



ARAŞTIRMA

F.Ü.Sağ.Bil.Tıp Derg.
2013; 27 (2): 63 - 67
http://www.fusabil.org

İnsanlarda Sabit Yük Egzersiz Testi Sırasında Anaerobik Eşik ile Substrat Kullanımı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Seda UĞRAŞ
Sermin ALGÜL
Oğuz ÖZÇELİK

Fırat Üniversitesi,
Tıp Fakültesi,
Fizyoloji Anabilim Dalı,
Elazığ, TÜRKİYE

Amaç: Optimal yağ yakım bölgesinin bulunması için farklı yoğunluktaki sabit yük egzersiz testleri sırasında vücut substrat kullanımları karşılaştırılmalı olarak incelendi.

Gereç ve Yöntem: Yedi sedanter erkek denek lokal etik komite iznini okuyup imzaladıktan sonra çalışmaya katıldılar. Başlangıçta, deneklerin anaerobik eşik (AE) ve maksimal egzersiz kapasitelerinin (Wmax) belirlenmesi için bisiklet ergometre ile artan yüke karşı yapılan egzersiz testi (15 W/dk) uygulandı. Sonra, her denek AE'nin %25 altı, AE'de ve AE'nin %25 üstünde olmak üzere 3 farklı sabit yük egzersiz testine (30 dk) katıldılar. Solunum ve pulmoner gaz değişim parametreleri nefesten-nefese değerlendirildi. Metabolik değişim solunum katsayısı (RQ) ile belirlendi. AE, V-slope ve diğer konvansiyonel metotlar ile belirlendi. Verilerin analizinde paired t-testi kullanıldı.

Bulgular: Yağ oksidasyon oranı AE'nin %25 altında 0.952 ± 0.01 ve AE'de 0.950 ± 0.02 olarak bulundu. RQ, AE'nin %25 üstü iş güçlerinde ise düzenli olarak artış gösterdi (1.046 ± 0.03).

Sonuç: Egzersiz yoğunluğunun artışı (AE'nin %25 altından AE'ye) yağ oksidasyonunun artmasına neden olmaktadır. AE'nin %25 üstü iş gücünde, anaerobik glikoliz nedeniyle karbonhidrat oksidasyonu artışı gözlenmiştir. AE'de yapılan iş gücündeki yağ oksidasyonunun artışı, klinik bilimleri için önemli bir egzersiz protokolüdür.

Anahtar Kelimeler: Egzersiz testi, metabolizma, anaerobik eşik, solunum katsayısı.

Determination of the Relationships Between Anaerobic Threshold and Substrate Utilization During Constant Load Exercise Test in Human Subjects

Objective: Body substrate utilizations were examined comparatively in various constant load exercise tests to find optimal fat burning zone.

Material and Methods: Seven sedantary male subjects participated to the study after giving signed written informed consents which were approved by the local ethical committee. They initially performed an incremental exercise test (15 W/min) for estimation of anaerobic threshold (AT) and maximal exercise capacity (Wmax) using cycle ergometer. Then, each subject performed 3 different constant load exercise tests (30 min): work load corresponded to 25% below AT, at the AT, and at the 25% above AT. Ventilatory and pulmonary gas exchange parameters were evaluated breath-by-breath. Metabolic changes were determined using respiratory quotient (RQ). AT was estimated using V-slope and other conventional methods. A paired t-test was used to evaluate values.

Results: Fat oxidation ratio was found to be 0.950 ± 0.02 in AT and 0.952 ± 0.01 in 25% below AT. RQ systematically increased work load at the 25% above AT (1.046 ± 0.03).

Conclusion: Increasing exercise intensity (from 25% below AT to AT) caused increases in fat oxidation ratio. However, the work load intensity 25% above AT results in an increase of carbohydrate oxidation rate due to the anaerobic glycolysis. Increases in fat oxidation at the work load by corresponded AT could be an important training protocol for clinical medicine.

Key Words: Exercise test, metabolism, anaerobic threshold, respiratory quotient.

Geliş Tarihi : 07.02.2013
Kabul Tarihi : 07.06.2013

Yazışma Adresi
Correspondence

Oğuz ÖZÇELİK
Fırat Üniversitesi,
Tıp Fakültesi,
Fizyoloji Anabilim Dalı,
Elazığ-TÜRKİYE

droozcelik@yahoo.com

Giriş

Egzersiz sırasında vücudun artan enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacın sağlandığı kaynakların belirlenmesi klinik ve spor bilimlerinin üzerinde durduğu önemli konuların başında gelmektedir. Fiziksel egzersiz yoğunluğunun derecesi ve süresi teşhis veya tedavi amaçlı egzersiz programı hazırlanmasında hayati öneme sahiptir. Bireylere uygulanan egzersiz iş gücü stresine bağlı olarak artan metabolik aktivitenin devam ettirebilmesi için gerekli olan O_2 ve besin maddelerinin karşılanabilmesi, kardiyovasküler ve solunum sistemlerinin yakın desteğini gerektirmektedir (1). Bu destekleyici sistemlerde meydana gelebilecek olan yetersizlik metabolizmada değişime ve sonucunda erken yorulmalara neden olabilmektedir. Aerobik egzersiz uygulamaları diyabetik hastalarda glukoz kullanımını ve obez hastalarda yağ yakımını artırmayı destekleyici tedavi için yaygın olarak uygulanmaktadır (2-5). Egzersiz

sırasında bireylerin organ ve sistemlerin sağlamlık durumlarının belirlenmesinde sık kullanılan bir parametre olan Anaerobik Eşik (AE), metabolizmanın aerobikten anaerobiğe geçiş noktasını tanımlamaktadır (1). Bireylerin istirahat veya farklı yoğunluktaki fiziksel aktiviteler sırasında kullandığı enerji kaynaklarının karbonhidrat-yağ durumlarının belirlenmesi önemli bir konudur (5-7). Şiddeti düzenli olarak artan yüke karşı yapılan egzersiz testi sırasında AE'deki substrat kullanım durumunu gösteren solunum katsayısı (RQ) yaklaşık 1.00 olup karbonhidrat kullanımı göstermektedir. Bununla birlikte iş gücü şiddetinin AE'ye denk geldiği sabit yük egzersiz testi sırasında vücut substrat kullanımının değişimi henüz aydınlığa kavuşturulmamıştır. Vücut metabolizmasının oksidatif olarak (metabolik asit artışı olmadan) tolere edebileceği en yüksek nokta olan AE'deki substrat kullanımının belirlenmesi özellikle sporcuların aerobik performanslarının artırılmasında ve obezite kliniklerinde önemli bir yer tutacaktır.

Bu çalışmada AE'deki iş gücünde uzun süreli yapılan egzersiz sırasında vücut substrat kullanımını belirleyerek AE üstü ve AE altı sabit yük egzersiz testleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amaçlanmıştır.

Gereç ve Yöntem

Toplam 7 sağlıklı sedanter erkek denek etik kurul onay formunu okuyup imzaladıktan sonra çalışmaya katıldı. Deneklerin fiziksel özellikleri; (ortalama±SD) yaşları: 19.8±1.6 yıl, boyları: 189±5 cm, ağırlıkları: 75.6±6 kg, VKİ'leri: 21.2±1.8. Egzersize katılmadan önce heyecan ve stres durumunun en aza indirilmesi amacı ile deneklere laboratuvar ortamı ve egzersiz sistemleri tanıtıldı. Tüm çalışmalar akşam açlığını takiben sabah 08:00-10:00 arasında yapıldı. Deneklerin çalışma öncesi ilaç veya performansı etkileyici, metabolizmayı değiştirebilecek faktörlerden uzak durması söylendi.

Tüm denekler, ilk olarak elektromanyetik bisiklet ergometre (VIA sprint TM 150/200P) ile şiddeti düzenli olarak artan yüke karşı yapılan egzersiz testine katıldılar (8). Egzersiz test protokolü 20 W iş gücünde 4 dk'lık ısınma dönemi ile başladı. Bunu takiben iş gücü 15 W/dk olarak bilgisayar kontrolünde deneklerin pedal çevirmeye devam edemeyecekleri nokta olan maksimal egzersiz kapasitelerine (W_{max}) kadar artırıldı. Daha sonra iş gücü tekrar 20 W'a indirilerek iyileşme dönemi ile test sonlandırıldı. Bisiklet sele yüksekliği deneklerin fiziksel özelliklerine uygun şekilde ayarlandı ve pedal çevirme hızları yaklaşık olarak 60 rpm'de tutuldu.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise tüm deneklere iş gücü şiddetleri AE'de (W_{AE}), AE'nin %25 üstünde (W_{%25>AE}) ve %25 AE altında (W_{%25<AE}) olmak üzere 3 farklı sabit yük egzersiz test protokolleri uygulandı. Egzersiz test süresi maksimal 30 dk ile (veya gidebilecekleri noktaya kadar) sınırlandırılmıştır.

Egzersiz sırasında tüm deneklerin kardiyak parametreleri 12'li göğüs elektrotları kullanılarak (Nihon Kohden BSM-230) atımdan atıma takip edildi. Solunum ve akciğer gaz değişim parametreleri türbin volümetre

(Triple V sensörü) ve metabolik gaz ölçüm sistemi (Master Screen CPX, Almanya) ile değerlendirildi. Her test öncesi sistemlerin kalibrasyonu düzenli olarak yapıldı.

Deneklerin AE'lerinin hesaplanmasında CO₂ atılımı (VCO₂) ile O₂ alımı (VO₂) arasındaki ilişkiyi tanımlayan V-slope metodu ile indirekt olarak hesaplandı (9). İlave olarak solunum-O₂ alım eşitliği (V_E/VO₂) ile tidal sonu parsiyel O₂ basıncındaki (PETO₂) artışlarda AE hesaplanmasında destekleyici yöntem olarak kullanıldı (10). Egzersiz sırasında bireylerin metabolizma değişimlerinin takibinde birim zamandaki VO₂ ile birim zamandaki VCO₂ arasındaki ilişkiyi tanımlayan solunum katsayısı (RQ, ΔVCO₂/ΔVO₂) kullanıldı. Çalışmada elde edilen değerler ortalama ±SD olarak hesaplandı. İstatistiksel analizde Paired t-testi kullanıldı P<0.05 anlamlı kabul edildi.

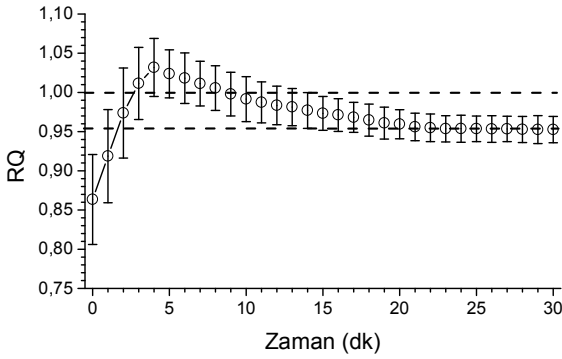
Bulgular

Deneklerin, şiddeti düzenli olarak artan yüke karşı yapılan egzersiz testi sırasında ulaştıkları maksimal iş gücü (V_{max}) ve AE'deki iş gücü değerleri (W_{AE}) sırası ile 222±29 W, 137±23 W, 61±2 olarak bulundular. Deneklere W_{AE}, W_{%25>AE}, W_{%25<AE}, uygulanan iş güçleri ve bunların W_{max} ile oranları Tablo 1'de verilmiştir.

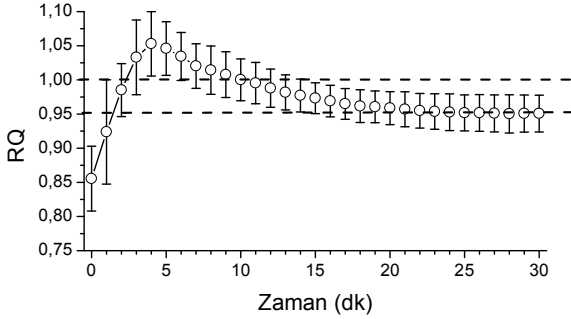
Tablo 1. Deneklere uygulanan sabit yük egzersiz test protokollerindeki iş gücü değerleri ve bunların maksimal egzersiz kapasitelerine oranları (W_{max}, %): Anaerobik eşığe denk gelen iş gücünün %25 altı (W_{%25<AE}), anaerobik eşikteki iş gücü (W_{AE}) ve anaerobik eşığın %25 üstüne denk gelen iş gücü (W_{%25>AE}).

Denek	W _{AE<%25} (W)	W _{max} (%)	W _{AE} (W)	W _{max} (%)	W _{AE>%25} (W)	W _{max} (%)
1	123	%47	165	%63	206	%79
2	94	%45	125	%60	156	%76
3	105	%46	135	%60	168	%73
4	123	%48	165	%64	206	%80
5	82	%44	110	%59	138	%74
6	110	%46	150	%63	187	%79
7	82	%42	110	%56	135	%69
Ort (±SD)	102± 17	45±1	137± 23	61±2	170± 29	75±3

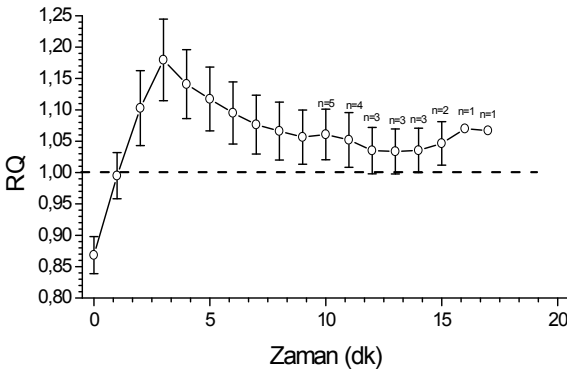
Denekler arasında farklılıklar olmakla birlikte ortalama (±SD) iş güçlerinin maksimal iş gücüne oranları: W_{%25<AE}, %45±1, W_{AE}, %61±2 ve W_{%25>AE} %75±3 olarak bulundular (Tablo 1). Tüm denekler W_{%25<AE} ve W_{AE}'deki testlerde hedeflenen 30 dk'lık maksimal egzersiz süresini tamamlamışlardır (Şekil 1 ve Şekil 2). Buna karşılık W_{%25>AE}'deki testlerde denekler arasında egzersiz süreleri 8 dk 55 sn ile 16 dk 56 sn arasında değişiklikler göstermiştir (Şekil 3). Bu egzersiz protokolünde maksimal egzersiz süresini sadece 1 denek tamamlamıştır.



Şekil 1. Egzersiz iş gücü şiddeti %25 AE altında olan egzersiz testinde tüm deneklerin ortalama (\pm SD) solunum katsayısı (RQ) cevapları. Üstteki kesik çizgi RQ:1.00 altındaki ise test esnasında RQ'nun dengelendiği noktayı göstermektedir (n=7).



Şekil 2. Egzersiz iş gücü şiddeti AE'ye denk gelen sabit yük egzersiz testinde deneklerin ortalama (\pm SD) solunum katsayısı (RQ) cevapları. Üstteki kesik çizgi RQ:1.00 altındaki kesik çizgi ise test esnasında RQ'nun dengelendiği noktayı göstermektedir (n=7).



Şekil 3: İş gücü şiddeti %25 AE üstünde olan sabit yük egzersiz testinde deneklerin ortalama (\pm SD) solunum katsayısı (RQ) cevapları. Kesik çizgi RQ:1.00'ü göstermektedir (işaretsiz noktalarda n=6). Bir denek 30 dk'lık maksimal egzersiz süresini tamamladığı için değerlendirme dışı bırakılmıştır.

İş gücü şiddetinin $W_{\%25<AE}$ ve W_{AE} 'de olduğu sabit yük egzersiz testleri sırasındaki RQ değerlerinin ısınma döneminde sırası ile 0.863 ± 0.05 ve 0.855 ± 0.04 olarak bulunurken iş gücünü artırılmasını takiben RQ hızlı bir şekilde artış göstererek 1.00 üzerine yükselip yaklaşık 20. dakikadan sonra 0.952 ± 0.01 ve 0.950 ± 0.02 seviyelerine düşüp sabit bir şekilde egzersiz sonuna kadar devam etmişlerdir (Şekil 1 ve Şekil 2). Buna karşılık iş gücü şiddeti $W_{\%25>AE}$ 'deki RQ değeri 1.00 üzerinde olup istatistiksel olarak hem $W_{\%25<AE}$ ($P=0.0001$) hemde W_{AE} 'den ($P<0.0001$) anlamlı olarak bulunmuştur (Şekil 3).

Tartışma

Deneklerin, şiddeti düzenli olarak artan yüke karşı yapılan egzersiz testi sırasında ulaştıkları W_{max} ve AE'deki iş gücü değerlerinin vücut ağırlıkları başına miktarı, literatürde normal kabul edilen değerler ile uyum göstermektedirler (11, 12). Aerobik metabolizmadan anaerobik metabolizmaya geçiş noktasını tanımlayan AE'deki iş gücü oranı deneklerin W_{max} 'larının %56 ile %64'ü arasında değişmektedir (1, 11, 12).

Besinlerle alınan substratların vücut yaşamını desteklemek için yakılarak enerjiye dönüştürülme hızındaki azalma veya artma hastalık göstergelerinden birisidir. Metabolik hızın belirlenmesinin önemine paralel olarak metabolizma için kullanılan kaynakların oranlarının da belirlenmesi yine klinik açıdan üzerinde durulan önemli bir konudur (5, 13, 14). Vücut enerji sistemlerinin devamlılığı için glikojen ve yağlar temel kaynaklardır (15). Egzersiz sırasında enerji kaynaklarının kullanımında egzersizin yoğunluğu, tipi, süresi, diet, fiziksel durum gibi pek çok faktör rol oynamaktadır (16-18). İstirahat veya düşük yoğunluktaki egzersiz sırasında adipozitlerden mobilize olan serbest yağ asitleri, ana enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (19). Bu çalışmada, sabit yük egzersiz testlerinin ısınma dönemindeki RQ değerleri yaklaşık olarak 0.850'ler civarlarında olup enerji kaynaklarının %50 yağ %50 karbonhidratlardan olduğunu göstermektedir.

İş gücü şiddetinin hafif ve orta seviye yoğunluğuna denk geldiği $W_{\%25<AE}$ ve W_{AE} 'deki sabit yük egzersiz testleri sırasındaki RQ değerleri, yaklaşık 20. dakika civarında 0.950'ler seviyelerine inerek testin sonuna kadar benzer şekilde devam etmiştir (Şekil 1 Şekil 2). Egzersiz sırasındaki RQ 0.950, enerji kaynaklarının %84 karbonhidrat %16 yağ oksidasyonundan geldiğini göstermektedir. Şiddeti düzenli olarak artan yüke karşı yapılan egzersiz testi sırasında AE altı bölgede RQ değeri 1.00 olup %100 karbonhidrat tüketimini göstermektedir (9, 19).

Literatürde iş gücü yoğunluğunun maksimal O_2 alımının (VO_2max) %40-65 arasında olduğunda egzersiz testlerinde yağ yakım oranının yüksek oranda olduğu bildirilmiştir (14, 20). Bu çalışmada $W_{\%25<AE}$ egzersiz yoğunluk oranı %45 ve W_{AE} 'deki egzersiz yoğunluk oranı ise %61 değerindedir (21).

Düşük ve orta yoğunluklu egzersizde yağlar temel kaynak olurken egzersiz yoğunluğu artınca

karbonhidratlar temel kaynak durumuna geçerler. Egzersiz sırasında iskelet kaslarında glikoz alımının düzenlenmesi tam olarak anlaşılacakla birlikte bunun insülinle bağımlı bir mekanizma olduğu görüşü ileri sürülmektedir (22). Yüksek yoğunluktaki egzersizler sırasında anaerobik glikolizis ve kreatinkinaz reaksiyonu ana enerji kaynağıdır (23). Bu çalışmada $W_{%25>AE}$ 'deki egzersiz testlerinde iş kapasiteleri ve egzersizi devam ettirebilme süreleri 1 denek hariç önemli oranda düşüş göstermektedir (Şekil 3). Yoğun egzersize bağlı üretilen laktik asidin bikarbonat tampon sistemi tarafından tamponlanması kapasitesinin üstüne çıktığı zamanlarda kas hücresinde artan asitte kaslarda yorgunluğa neden olmaktadır (24, 25). Artan kas H^+ iyon konsantrasyonu glikoneogenolitik ve glikolitik yollarda önemli rol oynayan düzenleyici enzimlerden fosforilaz ve fosfofruktokinazı inhibe etmektedir (26). Artan inorganik fosfat sarkoplazmik retikulum girip serbest Ca^{++} varlığını da azaltarak yorgunluğa neden olabilmektedir (27). Yorgunlukta rol oynayan diğer bir önemli faktör ise artan serbest radikal olduğu ileri sürülmüştür (28-30) Egzersiz yoğunluğunun %65'den %85 VO_2max 'a arttığı egzersizlerde lipit oksidasyonunun azaldığı gösterilmiştir (23, 25, 31). Bu çalışmada $W_{%25>AE}$ 'deki iş gücü %75 W_{max} seviyelerine denk gelmekte ve substrat kullanım

durumu 1.00 üzerinde olup anaerobik karbonhidrat ağırlıklı oksidasyonu göstermektedir. Vücut endojen karbonhidrat depoları sınırlı miktarda olduğundan VO_2max 'ın %70-80 seviyesine denk gelen egzersiz testlerinde 3 saat süre ile testin devamını desteklemektedir. Egzersize bağlı olarak karbonhidrat depolarının azalması da egzersiz kapasitesinin azalmasına ve yorgunluğa neden olan önemli faktörlerdendir (32, 33).

Aminoasitler aerobik egzersizlerde diğer bir substrat olup enerji üretimlerine katılımları %5 civarındadır ve karbonhidrat kaynakların tükenmesinde bile katılımı %10 civarında olmaktadır (34). Proteinlerin yakımı ile RQ değeri 0.830-0.850 arasında olmaktadır.

Egzersiz yoğunluğunun sağlık ve fitness üzerine etkilerinin optimal hale getirilebilmesi için uygun egzersiz protokolünün bireylere göre seçimi yapılmalıdır. Sabit yük egzersiz testinin başlangıcındaki karbonhidrat kullanımı ve sonradan yağ yakım oranının artışı nedeni ile AE'deki egzersiz protokolü özellikle kilo problemi olan bireylerde kullanılması gereken etkili bir egzersiz parametresidir.

Kaynaklar

1. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, et al. Principles of Exercise Testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications. 5. Edition, Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
2. O'Hagan C, De Vito G, Boreham CA. Exercise prescription in the treatment of type 2 diabetes mellitus: current practices, existing guidelines and future directions. Sports Med 2013; 43: 39-49.
3. Talanian JL, Galloway SD, Heigenhauser GJ, Bonen A, Spriet LL. Two weeks of high-intensity aerobic interval training increases the capacity for fat oxidation during exercise in women. J Appl Physiol 2007; 102: 1439-1447.
4. Burgomaster KA, Heigenhauser GJ, Gibala MJ. Effect of short-term sprint interval training on human skeletal muscle carbohydrate metabolism during exercise and time-trial performance. J Appl Physiol 2006; 100: 2041-2047.
5. Ozcelik O, Dogan H, Kelestimur H. Effects of eight weeks of exercise training and orlistat therapy on body composition and maximal exercise capacity in obese females. Public Health 2006; 120: 76-82.
6. Yasuda N, Ruby BC, Gaskill SE. Substrate oxidation during incremental arm and leg exercise in men and women matched for ventilatory threshold. J Sports Sci 2006; 24: 1281-1289.
7. Snel M, Gastaldelli A, Ouwens DM, et al. Effects of adding exercise to a 16-week very low-calorie diet in obese, insulin-dependent type 2 diabetes mellitus patients. J Clin Endocrinol Metab 2012; 97: 2512-2520.
8. Whipp BJ, Davis JA, Torres F, et al. A test to determine parameters of aerobic function during exercise. J Appl Physiol 1981; 50: 217-221.
9. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange J Appl Physiol 1986; 60: 2020-2027.
10. Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Respiratory markers of the anaerobic threshold. Adv Cardiol 1986; 35: 47-64.
11. Ozcelik O, Aslan M, Ayar A, Kelestimur H. Effects of body mass index on maximal work production capacity and aerobic fitness during incremental exercise test. Physiol Res 2004; 53: 165-170.
12. Hansen JE, Sue DY, Wasserman K. Predicted values for clinical exercise testing. Am Rev Respir Dis 1984; 129: S49-55.
13. Christmass MA, Dawson B, Arthur PG. Effect of work and recovery duration on skeletal muscle oxygenation and fuel use during sustained intermittent exercise. Eur J Appl Physiol Occup Physiol 1999; 80: 436-47.
14. Venables MC, Jeukendrup AE. Endurance training and obesity: effect on substrate metabolism and insulin sensitivity. Med Sci Sport Exer 2008; 40: 495-502.
15. Holloszy JO, Kohrt WM, Hansen PA. The regulation of carbohydrate and fat metabolism during and after exercise. Front Biosci 1998; 3: 1011-1027.
16. Dasilva SG, Guidetti L, Buzzachera CF, et al. Gender-based differences in substrate use during exercise at a self-selected pace. J Strength Cond Res 2011; 25: 2544-2551.
17. Isacco L, Duché P, Boisseau N. Influence of hormonal status on substrate utilization at rest and during exercise in the female population. Sports Med 2012; 42: 327-42.
18. Jeukendrup AE, Wallis GA. Measurement of substrate oxidation during exercise by means of gas exchange measurements. Int J Sports Med 2005; 26: 28-37.

19. Çolak R, Özçelik O. Effects of progressively increasing work rate exercise on body substrate utilisation. Turk JEM 2002; 2: 81-84.
20. Achten J, Jeukendrup AE. Optimizing fat oxidation through exercise and diet. Nutrition 2004; 20: 716-727.
21. Kaya H, Serhatlıoğlu İ. Sedanter bireylerde artan yüke karşı yapılan egzersiz testi sırasında kalp atım hızı-iş gücü arasındaki ilişkinin aerobik-anaerobik bölgelerinde incelenerek kalp atım etkinliğinin belirlenmesi. F Ü Sağ Bil Tıp Derg 2011; 25: 43-47.
22. Holloszy JO. A forty-year memoir of research on the regulation of glucose transport into muscle. Am J Physiol Endocrinol Metab 2003; 284: 453-467.
23. Van Loon LJ, Greenhaff PL, Constantin-Teodosiu D, Saris WH, Wagenmakers AJ. The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. J Physiol 2001; 536: 295-304.
24. Bangsbo J, Madsen K, Kiens B, et al. Effect of muscle acidity on muscle metabolism and fatigue during intense exercise in man. J Physiol 1996; 495: 587-596.
25. Spriet LL, Lindinger MI, Mckelvie S, et al. Muscle glycogenolysis and H⁺ concentration during maximal intermittent cycling. J Appl Physiol 1989; 66: 8-13.
26. Amorena CF, Wilding TJ, Manchester JK et al. Changes in intracellular pH caused by high K in normal and acidified frog muscle. J Gen Physiol 1990; 96: 959-972.
27. Fryer MW, West JM, Stephenson DG. Phosphate transport into the sarcoplasmic reticulum of skinned fibres from rat skeletal muscle. J Muscle Res Cell Motil 1997; 18: 161-167.
28. Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: Cellular mechanisms. Physiol Rev 2008; 88: 287-332.
29. Powers SK, Jackson MJ. Exercise-induced oxidative stress: cellular mechanisms and impact on muscle force production. Physiol Rev 2008; 88: 1243-1276.
30. Bruton JD, Place N, Yamada T, et al. Reactive oxygen species and fatigue-induced prolonged low-frequency force depression in skeletal muscle fibres of rats, mice and SOD2 overexpressing mice. J Physiol 2008; 586: 175-184.
31. Brun JF, Malatesta D, Sartorio A. Maximal lipid oxidation during exercise: a target for individualizing endurance training in obesity and diabetes? J Endocrinol Invest 2012; 35: 686-691.
32. Burke LM, Hawley JA. Effects of short-term fat adaptation on metabolism and performance of prolonged exercise. Med Sci Sport Exer 2002; 34: 1492-1498.
33. Hargreaves M. Metabolic responses to carbohydrate ingestion: Effects on exercise performance. In: Perspectives in Sports Medicine and Exercise Science. The Metabolic Basis of Performance in Exercise and Sport, Indiana: Cooper Publishing, 1999: 93-124.
34. Lemon PW, Mullin JP. Effect of initial muscle glycogen levels on protein catabolism during exercise. J Appl Physiol 1980; 48: 624-629.