



Durağan Hal Görsel Uyarılmış Potansiyel Temelli Beyin Bilgisayar Arayüzleri Steady State Visual Evoked Potential Based Brain Computer Interfaces

A. Talha Sözer¹, C. Bülent Fidan²

¹Elektrik – Elektronik Mühendisliği
Karabük Üniversitesi
talhasozer@karabuk.edu.tr

²Mekatronik Mühendisliği
Karabük Üniversitesi
cbfidan@karabuk.edu.tr

Özet

Beyin bilgisayar arayüzü (BBA), kişiye yalnızca beynini kullanarak haberleşme ve kontrol imkânı sağlayan, tıp ve mühendislik bilimlerini kapsayan disiplinler arası bir çalışma sahasıdır. BBA sistemlerinde, beyinde farklı tür aktiviteler esnasında ortaya çıkan elektriksel potansiyeller giriş sinyali olarak kullanılmaktadır. Bu sinyal türlerinden biri de durağan hal görsel uyarılmış potansiyellerdir. Durağan hal görsel uyarılmış potansiyel (SSVEP) temelli BBA sistemlerinde, kullanıcı, bakışlarını, kendisine sunulan belirli frekansta tekrarlanan görsel uyarana odaklandığında beyinde ortaya çıkan sinyaller, giriş sinyali olarak kullanılmaktadır. SSVEP temelli BBA sistemlerinin, yüksek veri transfer hızı, eğitim süresi kısalığı gibi avantajları bulunmaktadır. Bu çalışma, SSVEP temelli BBA sistemlerine ilgi duyan, çalışmalarına giriş yapmak isteyen araştırmacılar için bir inceleme yazısı niteliğindedir.

Abstract

Brain-computer interface (BCI) that provides one's communication and control ability by using only his/her brain, is a multidisciplinary research area that covers medical and engineering science. In BCI systems electrical potentials that emerge as a result of different activities in brain is used as input signal. One of these signal types is steady-state visual evoked potentials. In steady-state visual evoked potential (SSVEP) based BCI systems, the signals emerging at the brain of user are used as input signal when user focuses his/her attention on repetitive visual stimulus that alternates at a specified frequency. SSVEP based BCI have advantages such as high data transfer speed and short training time requirement. This paper is a review article for those who are interested in SSVEP based BCI or want to begin research in this area.

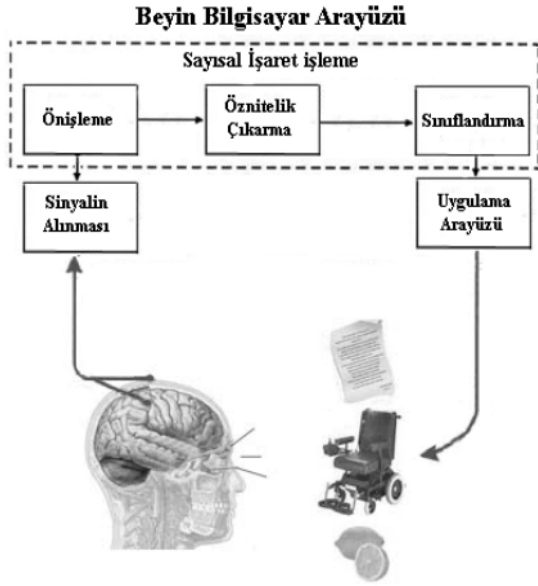
1. Giriş

Beyin Bilgisayar Arayüzleri (BBA), kullanıcıya, dış dünya ile haberleşme ve kontrol faaliyetleri için, beynin normal çıkış kanalları olan çevresel sinir sistemine ve kaslara bağımlı olmayan çıkış yolları sağlar. Beyin bilgisayar arayüzü

çalışmaları, bilinçli kas kontrollerine ihtiyaç duyulan geleneksel teknolojilerin kullanılmasını engelleyen motor hastalıklarına sahip kişiler için yeni ve gelişen iletişim seçenekleri sunabilme ümidini taşımaktadır [1].

BBA araştırmalarının başlıca hedefi, motor nöron hastalıkları gibi kişilerin kaslarını faaliyet dışı bırakan hastalıklar sebebiyle engelli olan kişilerin kısmen de olsa diğer kişilerle iletişime geçebilmesine ve çevresindeki cihazları (bilgisayar, robot kol...) kontrol edebilmesine imkân sağlayan sistemler geliştirmektir. Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS) gibi motor nöron hastalıklarında, merkezi sinir sistemindeki kasların kontrolü ile ilişkili nöronlar hasar görmekte, hasta kaslarını kullanamaz hale gelmektedir. Bununla birlikte zihin fonksiyonları ve hafızaları zarar görmemekte beyin fonksiyonları sağlıklı insanlardaki gibi faaliyetlerini icra edebilmektedir. Bu hastaların duyu organları düzgün çalışabildikleri için görebilmekte, işitebilmekte; zihni faaliyetleri devam ettiği için muhakeme edebilmekte; fakat kaslarını kullanamadıklarından dolayı herhangi bir tepki verememekte ve dış dünya ile iletişimleri kopmaktadır. Beyin bilgisayar arayüzleri aracılığı ile bu gibi hastalara yardımcı olunabileceği kısmen de olsa yaşam kalitelerinin artırılacağı düşünülmektedir. BBA araştırmalarının başlıca hedefi engelli kişiler olmasına rağmen, sinirbilim araştırmaları, cihazların ve robotların uzaktan kontrolü, akıllı ev uygulamaları, oyun sektörü uygulamaları gibi birçok çalışma alanı da hedefleri içerisinde yer almaktadır.

Beyin bilgisayar arayüzleri, kişinin bilinçli beyin faaliyetleri (bir uzvunu hareket ettirdiğini hayal etmesi, bir noktaya dikkatini vermesi...) yürüttüğü esnadaki ortaya çıkan sinyalleri toplayan, bu sinyallere ileri sinyal işleme metotları uygulayarak kişinin icra ettiği zihinsel faaliyeti tespit etmeye çalışan ve tespit edilen bu faaliyet ile ilişkilendirilmiş fonksiyonu (robot kolun, bilgisayarın kontrolü...) icra eden sistemlerdir. Kısaca BBA sistemi, kişiye yalnızca beynini kullanarak haberleşme ve kontrol imkânı sunmaktadır. Şekil 1'de sistemin genel yapısı görülmektedir.



Şekil 1: Beyin bilgisayar arayüzlerinin genel yapısı [2]

Beyin faaliyetleri esnasındaki ortaya çıkan sinyalleri ölçmek için Elektroensefalografi (EEG), Bilgisayarlı Tomografi (CT), Elektrokortikografi (ECoG), Manyetoensefalografi (MEG), Pozitron Emisyon Tomografisi (PET), Fonksiyonel Manyetik Rezonans Görüntüleme (fMRI) teknikler mevcuttur. Fakat noninvazif olması (cerrahi müdahale gerektirmemesi), gerçek zamanlı sistemlerde kullanılabilirliği, veri toplama kolaylığı, maliyetinin düşüklüğü, yüksek zaman çözünürlüğü gibi avantajlarından dolayı BBA sistemlerinde EEG tercih edilmektedir [3].

Mevcut BBA sistemleri, kontrol sinyali üretmek için kullandıkları elektrofizyolojik kaynağa göre Yavaş Kortikal Potansiyeller (SCP), P300 Uyarılmış Potansiyeller, Sensör-Motor Aktivitesi, Görsel Uyarılmış Potansiyeller, Sinir Hücresi Aktivitesi (SNC), Zihni Görev Tepkisi ve Çoklu Nöromekanizma olmak üzere 7 grupta toplanmaktadır [4]. Bunların arasından görsel uyarılmış potansiyel temelli beyin bilgisayar arayüzleri noninvazif yöntemle sinyal alınması, az sayıda EEG kanalı kullanılması, diğer BBA sistemlerine nazaran daha yüksek bilgi transfer hızı sunması, kullanıcı eğitiminin yok denecek kadar kısa olması gibi avantajlarından dolayı dikkatleri üzerine çekmektedir [5].

2. Durağan Hal Görsel Uyarılmış Potansiyel Temelli Beyin Bilgisayar Arayüzleri

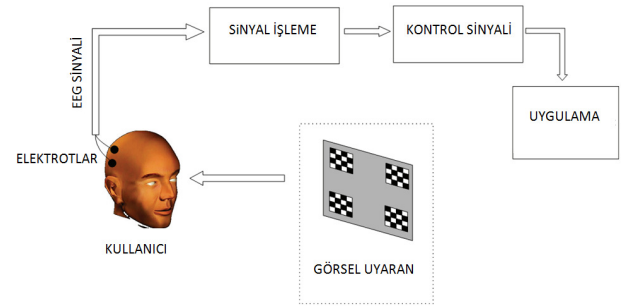
Durağan hal görsel uyarılmış potansiyel (SSVEP) temelli beyin bilgisayar arayüzlerinde beyindeki uyarılmış potansiyel/cevap mekanizmasından faydalanılmaktadır. Uyarılmış potansiyel, EEG, EMG veya diğer elektrofizyolojik kayıt metodları ile deneye uygulanmış bir uyarının (görsel, işitsel, dokunma) ardından sinir sisteminden kayıt edilmiş beyinin normal işleyişindeki elde edilenlerden farklı olan potansiyeldir. Uyarılmış potansiyel, bir dış uyarana karşı merkez sinir sisteminin elektriksel aktivitesinde ortaya çıkan değişim olarak da tanımlanabilir.

SSVEP temelli BBA sistemlerinde, kullanıcıya bilgisayar monitörü veya harici ışık kaynağı (led, flüoresans lamba)

aracılığı ile belirli bir frekansta tekrarlanan görsel uyarılar sunulur. Kişiyeye sunulan bu görsel uyarıların hepsi farklı özellikler (frekans, faz...) barındırmaktadır ve sistem çıkışında ayrı bir komut ile ilişkilidir. Kullanıcı dikkatini kendisine sunulan görsel uyarılardan birine yoğunlaştırdığı vakit, özellikle beyinin görme ile ilişkili bölgesi olan oksipital bölgeden alınan eeg sinyallerinde, görsel uyarının frekansı ile eşleşen periyodik sinyaller gözlemlenebilmektedir. Kişiden alınan eeg sinyallerine bir dizi sinyal işleme metodu (ön-ışılme, öznelik çıkarma, sınıflandırma) uygulanarak, SSVEP sinyalinin özellikleri, dolayısı ile kullanıcının yoğunlaştığı görsel uyarın tespit edilmeye çalışılmaktadır. Kişinin odaklandığı görsel uyarın tespit edilebildiği takdirde, tespit edilen görsel uyarın ile ilişkili komut (tekerlekli sandalye kontrolü...) gerçekleştirilir [6]. Şekil 2'de sistemin genel yapısı görülmektedir.

SSVEP temelli BBA sistemleri 4 adımda incelenecektir.

1. Görsel uyarılmış potansiyeller ve durağan halleri
2. Görsel uyarın
3. Sinyal toplama
4. Sinyal işleme



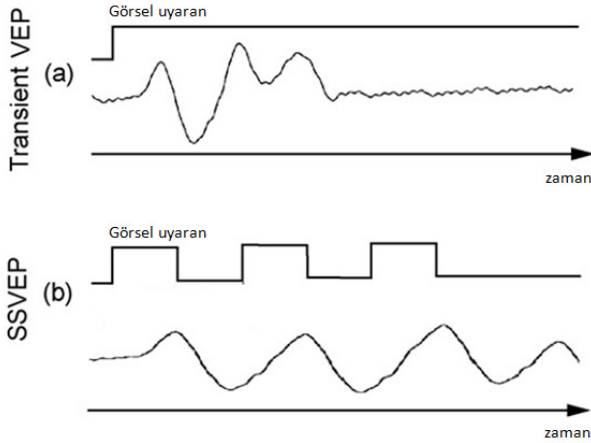
Şekil 2: Durağan hal görsel uyarılmış potansiyel temelli BBA'nın genel yapısı [7]

2.1. Görsel Uyarılmış Potansiyeller Ve Durağan Halleri

VEP, beyindeki görsel bilginin işlenmesindeki elektrofizyolojik mekanizmadır. Sinyaller, uyarandaki (örneğin yanıp sönen ışık) değişikliğe yanıt olarak ortaya çıkmaktadır. Görsel bir alandaki sabit bir uyarın EEG aktivitesinde ciddi bir değişime sebep olmaz. Görsel bir alandaki değişim ile ortaya çıkan sinyaller uyarının belirli özelliklerini yansıtmaktadır [8]. Görsel uyarılmış potansiyeller, geçici görsel uyarılmış potansiyel (Transient VEP) ile durağan hal görsel uyarılmış potansiyel (SSVEP) olarak sınıflara ayrılabilir. Transient VEP ile SSVEP arasındaki ayrım uyarın frekansı ile yapılabilir. Frekansı 3,5 Hz'den küçük olan uyarınların ardından ortaya çıkan sinyaller transient VEP olarak adlandırılır. Oksipital bölgeden kaydedilen transient VEP trifazik dalga biçimindedir ve uyarından 100 ms sonra P100 olarak adlandırılan pozitif tepe ortaya çıkmaktadır (Şekil 3 a).

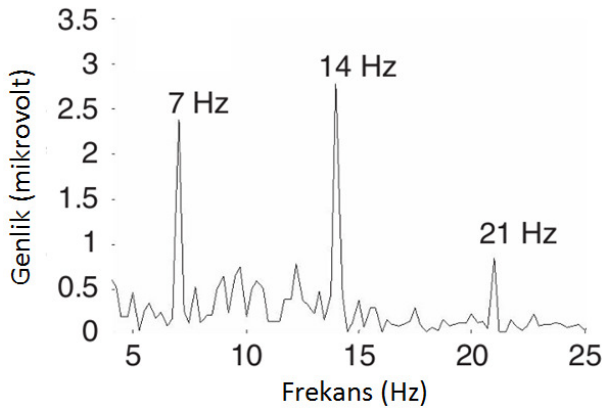
SSVEP, 3,5 Hz-75 Hz arasındaki uyarın frekansı ile ortaya çıkan, uyarının frekansında veya tam katlarında salınım yapan sinüzoidal sinyal biçimine yakın sürekli ve periyodik bir sinyaldir (Şekil 3 b). Bu sinyaller frekans uzayında kolaylıkla

ölçülebilir ve arka plandaki EEG gürültülerinden ayırt edilebilir [9].



Şekil 3: a) VEP sinyali b) SSVEP sinyali [10]

SSVEP sinyali uyarın sinyalinin frekansının tam katları olan bileşenlerden meydana gelir. Şekil 4’de 7 Hz ile uyarılmış SSVEP sinyali görülmektedir. 7 Hz, 14 Hz, 21 Hz bileşenleri rahatlıkla görülmektedir [8].



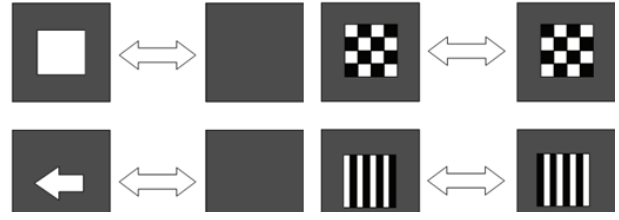
Şekil 4: 7 Hz frekansındaki uyarın ile elde edilen SSVEP sinyali[11]

2.2. Görsel Uyarın

Görsel uyarın, bilgisayar ekranındaki belirli bir frekansta tazelenen şekillerle uygulanabildiği gibi led, flüoresan lamba gibi harici ışık kaynakları ile de sağlanabilir. SSVEP sinyalinin özellikleri seçilen ışık kaynağına, frekansa, renge göre değişmektedir.

SSVEP araştırmalarında uyarın şekli 3 ana kategoriye ayrılmaktadır. Işık kaynağı ile uyarında belirli frekanslara ayarlanmış led, flüoresan lamba, Xe ışık gibi kaynaklar kullanılmaktadır. Uygulamalarda bu kaynaklar harici elektronik devreler ile sürülmektedir. Tek şekil (kare, dikdörtgen, ok) uyarında (Şekil 5), seçilen şekil bilgisayar ekranında belirlenen frekansta yanıp sönerek görsel uyarın sağlanır. Örnek terslenmesi ile uyarında (Şekil 5) satranç tahtası gibi bir şekil bilgisayar ekranında istenilen frekansta periyodik olarak terslenerek görsel uyarın verilir. Tek şekil uyarına örnek terslenmesi ile uyarın biçiminin özel bir hali olarak bakılabilir. Temel fark ise tek şekil uyarının periyodu

şeklin yanıp sönmesi iken örnek terslenmesi ile uyarında bir periyot tek bir terslenme işlemidir [7].



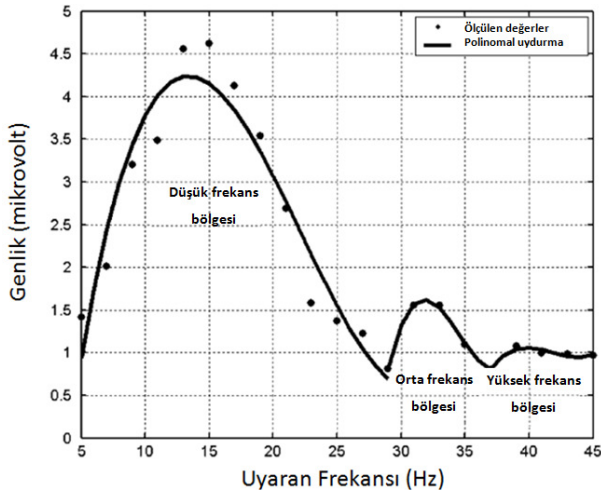
Şekil 5: Tek şekil uyarın (sol), Örnek tersleme ile uyarın (sağ)

Uyarın tipi SSVEP cevabını etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda led ışık kaynağı kullanarak görsel uyarın sağlandığı takdirde SSVEP sinyalinin genliği diğer uyarın tiplerine nazaran daha yüksek olmaktadır. Tek şekil uyarında ise genlik değeri en düşüktür. Bundan dolayı led kullanılan SSVEP temelli BBA uygulamalarında daha yüksek başarı elde edilmektedir [7].

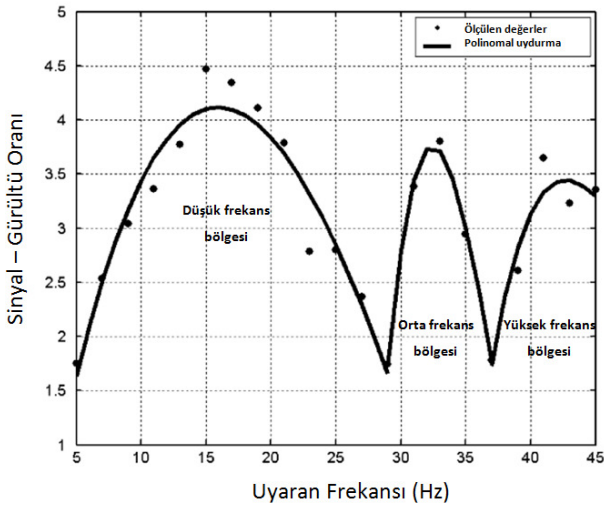
Görsel uyarın kaynağı olarak monitör kullanmanın bazı avantajları vardır. Bu şekilde görsel uyarın, bilgisayardan yazılım aracılığı ile kontrol edilecek ve BBA sisteminin donanımsal bağımlılığı azaltılarak sisteme esneklik kazandırılacaktır. Fakat bazı dezavantajlar beraberinde gelmektedir. Monitörün sağlayabileceği en yüksek frekans kendi yenilenme frekansının yarısıdır. Monitörün yenilenme frekansı istenilen frekansların tam katı olmadığı takdirde hatalı sonuçlar alınmaktadır. Ayrıca uygulanmak istenen farklı frekansdaki hedef sayısı arttıkça işletim sistemi ile ilgili engellerden dolayı gecikmeler olmaktadır. Harici ışık kaynağı ile görsel uyarın verildiği durumlarda ışık kaynağı çoğunlukla sinyal jeneratörü ile kontrol edilmektedir. Bu durum harici donanım gerektirdiği için bazı kısıtlamaları sebep olmaktadır. Fakat harici ışık kaynağı kullanımı uygulanabilecek frekanslar noktasında esneklik sağlamaktadır. İstenilen frekanslarda birçok görsel hedef elde edilebilmektedir [7].

SSVEP temelli BBA uygulamalarında kullanılan frekans sistemin güvenlik ve konforunu doğrudan etkilemektedir. Uygulanabilir frekanslar düşük (1–12 Hz), orta (12–30 Hz) ve yüksek (30–60 Hz) frekans olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. En yüksek genlik 15 Hz civarında elde edilirken en düşük genlik ise yüksek frekans bandına elde edilmektedir.

Mevcut SSVEP temelli BBA uygulamalarında orta ve düşük kullanılmasına rağmen bazı dezavantajları bulunmaktadır. İlk olarak 5 Hz ile 25 Hz arasındaki sinyaller gözü rahatsız etmektedir ve epileptik nöbetleri tetiklemektedir. İkinci olarak düşük frekans bandı alfa bandını kapsamaktadır ve SSVEP sinyalleri beynin normal çalışma sinyalleri ile karışarak sınıflandırmada hatalar olmaktadır. SSVEP temelli BBA uygulamalarında düşük ve orta frekans bandında bulunan frekanslar kullanıldığı zaman ortaya çıkan problemler yüksek frekans bandındaki frekanslar kullanılarak azaltılabilir. Yüksek frekans bandında genlik düşük olmasına rağmen (Şekil 6) sinyal gürültü oranı tüm bantlar için eşittir (Şekil 7) [7].



Şekil 6: SSVEP sinyalinin uyarın frekansı ile genlik değişimi [12]



Şekil 7: SSVEP sinyalinin uyarın frekansı - SNR değişimi [12]

Görsel uyarının rengi de elde edilen SSVEP sinyalinin etkilemektedir. Mevcut sistemlerde yeşil, kırmızı, mavi sarı, siyah, beyaz, gri renkli görsel uyarınlar bulunmaktadır. Farklı renklerde elde edilen en yüksek gerilimler ve bunların elde edildiği frekanslar değişebilmektedir [7].

2.3. Sinyal Toplama

SSVEP çalışmalarında sinyaller EEG cihazı aracılığı ile toplanmaktadır. Görsel uyarın aracılığı ile ortaya çıkan SSVEP sinyalleri tüm kafadan ölçülebilmesine rağmen oksipital bölgeden yapılan ölçümlerde en yüksek SNR değerine ulaşılmaktadır. Mevcut sistemlerde çoğunlukla kayıt 10-20 sisteminde O_1 ve O_2 olarak adlandırılan bölgeden alınmaktadır. En yüksek sınıflandırma başarısı bipolar kayıt yapıldığı zamanlarda elde edilmektedir. Bipolar elektrot yerleşimi ile ortak arkalan aktiviteleri temizlenerek daha temiz sinyal elde edilebilmektedir [10], [11].

SSVEP temelli BBA tasarımında sinyal alınacak noktalara ve sayısına karar vermek kritik noktalardan birisidir. Mevcut

sistemlerde çoğunlukla ıslak elektrot kullanılmaktadır. Bu durumun -kullanılan elektrot sayısının artması ile de orantılı olarak- kullanıcıyı rahatsız etmesi, kayıt için hazırlık süresi gerektirmesi, uzun süre kayıt yapılamaması gibi dezavantajları vardır. Daha az elektrot kullanılması kullanılabilirliği artırmakta, sinyal işleme uygulamaları için işlem yükünü azaltmakta ve sistem maliyeti düşürmektedir fakat sınıflandırma başarısını olumsuz etkilemektedir [11].

2.4. Sinyal İşleme

BBA sistemlerinde, kişiden beyin aktivitelerine karşılık gelen sinyallerin alınmasından, kontrol sinyali üretilmesine kadar olan işlemler ve adımlar sinyal işleme birimi tarafından yürütülmektedir. Bu adımlar genel olarak ön-işleme, öznelilik çıkarma, sınıflandırma başlıkları altında incelenmektedir.

Ön-işleme adımından maksat SSVEP sinyalinin kuvvetlendirilmesidir. EEG sinyalleri gürültülü sinyallerdir ve artefaktlar barındırır. EEG işaretlerinin genlikleri çok düşük mertebelerde olduğundan bu hassas işaretlere çeşitli gürültüler kolayca karışabilmektedir. EEG işaretleri ölçüm sırasındaki elektromanyetik dalga yayabilecek cihazlardan, kas, göz hareketleri gibi fiziksel aktivitelerden etkilenmektedir. Hatta SSVEP sinyali ile ilişkili olmayan beyin aktiviteleri de gürültü sınıfına dâhil edilebilir [2], [10].

SSVEP temelli BBA çalışmalarında sinyali kuvvetlendirmek için farklı yöntemler uygulanmıştır. Kullanıcılar eğitilerek, gürültüye sebep olabilecek hareketlerden kaçınıdırılmaya; EMG sensörü kullanarak veya yüksek frekans analizi yaparak kas aktivitelerinin tespit edilmeye; farklı filtre tasarımları ile Sinyal Gürültü Oranı (SNR) değerinin artırılmaya çalışılmıştır. En sık rastlanılan ön-işleme uygulamaları ise sinüzoidal bileşene uygun filtre tasarlanması ve bağımsız bileşenler analizinin uygulanmasıdır [10]. Ayrıca farklı uyarın tasarımları ile de sinyal kuvvetlendirilmeye, gürültüler azaltılmaya çalışılmaktadır [13].

SSVEP temelli BBA sistemlerinde öznelilik olarak sinyalin frekans veya zaman bilgisinden yararlanılmaktadır. Sistemlerin çoğunda SSVEP sinyalinin frekans bilgisinden yararlanılmaktadır. Sinyalin frekans bilgisini tespit etmek için en çok kullanılan uygulama FFT ile güç spektral yoğunluğunun hesaplanmasıdır. Sinyalin frekans özelliklerinden faydalanan ilgi çeken bir diğer yöntem ise Kanonik korelasyon analizidir [14]. Zaman bilgisinin kullanıldığı BBA sistemlerinde aynı frekansta fakat farklı fazlarda görsel uyarın kullanılmaktadır. Zaman bilgisine göre uyarın tespitinde VEP sinyalinin ortaya çıkış anı hedef uyarını belirlemede kullanılmaktadır. Diğer bir ifade ile aynı frekansta fakat farklı fazdaki uyarınlar aynı dalga şeklinde SSVEP sinyali oluşturmaktadır fakat ortaya çıkış anları farklıdır [15].

Sınıflandırma işlemi genellikle eşikleme ile yapılmaktadır. Güç spektral yoğunluğu hesaplanmış sinyalde, kullanıcıya sunulan uyarınların frekansından birine karşılık gelen frekansın genlik değeri, belirlenen bir değeri geçtiği takdirde, kullanıcının bu frekanstaki uyarına odaklandığı kabul edilmektedir [9]. Kanonik korelasyon analizinde, uygulanan tüm frekans değerleri için katsayı hesaplanmakta; en yüksek katsayının hesaplandığı frekans, kullanıcının seçtiği frekans olarak kabul edilmektedir [14].

BBA sistemlerinde başarı, veri transfer hızı (Information Transfer Rate) ile ölçülmektedir. Kısaca birim zamanda transfer edilen veri miktarı olarak ifade edilebilir. Veri transfer hızı kavramı hız ve doğruluk değerlerine bağlıdır. Eğer bir testte N adet muhtemel seçenek var ve hepsinin seçilebilme olasılığı aynı ise ve P ile istenilen durumun seçilmiş olma olasılığı ifade edilirse kalan durumların seçilme olasılığı

$$\frac{(1-P)}{(N-1)} \quad (1)$$

olarak gösterilir. Dakikadaki seçim sayısı s ile gösterilirse veri transfer hızı

$$ITR = s \times \left[\log_2 N + P \log_2 P + (1-P) \log_2 \frac{(1-P)}{(N-1)} \right] \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir [6], [10].

Veri transfer hızı kullanıcının seçebileceği seçenek sayısı ile arttığı için ve SSVEP temelli BBA'lar çok seçenekli olarak gerçekleştirilebildikleri için SSVEP temelli BBA'larda diğer BBA'lara nazaran daha yüksek veri transfer hızına ulaşılabilir [10].

3. Sonuçlar

SSVEP temelli beyin bilgisayar arayüzleri yüksek veri transfer hızı, çok komut imkânı, düşük eğitim süresi gibi BBA çalışmalarındaki kritik noktalarda artıları olmasına rağmen mevcut çalışmaların çoğu laboratuvar ortamında kalmaktadır. Bu sistemlerin gerçek ortamlarda kullanılabilmesi için bu ortamların daha gürlüğü olduğu göz önünde bulundurularak sinyal toplama ve işleme yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Sistemlerin uzun süre kullanılabileceği varsayılarak konforunun ve kullanıcı dostluğunun artırılması gerekmektedir. Ayrıca ticari olabilmesi için fiyatının da dikkate alınması kaçınılmazdır.

4. Kaynaklar

- [1] J. Wolpaw, N. Birbaumer, W. J. Heetderks, D. J. McFarland, P. H. Peckham, G. Schalk, E. Donchin, L. A. Quatrano, C. J. Robinson, and T. M. Vaughan, "Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting," *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–173, Jun. 2000.
- [2] Ö. Aydemir and T. Kayıkçıoğlu, "EEG Tabanlı Beyin Bilgisayar Arayüzleri," *Akad. Bilişim*, pp. 7–13, 2009.
- [3] A. Roman-Gonzalez, "EEG Signal Processing for BCI Applications," *Adv. Intell. Soft Comput.*, vol. 98, pp. 571–591, 2012.
- [4] A. Bashashati, M. Fatourehchi, R. K. Ward, and G. E. Birch, "A survey of signal processing algorithms in brain-computer interfaces based on electrical brain signals," *J. Neural Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 32–57, Jun. 2007.
- [5] G. Garcia, "High frequency SSVEPs for BCI applications," *Comput. Interact.*, pp. 2–5, 2008.
- [6] X. Gao, D. Xu, M. Cheng, and S. Gao, "A BCI-based environmental controller for the motion-disabled," *IEEE*

- Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 137–140, Jun. 2003.
- [7] D. Zhu, J. Bieger, G. Garcia Molina, and R. M. Aarts, "A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs," *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2010, pp. 1–12, Jan. 2010.
- [8] M. Cheng, X. Gao, S. Gao, and D. Xu, "Design and implementation of a brain-computer interface with high transfer rates," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 49, no. 10, pp. 1181–1186, Oct. 2002.
- [9] F. Beverina, G. Palmas, S. Silvoni, F. Piccione, and S. Giove, "User adaptive BCIs: SSVEP and P300 based interfaces," *PsychNology J.*, vol. 1, no. 4, pp. 331–354, 2003.
- [10] F.-B. Vialatte, M. Maurice, J. Dauwels, and A. Cichocki, "Steady-state visually evoked potentials: focus on essential paradigms and future perspectives," *Prog. Neurobiol.*, vol. 90, no. 4, pp. 418–438, Apr. 2010.
- [11] Y. Wang, X. Gao, B. Hong, C. Jia, and S. Gao, "Brain-computer interfaces based on visual evoked potentials," *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 27, no. 5, pp. 64–71, 2008.
- [12] Y. Wang, R. Wang, X. Gao, B. Hong, and S. Gao, "A practical VEP-based brain-computer interface," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 234–239, Jun. 2006.
- [13] Z. Yan, X. Gao, G. Bin, B. Hong, and S. Gao, "A half-field stimulation pattern for SSVEP-based brain-computer interface," in *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2009, pp. 6461–6464.
- [14] Z. Lin, C. Zhang, W. Wu, and X. Gao, "Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 53, no. 12, pp. 2610–2614, Jun. 2006.
- [15] T. Kluge and M. Hartmann, "Phase Coherent Detection of Steady-State Evoked Potentials: Experimental Results and Application to Brain-Computer Interfaces," in *IEEE EMBS Conference on Neural Engineering*, 2007, pp. 425–429.