

EEG Tabanlı Beyin-Bilgisayar Arayüzleri ile Sanatsal Deneyim Tasarımı

Designing Artistic Experiences with EEG-Based Brain-Computer Interfaces

Fatih Kılavuz*, Bahadır Uçan**

DOI: 10.46641/medeniyetsanat.1805050

Research Article / Araştırma Makalesi

Abstract

This study explores the role of EEG-based Brain-Computer Interfaces (BCIs) in artistic experience design across conceptual, methodological, and experiential dimensions. The main aim is to explain the transformative impact of BCI technologies on art creation and perception, identify technical and methodological limitations in current research, and propose a holistic conceptual perspective for future research. The literature at the intersection of neurotechnology, art, and user experience has been critically reviewed, and existing applications have been qualitatively evaluated. Findings suggest that EEG-based systems translate cognitive states of artists and perceivers into an aesthetic interface. EEG's low spatial resolution and high temporal resolution coupled with its portability allow for real-time interaction in artistic environments, while EEG's low spatial resolution and signal noise render accuracy and reproducibility difficult. The study positions BCI not merely as a technical device but as an aesthetic interface that makes human cognitive work legible. Accordingly, artistic practice facilitated by BCI creates dynamic, interactive, and customized experiences based on co-creation between the artist and viewer, infusing neurophysiological depth into art's inherently subjective nature.

Keywords: Brain-Computer Interface, EEG, Artistic Experience, Neuroaesthetics

Öz

Bu çalışma, EEG tabanlı Beyin-Bilgisayar Arayüzlerinin (BBA) sanatsal deneyim tasarımındaki rolünü kavramsal, metodolojik ve deneyimsel boyutlarda ele almaktadır. Temel amaç, BBA teknolojilerinin sanat yaratımı ve algısı üzerindeki dönüştürücü etkisini açıklamak, mevcut araştırmalardaki teknik ve metodolojik sınırlamaları belirlemek ve gelecekteki araştırmalar için bütüncül bir kavramsal perspektif önerisi sunmaktır. Nöroteknoloji, sanat ve kullanıcı deneyiminin kesişimindeki literatür, eleştirel bir bakış açısıyla incelenmiş; mevcut uygulamalar nitel olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, EEG tabanlı sistemlerin sanatçıların ve sanatı alımlayıcıların bilişsel durumlarını estetik bir arayüze dönüştürdüğünü göstermektedir. EEG'nin düşük uzamsal çözünürlüğü ve yüksek zamansal çözünürlüğü, taşınabilirliğiyle birlikte sanatsal ortamlarda gerçek zamanlı etkileşime olanak tanırken, EEG'nin düşük uzamsal çözünürlüğü ve sinyal gürültüsü doğruluğu ve yeniden üretilebilirliği zorlaştırmaktadır. Çalışma, BBA'yı yalnızca teknik bir araç olarak değil, aynı zamanda insanın bilişsel çalışmasını okunabilir kılan estetik bir arayüz olarak konumlandırmaktadır. Dolayısıyla, BBA tarafından kolaylaştırılan sanatsal uygulama, sanatçı ve alımlayıcı arasındaki ortak yaratıma dayalı dinamik, etkileşimli ve kişiselleştirilmiş deneyimler yaratır ve sanatın özünde öznel olan doğasına nörofizyolojik derinlik katmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Beyin-Bilgisayar Arayüzü, EEG, Sanatsal Deneyim, Nöroestetik

Fatih Kılavuz* Yıldız Teknik Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İletişim ve Tasarım Bölümü İletişim Tasarımı pr., fkilavuz@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8305-4754.

Bahadır Uçan** Yıldız Teknik Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İletişim ve Tasarım Bölümü İletişim Tasarımı pr., bucan@yildiz.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4062-0469.

Giriş

Günümüz dijital çağında, kullanıcı deneyimi ve etkileşim tasarımı, kişiselleştirme ve derinlemesine katılım arayışıyla sürekli olarak yeniden tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, Beyin-bilgisayar arayüzleri (BBA), insan ve teknoloji arasındaki doğrudan iletişim köprüsü olarak çığır açan bir potansiyele sahiptir. Geleneksel olarak tıbbi ve yardımcı teknolojiler alanında kullanılan BBA sistemleri, artık bilişsel ve duygusal durumları algılayarak insan-bilgisayar etkileşimini kökten dönüştürebilecek yeni bir ifade ve kontrol mekanizması sunmaktadır.

Sanat ve tasarım, insan yaratıcılığının ve duygusal ifadesinin en üst noktalarından biri olarak, BBA teknolojisinin bu dönüşüm potansiyelini keşfetmek için ideal bir alandır. Yaratıcılık sürecinin nöral mekanizmalarını doğrudan arayüze dahil etmek, sanatsal üretimi sadece motor becerilere bağımlı olmaktan çıkarıp, içsel niyet, duygu ve dikkat gibi bilişsel durumlarla yönlendirilen yeni bir alana taşımaktadır. Sanatsal deneyimlerin bireyin nöral imzalarıyla şekillendirilmesi, pasif izleyicilikten aktif, içsel durumla yönlendirilen bir katılıma geçişi mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, sadece sanatsal ifade için yeni mecralar yaratmakla kalmaz, aynı zamanda estetik deneyimin temelinde yatan bilişsel mekanizmaların daha iyi anlaşılmasına da olanak tanır.

Beyin-bilgisayar arayüzleri; son yıllarda eğitim, sanat ve insan-bilgisayar etkileşimi alanlarında dikkat çeken bir araştırma sahası haline gelmiştir. Tüketici sınıfı elektroensefalografi (EEG) cihazlarına dayalı BBA uygulamalarının; oyunlardan rehabilitasyona kadar geniş bir alana yayılması, bu teknolojilerin erişilebilirliğini artırmıştır. Ancak bu hızlı gelişime rağmen, BBA'nın kullanıcı deneyimi, estetik boyutu ve gündelik yaşamla entegrasyonu konusunda halen birçok belirsizlik bulunmaktadır (Welter & Lotte, 2024). Literatürde yapılan çalışmalar farklı bağlamlara odaklanmıştır. Örneğin, sanatsal BBA uygulamaları yaratıcı ifade biçimlerini araştırarak pasif BBA perspektifinden sanat deneyiminin mümkün olduğunu göstermiştir. EEG tabanlı çalışmalar, estetik deneyimlerin beyinle ilişkisini incelemiş ve bireysel farklılıkların deneyim tasarımında önemli olduğunu ortaya koymuştur. (Welter & Lotte, 2024). Bunun yanında tüketici sınıfı cihazlarla yapılan sistematik derlemeler, oyunların çoğunun araştırma amaçlı basitleştirildiğini ve gerçek yaşam deneyimlerinin sınırlı şekilde yansıtıldığını vurgulamaktadır (Vasiljevic & de Miranda, 2019). Ayrıca BBA tabanlı robotik ve yardımcı teknolojiler, özellikle felçli bireyler için umut vadeden uygulamalar sunarken, taşınabilirlik, düşük maliyet ve kullanılabilirlik konularında önemli sınırlılıklar bildirilmiştir (van de Laar vd., 2013; Vasiljevic & de Miranda, 2019).

Sanat alanında BBA kullanımı, aynı zamanda sanatın epistemolojik sınırlarını da sorgulamaktadır. Beyin verilerinin sanatsal bir dile dönüştürülmesi, yaratıcılığın ölçülebilirliği, duyguların temsil biçimleri ve insan-makine etkileşiminin estetik niteliği gibi farklı konuları gündeme getirmektedir. Bu teknolojiler aracılığıyla üretilen sanat eserleri hem bireysel bilinç hem de kolektif deneyim arasındaki ilişkiyi yeniden tanımlamakta; sanatın öznel algısına bilişsel şeffaflık kazandırmaktadır.

Bu alandaki araştırmalar, sanat ve nöroteknoloji kesişiminde önemli bir potansiyel taşısa da çeşitli sınırlılıklar barındırmaktadır. Öncelikle EEG verilerinin düşük uzamsal çözünürlüğü, sanatsal bağlamda yüksek doğrulukta duygu veya düşünce temsillerinin oluşturulmasını güçleştirmektedir. Beyin sinyallerinin bireyler arasında önemli ölçüde farklılık göstermesi, deneylerin tekrarlanabilirliğini ve sonuçların genellenebilirliğini azaltmaktadır. Sanat alanındaki BBA uygulamaları çoğunlukla küçük örneklem gruplarıyla yürütülmekte; deneysel doğrulama

yerine estetik gözlem ön planda tutulmaktadır. Bu durum, sanat ve nöroteknoloji arasındaki disiplinlerarası köprünün kavramsal olarak güçlü olmasına rağmen metodolojik açıdan henüz olgunlaşmadığını göstermektedir (Yanci Liu vd., 2024; Zioga vd., 2018; Pinegger vd., 2017).

BBA araştırmalarının ve potansiyelinin çeşitliliği dikkate değer olsa da bazı teknik ve deneysel sorunlar hâlen aşılabilmiş değildir. Özellikle invaziv olmayan, yani cerrahi müdahale gerektirmeyen taşınabilir sistemlerin doğruluk ve güvenilirlik düzeyi yeterli olgunluğa ulaşmamıştır (Pasqualotto vd., 2011). EEG ölçümlerinde bireysel farklılıkların yanı sıra sinyal gürültüsü, veri kalitesini düşürmekte ve sonuçların tutarlılığını sınırlamaktadır (Welter & Lotte, 2024). Sanat ve estetik odaklı çalışmalarda ise deneysel tasarımların kısıtlı olması, kullanıcı deneyiminin derinlemesine analiz edilmesini engellemektedir (Andujar vd., 2015). Ayrıca, geleneksel BBA sistemleri ile yeni nesil giyilebilir cihazlar arasındaki performans farkı, teknolojinin sanatsal ortamlarda yaygın olarak kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Welter & Lotte, 2024; Andujar vd., 2015).

Tüm bu bulgular, BBA araştırmalarının farklı alanlarda yenilikçi olanaklar sunduğunu ancak henüz olgunlaşma sürecinde bulunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle estetik deneyim ve yaratıcı uygulamalar bağlamında hem teknik doğruluk hem de kullanıcı merkezli tasarım konularında eksiklikler göze çarpmaktadır. Bu noktada gelecekteki çalışmaların yalnızca teknolojik gelişmelere odaklanması değil, aynı zamanda bireyin deneyim dünyasını ve sanatsal algısını merkeze alan bütüncül yaklaşımlar geliştirmesi gerekmektedir (Andujar vd., 2015). Bu yaklaşımlar, mevcut çalışmanın odaklandığı beyin-bilgisayar arayüzü temelli sanatsal deneyimlerin kuramsal ve uygulamalı çerçevesini anlamak açısından da önemli bir zemin oluşturmaktadır.

Bu makale, mevcut literatürden yola çıkarak bu alanla ilgili sınırlılıkları tanımlamayı, tanımlanan sınırlılıkları aşmaya dair çıkarımları ve BBA'nın sanat/deneyim odaklı kullanımına ilişkin bütüncül bir kavramsal perspektif önerisi sunmayı amaçlamaktadır. Böylece hem teknik zorlukların hem de estetik boyutların birlikte ele alınmasıyla, gelecekte kullanıcı odaklı ve yaratıcı BBA uygulamalarına yönelik daha sağlam bir temel oluşturulması hedeflenmektedir.

Bu çalışma ayrıca hem sinirbilim tabanlı etkileşim hem de üretken sanat tasarımı disiplinlerine önemli katkılar sunmayı hedeflemektedir. Uygulanan eleştirel literatür taraması yöntemiyle, EEG verilerinin karmaşık sanatsal çıktılara dönüştürülme potansiyelini ortaya koyarak bilişsel durumlar ile estetik çıktılar arasındaki ilişkiyi somutlaştırmaktadır. Bu makale, özellikle BBA'nın sanatsal yaratım sürecinde pasif gözlemden aktif, nörofizyolojik temelli bir tasarıma geçişini sağlayarak disiplinler arası bir köprü kurmaktadır. Beklenen katkı, hem nörobilim tabanlı sanat ve tasarım alanındaki bilgi boşluğunu doldurmak hem de bireyin iç dünyasını yansıtan, son derece kişiselleştirilmiş ve erişilebilir sanatsal deneyimlerin geliştirilmesine katkı sunacak çıkarımlar yapmaktır. Çalışmanın özgün değeri; nitel bir yaklaşımla sentezlenen dağınık BBA ve sanat literatürünün, teknolojik kısıtlar ile estetik deneyim arasındaki ilişkisini bütüncül bir kavramsal perspektiften ele almasıdır. Aynı zamanda bu alandaki tasarım süreçleri için sistematik bir referans noktası oluşturmaktadır.

1. Sanatsal Deneyim, Sanatçı ve Sanatı Alımlayan (İzleyici) Arasındaki İlişki

Sanat kavramının tanımı tarih boyunca farklı düşünsel yaklaşımlar arasında tartışma konusu olmuştur. Her dönemde bu kavram üzerine ortak bir uzlaşıya varmak mümkün olmasa da, çeşitli kaynaklar sanatın genel çerçevesini belirlemeye yönelik ortak eğilimler sunmaktadır.

- Sanat; insan yaratıcılığının ve hayal gücünün ürünü olan, teknik beceri, güzellik, duygusal güç veya kavramsal fikirler içeren çok çeşitli insan etkinliklerini kapsar. Sanatın kesin ve evrensel bir tanımı yoktur; tarih boyunca ve kültürler arasında yorumu değişmiştir. Klasik anlamda resim, heykel ve mimari gibi görsel sanatlar; tiyatro, dans, edebiyat, müzik, film ve diğer medya ise sanatın daha geniş tanımına dahildir (Núñez-Cacho vd., 2024; Sun & Zhou, 2025; Zaidel, 2025).

- Sanat, insan toplumunun temel bir parçası olarak, duyguları ifade etme, toplumsal kimliği simgeleme, kültürler arası iletişim kurma ve insan deneyimini kaydetme işlevi görür. İnsanlar, sanat yoluyla gerçek yaşamı belgeleyebilir, geleceğe dair hayallerini ifade edebilir ve doğanın bilinmeyen güçlerine karşı saygılarını gösterebilirler (Sun & Zhou, 2025; Zaidel, 2025; Hebi, Czamanski-Cohen & Azaiza, 2022; de Castro Silva vd., 2020).

- Sanat, duyguları ve düşünceleri sözsüz olarak da ifade edebilen, evrensel bir dildir. Kültür, zaman ve insanları birbirine bağlar; farklı bakış açılarını barındırır ve yerel kültürleri değerli kılar (Hebi, vd., 2022; de Castro Silva vd., 2020; Elliott, 2011).

Sanatçı, kendi yaşadığı duyguları ve düşünceleri belirli dışsal işaretler aracılığıyla başkalarına aktarırken, izleyici bu duygulardan etkilenir ve benzer duygusal deneyimler yaşar; bu durum, sanatın özünde yer alan iletişimsel bir süreci temsil etmektedir (Eber, 2000). Sanat, sanatçı ile izleyici arasında kurulan sosyokültürel bir iletişim biçimi olarak düşünülebilir; sanatçı, estetik fikirleri ve teknik yetkinliğiyle bir eser üretirken, izleyicinin bu eseri anlamlandırabilmesi için belirli bir deneyim, kültürel birikim ve sanat bilgisine sahip olması gerekmektedir (Zaidel, 2025; Sauri, Gunara & Cipta, 2022). Ancak sanat yalnızca bir nesne sunmakla kalmaz, aynı zamanda duygusal, düşünsel ve kültürel bir etkileşim alanı yaratır; izleyici, sanat eserini kendi yaşantısı ve deneyimleriyle yorumlayarak sanatçıyla arasında bir anlam köprüsü kurmaktadır (Elliott, 2011; Sauri vd., 2022).

Sanatçı, kendi düşünce dünyasını, duygularını ve kavramsal yaklaşımlarını bir sanat eseri aracılığıyla somutlaştırır. Ancak bu ifadenin alımlayıcı tarafından nasıl çözümleneceği, izleyicinin bilişsel, kültürel ve estetik birikimiyle doğrudan ilişkilidir. Her sanat eseri, sanatçının niyetini bütünüyle yansıtmayabilir; izleyici, kendi deneyimsel ve kültürel çerçevesi içinde eseri yeniden anlamlandırır (Elliott, 2011). Bu nedenle sanatın “anlaşılması” tek yönlü bir süreç değil, çok katmanlı bir etkileşim alanı olarak değerlendirilebilir.

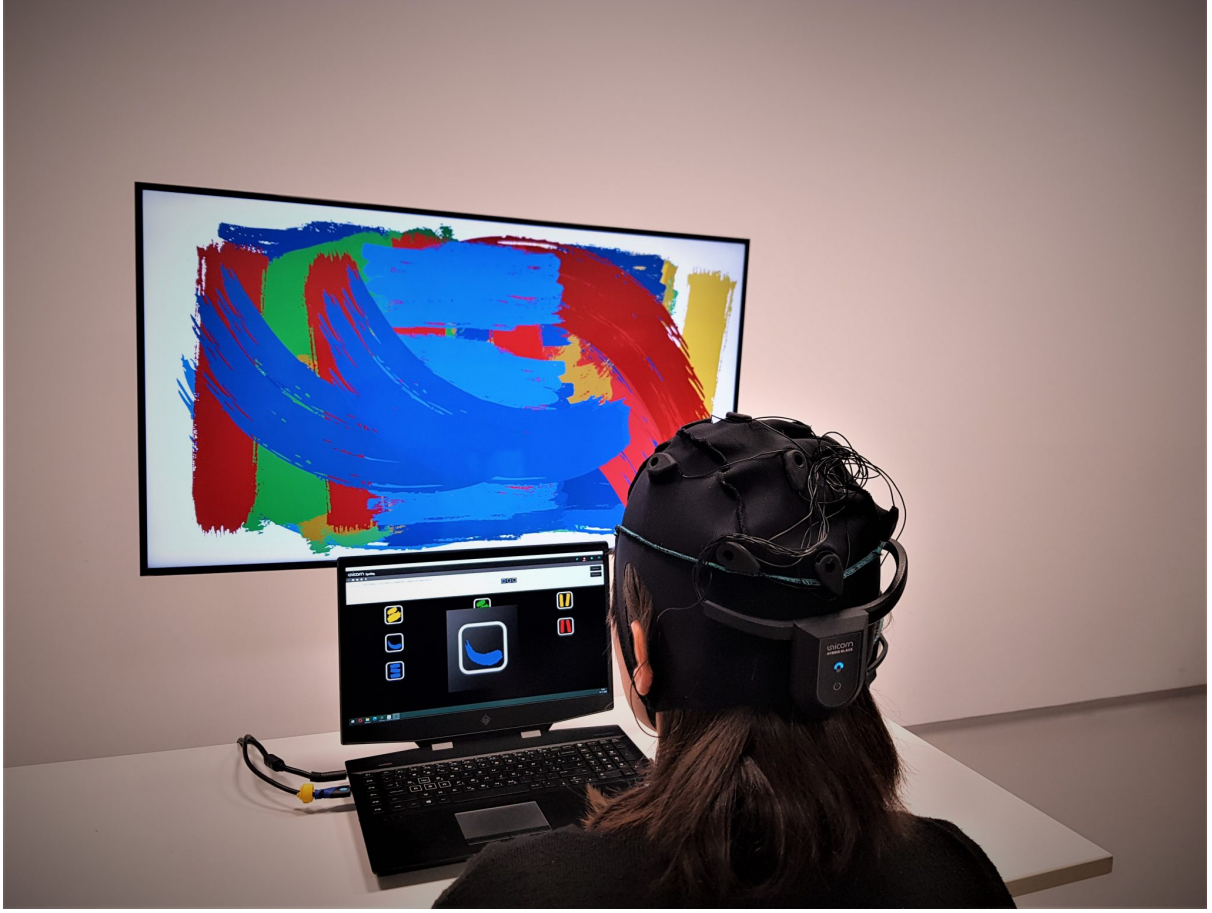
Kavramsal sanatın ortaya çıkışıyla birlikte sanatçının iletmek istediği mesajın doğru biçimde anlaşılması giderek ikinci plana düşmüştür. 1960’lardan itibaren fikir merkezli üretim anlayışı, sanat nesnesinin maddesel değerinden çok düşünsel boyutuna odaklanmış, böylece anlamın üretiminde izleyicinin konumu güçlenmiştir. Görsel 1’de örnek bir kavramsal sanat enstalasyonuna yer verilmiştir. Yine bu dönemde “yanlış anlama” veya “anlamsızlık” gibi kavramlar, sanatın bir kusuru olmaktan ziyade, onun doğasının bir parçası haline gelmiştir.

Sanatçılar, anlamın nihai belirleyicisi olmaktan ziyade, izleyiciyi sürece dahil eden bir yapı kurmaya yönelmişlerdir. Böylece, anlam üretimi sanatçı ile izleyici arasında ortaklaşa bir deneyim halini almıştır.



Görsel 1. *Bir ve Üç Sandalye (One and Three Chairs)*, Joseph Kosuth, 1965. Museum of Modern Art (MoMA). Erişim adresi: <https://www.moma.org/collection/works/81435>

Etkileşimli sanat pratikleri, bu dönüşümün önemli bir aşamasını oluşturur. Dijital teknolojilerin, özellikle sanal ve artırılmış gerçeklik ile beyin-bilgisayar arayüzlerinin sanat alanına entegrasyonu, izleyicinin yalnızca anlamın değil, aynı zamanda eserin oluşum sürecinin de aktif bir parçası olmasını mümkün kılmıştır. Bu tür uygulamalarda sanatçı, başlangıçta bir kavramsal çerçeve veya deneyimsel altyapı oluşturur; izleyici ise bedensel hareketleri, duygusal tepkileri veya nörofizyolojik sinyalleri aracılığıyla bu yapıyı dönüştürür. Özellikle beyin-bilgisayar arayüzü (BBA) destekli sanatsal deneyimlerde, izleyicinin beyin dalgaları doğrudan eserin biçimsel ya da görsel niteliklerini belirler. (Bkz. Görsel 2) Böylece her izleyici, eserin eşsiz bir varyasyonunu üretir; sanat eseri, tekil bir nesne olmaktan çıkarak dinamik, kişisel ve deneyimsel bir sürece dönüşür.

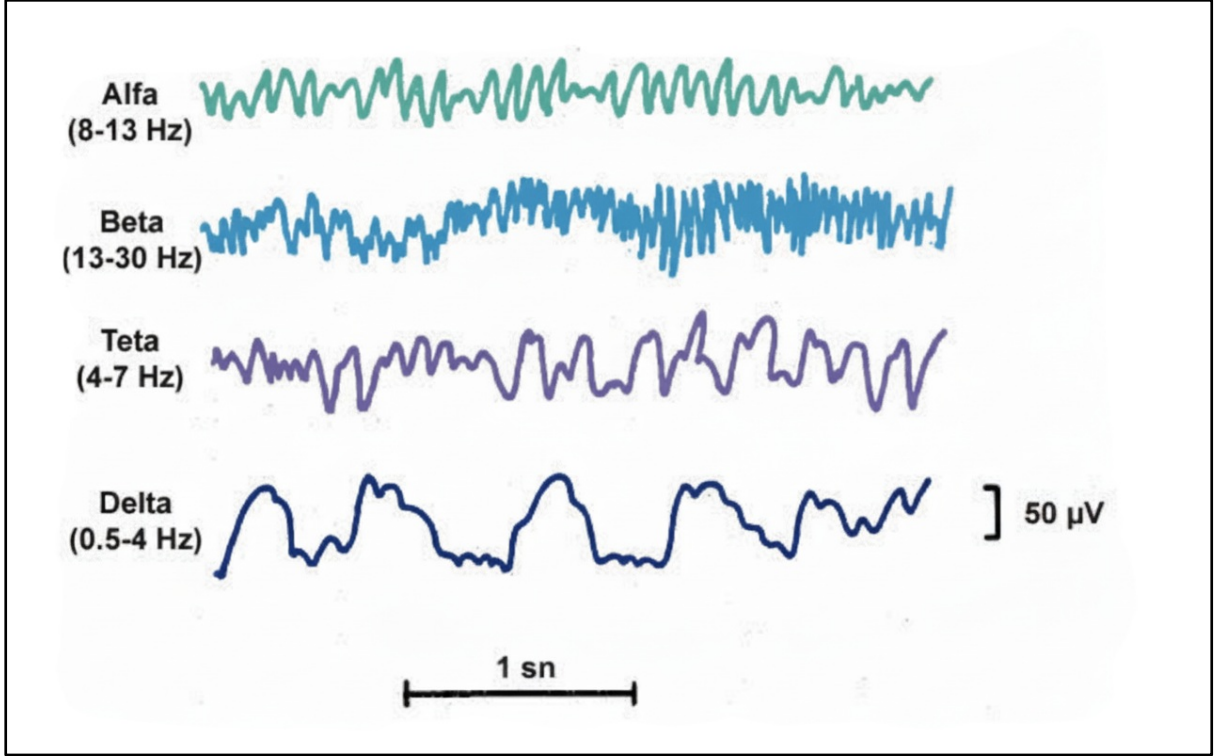


Görsel 2. BBA ile Boyama, RUK/DDTLAB, 2021. Erişim adresi:
<https://www.mcruk.si/en/article/bci-painter>

Bu noktada, sanatçı-alımlayıcı ilişkisi geleneksel anlamını yitirir ve ortak üretim anlayışına evrilir. Sanatçı artık yalnızca anlamın taşıyıcısı değil, aynı zamanda deneyimin tasarımcısıdır; izleyici ise yalnızca alımlayan değil, eserin eş-yaratıcısıdır. Bu durum, sanatın 20. yüzyıldaki kavramsal kırılmalarından sonra, 21. yüzyılın teknolojik çağında ikinci bir devrim olarak değerlendirilebilir. Sanatın iletişimsel, duygusal ve bilişsel boyutları, nöroteknolojik araçlar sayesinde yeniden tanımlanmakta; sanat eseri hem bireysel hem de kolektif bir bilinç alanına dönüşmektedir.

2. Beyin Bilgisayar Arayüzü

Beyin-bilgisayar arayüzlerinin (BBA) tarihi, Hans Berger'in beynin elektriksel aktivitesini keşfetmesi ve elektroensefalografi (EEG) yönteminin geliştirilmesiyle başlamaktadır. 1920'lerde Berger, EEG kullanarak insan beyin aktivitesini kaydeden ilk kişi olmuştur (Gürkök & Nijholt, 2013). Berger, EEG izlerini analiz ederek 8-13 Hz. aralığındaki alfa dalgası gibi salınım aktivitelerini tanımlamıştır. Bu dalgalar genellikle, özellikle uyanıklık sırasında, zihinsel aktivitenin minimum düzeyde olduğu rahat durumlarda gözlemlenmektedir. (Bkz. Görsel 3).



Görsel 3. Alfa Dalgası ve Diğer Beyin Dalga Frekansları (Görsel yazar tarafından üretilmiştir.)

Beyin-bilgisayar arayüzü (BBA), insan beyninin ürettiği sinyalleri işleyerek, geleneksel kas ve sinir yollarını kullanmadan harici bir cihazla doğrudan iletişim kurma yeteneği sağlayan bir teknolojidir (Aldayel & Al-Nafjan, 2024; Xiao & Fang, 2021; Tai vd., 2024). Bu sistemlerin temel işlevi, beyinden gelen sinyalleri toplamak, analiz etmek ve kullanıcının niyetini yorumlayarak bu niyeti bir dış cihaza komut olarak iletmektir (Khan vd., 2023; Blokland vd., 2015; Aldayel & Al-Nafjan, 2024; Angulo-Sherman vd., 2025). Bu sayede BBA, beyin ile makine arasında doğrudan bir etkileşim kanalı oluşturarak tekerlekli sandalye, protez uzuvlar, oyun konsolları ve web tarayıcıları gibi çeşitli cihazların kontrolünü mümkün kılmaktadır. (Ansari vd., 2019; Sarraf, Vaibhaw & Pattnaik, 2023).

BBA teknolojisinin en yaygın sinyal toplama yöntemi, düşük maliyeti ve yüksek zamansal çözünürlüğü nedeniyle Elektroensefalografi'dir (Angulo-Sherman vd., 2025; Han vd., 2025). Sistem, motor imgeleme gibi belirli zihinsel olayları algılayarak bu bilişsel aktiviteleri komutlara dönüştürür (Angulo-Sherman vd., 2025). Ancak, EEG tabanlı sistemlerde elektrot empedansı (karşı direnç), fizyolojik ve fizyolojik olmayan gürültüler gibi faktörler sinyal kalitesini olumsuz etkileyebilen teknik zorluklar arasında yer almaktadır (Han vd., 2025). Başarılı bir BBA uygulaması hem sistemin kullanıcıya hem de kullanıcının sisteme uyum sağladığı karşılıklı bir geri bildirim ve öğrenme döngüsünü gerektirmektedir. (Doud vd., 2011).

Beyin-bilgisayar arayüzleri, başta engelli bireyler için geliştirilen yardımcı teknolojiler olarak ortaya çıksa da günümüzde; tıbbi rehabilitasyon, duygu tanıma, insan-bilgisayar etkileşimi ve eğlence gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadır (Tai vd., 2024; Sarraf vd., 2023; Han vd., 2025). Özellikle motor fonksiyonların iyileştirilmesi ve insan-bilgisayar etkileşiminin

zenginleştirilmesi gibi alanlarda önemli potansiyeller sunmaktadır (Han vd., 2025). Özetle BBA, beynin elektriksel aktivitesini kullanarak insan ile makine arasında doğrudan ve yenilikçi bir iletişim köprüsü kuran bir teknolojidir.

2.1 Beyin Görüntüleme Yöntemleri

Beyin görüntüleme yöntemleri, insan zihninin bilişsel, duygusal ve algısal süreçlerini anlamak amacıyla geliştirilen nörofizyolojik ölçüm teknikleridir. Bu yöntemler, sinirsel etkinliklerin zamansal ve uzamsal çözünürlüğünü farklı düzeylerde yakalayarak beynin işlevsel yapısını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Literatürde en yaygın kullanılan teknikler arasında elektroensefalografi (EEG), fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI), fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi (fNIRS) ve magnetoensefalografi (MEG) yer almaktadır. Her bir yöntem, beynin elektriksel ya da hemodinamik¹ aktivitelerini ölçme biçimi, taşınabilirlik düzeyi ve uygulama alanı açısından farklı avantajlar ve sınırlılıklar sunmaktadır. Sanat, psikoloji, eğitim ve nöroestetik gibi disiplinlerde bu yöntemler, insan deneyiminin nörobiyolojik temellerini incelemek ve özellikle estetik algı, yaratıcılık ve duygusal tepki gibi süreçleri nesnel biçimde analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu disiplinlerle bağlantılı olarak beyin-bilgisayar arayüzlerinde kullanım ihtiyacına göre bu yöntemlerden bazıları öne çıkmaktadır. Beyinden doğrudan dijital bir sisteme komut göndermek gibi işlevlerde ise yöntemin seçimi önem taşımaktadır.

EEG, beyin-bilgisayar arayüzlerinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bunun başlıca nedenleri arasında taşınabilirliği, düşük maliyeti, yüksek zaman çözünürlüğü ve kullanıcı açısından güvenli oluşu yer almaktadır. EEG, özellikle motor ve zihinsel imgeleme tabanlı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Liao vd., 2025; Shi vd., 2024; Sadiq vd., 2022; Kwon vd., 2022; Kwon & Im, 2022; Israsena & Pan-Ngum, 2022; Rodoplu Solovchuk, 2024; Liang vd., 2022; Singanamalla & Lin, 2021). Bu yöntem literatürde non-invaziv olarak geçmektedir. Non-invaziv yöntemler cerrahi bir müdahale gerektirmeden takılıp kullanılabilir.

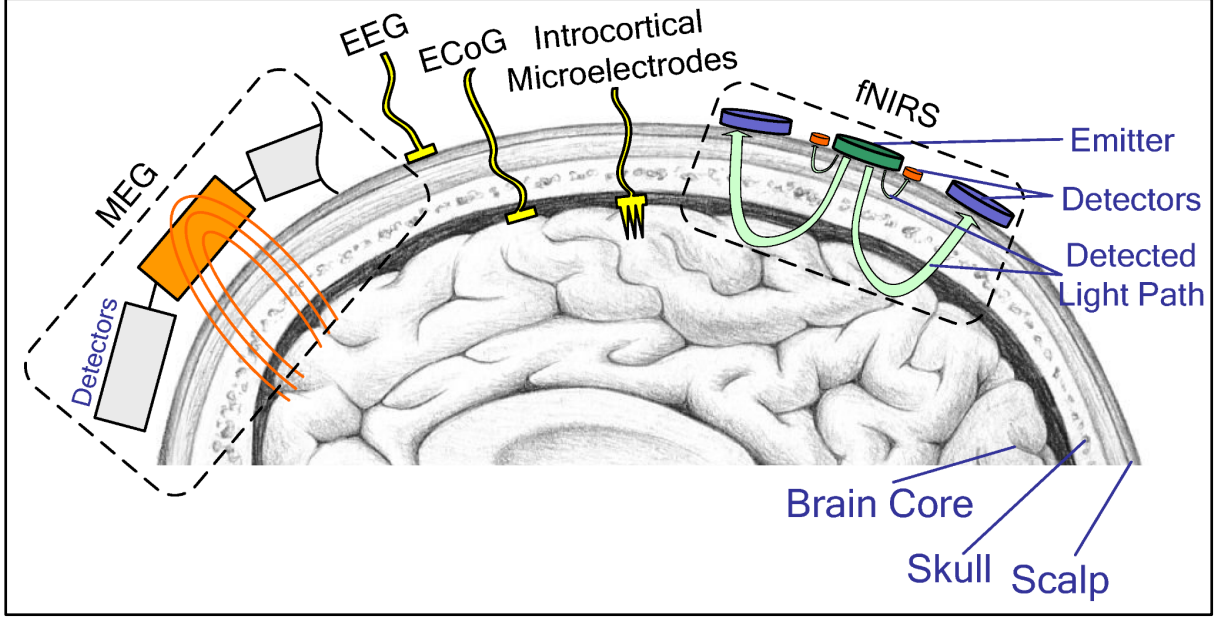
fMRI ve MEG gibi yöntemler yüksek uzamsal çözünürlük sağlamaktadır; ancak zaman çözünürlükleri düşüktür ve pratik kullanım açısından çeşitli zorluklar içermektedir (Shi vd., 2024; Sadiq vd., 2022; Kwon vd., 2022; Kwon & Im, 2022; Israsena & Pan-Ngum, 2022; Al Aïn & Frasnelli, 2017).

İnvaziv yöntemler (örneğin; ECoG, iEEG) sinyal kalitesi açısından üstün nitelikler sunmaktadır; ancak cerrahi müdahale gerektirdikleri için risk taşımakta ve yaygın olarak tercih edilmemektedir (Rodoplu Solovchuk, 2024; Liang vd., 2022). İnvaziv ve non-invaziv yöntemlerin sensör tipleri ve beyinle ilişkisi Görsel 4'te gösterilmiştir.

Bu çerçevede, yöntem seçimi uygulamanın gereksinimlerine -gerçek zamanlılık, taşınabilirlik veya çözünürlük düzeyine- bağlı olarak yapılmaktadır (Sadiq vd., 2022; Israsena & Pan-Ngum, 2022; Al Aïn & Frasnelli, 2017). Tablo 1'de beyin-bilgisayar arayüzlerinde kullanılan başlıca beyin görüntüleme ve sinyal toplama yöntemleri gösterilmektedir. Ayrıca bu yöntemlerin beyin-

¹ Hemodinamik: Beyindeki kan akışı ve oksijen değişimlerini ifade eder.

bilgisayar arayüzlerinde kullanımına dair avantajları ve dezavantajlarına da aynı tabloda yer verilmektedir.



Görsel 4. İnvaziv ve Non-invaziv Yöntemlerin Sensör Tipleri ve Beyinle İlişkisi (Peksa & Mamchur, 2023).

Tablo 1. Beyin Görüntüleme Yöntemleri ve Özellikleri

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
EEG	- Yüksek zaman çözünürlüğü - Taşınabilirlik - Düşük maliyet - Kullanım kolaylığı - Güvenli ve non-invaziv	- Düşük uzamsal çözünürlük - Gürültüye ve artefaktlara duyarlılık - Sinyaller zayıf olabilir
fMRI	- Yüksek uzamsal çözünürlük - Beynin derin bölgelerini görüntüleyebilme	- Düşük zaman çözünürlüğü - Pahalı - Taşınabilir değil - Kullanımı zahmetli

fnIRS	- Taşınabilirlik - Uygulama kolaylığı - Kısmen uygun maliyet	- Sınırlı uzamsal çözünürlük - Derin beyin bölgelerini ölçemez
MEG	- Yüksek zaman ve uzamsal çözünürlük	- Çok pahalı - Taşınabilir değil - Kullanımı karmaşık
PET	- Beyin metabolizmasını ölçebilir	- Düşük zaman çözünürlüğü - Radyasyon - Pahalı
ECoG/iEEG	- Yüksek zaman ve uzamsal çözünürlük - Gürültüsüz sinyal	-İnvaziv (cerrahi müdahale gerektirir) - Riskli

Özetle; BBA uygulamalarında EEG, fMRI, fnIRS, MEG, PET ve ECoG gibi çeşitli beyin görüntüleme yöntemleri kullanılmaktadır. EEG, yüksek zaman çözünürlüğü, taşınabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajlarıyla en yaygın tercih edilen yöntemdir. Diğer yöntemler ise uzamsal çözünürlük, sinyal kalitesi veya uygulama kolaylığı açısından farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Yöntem seçimi, uygulamanın amacına ve gereksinimlerine göre değişmektedir. Bütün bunlar değerlendirildiğinde sanatsal deneyimlerde EEG yöntemi kullanılabilirlik açısından öne çıkmaktadır.

2.2 Beyin-Bilgisayar Arayüzlerinde EEG Sinyallerinin Yönetimi

Elektroensefalografi (EEG), Beyin-bilgisayar arayüzü (BBA) sistemlerinin temelini oluşturan en yaygın sinyal toplama yöntemidir. EEG'nin bu sistemlerdeki merkezi rolü, beyindeki elektriksel aktiviteleri kaydederek bu sinyalleri harici cihazlar için yorumlanabilir komutlara dönüştürmesinden kaynaklanır. Bu teknoloji, özellikle hareket kabiliyetini yitirmiş bireylerin tekerlekli sandalye veya dış iskelet gibi yardımcı cihazları doğrudan beyin aktiviteleriyle kontrol etmelerine olanak tanımaktadır (Meng vd., 2021; Cai & Zeng, 2024; Li vd., 2022). EEG'nin cerrahi bir müdahale gerektirmeyen, non-invaziv bir yöntem olması, elektrotların kafa derisine kolayca yerleştirilebilmesi ve güvenli bir şekilde veri toplanabilmesi, BBA uygulamalarında geniş çapta tercih edilmesinin en önemli nedenlerindendir (Meng vd., 2021; Cai & Zeng, 2024; Wang vd., 2025; Jrad & Congedo, 2012). Görsel 5'te insan kafası üstüne yerleştirilmiş bir non-invaziv EEG başlığı gösterilmektedir.



Görsel 5. Non-invaziv EEG Cihazı. Erişim adresi: <https://www.emotiv.com/>

EEG teknolojisinin BBA sistemleri için sunduğu en kritik teknik avantajlardan biri, milisaniye düzeyindeki yüksek zamansal çözünürlüğüdür. Bu özellik, beynin anlık elektriksel aktivite değişimlerinin gerçek zamanlı olarak izlenmesine ve bu değişimlere dayalı anlık komutların üretilmesine imkân tanır ki bu, Bilgisayarlı Tomografi (BT) veya Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG) gibi diğer nörogörüntüleme teknikleriyle mümkün değildir (Wang vd., 2025; Cai vd., 2025). Ayrıca, EEG sinyalleri, beyin fonksiyonları ve bilişsel süreçler hakkında zengin bir fizyolojik bilgi içeriği sunar. Bu bilgiler, sadece harici cihaz kontrolü için değil, aynı zamanda duygusal durum tespiti veya Parkinson ve epilepsi gibi nörolojik hastalıkların teşhisi gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır (Cai vd., 2025; Huynh & Van Huynh, 2023).

Bununla birlikte, EEG sinyallerinin etkin bir şekilde yönetilmesi, BBA sistemlerinin performansı açısından hayati öneme sahiptir ve beraberinde bazı zorlukları getirir. EEG sinyalleri, göz kırpmaya gibi fizyolojik hareketlerden veya çevresel faktörlerden kaynaklanan gürültü² ve artefaktlara³ karşı oldukça hassastır. Bu nedenle, ham sinyalden anlamlı bilginin çıkarılması ve güvenilir bir kontrol sağlanması için gelişmiş sinyal işleme ve sınıflandırma algoritmalarının kullanılması

² Gürültü: Bir sensörün algıladığı ancak araştırmacının algılamasını amaçlamadığı her şeydir.

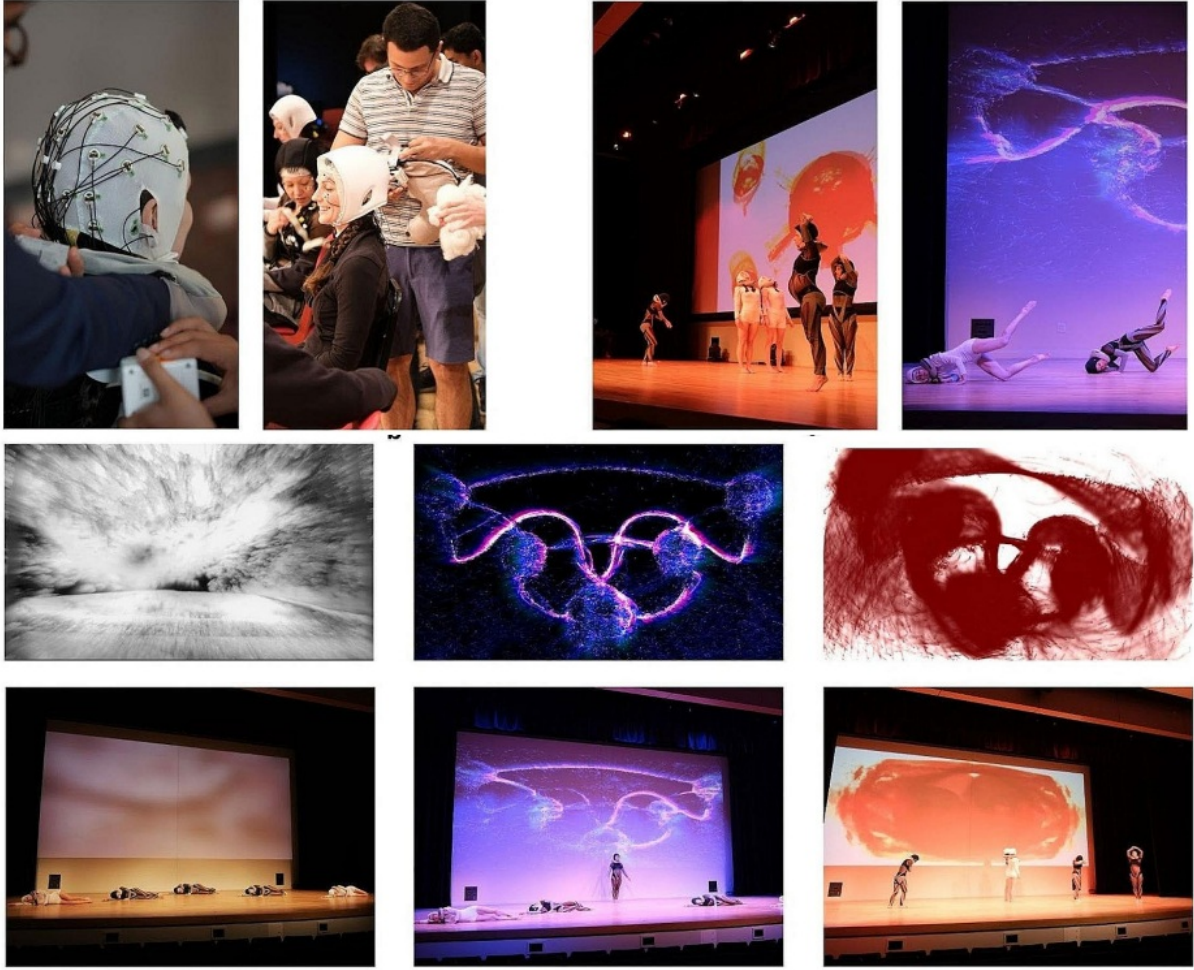
³ Artefakt: Sinyal işlemede ilgili ekipman ya da teknik tarafından sunulan herhangi bir bilginin algılanması ya da temsilindeki herhangi bir hatadır.

zorunludur (Jrad & Congedo, 2012; Cai vd., 2025; Xiao & Fang, 2021). Ek olarak, EEG sinyallerinin bireyler arasında önemli ölçüde farklılık göstermesi, sistemlerin her kullanıcı için özel olarak ayarlanmasını gerektiren uzun kalibrasyon süreçlerini ve kişiselleştirilmiş modellerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Li vd., 2022; Cai vd., 2025). Bu zorluklar, BBA sistemlerinin başarısı için etkin EEG yönetiminin ne denli kritik olduğunu göstermektedir.

3. EEG Tabanlı Beyin-Bilgisayar Arayüzleri ile Sanatsal Çalışmalar

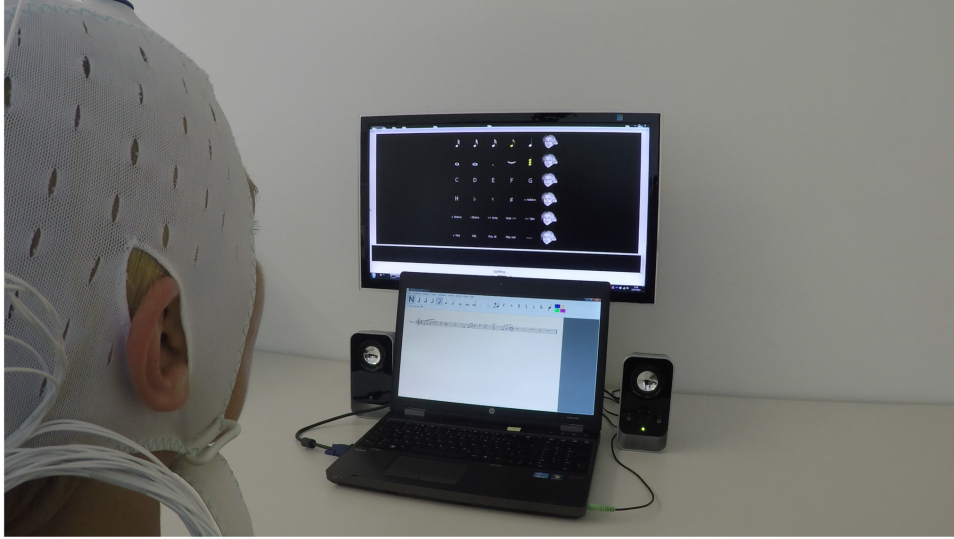
EEG tabanlı beyin-bilgisayar arayüzleri, son yıllarda sanatsal üretim süreçlerinde yenilikçi bir araç olarak giderek daha fazla kullanılmakta ve farklı sanat dallarında yaratıcı uygulamalara olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler, sanatçının beyin aktivitelerini doğrudan dijital sistemlerle ilişkilendirerek, sanatı yalnızca ifade biçimi değil aynı zamanda biyolojik ve bilişsel bir süreç olarak yeniden tanımlamaktadır.

EEG sinyallerinin üretken sanat uygulamalarında kullanımı, bu teknolojinin en dikkat çekici yönlerinden biridir. Sanatçılar, EEG cihazlarıyla topladıkları beyin dalgalarını bilgisayara aktararak görsel sanat eserlerinin üretiminde doğrudan kullanmaktadır. Örneğin, Yang Liu ve arkadaşlarının (2024) bildirdiği üzere bir çalışmada EEG verileri Unity motoruna entegre edilmiş, katılımcının dikkat ve meditasyon düzeyleri gibi bilişsel durumları çiçek açısı ve rengi gibi görsel parametrelerle eşlenmiştir. Böylece, her bireyin beyin aktivitesine göre benzersiz, dinamik ve kişisel sanat eserleri üretilmiştir. Bu tür yaklaşımlar, meditasyon ve sanat terapisi gibi alanlarda da uygulanmakta, ayrıca metaverse ortamında daha özgür ve ekonomik üretim biçimlerine zemin hazırlamaktadır. Benzer biçimde, canlı performanslarda EEG tabanlı görselleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Theofanopoulou ve arkadaşları (2024) tarafından yürütülen bir çalışmada, dansçıların beyin aktiviteleri (interbrain synchrony) performans sırasında ölçülmüş ve bu veriler gerçek zamanlı olarak animasyonlu görsellere dönüştürülerek izleyicilere sunulmuştur. Görsel 6'da bu performansa ait görseller gösterilmektedir. Bu tür uygulamalar hem bilimsel hem de sanatsal olarak yeni bir iletişim biçimi oluşturmaktadır.



Görsel 6. Gerçek Zamanlı BBA Destekli Dans Performansı (Theofanopoulou vd., 2024).

EEG tabanlı sistemlerin müzik üretiminde kullanımı ise, beynin elektriksel aktivitelerinin doğrudan müzikal yapıya dönüştürülmesi açısından dikkat çekicidir. İlk örneklerde EEG sinyalleri seslere çevrilirken, günümüzde belirli frekans bantları müzikal parametrelere bağlanmakta ve tempo, ritim ya da ses dinamikleri beyin aktivitesine göre şekillenmektedir. Pinegger ve arkadaşları (2017), yalnızca düşünce gücüyle müzik üretimine olanak tanıyan bir sistem (Bkz. Görsel 7) geliştirmiştir. Norata ve ekibi (2023) ise EEG'nin tarihsel süreçte ses ve müzikle ilişkilendirilmesine yönelik çalışmalarda, dikkat düzeyi gibi nörofizyolojik göstergelerin müziğin yapısına nasıl entegre edildiğini incelemiştir. Bunun yanında, 2003 yılında gerçekleştirilen bir "beyin dalgası konseri"nde, izleyicilerin EEG sinyalleriyle canlı müzik oluşturulmuş ve bu etkileşimsel süreç izleyici deneyimini dönüştüren bir performans biçimine evrilmiştir.



Görsel 7. Düşünce Gücüyle Müzik Besteleme (Pinegger vd., 2017)

İnteraktif sanat ve performans alanında da EEG tabanlı yaklaşımlar dikkat çekmektedir. Zioga ve arkadaşlarının (2018) “Enheduanna - A Manifesto of Falling” adlı canlı beyin-bilgisayar sinema performansı hem sanatçıların hem de izleyicilerin beyin aktivitelerinin aynı anda ölçülüp görsel ve işitsel parametrelere dönüştürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu tür çoklu katılımcı sistemler, sanat ile bilimi birleştirerek izleyiciyi yalnızca gözlemci değil, aynı zamanda üretim sürecinin bir parçası hâline getirmektedir. EEG tabanlı sanatsal uygulamalarda, sinyallerin gerçek zamanlı toplanması, ön işleme tabi tutulması, özellik çıkarımı yapılması ve bu özelliklerin görsel veya işitsel parametrelere eşlenmesi temel yöntemsel adımlardır. Kullanıcıların dikkat, meditasyon ya da duygusal durumları gibi bilişsel süreçleri, sanat eserinin biçimsel veya deneyimsel yönlerini doğrudan belirleyebilmektedir (Yang Liu vd., 2024; Pinegger vd., 2017; Zioga vd., 2018). Sanat dalı ve uygulama yöntemine göre bu örnek çalışmalar aşağıda Tablo 1’de gösterilmektedir.

Sanat Dalı	Uygulama Yöntemi	Örnekler / Detaylar
Görsel Sanat	EEG verileriyle üretken görseller	Dikkat / meditasyon (Yang Liu vd., 2024)
Müzik	EEG sinyallerinin ses / müzik parametrelerine dönüşümü	Tempo, dinamik, nota üretimi (Pinegger vd., 2017; Norata vd., 2023)
Performans Sanatı	Canlı EEG verisiyle görsel / müzikal performans	Dans, konser, interaktif gösteri (Theofanopoulou vd., 2024; Zioga vd., 2018)

Böylece, EEG tabanlı beyin-bilgisayar arayüzleri, sanatsal üretim süreçlerinde insan zihninin doğrudan bir araç haline gelmesini sağlamaktadır. Bu teknoloji, sanat ve bilimi bir araya getirerek, sanatçının ve izleyicinin beyin aktivitelerini estetik bir deneyimin temel bileşeni hâline dönüştürmektedir. Böylece her bireyin nörofizyolojik yapısına özgü, kişisel ve dinamik sanat formları ortaya çıkmakta; sanatın öznel doğası, teknolojik araçlarla görünür ve ölçülebilir bir hâle gelmektedir.

4. Sonuç

Sanatsal deneyim, özünde bir etkileşim ve anlam inşası sürecidir. Sanatsal deneyim yapboz gibidir; sanatçı yapbozun bir parçasını uzatır, alımlayıcı ise kendinden bir parçayla onu birleştirir. Bu birleşme anı, estetik deneyimin en özgün ve kişisel katmanını oluşturur. Herkes kendi anlamını bulur ve hepsi de kendilerince doğrudur. BBA destekli sanatsal üretimlerde bu çoklu anlam yapısı, yalnızca sembolik düzeyde değil, bilişsel ve nörofizyolojik düzeyde de gerçekleşmektedir. İzleyicinin zihinsel ve duygusal durumlarının esere dâhil olması, anlamın tek bir merkezden değil, ortak bir bilinç alanından üretildiği yeni bir sanatsal paradigma ortaya koymaktadır. Böylece sanat, doğrusal bir iletim biçimi olmaktan çıkarak, izleyiciyle birlikte şekillenen açık uçlu bir diyalog hâline dönüşmektedir.

Bu çalışma, EEG tabanlı beyin-bilgisayar arayüzlerinin (BBA) sanatsal deneyim tasarımındaki konumunu kavramsal, yöntemsel ve deneyimsel boyutlarıyla bütüncül biçimde ele almaktadır. Bulgular, BBA'nın yalnızca sanatın ifade kanallarını değil, aynı zamanda üretim ve alımlama biçimlerini de dönüştüren bir arayüz olarak işlev gördüğünü göstermektedir. Sanatçı ve izleyici arasındaki ilişki, BBA aracılığıyla ortak bir üretim zeminine taşınmaktadır. Sanat eseri, izleyicinin nörofizyolojik durumlarına duyarlı, dinamik ve öznel bir süreç olarak biçimlenmektedir. EEG'nin yüksek zamansal çözünürlüğü ve taşınabilirliği, sanatsal ortamlarda gerçek zamanlı geri bildirim ve etkileşimi mümkün kılmakta; estetik deneyimin bilişsel temellerine ilişkin gözlemleri operasyonel hâle getirmektedir.

Bununla birlikte, literatürde vurgulanan sınırlılıklar, sanatsal BBA uygulamalarının yöntemsel olgunlaşmasını doğrudan etkilemektedir. EEG'nin düşük uzamsal çözünürlüğü, bireyler arası biyolojik farklılıklar ve sinyal gürültüsü oranının yüksekliği, duygusal ve bilişsel temsillerin doğruluğunu sınırlamaktadır. Özellikle tüketici sınıfı cihazlarda kalibrasyon süresinin uzunluğu ve kullanıcıya özgü model gereksinimleri, uygulama verimliliğini azaltmaktadır. Ayrıca, sanat odaklı çalışmalarda örneklem büyüklüklerinin sınırlı kalması ve deneysel tasarımların çoğunlukla nitel gözlemlere dayanması, bulguların genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Bu durum, BBA-sanat kesişiminde kavramsal ufkun geniş olmasına karşın yöntemsel standardizasyonun hâlen gelişmekte olduğunu göstermektedir.

Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, yöntem seçiminin deneyim mimarisinin erken safhasında belirlenmesi gerektiğidir. Sanatsal bağlamlarda gerçek zamanlılık, taşınabilirlik ve erişilebilirlik önceliklidir. Bu açıdan EEG, kurulum kolaylığı ve düşük maliyetiyle pratik bir tercih olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, hedeflenen estetik ya da algısal çıktıya göre fNIRS, MEG veya

invaziv yöntemlerden elde edilen içgörülerin kuramsal referans olarak kullanılması; çok modlu (multimodal) ölçüm sistemlerinin benimsenmesiyle uzamsal ve anlamsal çözünürlüğün artırılması önerilmektedir. Böyle bir yaklaşım, tekil sinyal kaynaklarının sınırlılıklarını dengeleyerek sanat eseri ile deneyim tasarımını daha güvenilir bir bilişsel harita üzerinde konumlandırmaktadır.

Sanatsal deneyimi yönlendiren etkileşim haritalarının (mapping) açık biçimde tanımlanması da kritik önemdedir. Dikkat, uyarılmışlık, motor imgeleme veya duygu durumlarına ilişkin EEG özelliklerinin hangi görsel ya da işitsel parametrelere nasıl eşleneceği, tasarımın estetik tutarlılığı kadar kullanıcı öğrenilebilirliğini de belirlemektedir. Bu haritaların doğrusal olmayan, eşige duyarlı ve kişiselleştirilebilir biçimde kurgulanması; öznel deneyim çeşitliliğini yansıtırken performans dalgalanmalarını da dengelemektedir. Ayrıca, kısa kalibrasyon süresi, anlık ve anlaşılır geri bildirim, hata durumlarının zarif biçimde telafi edilmesi gibi unsurlar, kullanıcıyı yormadan bir “akış hâli” yaratmakta ve sanatsal katılımı derinleştirmektedir.

Değerlendirme boyutunda, sanatsal ve deneyimsel ölçütlerin teknik metriklerle birlikte raporlanması gerekmektedir. Estetik haz, akış, öznellik, ortak üretim hissi ve anlam üretimi gibi nitel göstergeler; doğruluk, gecikme, kararlılık ve görev başarısı gibi nicel BBA metrikleriyle birlikte ele alındığında, sanatsal çıktının bilişsel temelleri görünür hâle gelmektedir. Bu bütünleşik değerlendirme, tasarım kararlarının gerekçelendirilmesini kolaylaştırmakta ve disiplinler arası karşılaştırılabilirliği artırmaktadır. Ayrıca, ekolojik geçerliliği yüksek senaryolar, tekrarlanabilir süreç tanımları ve açık veri/paylaşım politikaları, alanın birikimli ilerlemesini desteklemektedir.

Etik ve veri yönetimi boyutu da sanatsal bağlamda merkezi öneme sahiptir. Biyometrik verinin anlam üretiminde kullanılması, mahremiyet, rıza, veri minimizasyonu ve açıklanabilirlik ilkeleriyle yönetilmelidir. Katılımcının faaliyet hissini güçlendiren şeffaf tasarım tercihleri, etik sanat üretiminin ayrılmaz bileşenidir. Sanatın deneyimsel doğası gereği, manipülasyon risklerinin azaltılması ve katılımcının öz-düzenleme kapasitesini destekleyen geri bildirim stratejileri etik tasarımın yapıtaşlarını oluşturmaktadır.

Bu bütüncül kavramsal perspektif ışığında çalışma, girişte belirtilen amaçları yerine getirmektedir: (I) literatürde raporlanan teknik ve yöntemsel sınırlılıkları tanımlamakta, (II) bu sınırlılıkları aşmaya yönelik tasarımsal ve yöntemsel çıkarımlar geliştirmekte, (III) sanat ve deneyim odaklı BBA uygulamaları için erişilebilir, kullanıcı merkezli ve ölçülebilir bir yol haritası adımları önermektedir. Burada vurgulanan yol haritası: *“bağlam ve amaç tanımlama → yöntem seçimi (EEG odaklı, gerekirse çok modlu destek) → sinyal işleme hattı → etkileşim haritası (mapping) → kişiselleştirme ve kısa kalibrasyon → gerçek zamanlı geri bildirim → bütünleşik değerlendirme (estetik + teknik) → etik ve veri yönetimi”* adımlarından oluşmaktadır. Sunulan bu önerilerin farklı sanat disiplinlerinde pratik uygulamalarla test edilmesi ve kullanıcı deneyimi çıktılarıyla desteklenmesi, gelecek çalışmaların bu alanı ampirik bir düzeye taşıması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak, EEG tabanlı BBA’lar, sanatsal üretim ve deneyimi kişiselleştiren, katılımı derinleştiren ve bilişsel süreçleri estetik bir dile tercüme eden güçlü arayüzler olarak konumlanmaktadır. Bu sistemler, yüksek zamansal çözünürlük ve taşınabilirlik avantajları sayesinde yaratıcı pratiği gerçek zamanlı ve erişilebilir bir zemine taşımaktadır. Gelecekteki çalışmaların, kişiselleştirmeyi hızlandıran uyarlamalı modeller, düşük gürültülü donanımlar, açık

haritalama şemaları ve ekolojik geçerliliğe sahip deneysel tasarımlarla bu potansiyeli kurumsallaştırması beklenmektedir. Böylelikle sanat, teknoloji ve bilişin kesiştiği bu arayüzde; izleyicinin öznel dünyasını görünür kılan, birlikte üretimi teşvik eden ve bilimsel olarak izlenebilir yeni sanatsal paradigmlar olgunlaşmaktadır.

Kaynakça

- Al Aïn, S., & Frasnelli, J. A. (2017). Intranasal trigeminal chemoreception. In *Conn's Translational Neuroscience* (pp. 379-397). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802381-5.00030-0>
- Aldayel, M., & Al-Nafjan, A. (2024). A comprehensive exploration of machine learning techniques for EEG-based anxiety detection. *PeerJ Computer Science*, 10, e1829. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1829>
- Andujar, M., Crawford, C. S., Nijholt, A., Jackson, F., & Gilbert, J. E. (2015). Artistic brain-computer interfaces: The expression and stimulation of the user's affective state. *Brain-Computer Interfaces*, 2(2-3), 60-69. <https://doi.org/10.1080/2326263x.2015.1104613>
- Angulo-Sherman, I. N., León-Domínguez, U., Martínez-Torteya, A., Fragoso-González, G. A., & Martínez-Pérez, M. V. (2025). Proficiency in motor imagery is linked to the lateralization of focused ERD patterns and beta PDC. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01571-6>
- Ansari, M. F., Edla, D. R., Dodia, S., & Kuppili, V. (2019). Brain-Computer Interface for wheelchair control operations: An approach based on Fast Fourier Transform and On-Line Sequential Extreme Learning Machine. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7(3), 274-278. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.10.007>
- Blokland, Y., Spyrou, L., Lerou, J., Mourisse, J., Jan Scheffer, G., Geffen, G.-J. van, Farquhar, J., & Bruhn, J. (2015). Detection of attempted movement from the EEG during neuromuscular block: Proof of principle study in awake volunteers. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep12815>
- Cai, M., & Zeng, Y. (2024). MAE-EEG-Transformer: A transformer-based approach combining masked autoencoder and cross-individual data augmentation pre-training for EEG classification. *Biomedical Signal Processing and Control*, 94, 106131. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106131>
- Cai, Z., Gao, Y., Fang, F., Zhang, Y., & Du, S. (2025). Multi-layer transfer learning algorithm based on improved common spatial pattern for brain-computer interfaces. *Journal of Neuroscience Methods*, 415, 110332. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2024.110332>
- de Castro Silva, F., Brandão Lima, L. C., Silva-Filho, E. C., Fonseca, M. G., & Jaber, M. (2020). Through alizarin-hectorite pigments: Influence of organofunctionalization on fading. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 587, 124323. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124323>

- Doud, A. J., Lucas, J. P., Pisansky, M. T., & He, B. (2011). Continuous three-dimensional control of a virtual helicopter using a motor imagery based brain-computer interface. *PLoS ONE*, 6(10), e26322. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0026322>
- Eber, D. E. (2000). Computer graphics curricula in the visual arts. *Computers & Graphics*, 24(6), 919-923. [https://doi.org/10.1016/s0097-8493\(00\)00094-7](https://doi.org/10.1016/s0097-8493(00)00094-7)
- Elliott, B. (2011). Arts-based and narrative inquiry in liminal experience reveal platforming as basic social psychological process. *The Arts in Psychotherapy*, 38(2), 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.aip.2011.01.001>
- Gurkok, H., & Nijholt, A. (2013). Affective brain-computer interfaces for arts. *2013 Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, 827-831. <https://doi.org/10.1109/acii.2013.155>
- Han, Q., Wei, Y., Pei, Z., Weng, T., Qin, J., Xu, Y., Li, S., Tian, Y., Li, Z., & Pei, Y. (2025). A multi-branch electroencephalogram emotion recognition framework based on cross-subject or cross-session multi-perspective representation fusion. *Neurocomputing*, 131767. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.131767>
- Hebi, M., Czamanski-Cohen, J., & Azaiza, F. (2022). Art therapy in the arab world. *The Arts in Psychotherapy*, 81, 101969. <https://doi.org/10.1016/j.aip.2022.101969>
- Huynh, V. Q., & Van Huynh, T. (2023). Application of cluster repeated mini-batch training method to classify electroencephalography for grab and lift tasks. *Medical Engineering & Physics*, 120, 104041. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2023.104041>
- Israsena, P., & Pan-Ngum, S. (2022). A cnn-based deep learning approach for SSVEP detection targeting binaural ear-eeg. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fncom.2022.868642>
- Jrad, N., & Congedo, M. (2012). Identification of spatial and temporal features of EEG. *Neurocomputing*, 90, 66-71. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.02.032>
- Khan, R. A., Rashid, N., Shahzaib, M., Malik, U. F., Arif, A., Iqbal, J., Saleem, M., Khan, U. S., & Tiwana, M. (2023). A novel framework for classification of two-class motor imagery EEG signals using logistic regression classification algorithm. *PLOS ONE*, 18(9), e0276133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276133>
- Kwon, J., Hwang, J., Nam, H., & Im, C.-H. (2022). Novel hybrid visual stimuli incorporating periodic motions into conventional flickering or pattern-reversal visual stimuli for steady-state visual evoked potential-based brain-computer interfaces. *Frontiers in Neuroinformatics*, 16. <https://doi.org/10.3389/fninf.2022.997068>
- Kwon, J., & Im, C.-H. (2022). Novel Signal-to-Signal translation method based on StarGAN to generate artificial EEG for SSVEP-based brain-computer interfaces. *Expert Systems with Applications*, 203, 117574. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117574>
- Li, Q., Wu, Y., Song, Y., Zhao, D., Sun, M., Zhang, Z., & Wu, J. (2022). A p300-detection method based on logistic regression and a convolutional neural network. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fncom.2022.909553>

- Liang, S., Su, L., Fu, Y., & Wu, L. (2022). Multi-source joint domain adaptation for cross-subject and cross-session emotion recognition from electroencephalography. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.921346>
- Liao, X., Li, G., Wang, Y., Sun, L., & Zhang, H. (2025). Constructing lightweight and efficient spiking neural networks for EEG-based motor imagery classification. *Biomedical Signal Processing and Control*, 100, 107000. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.107000>
- Liu, Yang, Liu, R., Ge, J., & Wang, Y. (2024). Advancements in brain-machine interfaces for application in the metaverse. *Frontiers in Neuroscience*, 18. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1383319>
- Liu, Yanci, Teng, F., Zhang, S., & Du, F. (2024). Neuroaesthetic Indicators from the Perspective of Two-Stage Process Theory: N2 and LPP can Predict Aesthetic Judgment of Human-Computer Interfaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 41(9), 5485-5497. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2364138>
- Meng, M., Yin, X., She, Q., Gao, Y., Kong, W., & Luo, Z. (2021). Sparse representation-based classification with two-dimensional dictionary optimization for motor imagery EEG pattern recognition. *Journal of Neuroscience Methods*, 361, 109274. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2021.109274>
- Norata, D., Broggi, S., Alvisi, L., Lattanzi, S., Brigo, F., & Tinuper, P. (2023). The EEG pen-on-paper sound: History and recent advances. *Seizure: European Journal of Epilepsy*, 107, 67-70. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2023.03.011>
- Núñez-Cacho, P., Mylonas, G., Kalogeras, A., & Molina-Moreno, V. (2024). Exploring the transformative power of AI in art through a circular economy lens. A systematic literature review. *Heliyon*, 10(4), e25388. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25388>
- Pasqualotto, E., Federici, S., & Belardinelli, M. O. (2011). Toward functioning and usable brain-computer interfaces (BCIs): A literature review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 7(2), 89-103. <https://doi.org/10.3109/17483107.2011.589486>
- Pinegger, A., Hiebel, H., Wriessnegger, S. C., & Müller-Putz, G. R. (2017). Composing only by thought: Novel application of the P300 brain-computer interface. *PLOS ONE*, 12(9), e0181584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181584>
- Rodoplu Solovchuk, D. (2024). Advances in AI-assisted biochip technology for biomedicine. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 177, 116997. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2024.116997>
- Sadiq, M. T., Aziz, M. Z., Almogren, A., Yousaf, A., Siuly, S., & Rehman, A. U. (2022). Exploiting pretrained CNN models for the development of an EEG-based robust BCI framework. *Computers in Biology and Medicine*, 143, 105242. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105242>
- Sarraf, J., Vaibhaw, & Pattnaik, P. K. (2023). A study of classification techniques on P300 speller dataset. *Materials Today: Proceedings*, 80, 2047-2050. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.110>

- Sauri, S., Gunara, S., & Cipta, F. (2022). Establishing the identity of insan kamil generation through music learning activities in pesantren. *Heliyon*, 8(7), e09958. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09958>
- Shi, X., Li, B., Wang, W., Qin, Y., Wang, H., & Wang, X. (2024). EEG-VTTCNet: A loss joint training model based on the vision transformer and the temporal convolution network for EEG-based motor imagery classification. *Neuroscience*, 556, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.051>
- Singanamalla, S. K. R., & Lin, C.-T. (2021). Spiking neural network for augmenting electroencephalographic data for brain computer interfaces. *Frontiers in Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.651762>
- Sun, J., & Zhou, J. (2025). Metamaterials: The art in materials science. *Engineering*, 44, 145-161. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.12.011>
- Tai, P., Ding, P., Wang, F., Gong, A., Li, T., Zhao, L., Su, L., & Fu, Y. (2024). Brain-computer interface paradigms and neural coding. *Frontiers in Neuroscience*, 17. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1345961>
- Theofanopoulou, C., Paez, S., Huber, D., Todd, E., Ramírez-Moreno, M. A., Khaleghian, B., Sánchez, A. M., Barceló, L., Gand, V., & Contreras-Vidal, J. L. (2024). Mobile brain imaging in butoh dancers: From rehearsals to public performance. *BMC Neuroscience*, 25(1). <https://doi.org/10.1186/s12868-024-00864-1>
- van de Laar, B., Gurkok, H., Plass-Oude Bos, D., Poel, M., & Nijholt, A. (2013). Experiencing BCI control in a popular computer game. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 5(2), 176-184. <https://doi.org/10.1109/tciaig.2013.2253778>
- Vasiljevic, G. A. M., & de Miranda, L. C. (2019). Brain-Computer interface games based on consumer-grade EEG devices: A systematic literature review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(2), 105-142. <https://doi.org/10.1080/10447318.2019.1612213>
- Wang, W., Li, B., Liu, X., Shi, X., Qin, Y., Wang, H., & Wang, X. (2025). ALGGNet: An adaptive local-global-graph representation network for brain-computer interfaces. *Knowledge-Based Systems*, 311, 113096. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113096>
- Welter, M., & Lotte, F. (2024). Ecological decoding of visual aesthetic preference with oscillatory electroencephalogram features - A mini-review. *Frontiers in Neuroergonomics*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnrgo.2024.1341790>
- Xiao, X., & Fang, Y. (2021). Motor imagery EEG signal recognition using deep convolution neural network. *Frontiers in Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.655599>
- Zaidel, D. W. (2025). The arts and hemispheric specialization. In *Handbook of Clinical Neurology* (pp. 409-419). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15646-5.00002-6>
- Zioga, P., Pollick, F., Ma, M., Chapman, P., & Stefanov, K. (2018). "Enheduanna - A manifesto of falling" live brain-computer cinema performance: Performer and audience participation, cognition and emotional engagement using multi-brain BCI interaction.

Görsel Kaynakça

Görsel 1. *Bir ve Üç Sandalye (One and Three Chairs)* Kosuth, J. (1965). [Enstalasyon]. Museum of Modern Art (MoMA). <https://www.moma.org/collection/works/81435>

Görsel 2. BBA ile Boyama, 2021 BCI Painter [Fotoğraf]. RUK/DDTLAB
<https://www.mcruk.si/en/article/bci-painter>

Görsel 3. Alfa Dalgası ve Diğer Beyin Dalga Frekansları (Görsel yazar tarafından üretilmiştir.)

Görsel 4. İnvaziv ve Non-invaziv Yöntemlerin Sensör Tipleri ve Beyinle İlişkisi. [Şekil]. Peksa, J., & Mamchur, D. (2023). State-of-the-Art on Brain-Computer Interface Technology. *Sensors*, 23(13), 6001. <https://doi.org/10.3390/s23136001>

Görsel 5. Non-invaziv EEG Cihazı. [Fotoğraf]. Erişim adresi: <https://www.emotiv.com/>

Görsel 6. Gerçek Zamanlı BBA Destekli Dans Performansı. [Fotoğraf]. (Theofanopoulou vd., 2024).

Theofanopoulou, C., Paez, S., Huber, D. vd. Mobile brain imaging in butoh dancers: from rehearsals to public performance. *BMC Neurosci* 25,62 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12868-024-00864-1>

Görsel 7. Düşünce Gücüyle Müzik Besteleme. [Fotoğraf]. Pinegger, A., Hiebel, H., Wriessnegger, S., & Müller-Putz, G. (2017). Composing only by thought: Novel application of the P300 brain-computer interface. *PLoS ONE* 12(9): e0181584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181584>

Bu makale iThenticate intihal tespit yazılımıyla taranmıştır. / This article has been scanned by iThenticate plagiarism detection software.

Bu çalışmada "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması belirtilen kurallara uyulmuştur. / In this study, the rules stated in the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" were followed.

Araştırma tek yazar tarafından yürütülmüştür (Katkı Oranı: %100). / The research was conducted by one author (Author Contribution: 100%).

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır. / There is no conflict of interest with any institution or person within the scope of the study.