



Yorgunluk monitörizasyonunda kalp atım hızı değişikliği ölçümü ve değerlendirilmesi: Geleneksel bir derleme

Sümer ALVURDU¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi

Derleme Makale/ Review

DOI: 10.5281/zenodo.7741425

Gönderi Tarihi/ Received:
16.08.2022

Kabul Tarihi/ Accepted:
10.03.2023

Online Yayın Tarihi/ Published:
20.03.2023

Özet

Bu çalışmanın amacı, sporda yorgunluğun monitörizasyonunda kalp atım hızı değişkenliğinin (HRV) kullanımı ile ölçme ve değerlendirme yöntemleri hakkında detaylı bilgi vermektir. Sporcu monitörizasyonunda HRV, iç yükteki değişiklikleri takip etmek, antrenman yükü yönetimini optimize etmek ve antrenman adaptasyonlarını belirlemek için kullanılmaktadır. HRV monitörizasyonu, sporcunun toparlanma durumu ve antrenman ve müsabakanın genel yorgunluk seviyeleri üzerindeki etkisi hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Giyilebilir teknolojiler ve mobil uygulamalardaki son gelişmeler, HRV'nin gerçek zamanlı olarak ölçülmesini ve sporcularda yorgunluk seviyelerinin sürekli olarak takip edilmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca HRV ölçüm araçlarının geçerlik ve güvenilirliğini göz önünde bulundurmak ve HRV sonuçlarını açık ve kapsamlı bir şekilde (analiz yöntemi, ölçüm parametreleri, değerlendirme süresi gibi) raporlamak önemlidir. Sporcu monitörizasyonunda HRV ölçümlerinin daha çok istirahat halinde, ultra-kısa süreli (<60sn) analiz yöntemi ile lnRMMSD ve RMMSD metrikleri dikkate alınarak gerek giyilebilir gerekse mobil uygulama araçları ile değerlendirilebileceği söylenebilir. HRV sporcularda yorgunluk monitörizasyonu için zamanla daha fazla kullanılan bir araç haline gelmiştir. Ancak, HRV'nin atletik popülasyonlarındaki geçerliliğini belirlemek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu açıktır. Ayrıca, spor bilimciler ve uygulayıcılar (atletik performans antrenörleri, fizyoterapistler gibi) sporcuların yorgunluk ve toparlanma düzeyleri hakkında karar verirken, HRV kullanımının yanında diğer yorgunluk monitörizasyon araçlarını da mutlaka dikkate almalıdır.

Anahtar Kelimeler: HRV, Otonom sinir sistemi, Yük yönetimi, Toparlanma, Sporcu monitörizasyonu

Measurement and evaluation of heart rate variability in monitoring fatigue: A narrative review

Abstract

The aim of this study was to give detailed information about the use of heart rate variability (HRV) and measurement and evaluation methods of the monitoring fatigue. HRV has become an increasingly used tool for monitoring fatigue in athletes. HRV is used for monitoring changes in optimize training load, and identify training adaptations. HRV monitoring provides important information about the athlete's recovery and the impact of training and competition on overall fatigue levels. Recent developments in wearable technologies and mobile applications have made it possible to measure HRV in real time and to continuously monitor fatigue levels. It is also important to consider the validity and reliability of HRV measurement tools and to report HRV results clearly and comprehensively. In athlete monitoring, it can be said that HRV measurements can be evaluated mostly at rest, with ultra-short-term (<60 sec) analysis method, and by taking into account the lnRMMSD and RMMSD metrics. However, it is clear that more research is needed to determine the validity of HRV in athletic populations. In addition, sports scientists and practitioners should consider other fatigue monitoring tools in addition to the use of HRV when making decisions about the fatigue and recovery levels of athletes.

Keywords: HRV, Autonomic nervous system, Load management, Recovery, Athlete monitoring

Sorumlu Yazar/ Corresponded Author: Sümer ALVURDU, E-posta/ e-mail: sumeralvurdu@gazi.edu.tr

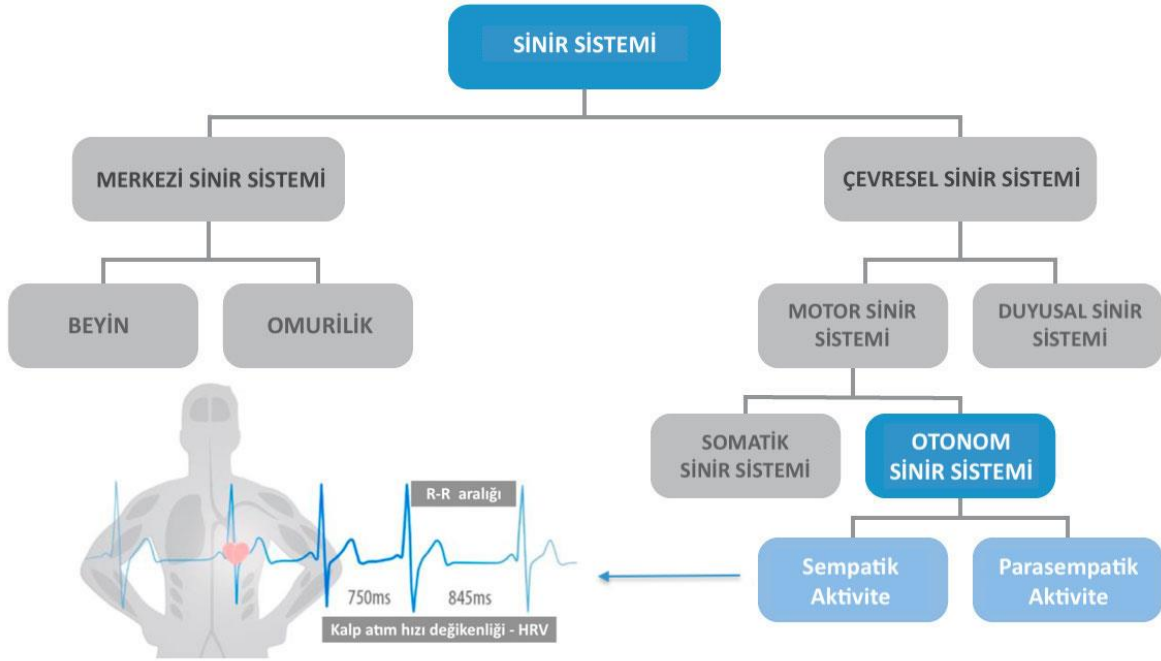
Genişletilmiş Türkçe Özet, makalenin sonunda yer almaktadır.

GİRİŞ

Yorgunluk, fizyolojik olarak gerekli veya beklenen kuvveti/gücü sürdürememe (Edwards, 1981), fiziksel aktivite sırasında bir kasın kuvvet oluşturma yeteneğindeki azalma (Bogdanis, 2012), sinir sisteminin kasları harekete geçirme ve kontrol etme yeteneğinde bir düşüş (Kenney ve ark., 2021) veya antrenman yükünün artması ile sporcunun istirahat düzeyindeki fizyolojik ve psikolojik fonksiyonlardaki kayıplar (Allen, 2009; Jones ve ark., 2017) şeklinde ifade edilmektedir.

Yorgunluğun nedeni incelendiğinde ise, çevresel (peripheral) ve merkezi (central) yorgunluk olmak üzere iki mekanizmaya bağlı olduğu görülmektedir (McKenna ve Hargreaves, 2008). **Çevresel yorgunluk**, kas içindeki metabolik ve biyokimyasal değişikliklerin neden olduğu kas liflerinin yorgunluğunu; **merkezi yorgunluk** ise, beyin ve omurilik dahil olmak üzere merkezi sinir sisteminden (SNS) kaynaklanan yorgunluğu ifade etmektedir (Zajac ve ark., 2015). Bununla birlikte, yeterli toparlanma süreleri olmadan antrenman şiddetinin veya hacminin artması performans kapasitesinin düşmesine neden olacak şekilde yorgunluğa sebep olabilir. Bu yoğunlaştırılmış antrenman dönemleri, fonksiyonel aşırı erişim (over-reaching), fonksiyonel-olmayan aşırı erişim veya sürantrenman (over-training) sendromuna yol açabilir (Meeusen ve ark., 2006). Bu nedenle, bir antrenman uyarısına verilen cevaplar hakkında detaylı bilgiler sağlayan yorgunluk ve toparlanma monitörizasyonu, önemli bir hale gelmiştir (Coutts ve ark., 2007; Halson, 2014; Fitzpatrick ve ark., 2021; Lourenço ve ark., 2023) ve biyokimyasal (Meeusen ve ark., 2013), hormonal (Urhausen ve ark., 1995), immünolojik (Gabriel ve ark., 1998), psikolojik anketler (Kellmann, 2010) ve otonom sinir sistemi dengesi (Kaikkonen ve ark., 2008) gibi göstergeler ile değerlendirilebilmektedir.

Otonom sinir sistemi (ANS), kalp atım hızı, kan basıncı ve solunum gibi vücudun iç fonksiyonlarını ve homeostaz seviyesini düzenler (McCorry, 2007). Kalp atım hızına bağlı değişiklikler, ANS'nin **sempatik** (uyarılma) ve **parasempatik** (gevşeme) dalları arasındaki dengede ile kontrol edilir (Stauss, 2003). Sempatik aktivite “savaş ya da kaç” tepkisini etkinleştirir ve kalp atım hızını artırırken, parasempatik aktivite “dinlen veya toparlan” tepkisini etkinleştirir ve kalp atım hızını yavaşlatır (Furlan ve ark., 1993; Iellamo ve ark., 2002).



Şekil 1. Otonom sinir sistemi ve HRV

Bir sporcunun fizyolojik stres, yorgunluk ve toparlanma düzeyi büyük ölçüde ANS tarafından kontrol edilir (Flatt ve Howells, 2019) ve istirahat kalp atım hızı (Borresen ve Lambert, 2007), egzersiz kalp atım hızı (Buchheit, 2014), toparlanma kalp atım hızı (Lamberts ve ark., 2010) ve kalp atım hızı değışkenliği (Schmitt ve ark., 2013) gibi kalp atım hızına bağlı çeşitli parametreler ile değeriendirilir.

Kalp atım hızı değışkenliği (HRV) kavramı, yirminci yüzyılın başlarına kadar uzanan bir geçmişe sahiptir. HRV ile ilgili ilk çalışmalar, kalp atım hızını belirleyen fizyolojik mekanizmaları anlamakla ilgilenen kardiyovasküler araştırmacılar tarafından yürütülmüştür. 1950'lerde ve 1960'larda, HRV öncelikle aritmiler ve kalp hastalığı gibi kalp rahatsızlıklarını teşhis etmek ve takip etmek için bir araç olarak kullanılmıştır (Malik, 1996).

HRV'nin önemi ilk kez 1965 yılında Hon ve Lee (1965)'nin, kalp atım hızında kayda değer bir değışiklik meydana gelmeden önce atımlar arası aralıklardaki değışikliklerin ortaya çıktığını kaydetmesiyle anlaşılmıştır. 1980'lerde ve 1990'larda bilgisayar teknolojisindeki ve dijital sinyal işlemedeki gelişmeler, HRV verilerinin daha karmaşık analizine imkan vermiştir (Billman, 2011). Bu gelişmeler, giyilebilir cihazlar ve mobil uygulamalar da dahil olmak üzere HRV'yi gerçek zamanlı olarak takip etmek için yeni monitörizasyon araçlarının geliştirilmesinin önünü açmıştır.

Sporcu monitörizasyonu üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde (Borresen ve Lambert, 2008; Buchheit, 2014; Halson, 2014), HRV ölçümlerinin toparlanma ve yorgunluk monitörizasyonu kapsamında değerlendirildiği görülmektedir. Ancak bu çalışmada her iki kavram da yorgunluk monitörizasyonu olarak ifade edilecektir. Literatür taraması türlerinden geleneksel derleme yöntemi ile hazırlanmış bu araştırmada, atletik popülasyonlardaki yorgunluk monitörizasyonu üzerine yapılmış HRV ölçme ve değerlendirme yöntemleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Yorgunluk monitörizasyonu ve HRV

ANS'nin sempatik ve parasempatik aktivitelerini invaziv olmayan bir şekilde belirleyen HRV, antrenman ve performansa verilen fizyolojik tepkileri değerlendirmek, sürantrenman ve yorgunluğu/stresi monitörize etmek için giderek daha popüler bir araç haline gelmiştir (Bricout ve ark., 2010). Sporcu monitörizasyonunda HRV, antrenman iç yükünü belirlemek (McGuigan, 2017), sporcunun kondisyon seviyesindeki değişiklikleri değerlendirmek (Iellamo ve ark., 2002), antrenmanın pozitif-negatif adaptasyonlarını takip etmek (Plews ve ark., 2013), sürantrenman (overtraining) ve yaralanmayı önlemeye yardımcı olmak (Halson ve Jeukendrup, 2004) amacıyla kullanılmaktadır.

Sağlık durumunun değerlendirilmesi: HRV, bir sporcunun genel sağlık durumunu değerlendirmek için kullanılabilir. Antrenörler ve sporcular, HRV'deki değişiklikleri monitörize ederek hazır bulunuşluk düzeyi ve hastalık durumunu tespit edebilir ve bu sorunları ele almak için uygun önlemleri alabilir (Schaafsma, 2015; Flatt ve ark., 2017; Rabbani ve ark., 2018).

Stres düzeyinin belirlenmesi: HRV ayrıca, bir sporcunun fizyolojik durumu ve antrenman stresiyle başa çıkma yeteneği hakkında bilgi sağlayarak yorgunluğu monitörize etmek için kullanılabilir (Nikhil ve ark., 2018). Örneğin, sporcular belirli bir süre boyunca aşırı yüklerle antrenman yaptıklarında, antrenmanlar strese bağlı kümülatif etkiler üretebilir. Bu stresin büyüklüğü, HRV analizi kullanılarak ANS'deki sempatik aktivite değişimleri takip edilebilir (Morales ve ark., 2014).

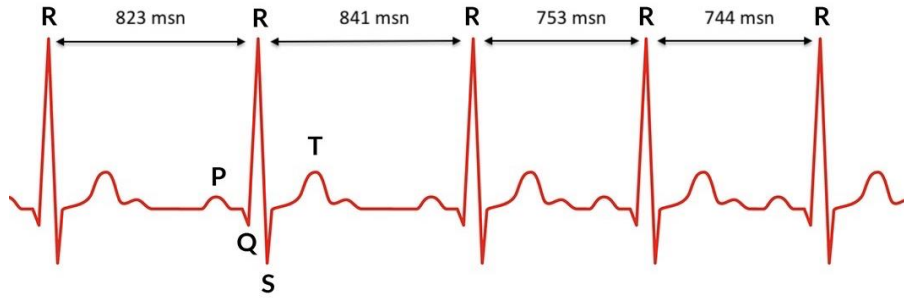
Antrenman adaptasyonları ve toparlanma monitörizasyonu: HRV, yüksek şiddetli aralıklı antrenman (Fronchetti ve ark., 2007; Schneider ve ark., 2019), dayanıklılık antrenmanı (Terziotti ve ark., 2001) ve kuvvet antrenmanı (Anunciacao ve ark., 2011; Figueiredo ve ark., 2013; Rezk ve ark., 2006) gibi farklı antrenman türlerinin ANS üzerindeki etkilerini monitörize etmek için kullanılabilir ve antrenörler HRV'deki değişiklikleri takip ederek, antrenman

programlarını buna göre ayarlayabilir ve toparlanma stratejilerini (Javorka ve ark., 2002; Martinmäki ve Rusko, 2008; Morales ve ark., 2014) optimize edebilirler.

Antrenman yükü yönetimi ve yorgunluk monitörizasyonu: HRV yorgunluğa yanıt olarak iç yükün ANS üzerindeki etkisine dair bir fikir verdiği için, sporcularda antrenman yükü yönetimi açısından önemli bir yorgunluk monitörizasyonu aracıdır (Michael ve ark., 2017). Antrenörler ve sporcular, antrenman yoğunluğunu ayarlamak için HRV'yi kullanarak yaralanma ve sürantrenman riskini azaltabilir ve performans sonuçlarını iyileştirebilirler (Hedelin ve ark., 2000; Mourot ve ark., 2004; Schmitt ve ark., 2013; Lai ve ark., 2017; Kumar ve ark., 2022).

HRV ile ilgili terminoloji

HRV, ardışık kalp atımları arasındaki zaman aralıklarındaki (R-R aralıkları) değişkenliğin bir ölçüsüdür (Bosquet ve ark., 2008) (Şekil 2) ve otonom sinir sisteminin (ANS), sempatik ve parasempatik aktiviteleri arasındaki dengenin güvenilir bir göstergesi olarak kabul edilir (Lacey, 1956).



Şekil 2. R-R aralıkları

Yüksek bir HRV, ANS'nin değişen koşullara etkili bir şekilde cevap verebildiğini ve strese uyum sağlayabildiğini gösterirken, düşük bir HRV, ANS'nin etkili bir şekilde cevap veremediğini ve stres/yorgunluk altında olabileceğini gösterir (Blásquez ve ark., 2009). HRV değerlerindeki azalmalar, rekreasyonel aktif bireyler veya iyi antrenmanlı sporcularda fonksiyonel olmayan aşırı erişim ve/veya yorgunluk ile ilişkilendirilmiştir (Uusitalo ve ark., 2000; Borresen ve Lambert, 2008; Hynynen ve ark., 2008).

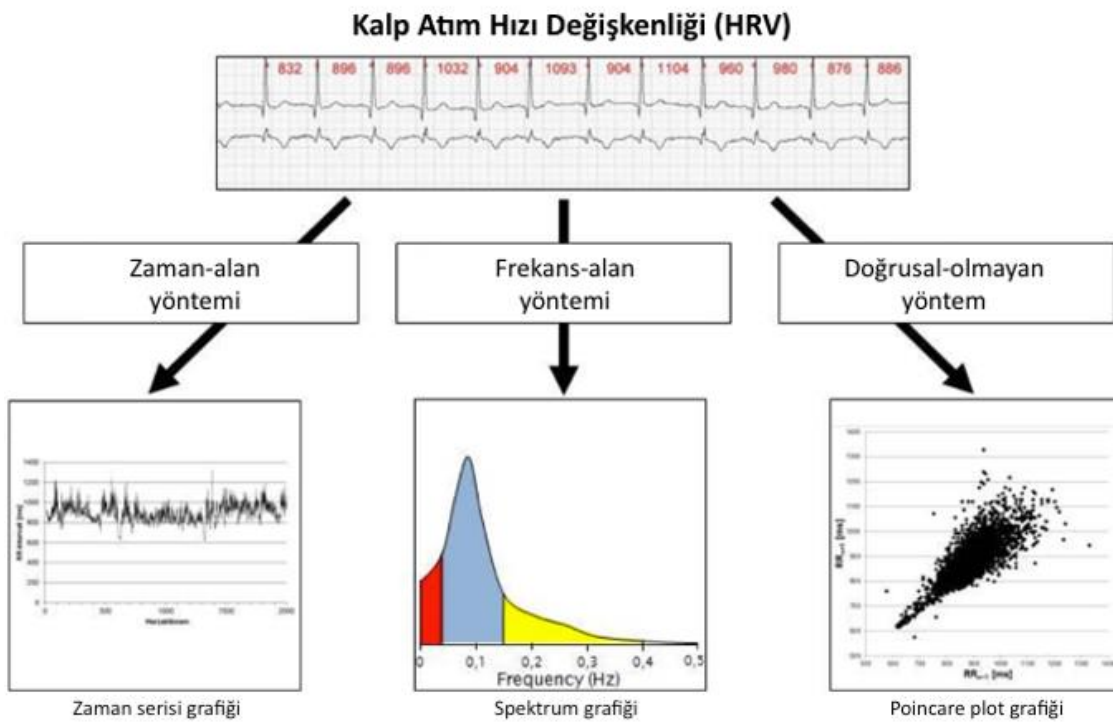
HRV analizi

HRV parametreleri matematiksel algoritmalar yardımıyla zaman-alanı (*time-domain*), frekans alanı (*frequency-domain*) ve doğrusal olmayan (*non-linear*) yöntemler kullanılarak analiz edilebilir (Camm ve ark., 1996; Cowan, 1995).

Zaman alanı analizi, ardışık kalp atımları (R-R aralıkları) arasındaki zaman aralıklarını analiz eder. Zaman alanı ölçümleri, NN aralıklarının ortalamasını (NN50), NN aralıklarının standart sapmasını (SDNN) ve ardışık NN aralıkları arasındaki farkların (rMSSD) ortalama karekökünü içerir.

Frekans alanı analizi, düşük frekanslı (LF) gücü, yüksek frekanslı (HF) gücü ve LF'nin HF'ye oranını (LF/HF oranı) içerir.

Doğrusal olmayan analiz ise, HRV sinyalinin karmaşıklığını ve düzensizliğini analiz etmek için matematiksel algoritmalar kullanır. Doğrusal olmayan ölçümler, HRV sinyalinin Poincare grafik analizini içerir (Henriques ve ark., 2020).



Şekil 3. HRV analiz yöntemleri (Sammito ve ark., 2015).

HRV metrikleri

HRV ile ilgili spor ve egzersiz bilimlerinde en çok kullanılan metriklerin/parametrelerin detaylı açıklamaları Tablo 1'de verilmiştir (Achten ve Jeukendrup, 2003; Sammito ve ark., 2015; Dobbs ve ark., 2019).

Tablo 1. HRV metrikleri ve açıklamaları

Kategori	Metrik	Açıklama	ANS aktivitesi
Zaman- alan analizi	SDNN (msn)	Normalden normale aralıkların standart sapması	Genel otonomik değişkenlik
	pNN50 (msn)	Birbirinden 50 ms'den fazla sapan ardaşık N-N aralıklarının yüzdesi	Parasempatik
	RMMSD (msn)	R-R aralıkları arasındaki ardışık farkların karelerinin ortalamasının karekökü	Parasempatik
Frekans- alan analizi	TP (msn ²)	Toplam güç (< 0.4 Hz)	Genel otonomik değişkenlik
	VLF (msn ²)	Çok düşük frekans (< 0.04 Hz)	Sempatik
	LF (msn ²)	Düşük frekans (0.05 - 0.15 Hz)	Sempatik* Parasempatik
	HF (msn ²)	Yüksek frekans (0.15 - 0.4 Hz)	Parasempatik
	LF/HF oranı	Düşük (LF) ve yüksek (HF) frekanslı bileşenlerinin birbirine oranı (0-4 birim)	Sempatik ve Parasempatik
Doğrusal olmayan analiz	SD1	Poincare grafiğinin genişliğinin standart sapması: grafikteki kısa süreli R-R aralıklarını ifade eder	Parasempatik
	SD2	Poincare grafiğinin uzunluğunun standart sapması: grafikteki uzun süreli R-R aralıklarını ifade eder	Sempatik ve parasempatik

ANS: otonom sinir sistemi, * Baskın olarak

HRV değerlerinin aralığı, ölçüm ve analiz için kullanılan yöntemle bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Genel olarak, HRV milisaniye (msn) cinsinden rapor edilir. Normalden normale (NN) aralıkların standart sapması gibi zaman alanlı HRV ölçümleri, tipik olarak 50-200 msn veya 0,05-0,2 s arasında bir değer aralığına sahiptir. Düşük frekansın (LF) yüksek frekansa (HF) oranı gibi frekans alanı ölçümleri genellikle bir oran olarak veya milihertz (mHz) veya hertz (Hz) cinsinden mutlak güç birimleri olarak ifade edilir. LF/HF oranı için ise değer aralığı, 0-4 arasında değişebilir (Camm ve ark., 1996).

HRV ölçüm süreleri

HRV analizi, uzun süreli (*long-term*), kısa süreli (*short-term*) ve ultra kısa süreli (*ultra-short-term*) analiz dahil olmak üzere farklı zaman dilimlerinde gerçekleştirilebilir. Her bir analiz yöntemi antrenman adaptasyonları, antrenman yükü yönetimi ve yorgunluk monitörizasyonunda farklı uygulamalara sahiptir.

Uzun süreli analiz: Genellikle günlük veya haftalık kalp atım hızı kayıtlarını toplayarak, birkaç gün veya hafta boyunca HRV'nin değerlendirilmesini içerir. Bu yaklaşım, sporcunun genel yorgunluk seviyeleri ve toparlanma stratejileri hakkında kapsamlı bir genel bakış sağlar.

Kısa süreli analiz: Genellikle birkaç dakika gibi daha kısa bir süre boyunca HRV'nin değerlendirilmesini içerir. Bu yaklaşım, egzersiz sırasında ve sonrasında HRV'deki

değişiklikleri takip etmek için kullanılır ve sporcunun antrenman ve yarışmaya tepkisi hakkında önemli bilgiler sağlayabilir.

Ultra kısa süreli analiz: HRV'nin daha da kısa bir süre, genellikle birkaç saniye boyunca değerlendirilmesini içerir. Bu yaklaşım, yüksek yoğunluklu egzersiz sırasında HRV'deki hızlı değişiklikleri takip etmek için kullanılır ve sporcunun strese karşı fizyolojik tepkisi hakkında değerli bilgiler sağlayabilir.

Tablo 2. HRV ölçüm sürelerinin karşılaştırılması

Kategori	Süre	Parametre	Değerlendirme	Yöntem
Uzun-süreli HRV	1 gün- 1 hafta	SDNN RMMSD pNN50	- ANS fonksiyon bozukluğu	- Zaman-alan
			- Genel fizyolojik stres düzeyi	- Frekans-alan
			- Genel sağlık ve esenlik durumları	- Doğrusal-olmayan analiz
			- Antrenman adaptasyonları	
Kısa-süreli HRV	1-60 dk	SDNN LF/HF	- ANS mevcut durumu	- Zaman-alan
			- Stres faktörlerinin ve egzersiz/antrenman müdahalelerinin HRV üzerindeki etkisi	- Frekans-alan
Ultra-kısa-süreli HRV	30sn- 5dk	RMMSD lnRMMSD*	- Fizyolojik ve psikolojik uyaranlara akut cevap	- Zaman-alan
			- HRV'deki ani değişiklikler Toparlanma düzeyi	- Frekans-alan

* lnRMMSD (R-R aralıklarının log-dönüştürülmüş kök ortalama karesi): yorgunluk monitörizasyonunda kısa süreli ölçümlerde en güvenilir parametre olarak kabul edilebilir (Esco ve Flatt, 2014).

Kısa süreli HRV analizlerinin uzun süreli HRV analizlerine göre ucuz ve ulaşılabilir olması, farklı vücut pozisyonlarında (oturarak, yatarak veya ayakta/egzersiz sırasında) ölçülebilmesi, çevresel faktörlerin kontrol edilebilir olması ve kısa süre içerisinde HRV değişimi hakkında bilgi vermesi açısından yorgunluk ve toparlanma monitörizasyonunda daha avantajlı olduğu söylenebilir (Li ve ark., 2019).

HRV ölçüm yöntemleri

Klinik ortamlarda, HRV ölçümü için en sık kullanılan yöntemler, en yüksek düzeyde doğruluk ve kesinlik sağladıkları için EKG tabanlıdır. Bununla birlikte, EKG tabanlı HRV ölçümü tipik olarak daha invazivdir ve özel ekipman gerektirir, bu da onu klinik olmayan ortamlarda veya sürekli olarak monitörizasyon için uygun değildir. Altın standart olarak kabul edilen EKG ölçümüne ek olarak, HRV'yi değerlendirmek için kullanılabilecek birkaç alternatif yöntem ve araç mevcuttur. Bunlar;

Elektrokardiyogram (EKG): Genellikle sağ köprücük kemiğinin altına bir katot elektrotu, sol köprücük kemiğinin altına bir toprak elektrotu ve karnın sol tarafına bir anot elektrotu yerleştirmeyi içerir. EKG sensörleri, göğüs bölgesinde bir kalp atımları tarafından

üretilen elektriksel aktiviteyi saptadıkları için kalp aktivitesinin doğrudan bir ölçümünü sağlamaktadır (Ramasamy ve Balan, 2018).

Göğüs bantları: Göğüs bantları/kemerleri, EKG tabanlı HRV ölçümü için başka bir yöntemdir. Bir kalp atımının ürettiği elektriksel aktivite, göğüs kemerindeki sensörden kablosuz olarak uygun bir alıcıya (akıllı saat, mobil cihazlar veya diğer benzer alıcılar) gönderilir (Stangl ve Riedl, 2022).

Fotopletizmografi (PPG): Bu yöntem, ışık sensörleri kullanarak kan hacmindeki değişiklikleri ölçer ve nabız dalgalarının tespiti yoluyla HRV'yi invaziv olmayan bir yöntemle ölçmek için kullanılabilir (Plews ve ark., 2017). PPG tabanlı HRV ölçümü genellikle akıllı saatler gibi giyilebilir cihazlarda veya mobil uygulamalarda kullanılır.

Temassız (Non-contact) PPG algoritması ölçümü: Bireyin kalp atımı sırasında periyodik olarak oluşan cilt rengindeki (örneğin: yüzündeki) hafif değişimlerden yararlanır. Bu metodolojik yaklaşım, kullanıcıların doğal ortamına müdahale etmeden mobil HRV ölçümlerini mümkün kılmaktadır (Rouast ve ark., 2017).

HRV ölçümünde giyilebilir teknolojiler ve mobil uygulamalar

Giyilebilir teknolojiler ve mobil uygulamalardaki son gelişmeler, HRV'nin gerçek zamanlı olarak ölçülmesini ve sporcularda yorgunluk seviyelerinin sürekli olarak takip edilmesini mümkün kılmıştır.

Apple Watch, Samsung Galaxy Watch, Garmin ve Fitbit gibi birçok **akıllı saatler**, nabız dalgalarının algılanması yoluyla HRV'yi ölçmek için PPG yöntemini kullanır ve genel sağlık, fitness ve zindelik monitörizasyonu hakkında bilgi sağlar. EmWave2, OmegaWave gibi bazı **biyogeribildirim cihazları** PPG yöntemini kullanarak ışık, ses veya diğer geri bildirim mekanizmaları aracılığıyla organizmanın stres ve yorgunluk seviyesi hakkında gerçek zamanlı geri bildirim sağlar. Polar H10, Garmin, Zephyr, Suunto gibi bazı **göğüs bantları**, HRV hakkında doğru ve ayrıntılı bilgi sağlamak için EKG ölçümü kullanır ve HRV verilerinin kapsamlı analizini ve takibini sağlamak için **giyilebilir bir cihazlar** yardımıyla (kol bandı, yüzük, kulak klipsi gibi) veya akıllı telefon uygulamalarıyla (HRV4training ve Elite HRV gibi) birlikte kullanılabilir. Ayrıca, bir akıllı telefon kamerası aracılığıyla farklı PPG yöntemleri (PPG_{parmak} ve PPG_{yüz} gibi) kullanarak HRV ölçümü yapabilen **mobil uygulamalar** da stres ve yorgunluk monitörizasyonunda son zamanlarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Tablo 3. HRV ölçümünde kullanılan giyilebilir teknolojiler ve mobil uygulamalar

Mobil Uygulamalar	Giyilebilir Teknolojiler (Mobil uygulamalar tarafından desteklenen)							
	Göğüs bandı	Parmak oksimetre	PPG Kamera	PPG Bilek	PPG Yüzük	PPG Kol bandı	PPG Yüz	PPG Kulak
HRV4Training	Polar H7, H9, H10	-	Evet	Akıllı saat (Apple)	Ouro Ring	-	-	-
Elite HRV	Polar, Suunto Zephyr, Garmin*	CorSense Kyoto	-	-	-	Schosche Rhythm 24 *	-	Kyto Ear Clip
ithlete	Cardiosport	Evet #	-	-	-	-	-	-
HRV+	Polar H9,H10 ve diğerleri	-	-	-	-	-	-	-
SweatBeat	Wellue VisuaBeat	Wellue DeoEK	-	✓ #	-	-	-	-
AIO Sleeve	-	-	-	✓ #	-	✓ #	-	-
Camera HRV	-	-	✓	-	-	-	-	-
CardioRhythm	-	-	✓	-	-	-	✓	-
Beam AI Lite	-	-	-	-	-	-	✓	-
Apple Health	Polar, Garmin	-	-	Akıllı saat (Apple)	Ouro Ring	Schosche Rhythm 24	-	-
Welltory	Polar, Garmin, FitBit	-	✓	Mifit Whithings	Ouro Ring	-	-	-
Empatica E4	-	-	-	Evet #	-	-	-	-
Whoop	-	-	-	Evet #	-	-	-	-
CardioMood	-	-	-	Evet #	-	-	-	-
Inner Balance	-	-	-	-	-	-	-	HeartMath
EmWave2	-	-	-	-	-	-	-	HeartMath

PPG: fotopleitismografi, ✓: Destekliyor, (-): Desteklemiyor, # Sadece üretici firmaya ait, * Sadece Android işlemci

Ayrıca, Kubious HRV, Finland (Tarvainen ve ark., 2014) ve Nevrokard aHRV, Slovenia (Rajalakshmi ve ark., 2015) gibi yazılımlar, HRV değerlerinin detaylı analizlerinin yapılmasına imkan tanımaktadır. Ancak bu yazılımlar ile ham veriler üzerinden değerlendirme yapılabildiği için gerek giyilebilir teknolojiler gerekse mobil uygulamalar üzerinden ham veri dosyalarının (.csv) dışarıya aktarılıp aktarılmadığı dikkate alınmalıdır.

HRV ölçüm araçlarının geçerlik ve güvenilirliği

Geçerlik, bireyin gerçek fizyolojik durumuyla ilişkili olarak HRV ölçümünün doğruluğunu, güvenilirlik ise, HRV ölçümünün zaman içinde ve farklı ölçüm seansları arasındaki tutarlılığını ifade etmektedir.

EKG, kalbin elektriksel aktivitesi hakkında doğru ve ayrıntılı bilgi sağladığı için HRV ölçümü için altın standart olarak kabul edilir (Ishaque ve ark., 2021). Bununla birlikte, EKG

ölçümü invaziv bir ölçümdür ve klinik ortam dışında monitörizasyon gibi değerlendirmeler için kolay uygulanabilir değildir (Georgiou ve ark., 2018).

Nabız dalgalarının tespiti yoluyla HRV'yi ölçen fotopletismografi (PPG), invaziv olmayan bir yöntemdir ve EKG'ye göre daha pratik bir alternatiftir (Georgiou ve ark., 2018), ancak özellikle PPG sinyal kalitesini etkileyebilecek belirli fizyolojik özellikleri olan bireylerde EKG'ye kıyasla daha düşük geçerliliğe sahip olabilir.

HRV ölçümünün güvenilirliği ölçüm ortamı veri işleme algoritmaları ve ölçüm protokolleri gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Özellikle sporcu monitörizasyonu alanında HRV ölçümleri için giyilebilir teknolojiler ve mobil uygulamalar seçerken geçerlilik, güvenilirlik ve pratiklik arasındaki denge göz önünde bulundurulmalıdır. HRV ölçüm araçlarının geçerliliği ve güvenilirliği, uygun istatistiksel yöntemler ve altın standart ölçümlerle karşılaştırma yoluyla belirli popülasyonlarda ve uygulamalarda doğrulanmıştır ancak, atletik popülasyonlarda geniş katılımcı gruplarıyla yapılacak daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu açıktır. Dolayısıyla HRV ölçüm araçlarının geçerliliği ve güvenilirliği, ölçüm araçlarının özelliğine ve uygulamaya bağlı olarak değişebilir. Tablo 4'de HRV ölçümlerinde kullanılan giyilebilir teknolojiler ve mobil uygulamalara ait ilgili geçerlik ve güvenilirlik çalışmaları raporlanmıştır.

Giyilebilir cihazlar ve mobil uygulamalar kullanılarak yapılan HRV ölçümünün doğruluğu ve geçerliliğinin, HRV ölçümü için altın standart olan EKG ölçümüne kıyasla daha düşük olabileceğine ve belirli popülasyonlarda daha fazla doğrulama çalışması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, aynı mobil uygulama üzerinden kullanılacak farklı ölçüm yöntemlerinin (PPG, göğüs bandı veya parmak oksimetre) HRV sonuçlarını etkileyebileceği de unutulmamalıdır.

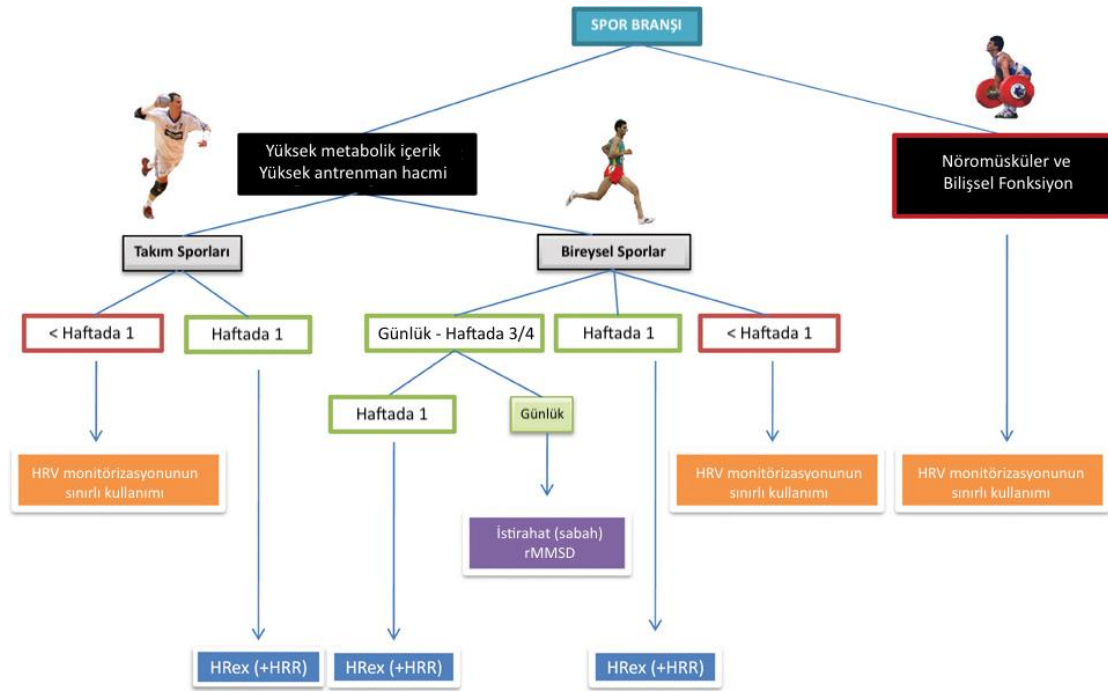
Tablo 4. HRV ölçümünde kullanılan giyilebilir teknolojiler ve mobil uygulamaların geçerlik ve güvenilirliğine ait bilimsel çalışmalar (Altın standart EKG ölçümleri ile karşılaştırılmıştır)

Teknoloji	Uygulama	Ölçüm yöntemi	Çalışma grubu	Parametre	Analiz	Referanslar
Giyilebilir teknoloji	Ouro Ring	PPG yüzük	Elit dayanıklılık sporcuları	lnRMMSD	Ultra-kısa süreli < 60 sn	(Cao ve ark., 2022)
Giyilebilir teknoloji	ithlete	Göğüs bandı	Spor bilimleri öğrencileri	lnRMMSD	Ultra-kısa süreli < 60 sn	(Flatt ve Esco, 2013)
Giyilebilir teknoloji	ithlete	Parmak oksimetre	Atletik popülasyon	lnRMMSD	Ultra-kısa süreli < 60 sn	(Esco ve ark., 2017)
Giyilebilir teknoloji	Suunto T6	Göğüs bandı	Rekreasyonel aktif bireyler	TP, VLF, LF	Kısa süreli: < 10 dakika	(Sammito ve ark., 2015)
Giyilebilir teknoloji	CardioMood	PPG Bilek (Akıllı saat)	Rekreasyonel koşucular	Tüm HRV parametreleri	Kısa süreli: 5 dakika	(Pereira ve ark., 2020)
Mobil uygulama	Elite HRV	PPG kamera	Yol bisikletçileri	RMMSD	Kısa süreli: 5 dakika	(Moya-Ramon ve ark., 2022)
Mobil uygulama #	Elite HRV	Göğüs bandı	Rekreasyonel sporcular	RMMSD	Kısa süreli: 10 dakika	(Perrotta ve ark., 2017) *
Mobil uygulama	HRV4training	PPG kamera	Rekreasyonel ve iyi antrene atletler	RMMSD	Kısa süreli: 1-5 dakika	(Plews ve ark., 2017)
Mobil uygulama	HRV4training	PPG kamera	Yarı maraton ve Maraton koşucuları	RMMSD	Kısa süreli: 1-5 dakika	(Altini ve ark., 2017)
Mobil uygulama	CardiioRhythm	PPG yüz	Elit dayanıklılık sporcuları	RMMSD	Ultra-kısa süreli < 60 sn	(Chan ve ark., 2016; Yan ve ark., 2018)
Mobil uygulama	Welltory	PPG kamera	Yol bisikletçileri	lnRMMSD	Kısa süreli: 5 dakika	(Moya-Ramon ve ark., 2022)
Giyilebilir teknoloji	Empatica E4	PPG Bilek (Akıllı saat)	Atletik popülasyonlarda değerlendirilmemiştir			(Schuurmans ve ark., 2020)
Giyilebilir teknoloji	Whoop	PPG Bilek (Akıllı saat)	Atletik popülasyonlarda değerlendirilmemiştir			(Bellenger ve ark., 2021)

PPG: fotopletizmografi, lnRMMSD: R-R aralıklarının log-dönüştürülmüş kök ortalama karesi, TP: Toplam güç, VLF: çok düşük frekans, LF: düşük frekans, #: Giyilebilir teknoloji aracılığı mobil uygulama kullanılarak HRV analizi yapılmıştır, * Ham veri üzerinden Kubious yazılımı ile karşılaştırma yapılmıştır.

HRV'nin değerlendirilmesi

HRV'nin ölçüm yöntemleri ve standartları hakkında Avrupa Kardiyoloji Derneği (Camm ve ark., 1996) tarafından metodolojik önerilerde bulunulmuş ve klinik değerlendirmeler için birçok kılavuz yayımlanmıştır (Sammito ve ark., 2015; Quintana ve ark., 2016; Nikhil ve ark., 2018). Diğer taraftan, HRV'nin atletik popülasyonlarda yorgunluk ve antrenman adaptasyonlarını yansıttığını gösteren birçok araştırma bulunmasına rağmen sporcu monitörizasyonunda HRV'nin pratik kullanımı için kapsamlı bir ölçüm yönergesi henüz yer almamaktadır. Bununla birlikte, Buchheit (2014)'in kalp atım hızı parametreleri ve HRV ölçümleri üzerine yapmış olduğu çalışma, sporcu monitörizasyonunda HRV'nin sınırlılıkları, değerlendirilmesi ve yorumlanması açısından önemli bir kaynak olduğu düşünölmektedir (şekil 4).



Şekil 4. HRV ölçümlerinin değerlendirilmesine yönelik karar tablosu (HRV: kalp atım hızı değişkenliği, HRex: egzersiz kalp atım hızı, HRR: toparlanma kalp atım hızı)

Şekil 4 incelendiğinde, antrenman adaptasyonları ve yorgunluk/toparlanma düzeyindeki anlamlı değişiklikleri değerlendirmek için HRV'nin en az bir hafta içerisinde ve günlük monitörize edilmesi sporcunun uyumu açısından önemli bir husustur. Bununla birlikte, dayanıklılık sporlarında haftada 3-4 defa, uyandıktan sonra HRV'nin (rMMSD parametresinin) değerlendirilmesi önerilmesine rağmen takım sporları için HRV ölçümünün evde yapılması gerektiği ve haftada birden fazla değerlendirmenin spor ortamında gerçekçi olmadığı belirtilmiştir. Dolayısıyla takım sporları için HRV'nin değerlendirilmesinde bir görüş birliği sağlanamamış ve standart bir antrenman gününde HRex ve HRR parametrelerinin değerlendirilmesi önerilmiştir.

SONUÇ

Yorgunluk monitörizasyon araçları değerlendirildiğinde, algılanan zorluk derecesi ölçęinin sübjektif ve sporcu tarafından manipüle edilebilir olması; dikey sıçrama ve sprint testlerinin maksimal performans sırasında motivasyon kaybı ve yorgunluk oluşturması; biyokimyasal belirteçlerin yüksek maliyetli olması ve geribildirim uzun zaman alması gibi dezavantajları olduğu belirtilmektedir (Dobbs ve ark., 2019). HRV'nin ise, kolay ulaşılabilir fizyolojik bir yorgunluk ölçümü olması ve kısa sürede güvenilir sonuçlar vermesi açısından yorgunluğun değerlendirilmesi ve antrenman yükü yönetiminde daha avantajlı bir monitörizasyon aracı olduğu söylenebilir. Ancak, HRV'nin sporcularda yorgunluk ve toparlanmayı monitörize etmek ve değerlendirmek için önemli bir araç olduğu bilinmekle

birlikte, özellikle atletik popülasyonlardaki kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla HRV'nin spor bilimlerinde antrenman ve performans verilen fizyolojik tepkileri değerlendirmek için kullanılabilir birçok araçtan sadece biri olduğunu ve sporcu sağlığı ve performansının daha kapsamlı bir değerlendirmesi için diğer ölçümler ve veri kaynakları ile birlikte kullanılması gerektiğini unutmamak önemlidir.

Ayrıca, spor bilimciler, antrenörler ve uygulayıcılar yorgunluğun monitörizasyonunda hangi değişkenin dikkate alınması gerektiği konusunda bilgi sahibi olmalıdır.

Pratik çıkarımlar ve Öneriler

Bir antrenman seansından sonra HRV azalırsa, bu durum sporcunun artan stres ve yorgunluk yaşadığını ve antrenman yükünün azaltılması gerekebileceğini gösterebilir. Tersine, bir antrenman seansından sonra HRV artarsa, bu toparlanmanın iyi düzeyde olduğunu ve daha fazla antrenman yüküyle başa çıkma yeteneğinin arttığını gösterebilir.

HRV, atletik popülasyonlarda yorgunluk/toparlanma monitörizasyonu için kısa sürelerde (1-5 dakika) ve ultra-kısa sürelerde (60 sn.) değerlendirilebilir.

Sporcu monitörizasyonu için en çok kullanılan HRV parametresi lnRMSSD'dir (Buchheit, 2014). Bunun nedeni, frekans alanı ölçümlerine kıyasla solunum hızından daha az etkilenmesi, doğrusal olmayan ölçümlere kıyasla daha iyi tekrar üretilebilirlik sağlaması ve kısa bir zaman diliminde değerlendirilebilmesidir (Flatt ve Esco, 2016).

Takım sporlarında HRV ölçümlerinin değerlendirmesinde önemli sınırlılıkların bulunduğu unutulmamalıdır (Bosquet ve ark., 2008; Thorpe ve ark., 2016; Thorpe ve ark., 2017). Bireysel sporlarda ise günlük yorgunluk ve toparlanma HRV değerlendirmesinde istirahat RMSSD metriğinin dikkate alınması önerilmektedir (Buchheit, 2014).

HRV ölçümü için vücut pozisyonu seçimi, ölçümün amacına bağlıdır. Örneğin, rahat bir pozisyonda uzanmak veya oturmak genellikle bazal HRV'yi ölçmek için kullanılırken, ayakta durmak ANS'nin postüral değişikliklere tepkisini ölçmek için kullanılır (Kumar ve ark., 2020).

HRV değerlerinin yaş, cinsiyet, fiziksel uygunluk, sağlık durumu ve çevre koşulları gibi bir dizi faktörden etkilenebileceği (Sammuto ve Böckelmann, 2016) göz önünde bulundurulmalıdır.

Yorgunluk takibi için HRV kullanırken ölçüm aracının geçerliliğini ve güvenilirliğini göz önünde bulundurmak ve HRV sonuçlarını açık ve kapsamlı bir şekilde (analiz yöntemi, değerlendirme süresi gibi) raporlamak önemlidir.

Giyilebilir teknolojiler veya mobil bir ölçüm cihazından elde edilen HRV metriklerinin farklı platformlardaki değerler ile karşılaştırmasında önemli kısıtlamalar bulunmaktadır.

Sınırlılıklar

Bu geleneksel derlemenin sınırlılıklarından birisi, bireylerin sağlık durumu, stres düzeyi ve mental yorgunluk gibi klinik ve psikofizyolojik HRV değerlendirmeleri üzerine yapılmış araştırmaların çalışma kapsamına dahil edilmemesidir. Bir diğer sınırlılık ise, çalışmada egzersiz sırasındaki değişiklikler ve akut-kronik antrenman adaptasyonları gibi HRV cevaplarının tartışılmamış olmasıdır. Son olarak, HRV ölçme yöntemlerine ait karşılaştırmalar ve ölçme araçlarının geçerlik ve güvenilirliklerine ait istatistiksel bilgiler (korelasyon, etki büyüklüğü, değişim katsayısı gibi) bu çalışmada belirtilmemiştir.

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Fatigue is most commonly described as an inability to maintain physiologically needed or expected strength/power (Edwards, 1981), a decrease in a muscle's ability to generate force during physical activity (Bogdanis, 2012), a decrease in the nervous system's ability to activate muscles (Kenney et al., 2021) or the loss of physiological and psychological functions at the resting level of the athlete with the increase in training load (Allen, 2009; Jones et al., 2017). An athlete's level of physiological stress, fatigue and recovery is mainly controlled by the Autonomic Nervous System (ANS) (Flatt and Howells, 2019) and resting heart rate (Borresen and Lambert, 2007), exercise heart rate (Buchheit, 2014), recovery is assessed by various heart rate-related parameters such as heart rate (Lamberts et al., 2010) and heart rate variability (Schmitt et al., 2013).

Heart Rate Variability (HRV) was first recognized in 1965 by Hon and Lee (1965), who discovered that fluctuation in heart rate intervals occur before a significant change in heart rate. Advances in computer technology and digital signal processing in the 1980s and 1990s enabled more sophisticated HRV data analysis (Billman, 2011). These advancements have paved the way for the development of new monitoring tools for real-time HRV monitoring, such as wearable devices and mobile applications. In this study, which was prepared with the traditional compilation method, one of the literature review types, HRV measurement and evaluation methods on fatigue monitoring in athletic populations were discussed in detail.

Wearable technologies and mobile applications in HRV measurement

Recent developments in wearable technologies and mobile applications have made it possible to measure HRV in real time and to continuously monitor the fatigue levels of athletes. Many *smartwatches*, such as the Apple Watch, Samsung Galaxy Watch, Garmin, and Fitbit, use Photoplethysmography (PPG) to measure HRV through the detection of pulse waves and provide

information about overall health, fitness, and wellness monitoring. **Biofeedback devices** such as EmWave2, OmegaWave provide real-time feedback on the stress and fatigue level of the organism through light, voice or other feedback mechanisms using the PPG method. **Chest bands**, such as Polar H10, Garmin, Zephyr, Suunto, use Electrocardiogram (ECG) measurement to provide accurate and detailed information about HRV, and with the help of a **wearable device** (such as armband, ring, ear clip) to provide comprehensive analysis and tracking of HRV data. or with smartphone apps (such as HRV4training and Elite HRV). In addition, **mobile applications** that can measure HRV by using different PPG methods (such as PPG finger and PPG face) via a smartphone camera are also frequently used in stress and fatigue monitoring.

Validity and reliability of HRV measurement tools

It should be noted that the accuracy and validity of HRV measurement using wearable devices and mobile applications may be lower than ECG measurement, which is the gold standard for HRV measurement, and further validation studies are required in different populations. It should be noted that different measurement methods (PPG, chest bands or finger oximetries) to be used on the same mobile application may affect HRV results. In addition, the validity and reliability of HRV measurement tools has been validated in specific populations and practices by appropriate statistical methods and comparison with gold standard measures, but it is clear that more research is needed in athletic populations with larger populations of participants.

CONCLUSION

It is stated that some fatigue monitoring tools have disadvantages such as the rate of perceived exertion scale being subjective and manipulable by the athlete, the vertical jump and sprint tests causing loss of motivation and fatigue during maximal performance, the high cost and the long time to get feedback of biochemical markers (Dobbs et al., 2019).

HRV, on the other hand, can be said to be an alternative monitoring tool in the measurement of fatigue and training load management, as it is an easily evaluate physiological fatigue and provides reliable results in a short time. However, its use seems to be limited, especially in athletic populations. Therefore, it is important to remember that HRV is one of the monitoring tools that can be used in sports science to assess physiological responses to training and performance, and should be used in conjunction with other tools for a more comprehensive assessment of athlete health and performance. In addition, sports scientists, coaches and practitioners should be aware of which variable should be taken into account in monitoring fatigue.

Practical implications and recommendations

- HRV increases after a training session, this may indicate good recovery and increased ability to cope with greater training load.

- HRV can be evaluated for short periods (1-5 minutes) and ultra-short durations (60 seconds) for fatigue/recovery monitoring in athletic populations.
- The most used HRV parameter for athlete monitoring is lnRMSSD (Buchheit, 2014). This provides a better reproducibility compared to nonlinear measurements, and can be evaluated in a short time frame (Flatt and Esco, 2016).
- There are important limitations in the evaluation of HRV measurements in team sports (Bosquet et al., 2008; Thorpe et al., 2017; Thorpe et al., 2016). In individual sports, it is recommended to consider the resting RMSSD metric in the evaluation of daily fatigue and recovery HRV (Buchheit, 2014).
- Lying or sitting in a comfortable position is usually used to measure baseline HRV, while standing is used to measure the response of the ANS to postural changes (Kumar et al., 2020).
- HRV values can be affected by a number of factors such as age, gender, physical fitness, health status and environmental conditions (Sammito & Böckelmann, 2016).
- When using HRV for fatigue monitoring, it is important to consider the validity and reliability of the measurement tool and to report HRV results clearly and comprehensively (such as analysis method, evaluation time).
- There are significant limitations in comparing HRV metrics obtained from wearable technologies or a mobile measuring device with values on different platforms.

KAYNAKLAR

- Allen, D. G. (2009). Fatigue in working muscles. *Journal of Applied Physiology*, 106(2), 358-359.
- Altini, M., Van Hoof, C., & Amft, O. (2017, February). Relation between estimated cardiorespiratory fitness and running performance in free-living: an analysis of HRV4Training data. In *2017 IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI)* (pp. 249-252). IEEE.
- Anunciacao, P.G., Polito, M.D., & Casonatto, J. (2011). Blood pressure responses and heart rate variability after resistance exercise with different intensities and same workload. *International SportMed Journal*, 12(2), 53-67.
- Bellenger, C.R., Miller, D.J., Halson, S.L., Roach, G.D. & Sargent, C. (2021). Wrist-based photoplethysmography assessment of heart rate and heart rate variability: Validation of WHOOP. *Sensors*, 21(10), 3571.
- Billman, G.E. (2011). Heart rate variability—a historical perspective. *Frontiers in Physiology*, (2), 86.
- Blásquez, J.C.C., Font, G.R. & Ortís, L.C. (2009). Heart-rate variability and precompetitive anxiety in swimmers. *Psicothema*, 531-536.
- Bogdanis, G.C. (2012). Effects of physical activity and inactivity on muscle fatigue. *Frontiers in Physiology*, (142).
- Borresen, J., & Lambert, M.I. (2007). Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. *European Journal of Applied Physiology*, (101), 503-511.
- Borresen, J., & Lambert, M.I. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise: measurements and implications for monitoring training status. *Sports Medicine*, (38), 633-646.

- Bosquet, L., Merkari, S., Arvisais, D., & Aubert, A.E. (2008). Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. *British Journal of Sports Medicine*, 42(9), 709-714.
- Bricout, V.A., DeChenaud, S., & Favre-Juvin, A. (2010). Analyses of heart rate variability in young soccer players: the effects of sport activity. *Autonomic Neuroscience*, 154(1-2), 112-116.
- Buchheit, M. (2014). Monitoring training status with HR measures: do all roads lead to Rome? *Frontiers in Physiology*, 5, 73.
- Camm, A.J., Malik, M., Bigger, J.T., Breithardt, G., Cerutti, S., Cohen, R. J., . . . et al. (1996). Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*, 93(5), 1043-1065.
- Cao, R., Azimi, I., Sarhaddi, F., Niela-Vilen, H., Axelin, A., Liljeberg, P., . . . et al. (2022). Accuracy assessment of oura ring nocturnal heart rate and heart rate variability in comparison with electrocardiography in time and frequency domains: comprehensive analysis. *Journal of Medical Internet Research*, 24(1), e27487.
- Chan, P.H., Wong, C.K., Poh, Y.C., Pun, L., Leung, W.W.C., Wong, Y.F., . . . et al. (2016). Diagnostic performance of a smartphone-based photoplethysmographic application for atrial fibrillation screening in a primary care setting. *Journal of the American Heart Association*, 5(7), e003428.
- Coutts, A.J., Slaterry, K.M. & Wallace, L.K. (2007). Practical tests for monitoring performance, fatigue and recovery in triathletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10(6), 372-381.
- Cowan, M.J. (1995). Measurement of heart rate variability. *Western Journal of Nursing Research*, 17(1), 32-48.
- Dobbs, W.C., Fedewa, M.V., MacDonald, H.V., Holmes, C.J., Cicone, Z.S., Plews, D.J., . . . et al. (2019). The Accuracy of Acquiring Heart Rate Variability from Portable Devices: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(3), 417-435.
- Edwards, R.H. (1981). Human muscle function and fatigue. *Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms*, (82), 1-18.
- Esco, M.R., & Flatt, A.A. (2014). Ultra-short-term heart rate variability indexes at rest and post-exercise in athletes: evaluating the agreement with accepted recommendations. *Journal of Sports Science ve Medicine*, 13(3), 535.
- Esco, M.R., Flatt, A.A. & Nakamura, F.Y. (2017). Agreement between a smartphone pulse sensor application and electrocardiography for determining lnRMSSD [Article]. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(2), 380-385.
- Figueiredo, T., Menezes, P., Kattenbraker, M., Polito, M., Reis, V., & Simão, R. (2013). Influence of exercise order on blood pressure and heart rate variability after a strength training session. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 53(3), 12-17.
- Fitzpatrick, J.F., Hicks, K.M., Russell, M., & Hayes, P.R. (2021). The reliability of potential fatigue-monitoring measures in elite youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(12), 3448-3452.
- Flatt, A.A., & Esco, M. R. (2013). Validity of the ithlete™ smart phone application for determining ultra-short-term heart rate variability. *Journal of Human Kinetics*, (39), 85-92.
- Flatt, A. A. and Esco, M. R. (2016). Heart rate variability stabilization in athletes: Towards more convenient data acquisition. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 36(5), 331-336.

- Flatt, A.A., Hornikel, B., & Esco, M. R. (2017). Heart rate variability and psychometric responses to overload and tapering in collegiate sprint-swimmers. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(6), 606-610.
- Flatt, A.A., & Howells, D. (2019). Effects of varying training load on heart rate variability and running performance among an Olympic rugby sevens team. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 22(2), 222-226.
- Fronchetti, L., Nakamura, F.Y., De-Oliveira, F.R., Lima-Silva, A.E., & De Lima, J. R. (2007). Effects of high-intensity interval training on heart rate variability during exercise. *Journal of Exercise Physiology Online*, 10(4).
- Furlan, R., Pagani, M., & Malliani, A. (1993). Effects of exercise and training on control of heart rate. *Cardiovascular Research*, 27(12), 2286-2287.
- Gabriel, H.H., Urhausen, A., Valet, G., Heidelbach, U., & Kindermann, W. (1998). Overtraining and immune system: A prospective longitudinal study in endurance athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, (30), 1151-1157.
- Georgiou, K., Larentzakis, A.V., Khamis, N.N., Alsuhaibani, G.I., Alaska, Y.A., & Giallafos, E.J. (2018). Can wearable devices accurately measure heart rate variability? A systematic review. *Folia Medica*, 60(1), 7-20.
- Halson, S.L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44(Suppl 2), 139-147.
- Halson, S.L., & Jeukendrup, A.E. (2004). Does overtraining exist? An analysis of overreaching and overtraining research. *Sports Medicine*, (34), 967-981.
- Hedelin, R., Kenttä, G., Wiklund, U., Bjerle, P., & Henriksson-Larsén, K. (2000). Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(8), 1480-1484.
- Henriques, T., Ribeiro, M., Teixeira, A., Castro, L., Antunes, L., & Costa-Santos, C. (2020). Nonlinear methods most applied to heart-rate time series: A review. *Entropy*, 22(3), 309.
- Hon, E. (1965). Electronic evaluations of the fetal heart rate patterns preceding fetal death: further observations. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, (87), 814-826.
- Hynynen, E., Uusitalo, A., Kontinen, N., & Rusko, H. (2008). Cardiac autonomic responses to standing up and cognitive task in overtrained athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 29(07), 552-558.
- Iellamo, F., Legramante, J.M., Pigozzi, F., Spataro, A., Norbiato, G., Lucini, D., & Pagani, M. (2002). Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation*, 105(23), 2719-2724.
- Ishaque, S., Khan, N., & Krishnan, S. (2021). Trends in heart-rate variability signal analysis. *Frontiers in Digital Health*, (3), 639444.
- Javorka, M., Zila, I., Balharek, T., & Javorka, K. (2002). Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, (35), 991-1000.
- Jones, C.M., Griffiths, P.C., & Mellalieu, S.D. (2017). Training load and fatigue marker associations with injury and illness: a systematic review of longitudinal studies. *Sports Medicine*, (47), 943-974.

- Kaikkonen, P., Rusko, H., & Martinmäki, K. (2008). Post-exercise heart rate variability of endurance athletes after different high-intensity exercise interventions. *Scandinavian Journal of Medicine ve Science in Sports*, 18(4), 511-519.
- Kellmann, M. (2010). Preventing overtraining in athletes in high-intensity sports and stress/recovery monitoring. *Scandinavian Journal of Medicine ve Science in Sports*, (20), 95-102.
- Kenney, W.L., Wilmore, J.H., & Costill, D.L. (2021). *Physiology of sport and exercise*. Human kinetics.
- Kumar, P., Das, A.K., & Halder, S. (2020). Time-domain HRV analysis of ECG signal under different body postures. *Procedia Computer Science*, (167), 1705-1710.
- Kumar, P., Das, A.K., & Halder, S. (2022). Statistical heart rate variability analysis under rest and post-exercise. *International Journal of Computational Science and Engineering*, 25(2), 186-197.
- Lacey, J.I. (1956). The evaluation of autonomic responses: Toward a general solution. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 67(5), 125-163.
- Lai, E., Boyd, K., Albert, D., Ciocca, M., & Chung, E. H. (2017). Heart rate variability in concussed athletes: A case report using the smartphone electrocardiogram. *HeartRhythm case reports*, 3(11), 523-526.
- Lamberts, R., Swart, J., Capostagno, B., Noakes, T., & Lambert, M. (2010). Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(3), 449-457.
- Li, K., Rüdiger, H., & Ziemssen, T. (2019). Spectral analysis of heart rate variability: Time window matters. *Frontiers in Neurology*, (10), 545.
- Lourenço, J., Gouveia, É.R., Sarmiento, H., Ihle, A., Ribeiro, T., Henriques, R., ... et al. (2023). Relationship between Objective and Subjective Fatigue Monitoring Tests in Professional Soccer. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1539.
- Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: task force of the European Society of Cardiology and the North American Society for pacing and electrophysiology. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 1(2), 151-181.
- Martinmäki, K., & Rusko, H. (2008). Time-frequency analysis of heart rate variability during immediate recovery from low and high intensity exercise. *European Journal of Applied Physiology*, (102), 353-360.
- McCorry, L.K. (2007). Physiology of the autonomic nervous system. *American Journal of Pharmaceutical Education*, 71(4).
- McGuigan, M. (2017). *Monitoring training and performance in athletes*. Human Kinetics.
- McKenna, M.J., & Hargreaves, M. (2008). Resolving fatigue mechanisms determining exercise performance: integrative physiology at its finest! In (Vol. 104, pp. 286-287): American Physiological Society.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., ... et al. (2013). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science (ECSS) and the American College of Sports Medicine (ACSM). *European Journal of Sport Science*, 13(1), 1-24.
- Meeusen, R., Duclos, M., Gleeson, M., Rietjens, G., Steinacker, J., & Urhausen, A. (2006). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome. *European Journal of Sport Science*, 6(1), 1-14.

- Michael, S., Graham, K.S., & Davis, G. M. (2017). Cardiac autonomic responses during exercise and post-exercise recovery using heart rate variability and systolic time intervals—a review. *Frontiers in Physiology*, (8), 301.
- Morales, J., Álamo, J.M., García-Massó, X., López, J.L., Serra-Añó, P., & González, L.M. (2014). Use of heart rate variability in monitoring stress and recovery in judo athletes. *The Journal of Strength ve Conditioning Research*, 28(7), 1896-1905.
- Mourot, L., Bouhaddi, M., Perrey, S., Cappelle, S., Henriot, M.T., Wolf, J.P., ... et al. (2004). Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincare plot analysis. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 24(1), 10-18.
- Moya-Ramon, M., Mateo-March, M., Peña-González, I., Zabala, M., & Javaloyes, A. (2022). Validity and reliability of different smartphones applications to measure HRV during short and ultra-short measurements in elite athletes. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, (217), 106696.
- Nikhil, S., Kegan, J. M., Christle, J. W., Hadley, D., Plews, D., & Froelicher, V. (2018). Heart rate variability: An old metric with new meaning in the era of using MHealth technologies for health and Exercise training guidance. Part one: Physiology and methods. *Arrhythmia ve Electrophysiology Review*, 7(4), 193-198.
- Pereira, R.d.A., Alves, J.L.d.B., Silva, J.H.d.C., Costa, M.d.S., & Silva, A.S. (2020). Validity of a smartphone application and chest strap for recording RR intervals at rest in Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(6), 896-899.
- Perrotta, A.S., Jeklin, A.T., Hives, B.A., Meanwell, L.E., & Warburton, D. E. (2017). Validity of the elite HRV smartphone application for examining heart rate variability in a field-based setting. *The Journal of Strength ve Conditioning Research*, 31(8), 2296-2302.
- Plews, D.J., Laursen, P.B., Stanley, J., Kilding, A.E., & Buchheit, M. (2013). Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Medicine*, (43), 773-781.
- Plews, D.J., Scott, B., Altini, M., Wood, M., Kilding, A.E., & Laursen, P.B. (2017). Comparison of Heart-Rate-Variability Recording With Smartphone Photoplethysmography, Polar H7 Chest Strap, and Electrocardiography. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(10), 1324-1328.
- Quintana, D., Alvares, G.A., & Heathers, J. (2016). Guidelines for Reporting Articles on Psychiatry and Heart rate variability (GRAPH): recommendations to advance research communication. *Translational Psychiatry*, 6(5), e803-e803.
- Rabbani, A., Baseri, M.K., Reisi, J., Clemente, F.M., & Kargarfard, M. (2018). Monitoring collegiate soccer players during a congested match schedule: Heart rate variability versus subjective wellness measures. *Physiology and Behavior*, (194), 527-531.
- Rajalakshmi, R., Akila, B. & Tharion, E. (2015). Intra-class correlation among heart rate variability analysis softwares across different physiological postures. *Indian Journal of Physiology and Pharmacology*, 59(1), 2-8.
- Ramasamy, S., & Balan, A. (2018). Wearable sensors for ECG measurement: a review. *Sensor Review*, 38(4), 412-419.

- Rezk, C.C., Marrache, R.C., Tinucci, T., Mion, D., & Forjaz, C.L.M. (2006). Post-resistance exercise hypotension, hemodynamics, and heart rate variability: influence of exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*, (98), 105-112.
- Rouast, P.V., Adam, M.T., Cornforth, D.J., Lux, E., & Weinhardt, C. (2017). *Using contactless heart rate measurements for real-time assessment of affective states*. Information Systems and Neuroscience: Gmunden Retreat on NeuroIS 2016,
- Sammito, S., & Böckelmann, I. (2016). Factors influencing heart rate variability. *International Cardiovascular Forum Journal*, (6), 18-22.
- Sammito, S., Thielmann, B., Seibt, R., Klussmann, A., Weippert, M., & Böckelmann, I. (2015). Guideline for the application of heart rate and heart rate variability in occupational medicine and occupational science. *ASU International*, 2015(06), 1-29.
- Schaafsma, A. E. (2015). *Heart rate variability and wellness monitoring in collegiate athletes* [University of Illinois at Urbana-Champaign].
- Schmitt, L., Regnard, J., Desmarests, M., Mauny, F., Mourot, L., Fouillot, J.P., ... et al. (2013). Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes. *PLoS one*, 8(8), e71588.
- Schneider, C., Wiewelhoe, T., Raeder, C., Flatt, A.A., Hoos, O., Hottenrott, L., ... et al. (2019). Heart rate variability monitoring during strength and high-intensity interval training overload microcycles. *Frontiers in Physiology*, (10), 582.
- Schuermans, A.A., de Loeff, P., Nijhof, K.S., Rosada, C., Scholte, R.H., Popma, A., ... et al. (2020). Validity of the Empatica E4 wristband to measure heart rate variability (HRV) parameters: A comparison to electrocardiography (ECG). *Journal of Medical Systems*, (44), 1-11.
- Stangl, F.J., & Riedl, R. (2022). Measurement of heart rate and heart rate variability with wearable devices: A systematic review.
- Stauss, H.M. (2003). Heart rate variability. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 285(5), R927-R931.
- Tarvainen, M.P., Niskanen, J.P., Lipponen, J.A., Ranta-Aho, P.O., & Karjalainen, P.A. (2014). Kubios HRV—heart rate variability analysis software. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 113(1), 210-220.
- Terziotti, P., Schena, F., Gulli, G., & Cevese, A. (2001). Post-exercise recovery of autonomic cardiovascular control: A study by spectrum and cross-spectrum analysis in humans. *European Journal of Applied Physiology*, (84), 187-194.
- Thorpe, R.T., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2017). Monitoring fatigue status in elite team-sport athletes: implications for practice. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(s2), S2-27-S22-34.
- Thorpe, R.T., Strudwick, A.J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2016). Tracking morning fatigue status across in-season training weeks in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(7), 947-952.
- Urhausen, A., Gabriel, H., & Kindermann, W. (1995). Blood hormones as markers of training stress and overtraining. *Sports Medicine*, (20), 251-276.
- Uusitalo, A., Uusitalo, A., & Rusko, H. (2000). Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *International Journal of Sports Medicine*, 21(01), 45-53.

Yan, B.P., Lai, W.H., Chan, C.K., Chan, S.C.H., Chan, L.H., Lam, K.M., ... et al. (2018). Contact-free screening of atrial fibrillation by a smartphone using facial pulsatile photoplethysmographic signals. *Journal of the American Heart Association*, 7(8), e008585.

Zajac, A., Chalimoniuk, M., Maszczyk, A., Gołasz, A., & Lngfort, J. (2015). Central and peripheral fatigue during resistance exercise—a critical review. *Journal of Human Kinetics*, (49), 159.

KATKI ORANI CONTRIBUTION RATE	AÇIKLAMA EXPLANATION	KATKIDA BULUNANLAR CONTRIBUTORS
Fikir ve Kavramsal Örgü <i>Idea or Notion</i>	Araştırma hipotezini veya fikrini oluşturmak <i>Form the research hypothesis or idea</i>	Sümer ALVURDU
Tasarım <i>Design</i>	Yöntem ve araştırma desenini tasarlamak <i>To design the method and research design.</i>	Sümer ALVURDU
Literatür Tarama <i>Literature Review</i>	Çalışma için gerekli literatürü taramak <i>Review the literature required for the study</i>	Sümer ALVURDU
Veri Toplama ve İşleme <i>Data Collecting and Processing</i>	Verileri toplamak, düzenlemek ve raporlaştırmak <i>Collecting, organizing and reporting data</i>	Sümer ALVURDU
Tartışma ve Yorum <i>Discussion and Commentary</i>	Elde edilen bulguların değerlendirilmesi <i>Evaluation of the obtained finding</i>	Sümer ALVURDU
Destek ve Teşekkür Beyanı/ Statement of Support and Acknowledgment		
Bu çalışmanın yazım sürecinde herhangi bir şekilde katkı ve/veya destek alınmamıştır. <i>No contribution and/or support was received during the writing process of this study.</i>		
Çatışma Beyanı/ Statement of Conflict		
Araştırmacıların araştırma ile ilgili diğer kişi ve kurumlarla herhangi bir kişisel ve finansal çıkar çatışması yoktur. <i>Researchers do not have any personal or financial conflicts of interest with other people and institutions related to the research.</i>		
Etik Kurul Beyanı/ Statement of Ethics Committee		
Bu araştırma nitel yöntemle (geleneksel derleme) yapıldığı için Etik Kurul gereksinimi bulunmamaktadır. <i>Since this research was conducted with a qualitative method (traditional review), there is no need for an Ethics Committee.</i>		



Bu eser [Creative Commons Atıf-Gayri Ticari 4.0 Uluslararası Lisansı \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) ile lisanslanmıştır.