kadar yakındır ve matematiksel eşitliklere dayalı KG bu düzeyin altında kalmaktadır. Başka bir çalışmada, bisiklet ve koşuda şiddetli egzersiz alanının sınırında; benzer şiddet (sırasıyla, %90 $v\dot{V}O_{2maks}$ ve %90 $P\dot{V}O_{2maks}$ 'da), tükenme süreleri (sırasıyla 10 dakika 37 saniye ve 10 dakika 54 saniye) ve efor sonrası kan laktatı yanıtı (sırasıyla 7,2'ye 7,3 mmol·L⁻¹) ile sonlanan iki farklı egzersiz modeline ait yavaş komponent büyüklükleri farkı anlamlı bulunmuştur (sırasıyla 21 ml·dk⁻¹'ye 269 ml·dk⁻¹; $p < 0.05$). Bu egzersizlerde bitkinliğe ait ortalama $\dot{V}O_2$ düzeyleri bisiklet egzersizi için %100'ü yani $\dot{V}O_{2maks}$ 'ı verirken, koşuda $\dot{V}O_{2maks}$ 'dan %6 kadar uzak kalmıştır (%94 $\dot{V}O_{2maks}$). Çalışmanın önemli bir diğer sonucu, 10 triatletten dördünün hem bisiklet hem koşu egzersizlerinde $\dot{V}O_{2maks}$ 'a ulaştığı, buna karşın dördünün bisiklet egzersizlerinde $\dot{V}O_{2maks}$ 'a ulaştığı ancak koşuda ulaşamadığı ve iki sporcunun ise hem koşuda hem de bisiklet egzersizlerinde $\dot{V}O_{2maks}$ 'a hiç ulaşamadığıdır (Billat ve diğ., 1998). Buradan çıkan bir diğer sonuç ise, bisiklet egzersizlerinde koşuya kıyasla $\dot{V}O_{2maks}$ 'a gidişin daha kolay olabileceği şeklinde yorumlanabilir. Dolayısıyla "matematiksel" KE aşıldığında, *i*) yavaş komponent halen gecikmiş bir denge verebilir, *ii*) yavaş komponentte t_{lim} 'e kadar hiçbir zaman denge kurulmadan oksijen kullanımını artış trendini sürdürebilir ya da *iii*) VO_{2maks} 'a girilebilir (Barstow ve Mole, 1991; Billat ve diğ., 1998; Poole ve diğ., 1988; Roston ve diğ., 1987; Sawyer ve diğ., 2012).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Orijinali matematiksel modellemelere dayalı kritik eşik, en az 3-7 sabit hızlı ve bitkinlikle sonlanan eforla saptanabilen indirekt bir eşik değer olarak tanımlanmıştır. Elde edilen verilere matematiksel modelleri uygulamak oldukça basit gibi görünse de, tüketici testlemeler oldukça meşakkatli ve pratiklikten uzaktır. Kritik eşik belirlemede beş temel matematiksel eşitlik kullanılır. Ancak kullanılan matematiksel modelin türüne ve testlenen tüketici egzersiz sayısı ve test yapısına göre hesaplanan eşik değerinde hatırı sayılır farklılıklar oluşabilir. Bu ve benzeri problemlerin üstesinden gelebilmek için, kritik eşik tahmin etmede kullanılan indirekt yöntemler geliştirilmiştir. Ancak orijinali zaten matematiksel modellemelere dayalı bir eşik değeri, daha dolaylı yollarla belirlemeye çalışmak pratik bir yaklaşım sunsa da pek gerçekçi değildir. Şiddetli egzersiz alanına geçişte altın anahtar, fizyolojik temelli kritik eşiktir. Bu kritik düzey, "egzersiz VO_2 'sinin bitkinliğe kadar VO_{2maks} 'a gitmeden stabil tutulduğu en yüksek egzersiz şiddeti" olarak kabul edilir. Bu eşik değeri belirleyebilmenin en doğru yolu ise, sabit şiddetli egzersizde bitkinliğe kadar VO_2 kinetiklerini analiz etmektir. Bu testler için en pratik referans, kademeli bir testten alınan solunumsal kompanzasyon noktası ve dolaylarındaki ($\pm\%3$) egzersiz şiddetleri olabilir.

Yazar Notu: Bu çalışmada maddi herhangi bir kaynak kullanılmamıştır. Yazarlar arasında bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazışma Adresi (Corresponding Address):

Doç. Dr. Özgür Özkaya

Ege Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Hareket ve Antrenman ABD

E-posta: ozgur.ozkaya@ege.edu.tr

Telefon No: +90 (232) 342 5715

Faks No: +90 (232) 339 9000

KAYNAKLAR

1. **Barstow, T. J., & Molé, P. A.** (1991). Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *Journal of Applied Physiology*, *71*(6), 2099-2106.
2. **Barstow, T. J., Jones, A. M., Nguyen, P. H., & Casaburi, R.** (1996). Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *Journal of Applied Physiology*, *81*(4), 1642-1650.
3. **Bearden, S. E., & Moffatt, R. J.** (2000). VO₂ kinetics and the O₂ deficit in heavy exercise. *Journal of Applied Physiology*, *88*(4), 1407-1412.
4. **Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J.** (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology*, *60*(6), 2020-2027.
5. **Belardinelli, R., Barstow, T. J., Porszasz, J., & Wasserman, K.** (1995). Skeletal muscle oxygenation during constant work rate exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *27*(4), 512-519.
6. **Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Camic, C. L., Traylor, D. A., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O.** (2012). A new single work bout test to estimate critical power and anaerobic work capacity. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, *26*(3), 656-663.
7. **Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Camic, C. L., Lewis, J. R. W., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O.** (2013^a). The relationships among critical power determined from a 3-min all-out test, respiratory compensation point, gas exchange threshold, and ventilatory threshold. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *84*(2), 232-238.
8. **Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Cochrane, K. C., Jenkins, N. D., Lewis Jr, R. W., Traylor, D. A., Zuniga, J. M., Schmidt, R. J., Johnson, G. O., & Cramer, J. T.** (2013^b). An examination of neuromuscular and metabolic fatigue thresholds. *Physiological measurement*, *34*(10), 1253.
9. **Billat, L. V., & Koralsztein, J. P.** (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Medicine*, *22*(2), 90-108.
10. **Billat, V., Binsse, V., Petit, B., & Koralsztein, J. J.** (1998^a). High level runners are able to maintain a VO₂ steady-state below VO₂max in an all-out run over their critical velocity. *Archives of Physiology and Biochemistry*, *106*(1), 38-45.
11. **Billat, V. L., Richard, R., Binsse, V. M., Koralsztein, J. P., & Haouzi, P.** (1998^b). The VO₂ slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. *Journal of Applied Physiology*, *85*(6), 2118-2124.
12. **Billat, V. L., Blondel, N., & Berthoin, S.** (1999). Determination of the velocity associated with the longest time to exhaustion at maximal oxygen uptake. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *80*(2), 159-161.
13. **Binder, R. K., Wonisch, M., Corra, U., Cohen-Solal, A., Vanhees, L., Saner, H., & Schmid, J. P.** (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation*, *15*(6), 726-734.
14. **Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M., & Vanhatalo, A.** (2014). Critical power derived from a 3-min all-out test predicts 16.1-km road time-trial performance. *European Journal of Sport Science*, *14*(3), 217-223.
15. **Black, M. I., Jones, A. M., Bailey, S. J., & Vanhatalo, A.** (2015). Self-pacing increases critical power and improves performance during severe-intensity exercise. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *40*(7), 662-670.
16. **Black, M. I., Jones, A. M., Kelly, J. A., Bailey, S. J., & Vanhatalo, A.** (2016). The constant work rate critical power protocol overestimates ramp incremental exercise performance. *European journal of applied physiology*, *116*(11-12), 2415-2422.
17. **Broxterman, R. M., Ade, C. J., Barker, T., & Barstow, T. J.** (2015^a). Influence of pedal cadence on the respiratory compensation point and its relation to critical power. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, *208*, 1-7.
18. **Broxterman, R. M., Ade, C. J., Craig, J. C., Wilcox, S. L., Schlup, S. J., & Barstow, T. J.** (2015^b). The relationship between critical speed and the respiratory compensation point: coincidence or equivalence. *European Journal of Sport Science*, *15*(7), 631-639.
19. **Burnley, M., Vanhatalo, A., & Jones, A. M.** (2012). Distinct profiles of neuromuscular fatigue during muscle contractions below and above the critical torque in humans. *Journal of Applied Physiology*, *113*(2), 215-223.
20. **Clark, I. E., Murray, S. R., Pettitt, C. D., Kernozek, T. W., & Pettitt, R. W.** (2012). Alternative procedures for the 3-min all-out exercise test. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *27*(8), 2014-2112.
21. **Constantini, K., Sabapathy, S., & Cross, T. J.** (2014). A single-session testing protocol to determine critical power and W'. *European Journal of Applied Physiology*, *114*(6), 1153-1161.
22. **Dekerle, J., Sidney, M., Hespel, J. M., & Pelayo, P.** (2002). Validity and reliability of critical speed, critical stroke rate, and anaerobic capacity in relation to front crawl swimming performances. *International Journal of Sports Medicine*, *23*(02), 93-98.
23. **Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J., & Pelayo, P.** (2003). Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *European Journal of Applied Physiology*, *89*(3-4), 281-288.
24. **Dickstein, K., Barvik, S., Aarsland, T., Snapinn, S., & Karlsson, J.** (1990). A comparison of methodologies in detection of the anaerobic threshold. *Circulation*, *81*(1 Suppl), 1138-46.

25. Endo, M. Y., Kobayakawa, M., Kinugasa, R., Kuno, S., Akima, H., Rossiter, H. B., Miura, A., & Fukuba, Y. (2007). Thigh muscle activation distribution and pulmonary VO₂ kinetics during moderate, heavy, and very heavy intensity cycling exercise in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *293*(2), 812-820.
26. Gaesser, G. A., & Wilson, L. A. (1988). Effects of continuous and interval training on the parameters of the power-endurance time relationship for high-intensity exercise. *International Journal of Sports Medicine*, *9*(06), 417-421.
27. Gaesser, G. A., Carnevale, T. J., Garfinkel, A., Walter, D. O., & Womack, C. J. (1995). Estimation of critical power with nonlinear and linear models. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *27*(10), 1430-1438.
28. Galbraith, A., Hopker, J. G., Jobson, S. A., & Passfield, L. (2011). A novel field test to determine critical speed. *Journal of Sports Medicine and Doping Studies*, *1*(1), 1-4.
29. Galbraith, A., Hopker, J., Lelliott, S., Diddams, L., & Passfield, L. (2014). A single-visit field test of critical speed. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *9*(6), 931-935.
30. Grassi, B., Poole, D. C., Richardson, R. S., Knight, D. R., Erickson, B. K., & Wagner, P. D. (1996). Muscle O₂ uptake kinetics in humans: implications for metabolic control. *Journal of Applied Physiology*, *80*(3), 988-998.
31. Hendrix, C. R., Housh, T. J., Mielke, M., Zuniga, J. M., Camic, C. L., Johnson, G. O., & Schmidt, R. J. (2009). Critical torque, estimated time to exhaustion, and anaerobic work capacity from linear and nonlinear mathematical models. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *41*(12), 2185-2190.
32. Henry, F. M. (1955). Prediction of world records in running sixty yards to twenty-six miles. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, *26*(2), 147-158.
33. Hill, A. V. (1925). The physiological basis of athletic records. *The Lancet*, *206*(5323), 481-486.
34. Hill, A. V. (1927). Muscular Movement in Man: The Factors Governing Speed and Recovery from Fatigue. *Muscular Movement in Man: The Factors governing Speed and Recovery from Fatigue*.
35. Hill, D. W. (1993). The critical power concept. *Sports medicine*, *16*(4), 237-254.
36. Hill, D. W., & Smith, J. C. (1993). A comparison of methods of estimating anaerobic work capacity. *Ergonomics*, *36*(12), 1495-1500.
37. Hill, D. W., Alain, C., & Kennedy, M. D. (2003). Modeling the relationship between velocity and time to fatigue in rowing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *35*(12), 2098-2105.
38. Housh, D. J., House, T. J., & Bauge, S. M. (1989). The accuracy of the critical power test for predicting time to exhaustion during cycle ergometry. *Ergonomics*, *32*(8), 997-1004.
39. Housh, D. J., Housh, T. J., & Bauge, S. M. (1990). A methodological consideration for the determination of critical power and anaerobic work capacity. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *61*(4), 406-409.
40. Housh, T. J., Cramer, J. T., Bull, A. J., Johnson, G. O., & Housh, D. J. (2001). The effect of mathematical modeling on critical velocity. *European Journal of Applied Physiology*, *84*(5), 469-475.
41. Hughson, R. L., Orok, C. J., & Staudt, L. E. (1984). A high velocity treadmill running test to assess endurance running potential. *International Journal of Sports Medicine*, *5*(01), 23-25.
42. Jenkins, D. G., & Quigley, B. M. (1990). Blood lactate in trained cyclists during cycle ergometry at critical power. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *61*(3), 278-283.
43. Jenkins, D. G., & Quigley, B. M. (1991). The y-intercept of the critical power function as a measure of anaerobic work capacity. *Ergonomics*, *34*(1), 13-22.
44. Johnson, T. M., Sexton, P. J., Placek, A. M., Murray, S. R., & Pettitt, R. W. (2011). Reliability analysis of the 3-min all-out exercise test for cycle ergometry. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *43*(12), 2375-2380.
45. Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C. (2010). Critical power: implications for determination of VO₂max and exercise tolerance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *42*(10), 1876-90.
46. Keir, D. A., Fontana, F. Y., Robertson, T. C., Murias, J. M., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M., & Pogliaghi, S. (2015). Exercise intensity thresholds: identifying the boundaries of sustainable performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *47*(9), 1932-40.
47. Kennelly, A. E. (1906). An approximate law of fatigue in the speeds of racing animals. In *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* (Vol. 42, No. 15, pp. 275-331). American Academy of Arts & Sciences.
48. Laursen, P. B., Francis, G. T., Abbiss, C. R., Newton, M. J., & Nosaka, K. (2007). Reliability of time-to-exhaustion versus time-trial running tests in runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(8), 1374-1379.
49. Leo, J. A., Sabapathy, S., Simmonds, M. J., & Cross, T. J. (2017). The Respiratory Compensation Point is Not a Valid Surrogate for Critical Power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*.
50. Manns, P. J., Tomczak, C. R., Jelani, A., & Haennel, R. G. (2010). Oxygen uptake kinetics: associations with ambulatory activity and physical functional performance in stroke survivors. *Journal of Rehabilitation Medicine*, *42*(3), 259-264.
51. McGawley, K. (2010). The application of the critical power construct to endurance exercise (Doctoral dissertation, University of Brighton, Faculty of Education and Sport).
52. McLellan, T. M., & Cheung, K. S. (1992). A comparative evaluation of the individual anaerobic threshold and the critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *24*(5), 543-550.

53. Meade, G. P. (1916). An analytical study of athletic records. *The Scientific Monthly*, 2(6), 596-600.
54. Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics*, 8(3), 329-338.
55. Moritani, T., Nagata, A., Devries, H. A., & Muro, M. (1981). Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24(5), 339-350.
56. Morton, R. H. (1994). Critical power test for ramp exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 69(5), 435-438.
57. Noakes, T. D. (1998). Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints: a rebuttal. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(9), 1381-1398.
58. Overend, T. J., Cunningham, D. A., Paterson, D. H., & Smith, W. D. F. (1992). Physiological responses of young and elderly men to prolonged exercise at critical power. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 64(2), 187-193.
59. Ozyener, F., Rossiter, H. B., Ward, S. A., & Whipp, B. J. (2001). Influence of exercise intensity on the on-and off-transient kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. *The Journal of Physiology*, 533(3), 891-902.
60. Ozyener, F., Rossiter, H. B., Ward, S. A., & Whipp, B. J. (2003). Negative accumulated oxygen deficit during heavy and very heavy intensity cycle ergometry in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 90(1-2), 185-190.
61. Parker Simpson, L., & Kordi, M. (2016). Comparison of Critical Power and W Derived from Two or Three Maximal Tests. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1-24.
62. Poole, D. C., Ward, S. A., Gardner, G. W., & Whipp, B. J. (1988). Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*, 31(9), 1265-1279.
63. Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., & Jones, A. M. (2016). Critical power: an important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2320-34.
64. Poole, D. C., & Jones, A. M. (2017). Measurement of the maximum oxygen uptake VO₂max: VO₂peak is no longer acceptable. *Journal of Applied Physiology*, 122(4), 997-1002.
65. Reinhard, U., Müller, P. H., & Schmülling, R. M. (1979). Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respiration*, 38(1), 36-42.
66. Robergs, R. A. (2014). A critical review of the history of low-to moderate-intensity steady-state VO₂ kinetics. *Sports Medicine*, 44(5), 641-653.
67. Roston, W. L., Whipp, B. J., Davis, J. A., Cunningham, D. A., Effros, R. M., & Wasserman, K. (1987). Oxygen Uptake Kinetics and Lactate Concentration During Exercise in Humans 1-3. *American Review of Respiratory Disease*, 135(5), 1080-1084.
68. Sawyer, B. J., Morton, R. H., Womack, C. J., & Gaesser, G. A. (2012). VO₂max may not be reached during exercise to exhaustion above critical power. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(8), 1533-1538.
69. Smith, C. G., & Jones, A. M. (2001). The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turn-point velocity in runners. *European Journal of Applied Physiology*, 85(1), 19-26.
70. Stringer, W., Wasserman, K., Casaburi, R., Porszasz, J., Maehara, K., & French, W. (1994). Lactic acidosis as a facilitator of oxyhemoglobin dissociation during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 76(4), 1462-1467.
71. Vandewalle, H., Kapitaniak, B., Grün, S., Raveneau, S., & Monod, H. (1989). Comparison between a 30-s all-out test and a time-work test on a cycle ergometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 58(4), 375-381.
72. Vandewalle, H. (1995). Critical power test for ramp exercise. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 71(2), 285-286.
73. Vandewalle, H., Vautier, J. F., Kachouri, M., Lechevalier, J. M., & Monod, H. (1997). Work-exhaustion time relationships and the critical power concept. A critical review. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 37(2), 89-102.
74. Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 548-555.
75. Wakayoshi, K., Yoshida, T., Udo, M., Kasai, T., Moritani, T., Mutoh, Y., & Miyashita, M. (1992^a). A simple method for determining critical speed as swimming fatigue threshold in competitive swimming. *International journal of sports medicine*, 13(05), 367-371.
76. Wakayoshi, K., Ikuta, K., Yoshida, T., Udo, M., Moritani, T., Mutoh, Y., & Miyashita, M. (1992^b). Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 64(2), 153-157.
77. Wasserman K., Whipp B.J., Koyl, S. N., & Beaver, W. L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 35(82), 236.
78. Whipp, B. J., Ward, S. A., Lamarra, N., Davis, J. A., & Wasserman, K. (1982). Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 52(6), 1506-1513.
79. Whipp, B. J., Davis, J. A., & Wasserman, K. (1989). Ventilatory control of the 'isocapnic buffering' region in rapidly-incremental exercise. *Respiration physiology*, 76(3), 357-367.
80. Whipp, B. J. (1994). The slow component of O₂ uptake kinetics during heavy exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 26(11), 1319-1326.
81. Whipp, B. J., Ward, S. A., & Rossiter, H. B. (2005). Pulmonary O₂ uptake during exercise: Conflating muscular and cardiovascular responses. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(9): 1574-1585.
82. Yeh, M. P., Gardner, R. M., Adams, T. D., Yanowitz, F. G., & Crapo, R. O. (1983). "Anaerobic threshold": problems of determination and validation. *Journal of Applied Physiology*, 55(4), 1178-1186.

Tanımlama ve Kısaltmalar

a (amplitude): Yükseklik

D' (D prime): Anaerobik koşu kapasitesi

$d_{limVO_{2maks}}$: VO_{2maks} 'da kalınan zaman süresince kat edilen mesafeler toplamı

$[HHb]_{KN}$: Deoksi-hemoglobin kırılma noktası

KE: Kritik eşik

KH: kritik hız ($km \cdot sa^{-1}$)

KH' : VO_{2maks} 'da harcanan en uzun zamanı veren hız ($km \cdot sa^{-1}$)

KG: Kritik güç (Watt)

KT: Kritik tork (Nm)

La: Kan laktatı ($mmol \cdot L^{-1}$)

LE: Laktat eşiği (gerçek aerobik eşik)

LE_{4-mmol} : 4-mmol sabit laktat eşiği

LDN: Laktat dönüm (kırılma) noktası

MAH: Maksimal aerobik hız

MLD: Maksimal laktat dengesi ($<0,05 mmol \cdot dk^{-1}$ laktat artışı) (gerçek anaerobik eşik)

P_{maks} : En yüksek güç üretim düzeyi

$P_{maks} VO_{2maks}$: VO_{2maks} veren en yüksek güç üretim düzeyi

$P_{min} VO_{2maks}$: VO_{2maks} veren en düşük güç üretim düzeyi

PVO_{2maks} : VO_{2maks} veren güç üretimi

RER: Solunum değişim katsayısı

SE_1 : Birinci solunumsal eşik (solunumsal aerobik eşik)

SE_2 : İkinci solunumsal eşik (solunumsal anaerobik eşik)

SKN: Solunumsal kompanzasyon noktası

τ (tau): Sabit zaman

Tork: Döndürme kuvveti

$Tork_{maks}$: En yüksek döndürme kuvveti

t_{lim} : Toplam tükenme süresi

$t_{limVO_{2maks}}$: VO_{2maks} 'da kalınan toplam zaman

T' (T prime): İzometrik kasılmalarda torka bağlı hesaplanan anaerobik iş kapasitesi

V_{maks} : En yüksek hız

V_E : Dakika ventilasyonu (L)

VCO_2 : Karbondioksit üretimi ($ml CO_2 dk^{-1}$) (CO_2 için $ml CO_2 dk^{-1} \cdot kg^{-1}$)

VO_2 'de denge: VO_2 'de $\leq 2,1 ml O_2 dk^{-1} \cdot kg^{-1}$ değişim görülen değer

VO_2 : Oksijen tüketimi ($ml O_2 dk^{-1}$) (O_2 için $ml O_2 dk^{-1} \cdot kg^{-1}$)

VO_{2maks} : Bir dakikada en yüksek oksijen kullanım düzeyi

VO_{2pik} : Doğrulanmış VO_{2maks} 'a %3 kadar yakın değer

$v_{maks} VO_{2maks}$: VO_{2maks} veren en yüksek hız

$v_{min} VO_{2maks}$: VO_{2maks} veren en düşük hız

vVO_{2maks} : VO_{2maks} veren hız

$v_{VO_{2maks}}$: Kademeli bir testin VO_{2maks} veren ilk hızı ($km \cdot sa^{-1}$)

W' (W prime): Anaerobik iş kapasitesi