



İki ve Üç Boyutlu Paradigmaların Olay İlişkili P300 Potansiyeli Üzerindeki Etkilerinin Dalgacık Dönüşümü Esaslı İncelenmesi

Onur Erdem Korkmaz^{1*}

^{1*} Atatürk Üniversitesi, İspir Hamza Polat Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Erzurum, Türkiye (ORCID: 0000-000-6336-6147)
onurerdem.korkmaz@atauni.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 25 Eylül 2022 ve Kabul Tarihi 26 Ekim 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1179944)

ATIF/REFERENCE: Korkmaz, O. E. (2022). İki ve Üç Boyutlu Paradigmaların Olay İlişkili P300 Potansiyeli Üzerindeki Etkilerinin Dalgacık Dönüşümü Esaslı İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 258-268.

Öz

Olay ilişkili P300 potansiyeli tabanlı Beyin Bilgisayar Arayüzü (BBA) sistemlerinde genellikle farklı uyaran tiplerinin sistem performansını nasıl etkilediği yapılan çalışmaların ana odak noktasıdır. Yapılan bu çalışmada dalgacık dönüşümü esaslı bir yöntem kullanılarak iki boyutlu satır-sütun ve üç boyutlu sütun paradigmalarının olay ilişkili P300 potansiyeli üzerindeki etkisi hem zaman hem de frekans uzayı açısından ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen paradigmanın P300 potansiyeli üzerinde daha fazla frekans bandında aktivasyon meydana getirdiği görülmüştür. Ayrıca yine önerilen yöntem kullanılarak birçok kanalda daha yüksek P300 genliği elde edilmiştir. Üç boyutlu sütun paradigması kullanılarak ortalama %6.03'lük daha yüksek dalgacık dönüşümü katsayısı gücü elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen paradigma kullanılarak gerçekleştirilen uyaran sunumunda daha etkin P300 sinyalleri elde edilmekte, buda BBA sistem performansını artırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dalgacık dönüşümü, P300, BBA, EEG.

Investigation of the Effects of Two and Three Dimensional Paradigms on Event-Related Potentials Using Wavelet Transform Based Method

Abstract

In event-related P300 potential-based Brain Computer Interface (BCI) systems, the main focus of the studies is how different stimulus types affect system performance. This study discusses the effect of two-dimensional row-column and three-dimensional column paradigms on the event-related P300 potential in terms of both time and frequency space using a wavelet transform-based method. According to the results obtained, it was observed that the proposed paradigm activated more frequency bands on the P300 potential. In addition, using the proposed method, higher P300 amplitude was obtained in many channels. The three-dimensional column paradigm achieved an average of 6.03% higher wavelet transform coefficient. As a result, more effective P300 signals are received in stimulus presentation using the proposed paradigm, increasing the BCI system performance.

Keywords: Wavelet transform, P300, BCI, EEG.

* Sorumlu Yazar: onurerdem.korkmaz@atauni.edu.tr

1. Giriş

Beyin Bilgisayar Arayüzü (BBA) çalışmalarında temel amaç, hiçbir kasını istemli kullanamayacak derecedeki felçli ve ALS (ing. Amyotrofik Lateral Skleroz, ALS)'li bireylerin çevresindeki bireylerle etkileşim kurmalarını sağlayacak heceleme sistemi, bilgisayar kullanımı, robotik bir kolu hareket ettirme ve diğer nöro protezlerini kullanmalarını sağlayacak bir bilgisayar arayüzü gerçekleştirmektir. BBA sistemlerinde giriş sinyali olarak genellikle kafa derisinden kaydedilen elektroensefalogram (EEG) sinyalleri kullanılmaktadır (Aydemir & Kaykicoglu, 2011).

EEG tabanlı BBA sistemleri kullanılarak, bilgisayar faresi (McFarland, Krusienski, Sarnacki, & Wolpaw, 2008), robotik kol (Cao vd., 2021), tekerlekli sandalye (Palumbo, Gramigna, Calabrese, & Ielpo, 2021) heceleme (Yin, Zhou, Jiang, Yu, & Hu, 2014), oyun (Li vd., 2021) ve hatta güvenlik sistemlerine (Ahmad & Ahuja, 2022) kadar birçok uygulama geliştirilmiştir. BBA sistemlerinin en sık kullanıldığı alanlardan biri de heceleme sistemleridir (Aggarwal & Chugh, 2022). Heceleme sistemleri, bireylerin bilgisayar ekranında bulunan sanal bir klavyeyle düşüncelerini yazarak etrafındaki kişilere aktarmalarını sağlayan en güncel BBA uygulamalarından biridir.

Literatürde EEG sinyallerinin kullanımından elde edilen öznelikleri kullanarak genellikle motor hayali (Arpaia, Esposito, Natalizio, & Parvis, 2022; Kevric & Subasi, 2017; Stephe & Kumar, 2022), olay ilişkili P300 potansiyel temelli (Sellers, Krusienski, McFarland, Vaughan, & Wolpaw, 2006; Won, Kwon, Ahn, & Jun, 2022; Xu vd., 2013) ve kararlı durum görsel olarak uyarılmış potansiyel tabanlı (Jalilpour, Sardouie, & Mijani, 2020; Muller-Putz & Pfurtscheller, 2007; Z. Wu, Lai, Xia, Wu, & Yao, 2008) olmak üzere üç ana yaklaşım vardır. Bunlardan olay ilişkili P300 potansiyeli, EEG tabanlı BBA sistemlerinde kısa sürede meydana gelmesi, göz hareketi artefaktlarından etkilenmemesi ve bu sistemler için bir ön eğitim aşaması gerektirmemesi nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle, P300 bileşenleri kullanılarak, sınıflandırma doğruluğu ve bilgi aktarım hızı açısından yüksek performanslı BBA sistemleri elde edilebilmektedir.

P300 tabanlı heceleme sistemleri en umut verici ve hayati önemde sahip BBA uygulamalarından biridir. Bu tür sistemlerde, P300 olaya bağlı potansiyel kullanılarak, engelli bireylerin kas aktivitesi olmadan bilgisayar ekranındaki harfleri veya diğer karakterleri seçerek çevreleriyle iletişim kurması sağlanmaktadır (Won vd., 2022). Bu sistemlerde en yaygın şekilde harflerden-karakterlerden oluşan ve sanal klavyeyi simüle eden bir matriste görüntülediği klasik iki boyutlu satır-sütun (2B-SS) flaşlanması paradigması kullanılır. Burada satırlar ve sütunlar rastgele yanıp sönerken (flaşlanma) kullanıcı hedef olarak da adlandırılan istenen harf veya karaktere odaklanır. Kullanıcının beyin sinyallerinde hedef karakter flaşlanmalarından yaklaşık 300 milisaniye (ms) sonra pozitif genlikli bir elektriksel tepki oluşmaktadır (Obeidat, Campbell, & Kong, 2015). 300 ms sonra ortaya çıkan bu pozitif genlik değerine P300 dalgası denir. Sonuç olarak, P300 heceleme sistemleri, P300 bileşenlerinin varlığını inceleyerek hedef ve hedef dışı flaşlanmaları tespit ederek katılımcının odaklandığı harfi tespit etmektedir.

Literatürdeki P300 tabanlı heceleme sistemlerine ait bir çok çalışma, görsel uyaran sunumunun sistem performansını nasıl etkilediğini araştırmaya yöneliktir (Janapati, Dalal, & Sengupta, 2022). Lu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (Lu, Li, Gao, &

Yang, 2020) katılımcıların kendi yüzleri ve ünlü kişilerin yüzlerinden oluşan bir paradigma tasarlamışlar ve karşılaştırmalı sonuçlar elde etmişlerdir. Toplam 10 katılımcı ile gerçekleştirdikleri çalışmada çevrimiçi oturumda ortalama %85.3 sınıflandırma doğruluğu (SD) elde etmişlerdir. P300 tabanlı başka bir çalışmada Wu ve arkadaşları (Y. Wu, Zhou, Lu, & Li, 2020), mevcut P300 heceleme sistemlerine ait SD performansının ve bilgi aktarım hızının gerçek dünya uygulaması için yetersiz olduğunu belirtmiş ve sanal bir karakter matrisinde karakterlerin üzerine yeşil bir nokta veya kırmızı bir çizgi yerleştirerek yeni bir matris formatı önermiştir. 11 katılımcıyla yürüttükleri çevrimdışı çalışma, ortalama %97.27'lik bir SD elde etmişlerdir. Literatürde yer alan bir diğer çalışmada ise Qu ve arkadaşları geliştirdikleri üç boyutlu tek karakter flaşlanması esaslı paradigma ile toplam 12 katılımcıyla yaptıkları çevrimiçi deneylerde ortalama %94 SD elde etmişlerdir (Qu vd., 2018). P300 yazım paradigmasındaki görsel modüllasyonları değerlendiren bir çalışmada (Zhang, Jin, Li, Wang, & Cichocki, 2021), toplam 10 kişi ile çevrimiçi ve çevrimdışı deneyler yapılmıştır. Sonuçlar, çevrimiçi oturumda beyaz çerçevedeki kırmızı yüz paradigmasının mavi çerçevedeki kırmızı yüz paradigmasından ve kırmızı çerçevedeki kırmızı yüz paradigmasından daha yüksek ortalama SD sağladığını göstermiştir. Xu ve arkadaşları (Xu vd., 2013) kararlı durum görsel uyarılmış potansiyel (ing. Steady-State Visual Evoked Potentials, SSVEP) ve P300 tabanlı hibrit bir yaklaşımla geliştirdikleri paradigmayı kullanarak toplam 12 katılımcıyla deneyler gerçekleştirmişlerdir. SSVEP-P300 ve sadece P300 paradigması kullanılarak iki farklı oturumda gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen veriler dalgacık dönüşümü ve topografik görseller kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre geliştirilen hibrit yaklaşımın daha etkin olay ilişkili potansiyeller meydana getirdiği görülmüştür. Bir diğer çalışmada ise Arvaneh ve arkadaşları (Arvaneh, Robertson, & Ward, 2019), geliştirdikleri nöro geribildirim tabanlı heceleme sisteminin etkinliğini 28 yetişkin bireyle gerçekleştirdikleri deneylerle göstermişlerdir. Elde edilen zaman-frekans görsellerine göre, geliştirilen yeni paradigmanın 150-550 ms zaman aralığında olay ilişkili potansiyel aktivitesini artırdığı görülmektedir.

Scharinger ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada (Scharinger, Soutschek, Schubert, & Gerjets, 2017), iki farklı psikolojik görev sonucunda oluşan P300 işaretleri hem zaman-frekans açısından hem de P300 sinyallerine ait genel genlik ortalaması açısından karşılaştırılmıştır. Bir diğer çalışmada ise De Vos ve arkadaşları (De Vos, Kroesen, Emkes, & Debener, 2014), yerleşik ve mobil EEG cihazları kullanılarak elde edilen P300 sinyallerini hem genlik açısından hem de sınıflandırma doğrulukları açısından karşılaştırmışlardır. P300 sinyallerini sadece genlik açısından veya sınıflandırma doğruluğu açısından karşılaştırmak eksik kalacaktır. İki farklı durum sonucunda elde edilen P300 sinyallerinin hem zaman uzayında ne gibi bir değişikliğe sebebiyet verdiği hem de frekans uzayında nasıl bir farklılık meydana getirdiği ayrıntılı bir şekilde açıklanmalıdır. Bu sayede sınıflandırma doğruluğunu nasıl etkilediğine dair ayrıntılı bilgi edilmiş olur. Ayrıca, etkin frekans bölgesi kullanılarak daha düşük hesaplama maliyetiyle daha hızlı işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Bu açıdan hem zaman hem de frekans yönüyle karşılaştırma imkânı sağlayan dalgacık dönüşümü esaslı bir yöntem kullanmak, ayrıntılı karşılaştırma açısından önemlidir.

Literatürde yapılan bir diğer çalışmada ise Korkmaz ve arkadaşları (Korkmaz, Aydemir, Oral, & Ozbek, 2022), geliştirdikleri üç boyutlu sütun (3B-S) flaşlanması paradigmasını

kullanarak klasik 2B-SS flaşlanması paradigmasına göre sistem performansını değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre 3B-S paradigmasıyla 15 flaşlanma ile en yüksek %99.81 SD elde etmişlerdir. Ayrıca 3B-S paradigmasını kullanarak klasik 2B-SS paradigmasına göre 1,3 ve 15 flaşlanma için sırasıyla %4.36, %1.01 ve %0.11 performans iyileştirmesi sağlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre 3B-S paradigmasının SD açısından yüksek performans sağladığı vurgulanmıştır. Ancak, 3B-S paradigmasının 2B-SS paradigmasından farklı olarak, P300 olay ilişkili potansiyel üzerinde hem zaman hem de frekans uzayı açısından ne gibi farklılıklar meydana getirdiği incelenmemiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada Korkmaz ve arkadaşlarının kaydettikleri 2B-SS ve 3B-S paradigmalarına ait veri seti, dalgacık dönüşümü yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Dalgacık dönüşümü aynı anda hem frekans hem de zaman açısından değerlendirme imkânı sağlayan bir yöntemdir. Bu şekilde her iki paradigmanın olay ilişkili P300 potansiyeli üzerindeki etkisi hem zaman hem de frekans açısından ele alınarak karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu başlık altında öncelikle çalışmada kullanılan veri seti tanıtılmış, daha sonra veri seti oluşturulurken kullanılan paradigmlar, EEG kaydı, deneysel prosedür ve son olarak sinyal işleme başlıkları açıklanmıştır. Çalışmanın blok diyagramı ise Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Yürütülen Çalışmanın Blok Diyagramı

2.1. Veri Seti Tanıtımı

2B-SS ve 3B-S paradigmaları kullanılarak iki farklı oturumda deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yanlılığı önlemek adına katılımcıların yarısı önce 2B-SS daha sonra 3B-S paradigması deneyine katılmış, diğer yarısı ise bunun tam tersi olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler yaş ortalaması 28 ± 4.84 olan 5 erkek ve yaş ortalaması 27 ± 4.15 5 kadın olmak üzere toplam 10 katılımcıyla gerçekleştirilmiştir. Her iki kayıt oturumunda da katılımcılara toplam 60 hedef karakter sunulmuştur. Katılımcılar rahat bir koltukta oturmuş ve 1 metre uzaklıktaki ekrandan uyarın sunumunu izlerken EEG verileri kaydedilmiştir. Katılımcıların tamamı deneye katılmadan önceki gün rahat bir uyku uyuduklarını ifade etmişlerdir. Deneylerden en az 5 saat öncesinde çay, kahve ve sigara gibi bilişsel işlevleri etkileyebilecek yeme içme faaliyetlerinden uzak durmuşlardır. Katılımcıların tamamı sağ elini kullanmaktaydı, nörolojik ya da başka herhangi bir rahatsızlıkları bulunmamaktaydı.

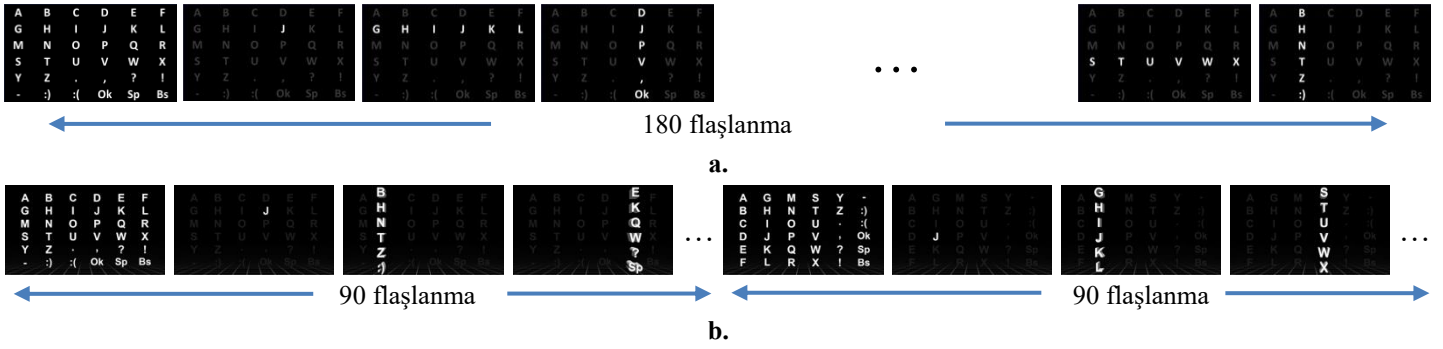
2.2. Paradigma

BBA uygulamalarında genellikle Donchin ve arkadaşları tarafından önerilen (Farwell & Donchin, 1988), ve klasik paradigma olarak da adlandırılan 2B-SS flaşlanması esaslı uyarın

sunumu kullanılmaktadır. Korkmaz ve arkadaşları tarafından geliştirilen (Korkmaz vd., 2022) 3B-S flaşlanması esaslı paradigma ve klasik 2B-SS flaşlanması paradigmaları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Klasik 2B-SS paradigmasında katılımcılara öncelikle 6x6 matris içerisinde karakterler gösterilmektedir. Daha sonra bu karakterlerden bir tanesi hedef olarak gösterildikten sonra uyarın sunumu başlamaktadır. Uyarın sunumunda her defasında bir satır ve bir sütun olacak şekilde toplam 12 flaşlanma işlemi gerçekleştirilir. 6 sütun ve 6 satırın birer kez flaşlanmasıyla toplam 12 flaşlanma işlemi gerçekleştirilir. Bu 12 flaşlanma paketine bir “deneme” denilmektedir. Olay ilişkili P300 potansiyeli tek denemeden oluşmadığı için birden fazla deneme gerçekleştirilir. Veri seti oluşturulurken toplam 15 deneme flaşlanması gerçekleştirilmiştir ve buna da bir “koşum” denilmektedir. 2B-SS paradigması oturumunda bir hedef karakter için toplam 180 (12x15) satır-sütun flaşlanması gerçekleştirilerek uyarın sunumu tamamlanır. 2B-SS oturumu deney prosedürü Şekil 2.a’da görülmektedir.

Önerilen 3B-S paradigması literatürde bulunan iki yaklaşımın birleşiminden oluşmaktadır. Bu çalışmalardan ilkinde, Qu ve arkadaşları yaptıkları üç boyutlu tek karakter flaşlanması paradigmasında üç boyut efektinin beyin olay ilişkili potansiyel tepkisini artırdığını göstermişlerdir. Ancak bu çalışmada tek karakter flaşlanması gerçekleştirildiğinden bilgi aktarım hızı oldukça yavaştır (Qu vd., 2018). Diğer çalışmada ise Ramirez-Quintana ve arkadaşları yalnızca sütun flaşlanmalarının olay ilişkili potansiyel tepkisini artırdığını göstermişlerdir (Ramirez-Quintana, Madrid-Herrera, Chacon-Murguía, & Corral-Martinez, 2021). Ancak bu çalışmada uyarın sunumları iki boyutlu gerçekleştirilmiştir. Korkmaz ve arkadaşları ise literatürde yer alan bu iki çalışma sonucunda elde edilen bilgilerden yola çıkarak hem üç boyutlu hem de yalnızca sütun flaşlanması temelli yeni bir uyarın sunumu paradigması geliştirmişlerdir. Önerilen paradigmaya ait prosedür ise Şekil 2.b’de görülmektedir. Buna göre katılımcıya 6x6 matriste karakterler gösterilir ve bu karakterlerden bir tanesi hedef olarak belirlenir. Daha sonra 6 sütunun tamamı rastgele flaşlandırılır. 6 flaşlanmanın tamamına bir “sütun deneme” denilmektedir. Yine olay ilişkili potansiyelin tek denemeden meydana gelmediği bilgisinden hareketle 15 sütun denemesi gerçekleştirilerek sütunlara ait uyarın sunumu tamamlanır. 15 sütun flaşlanmasının tamamına da bir “sütun koşum” denilmektedir ve bir sütun flaşlanmasında toplam 90 flaşlanma gerçekleştirilir (6x15). Bir sütun koşumu sonunda baştaki 6x6’lık karakter matrisini transpozu alınarak baştaki satırlardan yeni sütunlar elde edilir. Elde edilen yeni dağılımlı 6x6 karakter matrisi ve hedef karakterin yeni konumu tekrar gösterilerek bu kez satırların transpozundan elde edilen yeni sütunlar (satur^T) benzer şekilde flaşlandırılarak bir hedef karakter için uyarın sunumu tamamlanır.



Şekil 2. 2B-SS ve 3B-S paradigması deney prosedürleri

2.3. EEG Kaydı

EEG verileri kayıt prosedürü Atatürk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Etik Kurulu tarafından onaylandı. Tüm katılımcılar deneye başlamadan önce kurul onaylı onam formunu imzaladılar. Deneyler hem 2B-SS hem de 3B-S olmak üzere iki farklı oturumda gerçekleştirildi. Her iki oturumda da paradigmalara katılımcılara 1920 x 1080 çözünürlüklü LED monitörde gösterildi. Katılımcılar ekrandan 1 metre uzaklıkta bulunan rahat bir koltukta otururken EEG verileri kaydedildi. Deneyler sırasında deneklere, göz kırpmaya dahil gereksiz hareketlerden kaçınmaları, hedef karaktere dikkat etmeleri ve sessizce hedef karakterin flaşlanma sayısını saymaları istendi.

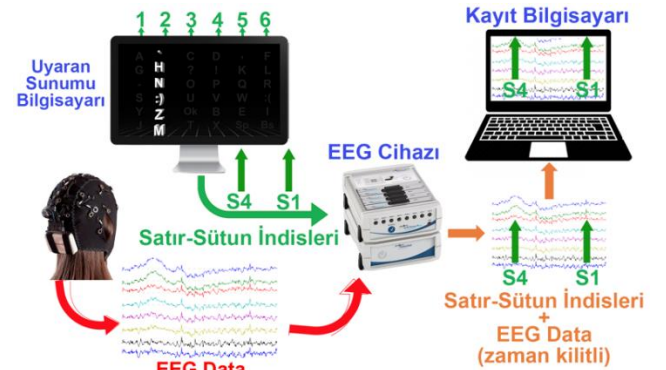
EEG verileri actiCHamp cihazı (Brain Products GmbH, Almanya) kullanılarak uluslararası 10-20 sistemine göre yerleştirilmiş 32 elektrot kullanılarak kaydedilmiştir. "Fz" referans elektrotu ve 250 Hz örnekleme frekansı ve alın bölgesine yerleştirilmiş toprak elektrotu (ing. Ground, Gnd) kullanılarak veriler kaydedilmiştir. Deneyler sırasında elektrotların empedanslarını 5 kΩ'un altında tutmak için iletkenlik sağlayan sıvı jel kullanılmıştır. Veri kaydında kullanılan elektrot dizilimi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. EEG verileri kaydedilirken kullanılan elektrot dizilimi

2.4. Deney Düzenegi

EEG verileri kaydedilirken kullanılan deney düzenegi Şekil 4'te görülmektedir. Deney düzenegi biri EEG verilerinin kaydedildiği kayıt bilgisayarı, diğeri uyarının sunumunun gerçekleştirildiği uyarın sunum bilgisayarı ve EEG cihazından oluşmaktadır. Uyarın sunumu psychtoolbox kütüphanesi kullanılarak MATLAB programı ile gerçekleştirilmektedir. Satır sütun flaşlanmaları gerçekleştirilirken LPT portu aracılığıyla hangi satır ya da sütunun flaşlandığına dair indis bilgisi EEG kayıt bilgisayarına gönderilmektedir. Bu şekilde uyarın sunumu ve EEG verileri zaman kilitli bir şekilde kaydedilmektedir. Olay ilişkili potansiyeller için zaman kilitli EEG kaydı önemli bir durumdur. Bu şekilde her bir satır sütun flaşlanmalarına ait EEG parçalarının ortalamaları alınarak işaret gürültü oranı yüksek olay ilişkili P300 potansiyeli elde edilmektedir.



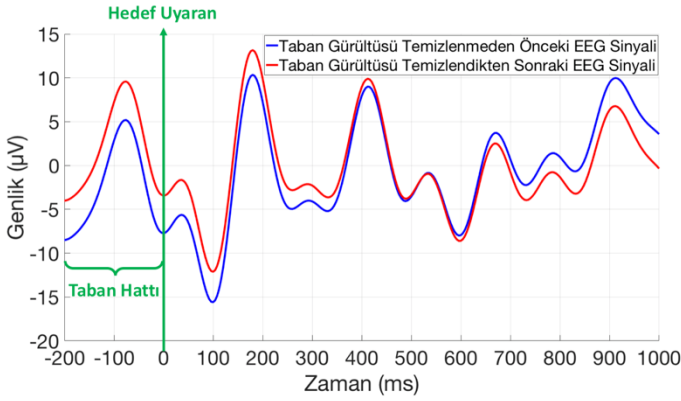
Şekil 4. EEG verileri kaydedilirken kullanılan deney düzenegi

2.4. EEG Sinyal İşleme

Tek bir satır ya da sütun flaşlanmasıyla meydana gelen olayla ilgili potansiyellerin sinyal-gürültü oranı çok düşüktür. Bu nedenle, aynı satır ya da sütun flaşlanmasına ait birden fazla EEG parçasının ortalaması alınarak daha yüksek sinyal-gürültü oranına sahip olay ilişkili potansiyeller elde edilir. En yaygın kullanılan olayla ilgili potansiyel, P300 sinyalidir. Hedef uyarıdan yaklaşık 300 ms sonra oluşan pozitif genlikli tepe noktasına P300 denilmektedir. Aynı şekilde, olayla ilgili benzer başka potansiyeller de vardır. Örneğin 100 ms ve 400 ms'de meydana gelen negatif tepeler sırasıyla N100 ve N400 olarak adlandırılır.

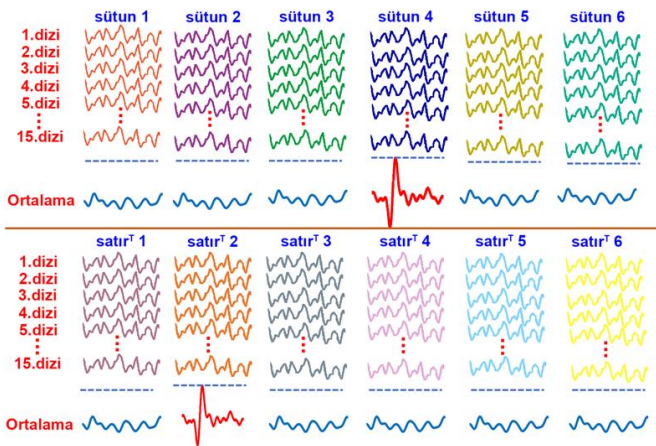
200 ms ve 600 ms'de görünen pozitif tepe noktaları ise sırasıyla P200 ve P600 olarak adlandırılır.

Elde edilen EEG sinyallerine beş aşamalı veri işleme adımı uygulanmıştır. Bunlar ön işleme, segmentasyon, taban çizgisi kaldırma, ortalama ve dalgacık dönüşümü adımlarıdır. Ön işleme adımında, P300 sinyalleri düşük frekans bileşenlerine sahip olduğundan (Rakotomamonjy & Guigue, 2008), 0.1-10 Hz bant geçiren filtre uygulanmıştır. Segmentasyon adımında ise, tüm kanallardaki EEG verisi uyaran gelmeden önceki 200 ms ve uyaran geldikten sonraki 1000 ms'lik parçalara ayrılır. Bu işlem her kanal ve her satır sütun flaşlanması denemesine uygulanır. Taban çizgisi kaldırma adımında ise uyarandan önceki 200 ms'lik EEG parçası taban çizgisi olarak belirlenir ve uyaran sonrası 1000 ms'lik EEG parçası bu taban çizgisine göre düzenlenir. Şekil 5'te taban çizgisi kaldırılmadan önceki ve taban çizgisi kaldırıldıktan sonraki EEG sinyalleri görülmektedir.



Şekil 5. Taban gürültüsü kaldırılmadan önceki ve taban gürültüsü kaldırıldıktan sonraki EEG sinyalleri

Ortalama alma adımında ise taban hat gürültüsü kaldırılmış EEG sinyal parçaları, ilgili satır ve sütun denemelerinin hepsinin ortalaması alınarak olay ilişkili P300 potansiyelleri elde edilir. Şekil 6'da bir kanal için, her bir satır sütun flaşlanmasından sonra elde edilmiş temsili 1.2 saniyelik (200 ms + 1000 ms) EEG parçaları görülmektedir. Temsili görselde, 4.sütun ve 2.satır^T'da yer alan "J" harfi hedef karakter olarak gösterildiğinden, bu sütun ve satır^T'larına ait 1.2 saniyelik EEG parçalarının ortalamasından olay ilişkili P300 sinyali elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6. Her bir sütun ve satır için elde edilmiş temsili ortalama EEG sinyalleri

Dalgacık dönüşümü adımında ise, her iki paradigma verisinden elde edilen CP1, Cz, CP2, P3, P7, Pz, P4, P8, O1, Oz ve O2 kanallarında, tüm kişiler ve tüm hedef karakterler için elde edilmiş ortalama P300 işaretlerine dalgacık dönüşümü uygulanmıştır.

Dalgacık dönüşümü zaman-frekans lokalizasyonu sağlaması açısından önemli bir yöntemdir. Dalgacık analizinin en önemli noktası, uygun bir dalgacık fonksiyonunun seçimidir. Ayrıca dalgacık fonksiyonunun ve analiz edilecek sinyallerin benzerliği, faydalı bilgiler elde etmek için önemlidir (Aydemir & Kayıkcıoğlu, 2011). Literatürde sıklıkla kullanılan Morse, Morlet, ve Bump dalgacık türlerinden Morlet dalgacık, analiz edilecek sinyallere en çok benzeyen şekle sahiptir. Yine Morlet dalgacık fonksiyonunu, frekans alanında iyi lokalize olmasından dolayı bu çalışmada kullanılmıştır.

Sürekli dalgacık dönüşümü (SDD), orijinal $x(t)$ sinyali ile $\psi_{\tau,s}(t)$ dalgacık fonksiyonunun konvolüsyonu olarak tanımlanır ve Eşitlik 1 ile gösterilmektedir;

$$SDD_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

Eşitlikte $\psi_{(\tau,s)}(t)$, $\psi(t)$ dalgacık fonksiyonunun genişleme ve kaydırılmış versiyonunu göstermektedir ve Eşitlik 2'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır;

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) \quad (2)$$

Burada t , τ ve s sırasıyla zaman, öteleme ve ölçekleme parametrelerini göstermektedir (Adeli, Zhou, & Dadmehr, 2003). Dalgacık fonksiyonu Eşitlik 3'te gösterildiği gibi sıfır ortalamaya sahiptir;

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{\tau,s}(t) dt = 0 \quad (3)$$

Dalgacık dönüşümü katsayılarının genlik kareleri toplamları (dalgacık dönüşümü katsayıları gücü, DDKG) Eşitlik 4'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır;

$$DDKG = \sum_{i=1}^n |w_i|^2 \quad (4)$$

Eşitlikte w_i , i . dalgacık dönüşümü katsayısını, n ise toplam dalgacık katsayısını göstermektedir.

3. Sonuçlar

Her iki paradigma kullanılarak kaydedilen EEG verisinden CP1, Cz, CP2, P3, P7, Pz, P4, P8, O1, Oz ve O2 kanallarında, tüm kişiler ve tüm hedef karakterler için elde edilmiş ortalama P300 işaretlerine dalgacık dönüşümü uygulanarak Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da yer alan grafikler elde edilmiştir. Şekillerde 1.sütunda 2B-SS, 2.sütunda 3B-S ve satırlarda ise kanallara ait görseller yer almaktadır. Her bir görselde yatay eksen ms cinsinden zamanı, dikey eksen Hz cinsinden frekansı göstermektedir. Zaman eksenini doğrusal şekilde artarken frekans eksenini logaritmik şekilde artmaktadır. Şekillerdeki renkli kısım ise ilgili frekans ve zaman bölgesindeki büyüklüğü göstermektedir ve 0.1 ile 1 arasında bir değere ait renk skalasını göstermektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, görsel uyaranların çoğunlukla oksipital ve parietal bölgede aktivasyon meydana getirdiği görülmektedir yine temporal ve sentral bölgelerde de aktivasyon meydana getirdiğine dair çalışmalar da bulunmaktadır (Fink vd., 1996; Indovina & Macaluso, 2004; Neville & Lawson, 1987). Bu çalışmada iki farklı görsel uyaran sonucunda oluşan olay ilişkili P300 potansiyeli karşılaştırıldığından sentral (CP1, Cz ve CP2), parietal (P3, P7, Pz, P4 ve P8), ve oksipital (O1, Oz ve O2) bölge elektrotları kullanılarak karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir.

Elde edilen grafikler kabaca değerlendirildiğinde, 3B-S paradigmasına ait ortama P300 sinyallerinin, 2B-SS paradigmasına göre daha geniş bir frekans bandına yayıldığı görülmektedir. Yine bazı istisnalar dışında 3B-S paradigması kullanılarak elde edilen olay ilişkili P300 potansiyelinin 2B-SS paradigması kullanılarak elde edilen olay ilişkili P300 potansiyellerinden daha yüksek genlik değerine sahip olduğu Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'dan görülmektedir. Ayrıca grafiklerden 3B-S paradigmasına ait ortalama P300 sinyallerinin tepe noktasının, 2B-SS paradigmasına ait ortalama P300 sinyallerinden daha erken ortaya çıktığı görülmektedir.

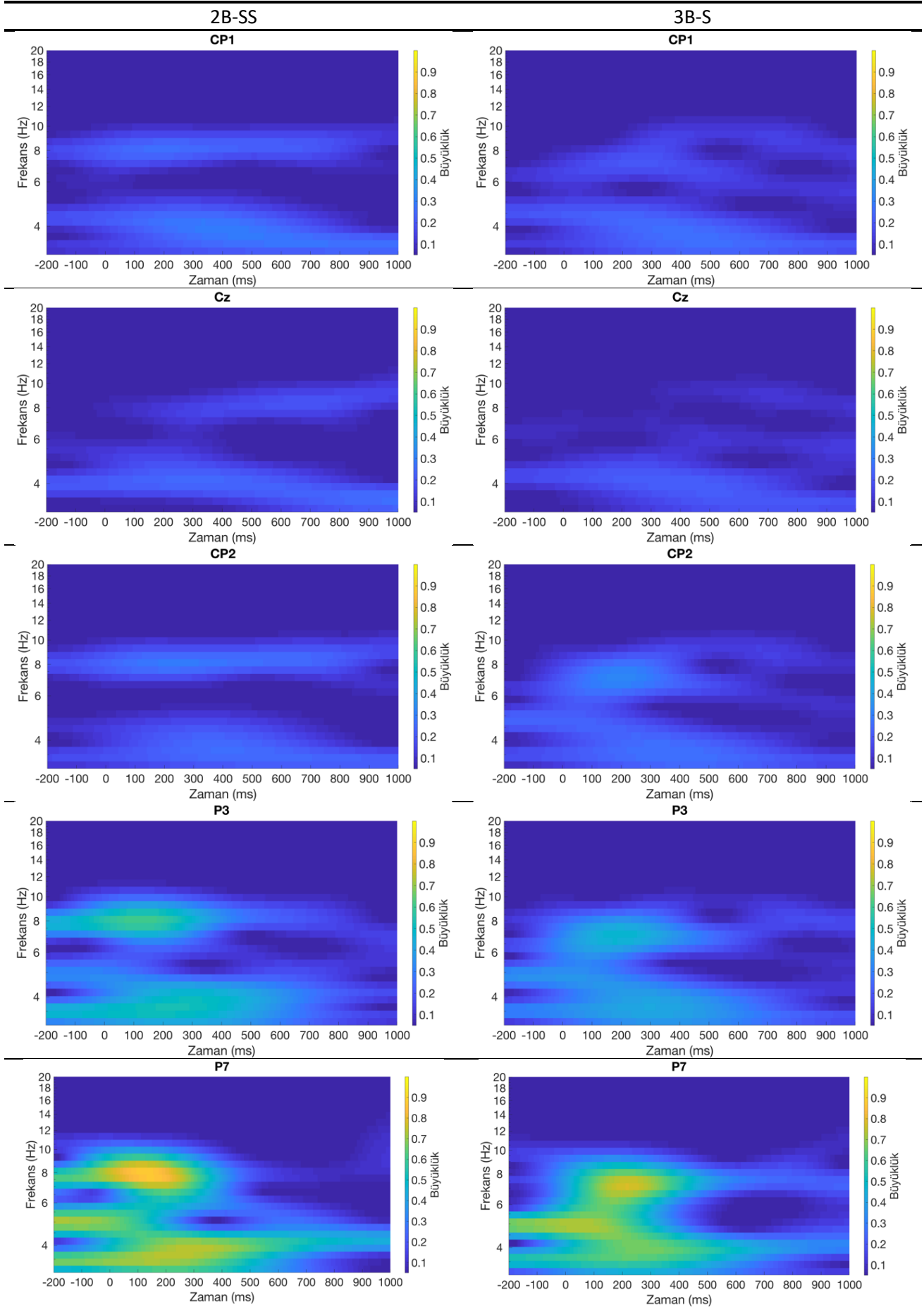
Yapılan ayrıntılı değerlendirmeler sonucunda 3B-S paradigmasına ait P300 sinyalleri özellikle P4, P8 ve O1 kanallarında 2B-SS paradigmasına ait P300 sinyallerinden çok daha yüksek genlik değerine sahiptir. 2B-SS paradigmasında genellikle 3. ve 8. Hz civarlarında bir aktivasyon görünürken, 3B-S paradigması deneyinde 3 ile 10 Hz arasındaki tüm frekans bandında bir aktivasyon görülmektedir. Her iki paradigma arasındaki en büyük fark ise P8 kanalında görülmektedir. Bu kanalda özellikle 0 ile 400 ms arasında 3 ile 10 Hz arası frekans bölgesinde 3B-S paradigması için en yüksek aktivasyon değeri elde edilmiştir.

Ayrıca her iki paradigma arasındaki farkın sayısal açıdan değerlendirilebilmesi için DDKG hesaplanmıştır. Elde edilen DDG değerleri Tablo 1'de görülmektedir.

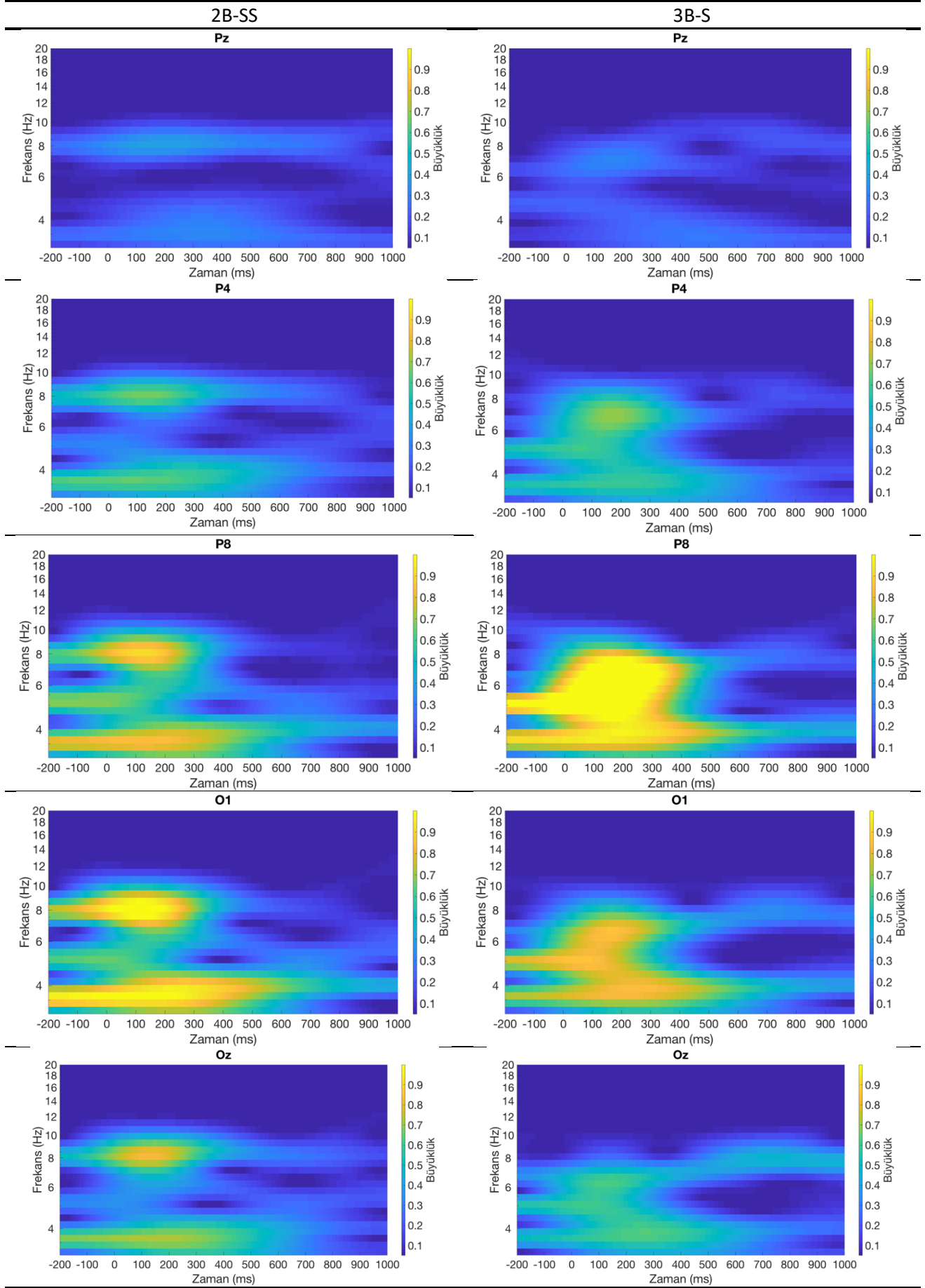
Tablo 1. Her iki paradigma için elde edilen DDKG değerleri

Kanallar	Dalgacık Dönüşümü Katsayıları Gücü		Artış Oranı (%)
	2B-SS	3B-S	
Cp1	118.45	143.87	17.67
Cz	74.96	95.79	21.75
Cp2	135.14	151.08	10.55
P3	472.64	325.53	-25.86
P7	1067.40	886.70	-20.38
Pz	168.06	222.44	24.45
P4	600.45	670.23	10.41
P8	1162.80	2013.70	42.26
O1	1532.60	1220.06	-16.10
Oz	813.02	824.45	1.39
O2	1024.90	1026.80	0.19
ORTALAMA			6.03

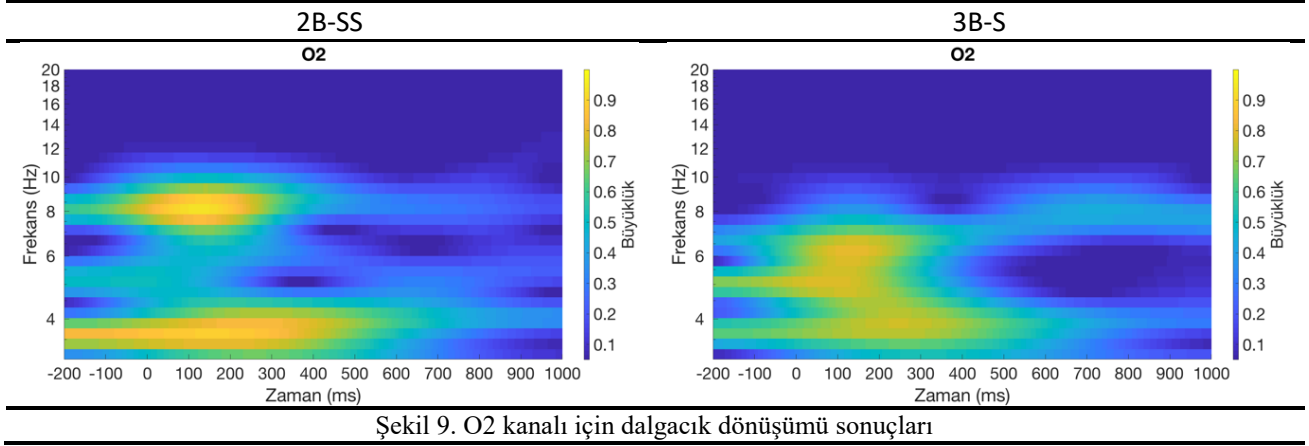
Tablo 1'de yer alan sonuçlar incelendiğinde P3, P7 ve O1 kanallarının dışındaki tüm kanallarda 3B-S paradigmasına ait DDKG, 2B-SS paradigmasına ait DDKG'larından daha yüksektir. 3B-S paradigması kullanılarak ortalama %6.03'lük bir DDKG artış değeri elde edilmiştir.



Şekil 7. Cp1, Cz, Cp2, P3 ve P7 kanalları için dalgacık dönüşümü sonuçları



Şekil 8. Pz,P4, P8, O1 ve Oz kanalları için dalgacık dönüşümü sonuçları



Şekil 9. O2 kanalı için dalgacık dönüşümü sonuçları

4. Bulgular

Çalışma kapsamında literatürde var olan veri seti üzerinde dalgacık dönüşümü esaslı karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir. Klasik 2B-SS paradigması ve önerilen 3B-S paradigması kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen veri seti kullanılarak, her iki paradigmanın olay ilişkili P300 potansiyeli üzerindeki etkisi hem zaman hem de frekans uzayında incelenmiştir. Sonuçlara göre 3B-S paradigması kullanılarak elde edilen P300 sinyalinin, 2B-SS paradigması kullanılarak elde edilen P300 sinyalinden daha fazla frekans bandında aktivasyon gösterdiği görülmüştür. Ayrıca yine 3B-S paradigması kullanılarak elde edilen P300 sinyalinin daha yüksek genlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Her iki paradigma arasındaki en büyük farklılık P8 kanalında görülmüştür. Görsel uyaranların oksipital ve parietal bölgede aktivasyon gösterdiği bilgisinden hareketle, geliştirilen yeni üç boyutlu sütun flaşlanması esaslı uyaran sunumunun beyin görsel bölgesinde daha yüksek aktivasyon oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca 3B-S paradigması kullanılarak elde edilen P300 tepe değerinin, 2B-SS paradigması kullanılarak elde edilen P300 tepe değerinden zaman açısından daha erken oluştuğu görülmektedir. Yapılan literatür araştırması sonucunda, beyin tarafından daha çabuk adapte olunan ve daha kolay yorumlanan paradigmalarda P300 gecikmesinin daha düşük olduğu görülmektedir (Kim, Kim, Yoon, & Jung, 2008; Polich, 1987). Buna göre 3B-S paradigmasından elde edilen P300 sinyalinin gecikme değerinin daha düşük olması, oluşturulan paradigmanın beyin tarafından daha kolay yorumlandığını göstermektedir. 3- İnsan beyni günlük hayatta üç boyut etkisine alışkın olduğundan, hazırlanan üç boyutlu sütun paradigmasıyla elde edilen olay ilişkili potansiyellerin iki boyutlu satır sütun paradigmasına göre daha etkili olduğu düşünülmektedir.

Kaynakça

Adeli, H., Zhou, Z., & Dadmehr, N. (2003). Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform. *Journal of neuroscience methods*, 123(1), 69-87.

Aggarwal, S., & Chugh, N. (2022). Review of machine learning techniques for EEG based brain computer interface. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-20.

Ahmad, M. M., & Ahuja, K. (2022). Role of 5G Communication Along With Blockchain Security in Brain-Computer Interfacing: A Review. *Futuristic Design and Intelligent Computational Techniques in Neuroscience and Neuroengineering*, 65-85.

Arpaia, P., Esposito, A., Natalizio, A., & Parvis, M. (2022). How to successfully classify EEG in motor imagery BCI: a metrological analysis of the state of the art. *Journal of Neural Engineering*.

Arvaneh, M., Robertson, I. H., & Ward, T. E. (2019). A p300-based brain-computer interface for improving attention. *Frontiers in human neuroscience*, 12, 524.

Aydemir, O., & Kayikcioglu, T. (2011). Wavelet transform based classification of invasive brain computer interface data. *Radioengineering*, 20(1), 31-38.

Cao, L., Li, G., Xu, Y., Zhang, H., Shu, X., & Zhang, D. (2021). A brain-actuated robotic arm system using non-invasive hybrid brain-computer interface and shared control strategy. *Journal of Neural Engineering*, 18(4), 046045.

Farwell, L. A., & Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain

potentials. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 70(6), 510-523.

Jalilpour, S., Sardouie, S. H., & Mijani, A. (2020). A novel hybrid BCI speller based on RSVP and SSVEP paradigm. *Computer methods and programs in biomedicine*, 187, 105326.

Janapati, R., Dalal, V., & Sengupta, R. (2022). Advances in Experimental Paradigms for EEG-BCI. Paper presented at the Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications.

Kevric, J., & Subasi, A. (2017). Comparison of signal decomposition methods in classification of EEG signals for motor-imagery BCI system. *Biomedical Signal Processing and Control*, 31, 398-406.

Kim, K. H., Kim, J. H., Yoon, J., & Jung, K.-Y. (2008). Influence of task difficulty on the features of event-related potential during visual oddball task. *Neuroscience letters*, 445(2), 179-183.

Korkmaz, O. E., Aydemir, O., Oral, E. A., & Ozbek, I. Y. (2022). An efficient 3D column-only P300 speller paradigm utilizing few numbers of electrodes and flashings for practical BCI implementation. *PloS one*, 17(4), e0265904.

Li, M., Li, F., Pan, J., Zhang, D., Zhao, S., Li, J., & Wang, F. (2021). The mindgomoku: An online P300 BCI game based on Bayesian deep learning. *Sensors*, 21(5), 1613.

Lu, Z., Li, Q., Gao, N., & Yang, J. (2020). The self-face paradigm improves the performance of the P300-speller system. *Frontiers in computational neuroscience*, 13, 93.

McFarland, D. J., Krusienski, D. J., Sarnacki, W. A., & Wolpaw, J. R. (2008). Emulation of computer mouse control with a noninvasive brain-computer interface. *Journal of Neural Engineering*, 5(2), 101.

Muller-Putz, G. R., & Pfurtscheller, G. (2007). Control of an electrical prosthesis with an SSVEP-based BCI. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 55(1), 361-364.

Obeidat, Q. T., Campbell, T. A., & Kong, J. (2015). Introducing the edges paradigm: a P300 brain-computer interface for spelling written words. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 45(6), 727-738.

Palumbo, A., Gramigna, V., Calabrese, B., & Ielpo, N. (2021). Motor-imagery EEG-based BCIs in wheelchair movement and control: A systematic literature review. *Sensors*, 21(18), 6285.

Polich, J. (1987). Task difficulty, probability, and inter-stimulus interval as determinants of P300 from auditory stimuli. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 68(4), 311-320.

Qu, J., Wang, F., Xia, Z., Yu, T., Xiao, J., Yu, Z., . . . Li, Y. (2018). A novel three-dimensional P300 speller based on stereo visual stimuli. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 48(4), 392-399.

Rakotomamonjy, A., & Guigue, V. (2008). BCI competition III: dataset II-ensemble of SVMs for BCI P300 speller. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 55(3), 1147-1154.

Ramirez-Quintana, J. A., Madrid-Herrera, L., Chacon-Murguia, M. I., & Corral-Martinez, L. F. (2021). Brain-computer interface system based on p300 processing with convolutional neural network, novel speller, and low number of electrodes. *Cognitive Computation*, 13(1), 108-124.

Sellers, E. W., Krusienski, D. J., McFarland, D. J., Vaughan, T. M., & Wolpaw, J. R. (2006). A P300 event-related potential brain-computer interface (BCI): the effects of matrix size and

- inter stimulus interval on performance. *Biological psychology*, 73(3), 242-252.
- Stephe, S., & Kumar, K. V. (2022). Motor Imagery EEG Recognition using Deep Generative Adversarial Network with EMD for BCI Applications. *Tehnički vjesnik*, 29(1), 92-100.
- Won, K., Kwon, M., Ahn, M., & Jun, S. C. (2022). EEG Dataset for RSVP and P300 Speller Brain-Computer Interfaces. *Scientific Data*, 9(1), 1-11.
- Wu, Y., Zhou, W., Lu, Z., & Li, Q. (2020). A spelling paradigm with an added red dot improved the P300 speller system performance. *Frontiers in neuroinformatics*, 14, 589169.
- Wu, Z., Lai, Y., Xia, Y., Wu, D., & Yao, D. (2008). Stimulator selection in SSVEP-based BCI. *Medical engineering & physics*, 30(8), 1079-1088.
- Xu, M., Qi, H., Wan, B., Yin, T., Liu, Z., & Ming, D. (2013). A hybrid BCI speller paradigm combining P300 potential and the SSVEP blocking feature. *Journal of Neural Engineering*, 10(2), 026001.
- Yin, E., Zhou, Z., Jiang, J., Yu, Y., & Hu, D. (2014). A dynamically optimized SSVEP brain-computer interface (BCI) speller. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 62(6), 1447-1456.
- Zhang, X., Jin, J., Li, S., Wang, X., & Cichocki, A. (2021). Evaluation of color modulation in visual P300-speller using new stimulus patterns. *Cognitive Neurodynamics*, 15(5), 873-886.