

Yakın Kızılaltı Spektroskopi ve Yüzeysel Elektromiyografi Kullanarak Kas Yorgunluğu İnceleme Çalışmaları

Ömer Şaylı¹, Bilal Biçer², Selda Uzun², Orkun Pelvan², Ata Akın³, Birol Çotuk²

¹Marmara Üniversitesi, Spor Bilimleri ve Sporcu Sağlığı AUM, İstanbul-Türkiye,

²Marmara Üniversitesi, Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu, İstanbul-Türkiye

³Boğaziçi Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul-Türkiye

Yazışma Adresi / Address reprint requests to: Dr. Ömer Şaylı

Marmara Üniversitesi, Spor Bilimleri ve Sporcu Sağlığı AUM, Anadoluhisarı Yerleşkesi Cuma Yolu Cad., Anadoluhisarı, Beykoz 34800 İstanbul-Türkiye

Telefon / Phone: +90-216-308-5661 Faks / Fax: +90-216-460-2782 Elektronik posta adresi / E-mail address: omer.sayli@gmail.com

Kabul tarihi / Date of acceptance: 31 Mayıs 2011 / May 31, 2011

ÖZET:

Yakın kızılaltı spektroskopisi ve yüzeysel elektromiyografi kullanarak kas yorgunluğu inceleme çalışmaları

Amaç: Oldukça gelişen ölçüm tekniklerine rağmen yorgunluğa neden olan etmenlerin gelişimi ve etkileşimi tam olarak açığa çıkarılamamıştır. Esas hedef olarak ise girişimsiz metotlarla yorgunluğa neden olan etmenlerin takibi ve bu şekilde gerçek saha koşullarında atletlere geri besleme sağlayacak metotların geliştirilmesi önümüzde durmaktadır. Çalışmalarımızda çalışan kas ve yorgunluk mekanizması hakkında daha fazla bilgi sahibi olmaya çalıştık.

Yöntem: Yerel kas testleri esnasında eş zamanlı yüzeysel elektromiyografi (YEMG) ve yakın kızılaltı spektroskopisi teknikleriyle (YKAS) ölçümler alındı. YKAS kas yüzeyindeki deoksihemoglobin (Hb) ve oksihemoglobin (HbO₂) konsantrasyon değişimlerine paralel sinyaller verebilirken, YEMG ise aktif motor birimlerin aksiyon potansiyellerinin yüzeydeki toplamını vermektedir. Çalışmalarımızda biceps brachii, flexor digitorum superficialis ve vastus lateralis uzun kaslarından izometrik ve dinamik egzersizler esnasında ölçülen sinyaller incelenmiştir.

Bulgular: Egzersiz sırasında YEMG sinyalinden elde edilen ortalama frekans (OMF) ve ortanca frekans (OCF) parametrelerindeki azalmalarla beraber Hb artışı ve HbO₂ azalışı bulunmuştur. Deneylerin başlangıcında Hb ve HbO₂ değişimleri oldukça hızlı olmakla beraber, bu hızlı fazdan sonraki değişimler yavaş olmaktadır. Kasılma kuvvetinin artmasıyla beraber OMF ve OCF parametrelerindeki azalmalar artmakta, Hb artışı ve HbO₂ azalış oranları artmaktadır.

Sonuç: YEMG ile beraber İYKAS ölçümleri yerel kas metabolizmasının egzersiz esnasındaki farklı değişimlerine duyarlı bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar sözcükler: Kas yorgunluğu, yüzeysel elektromiyografi, yakın kızılaltı spektroskopisi, aerobik metabolizma, anaerobik metabolizma

ABSTRACT:

Muscle fatigue investigation studies using near-infrared spectroscopy and surface electromyography

Objective: Progression and interaction of factors that cause fatigue have not been fully uncovered despite highly developed measurement technologies. Non-invasive monitoring of fatigue causing factors and in this way development of methods for giving feedback to the athletes lies ahead of us as the main goal. We have tried to obtain more information about working muscles and fatigue mechanisms.

Method: Simultaneous near infrared spectroscopy (NIRS) and surface electromyography (SEMG) measurements were recorded during local exercises. The NIRS signals are proportional to concentration changes of deoxyhemoglobin (Hb) and oxyhemoglobin (HbO₂) while SEMG contains the surface sum of motor units' action potentials. Signals recorded during isometric and dynamic exercises of limb muscles biceps brachii, flexor digitorum superficialis, vastus lateralis have been investigated.

Results: Mean (MNF) and Median Frequency (MDF) parameters computed from SEMG were found to decline concomitant with Hb increase and HbO₂ decrease during the exercise. Hb and HbO₂ changes were fast at the start of the exercise, whereas these rates slow down afterwards the fast phase. Magnitudes of MNF, MDF decrease slopes and fast phase rates of Hb increase/HbO₂ decrease become greater as the contraction force increases.

Conclusion: SEMG and NIRS measurements give information about local muscle metabolism changes during exercise each being sensitive to different changes.

Key words: Muscle fatigue, surface electromyography, near infrared spectroscopy, aerobic metabolism, anaerobic metabolism

GİRİŞ

Gündelik yapılan işlerden, spor ve klinik uygulamalardan oldukça aşına olduğumuz kas yorgunluğu, hala tam

olarak anlaşılabilmiş değildir. Çok genel olarak performans düşüşü yorgunluk olarak tanımlanabilmektedir. Daha özel tanımlardan bazıları ise maksimum kuvvet kapasitesindeki düşüş, maksimum güçteki düşüş, veya maksimal altı güç/

kuvvet seviyeleri için istenen egzersizin yapılabilme (dayanıklılık) süresidir (1,2). Yorgunluğa neden olan süreçler bir anda oluşmayıp, egzersiz ile başlamakta ve egzersiz süresince devam etmektedirler. Bundan dolayı maksimum güç/kuvvet üretimi deneylerinde, güç/kuvvet deney başlar başlamaz azalmaya başlamaktadır. Maksimal altı egzersizlerde ise, dayanıklılık süresi yorgunluğa neden olan süreçlerin bileşkesine ve etkileşimlerine bağlı olup, egzersiz türüne ve denegin özelliklerine göre değişebilecek etmenlerden biri baskın olarak egzersizin sürmesini engelleyen başlıca neden olabilmektedir.

Yorgunluğun incelenmesindeki zorluklar başlıca olarak bu süreci etkileyen etmenlerin ölçülme-araştırılma zorlukları, etmenlerin birbirleriyle etkileşim içinde olmaları, egzersiz türüne ve denegin fiziksel durumuna göre dayanıklılığı belirleyen baskın etmen(ler)in değişmesi olarak ifade edilebilir. Araştırmacıların elinde bulunan araçlar genelde bütün vücut performansı ve aktivitesinden etkilenen ve yerel kaslar çalışsa bile tüm vücut ortalamasını ölçen tekniklerdir. Bunlar arasında kan ölçümleri (örn. laktat ölçümleri), solunumdan bulunan oksijen tüketimi ve karbondioksit salınım miktarları, EKG ölçümleri ile belirlenen kardiyovasküler performans ölçütleri bulunmaktadır. Doğrudan olarak kandan alınan ölçümler ile kandaki laktik asit, pH oranı, kısmi oksijen basıncı ve doyum gibi parametrelerin bulunması egzersiz sırasında ve sonrasında metabolik aktiviteleri yansıtmaları açısından oldukça önemlidir. Ancak çalışmalarda damardan sürekli olarak kan örneği almak sıkıntı yaratabilmektedir. Vücudun genel oksijen kullanımını bulmak için sıkça uygulanan solunum yönteminde ağız ve buruna takılan bir aparat ve sistem ile vücudun aldığı oksijen ve verdiği karbondioksit gibi temel gazların miktarları ölçülebilmektedir. Yöntemin temel zayıflığı tüm vücudun oksijen tüketimini ölçmesi (küçük kas gruplarındaki oksijen tüketimi bulunamamakta) ve akciğer dinamiğinden etkilenmesidir. Büyük kas gruplarının çalıştığı egzersizlerde yöntem oldukça başarılıdır.

Her ne kadar diğer kasların katkıları da olsa izometrik-izokinetik-dinamik egzersiz setleri ile ölçülen kuvvet/tork/güç ölçümleri, iğne ve yüzeysel elektromiyografi, manyetik rezonans spektroskopisi (MRS), pozitron emisyon tomografi (PET) gibi yöntemler ise araştırmacılara yerel kas fizyolojisi çalışmaları hakkında daha çok veri sunabilmektedirler. MRS ve PET yöntemleri ile yerel kas metabolizması hakkında bilgi sahibi olmak mümkün olsa da pratikte bu aletlerin içinde egzersiz yapmak oldukça güçtür ve laboratuvar koşulları

dışında kullanılamamaktadırlar.

Marmara Üniversitesi Beden Eğitimi Spor Yüksekokulu ve Boğaziçi Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsünün işbirliğiyle son birkaç senedir yorgunluk fizyolojisi ve dayanıklılık üstüne çalışmalar yapmaktayız. Araştırmalarımızda yerel kas testleri esnasında eş zamanlı yüzeysel EMG (YEMG) ve yakın kızılaltı spektroskopisi (YKAS) teknikleri kullanılarak çalışan yerel kas ve yorgunluk mekanizması hakkında daha fazla bilgi sahibi olmaya çalıştık. YEMG'de aktif motor birimlerin aksiyon potansiyellerinin yüzeydeki toplamı deriye yerleştirilen elektrotlarla ölçülmektedir. YKAS tekniğinin temelinde biyolojik dokuların yakın kızılaltı spektrumuna karşı geçirgen olmaları yatmaktadır. Işık alıcısından çıkıp yakın bir alıcıya ulaşan ışık farklı YKAS sistemlerinde farklı metotlarla incelenerek doku yüzeyindeki deoksihemoglobin (Hb) ve oksihemoglobin (HbO₂) incelenebilmektedir. Çalışmalarımızda kullandığımız Sürekli Dalga Yakın Kızılaltı Spektroskopisi (SDYKAS) ile kas yüzeyindeki Hb ve HbO₂ derişim (konsantrasyon) değişimlerine orantılı sinyaller elde edilebilmektedir. YEMG ve YKAS teknikleri girişimsiz olarak yerel kas fizyolojik değişimleri hakkında bilgi verebilmektedirler.

Çalışmalarımızda öncelikle biceps brachii, flexor digitorum superficialis, vastus lateralis uzuv kaslarından izometrik ve dinamik egzersizler esnasında ölçülen sinyallerin incelemeleri yapıldı. Elde edilen YEMG sinyallerinden hesaplanan parametrelerle birlikte, YKAS sistemiyle eş zamanlı takip edilen Hb ve HbO₂ değişimleriyle orantılı sinyaller eş zamanlı olarak incelendi. Bu yazıda elde edilen bulgular özetlenmekte ve paylaşılmaktadır.

GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışmalarımızda kullandığımız teknikler Yüzeysel Elektromiyografi ve Yakın Kızılaltı Spektroskopisi yöntemidir.

Yüzeysel Elektromiyografi

Elektromiyografi motor sinirlerin uyarılması ile kasılan kas fibrillerinde oluşan elektriksel potansiyel değişikliklerini ölçer. Tek bir alfa motor sinirin uyardığı tüm kas fibrillerinde oluşan kas aksiyon potansiyellerinin toplamına motor birim aksiyon potansiyeli denmektedir. YEMG tekniğinde deri üstüne elektrotlar yerleştirilerek kas kasılmasında aktif motor aksiyon potansiyellerinin yüzeydeki zamansal ve

konumsal toplamları ölçülmektedir (3). YEMG sinyali en kolay şekilde ölçülen biyoelektrik sinyallerden birisidir. YEMG sinyalinin spektrumu 0 - 500 Hz frekans aralığındadır. Enerjinin baskın olduğu aralık ise 50 – 150 Hz aralığıdır (4). Genlik ve güç spektrumu gibi karakteristik YEMG özellikleri kas fibrillerinin hücre zarı özelliklerine ve motor birimlerin aksiyon potansiyel zamanlamalarına bağlıdır (5). Bu yüzden YEMG hem merkezi hem de çevresel sinir-kas sistemi hakkında bilgi yansıtmaktadır. Bu bağlamda aktif motor birimlerin sayısı, kas fibrilleri arasındaki mekanik etkileşim, motor birim ateşleme oranı, motor birim aksiyon potansiyellerinin şekli (MBAPŞ), süresi, genliği ve motor birimlerin ateşleme dengesi önemlidir.

YEMG kas kasılma anlarının bulunması, kas kuvvetinin tahmini ve kas yorgunluğunun değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ergonomi, spor fizyolojisi ve rehabilitasyon tıbbında YEMG tanı aracı olarak işlevseldir (6). YEMG doğal ve patolojik süreçlerde değerlendirilen izometrik kas kasılmaları, özel motor becerileri ve egzersiz dinamik kas hareketlerini içeren geniş bir uygulama alanına sahiptir.

İzometrik kasılmalar sırasında YEMG sinyalinde düşük frekanslara kayma şeklinde bir spektral değişim gözlenir. Bu frekans değişimini belirlemek için kullanılan en yaygın parametreler ortalama (OMF) ve ortanca frekanslardır (OCF). OMF ve OCF'de egzersiz kasılması boyunca gözlenen frekans düşüşü birçok çalışmada kas yorgunluğu ile ilişkilendirilmiştir. Bu parametreler, egzersiz boyunca kaydedilen YEMG verisinin bölütlenen pencereleri (örn. 0.5 saniye) için hesaplanmaktadır. YEMG sinyalinin genliğiyle (büyüklüğüyle) alakalı olarak hesaplanan parametre KOKK (karelerin ortalamasının karekökü) parametresidir. KOKK değişkeni şu şekilde hesaplanır;

$$KOKK = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i^2} \quad (1)$$

Burada N değeri KOKK değeri hesaplanan penceredeki örnek sayısı, s_i ise penceredeki i'ninci işarettir. Ortalama ve ortanca frekansların hesaplanmasında her pencerenin güç spektrumu kullanılır. Güç spektrumu hesaplanırken analiz penceresindeki veri, aynı uzunluktaki hamming fonksiyonu ile çarpılır ve hızlı Fourier dönüşümüyle güç

spektrumu hesaplanır. OMF ve OCF şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$OMF = \frac{\int_0^{\infty} fP(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) df} \quad (2)$$

$$OCF = \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_{OCF}^{\infty} P(f) df} \quad (3)$$

OMF hesaplanan güç frekansının ortalama frekans değeri, OCF ise güç frekansının alanını iki eşit parçaya ayıran frekans değeridir. Bu parametreler YEMG sinyalinin genliğine değil, sinyalin güç frekans dağılım şekline duyarlıdır. Örneğin güç spektrumunun düşük frekans bandındaki ağırlığı artmasıyla OMF ve OCF değerleri azalır.

YEMG sinyallerinden bu parametrelerin hesaplanmasında geliştirdiğimiz Matlab (MathWorks Firması) ortamında çalışan EMGALY programı kullanıldı (7). Grafik ara yüzü kolay kullanıma ait bu programla istenen inceleme değerleri (örn. pencere büyüklüğü, filtre frekans değerleri, gürültü eşik değerleri vb.) girilerek KOKK, OMF ve OCF parametrelerinin hesaplanması, en küçük kareler yöntemi ile hesaplanan bu parametrelere doğruların oturtulması sağlanmaktadır.

Ölçümlerde YEMG için PowerLab 16/30 ML880/P veri toplama sistemi ile ML132 ve ML135 yükselteçleri kullanılmıştır.

Yakın Kızılaltı Spektroskopi

Son yıllarda popülerliği artan YKAS kas enerji metabolizmasının incelenmesine yönelik ekonomik ve pratik çözümler sunmaktadır. YKAS ile dokulardaki Hb ve HbO₂ derişimlerindeki (konsantrasyonlarındaki) anlık değişimlere orantılı sinyaller elde edilebilmektedir (8). Sistemde deri üzerine konan ve içinde ışık kaynakları ile ışık şiddeti algılayıcıları içeren bir prob bulunmaktadır. Bu probdaki ışık kaynakları, yakın kızılaltı dalga bandında ışınım yapmaktadırlar. 'Optik pencere' olarak tanımlanan bu dalga boyu bandında (700-900 nm arası) suyun soğurması nispeten düşük olup, ışık dokuda yol alabilmekte, şiddeti zayıflamakla birlikte yakın mesafedeki ışık alıcılarına ulaşabilmekte, Hb tarafından çok soğurulmamakta ve algılanan ışığın şiddeti en çok Hb ve

HbO₂ derişim değişimlerinden etkilemektedir. Dokuya en az iki farklı kızılaltı dalga boyunda ışık gönderilerek, ışık alıcısında çıkarak dokuda yayılan ve yakındaki ışık alıcılarına varan ışıkların şiddetindeki değişimlerden uygun formülasyonlarla dokunun yüzeyindeki oksihemoglobin ve deoksihemoglobin derişim değişimlerine orantılı sinyaller elde edilebilmektedir. Sürekli Dalga Yakın Kızılaltı Spektroskopisi (SDYKAS) denilen bu yöntemde gönderilen ışığın şiddet değişimleri kullanılır. SDYKAS tekniğindeki temel sorun ışığın doku içinde aldığı yolun tam olarak bilinmemesinden dolayı mutlak derişim değişimlerinin bulunamaması, bu değerlere orantılı sinyallerin elde edilebilmesidir. Önceden yapılan deneylerden elde edilen optik yol bilgisi kullanılıp derişim değişimleri nicel olarak verilse de kullanılan optik yolun gerçek değerin farkına göre hata artmaktadır. Hastanelerde ve kliniklerde artık oldukça yaygın olarak parmak tip pulse oksimetre cihazları da SDYKAS tekniğine benzer çalışma prensipleriyle çalışmaktadırlar.

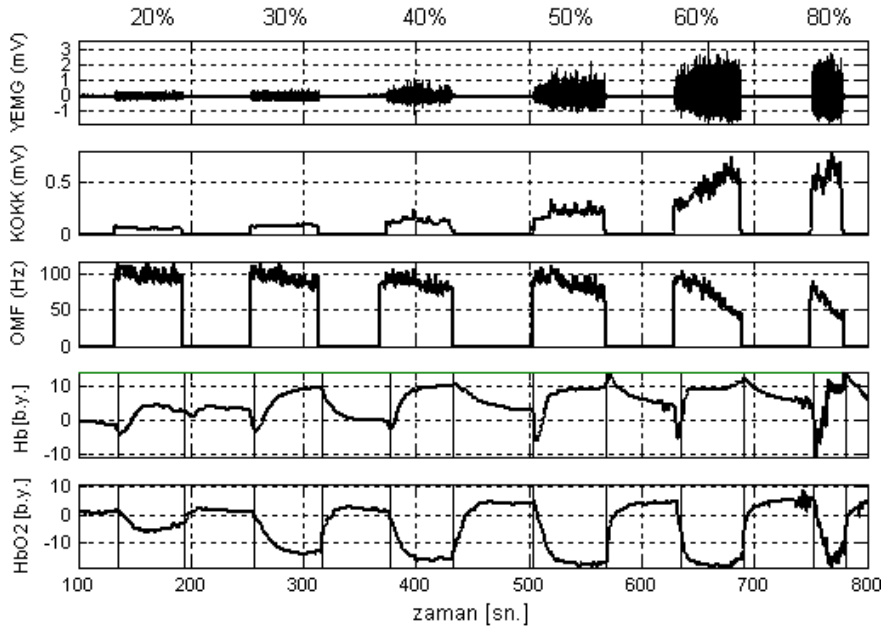
Diğer YKAS teknikleri Zaman Çözünürlüklü Spektroskopisi, Frekans Alanı Yakın Kızılaltı Spektroskopisi (9) ve Konumsal Çözünürlüklü Yakın Kızılaltı Spektroskopisi yöntemleridir. Zaman Çözünürlüklü Spektroskopisi dokuya gönderilen lazer ışığının ışık alıcısına gelme süresini hesaplayarak dokuda alınan mesafeyi ölçme kapasitesine sahiptir. Frekans Alanı Yakın Kızılaltı Spektroskopisi dokuya belli bir frekansla modüle edilen ışık yollayarak algılanan ışıktaki faz

farkına bakarak dokuda alınan mesafeyi hesaplar. Bu teknolojiler, mutlak derişim değerleri verme kapasitelerine sahiptirler. Konumsal Çözünürlüklü Yakın Kızılaltı Spektroskopisi ışık alıcısından belli bir mesafe uzaklıkta yan yana iki alıcıdaki şiddet farkının aralarındaki uzaklığa oranı olan eğimi kullanır (10). SDYKAS gibi Hb ve HbO₂ derişim değişimlerine orantılı sinyal vermenin yanında, ortalama taranan bölge hemoglobin oksijen doyumuyla alakalı doku oksijenlenme indeksi ve ölçeklenmiş doku hemoglobin indeksi parametrelerini de hesaplayabilmektedir.

Bizim çalışmalarımızda kullandığımız YKAS aleti (NIROX-COPE 301) Boğaziçi Üniversitesi Biyofotonik Laboratuvarında geliştirilmiştir. Cihaz teknolojisi sürekli dalga yakın kızılaltı spektroskopisi tekniğine dayanmakta olup, ölçümün başladığı andan itibaren olan Hb ve HbO₂ derişim değişimlerine orantılı sinyaller vermektedir ($\Delta[Hb]$ ve $\Delta[HbO_2]$). Egzersiz başı seviyesi temel seviye (0) olarak alınmaktadır. Cihaz kontrolü için kendi yazılımı kullanılmaktadır. Proba ışık alıcısından 1, 2, 3 ve 4 cm uzaklıkta 4 adet alıcı bulunmaktadır. Sonuçlarda Hb ve HbO₂ değişimleri birimsiz (birim yok, [b.y.]) olarak verilmiştir.

BULGULAR

YEMG ile SDYKAS sinyalleri arasındaki ilişkiyi güzel örneklendiren bir çalışmanın sonuçları Şekil 1'de verilmek-

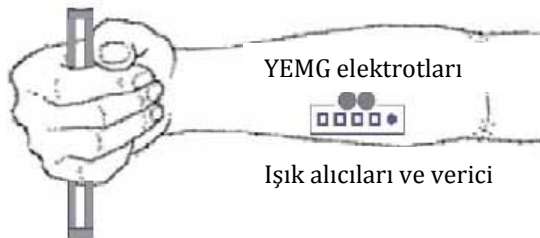


Şekil 1: %20 ve %80 arası Maksimum İstimli Kasılma seviyeleri için üst kol Biceps Brachii kasından eş zamanlı ölçülen YEMG sinyali ile ondan hesaplanan KOKK, OMF parametreleri ve Hb, HbO₂ değişim sinyalleri

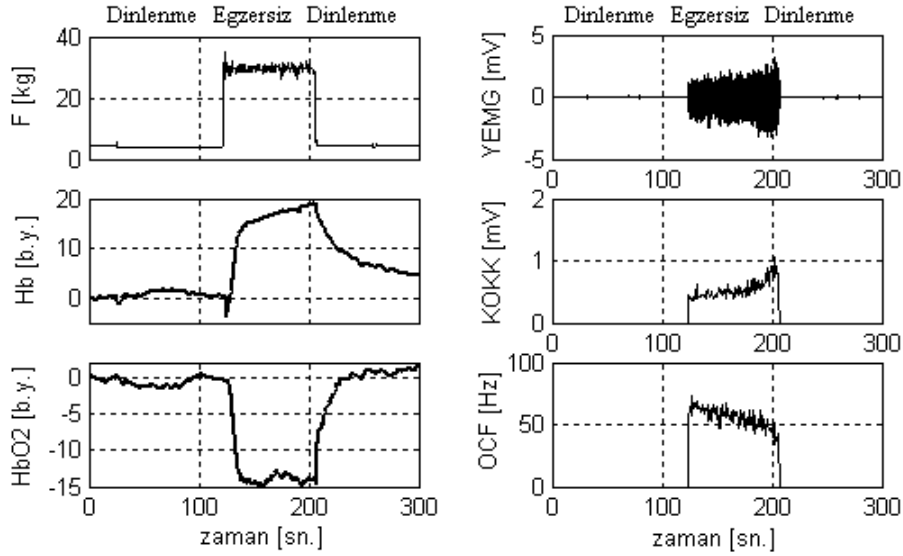
tedir. Bu çalışmada üst kolda bulunan biceps brachii kasından eş zamanlı YEMG (örnekleme frekansı 2 kHz, 4. Dereceden Butterworth 10 Hz yüksek geçiren, 500 Hz alçak geçiren ve şebeke frekans filtreleri) ve SDYKAS ölçümleri (alıcı-verici uzaklığı 3 cm) alınmıştır. Kas kasılma seviyeleri maksimum istemli kasılma seviyesinin (MİK) %20, 30, 40, 50, 60 ve 80'si olacak şekilde yaklaşık 1'er dakikalık 6 izometrik kasılma aralıklı olarak yaptırılmıştır. %80'lik kasılma seviyesinde süre deneğin deneyi devam edebildiği kadardır. Her kasılmada gönüllü kuvvet seviyesini sabit tutmaya çalışmıştır. Sonuçlardan görüldüğü üzere artan kasılma seviyesi ile beraber YEMG sinyalinin genliğinin arttığı, genlikle alakalı KOKK parametresinin kasılma seviyesi ile beraber büyüdüğünü görmekteyiz. OMF parametresi ilk üç kasılma deneyinde (%20, 30 ve 40 MİK seviyeleri) deney boyunca fazla değişmeyip sabit kalırken, son üç kuvvet seviyesinde (%50, 60 ve 80 MİK seviyeleri) ise kasılma boyunca düşüşü gözlemlenebilir derecede fazla olmaktadır. Her kasılmada Hb artmakta ve HbO₂ azalmaktadır. Değişim miktarları yüksek kasılma kuvvetlerinde daha fazladır. Kasılma başlarında derişim değişimleri daha çok olmaktadır. Bu faza hızlı faz denmektedir. Hızlı faz düşük kasılma kuvvetlerinde daha uzun sürmekte fakat değişim oranları daha yavaş olmaktadır. Hızlı fazdaki değişim yüksek kasılma kuvvetlerinde çok daha hızlı olmaktadır. Hızlı fazdan sonra değişimin daha yavaş olduğu durağan faz gelmektedir. Kasılma sonlarında HbO₂ hızlı bir şekilde reaktif hiperemiye açıkça gösteriş şekilde artmaktadır. %20 MİK seviyesinde ise kanlanma HbO₂ artışıyla kasılma sırasında görülmektedir.



Şekil 2: El sıkma deneyinden bir fotoğraf ve ön kolda YEMG elektrotlarının ve ışık alıcıları-vericisi yerleştirme şeması. Ölçüm el sıkma protokolüyle %50 ve %75'lik maksimum el sıkma kuvvet seviyelerinde alındı. YEMG elektrotları ile ışık alıcı-vericileri yan yana flexor digitorum superficialis kasının üstüne yerleştirildi.



Şekil 2'de gösterilen çalışmada ön kolda bulunan flexor digitorum superficialis kasından el sıkma protokolüyle %50 ve %75 MİK seviyelerinde ölçümler alınmıştır (11). Eş zamanlı olarak alınan YEMG, SDYKAS ve el sıkma kuvvet sinyalleri bilgisayar ortamına aktarıldı. Gönüllü oturur vaziyette iken baskın ön kolu alttan destekli olarak masada bulunmakta, uyguladığı kuvveti bilgisayar ekranında görerek istenen kuvvet seviyesinde el dinamometresini sıkmaya çalışmaktadır. YEMG sinyali ve hesaplanan OCF, KOKK ile Hb ve HbO₂ derişim değişim sinyallerini gösteren örnek bir veri Şekil 3'te verilmiştir. El sıkma deneyi başlar başlamaz Hb artmakta ve HbO₂ ise azalmaktadır. %75 MİK seviyesinde bu değişimler daha hızlı olmaktadır. Egzersizin başından itibaren bu hızlı fazın bittiği ana kadar geçen süreye düğüm süresi denmiştir. Hızlı faz bölgesi Yamaji ve diğ. (2004)'de kullanılan algoritma değiştirilerek bulunmuştur (12). Düğüm süreleri %75 MİK seviyesi için daha kısadır. %50 MİK seviyesinde tipik olarak 15 saniyeye kadar süren hızlı fazdan sonra değişim hızları yavaşlamaktadır. KOKK sinyali gönüllüler arası artma seviyesi farklılık göstermekle beraber genel olarak artmaktadır. OCF ve OMF ise doğrusal düşüşe sahiptirler. Bu eğimler %75 MİK seviyesi için daha fazla olmakla beraber, hızlı fazın sonundaki düşüş büyüklüğü %50 MİK seviyesindeki değerler yakın olmaktadır. %50 MİK seviyesi için egzersiz süresi ile OMF eğimi arasında İstatistiksel anlamlı ilinti vardır. Şaylı'nın (2009) çalışmasında ayrıntıları verildiği üzere Hb ve HbO₂ değişim sinyallerinden elde edilen parametrelerle OMF, OCF ve KOKK parametreleri arasında ilginç ilintiler bulunmuştur (11).

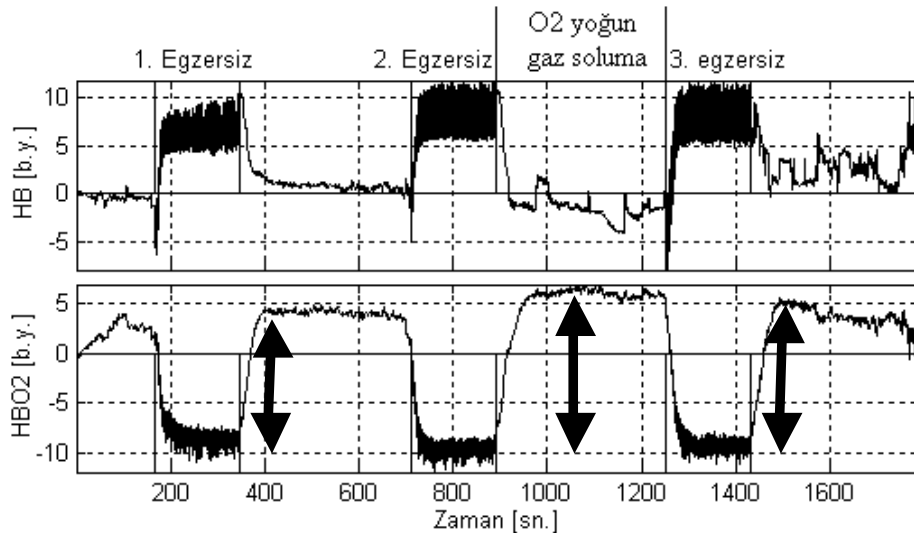


Şekil 3: El sıkma protokolü ile %50'lik maksimum kuvvet seviyesinde elde edilen eş zamanlı el sıkma kuvvetini veren kuvvet-zaman verisi, YEMG sinyali ve ondan elde edilen KOKK ve OCF parametreleri ile Hb ve HbO₂ değişim sinyalleri.

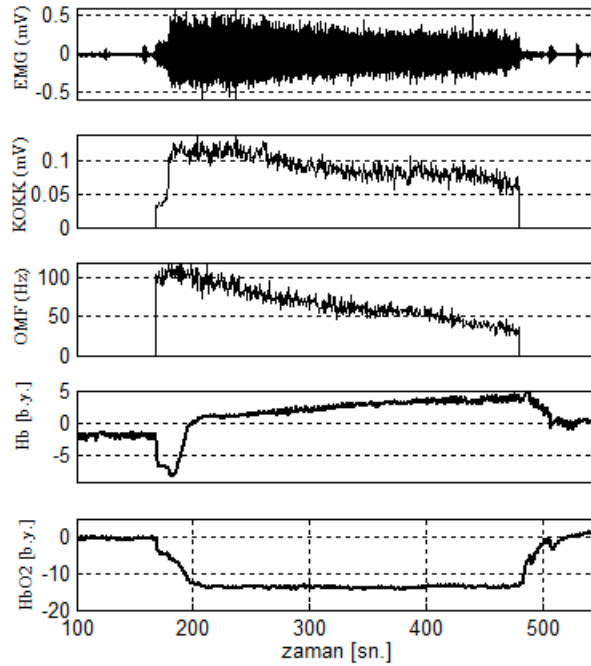
Oksijen gazı solumanın egzersiz sonrası toparlanmaya etkisi ve olası faydası bir doktora çalışması kapsamında değerlendirilmeye devam edilmektedir (Pelvan O., Marmara Üniversitesi BESYO) (13). Öncül sonucu Şekil 4'de verilmektedir. Deneyde ışık alıcı vericileri bacadaki vastus lateralis kasının üzerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Deneyde 3 tane kürek ergometre testi yapılmıştır. Her testten sonra toparlanma için dinlenme arası verilirken, ikinci egzersizden sonra deneye oksijen yoğunluklu gaz solutulmuştur. Sonuçlardan görüldüğü üzere egzersiz sonrası HbO₂ sinyaliindeki artma ikinci egzersizden sonra diğer iki egzersiz son-

rası artışlara göre daha fazla bulunmuştur.

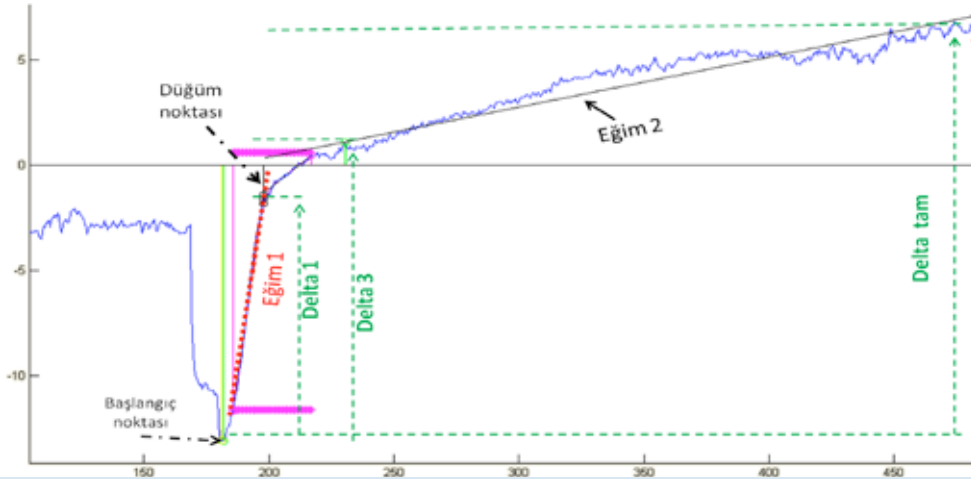
Diğer bir devam eden doktora tezi çalışmasında ise (Biçer B., Marmara Üniversitesi BESYO) bel kasları incelenmektedir (14). Bu deneyde Biering-Sørensen testi kullanılmaktadır. Gönüllüden yüz üstü yatmakta iken belden yukarısının üzerinde durduğu plaka aşağı çekilerek, üst vücudunu yere yatay bir şekilde sabit tutması istenmektedir. Erector spinae kasının üzerine yerleştirilmiş olan ışık alıcıları-vericisi ve YEMG elektrotları ile eş zamanlı ölçüm alınmıştır. Şekil 5'de örnek ölçüm sonucu verilmiştir. OMF düşüşü beklendik olmakla ve yorgunluğu göstermekle beraber KOKK'deki nis-



Şekil 4: Üç adet ergometre testi içeren kürek ergometre testi sonuçları. İkinci testten sonra oksijen yoğunluklu gaz solutulmuştur.



Şekil 5: Bel egzersizinde erector spinae kasında alınan eş zamanlı YEMG sinyali, OMF parametresi ile Hb ve HbO₂ değişim sinyalleri

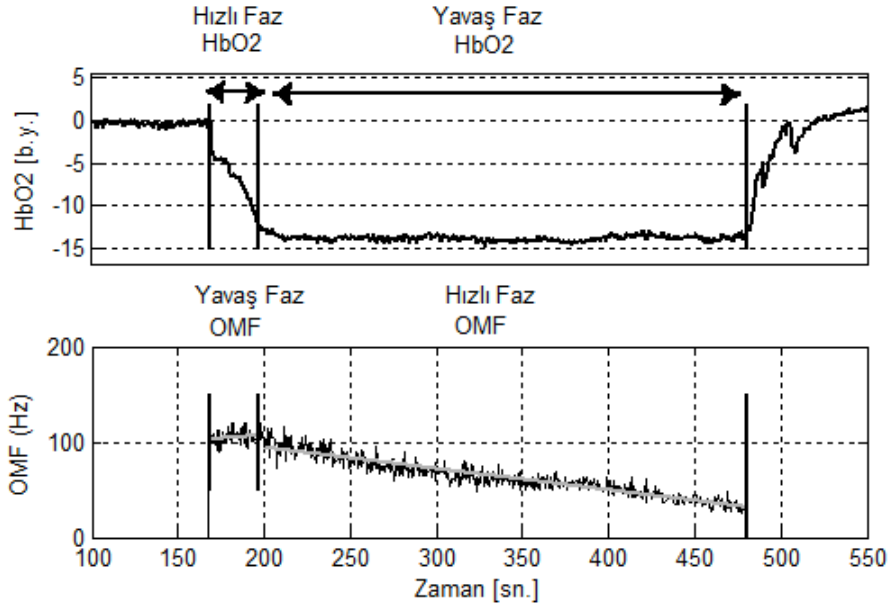


Şekil 6: Biering–Sørensen testinde sırtta bulunan erector spinae kasından ölçülen HbO₂ derişim değişimi sinyalinden hesaplanan parametreler

peten yatay seviye, vücutta deney esnasında yük paylaşımının diğer kaslara aktarıldığı fikrini beslemektedir. Hb sinyalinde görülen deneyin ilk başladığı andaki ilk anlık düşüşün ani kas kasılmasından kaynaklanan kan yer değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Hb hızlı artışı ve HbO₂ hızlı düşüşünü takiben yavaş değişim sinyalleri önceki sonuçlara benzerdir. Bu çalışmanın önceki yaptığımız çalışmalardan farkı kasın kasılma yüzdesinin bilinmemesidir. Kişinin vücut kütle indeksine, üst vücut uzunluğuna, kas kütlesine, fiziksel durumuna bağlı olarak kasa binen yükün kasın maksimum

kapasitesine oranı değişmektedir. Bu çalışmada kişiler arası farklılıkları bulmak için Hb ve HbO₂ sinyallerinden hesaplanan çeşitli parametreler kullanıldı. Bu parametrelerin bulunmasıyla ilgili grafiksel bilgi Şekil 6'da verilmiştir.

Çalışmalarımızda dikkat çeken ve daha fazla araştırılmayı hak eden bir bulgu ise OMF (benzer şekilde OCF) ile Hb ve HbO₂ sinyallerinin değişim fazlarının farklılığıdır. Şekil 7'deki grafik Şekil 5'te bel kası için verilen örnek veridir. Şekilden gözlemlenebileceği üzere HbO₂ sinyalinin değişiminin en çok olduğu başlangıçtaki hızlı faz süresince OMF



Şekil 7: Eş zamanlı olarak bel kasından elde edilen OMF parametresi ile HbO₂ arasındaki değişim bölgelerinin farklılığı

parametresinin değişimi, sonraki değişime göre az olmaktadır. HbO₂ (ve Hb) için değişimin hızlı olduğu bölge bittiğinde OMF (ve OCF) parametresinde hızlı düşüş başlamıştır.

TARTIŞMA

Yorgunluğa neden olan etmenler bir anda ortaya çıkmayıp, fizyolojik süreçler olarak egzersiz süresince devam etmektedirler. Kas fibrillerindeki pH düşüşü, laktat artışı, metabolik yan ürünlerin artışı ve ortama gelen kanın azalması gibi kas kasılmasıyla başlayan ve nihayetinde egzersizi kısıtlayıp sonlandıran sebeplerin aksiyon potansiyelleri ve yayılımı üzerindeki etkilerinin YEMG sinyal genliğinin ve sinyal frekans içeriğinin değişimi olduğu bilinmektedir. YKAS ise, gene müdahalesiz bir biçimde, yorgunluğa neden olan en önemli etkilere biri olan oksijen azalması hakkında ve dolaylı olarak kas içi basınç hakkında bilgi verebilmektedir.

Biceps brachii deneyinde görüldüğü gibi kas kasılma yüzdesinin artmasıyla beraber -uyarılan motor birimlerin artmasından dolayı- YEMG sinyal genliği ve dolayısıyla KOKK parametresi artmaktadır. YEMG sinyalinin frekans içeriği ise kasılma sürdükçe değişmekte, düşük frekans içeriğinin güç oranı artmaktadır. Bu da OMF ve OCF'de deney süresince azalış olarak kendini göstermektedir. Güç frekans içeriğinin değişimi hakkındaki klasik açıklamalar kasılma devam edilmesiyle beraber meydana gelen motor birimleri

arasındaki eş zamanlılık (senkronizasyon) ve kas fibrillerindeki iletim hızlarının düşüştür.

Yapılan çalışmalarda egzersiz başlangıcıyla beraber Hb artışı ve HbO₂ azalışı gözlemlenmektedir. HbO₂ azalışı kas içi basınç ile oluşan iskemiye ve aerobik enerji mekanizmasının yüksek oksijen tüketimine işaret etmektedir. İzometrik kasılmalarda kas kasılmasıyla beraber kas içi basıncın artması öncelikle basıncı daha düşük olan toplardamar sistemini etkilemekte ve Hb artışına sebep olmaktadır. Basıncı daha yüksek olan atardamar sistemi ise çok yüksek kasılma yüzdesine kadar belli oranda oksijen içeriği yüksek temiz kan sağlayabilmektedir.

Kasılma seviyesinin yükselmesiyle beraber OMF/OCF düşüşleri daha fazla olmuştur. Benzer şekilde Hb artış ve HbO₂ azalış oranları artmıştır. Bu kasılma yüzdesinin artmasıyla beraber kasta iskemi oluşumuyla kasa gelen kanın oldukça azalmasına ve aerobik metabolizmanın artan oksijen kullanımına bağlıdır.

Hb ve HbO₂ derişim değişimlerinde görülen önce hızlı fazdaki yüksek değişim ve onu takiben yavaş değişim fazları diğer araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir (15,16).

SDYKAS ile elde edilen Hb ve HbO₂ derişim değişim sinyalleri kas yüzeyindeki oksijen doyumunu hakkında bilgi vererek kasın enerji metabolizması hakkında ve kas içi basınç seviyesi hakkında dolaylı olarak bilgi sağlamaktadır. YEMG sinyalinden elde edilen KOKK ile OMF ve OCF parametreleri ise aksiyon

potansiyellerinin iletim hızlarının düşüden ve motor birimleri arasındaki senkronizasyondan etkilenmektedirler. Bu sayede YEMG yorgunluğa neden olan etmenlerin kas fibrillerindeki elektro fizyolojik süreçlere etkilerini yansıtmaktadır.

Kas fibrillerinde meydana gelen değişimlerin farklı boyutlarını yansıtan YKAS ve YEMG ile kastaki fizyolojik değişimlerin farklı açılardan incelenebilmektedir. Nihai hedef olarak ise gerçek saha koşullarında atletlere fizyolojik durumları ve performansları hakkında bilgi verebilecek teknik imkânların ve yöntemlerin geliştirilmesi önümüzde durmaktadır. Ayrıca bu tür çalışmaların atletlerin antrenman programlarının geliştirilmesinde, ergonomi çalışmalarında ve fizyoterapide iyileşmenin takibine olanak sağlaması açısından faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Ömer Şaylı'nın "Yakın kızılaltı spektroskopik yönteminin doğruluğunun iyileştirilmesi ve kas oksidatif

metabolizmasının araştırılması, Boğaziçi Üniversitesi, TÜBİTAK BİDEP destekli", Bilal Biçer'in "Sporcularda erector spinae kas yorgunluğunun işlevsel yakın kızıl altı spektroskopik ve yüzeysel elektromiyografi ile değerlendirilmesi, Marmara Üniversitesi", Orkun Pelvan'ın "Yüksek Şiddetli Kürek Egzersizleri Arasında Solunan Yüksek Yoğunluklu Oksijenin Kas İçerisinde Oksijen Metabolizmasına Etkisinin İşlevsel Yakın Kızılötesi Spektroskopik Kullanılarak İncelemesi, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje No SAG-C-DPR-211009-0315" başlıklı doktora tezleri kaynaklıdır. Çalışmalarımızda olanaklarından faydalandığımız Marmara Üniversitesi Spor Bilimleri ve Sporcu Sağlığı Araştırma ve Uygulama Merkezine ve sorumlusu Dr. Nuri Topsakal'a yardımlarından dolayı, Boğaziçi Üniversitesi Biyo-Medikal Mühendisliği Enstitüsü araştırma görevlisi Deniz Nevşehirli'ye İYKAS aletindeki teknik desteğinden ve problemlerin geliştirilmesinden dolayı teşekkür ederiz. NIROSCOPE 301 sisteminin geliştirilmesi Boğaziçi Üniversitesi ARFON Proje No 04S102, 08S101 ve 5106 nolu projelerle desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Edwards RH, Hill DK, Jones DA, Merton PA. Fatigue of long duration in human skeletal muscle after exercise. J Physiol. 1977;272(3):769-778.
2. Vøllestad, NK. Measurement of human muscle fatigue. J Neurosci Methods. 1997; 74(2):219-227.
3. Kamen G, Caldwell GE. Physiology and interpretation of the electromyogram. J Clin Neurophysiol. 1996;13(5):366-384.
4. De Luca CJ; Delsys Incorporated. Surface electromyography: detection and recording. 2002.
5. Farina D, Merletti R, Enoka RM. The extraction of neural strategies from the surface EMG. J Appl Physiol. 2004; 96(4), 1486--1495.
6. Masuda K, Masuda T, Sadoyama T, Inaki M, Katsuta S. Changes in surface EMG parameters during static and dynamic fatiguing contractions. J Electromyogr Kinesiol. 1999;9(1):39-46.
7. Şaylı Ö, Uzun S, Akın A, Çotuk B. EMGALY.1: Grafik kullanıcı ara yüzü yüzeysel elektromiyografi inceleme yazılımı. BİYOMUT; 2007 Mayıs 22-23; İstanbul.
8. Biomedical Optics Research Laboratory, UCL Department Of Medical Physics And Bioengineering [Internet]. Near infrared spectroscopy. Bağlantı: <http://www.ucl.ac.uk/medphys/research/borl/intro/nirs>
9. Delpy DT, Cope M. Quantification in tissue Near-Infrared Spectroscopy, Phil Tran R Soc Lond B. 1997;352:649-659.
10. Suzuki S, Takasaki S, Ozaki T, Kobayashi Y. Tissue oxygenation monitor using NIR spatially resolved spectroscopy. Proc. SPIE; 3597; 1999. s. 582-592.
11. Şaylı Ö. Accuracy improvements of NIRS and investigation of muscle oxidative metabolism (Yakın kızılaltı spektroskopik yönteminin doğruluğunun iyileştirilmesi ve kas oksidatif metabolizmasının araştırılması) [Doktora Tezi]. Boğaziçi Üniversitesi; 2009.
12. Yamaji S, Demura S, Nagasawa Y, Nakada M. Relationships between decreasing force and muscle oxygenation kinetics during sustained static gripping. J Physiol Anthropol Appl Human Sci. 2004;23(2):41-47.
13. Biçer B. Sporcularda erector spinae kas yorgunluğunun işlevsel yakın kızılaltı spektroskopik ve yüzeysel elektromiyografi ile değerlendirilmesi [Doktora Tezi, devam ediyor]. Marmara Üniversitesi.
14. Pelvan O. Yüksek Şiddetli Kürek Egzersizleri Arasında Solunan Yüksek Yoğunluklu Oksijenin Kas İçerisinde Oksijen Metabolizmasına Etkisinin İşlevsel Yakın Kızılötesi Spektroskopik Kullanılarak İncelemesi [Doktora Tezi, devam ediyor]. Marmara Üniversitesi.
15. Felici F, Quaresima V, Fattorini L, Sbriccoli P, Filligoi GC, Ferrari M. Biceps brachii myoelectric and oxygenation changes during static and sinusoidal isometric exercises. J Electromyogr Kinesiol. 2009;19(2):1-11.
16. Moalla W, Merzouk A, Costes F, Tabka Z, Ahmaidi S. Muscle oxygenation and EMG activity during isometric exercise in children. J Sports Sci. 2006;24(11):1195-1201.