

# Sporda Bilişsel Performansın Nörogörüntüleme İle Değerlendirilmesi: EEG ve Olay İlişkili Potansiyeller Yaklaşımları

Onur Erdem Korkmaz<sup>1</sup>

## Özet:

Elit spor performansı, yalnızca fiziksel kapasitenin (kuvvet, dayanıklılık, hız) bir sonucu değil, aynı zamanda algısal ve bilişsel süreçlerin etkin yönetimiyle doğrudan ilişkilidir. Karar verme hızı, seçici dikkat, dürtü kontrolü (inhibisyon) ve bilişsel esneklik gibi parametreler, sahadaki başarıyı belirleyen kritik faktörlerdir. Bu kitap bölümü, spor bilimlerinde bilişsel süreçlerin objektif olarak ölçülmesinde kullanılan Elektroensefalografi (EEG) ve Olay İlişkili Potansiyeller (ing. event related potentials, ERP) yöntemlerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Bölümde, EEG sinyallerinin fizyolojik temelleri, uluslararası 10-20 elektrot yerleşim sistemi, frekans bantları ve artefakt yönetimi teknik detaylarıyla açıklanmıştır. Özellikle ERP sinyallerinin elde edilme prosedürleri; marker gönderme, bölütleme, taban hattı düzeltmesi ve Sinyal/Gürültü oranını (SNR) artırmaya yönelik ortalama alma işlemleri adım adım irdelenmiştir. Son olarak, Stroop ve Go/No-Go gibi nöropsikolojik test bataryalarının spor ortamına uyarlanması ve elde edilen ERP bileşenlerinin (P300, N200) sporcu performansı ile ilişkisi literatür ışığında tartışılmıştır.

## 1. GİRİŞ

Geleneksel spor bilimleri yaklaşımı, uzun yıllar boyunca atletik performansı biyomekanik ve fizyolojik parametreler üzerinden değerlendirmiştir. Ancak modern rekabet ortamında, milisaniyelerle ölçülen farklar kazanımı belirlemektedir. Bu durum, araştırmacıları “beyin-davranış” ilişkisini incelemeye ve sporcunun bilişsel işleme kapasitesini (cognitive processing capacity) ölçmeye yöneltmiştir [1-2].

1 Dr., Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Erzurum, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6336-6147, onurerdem.korkmaz@atauni.edu.tr

Nörogörüntüleme teknikleri arasında fMRI (Fonksiyonel Manyetik Rezonans Görüntüleme) yüksek uzaysal çözünürlük sunsa da spor gibi anlık karar vermenin hayati olduğu dinamik süreçleri ölçmek için gereken zamansal çözünürlükten yoksundur [3-4]. Bu noktada Elektroensefalografi (EEG), milisaniye (ms) düzeyindeki hassasiyeti ile sporda bilişsel süreçlerin takibi için altın standart olarak öne çıkmaktadır [5-7]. Bu bölüm, sporcularda bilişsel esnekliğin ve reaksiyon hızının nöral izdüşümlerini anlamak için gerekli teknik altyapıyı ve metodolojik adımları sunmayı amaçlamaktadır.

## 1.1. EEG Sinyallerinin Temelleri

### 1.1.1. EEG'nin Fizyolojik Temeli

EEG, beyindeki nöron gruplarının (özellikle piramidal nöronların) senkronize elektriksel aktivitesinin, kafa derisi üzerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla voltaj farkı olarak kaydedilmesidir. Kaydedilen bu sinyal, aksiyon potansiyellerinden ziyade, nöronların dendritlerinde meydana gelen post-sinaptik potansiyellerin toplamını yansıtır. Sinyal gücü mikrovolt ( $\mu V$ ) seviyesindedir ve bu nedenle hassas amplifikatörler (yükseletçiler) ile kayıt altına alınır [8-10].

### 1.1.2. Uluslararası 10-20 Yerleşim Sistemi

EEG ölçümlerinin standartlaştırılması ve çalışmalar arası tutarlılık sağlanması amacıyla “Uluslararası 10-20 Sistemi” kullanılır. Bu sistemde elektrotlar, kafa kemiği üzerindeki belirli anatomik referans noktalarına (Nasion: burun kökü, Inion: oksipital kemik çıkıntısı) göre yerleştirilir. “10” ve “20” ifadeleri, nasion-inion veya kulaklar arası mesafenin %10'luk ve %20'lik dilimlere bölünmesini ifade eder. Harfler beyin loblarını (F: Frontal, P: Parietal, T: Temporal, O: Oksipital, C: Santral), sayılar ise hemisferi (Tek sayılar sol, çift sayılar sağ, ‘z’ ise orta hattı/midline) temsil eder. Örneğin, Fz elektrodu orta hat frontal bölgeyi, P3 elektrodu ise sol parietal bölgeyi gösterir [11-13].

### 1.1.3. EEG Frekans Bantları

Beyin sinyalleri kaotik görünse de belirli durumlarda baskın olan frekans (Hz) aralıklarına göre sınıflandırılır. Spor performansı analizinde her bandın farklı bir anlamı vardır. Delta ( $\delta$ , 0.5-4 Hz): Derin uyku durumunda görülür. Uyanık sporcuda yüksek delta aktivitesi patolojik olabilir veya yorgunluk/dikkatsizlik göstergesi olabilir. Teta ( $\theta$ , 4-8 Hz): Uyuklama, derin meditasyon veya karmaşık problem çözme sırasında artar. Alfa ( $\alpha$ , 8-13 Hz): Gözler kapalıyken veya kişi uyanık ama dinlenim halindeyken

parietal ve oksipital bölgelerde baskındır. Sporda “nöral verimlilik” (neural efficiency) hipotezi kapsamında, elit sporcuların atış öncesi hazırlık evresinde alfa gücünü artırarak dış uyaranları bloke ettikleri bilinmektedir. Beta ( $\beta$ , 13-30 Hz): Aktif düşünme, odaklanma, kaygı ve uyanıklık durumudur. Spor esnasında aktif konsantrasyon gerektiren anlarda baskındır. Gama ( $\gamma$ , >30 Hz): Farklı beyin bölgeleri arasındaki bilgi alışverişini ve üst düzey bilişsel birleştirmeyi temsil eder [14-16].

#### 1.1.4. EEG Kaydında Gürültüler

EEG sinyalleri çok düşük genlikli olduğu için gürültüye (artifakt) karşı hassastır. Temiz veri elde etmek için bu gürültülerin tanımlanması gerekir.

- Fizyolojik Artifaktlar: Vücut kaynaklıdır. Göz kırpması ve göz hareketleri (EOG), çene sıkma veya boyun gerginliği kaynaklı kas aktiviteleri (EMG) ve kalp atışı (EKG) sinyale karışabilir.

- Dışsal Artifaktlar: Çevresel elektriksel gürültülerdir. Şebeke elektriği (50/60 Hz hat gürültüsü), elektrot temasızlığı (yüksek empedans) veya kablo hareketleri buna örnektir.

#### 1.2. Olay İlişkili Potansiyeller

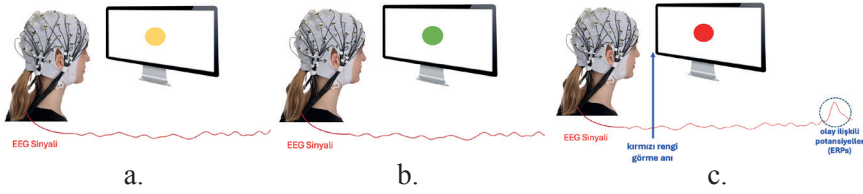
Sürekli EEG kaydı (spontaneous EEG), beynin genel durumu hakkında bilgi verirken belirli bir bilişsel işleme (örneğin bir rakibi fark etme) özgü tepkiyi göstermekte yetersiz kalır. Olay İlişkili Potansiyeller (ing. event related potentials, ERP), beynin belirli bir duyuşsal, motor veya bilişsel uyarana verdiği, zamanla kilitli (time-locked) elektrofizyolojik yanıttır ve oddball paradigması kullanılarak EEG sinyallerinden elde edilir [17-18].

##### 1.2.1. Oddball Paradigması

Bireylerin zihinsel kararlarını veya tercihlerini sözel olarak ifade etmedikleri durumlarda dahi, bu kararların nöral karşılıklarını EEG sinyalleri üzerinden tespit etmek mümkündür. Bu tespit sürecinde en sık başvurulan yöntem Oddball Paradigmasıdır. Bu paradigma temel olarak, sık tekrar eden standart uyaranlar dizisinin, rastgele aralıklarla gelen ve “seyrek” (odd) olan farklı bir uyaran tarafından kesintiye uğratılması prensibine dayanır. Beyin, monoton bir şekilde devam eden standart uyaranlara karşı duyarsızlaşırken (alışma), beklenen veya dikkat yöneltilen seyrek uyarana karşı belirgin bir elektrofizyolojik tepki üretir. Bu tepki, Olay İlişkili Potansiyel (ERP) olarak adlandırılır [19-20].

Uygulama sürecinde katılımcıya bilgisayar ekranında mevcut tüm uyaran seçenekleri (örneğin farklı renklerdeki toplar) tanıtılır ve katılımcıdan kendisi

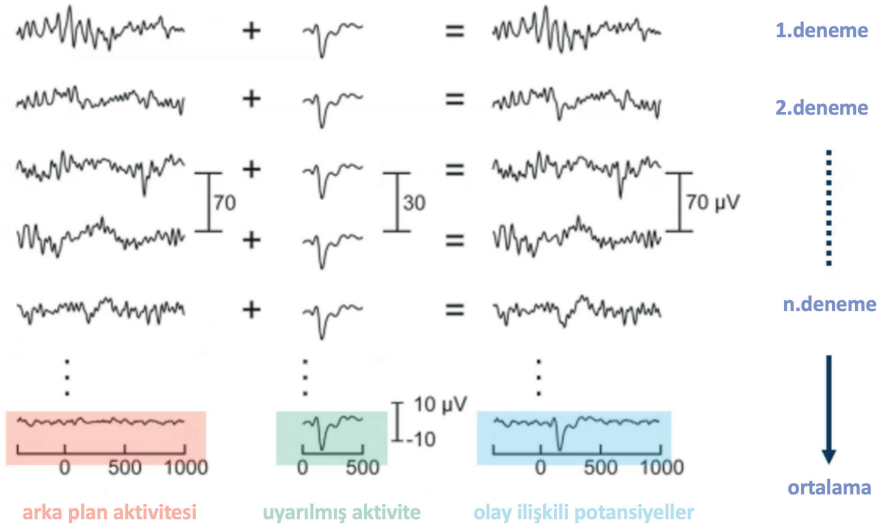
için bir “hedef” belirlemesi istenir (Örneğin: “Kırmızı renge odaklan”). Bu aşamadan sonra ekranda sırasıyla ve tek tek farklı renkler belirirken eş zamanlı EEG kaydı alınır. Katılımcının görevi, sadece zihinsel olarak seçtiği renge (hedef uyarı) odaklanmak, diğer renkleri (standart uyarılar) ise görmezden gelmektir. Elde edilen sinyallerin analizi, katılımcının hangi uyarıya odaklandığını, dolayısıyla hangi seçimi yaptığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu durum Şekil 1 üzerinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 1. Oddball paradigması ve ERP sinyallerinin oluşumu

Şekil 1a-b’de, katılımcının odaklanmadığı, yani hedef olmayan standart bir uyarıya (örneğin sarı ve yeşil top) maruz kaldığı andaki EEG kesiti görülmektedir. Dikkat edilirse, bu uyarılara verilen tepki, arka plan EEG aktivitesinden ayırt edilememekte ve belirgin bir ERP bileşeni oluşturmamaktadır. Beyin bu uyarıyı “önemsiz” olarak kodladığı için güçlü bir senkronize nöral ateşleme gerçekleşmez. Buna karşın Şekil 1c, katılımcının zihinsel olarak seçtiği hedef uyarıya (kırmızı renk) odaklandığı andaki sinyali göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, uyarının verilmesini takip eden süreçte (genellikle 300 ms civarında) genliği yüksek ve belirgin bir pozitif dalgalanma (ERP) meydana gelmiştir. Bu dalga, kişinin o sırada ekranda gördüğü rengi “hedef” olarak tanıdığını ve ona dikkatini yönelttiğini kanıtlar. Sonuç olarak, herhangi bir uyarıdan sonra Şekil 1c’deki gibi karakteristik bir ERP sinyali elde ediliyorsa, katılımcının o uyarıya odaklandığı sonucuna varılır. Bu yöntem sayesinde, kişinin hangi rengi veya nesneyi seçtiği, hiçbir fiziksel tepki vermesine gerek kalmadan sadece EEG sinyallerindeki bu genlik farklarına bakılarak yüksek doğrulukla ayırt edilebilmektedir.

Ancak bu analiz sürecinde dikkate alınması gereken teknik bir kısıtlılık bulunmaktadır. Tek bir uyarıdan sonra oluşan ERP sinyallerinin SNR değeri oldukça düşüktür ve bu sinyaller arka plan EEG gürültüsü içerisinde maskelenir. Bu nedenle, güvenilir bir dalga formu elde edebilmek için her bir uyarı, deney süresince birden fazla kez tekrarlandırılır. Uyarı sonrası elde edilmiş çok sayıda epokun ortalaması alındığında, rastgele gürültü sönümlenirken, uyarıya kilitli sinyal belirginleşir. Böylece SNR değeri yüksek ve genliği net bir ERP sinyali elde edilmiş olur. Ham ve gürültülü veriden, tekrarlı ölçümlerin ortalamasının alınmasıyla net bir ERP dalgasının oluşturulma süreci Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Hedef uyarının birden fazla gösterimi ve ERP sinyallerinin oluşumu

### 1.2.2. ERP Sinyallerinin Elde Edilme Adımları

Ham EEG verisinden anlamlı bir ERP dalgası elde etmek için hassas bir dijital sinyal işleme prosedürü uygulanır. Bu süreç şu adımlardan oluşur;

**Zaman Kilitli Kayıt ve Marker (İşaretleyici) Gönderme:** ERP analizinin temeli, uyarının verildiği anın kesin olarak bilinmesidir. Deney tasarımında, katılımcıya bir uyarın gösterildiği anda, EEG kayıt cihazına eş zamanlı olarak bir dijital sinyal (marker) gönderilir. Bu marker, EEG verisi üzerinde ms hassasiyetle bir zaman damgası oluşturur.

**Epoklama:** Sürekli akan EEG verisi, gönderilen markerlara referansla parçalara ayrılır. Örneğin, her bir uyarının verildiği andan (0. ms), 200 ms öncesi ve 1000 ms sonrasını kapsayan zaman pencereleri kesilerek ayırık veri setleri oluşturulur. Bu işleme epoklama denir. Markerlar genellikle uyarın tipine göre (Örn: Hedef Uyarın vs. Standart Uyarın) kodlanır ve epoklar bu tiplere göre gruplandırılır.

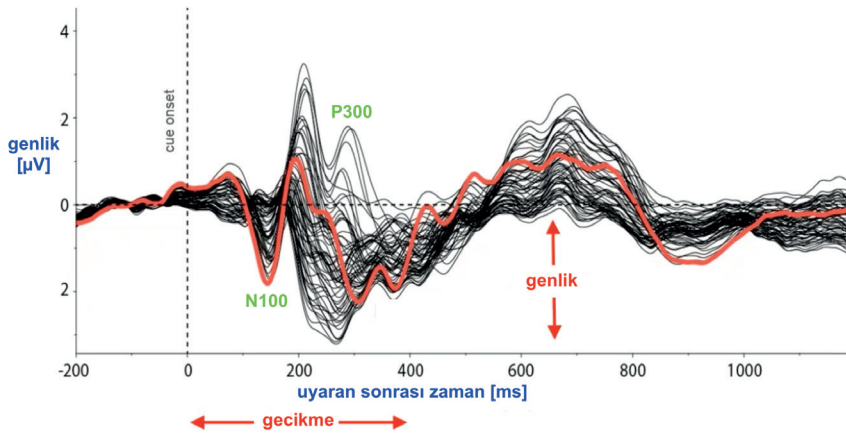
**Taban Hattı Düzeltmesi (Baseline Correction):** Her epok içinde, uyarın verilmeden önceki zaman dilimi (pre-stimulus interval, örn: -200 ms ile 0 ms arası) referans kabul edilir. Bu aralıktaki voltaj ortalaması hesaplanır ve epokun geri kalanındaki tüm değerlerden çıkarılır. Bu işlem, her bir epokun voltaj değerini "sıfır" noktasına hizalar ve uyarın öncesi elektriksel kaymaların ölçümü etkilemesini engeller.

**Artifakt Temizleme:** Epoklama sonrası, göz kırpması veya aşırı kas

hareketi içeren “kirli” epoklar ya otomatik algoritmalarla ya da manuel inceleme ile veri setinden atılır.

**Ortalama Alma (Averaging) ve Sinyal/Gürültü Oranı (SNR):** Tek bir uyarana verilen beyin ERP sinyali oldukça küçüktür ve arka plandaki sürekli EEG aktivitesi içinde kaybolur. Bu durumda SNR çok düşüktür. SNR’ı artırmak için “Averaging” tekniği kullanılır.

**ERP Bileşenlerinin Parametreleri (Genlik ve Latans):** Elde edilen ortalama ERP dalga formu, pozitif (P) ve negatif (N) piklerden oluşur (Örn: P300, N200). Bu dalgalar iki temel parametre ile analiz edilir: Genlik (Amplitude -  $\mu V/\mu V$ ): Dalganın tepe noktasının taban hattına olan voltaj farkıdır. Genlik, o bilişsel işlem için ayrılan nöral kaynağın miktarını gösterir. Sporcuda yüksek genlik, ilgili uyarana daha fazla dikkat kaynağı ayrıldığını işaret edebilir. Latans (Latency - ms): Uyarının verildiği andan (0. ms), dalganın pik yaptığı ana kadar geçen süredir. Bilişsel işleme hızını (processing speed) gösterir. Latansın kısalması, bilginin beyinde daha hızlı işlendiği anlamına gelir. ERP sinyallerinin bileşenleri Şekil 3’te görülmektedir.

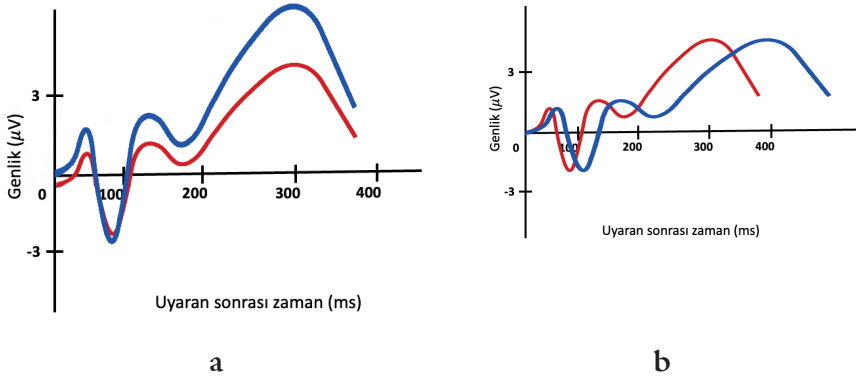


Şekil 3. ERP sinyallerinin bileşenleri

İlk olarak genlik, nöral aktivasyonun yoğunluğunu ve ilgili göreve ayrılan nöral kaynakların miktarını temsil eder. Literatürde, bir uyarana yöneltilen dikkat seviyesi ile ERP genliği arasında pozitif bir korelasyon olduğu, yani daha fazla dikkatin daha büyük P300 genlikli bir ERP sinyali ürettiği sıklıkla bildirilmiştir [21-22]. Bu durum Şekil 4a üzerinde karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, mavi renkli çizgi ile ifade edilen ERP sinyalinin P300 genliğinin, kırmızı renkli sinyale kıyasla belirgin şekilde daha

yüksek olduğu görülmektedir. Bu genlik farkı, mavi sinyalin elde edildiği durumda deneğin uyarana daha yoğun bir dikkat kaynağı ayırdığı şeklinde yorumlanır.

İkinci önemli parametre ise gecikmedir. Gecikme değeri, uyarının verilmesi ile beyindeki elektrofizyolojik tepkinin zirveye ulaşması arasında geçen süreyi ifade eder ve genellikle uyarın sınıflandırmasının hızı (stimulus classification speed) olarak değerlendirilir. Bir olayın diğerinden ayırt edilmesi sürecinde daha kısa gecikme süreleri, daha uzun sürelerle kıyasla daha hızlı bir bilgi işleme kapasitesini ve dolayısıyla üstün bir zihinsel performansı gösterir [23]. Şekil 4b'de bu zamansal farklılık somut bir örnekle sunulmuştur. Grafikte, kırmızı renkli ERP sinyalinin P300 bileşeni yaklaşık 300 ms civarında pik yaparken, mavi renkli ERP sinyalinin P300 bileşeni daha geç bir sürede, yaklaşık 400 ms civarlarında oluşmuştur. Buradaki zamansal fark, kırmızı çizgi ile temsil edilen durumdaki bilişsel işleme hızının, mavi duruma göre daha yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. Sonuç olarak, hem genlik hem de gecikme parametreleri, sporcunun dikkat seviyesi ve karar verme hızı gibi kritik bilişsel süreçleri hakkında tamamlayıcı bilgiler sunmaktadır.



Şekil 4. ERP sinyallerinin bileşenleri

## 2. Bilişsel Performans Ölçüm Paradigmaları Ve Spor Uygulamaları

Sporcularda bilişsel süreçleri izole edip ölçebilmek için standartlaştırılmış nöropsikolojik test bataryaları kullanılır. Bu testler, eş zamanlı EEG kaydı ile uygulandığında, sporcunun verdiği tepkinin sadece sonucu (doğru/yanlış) değil, o tepkinin oluşum sürecindeki nöral maliyeti ve hızı da ortaya çıkar. Spor bilimlerinde en sık kullanılan iki temel paradigma Stroop ve Go/No-Go görevleridir [24].

### 2.1. Stroop Testi ve Seçici Dikkat

Stroop testi, sporcunun otomatik tepkilerini bastırıp, odaklanması gereken asıl bilgiye yönelme becerisini (seçici dikkat ve enterferans kontrolü) ölçer.

**Görev Tasarımı:** Katılımcıya renk isimleri (Örn: “KIRMIZI”, “MAVİ”) gösterilir (Şekil 5). Ancak kelimeler, kendi anlamlarından farklı renklerde yazılmıştır (Örneğin “KIRMIZI” kelimesinin yeşil mürekkeple yazılması). Katılımcıdan kelimeyi okuması değil, yazıldığı rengi söylemesi/tuşlaması istenir.

**Ölçülen Bilişsel Süreç:** Okuma eylemi otomatik ve baskın olduğu için, beyin kelimenin anlamı (Kırmızı) ile görsel rengi (Yeşil) arasında bir çatışma yaşar. Buna “Stroop Etkisi” denir. Sporcunun bu çatışmayı çözüp doğru tuşa basma süresi, bilişsel esneklik ve çeldiricilere karşı direnci gösterir.

**Spor Sahasındaki Karşılığı:** Bir futbolcunun, tribünlerden gelen gürültüye (çeldirici) rağmen antrenörün sesine odaklanması veya bir basketbolcunun rakibin yaptığı aldatıcı vücut hareketine rağmen topun gerçek yönüne odaklanması bu beceriye örnektir.

**EEG/ERP Bulguları:** Stroop testinde uyumsuz (incongruent) uyarılara verilen tepkilerde, N450 veya geç pozitif potansiyeller incelenir. Başarılı sporcularda bu çatışma çözme sürecinin daha hızlı gerçekleştiği ve hatasız tepkilerin daha düşük latansla verildiği gözlemlenmektedir [25].



Şekil 5. Stroop paradigması



## 2.2. Go/No-Go Görevi ve İnhibisyon (Dürtü Kontrolü)

Spor sadece harekete geçmek değil, bazen de hareketi son anda durdurabilmekle ilgilidir. Go/No-Go paradigması, motor inhibisyonu (dürtüsel eylemi durdurma) ölçer [26].

Görev Tasarımı: Katılımcıya bir dizi görsel uyaran hızlıca gösterilir. Belirli bir uyaran (Örn: Yeşil Daire) görüldüğünde butona basması (“Go”), başka bir uyaran (Örn: Kırmızı Kare) görüldüğünde ise basmaması (“No-Go”) istenir. Genellikle “Go” uyaranları %70-80 oranında, “No-Go” uyaranları ise %20-30 oranında verilir. Sık gelen “Go” uyarı katılımcıda bir yanıtlama alışkanlığı yaratır; aniden gelen “No-Go” uyarısında ise bu güçlü basma dürtüsünün motor korteks seviyesinde frenlenmesi gerekir.

Ölçülen Bilişsel Süreç: İnhibisyon. Yanlış bir tepkiyi baskılama yeteneğidir.

Spor Sahasındaki Karşılığı: Bir savunma oyuncusunun topa hamle yaparken hakemin düdüğünü duyup son anda durması veya ofsait bayrağını görüp koşuyu kesmesi motor inhibisyon örneğidir.

EEG/ERP Bulguları: Bu görevde özellikle iki ERP bileşeni öne çıkar:

N200 (N2): Uyaran sonrası yaklaşık 200-300. ms’de frontal bölgede görülen negatif dalgadır. Çatışma izleme ve inhibisyonun “başlatılması” ile ilişkilidir.

P300 (P3): Uyaran sonrası 300-500. ms’de parietal bölgede görülen pozitif dalgadır. İnhibisyonun başarısını ve kapanışını temsil eder. Elit sporcularda No-Go durumlarında daha belirgin ve erken N200/P300 kompleksleri, üstün dürtü kontrolüne işaret eder.



Şekil 6. Go / Go-No paradigması

## 2.3. Spor ve ERP Çalışmaları

Spor nörobilimi literatürü, elit sporcuların beyinlerinin acemi sporculara göre bilgiyi farklı işlediğini göstermektedir. Bu farklar temel olarak “Nöral Verimlilik” ve “İşleme Hızı” başlıklarında toplanır.

### 2.3.1. Nöral Verimlilik Hipotezi

Bu hipotez, yüksek yetenek düzeyine sahip bireylerin (elit sporcular), belirli bir görevi yerine getirirken beyinlerini daha ekonomik kullandıklarını savunur. EEG çalışmalarında, elit sporcuların (örneğin atıcılık veya okçuluk yapanlar) atış hazırlığı sırasında frontal ve temporal bölgelerinde Alfa (8-13 Hz) aktivitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek alfa gücü, göreve ilgisiz beyin bölgelerinin “susturulduğu” ve sadece vizyospasyal (görsel-mekansal) işleme yapan bölgelerin aktif kaldığı anlamına gelir. Bu durum, “Sakin Zihin” kavramının elektrofizyolojik karşılığıdır. Acemi sporcularda ise aynı görev sırasında beyinde yaygın bir aktivasyon ve düşük alfa gücü görülür; bu da beynin gereksiz kaynak tükettiğini ve odaklanma sorunu yaşadığını gösterir [27-28].

### 2.3.2. ERP Bileşenleri ve Sporcu Performansı

ERP kullanılarak yapılan çalışmalarda, spor branşının gerektirdiği bilişsel taleplere göre beyin plastisitesinin şekillendiği görülmüştür.

**P300 Genliği ve Dikkat Kaynakları:** Birçok çalışmada, elit sporcuların (özellikle voleybol, tenis gibi hızlı karar gerektiren branşlarda) standart olmayan (“Oddball”) uyarılara verdikleri P300 yanıtının genliğinin, sedanter bireylere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Yüksek P300 genliği, sporcunun ilgili uyarana daha fazla dikkat kaynağı ayırabildiğini gösterir.

**P300 Latansı ve Karar Verme Hızı:** Elit sporcularda P300 latansının (tepe noktasına ulaşma süresi) anlamlı derecede daha kısa olduğu rapor edilmiştir. Örneğin, bir eskrimcinin rakibin hamlesini algılaması ile buna tepki vermesi arasındaki nöral süre, P300 latansının kısalığı ile ölçülebilir. Bu, sinir iletim hızından ziyade, beynin bilgiyi değerlendirme ve kategorize etme hızının yüksekliğidir.

**Erken Görsel Bileşenler (P100/N100):** Görsel dikkatin yoğun olduğu aksiyon sporlarında, uyarının verilmesinden sonraki ilk 100 ms içinde oluşan erken görsel ERP bileşenlerinin elit sporcularda daha keskin olduğu görülmüştür. Bu durum, sporcuların görsel korteksinin (oksipital lob) görsel uyarılara karşı “hazırlıklı” ve duyarlı olduğunu kanıtlar.

Bu alanda yapılmış literatür çalışmaları incelendiğinde, kompleks motor hareket eğitimlerinin futbolcuların uzun süreli dikkat ve inhibisyon performanslarına etkisini inceleyen çalışmada [29], davranışsal ve nörofizyolojik verilerin birlikte değerlendirildiği deneysel bir desen kullanılmıştır. Araştırma kapsamında, 18-25 yaş aralığındaki amatör lisanslı futbolculardan oluşan deney grubuna bir ay boyunca haftada üç gün olmak üzere toplam 12 seanslık, çoklu görev ve hızlı karar vermeyi içeren “Fit Beyin” antrenman programı uygulanırken, kontrol grubuna herhangi bir eğitim verilmemiştir. Katılımcıların bilişsel süreçlerindeki değişimler, eğitim öncesi ve sonrasında uygulanan “Yap/Yapma” (Go/NoGo) görevi esnasında alınan 16 kanallı EEG kayıtları üzerinden Olaya İlişkin Potansiyeller (OİP) analizi ile ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, hareket eğitimi alan futbolcuların özellikle “Yapma” (NoGo) görevindeki P300 genliklerinde artış olduğunu ve bu nörofizyolojik değişimin, kompleks motor antrenmanların uzun süreli dikkat ve tepki inhibisyonu becerilerini kontrol grubuna kıyasla anlamlı düzeyde geliştirdiğini ortaya koymuştur.

Sporcuların bilişsel performanslarını nörofizyolojik yöntemlerle inceleyen literatür, fiziksel aktivitenin beyin plastisitesi ve yönetici işlevler üzerindeki etkisine odaklanan çeşitli temeller üzerine kuruludur. Bu alandaki en çarpıcı çalışmalardan biri Vestberg ve arkadaşları (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, üst düzey futbolcuların sahadaki başarısının sadece fiziksel yetenekle değil, “yönetici işlevler” olarak adlandırılan bilişsel kapasiteyle doğrudan ilişkili olduğunu savunmuştur. Çalışma sonucunda, futbolcuların değişen oyun stratejilerine hızlı adapte olabilme ve doğru karar verme becerilerinin, ligdeki gol ve asist başarılarını önceden yordayabildiği (predict) ortaya konmuştur [30].

Bu bilişsel süreçlerin nöral karşılığını belirlemeye yönelik metodolojik çalışmalarda ise Roberts ve arkadaşları (1994) ile Menon ve arkadaşları (2001) öne çıkmaktadır. Bu araştırmalar, sporcularda sıklıkla test edilen “dürtü kontrolü”nü (inhibisyon) ölçmek için “Yap/Yapma” (Go/NoGo) paradigmasını kullanmış ve bu görev sırasında beynin orta-frontal bölgesinde “P300” adı verilen elektriksel dalgalanmaların oluştuğunu kanıtlamıştır. Bu bulgular, bir sporcunun hatalı bir hareketi yapmaktan sonra vazgeçebilme yeteneğinin (örneğin ofsayta düşmemek için durmak), beynin ön bölgesindeki bu spesifik sinyallerle takip edilebileceğini göstermiş ve sonraki spor araştırmalarına zemin hazırlamıştır [31].

Ayrıca Medina ve arkadaşları (2010), fiziksel egzersizlerin dikkat eksikliği üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, düzenli hareket eğitimlerinin bireylerin “uzun süreli dikkat” (sustained attention)

performanslarını artırdığını rapor etmiştir. Anderson ve arkadaşları (1995) ise EEG sinyalleri ile zihinsel durumların (mental state) belirlenebileceğini göstererek, sporcuların antrenman sırasındaki odaklanma düzeylerinin nöral ağlar üzerinden analiz edilebileceğinin ilk sinyallerini vermiştir. Tüm bu çalışmalar, kompleks motor hareketlerin beyindeki sinir ağlarını güçlendirerek sporcularda hem dikkat süresini hem de reaksiyon kontrolünü geliştirdiğini destekleyen güçlü bir literatür oluşturmaktadır [32].

### 3. Sonuç

Bu kitap bölümünde, spor performansının görünmeyen yüzü olan bilişsel süreçlerin, EEG ve ERP yöntemleriyle nasıl ölçülebilir ve somut verilere dönüştürülebilir olduğu ele alınmıştır. Özetlenen literatür ve metodolojik yaklaşımlar ışığında şu sonuçlara varılabilir:

**Objektif Değerlendirme:** EEG ve ERP, sporcunun antrenör gözlemi veya anketlerle ölçülemeyen “zihinsel yorgunluk”, “odaklanma kapasitesi” ve “reaksiyon hızı” gibi parametrelerini milisaniye hassasiyetinde sayısallaştırır.

**Yetenek Seçimi:** Bilişsel esneklik ve inhibisyon gibi özelliklerin ERP belirteçleri (P300, N200), genç sporcuların yetenek taramasında fiziksel testlerin yanında tamamlayıcı bir unsur olarak kullanılabilir.

**Antrenman Takibi:** Bilişsel antrenmanların (Neurofeedback veya bilgisayar tabanlı egzersizler) etkinliği, sporcunun ERP profillerindeki (örneğin P300 latansındaki kısalma) değişimlerle takip edilebilir.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, laboratuvar tipi ıslak elektrotlu hantal EEG cihazlarının yerini, sahada hareket halinde ölçüm yapabilen Mobil EEG sistemleri almaya başlamıştır. Gelecekteki çalışmaların, sporcuları laboratuvar da ekrana bakarak değil, sahada gerçek spor ekipmanlarıyla performans sergilerken nöro-görüntüleme yöntemleriyle analiz etmeye odaklanması beklenmektedir. Sporda fiziksel limitlere yaklaşıldığı günümüzde, bir sonraki büyük performans sıçraması, beynin potansiyelinin bu yöntemlerle daha iyi anlaşılması ve işlenmesiyle gerçekleşecektir.

## Referanslar:

- [1] Mann, D. T. Y., Williams, A. M., Ward, P., & Janelle, C. M. (2007). Perceptual-cognitive expertise in sport: A meta-analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 29(4), 457–478. <https://doi.org/10.1123/jsep.29.4.457>
- [2] Yarrow, K., Brown, P., & Krakauer, J. W. (2009). Inside the brain of an elite athlete: The neural processes that support high achievement. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(8), 585–596. <https://doi.org/10.1038/nrn2672>
- [3] Ritter, P., & Villringer, A. (2006). Simultaneous EEG-fMRI. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 30(6), 919–931. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.06.008>
- [4] Gramann, K., Jung, T. P., Ferris, D. P., Lin, C. T., & Makeig, S. (2014). Toward a new cognitive neuroscience: modeling natural brain dynamics. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 444. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00444>
- [5] Park, J. L., Fairweather, M. M., & Donaldson, D. I. (2015). Making the case for mobile cognition: EEG and sports performance. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 52, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.02.014>
- [6] Thompson, T., Steffert, T., Ros, T., Leach, J., & Gruzelier, J. (2008). EEG applications for sport and performance. *Methods*, 45(4), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2008.07.006>
- [7] Bertollo, M., di Fronso, S., Filho, E., Conforto, S., Schmid, M., Berchicci, M., ... & Robazza, C. (2016). Proficient brain for optimal performance: The MAP model perspective. *PeerJ*, 4, e2082. <https://doi.org/10.7717/peerj.2082>
- [8] Lopes da Silva, F. (2013). EEG: Origin and measurement. In C. Mulert & L. Lemieux (Eds.), *EEG - fMRI: Physiological Basis, Technique, and Applications* (pp. 19–38). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-87919-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-87919-0_2)
- [9] Buzsáki, G., Anastassiou, C. A., & Koch, C. (2012). The origin of extracellular fields and currents—EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(6), 407–420. <https://doi.org/10.1038/nrn3241>
- [10] Olejniczak, P. (2006). Neurophysiologic basis of EEG. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 23(3), 186–189. <https://doi.org/10.1097/01.wnp.0000220079.61973.6c>

- [11] Seeck, M., Koessler, L., Bast, T., Leijten, F., Michel, C., Baumgartner, C., He, B., & Beniczky, S. (2017). The standardized EEG electrode array of the IFCN. *Clinical Neurophysiology*, 128(10), 2070–2077. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.254>
- [12] Homan, R. W., Herman, J., & Purdy, P. (1987). Cerebral location of international 10–20 system electrode placement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66(4), 376–382. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(87\)90206-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(87)90206-9)
- [13] Jurcak, V., Tsuzuki, D., & Dan, I. (2007). 10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: Their validity as relative head-surface-based positioning systems. *NeuroImage*, 34(4), 1600–1611. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.09.024>
- [14] Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2–3), 169–195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- [15] Del Percio, C., Babiloni, C., Marzano, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., Vecchio, F., ... & Eusebi, F. (2009). “Neural efficiency” of athletes’ brain for upright standing: A high-resolution EEG study. *Brain Research Bulletin*, 79(3–4), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2009.02.001>
- [16] Herrmann, C. S., Munk, M. H., & Engel, A. K. (2004). Cognitive functions of gamma-band activity: Memory match and utilization. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(8), 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.06.006>
- [17] Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., ... & Taylor, M. J. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37(2), 127–152.
- [18] Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- [19] Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150(3700), 1187–1188. <https://doi.org/10.1126/science.150.3700.1187>
- [20] Farwell, L. A., & Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: Mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70(6), 510–523. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(88\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6)
- [21] Johnson, R., Jr. (1986). A triarchic model of P300 amplitude. *Psychophysiology*, 23(4), 367–384. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1986.tb00649.x>

- [22] Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, 38(3), 557–577.
- [23] McCarthy, G., & Donchin, E. (1981). A metric for thought: A comparison of P300 latency and reaction time. *Science*, 211(4477), 77–80.
- [24] Simonet, M., Beltrami, D., & Barral, J. (2023). Inhibitory control expertise through sports practice: A scoping review. *Journal of Sports Sciences*, 41(7), 616–630. <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2230713>
- [25] Hsieh, S. S., Huang, C. J., Wu, C. T., Chang, Y. K., & Hung, T. M. (2018). Acute exercise facilitates the N450 inhibition marker and P3 attention marker during Stroop test in young and older adults. *Journal of Clinical Medicine*, 7(11), 391. <https://doi.org/10.3390/jcm7110391>
- [26] Kida, N., Oda, S., & Matsumura, M. (2005). Intensive baseball practice improves the Go/No-Go reaction time, but not the simple reaction time. *Cognitive Brain Research*, 22(2), 257–264.
- [27] Haufler, A. J., Spalding, T. W., Santa Maria, D. L., & Hatfield, B. D. (2000). Neuro-cognitive activity during a self-paced visuospatial task: Comparative EEG profiles in marksmen and novice shooters. *Biological Psychology*, 53(2–3), 131–160. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(00\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(00)00047-8)
- [28] Del Percio, C., Rossini, P. M., Marzano, N., Iacoboni, M., Infarinato, F., Vecchio, F., ... & Babiloni, C. (2008). Is there a “neural efficiency” in athletes’ brains? *International Journal of Psychophysiology*, 69(3), 267–277.
- [29] Özbay, E. A., Cansu, İ., Şenyer, S., Özgör, C., Duru, A. D., & Şotuk, B. (2015, October). An ERP study on effects of complex motor movement training on football players’ sustained attention performance. In 2015 Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO) (pp. 1-3). IEEE.
- [30] Vestberg, T., Gustafson, R., Maurex, L., Ingvar, M., & Petrovic, P. (2012). Executive functions predict the success of top-soccer players. *PloS one*, 7(4), e34731.
- [31] Roberts, L. E., Rau, H., Lutzenberger, W., & Birbaumer, N. (1994). Mapping P300 waves onto inhibition: Go/No Go discrimination. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 92(1), 44-55.
- [32] Medina, J. A., Netto, T. L., Muszkat, M., Medina, A. C., Botter, D., Orbetelli, R., ... & Miranda, M. C. (2010). Exercise impact on sustained attention of ADHD children, methylphenidate effects. *ADHD Attention Deficit and Hyperactivity Disorders*, 2(1), 49-58.