BURSA
6. Uluslararası Sağlık ve Spor Bilimleri Kongresi

30 Aralık 2025
Bursa



45%

doi

ACADEMIA

SEMANTIC SCHOLAR

zenodo

OpenAIRE

StrikePlagiarism.com
ORIGINALITY IS A VALUE

ACADEMY GLOBAL CONFERENCES & JOURNALS

www.bursakongresi.org

ISBN NR: 978-625-5694-68-3

YORGUNLUK MONİTÖRİZASYONUNDA YENİ BİR DEĞERLENDİRME ARACI: PUPİLLOMETRİ

Doç. Dr. Sümer ALVURDU
Spor Bilimleri Fakültesi, Gazi Üniversitesi, sumeralvurdu@gazi.edu.tr, 0000-0002-3439-973X
İbrahim TAŞTAN
Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, 23853901801@gazi.edu.tr, 0009-0002-7076-4623
Pelinsu Ece CİVELEK
Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, pece.civelek@gazi.edu.tr, 0009-0003-4733-7372
Doç. Dr. Elif CENGİZEL
Spor Bilimleri Fakültesi, Gazi Üniversitesi, elifoz@gazi.edu.tr, 0000-0001-5148-3821

Özet

Sporcularda yorgunluğun erken ve objektif olarak belirlenmesi, performansın optimize edilmesi ve yaralanma riskinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Günümüzde kullanılan subjektif yorgunluk skalaları ve monitörizasyon araçları değerli bilgiler sunsa da otonom sinir sistemi tepkilerini doğrudan yansıtmada sınırlı kalabilmektedir. Pupillometri, pupilla ışık refleksi (PLR) üzerinden sempatik ve parasempatik sinir sistemi aktivitesini değerlendirmeye olanak tanıyan, hızlı ve non-invaziv bir yöntem olarak son yıllarda araştırmacılar tarafından kullanılan yenilikçi bir araçtır. Standart ışık uyaranı ile gerçekleştirilen PLR ölçümleri, pupilla daralma latansı, daralma hızı, maksimum–minimum pupilla çapı ve toparlanma süresi gibi temel parametreleri kısa sürede niceliksel olarak değerlendirme olanağı sunmaktadır. Altın standart ölçme araçlarına alternatif olarak el tipi (NeuroOptics PLR-3000 / PLR-200) veya mobil tabanlı (MindMirror, ReflexPro) teknolojiler sayesinde saha koşullarında da hızlı veri toplama imkânı sağlamaktadır. Özellikle elit takım sporcularında gerçekleştirilen çalışmalar, yoğun müsabakaya veya antrenman dönemleri sonrasında pupilla daralma hızındaki azalma ve pupilla daralma latans süresindeki uzamanın artan nörofizyolojik yorgunluğun hassas göstergeleri olabileceğini rapor etmiştir. Ayrıca PLR metrikleri ile diğer fizyolojik/psikometrik göstergeler arasında anlamlı korelasyonlar saptanmış; bu da pupillometrinin diğer yorgunluk değişkenleri ile paralel değişimler sergilediğini göstermektedir. Bu bulgular, egzersiz kaynaklı sempatik aktivite artışı ile parasempatik yanıt baskılanmasını yansıtmakta olup, merkezi ve otonom yorgunluk süreçlerinin PLR parametreleri ile hassas biçimde takip edilebileceğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla nörofizyolojik yorgunluğu yansıtabilme potansiyeline sahip olan pupillometri, diğer yüklenme ve toparlanma göstergeleriyle birlikte kullanıldığında çok boyutlu bir yorgunluk takibi imkânı sunma potansiyeli göstermektedir. Sonuç olarak, farklı branşlar ve uzunlamasına tasarımlarla yürütülecek gelecekteki çalışmaların bu ölçme aracının sporcu monitörizasyonu ve yaralanmaların önlenmesindeki önemini daha net ortaya koyacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Nörofizyoloji, Otonom sinir sistemi, Pupila ışık refleksi, Yorgunluk monitörizasyonu

A NEW ASSESSMENT TOOL IN FATIGUE MONITORING: PUPILLOMETRY

ISBN NR: 978-625-5694-68-3

Abstract

Early and objective monitoring of fatigue in athletes is critically important for optimizing performance and reducing the risk of injury. Although commonly used subjective fatigue scales and monitoring tools provide valuable information, they may be limited in directly reflecting autonomic nervous system responses. Pupillometry, which allows the evaluation of sympathetic and parasympathetic nervous system activity through the pupillary light reflex (PLR), has emerged in recent years as an innovative, fast and non-invasive method used by researchers. PLR measurements performed with a standard light stimulus offer the opportunity to quantitatively assess key parameters such as constriction latency, constriction velocity, maximum–minimum pupil diameter, and recovery time within a short period. Through handheld devices (NeuroOptics PLR-3000 / PLR-200) or mobile-based technologies (MindMirror, ReflexPro), it also enables rapid data collection under field conditions as an alternative to gold-standard assessment tools. Studies conducted particularly on elite team sport athletes have reported that a decrease in pupil constriction velocity and an increase in latency following intense competition or training may be sensitive indicators of increased neurophysiological fatigue. Additionally, significant correlations have been found between PLR metrics and other physiological/psychometric indicators, demonstrating that pupillometry changes in parallel with other fatigue-related variables. These findings reflect increased exercise-induced sympathetic activity and suppression of parasympathetic response, showing that central and autonomic fatigue processes can be monitored sensitively through PLR parameters. Therefore, pupillometry, with its potential to reflect neurophysiological fatigue, may provide multidimensional fatigue monitoring when used in conjunction with other load and recovery indicators. In conclusion, future studies with different sports branches and longitudinal designs are expected to further clarify the importance of this measurement tool in athlete monitoring and injury prevention.

Keywords: Neurophysiology, Autonomic nervous system, Pupillary light reflex, Fatigue monitoring

1. Giriş

Yorgunluk, performans kapasitesinde azalma ile ifade edilebilen ve aynı zamanda çok boyutlu bir olgu olarak tanımlanabilen bir kavramdır (Enoka & Duchateau, 2016). Yorgunlukla ilgili yapılan çalışmalarda, yorgunluğun yalnızca kas içi metabolik değişimlerden değil; aynı zamanda merkezi sinir sistemi, algısal-bilişsel süreçler ve psikolojik faktörlerden de kaynaklandığı vurgulanmaktadır (Meeusen et al., 2013). Özellikle merkezi yorgunluğun motor komut üretimi, dikkat ve karar verme süreçleri üzerindeki etkisi yadsınamaz bir gerçektir (Taylor et al., 2006). Bu nedenle, merkezi sinir sistemi kaynaklı yorgunluğun doğrudan değerlendirilmesine olanak tanıyacak hassas belirteçlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Performans gelişimi, yüklenme–toparlanma döngüsünün doğru biçimde yönetilmesiyle mümkün olmaktadır. Yetersiz yüklenmenin adaptasyonun oluşmamasına, aşırı ya da kötü planlanmış yüklenmenin ise yorgunluk gelişimine, performans düşüşüne ve sakatlık/yaralanma riskinin artmasına yol açtığı bildirilmektedir (Gabbett, 2016; Meeusen et al., 2013). Bu bağlamda sporcu monitorizasyonundaki temel soru, sporcunun maruz kaldığı dış yükün organizmada nasıl bir iç yük ve yorgunluk yanıtı oluşturduğunun güvenilir biçimde nasıl izlenebileceği olacaktır (Bourdon et al., 2017).

ISBN NR: 978-625-5694-68-3

Yorgunluk monitorizasyonunda kalp atım hızı değişkenliği (HRV), algılanan zorluk derecesi (RPE) ve biyokimyasal göstergeler bu amaçla yaygın olarak kullanılmaktadır (Impellizzeri et al., 2019). Pupillometri ise merkezi sinir sistemi temelli yorgunluğu yansıtan tamamlayıcı bir yöntem olarak literatürde yer almaktadır (Laeng et al., 2012). Pupillometri, göz bebeği (pupilla) çapının ışık, bilişsel görev, stres veya fiziksel yüklenme gibi farklı uyaranlara verdiği dinamik yanıtların zamansal olarak ölçülmesini sağlayan nicel ve non-invaziv bir yöntemdir (Laeng et al., 2012; Sirois & Brisson, 2014). Bu yöntem, Hess ve Polt (1960, 1964) ile Kahneman ve Beatty (1966) tarafından gerçekleştirilen öncü çalışmalardan bu yana pupil yanıtlarının kaydedilmesinde kullanılmaktadır (Laeng et al., 2012). Pupillometri, nöroloji ve oftalmoloji alanlarında özellikle travmatik beyin hasarı, anestezi derinliği ve nörolojik reflekslerin değerlendirilmesinde uzun süredir klinik bir araç olarak kullanılmaktadır.

Pupilla yanıtlarının locus coeruleus–noradrenerjik sistem aktivitesiyle yakından ilişkili olduğu ve bu sistemin dikkat, uyanıklık düzeyi ve zihinsel eforun düzenlenmesinde belirleyici rol oynadığı gösterilmiştir (Joshi et al., 2016). Pupilla hareketleri otonom sinir sistemi tarafından düzenlenmekte olup, pupillometrik yanıtlar merkezi sinir sistemi aktivitelerinin güvenilir bir fizyolojik yansıması olarak kabul edilmektedir (Beatty, 1982; Mathôt, 2018). Bu bağlamda sempatik sinir sistemi aktivasyonu pupilla dilatasyonuna, parasempatik sinir sistemi aktivasyonu ise pupilla konstriksiyonuna yol açmaktadır (McDougal & Gamlin, 2015; Mathôt, 2018).

Artan bilişsel yük ve akut zihinsel efor durumlarında pupilla dilatasyonunun arttığı; buna karşın uzamış görevler, yoğun fiziksel yüklenmeler veya yetersiz toparlanma sonrasında pupillometrik yanıtların zayıfladığı ve yanıt latans sürelerinin uzadığı rapor edilmiştir (Beatty, 1982; Hopstaken et al., 2015). Pupillada gözlenen bu değişimler, merkezi sinir sistemi kaynaklı yorgunluğun dolaylı göstergeleri olarak yorumlanmakta ve dikkat, bilişsel yük, zihinsel efor, stres ve yorgunluk gibi fizyolojik ve psikolojik durumlarla ilişkilendirilmektedir (Mathôt, 2018).

Spor bilimleri literatüründe pupillometri, yorgunluk monitorizasyonunda henüz yaygın olarak kullanılan bir yöntem değildir. Ancak sınırlı literatüre rağmen yapılan güncel çalışmalarda, yoğun ve tekrarlayıcı fiziksel yüklenmeler sonrasında pupillometrik değişkenlerin anlamlı biçimde değiştiği ve bu değişimlerin biyolojik, fizyolojik ve algısal yorgunluk belirteçleriyle ilişkili olduğu gösterilmiştir (Dai et al., 2024; Huyghe et al., 2024). Bu bulgular, pupillometrinin yalnızca zihinsel değil, performansı düzenleyen merkezi süreçler aracılığıyla fiziksel yorgunluğun izlenmesinde de potansiyel bir araç olabileceğini düşündürmektedir.

Bu bağlamda pupillometri, sporcu yorgunluğunun objektif, hızlı ve non-invaziv biçimde izlenmesine olanak tanıyan yenilikçi bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte yöntemin güvenilir ve geçerli biçimde uygulanabilmesi için ölçüm protokollerinin standardizasyonu, çevresel faktörlerin kontrolü ve pupillometrik verilerin diğer yorgunluk göstergeleriyle birlikte yorumlanması gerektiği savunulmaktadır.

2. Pupil Ölçme Yöntemleri

2.1. Ölçüm Cihazları ve Çalışma Prensipleri

Pupillometrik ölçümler, temel olarak kızılötesi ışık kaynakları ve yüksek hassasiyetli kameralar aracılığıyla gerçekleştirilir. Günümüzde spor bilimlerinde kullanılan başlıca sistemler şunlardır:

ISBN NR: 978-625-5694-68-3

NeurOptics PLR-200 / PLR-3000: NeurOptics PLR-200/PLR-3000 gold standart pupillometrik ölçüm cihazıdır ve ışığa pupil refleksini (Pupillary Light Reflex, PLR) otomatik olarak değerlendirir (Jehu et al., 2025). Maksimum ve minimum pupil çapı, latans süresi, konstriksiyon ve redilatasyon hızları gibi parametreleri kısa sürede sunar. En önemli avantajı, hızlı ve operatör bağımsız ölçüm sağlamasıdır. Dezavantajı ise daha çok refleks temelli ölçümlerle sınırlı olmasıdır.

MindMirror: Sporcular için özel olarak geliştirilen bu taşınabilir sistem, bilişsel yük ve yorgunluk analizine odaklanmaktadır. Antrenman veya maç sonrası saha koşullarında kullanım için uygundur. Avantajı, sporcu izleme yazılımlarıyla entegrasyonudur; dezavantajı ise sınırlı literatür desteğidir.

ReflexPro: Elde taşınabilir bir pupillometri cihazı olup dinamik pupil yanıtlarını ölçer. Mobil kullanım avantajı sağlarken, çevresel ışık koşullarına duyarlılığı dikkat edilmesi gereken bir noktadır (Dutta et al., 2025).

Pupil Labs Core / Invisible: Açık kaynaklı eye-tracking ve pupillometri sistemleridir. Araştırma projelerinde yüksek esneklik ve çoklu parametre analizi sunar. Ancak veri işleme süreçleri uzmanlık gerektirir.

2.2. Değerlendirilen Pupillometrik Parametreler

Bu çalışmada ele alınan ve slaytta vurgulanan altı temel pupillometrik parametre aşağıda açıklanmaktadır:

1. **Dinlenik Pupilla Çapı (Baseline Pupil Diameter):** Dinlenme durumunda ölçülen pupil çapıdır. OSS tonusunun genel bir göstergesi olarak kabul edilir. Uzun süreli yorgunluk durumlarında azalma veya düzensizlik gösterebilir.
2. **Maksimum Pupilla Çapı (Maximum Pupil Diameter):** Işık uyarısı veya görev sırasında ulaşılan en geniş pupil çapıdır. Sempatik aktivasyon ve bilişsel efor artışı ile ilişkilidir.
3. **Minimum Pupilla Çapı (Minimum Pupil Diameter):** Işık refleksi sonrası ulaşılan en küçük çapı ifade eder. Parasempatik yanıtın gücünü yansıtır.
4. **Pupilla Hızı (Dilatasyon / Konstriksiyon Hızı):** Pupillanın genişleme ve daralma hızıdır. Yorgunluk durumlarında bu hızlarda belirgin düşüşler rapor edilmiştir.
5. **Tepki Süresi (Latency):** Işık uyarısından sonra pupillanın yanıt vermeye başladığı süreyi ifade eder. Merkezi sinir sistemi inhibisyonu ve yorgunlukla birlikte uzama eğilimi gösterir.
6. **Pupilla Amplitüdü (Pupil Amplitude):** Maksimum ve minimum pupil çapı arasındaki farktır. Azalmış amplitüd, yorgunluk ve azalmış nörolojik yanıt kapasitesi ile ilişkilendirilir.

Bu parametreler tek başına değil; HRV, RPE ve performans testleri gibi diğer yorgunluk göstergeleriyle birlikte yorumlanmalıdır.

3. Literatürde Yapılan Çalışmalar ve Bulguları

Güncel literatür incelendiğinde pupillometrinin yorgunluk izleminde kullanımına yönelik çalışmaların sayısının hızla arttığı görülmektedir. Huyghe ve arkadaşları (2024), profesyonel EuroCup kadın basketbol takımında gerçekleştirdikleri pilot çalışmada, maç sonrası yorgunluk durumunda dinlenik pupil çapında azalma, latans süresinde uzama ve konstriksiyon hızında düşüş saptamışlardır. Bu değişkenlerin, biyolojik ve bilişsel yorgunluk belirteçleriyle anlamlı ilişkiler gösterdiği rapor edilmiştir.

ISBN NR: 978-625-5694-68-3

Dai ve arkadaşları (2024), dinamik aerobik antrenman yoğunluğunu değerlendirdikleri çalışmada, artan egzersiz şiddetiyle birlikte pupillometrik yanıtların sistematik olarak değiştiğini ve bazı parametrelerin egzersiz yoğunluğunu yansıtabildiğini göstermiştir. Bulgular, pupillometrinin yalnızca bilişsel değil, fizyolojik yüklenmelere de duyarlı olabileceğini ortaya koymaktadır.

Bilişsel yorgunluk alanındaki çalışmalar ise uzun süreli dikkat ve karar verme görevlerinde başlangıçta pupil dilatasyonunun arttığını, ancak görev süresi uzadıkça bu yanıtın azaldığını ve değişkenliğin arttığını bildirmektedir. Bu durum, zihinsel kaynakların tükenmesi ve merkezi sinir sistemi regülasyon kapasitesinin azalması ile ilişkilendirilmektedir (Beatty, 1982; van der Linden et al., 2003; Hopstaken et al., 2015).

4. Genel Sonuç ve Değerlendirme

Pupillometri, sporcu yorgunluğunun izlenmesinde merkezi sinir sistemi temelli süreçleri yansıtan, objektif, hızlı ve non-invaziv bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Mevcut bulgular, özellikle oyun ve antrenman sonrası yorgunluk durumlarının ayırt edilmesinde pupillometrik parametrelerin anlamlı bilgiler sunduğunu göstermektedir.

Ancak yöntemin tek başına kullanımı sınırlıdır. Çevresel ışık koşulları, sirkadiyen ritim, kafein alımı ve psikolojik stres gibi faktörler ölçümleri etkileyebilmektedir. Bu nedenle pupillometri, iç ve dış yük göstergeleriyle entegre edilmiş çok boyutlu bir yorgunluk monitörizasyon sistemi içerisinde değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, pupillometri spor bilimlerinde yorgunluk yönetimine yönelik yeni bir pencere açmakta; performansın doğru yönetimi için erken ve hassas geri bildirim potansiyeli sunmaktadır. Gelecek çalışmaların daha geniş örneklemler, uzunlamasına tasarımlar ve farklı spor branşları üzerinde yoğunlaşması, yöntemin uygulamadaki yerini daha net ortaya koyacaktır.

Kaynakça

Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. Psychological Bulletin, 91(2), 276–292. https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276

Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., Gabbett, T. J., Coutts, A. J., Burgess, D. J., Gregson, W., & Cable, N. T. (2017). Monitoring Athlete Training Loads: Consensus Statement. International Journal of Sports Physiology and Performance, 12(s2), S2-161-S2-170. Retrieved Dec 30, 2025, from https://doi.org/10.1123/IJSPP.2017-0208

Dai, J., Wang, X., Hang, C., An, L., Shao, R., & Tang, Z. (2024). Evaluating the effectiveness of quantitative pupillometry in assessing dynamic aerobic training intensity. Scientific Reports, 14(1), 26071. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77588-z

Dutta, P., Das, S., & Baishya, R. (2025). Reliability assessment of iPhone-based pupillometry: A test-retest analysis. DOI: 10.25259/TEE_9_2025

Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016). Translating Fatigue to Human Performance. Medicine and science in sports and exercise, 48(11), 2228–2238. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929

Gabbett, T. J. (2016). The training—injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder?. British journal of sports medicine, 50(5), 273-280.

Hess, E. H., & Polt, J. M. (1960). Pupil size as related to interest value of visual stimuli. Science, 132(3423), 349–350. https://doi.org/10.1126/science.132.3423.349

Hess, E. H., & Polt, J. M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. Science, 143(3611), 1190–1192. https://doi.org/10.1126/science.143.3611.1190

Hopstaken, J.F., van der Linden, D., Bakker, A.B. and Kompier, M.A.J. (2015), A multifaceted investigation of the link between mental fatigue and task disengagement. Psychophysiol, 52: 305-315. https://doi.org/10.1111/psyp.12339

Huyghe, T., Calleja-González, J., Bird, S. P., & E. Alcaraz, P. (2024). Pupillometry as a new window to player fatigue? A glimpse inside the eyes of a Euro Cup Women's Basketball team. Biology of Sport, 41(1), 3-15. https://doi.org/10.5114/biolsport.2024.125590

Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., & Coutts, A. J. (n.d.). Internal and External Training Load: 15 Years On. International Journal of Sports Physiology and Performance, 14(2), 270-273. Retrieved Dec 30, 2025, from https://doi.org/10.1123/ijspp.2018-0935

Jehu, D. A., Bolgla, L. A., Armas, S., & Dutton, F. (2025). Assessing the Inter-Rater and Inter-Trial Reliability of the NeurOptics Pupillary Light Response-3000 Pupillometer. International journal of sports physical therapy, 20(2), 157–167. https://doi.org/10.26603/001c.128047

Joshi, S., Li, Y., Kalwani, R. M., & Gold, J. I. (2016). Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex. Neuron, 89(1), 221-234. http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2015.11.028

Kahneman, D., & Beatty, J. (1966). Pupil diameter and load on memory. Science, 154(3756), 1583-1585. DOI:10.1126/science.154.3756.1583

Laeng, B., Sirois, S., & Gredebäck, G. (2012). Pupillometry: A Window to the Preconscious? Perspectives on Psychological Science, 7(1), 18-27. https://doi.org/10.1177/1745691611427305

Mathot, S. (2018) 'Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function', Journal of Cognition, 1(1), p. 16. Available at: https://doi.org/10.5334/joc.18

Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., … Urhausen, A. (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. https://doi.org/10.1080/17461391.2012.730061

McDougal, D. H., & Gamlin, P. D. (2015). Autonomic control of the eye. Comprehensive physiology, 5(1), 439-473. https://doi.org/10.1002/j.2040-4603.2015.tb00603.x

Sirois, S., & Brisson, J. (2014). Pupillometry. Wiley interdisciplinary reviews. Cognitive science, 5(6), 679–692. https://doi.org/10.1002/wcs.1323

Taylor, J. L., Todd, G., & Gandevia, S. C. (2006). Evidence for a supraspinal contribution to human muscle fatigue. Clinical and experimental pharmacology and physiology, 33(4), 400-405. https://doi.org/10.1111/j.1440-1681.2006.04363.x