

Solunumsal Yanıtlara Dayalı Yeni Bir Eşik Belirleme Yöntemi Olarak Respirasyon Eşiği ve Kritik Gücü Göstermedeki Başarısı

Respiratory Threshold as A New Threshold Determination Method based on Respiratory Responses and It's Success to Indicate Critical Power

¹Hakan AS

ORCID No: 0000-0002-1848-6251

²Görkem Aybars BALCI

ORCID No: 0000-0002-5720-1706

³Engin YILDIZTEPE

ORCID No: 0000-0002-7617-4934

²Özgür ÖZKAYA

ORCID No: 0000-0003-4222-5761

¹Ege Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Spor Sağlık Bilimleri Programı

²Ege Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü

³Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik Bölümü

Yazışma Adresi

Corresponding Address:

Prof. Dr. Özgür ÖZKAYA

Ege Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, Antrenörlük Eğitimi Anabilim Dalı

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

Geliş Tarihi (Received): 22.04.2022

Kabul Tarihi (Accepted): 12.09.2022

ÖZ

Yeni bir solunumsal eşik türü olarak ortaya atılan respirasyon eşiği (RE) kademeli bir rampa testinde dakika ventilasyonu bölü ekspirasyon sonu CO₂ kısmi basıncı (V_E/P_{ET}CO₂) değerindeki zamana bağlı değişimlerin analizine dayanır. Ancak RE tekniğinin yaygın olarak kullanılan önemli bir eşik belirleme yöntemi olan kritik gücü (KG) hangi düzeyde işaret edebildiğine odaklanan bir araştırma bulgusu rapor edilmemiştir. Bu çalışmanın amacı, RE tekniği kullanılarak elde edilen egzersiz şiddetinin, KG'yi hangi düzeyde karşılayabildiğini araştırmaktır. Çalışmaya iyi antrene on erkek bisiklet sporcusu katılmıştır. Sporcuların gaz değişim eşiği (GDE), solunumsal kompanzasyon noktası (SKN) ve RE düzeyleri kademeli rampa testleriyle belirlenmiştir. Bu testlerde GDE ve SKN düzeyleri, Innocor sistemi yoluyla VCO₂-VO₂ ve V_E-VCO₂ ilişkilerinde saptanan kırılmalar tespit edilerek değerlendirilmiştir. RE düzeyi SegReg paket programı kullanılarak V_E/P_{ET}CO₂-zaman ilişkisindeki en güçlü kırılma noktası tespit edilerek bulunmuştur. Sonrasında KG'yi hesaplamak için farklı günlerde sabit iş oranlarında testler uygulanmıştır. Tüm eşik göstergelerinin birbirleriyle ilişkilerinin sınaması için geçerlik analizleri yapılmıştır. Bulgular, RE (328±35,5 W; 4,23±0,39 L·dk⁻¹) ile SKN (324±34,3 W; 4,21±0,45 L·dk⁻¹) güç çıktıları ve her birine ait VO₂ yanıtları arasında yüksek bir ilişki ve uyum olduğunu göstermiştir (p>0,05; t= 1,19; r>0,96; % tahmini standart hata <5). Ancak hem RE hem de SKN güç çıktıları KG'den (298±32 W) yaklaşık %10 daha yüksek bulunmuştur (p<0,001). Çalışmamız, iyi antrene bisikletçilerde V_E/P_{ET}CO₂-zaman ilişkisinde oluşan en güçlü kırılmanın çok büyük bir başarı ile SKN'yi gösterdiğini, fakat KG'yi doğrudan belirlemede başarısız olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Değişim noktası tespiti, Gaz değişim eşiği, Rampa test, Solunumsal kompanzasyon noktası

ABSTRACT

The respiratory threshold (RT), introduced as a new threshold determination method that relied on respiratory responses, is based on the analysis of time-dependent changes in the value of minute ventilation divided by the end-tidal partial pressure of CO₂ (V_E/P_{ET}CO₂) in an incremental ramp test. However, there is no research finding focusing on the level at which the RT technique can indicate the critical power (CP), which is an essential threshold determination method widely used. The aim of this study was to investigate at which level the exercise intensity obtained using the RT technique can meet the CP. Ten well-trained male cyclists participated in the study. Gas exchange threshold (GET), respiratory compensation point (RCP), and RT levels of the athletes were determined by incremental ramp tests. In those tests, GET and RCP were evaluated by detecting breakpoints obtained in relationships of VCO₂-VO₂ and V_E-VCO₂ using the Innocor system. The RT level was found by the strongest breakpoint in the V_E/P_{ET}CO₂-time relationship using SegReg software. Then, tests were applied at constant work rates on different days to estimate the CP. Validity analyses were performed to test the relationships of all threshold indicators with each other. Results showed a high correlation and concordance between RT (328±35.5 W; 4.23±0.39 L·min⁻¹) and RCP (324±34.3 W; 4.21±0.45 L·min⁻¹) power outputs and the VO₂ responses of each (p>0.05; t= 1.19; r>0.96; estimated standard error % <5). However, both power outputs corresponded to RT and RCP were approximately 10% higher than the CP (298±32 W) (p<0.001). Our study revealed that the strongest breakpoint in the V_E/P_{ET}CO₂-time relationship in well-trained cyclists demonstrated the RCP with great success, but failed to determine the CP directly.

Keywords: Change point detection, Gas exchange threshold, Ramp test, Respiratory compensation point

GİRİŞ

Gaz değişim eşiği (GDE) (Beaver ve diğ., 1986), arttırılmalı bir egzersizde karbondioksit üretimine (V_{CO_2}) kıyasla oksijen kullanımının (VO_2) değerlendirilmesine dayanmaktadır (v -slope) (Pettitt ve diğ., 2013). Egzersiz şiddetinin kademeli olarak arttırıldığı bir egzersizde, V_{CO_2} - VO_2 regresyonu iki kez kırılmaktadır. Bu kırılmalardan ilki izotonik tamponlama fazından izokapnik faza geçişi, ikincisi ise izokapnik tamponlamadan hiperkapni fazına geçişi göstermektedir (Kouwijzer ve diğ., 2019). İzotonik tampon fazı aşıldığında, izokapnik fazda, istirahat değerlerinin üzerine çıkan laktik asidoza yanıt olarak, hidrojen iyonunun (H^+) bikarbonatla (HCO_3^-) tamponlanması yoluyla üretilen fazladan (oksidatif olmayan) CO_2 , aerobik metabolizmanın bir fonksiyonu olarak üretilen mitokondri kaynaklı (oksidatif) CO_2 'ye eklenir (Pettitt ve diğ., 2013). Egzersiz şiddeti daha da arttırıldığında, yükselen asidoz nedeniyle kandaki fazladan CO_2 düzeyinde daha ciddi bir artış görülür ve hiperkapni oluşur. Hiperkapni fazı esasen ekspirasyon sonu CO_2 kısmi basıncındaki ($P_{ET}CO_2$) ciddi azalmanın başlamasıyla karakterizedir (Wasserman ve diğ., 1975). Söz konusu üç faz arasında yaşanan iki geçiş de GDE'ye bir şekilde yansısız da, GDE izotonik tampon fazından izokapnik faza geçişte daha güçlü bir kırılma verir ve genellikle aerobik eşikle daha ilişkili bulunur (Jones ve Poole, 2009; Pettitt ve diğ., 2013).

Diğer bir solunumsal eşik türü olan solunumsal kompanzasyon noktası (SKN) ise dakika ventilasyonuna (V_E) göre V_{CO_2} 'nin durumunu yansıtmaktadır (Reinhard ve diğ., 1979). SKN'ye kadar V_E ve V_{CO_2} artışları arasında bir neden-sonuç ilişkisi varken, SKN geçilirken bu ilişki bozulmaktadır. SKN aşıldığında, solunumun kompanze edilememektedir ve ciddi bir hiperventilasyon yanıtı oluşmaktadır. SKN sırasında oluşan V_{CO_2} 'den bağımsız V_E artışında, merkezi ve periferik nörojenik uyarılar ve metabolitler önemli rol oynamaktadır (Rausch ve diğ., 1991). Bu noktada bir SKN oluşmasının esas nedeni; artan tidal hacimden (hiperpne) ziyade karotid cisimlerin aşırı uyarılmasına bağlı olarak oluşan solunum frekansı artışıdır (takipne) (Forster ve diğ., 2012; Nicolò ve diğ., 2020). Dolayısıyla SKN düzeyi, izokapnik tampon fazının sonlanarak bir hiperventilasyon yanıtının oluşmasıyla ilişkilidir ve güçlü bir anaerobik eşik göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Özkaya ve arkadaşları (2021) tarafından ortaya atılan yeni bir solunumsal eşik türü ise respirasyon eşiği (RE) olarak tanımlanmıştır. Kademeli bir egzersiz testinde RE, artan iş yüküne yanıt olarak $V_E/P_{ET}CO_2$ oranındaki zamana göre değişimlerin analizine dayanmaktadır ($V_E/P_{ET}CO_2$ -zaman). Kademeli bir egzersiz testinden elde edilen zamana göre $V_E/P_{ET}CO_2$ değişimleri, hem fiziksel olarak aktif bireylerde hem de elit dayanıklılık sporcularında analiz edilmiştir (Özkaya ve diğ., 2021). Bu değişim noktaları aerobik eşikle karakterize GDE ve anaerobik eşik olarak belirlenen SKN ile yüksek uyumlu (ortalama fark = 1,7 W; %95 uyum limiti = 3,4 W) ve ilişkili ($r=0.96$; tahmini standart hata (TSH) = 10 W) bulunmuştur. Ancak RE'nin $V_E/P_{ET}CO_2$ -zaman ilişkisinde oluşan en güçlü kırılma, kademeli bir egzersize hiperventilasyon yanıtı oluştuğunda görülmektedir. Çünkü ilişkide pay durumundaki V_E yanıtı hiperventilasyona bağlı olarak artarken, payda durumundaki $P_{ET}CO_2$ yanıtı dramatik bir şekilde düşer (Özkaya ve diğ., 2021).

Solunumsal verilere dayalı olarak eşik belirleme teknikleri dışında bir laboratuvar donanımına ihtiyaç duyulmadan saha koşullarında kolayca uygulanabilen ve yaygın olarak kullanılan bir diğer eşik belirleme yöntemi, kritik gücü (KG) analiz etmektir (Karsten ve diğ., 2014). Burada farklı günlerde uygulanan 4-5 tüketici egzersizden elde edilen, *i*) egzersiz şiddeti (W), *ii*) tükenme zamanı (s) ve *iii*) yapılan toplam iş (Joule) gibi veriler bir takım matematiksel modellere uygulanarak kritik bir güç üretim düzeyi hesaplanmaktadır (Jones ve diğ., 2019). Bu düzey teorik olarak "yorgunluk oluşmadan sürdürülebilir en yüksek egzersiz şiddeti" olarak tanımlanmıştır (Poole ve diğ., 2016). KG tahmini anaerobik eşikle ilişkili bir parametredir (Poole ve diğ., 2021). Ancak doğru bir KG tahmininde bulunabilmek için 4-5 test seansına ihtiyaç duyulur (Maturana ve diğ., 2018). Diğer yandan KG tahmininde seçilecek model ve uygulanan tüketici egzersiz şiddetlerindeki farklılığın, elde edilen değeri büyük oranda etkilediği bilinmektedir (Norouzi ve diğ., 2021).

Tahmin edilebileceği gibi KG ile en ilişkili solunumsal eşik türü SKN'dir ve bu konu literatürde çokça çalışılmıştır (Bergstrom ve diğ., 2013; Black ve diğ., 2014; Dekerle ve diğ., 2003; Leo ve diğ., 2017). Ancak RE'nin KG'yi hangi düzeyde işaret edebildiğine odaklanan bir araştırma bulgusu henüz rapor edilmemiştir. Bu çalışmanın amacı; RE tekniği kullanılarak elde edilen egzersiz şiddetinin KG'yi hangi düzeyde karşılayabildiğini araştırmaktır.

YÖNTEM

Araştırma Grubu: Çalışmanın etik kurul izni Ege Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Klinik Araştırmalar Etik Kurulu'ndan "ilaç dışı araştırmalar" etik kurul onayı ile alınmıştır (Etik No: 22-2T/16). Ayrıca çalışma Helsinki Bildirgesine uygun olarak ve katılımcılardan imzalı onam formu alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya VO_{2maks} düzeyleri $65,5 \pm 4,69$ mL·dk⁻¹·kg⁻¹ ve bu düzeye karşılık gelen zirve güç (ZG) ortalaması $366 \pm 48,8$ W olan 10 iyi antrene erkek bisiklet sporcusu gönüllü olarak katılmıştır (yaş: $24,6 \pm 1,94$ yıl; boy uzunluğu: $185 \pm 7,82$ cm; vücut ağırlığı: $72,1 \pm 9$ kg). Ölçümler ayrı günlerde ve Ege Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, İklimlendirme Laboratuvarı'nda 1 ATM, ~20°C sıcaklık ve %50-55 bağıl nem koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Veri Toplama Araçları: Gönüllülerin boy uzunluğu ve vücut ağırlığı ölçümleri, laboratuvar tipi bir boy/kilo ölçer ile yapılmıştır (Seca 217, Birmingham, İngiltere). Testler sırasındaki kalp atım sayısı takipleri telemetrik yolla veri aktaran sistemlerle kayıt altına alınmıştır (Polar RS 400, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandiya). Egzersizler elektromanyetik dirençli bir bisiklet ergometresiyle uygulanmıştır (Lode Excalibur Sport, Groningen, Hollanda). Gaz değişimleri solunum gazlarını nefesten nefese ölçebilen standart bir sistem kullanılarak değerlendirilmiştir (Innocor, Inno-500, Odense, Danimarka).

DeneySEL Tasarım: Bu çalışma ileriye dönük tekrarlanan ölçümler deney tasarımına sahip ve deney koşullarının standardize edildiği bir laboratuvar çalışmasıdır. Adaptasyon protokollerinin ardından sporcular, egzersiz şiddetinin doğrusal olarak arttırıldığı rampa testlerine alınmıştır. Akabinde sporcuların VO_{2maks} düzeyleri, farklı günlerde uygulanan sabit yüklü tüketici testlerle bulunmuştur. Yine sabit yüklü tüketici test protokollerine devam edilerek, sporcuların KG düzeyleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, hipotezlerin sınanmasında kullanılmıştır.

Verilerin Toplanması:

Uyum seansı: Her sporcunun bisiklet ergometresine, gaz analizörüne ve laboratuvar koşullarına alışabilmesi için uyum seansları yapılmıştır. Bu seanslarda sporcular, ~0 W'dan başlanarak tahmini anaerobik eşik (kalp atım sayısı rezervinin %70'i) değerlerini veren iş oranına kadar süren ve yükün doğrusal olarak arttırıldığı egzersizlere katılmıştır.

Kademeli rampa testi: Çalışmanın esas evresinde her sporcu kademeli rampa testleriyle tüketilmiştir. Rampa testlerine 4 dakika süresince 70 ± 10 devir·dk⁻¹ dolaylarında yüksüz pedal çevrimiyle başlanmıştır. Yüksüz pedal çevrim sürecinin hemen sonunda yük artışları uygulanmıştır ($1 \text{ W} \cdot 2 \text{ s}^{-1}$) ve sporcuların kendilerini rahat hissettikleri bir pedal hızı değerine ulaşmaları ve bunu korumaları istenmiştir. Tahmini aerobik eşik (kalp atım sayısı rezervinin %50'si) geçildikten sonra sporculardan 90 ± 10 devir·dk⁻¹ pedal çevrim hızlarına çıkmaları ve istenen pedal hızı aralığını korumaları istenmiştir. Yük artışları sporcunun istemli bitkinliğine kadar aynı esaslarla sürdürülmüştür. Rampa testleri, sporcuların pedal çevrim hızları 10 saniyeden uzun süre 80 devir·dk⁻¹ ve altına düştüğünde (sporcuların istemli bitkinlikleriyle) sonlandırılmıştır. Tüm testlerde sporculara güçlü sözel motivasyon desteği verilmiştir. Testler sırasında her dakikanın sonunda sporcuların algıladıkları zorluk (rating of perceived exertion: RPE) sorgulanmıştır. Test sonuçlarının doğruluğu; VO_2 'de plato (150 ml·dk⁻¹ değerinden düşük VO_2 farkı), maksimal kalp atım sayısı yanıtı ($220 - \text{yaş}$ 'a %10'dan daha yakın değer), $\geq 1,05$ solunum değişim katsayısı (respiratory exchange ratio: RER) yanıtı ve

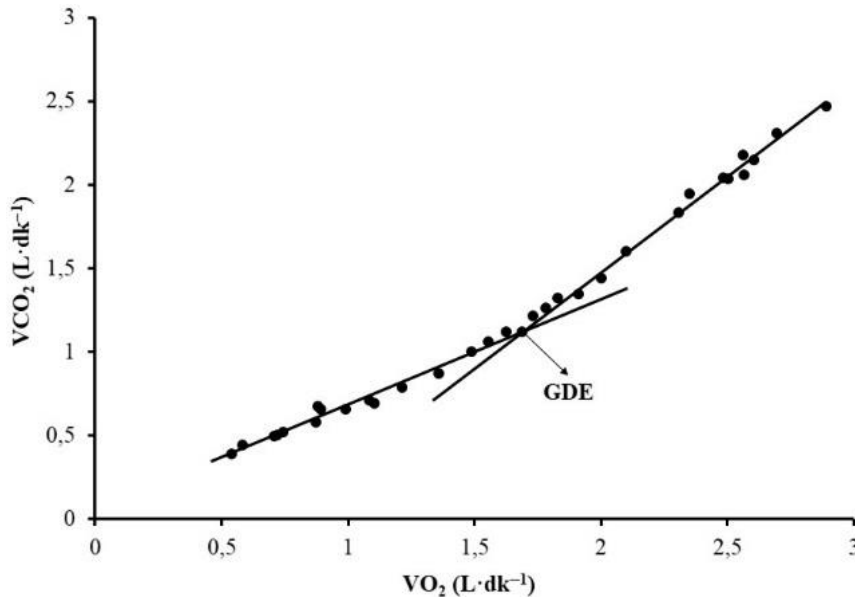
RPE'de ≥ 19 ile değerlendirilmiştir (Howley ve diğ., 1995). Kriterlere uymayan testler, devam eden günlerde tekrarlanmıştır.

Ortalama yanıt zamanı düzeltmesi: Rampa testleri sırasında elde edilen solunumsal yanıtların karşılığı olan güç üretim düzeylerinden bir miktar saptığı bilindiğinden, test sonuçlarına ortalama yanıt zamanı (mean response time: MRT) düzeltmesi uygulanmıştır (Boone ve diğ., 2008). Bu uygulamalarda egzersiz başından aerobik eşik düzeyine kadar (yani GDE) alınan VO_2 yanıtları 15 saniyelik ortalamalar şeklinde kullanılmıştır. Her bir testten elde edilen VO_2 /zaman ilişkisinin regresyon modeli oluşturulmuştur. MRT hesaplamalarında paraziti azaltabilmek için, zamana göre değişen bir fonksiyon olarak ifade edilecek VO_2 verilerinin ilk üç dakikası hesaplamalara dahil edilmemiştir (Leo ve diğ., 2017). Bu analiz VO_2 'de doğrusal trendin oluşmasıyla kontrol edilmiştir. Elde edilen veri, yüksüz pedal çevrimi sırasında kullanılan VO_2 düzeyine kadar doğrusal regresyon modelinde geri-ekstrapolasyon uygulanarak çizdirilmiştir. Bu kesişimin zaman eksenindeki iz düşümünden bir MRT değeri hesaplanmıştır. VO_2 düzeyine karşılık gelen yükler, hesaplanan MRT değeri kadar ileri alınarak, rampa egzersizleri sırasında üretilen güç çıktısına kıyasla VO_2 yanıtlarında oluşan gecikme düzeltilmiştir.

Solunumsal eşiklerin belirlenmesi: GDE ve SKN düzeyleri Innocor sisteminin yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerde GDE düzeyleri, VCO_2 - VO_2 ilişkisindeki kırılma değerlendirilerek belirlenmiştir (Binder ve diğ., 2008). Yazılım en güçlü VCO_2 - VO_2 kırılmasını GDE olarak atamıştır (Şekil-1A). SKN ise V_E 'ye kıyasla üretilen VCO_2 arasındaki ilişkide saptanan kırılma tespit edilerek bulunmuştur (Şekil-1B) (Binder ve diğ., 2008). Ayrıca Innocor sisteminin analizlerinden sonra belirlenen GDE ve SKN düzeylerinin doğrulanması için üç deneyimli araştırmacı tarafından görsel analizler yapılmıştır. Bu analizler sırasında üç araştırmacı söz konusu düzeylere ait değişim noktalarını köreltilerek ve birbirlerinden bağımsız olarak belirlemiştir (Crescêncio ve diğ., 2003). Standart bir rampa testi sırasında $V_E/P_{ET}CO_2$ -zaman ilişkisinde iki ya da üç önemli değişim noktası olduğu, ancak bu değişimlerden en güçlüsünün hiperventilasyonla ilişkili olduğu bilindiğinden (Ozkaya ve diğ., 2021), RE analizlerinde tek bir kırılmaya odaklanılmıştır. $V_E/P_{ET}CO_2$ -zaman ilişkisindeki en güçlü kırılma noktası, SegReg 1.7.0 programı kullanılarak analiz edilmiştir (Oosterbaan, 2011) (Şekil-2).

Şekil 1

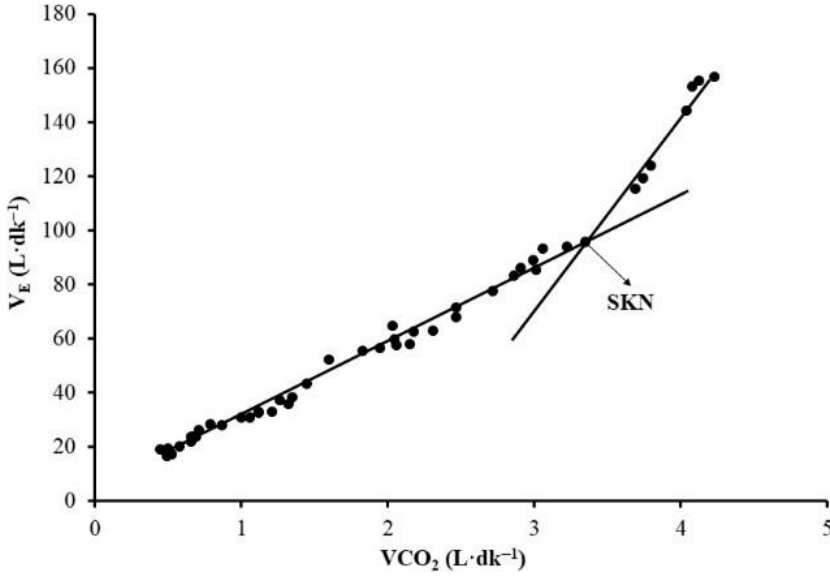
Katılımcı #5'in Rampa Testlerinden Elde Edilen VCO_2 - VO_2 (Panel A) ve V_E - VCO_2 (Panel B) İlişkisi



A

Şekil 1

Devamı

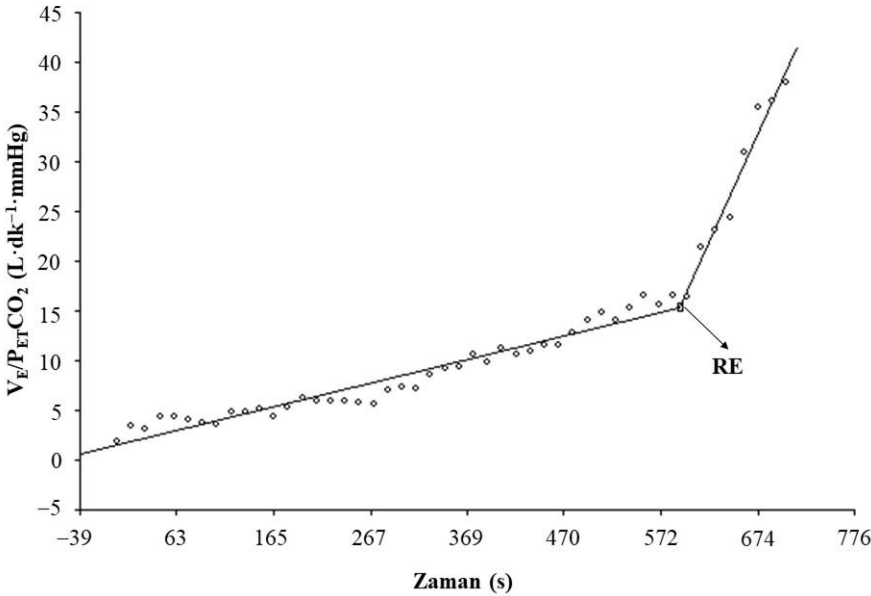


B

Not. Panel A, gaz değişim eşiği (GDE) ve Panel B ise solunumsal kompanzasyon noktası (SKN) olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 2

Katılımcı #5'in Rampa Testlerinden Elde Edilen ve $V_E/P_{ET}CO_2$ -Zaman İlişisini Gösteren Segreg Çıktısı



Not. Bu ilişkiadaki en güçlü değişim respirasyon eşiği (RE) olarak değerlendirilmiştir.

Maksimal oksijen kullanımı ve bu düzeye karşılık gelen güç çıktısının belirlenmesi: Kademeli testlerin ardından sporcular birer günlük aralıklarla sabit yüklü tüketici egzersiz testlerine alınmıştır. Bu egzersizlere, her sporcu için kademeli rampa testlerinden elde edilen en yüksek 30 saniyelik VO_2 yanıtını veren iş yükünden başlanmıştır. Sonraki seanslarda uygulanan sabit yüklü tüketici testlerde 15 W yük artışları ya da düşüşleri uygulanmıştır. Sabit şiddetli tüm egzersizlerden elde edilen en yüksek 30 saniyelik VO_2 ortalaması, o bireye ait VO_{2maks} yanıtı ve karşılık gelen güç üretim

düzeyi ise ZG olarak değerlendirilmiştir. Bu egzersizler sırasında sporculardan 90 ± 10 devir·dk⁻¹ aralığında kalmaları istenmiştir. Sporcuların pedal çevrim hızları >10 saniye süresince 80 devir·dk⁻¹ ve altına düştüğünde egzersizler sonlandırılmıştır. Tüm testlerde sporculara güçlü sözel motivasyon desteği verilmiştir. Sabit yüklü tüketici egzersizlerden elde edilen değerlerin doğruluğu; VO₂'de plato, maksimal kalp atım sayısı yanıtı, $\geq 1,05$ RER ve RPE'de ≥ 19 ile değerlendirilmiştir.

KG düzeyinin tahmin edilmesi: Sporcuların KG düzeylerinin belirlenebilmesi için, her sporcu bireysel VO_{2maks} yükü ve bu yükün %90, %95 ve %110'unda farklı günlerde tüketilmiştir. Dört testten elde edilen egzersiz şiddeti ve tükenme zamanı verileri, doğrusal 1/zaman modeline uygulanmıştır (Whipp ve diğ., 1982; Eşitlik 1). Bu egzersizler sırasında güçlü sözel desteğe rağmen pedal hızları 10 saniyeden daha uzun bir zaman 80 devir·dk⁻¹'nin altına düştüğünde testler sonlandırılmıştır.

Eşitlik 1

$$\text{Güç} = W' \times \left(\frac{1}{\text{Zaman}} \right) + KG$$

KG: Kritik güç; W': Anaerobik iş kapasitesi.

Verilerin Analizi: Sonuçlar IBM SPSS 21 istatistik paket programı (IBM SPSS Statistics for Windows, 21,0) ve Microsoft Excel (2016) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ortalamalar arasındaki farklar, varsayımların sağlandığı verilerde iki bağımlı örneklem t-testi ile varsayımlar sağlanmadığında Wilcoxon testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonrasında KG düzeyi ile diğer göstergeler arasındaki ilişkilerin değerlendirilebilmesi için Pearson korelasyon katsayısı (r) dikkate alınmıştır. Ardından KG ile SKN ve RE düzeyleri arasında doğrusal regresyon analizleri yapılarak, TSH hesaplanmıştır. Sonrasında, ölçümler arasındaki sapma (ortalama fark) belirlenmiştir ve rastgele hata değeri sapmanın $\pm 1,96$ standart sapması olarak kabul edilen sınır değeri (uyum limiti) dikkate alınarak hesaplanmıştır (Atkinson ve Nevill, 1998). Varsayım kontrollerinin ardından, ortalama farkların analizi için tek örneklem t-testi kullanılmıştır. Son olarak SKN ve RE düzeyleri ile KG çıktısının sistematik ve rastgele hatalarının hem görsel hem de sayısal açıdan ayırt edilebilmesi için Bland-Altman analizi yapılmıştır (Bland ve Altman, 1986). İstatistiksel analizlerde anlamlılık düzeyi $p < 0,05$ olarak kabul edilmiştir.

BULGULAR

Çalışmaya ait kademeli rampa testinden elde edilen GDE, RE ve SKN güç çıktıları ve bu güç çıktılarına ait VO₂ yanıtları ile tahmini KG değerleri Tablo 1'de gösterilmektedir. En güçlü anaerobik eşik göstergesi olan SKN ve RE güç çıktıları ile bu egzersiz şiddetlerine karşılık gelen VO₂ yanıtları benzerdir ($p > 0,05$; $t = 1,19$; $r > 0,96$; %TSH < 5). Fakat KG değeri hem SKN hem de RE'ye karşılık gelen güç çıktılarıyla kıyaslandığında oldukça düşük bir egzersiz şiddetine karşılık gelmektedir ($p < 0,001$; Tablo 1).

Tablo 1

İlgili Parametrelere Ait Güç Çıktısı ve VO₂ Değerleri

Değişkenler	Güç Çıktısı (W)	VO ₂ (L·dk ⁻¹)
GDE	191±26,6 ^a	2,98±0,29 ^a
SKN	324±34,3	4,21±0,45
RE	328±35,5	4,23±0,39
KG	298±32 ^b	-

Not. GDE: Gaz değişim eşiği; RE: Respirasyon eşiği; SKN: Solunumsal kompanzasyon noktası; KG: Kritik güç.

^a: SKN, RE ve KG'den daha düşük; ^b: RE ve SKN'den daha düşük.

Çalışmada elde edilen SKN ve RE düzeyleri ile KG çıktıları arasındaki ortalama farklar, uyum limitleri ve ilişki düzeyleri Tablo 2’de gösterilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, matematiksel modelle bulunan KG çıktısı ile kademeli rampa testinden elde edilen SKN ve RE düzeylerinin farklı egzersiz şiddetlerinin işaret ettikleri saptanmıştır (Tablo 2). Tüm sporcuların KG ile SKN ve RE güç çıktılarının ortalama değerleri ve bireysel farklılıkları Şekil 3’te gösterilmiştir. KG ile SKN ve RE değerleri arasında aynı yönde güçlü bir ilişki gözlenmiştir (Tablo 2). Ancak Şekil 3 ve Şekil 4’ten (Bland-Altman görsel analizi) anlaşıldığı üzere KG düzeyi, SKN ve RE değerlerini oldukça büyük bir yanlılık ile istikrarlı bir şekilde düşük göstermektedir.

Tablo 2

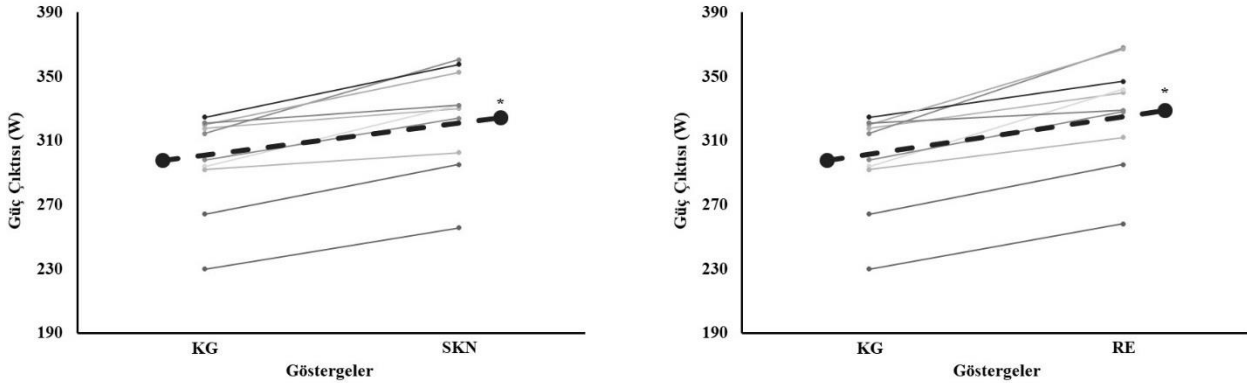
KG ile SKN ve RE Güç Çıktıları Arasındaki Ortalama Farklar, Uyum Limitleri ve İlişki Düzeyleri

Karşılaştırılan Değişken	Ortalama Fark (W)	Standart Sapma (W)	%95 Uyum Limiti (W)	Üst Uyum Limiti (W)	Alt Uyum Limiti (W)	t-testi (p)	Pearson (r)	TSH (W)
SKN	26,7	12,8	50,1	51,8	1,64	0,001	0,84	13,7
RE	31,2	15,3	59,8	61,1	1,28	0,001	0,78	16,3

Not. KG: Kritik güç; SKN: Solunumsal kompanzasyon noktası; RE: Respirasyon eşiği. TSH: Tahminin standart hatası.

Şekil 3

KG ile SKN ve RE Güç Çıktılarına Ait Ortalama ve Bireysel Farklar

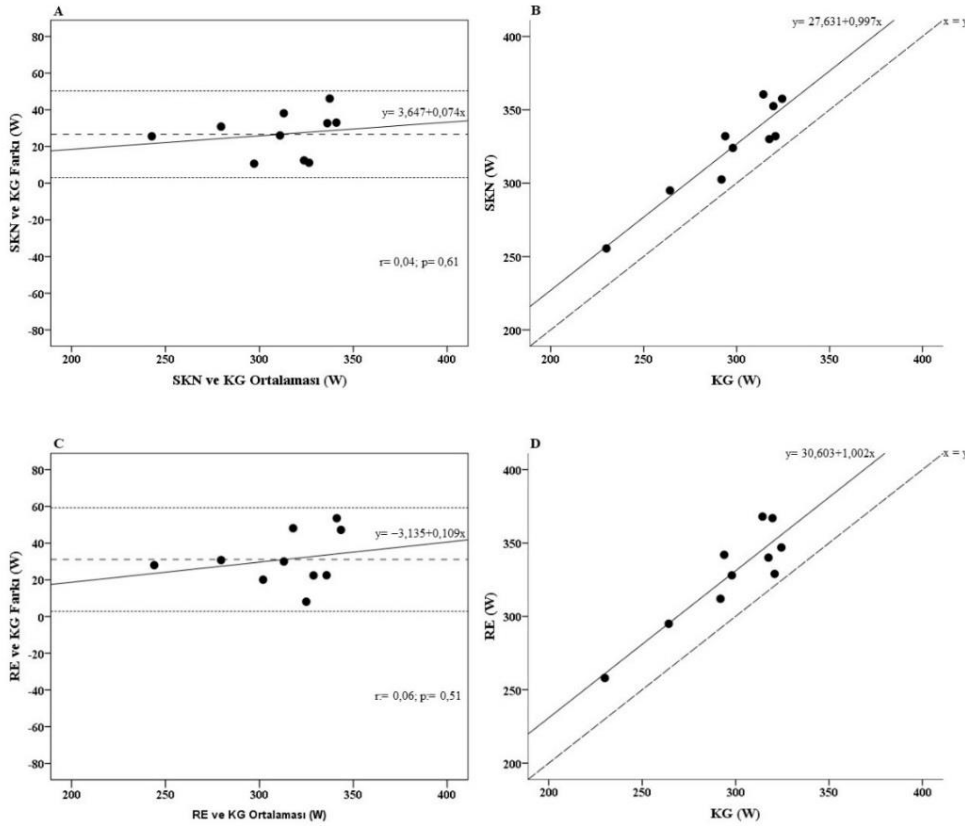


Not. KG: Kritik güç; SKN: Solunumsal kompanzasyon noktası, RE: Respirasyon eşiği.

* KG’ye oranla anlamlı farklılık.

Şekil 4

KG ile SKN ve RE Güç Çıktıları Arasındaki İlişki ve Uyum Limitinin Bland-Altman Görşeli



Not. A ve C panelindeki siyah noktalı çizgiler %95 uyum limitini temsil ederken, siyah kesikli çizgi iki ölçüm arasındaki ortalama farkı ve siyah düz çizgi ortalama değerler ile farklar arasındaki doğrusal regresyonu göstermektedir. Regresyon analizi sonucunda hem A hem de C için anlamlı bir trend bulunamamıştır. Ayrıca farklar ve ortalamalar arasında anlamlı bir korelasyon bulunmamaktadır. Farkların ölçüm değerlerine göre anlamlı bir değişim göstermediği söylenebilir. B ve D panelindeki siyah düz çizgi, en uygun doğrusal regresyonu temsil ederken, siyah kesikli çizgi tam eşitlik çizgisini göstermektedir. KG: Kritik güç; SKN: Solunumsal kompanzasyon noktası; RE: Respirasyon eşiği.

TARTIŞMA

Çalışmanın ana bulguları, RE ile SKN güç çıktıları ve her birine ait VO_2 yanıtları arasında yüksek bir ilişki ve uyum olduğunu ortaya koymuştur. Ancak hem RE hem de SKN güç çıktıları KG'den yaklaşık %10 daha yüksektir. Beklendiği gibi, GDE'ye karşılık gelen güç çıktısı VO_{2maks} elde edilen güç çıktısının ~%50-60'ı dolaylarına karşılık gelirken, KG'nin ~%70-80'i dolaylarında olduğu saptanmıştır. Bu durumda KG değeri, GDE ve VO_{2maks} elde edilen güç çıktısı farkının (Δ) yaklaşık olarak ~%60'ında oluşmuştur. Bu değerler literatürde daha önce rapor edilenlerle (~%50-60) benzerdir (Poole ve diğ., 1988; Voter ve Gayeski, 1995). Diğer yandan SKN ve RE düzeyleri, GDE ve VO_{2maks} elde edilen güç çıktıları arasında Δ %77'ye karşılık gelmiştir ve bu değer de literatürle benzerdir (Ozkaya ve diğ., 2022).

Kademeli bir egzersiz testinde artan iş yükü nedeniyle yükselen asidoz, giderek artan bir H^+ birikimine neden olmaktadır. Buna bağlı olarak da kaynağı aerobik reaksiyonlar olmayan, anaerobik temelli bir CO_2 artışı oluşmaktadır. Bu CO_2 artışı, V_E 'deki yükselmenin temelidir. Ancak bilinen şekliyle GDE ($V_{CO_2} - VO_2$), ventilasyon eşiği (VE) ($V_E - VO_2$) ya da SKN ($V_E - V_{CO_2}$) eşiklerinin analizi, zamana bağlı artış gösteren iki farklı parametrenin ilişkisinden hesaplanmaktadır. İlgili eşik düzeyleri aşılrken ilişkili parametrelerden biri (örneğin V_E) diğerine göre (örneğin VO_2) daha yüksek oranda arttığından, bir kırılma oluşur. Hâlbuki RE tekniğinde esas alınan $V_E/P_{ET}CO_2$ değişkenleri

değerlendirildiğinde; GDE'ye kadar V_E ve $P_{ET}CO_2$ birlikte artmakta, ancak GDE geçildikten sonra V_E değeri zamana bağlı olarak artışını sürdürürken $P_{ET}CO_2$ düzeyi yatay seyretmektedir. Devamında SKN geçilirken ise V_E yanıtı çok daha fazla büyümekte ancak zamana göre $P_{ET}CO_2$ yanıtlarında önemli bir düşüş trendi oluşmaktadır. Dolayısıyla RE tekniğinde kullanılan zamana göre $V_E/P_{ET}CO_2$ oranı esas alınarak yapılan analizlerde oluşan kırılmaların GDE, V_E ya da SKN'ye kıyasla daha anlamlı ve güçlü bir şekilde açığa çıkması beklenebilir. Bu şekliyle RE tekniğinin günümüze dek göz ardı edilmiş bir ilişkiye dayalı olarak ve günümüzde kullanılan diğer standart teknikler kadar etkili bir şekilde eşik değerlendirmesi yapabileceği iddia edilmiştir (Ozkaya ve diğ., 2021). Fakat her teknik için en güçlü değişim, farklı egzersiz şiddetlerinde oluşur. Örneğin GDE'nin en büyük eğimini (slope) izotonik fazdan izokapnik faza geçerken (Poole ve diğ., 2021), V_E 'nin en büyük eğimini izokapnik fazdan hiperkapni fazına geçerken (Kouwijzer ve diğ., 2019), SKN'nin ise izokapnik fazdan hiperventilasyona geçişte oluşturduğu bilinmektedir (Wasserman ve diğ., 1975). $V_E/P_{ET}CO_2$ -zaman ilişkisine dayalı RE tekniği göz önünde bulundurulduğunda ise bu düzeyin hiperkapni ve hiperventilasyon yanıtlarıyla daha ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Çünkü bu geçişlerde ilişkinin payı durumundaki V_E daha da büyürken, ilişkinin paydası durumundaki $P_{ET}CO_2$ yanıtı giderek küçülür. Yapılan ilk çalışmaya benzer şekilde (Ozkaya ve diğ., 2021), bu çalışmada gerçekleştirilen analizlerde de RE'de gözlenen en büyük değişimin SKN ile çok daha yakından ilişkili olduğu bir kez daha ortaya koyulmuştur ($p>0,05$; $t= 1,19$; $r>0,96$; %TSH<5).

SKN, tek bir tükenmeyle sonlanan kademeli bir egzersiz testiyle elde edilebildiğinden, farklı günlerde çok seanslı tüketici testler gerektiren KG belirleme prosedürlerine göre büyük kolaylık sağlamaktadır. Dolayısıyla farklı esaslara dayalı kademeli test yapıları kullanılarak belirlenen SKN'ler ile KG karşılaştırmaları çokça yapılmış ve anaerobik eşiğin gösterilmesinde bu çok güçlü iki farklı ölçüm yöntemi adına farklılaşan sonuçlar durumu bir fenomene dönüştürmüştür (Bergstrom ve diğ., 2013; Dekerle ve diğ., 2003; Keir ve diğ., 2015). Biri düşük maliyetli saha ölçümlerinde (KG), diğeri ise solunumsal parametrelerin değerlendirilmesinde (SKN) altın standart olarak kullanılan bu iki parametre arasında oldukça yüksek bir korelasyon düzeyi bulunsa da genel kanı, KG düzeyinin SKN'nin altında bir egzersiz şiddetini gösterdiğidir (Galán-Rioja ve diğ., 2020). Doğal olarak da SKN ve KG, birbirleri yerine kullanılmamalıdır (Cross ve Sabapathy, 2012). Bu farklılaşmanın nedeni iki parametrenin de dayandığı fizyolojik ve metabolik mekanizmalardaki farklılıkla açıklanmıştır. KG düzeyinin aşılarda en düşük "şiddetli" egzersiz yoğunluğuna ulaşılması, işe katılan hızlı kasılan fibril oranındaki artış (Vanhatalo ve diğ., 2016), substrat kullanımında enerji kaynağı olarak karbonhidratların daha baskın bir şekilde kullanılabilir hale gelmesi (Jones ve diğ., 2008) ve iskelet kasında kan akış hızının orantısız artışı (Copp ve diğ., 2010) gibi mekanizmalarla açıklanmaktadır. En yüksek "ağır" egzersiz yoğunluğu olan KG ise teorik olarak yorgunluk oluşmadan sürdürülebilir en yüksek egzersiz şiddeti olarak açıklanmaktadır (Poole ve diğ., 2016). Diğer yandan SKN'yi veren egzersiz şiddetinin aşılması, egzersiz yükü artışları sırasında oluşan hatırı sayılır bir metabolik asidoz artışı ve bu yolla uyarılan periferik kemoreseptörlerin tetiklediği ciddi bir hiperventilasyon yanıtıyla ilişkilendirilmektedir (Rausch ve diğ., 1991). SKN'ye kadar V_E ve VCO_2 artışları arasında bir neden-sonuç ilişkisi varken, SKN geçilirken bu ilişki bozulmaktadır. Solunumun kompanze edilememesi ve ciddi bir hiperventilasyon yanıtı oluşması ile karakterize SKN sırasında oluşan VCO_2 'den bağımsız V_E artışında, merkezi ve periferik nörojenik uyarılar ve metabolitler önemli rol oynamaktadır (Rausch ve diğ., 1991). Ancak söz konusu durumun esas nedeni; artan tidal hacimden (hiperpne) ziyade karotid cisimlerin aşırı uyarılmasına bağlı olarak oluşan solunum frekansı artışı (takipne) olarak açıklanmaktadır (Forster ve diğ., 2012; Nicolò ve diğ., 2020). Ayrıca bu yanıtın oluşmasında dolaşımdaki potasyum oranının da önemli bir rol üstlendiği kabul edilmektedir (Darabi ve diğ., 2009; McLoughlin ve diğ., 1994; Paterson ve diğ., 1990; Rosendal ve diğ., 2004). Bu bilgiler değerlendirildiğinde; KG ve SKN'yi destekleyen mekanizmaların birbirilerinden oldukça farklı olduğu görülmektedir (Leo ve diğ., 2017). Çalışmamızdan elde edilen

bulgular da özellikle iyi antrene bisikletçilerde KG ile SKN'ye karşılık gelen egzersiz yoğunluklarının yüksek ilişkili ancak önemli düzeyde farklı olduklarını ortaya koydu. RE ise hem elde edilme mantığı hem de protokol esasları bakımından çok daha yüksek oranda SKN ile kıyaslanabilir durumdadır ve elde edilen bulgulara göre KG'ye kıyasla SKN'yi göstermedeki başarısı çok daha yüksektir.

SKN adına belirtilen önemli bir diğer açık ise, bu parametrenin kullanılan rampa eğiminden çok kolayca etkilenmesi olarak rapor edilmiştir. Leo ve diğerlerine göre; SKN, rampa testlerinin bir fonksiyonu olarak açığa çıkar ve rampa eğiminden bağımsız değerlendirilemez (Leo ve diğ., 2017). Ancak rampa eğimi manipüle edilerek SKN'nin KG'yi vermesi sağlanabilir. Örneğin, dakikada 65 W yük artışı içeren rampa testlerinde, KG ve SKN'yi veren egzersiz şiddetlerinin benzer bulunduğunu gösteren araştırma bulguları sunulmuştur (Scheuermann ve Kowalchuk, 1998). Diğer yandan yavaş yük artışları içeren (örneğin dakikada 8 W) rampa testlerinden elde edilen SKN düzeyi GDE'nin hemen üzerindeki güç çıktılarında saptanabilmektedir. Bu testlerde egzersiz süresinin uzamasına bağlı olarak anaerobik eşikle ilişkili SKN düzeyi çok daha erken oluşarak çok farklı bir egzersiz şiddetini işaret edebilir (Scheuermann ve Kowalchuk, 1998). Bu durumlar SKN ve KG arasındaki ilişkinin ve her iki düzeyin meydana gelme mekanizmalarının yanlış anlaşılmasına neden olabilir (Cross ve Sabapathy, 2012). Buradaki SKN ve KG benzeşmesinin fizyolojik kaynaklı bir benzerlikten değil, kullanılan test prosedürü nedeniyle oluşan tesadüfi bir yanılgıya bağlı olarak oluştuğu gösterilmiştir (Cross ve Sabapathy, 2012; Galán-Rioja ve diğ., 2020; Leo ve diğ., 2017). Diğer yandan RE yöntemi de SKN gibi şiddeti kademeli olarak artan rampa testleri kullanılarak belirlendiği halde (Ozkaya ve diğ., 2021), $V_E/P_{ET}CO_2$ -zaman ilişkisinin uygulanan rampa eğiminden ne düzeyde etkilendiği ve bu durumda RE tekniğiyle bulunan egzersiz yoğunluklarının diğer eşik değerlerle olan ilişkisinin hangi oranda değiştiği henüz bilinmemektedir. Bu ve benzeri çalışma sorularıyla planlanacak araştırmaların, gelecekte RE tekniğinin temel mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Bilindiği gibi çalışmamızda kullanılan doğrusal 1/zaman modelinde (eşitlik-1), doğrusal ilişkinin y-ekseni uzantısı KG'yi vermektedir (Whipp ve diğ., 1982). Modele uygulanan veriler ise aynı sporcunun tahmini KG düzeyinin hemen üzerindeki egzersiz şiddetlerinde ve farklı günlerde uygulanan tüketici egzersizlerden elde edilmektedir. Fakat KG düzeyini tahmin etmede kullanılan matematiksel model, tüketici egzersiz sayısı ve tükenme zamanları değiştikçe, elde edilen KG tahmini de farklılaşmaktadır (Norouzi ve diğ., 2021). Son zamanlarda daha iyi bir KG tahmini yapabilmek için doğrusal toplam iş, doğrusal 1/zaman ve doğrusal olmayan 2-parametrelili modellerden elde edilen en düşük standart hata değeri ve yine en düşük toplam değişim katsayısına sahip (fit edilmiş) bir KG tahmin etme yöntemi önerilmiştir (Black ve diğ., 2015). Ancak sonraki dönemlerde yayımlanan çalışmalar; kullanılan bu üç matematiksel modele ait KG tahminlerinden elde edilen bireysel en iyi ve en kötü KG varsayımları arasında yalnızca %2 ya da daha az fark oluştuğunu rapor etmiştir (Black ve diğ., 2015, 2016; Greco ve diğ., 2012). Bu nedenle çalışmamızda fit edilmiş bir KG tahmini kullanılmamıştır. Ancak böyle bir yöntem benimsenmiş olsaydı bile, elde edilecek muhtemel KG tahminlerinin, yine RE ile oldukça farklı egzersiz şiddetlerini işaret edeceği söylenebilir.

Söz konusu veriler ışığında tartışılması gereken bir diğer konu, ülkemizde de yaygın olarak kullanılan "anaerobik eşik" terminolojisiyle ilgilidir. Örneğin, şiddetin kademeli olarak arttırıldığı egzersizler sırasında, iskelet kaslarından alınan elektrik sinyallerinin (EMG) analizine dayalı olarak elde edilen yorgunluk eşiği (YE), önemli çevreler tarafından ciddi bir anaerobik eşik alternatifi olarak görülür (Bergstrom ve diğ., 2013; Camic ve diğ., 2010; Zuniga ve diğ., 2010). Diğer yandan, egzersize kan laktatı yanıtlarının analiz edilerek bir anaerobik eşik belirlenmesinde kullanılan en geçerli yöntem, maksimal laktat dengesi (MLD) yorumudur (Beneke, 1995). Benzer şekilde, bu araştırmada kullanılan SKN, solunumsal parametrelere dayalı invaziv olmayan bir anaerobik eşik belirleme yöntemi olarak altın standart kabul

edilmektedir (Beaver ve diğ., 1986). Söz konusu egzersiz şiddetinin saha koşullarında belirlenmesinde altın standart ise KG'dir (Jones ve diğ., 2019). Ancak bu çalışmadan elde edilen bulguların gösterdiği şekliyle; SKN ve KG değerleri asıllarına uygun yöntemlerle değerlendirildiklerinde bile farklı egzersiz şiddetlerini verebilirler. Diğer yandan MLD'nin de SKN ya da KG'ye kıyasla farklı egzersiz şiddetlerini işaret ettiğini ortaya koyan çok sayıda araştırma bulgusu rapor edilmiştir (Dekerle ve diğ., 2003; Galán-Rioja ve diğ., 2020; Ozkaya ve diğ., 2022). Dolayısıyla ilgili egzersiz şiddeti hangi yöntem kullanılarak belirlenmiş ise o yöntemin adıyla –örneğin, yalnızca YE, MLD, SKN ya da KG olarak– anılmalı ve toptancı bir yaklaşımla bu düzey yalnızca “anaerobik eşik” olarak değerlendirilmemelidir. Anaerobik eşik terminolojisinin tek başına kullanımı, eşik değerini elde edildiği yöntem hakkında hiçbir fikir sunmamakta ve sonuç olarak da bu düzeyin hangi esaslar temel alınarak bulunduğu göz ardı edilmektedir. Çünkü bireysel bir anaerobik eşik düzeyi belirlemede kullanılacak onlarca farklı yöntem vardır ve her birinin elde edilme mantığı diğerinden farklıdır. Bu anlamda RE; gerek solunumsal parametrelere dayalı olarak elde edilen verilerden analiz ediliyor olması gerekse elde edilmesinde kullanılan test prosedürünün yapısal özellikleri bakımından büyük ölçüde SKN ile benzeşmekte ancak KG'yi yüksek tahmin etmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak RE tekniği oldukça yakın bir zamanda, yeni bir solunumsal eşik belirleme yöntemi olarak ortaya atılmış ve GDE, VE ya da SKN gibi geleneksel eşik türevlerine alternatif olarak önerilmiştir. Ancak RE'ye ait pek çok konu henüz ele alınamamıştır. Bu noktada RE'nin geçerlik ve güvenilirlik düzeyi hızla aydınlatılmalı, RE'nin güçlü ve zayıf yönleri daha ayrıntılı bir şekilde ele alınmalıdır. Söz konusu çalışma, bu ihtiyaçlardan yalnızca bir bölümünü karşılayabilmek amacıyla planlanmış ve RE'yi SKN ve KG özelinde değerlendirmiştir. Çalışma bulgularımız iyi antrene bisikletçilerde $V_E/P_{ET}CO_2$ -zaman ilişkisinde oluşan en güçlü kırılmanın çok büyük bir başarı ile SKN'yi gösterdiğini fakat KG'yi doğrudan belirlemede başarısız olduğunu ortaya koymuştur. Ancak KG ve RE arasında yüksek bir ilişki saptanmıştır. KG değeri, RE'nin oluştuğu egzersiz şiddetinin yaklaşık olarak %10 altına karşılık gelmiştir. Bu yönüyle RE, çok seanslı ve zaman alan bir KG belirleme prosedürüne alternatif olarak tek seansta bir KG tahmini sunabilir. Diğer yandan RE, SKN'nin kolaylıkla görülemediği bazı testlerde bir hiperventilasyon yanıt fazının başladığının anlaşılmasında da etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu da özellikle aerobik kapasite ve aerobik güç geliştirici antrenmanların planlanmasında oldukça önemli bir verinin elde edilebilmesi bakımından önemlidir.

Yazar Katkısı (Author contributions):

1. **Hakan As:** Tasarım, Analiz-Yorum, Makale Yazımı, Veri Toplama ve/veya İşleme, Eleştirel İnceleme.
2. **Görkem Aybars Balcı:** Makale Yazımı, Veri Toplama ve/veya İşleme, Eleştirel İnceleme.
3. **Engin Yıldıztepe:** Analiz-Yorum, Makale Yazımı, Veri Toplama ve/veya İşleme, Eleştirel İnceleme.
4. **Özgür Özkaya:** Fikir/Kavram, Tasarım, Analiz-Yorum, Makale Yazımı, Eleştirel İnceleme.

Etik Kurul İzni ile İlgili Bilgiler

Kurul Adı: Ege Üniversitesi Tıbbi Araştırmalar Etik Kurulu

Tarih: 10/02/2022

Sayı No: 22-2T/16

KAYNAKÇA

1. **Atkinson, G. ve Nevill, A. M. (1998).** Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26(4), 217-238. <https://doi.org/10.2165/00007256-199826040-00002>
2. **Beaver, W. L., Wasserman, K. ve Whipp, B. J. (1986).** A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of applied physiology*, 60(6), 2020-2027. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.6.2020>
3. **Beneke, R. (1995).** Anaerobic threshold, individual anaerobic threshold, and maximal lactate steady state in rowing. *Medicine and science in sports and exercise*, 27(6), 863-867.
4. **Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Cochrane, K. C., Jenkins, N. D. M., Lewis, R. W., Traylor, D. A., Zuniga, J. M., Schmidt, R. J., Johnson, G. O. ve Cramer, J. T. (2013).** An examination of neuromuscular and metabolic fatigue thresholds. *Physiological Measurement*, 34(10), 1253-1267. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/10/1253>
5. **Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Traylor, D. A., Camic, C. L., Lewis, R. W., Schmidt, R. J. ve Johnson, G. O. (2013).** 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. <https://doi.org/10.1080/02701367.2013.784723>
6. **Binder, R. K., Wonisch, M., Corra, U., Cohen-Solal, A., Vanhees, L., Saner, H. ve Schmid, J. P. (2008).** Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European journal of cardiovascular prevention ve rehabilitation*, 15(6), 726-734. <https://doi.org/10.1097/HJR.0b013e328304fed4>
7. **Black, M. I., Durant, J., Jones, A. M. ve 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. <https://doi.org/10.1080/17461391.2013.810306>
8. **Black, M. I., Jones, A. M., Bailey, S. J. ve Vanhatalo, A. (2015).** Self-pacing increases critical power and improves performance during severe-intensity exercise. *Applied physiology, nutrition, and metabolism*, 40(7), 662-670. <https://doi.org/10.1139/apnm-2014-0442>
9. **Black, M. I., Jones, A. M., Kelly, J. A., Bailey, S. J. ve 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. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3491-y>
10. **Bland, J. M. ve Altman, D. G. (1986).** Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307-310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
11. **Boone, J., Koppo, K. ve Bouckaert, J. (2008).** The VO₂ response to submaximal ramp cycle exercise: Influence of ramp slope and training status. *Respiratory physiology ve neurobiology*, 161(3), 291-297. <https://doi.org/10.1016/J.RESP.2008.03.008>
12. **Camic, C. L., Housh, T. J., Johnson, G. O., Hendrix, C. R., Zuniga, J. M., Mielke, M. ve Schmidt, R. J. (2010).** An EMG frequency-based test for estimating the neuromuscular fatigue threshold during cycle ergometry. *European journal of applied physiology*, 108(2), 337-345. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1239-7>
13. **Copp, S. W., Hirai, D. M., Musch, T. I. ve Poole, D. C. (2010).** Critical speed in the rat: Implications for hindlimb muscle blood flow distribution and fibre recruitment. *The Journal of Physiology*, 588(24), 5077-5087. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.198382>
14. **Crescêncio, J. C., Martins, L. E. B., Murta, L. O., Antloga, C. M., Kozuki, R. T., Santos, M. D. B., Neto, J. A. M., Maciel, B. C. ve Gallo, L. (2003).** Measurement of anaerobic threshold during dynamic exercise in healthy subjects: Comparison among visual analysis and mathematical models. *Computers in Cardiology*, 2003, 801-804.
15. **Cross, T. ve Sabapathy, S. (2012).** The Respiratory Compensation "Point" as a Determinant of O₂ Uptake Kinetics? *International Journal of Sports Medicine*, 33(10), 854-854. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1321903>
16. **Darabi, S., Dehghan, M., Refahi, S. ve Kiani, E. (2009).** Ventilation, potassium and lactate during incremental exercise in men athletes. *Research Journal of Biological Sciences*, 4(4), 427-429.
17. **Dekerle, J., Baron, B., Dupont, L., Vanvelcenaher, J. ve Pelayo, P. (2003).** Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. *European journal of applied physiology*, 89(3), 281-288. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0786-y>
18. **Forster, H. V., Haouzi, P. ve Dempsey, J. A. (2012).** Control of breathing during exercise. *Comprehensive Physiology*, 2(1), 743-777. <https://doi.org/10.1002/cphy.c100045>
19. **Galán-Rioja, M. Á., González-Mohino, F., Poole, D. C. ve González-Ravé, J. M. (2020).** Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: Systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1771-1783. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01314-8>
20. **Greco, C. C., Caritá, R. A. C., Dekerle, J. ve Denadai, B. S. (2012).** Effect of aerobic training status on both maximal lactate steady state and critical power. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 37(4), 736-743. <https://doi.org/10.1139/H2012-047>

21. **Howley, E. T., Bassett, D. R. ve Welch, H. G. (1995).** Criteria for maximal oxygen uptake: Review and commentary. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 27(9), 1292-1301. <https://doi.org/10.1249/00005768-199509000-00009>
22. **Jones, A. M., Burnley, M., Black, M. I., Poole, D. C. ve Vanhatalo, A. (2019).** The maximal metabolic steady state: Redefining the ‘gold standard’. *Physiological Reports*, 7(10), e14098. <https://doi.org/10.14814/phy2.14098>
23. **Jones, A. M. ve Poole, D. C. (2009).** Physiological demands of endurance exercise. *Olympic Textbook of Science in Sport*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell Publishing, Chichester, UK, 43-55.
24. **Jones, A. M., Wilkerson, D. P., DiMenna, F., Fulford, J. ve Poole, D. C. (2008).** Muscle metabolic responses to exercise above and below the “critical power” assessed using 31P-MRS. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 294(2), R585-R593. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00731.2007>
25. **Karsten, B., Jobson, S. A., Hopker, J., Jimenez, A. ve Beedie, C. (2014).** High agreement between laboratory and field estimates of critical power in cycling. *International journal of sports medicine*, 35(04), 298-303.
26. **Keir, D. A., Fontana, F. Y., Robertson, T. C., Murias, J. M., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M. ve Pogliaghi, S. (2015).** Exercise intensity thresholds: Identifying the boundaries of sustainable performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(9), 1932-1940. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000613>
27. **Kouwijzer, I., Valize, M., Valent, L. J. M., Comtesse, P. G. P., Woude, L. H. V. van der ve Groot, S. de. (2019).** The influence of protocol design on the identification of ventilatory thresholds and the attainment of peak physiological responses during synchronous arm crank ergometry in able-bodied participants. *European Journal of Applied Physiology*, 119(10), 2275-2286. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04211-9>
28. **Leo, J. A., Sabapathy, S., Simmonds, M. J. ve Cross, T. J. (2017).** The respiratory compensation point is not a valid surrogate for critical power. *Medicine and science in sports and exercise*, 49(7), 1452-1460. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001226>
29. **Maturana, F. M., Fontana, F. Y., Pogliaghi, S., Passfield, L. ve Murias, J. M. (2018).** Critical power: How different protocols and models affect its determination. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(7), 742-747. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.11.015>
30. **McLoughlin, P., Popham, P., Linton, R. A., Bruce, R. C. ve Band, D. M. (1994).** Exercise-induced changes in plasma potassium and the ventilatory threshold in man. *The Journal of physiology*, 479, 139-147. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1994.sp020283>
31. **Nicolò, A., Marcora, S. M. ve Sacchetti, M. (2020).** Time to reconsider how ventilation is regulated above the respiratory compensation point during incremental exercise. *Journal of Applied Physiology*, 128(5), 1447-1449. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00814.2019>
32. **Norouzi, M., Çabuk, R., Balci, G. A., As, H. ve Özkaya, Ö. (2021).** Farklı Tükenme Aralıkları ve Matematiksel Model Kullanımının Kritik Güç Tahminlerine Etkisi. *Spor Bilimleri Dergisi*, 32(3), 151-166. <https://doi.org/10.17644/sbd.931304>
33. **Oosterbaan, R. (2011).** *SegReg: Segmented linear regression with breakpoint and confidence intervals*. <https://www.waterlog.info/segreg.htm>
34. **Ozkaya, O., Balci, G. A., As, H., Cabuk, R. ve Norouzi, M. (2022).** Grey Zone: A Gap Between Heavy and Severe Exercise Domain. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(1), 113-120. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003427>
35. **Ozkaya, O., Balci, G. A., As, H. ve Yildiztepe, E. (2021).** A new technique to analyse threshold-intensities based on time dependent change-points in the ratio of minute ventilation and end-tidal partial pressure of carbon-dioxide production. *Respiratory Physiology ve Neurobiology*, 294, 103735.
36. **Paterson, D. J., Friedland, J. S., Bascom, D. A., Clement, I. D., Cunningham, D. A., Painter, R. ve Robbins, P. A. (1990).** Changes in arterial K⁺ and ventilation during exercise in normal subjects and subjects with McArdle’s syndrome. *The journal of physiology*, 429(1), 339-348. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1990.sp018260>
37. **Pettitt, R. W., Clark, I. E., Ebner, S. M., Sedgeman, D. T. ve Murray, S. R. (2013).** Gas exchange threshold and VO_{2max} testing for athletes: An update. *Journal of strength and conditioning research*, 27(2), 549-555. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825770d7>
38. **Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B. ve Jones, A. M. (2016).** Critical power: An important fatigue threshold in exercise physiology. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(11), 2320-2334. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000939>
39. **Poole, D. C., Rossiter, H. B., Brooks, G. A. ve Gladden, L. B. (2021).** The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. *The Journal of Physiology*, 599(3), 737-767. <https://doi.org/10.1113/JP279963>
40. **Poole, D. C., Ward, S. A., Gardner, G. W., Whipp, B. J., Pooles, D. C., Ward, S. A., Gardner, G. W. ve Whipp, B. J. (1988).** Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics*, 31(9), 1265-1279. <https://doi.org/10.1080/00140138808966766>
41. **Rausch, S. M., Whipp, B. J., Wasserman, K. ve Huszczuk, A. (1991).** Role of the carotid bodies in the respiratory compensation for the metabolic acidosis of exercise in humans. *The Journal of physiology*, 444, 567-578. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1991.sp018894>
42. **Reinhard, U., Müller, P. H. ve Schülling, R. M. (1979).** Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respiration; international review of thoracic diseases*, 38(1), 36-42. <https://doi.org/10.1159/000194056>

43. Rosendal, L., Blangsted, A. K., Kristiansen, J., Søgaard, K., Langberg, H., Sjøgaard, G. ve Kjaer, M. (2004). Interstitial muscle lactate, pyruvate and potassium dynamics in the trapezius muscle during repetitive low-force arm movements, measured with microdialysis. *Acta physiologica Scandinavica*, 182(4), 379-388. <https://doi.org/10.1111/j.1365-201X.2004.01356.x>
44. Scheuermann, B. W. ve Kowalchuk, J. M. (1998). Attenuated respiratory compensation during rapidly incremented ramp exercise. *Respiration Physiology*, 114(3), 227-238. [https://doi.org/10.1016/S0034-5687\(98\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0034-5687(98)00097-8)
45. Vanhatalo, A., Black, M. I., DiMenna, F. J., Blackwell, J. R., Schmidt, J. F., Thompson, C., Wylie, L. J., Mohr, M., Bangsbo, J., Krstrup, P. ve Jones, A. M. (2016). The mechanistic bases of the power–time relationship: Muscle metabolic responses and relationships to muscle fibre type. *The Journal of Physiology*, 594(15), 4407-4423. <https://doi.org/10.1113/JP271879>
46. Voter, W. A. ve Gayeski, T. (1995). Determination of myoglobin saturation of frozen specimens using a reflecting cryospectrophotometer. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 269(4), H1328-H1341.
47. Wasserman, K., Whipp, B. J., Koyal, S. N. ve Cleary, M. G. (1975). Effect of carotid body resection on ventilatory and acid-base control during exercise. *Journal of applied physiology*, 39(3), 354-358. <https://doi.org/10.1152/jappl.1975.39.3.354>
48. Whipp, B. J., Huntsman, D. J., Stoner, N., Lamarra, N. ve Wasserman, K. (1982). A constant which determines the duration of tolerance of high-intensity work. *Federation Proceedings*, 41(5), 1591.
49. Zuniga, J. M., Housh, T. J., Camic, C. L., Hendrix, C. R., Schmidt, R. J., Mielke, M. ve Johnson, G. O. (2010). A mechanomyographic fatigue threshold test for cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 31(9), 636-643. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1255112>