



**EEG DESTEKLİ SANAL GERÇEKLİK
ORTAMINDAKİ LOKOMOSYON TEKNİKLERİNİN
NESNEL ve ÖZNEL ÖLÇÜMLER AÇISINDAN
ANALİZİ**

Esra Fatma BİROL

**Yüksek Lisans Tezi
Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Yaşar DAŞDEMİR**

**2025
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EEG DESTEKLİ SANAL GERÇEKLİK ORTAMINDAKİ LOKOMOSYON
TEKNİKLERİNİN NESNEL ve ÖZNEL ÖLÇÜMLER AÇISINDAN ANALİZİ**

Esra Fatma BİROL

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar DAŞDEMİR

Anabilim Dalı: Biyomedikal Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**EEG DESTEKLİ SANAL GERÇEKLİK ORTAMINDAKİ LOKOMOSYON
TEKNİKLERİNİN NESNEL ve ÖZNEL ÖLÇÜMLER AÇISINDAN ANALİZİ**

Doç. Dr. Yaşar DAŞDEMİR danışmanlığında, Esra Fatma BİROL tarafından hazırlanan bu çalışma 28 / 05 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Biyomedikal Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç. Dr. Yaşar DAŞDEMİR	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Zeydin PALA	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Sefa KÜÇÜK	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

28 / 05 / 2025

Esra Fatma BİROL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EEG DESTEKLİ SANAL GERÇEKLİK ORTAMINDAKİ LOKOMOSYON TEKNİKLERİNİN NESNEL ve ÖZNEL ÖLÇÜMLER AÇISINDAN ANALİZİ

Esra Fatma BİROL

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yaşar DAŞDEMİR

Sanal gerçeklik (VR), bireyin fiziksel ortamda bilgisayar olanaklarından yararlanarak, bilgisayar tarafından simüle edilen üç boyutlu bir mekânda mevcudiyetini hissettiği teknolojik sistemlerdir. Bu sanal ortamlarda kullanıcıların hareket etmesine olanak tanıyan teknik ise VR Lokomasyon olarak adlandırılmaktadır. VR teknolojisinin giderek artan popülerliği ve kullanım alanlarının genişlemesiyle birlikte, sanal ortamlardaki farklı lokomasyon tekniklerinin kullanıcı deneyimi üzerindeki etkilerinin anlaşılması önem kazanmaktadır. Bu tez çalışmasında, EEG destekli sanal gerçeklik ortamındaki lokomasyon tekniklerinin nesnel ve öznel ölçümler açısından analizi amaçlanmıştır. On farklı VR lokomasyon tekniğinin (gerçek zamanlı yürüme, ışınlanma, kaydırma, sürekli, sürekli el, tırmanma, asılarak tırmanma, dokunma, yürüme ve koşma) kullanıcılar üzerindeki fizyolojik etkileri EEG sinyalleri kullanılarak nesnel olarak değerlendirilmiş ve öznel iş yükü algısı NASA-TLX ölçeği ile belirlenmiştir. Araştırma kapsamında, hazır VREEG veri seti kullanılmıştır. EEG verileri ön işlenerek zaman ve frekans tabanlı öznitelikler çıkarılmıştır. Lokomasyon tekniklerini sınıflandırmak için RF, SVM ve kNN makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. NASA-TLX sonuçlarına göre, lokomasyon teknikleri özellikle fiziksel talep, çaba ve rahatsızlık düzeylerini anlamlı şekilde etkilemiştir ($p < 0,05$). Tırmanma ve asılarak tırmanma teknikleri en yüksek iş yüküne neden olmuştur ($p < 0,05$). EEG sınıflandırmasında, RF ve kNN algoritmaları yüksek doğrulukla başarılı performans göstermiştir. Korelasyon analizleri, sınıflandırma doğruluğu ile zihinsel talep ve rahatsızlık arasında negatif, fiziksel talep ve çaba arasında ise pozitif ilişkiler bulmuştur. Bu çalışma, VR lokomasyon tekniklerinin kullanıcılar üzerinde farklı yükler oluşturduğunu ve EEG'nin bu yükü nesnel sınıflandırmada kullanılabileceğini göstermiştir. Sonuçlar, kullanıcı deneyimini iyileştirmek için lokomasyon tekniği seçiminin önemini vurgulamaktadır.

2025, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sanal Gerçeklik, EEG, VR Lokomasyon, NASA-TLX, Nesnel Ölçümler, Öznel Ölçümler

ABSTRACT

MS. Thesis

ANALYSIS of LOCOMOTION TECHNIQUES in EEG-SUPPORTED VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT in TERMS of OBJECTIVE and SUBJECTIVE MEASUREMENTS

Esra Fatma BİROL

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Biomedical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yaşar DAŞDEMİR

Virtual reality (VR) systems are technological systems where individuals experience a sense of presence in a computer-simulated three-dimensional space by utilizing computer capabilities within the physical environment. The technique that allows users to move in these virtual environments is called VR Locomotion. With the increasing popularity and expanding application areas of VR technology, understanding the effects of different locomotion techniques in virtual environments on user experience is becoming important. This thesis study aimed to analyze locomotion techniques in an EEG-supported virtual reality environment in terms of objective and subjective measurements. The physiological effects on users of ten different VR locomotion techniques (real-time walking, teleportation, shifting, continuous, continuous hand, climbing, hanging climbing, touching, walking, and running) were evaluated objectively using EEG signals, and the subjective workload perception was determined with the NASA-TLX scale. The readily available VREEG dataset was used within the scope of the research. EEG data were preprocessed and time and frequency-based features were extracted. RF, SVM, and kNN machine learning algorithms were used to classify locomotion techniques. According to the NASA-TLX results, locomotion techniques significantly affected physical demand, effort, and frustration levels ($p < 0.05$). Climbing and hanging climbing techniques resulted in the highest workload ($p < 0.05$). In EEG classification, RF and kNN algorithms showed successful performance with high accuracy. Correlation analyses found negative relationships between classification accuracy and mental demand and frustration, and positive relationships between physical demand and effort. This study showed that VR locomotion techniques create different loads on users and that EEG can be used for objective classification of this load. The results emphasize the importance of selecting locomotion techniques to improve user experience.

2025, 66 page

Keywords: Virtual Reality, EEG, VR Locomotion, NASA-TLX, Objective Measurements, Subjective Measurements

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında bilgi, birikim ve değerli yönlendirmeleriyle yetişmeme büyük katkılar sağlayan, engin deneyimlerinden her zaman faydalandığım kıymetli danışmanım Sayın Doç. Dr. Yaşar DAŞDEMİR'e en derin saygı ve şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatım boyunca bana ilham veren, bilimsel çalışma disiplini aşılayan ve her zaman destekçim olan değerli babam Doç. Dr. Nurettin BİROL'a, akademik yolculuğumda tecrübeleriyle ışık tutan ve desteğini esirgemeyen kıymetli abim Doç. Dr. Yunus Emre BİROL'a ve bu süreçte maddi ve manevi desteklerini her an yanımda hissettiğim değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, gelişimime katkıda bulunan tüm Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğretim üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Esra Fatma BİROL
Mayıs 2025

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Sanal Gerçeklik (VR).....	1
1.2. Elektroensefalografi (EEG)	6
1.3. Beyin Bilgisayar Arayüzü (BBA)	11
1.4. NASA İş Yüğü İndeksi (NASA-TLX)	14
2. KAYNAK ÖZETLERİ	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM	30
3.1. Veri Seti	30
3.2. Öznel Değerlendirme	31
3.3. Nesnel Değerlendirme	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	40
4.1. NASA-TLX Bulguları	40
4.2. EEG Tabanlı Sınıflandırma	44
4.3. NASA-TLX Puanları ile EEG Tabanlı Sınıflandırma Doğruluğu Arasındaki Korelasyonlar	51
4.4. Literatürle Karşılaştırmalı Bulguların Değerlendirilmesi	54
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

dF	Serbestlik Derecesi
Hz	Hertz
Np^2	Etki Büyüklüğü
p	Anlamlılık Değeri
r	Korelasyon Katsayısı
α	Alfa
β	Beta
θ	Teta
δ	Delta
γ	Gama

Kısaltmalar

3D	3 Boyutlu
ANCOVA	Kovaryans Analizi
ANOVA	Varyans Analizi
ASR	Artefakt Alt Uzayı Yeniden Yapılandırması
BBA	Beyin Bilgisayar Arayüzü
CLT	Bilişsel Yük Testi
CWL	Bilişsel İş Yüğü
CWT	Sürekli Dalgacık Dönüşümü
DE	Diferansiyel Entropi
DOF	Serbestlik Derecesi
EDA	Elektrodermal aktivite
EEG	Elektroensefalografi
EKG	Elektrokardiyogram
EOG	Elektrookülogram
ERS	Olayla İlişkili Senkronizasyon
ERD	Olayla İlişkili Desenkronizasyon

FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FP	Yanlış Pozitif
GWO	Gri Kurt Optimizasyonu
HMD	Başa Takılan Ekran
HRV	Kalp Atış Hızı Değişkenliği
ICA	Bağımsız Bileşen Analizi
IVA	Akıllı Sanal Aracılar
IVR	Sürükleyici Sanal Gerçeklik
kNN	k- En Yakın Komşu
LDA	Doğrusal Diskriminant Analizi
LMM	Doğrusal Karma Model
MRMR	Minimum Fazlalık Maksimum İlgi
MSSQ	Hareket Hastalığı Duyarlılık Anketi
MWI	Zihinsel Yük Envanteri
NASA-TLX	NASA İş Yüğü Ölçeği
PQ	Mevcudiyet Anketi
PSD	Güç Spektral Yoğunluğu
RBF	Radial Taban Fonksiyonu
RF	Rastgele Orman
rLDA	Düzenli Doğrusal Diskriminant Analizi
ROC	Alıcı Çalışma Karakteristiği
SAT	Uzamsal Yetenek Testi
SMEQ	Öznel Zihinsel Çaba Anketi
SSQ	Simülatör Hastalığı Anketi
SVM	Destek Vektör Makineleri
TP	Gerçek Pozitif
VR	Sanal Gerçeklik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. VR HMD ve Kontrolcüler	1
Şekil 1.2. 3 DOF ve 6 DOF Serbestlik Dereceleri	3
Şekil 1.3. 32 Kanallı Emotiv Flex 2 Saline.....	7
Şekil 1.4. Uluslararası 10-20 Standart EEG Elektrot Yerleşim Düzeni	8
Şekil 1.5. Delta Dalgası	8
Şekil 1.6. Teta Dalgası.....	9
Şekil 1.7. Alfa Dalgası.....	10
Şekil 1.8. Beta Dalgası.....	10
Şekil 1.9. Gama Dalgası.....	11
Şekil 1.10. BBA Sisteminin Çalışma Prensiğini Gösteren Akış Şeması	12
Şekil 1.11. RF Mimarisi	13
Şekil 1.12. SVM Mimarisi	14
Şekil 3.1. Akış Diyagramı.....	30
Şekil 3.2. İstatistiksel Analiz Akış Diyagramı.....	32
Şekil 3.3. NASA-TLX Alt Faktörleri için Histogram ve Yoğunluk Grafikleri	34
Şekil 3.4. NASA-TLX Toplam İş Yüğü Puanları için Histogram ve Yoğunluk Grafiğı	36
Şekil 4.1. Lokomasyon Tekniklerinin Fiziksel Talep Üzerindeki Etkileri.....	41
Şekil 4.2. Lokomasyon Tekniklerinin Çaba Üzerindeki Etkiler.....	42
Şekil 4.3. Lokomasyon Tekniklerinin Rahatsızlık Üzerindeki Etkileri.....	43
Şekil 4.4. RF Algoritmasının Performans Metrikleri	48
Şekil 4.5. SVM Algoritmasının Performans Metrikleri.....	49
Şekil 4.6. KNN Algoritmasının Performans Metrikleri.....	50
Şekil 4.7. RF, SVM ve KNN Algoritmalarının Karışıklık Matrisleri.....	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Normallik Testi Sonuçları.....	33
Çizelge 3.2. Lokomasyon Tekniklerinin Toplam İş Yüğü Puanlarına ait Tanımlayıcı Bulgular	35
Çizelge 3.3. EEG Sinyallerinden Öznitelikler	37
Çizelge 4.1. Kruskal-Wallis Testi Sonuçları	40
Çizelge 4.2. Tekrarlı Ölçümlerde Tek Yönlü Varyans Analizi Bulguları	44
Çizelge 4.3. Sınıflandırıcıların Hiperparametreleri	45
Çizelge 4.4. Sınıflandırıcıların Performans Metrikleri	46
Çizelge 4.5. Sınıflandırıcıların Performans Metrikleri Ortalamaları	50
Çizelge 4.6. NASA-TLX Alt Faktörleri ile Sınıflandırma Doğruluğı Arasındaki Pearson Korelasyon Analizi Sonuçları.....	52
Çizelge 4.7. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma.....	55
Çizelge 4.8. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma – Ana Bulgular	57

1. GİRİŞ

1.1.Sanal Gerçeklik (VR)

Sanal gerçeklik (VR), bireyin fiziksel ortamda bilgisayarın olanaklarından faydalanabildiği, bilgisayar tarafından simüle edilen üç boyutlu bir mekânda mevcudiyetini hissettiği teknolojik sistemlerdir. Temel bileşenlerinden biri olan HMD (Başa Takılan Ekran), kullanıcının başına takılan ve görüş alanını tamamen kaplayan bir ekran ile üç boyutlu görüntü sağlar (Şekil 1.1). Bazı modeller, kullanıcının hareketlerini izlemek için jiroskop, ivmeölçer veya dış kamera sistemleri ile bütünleşmiş bir şekilde çalışır. Ayrıca, el kontrolcüler, dokunsal geri bildirim eldivenleri veya yürüme platformları gibi çevre birimleriyle etkileşim daha da gerçekçi hale getirilebilir. Son zamanlarda dünya çapında popülerliği artan VR uygulamaları oyun severlerden, seyahat tutkunlarına; mühendislerden, cerrahi pratik yapmak isteyen tıp öğrencilerine kadar geniş bir kullanıcı çeşitliliğine sahiptir (LaValle 2023). Söz konusu teknoloji, sanal çevre olarak adlandırılan, bilgisayar tarafından sağlanan ortamın gerçekçiliğini artırmak için kullanıcılarının çeşitli fiziksel duyularını uyaran bir beyin-bilgisayar arayüzüdür (Seth et al. 2011).



Şekil 1.1. VR HMD ve Kontrolcüler

VR teknolojisi kullanıcılarına benzersiz deneyimler sunabilmek için dört temel bileşeni bir araya getirmektedir. Bu bileşenlerden ilki, hedeflenen davranıştır; yani kullanıcının sanal ortamda gerçekleştirmesi beklenen ya da istenen eylemlerdir. Bu eylemler, basit bir nesneyle etkileşimden karmaşık bir simülasyonda belirli görevleri yerine getirmeye kadar geniş bir yelpazede olabilir. İkinci olarak, organizma olarak adlandırılan, bu sanal ortamı deneyimleyen kullanıcıdır. Kullanıcının fiziksel ve bilişsel özellikleri, VR deneyiminden alınan verimi ve etkileşimin doğasını doğrudan etkiler. Üçüncü temel bileşen, yapay duyuşsal uyarıdır; bu, kullanıcının görme, işitme ve dokunma gibi duyularına hitap eden görsel, işitsel ve dokunsal geri bildirimleri içerir. Bu uyarılar, sanal ortamın gerçekçiliğini artırmada ve kullanıcının o ortamda bulunma hissiyatını güçlendirmede kritik bir rol oynar. Son olarak farkındalık, kullanıcının sanal ortamda gerçekten var olduğuna dair hissettiği derin ve kişisel hissiyattır. Bu his, VR deneyiminin sürükleyiciliğinin ve inandırıcılığının temelidir ve kullanıcıların sanal dünya ile etkileşim kurma biçimlerini derinden etkiler (LaValle 2023). VR deneyiminin temelini oluşturan çift gözlü derinlik algılı grafik, derinlik ve 3 boyutlu algı yaratmak için kritik öneme sahiptir. VR başlıkları, her göz için ayrı bir ekran veya tek bir ekran üzerinde iki farklı görüntü akışı kullanarak bu etkiyi oluşturur. Bu teknoloji sayesinde kullanıcılar sanal dünyada gerçekçi bir 3 boyutlu deneyim yaşayabilmektedir.

VR deneyiminin temelinde, çift gözlü derinlik algılı grafik yatar; bu grafikler, derinlik algısı ve üç boyutlu algı yaratmak için vazgeçilmezdir. İnsan gözünün doğal olarak iki farklı perspektiften görme yeteneğini taklit eden bu teknoloji, VR başlıkları aracılığıyla her bir göz için ayrı bir ekran veya tek bir ekran üzerinde iki farklı görüntü akışı sunarak bu etkiyi oluşturur. Bu sayede, kullanıcılar sanal dünyadaki objeleri ve ortamları tıpkı gerçek hayattaki gibi üç boyutlu olarak algırlar, bu da deneyimin gerçekçiliğini ve sürükleyiciliğini önemli ölçüde artırır. Bu teknolojik yaklaşım, kullanıcıların sanal ortamda daha doğal ve sezgisel bir şekilde hareket etmelerine, etkileşimde bulunmalarına ve bu ortamları keşfetmelerine olanak tanır.

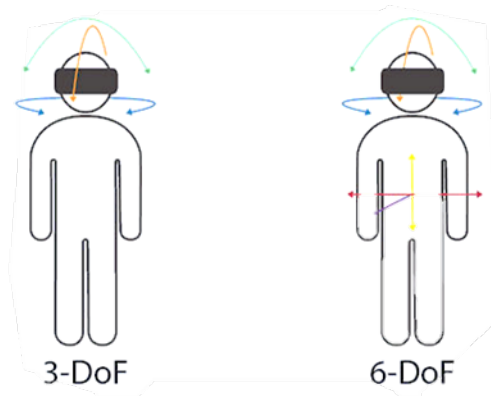
VR uygulamalarında, serbestlik derecesi, kullanıcının sanal ortamda ne kadar özgür ve çeşitli şekillerde hareket edebileceğini belirleyen temel bir kavramdır. Bu kavram, genellikle 3-DOF (Serbestlik Derecesi) ve 6-DOF olmak üzere iki ana kategoriye

1. GİRİŞ

ayrılır ve VR deneyiminin etkileyciliği ile kullanıcıların sanal dünyadaki varlık hissi üzerinde derin bir etkiye sahiptir.

3-DOF sistemler, kullanıcının başını yalnızca üç eksende (sağa-sola, yukarı-aşağı ve öne-arkaya) hareket ettirebilmesine olanak tanır (Şekil 1.2.). Bu sınırlı hareket kabiliyeti, genellikle daha basit VR uygulamalarında veya içerik tüketimi odaklı deneyimlerde yeterli olabilir. Ancak, kullanıcının sanal ortamda daha aktif bir şekilde etkileşimde bulunmasını gerektiren senaryolarda, 3-DOF'un sunduğu sınırlamalar, deneyimin gerçekçiliğini ve sürükleyiciliğini azaltabilir.

Buna karşılık, 6-DOF sistemler, kullanıcılara tam bir hareket özgürlüğü sunar. Başlarını üç eksende döndürmenin yanı sıra, sanal ortamda ileri-geri, yukarı-aşağı ve sağa-sola serbestçe hareket edebilirler (Şekil 1.2.). Bu gelişmiş hareket kabiliyeti, kullanıcının sanal dünyayla daha doğal ve sezgisel bir şekilde etkileşim kurmasına olanak tanıyarak, VR deneyiminin gerçekçiliğini ve etkileyciliğini önemli ölçüde artırır. 6-DOF, kullanıcının sanal ortamda kendi bedeninin bir uzantısı gibi hissetmesine yardım eder ve bireyde varlık hissi olarak adlandırılan derin bir sürüklenme duygusu meydana getirir. Özellikle eğitim, simülasyon ve oyun gibi alanlarda yüksek serbestlik derecesi, kullanıcıların sanal ortamda daha etkili ve verimli bir şekilde hareket etmelerine imkân tanır, bu da bu teknolojinin geniş bir yelpazede benimsenmesine ve kullanılmasına katkıda bulunur.



Şekil 1.2. 3 DOF ve 6 DOF Serbestlik Dereceleri

VR teknolojisi, video oyunlarından sürükleyici sinema deneyimlerine kadar eğlence sektöründe devrim yaratmıştır. Birinci şahıs nişancı oyunları, macera oyunları ve sosyal etkileşim platformları, kullanıcıların sanal dünyalara tamamen dalmalarına olanak tanımaktadır. Özellikle "Second Life" gibi sanal topluluklar ve Chris Milk'in Suriyeli mültecilerin deneyimlerini birinci şahıs bakış açısıyla sunduğu projeler, VR'ın empati kurmada ne kadar etkili olabileceğini göstermiştir (LaValle 2023). Eğitim alanında ise ABD hava kuvvetleri tarafından geliştirilen uçuş simülatörleri gibi uygulamalar, VR'ın potansiyelini ortaya koymaktadır. Tıp öğrencileri için cerrahi prosedür simülasyonları, mühendislik öğrencileri için sanal prototipleme ortamları ve askeri personel için savaş senaryo eğitimleri, VR'ın eğitimdeki çeşitliliğini göstermektedir.

Sağlık sektöründe VR teknolojisi hem eğitim hem de tedavi amaçlı kullanılmaktadır. Cerrahi eğitim simülasyonları, fobi tedavileri, rehabilitasyon programları ve kronik ağrı yönetimi gibi alanlarda başarıyla uygulanmaktadır. Özellikle Travma Sonrası Stres Bozukluğu tedavisinde maruz bırakma terapileri için güvenli ve kontrollü ortamlar sunmaktadır. Endüstriyel tasarım alanında ise ürün tasarım süreçlerinde sanal prototipleme, firmaların zaman ve maliyet tasarrufu yapmasını sağlamaktadır. Katlanabilir tasarımlar, ergonomik değerlendirmeler ve montaj hatası tespitleri gibi uygulamalar, VR'ın endüstriyel alandaki kullanım örneklerindendir.

Sanal çevrenin sürükleyiciliği, VR oyunları ve VR terapileri gibi çeşitli uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Sürükleyici sanal gerçeklik (IVR), kullanıcının fiziksel olarak gerçek dünyada bulunmasına rağmen, sanal bir ortamla tam etkileşim kurmasına olanak tanıyan bir deneyim sunar (Daşdemir 2023). Bu sürükleyiciliğin sağlanmasında vestibüler sistem, genellikle ihmal edilen ancak kritik öneme sahip bir unsurdur. Gerçek dünyada vestibüler sistem ve görsel sistem arasında doğal bir uyum bulunurken, VR ortamlarında bu iki sistem arasında uyumsuzluklar oluşabilmektedir. Bu durum, siber hastalık olarak adlandırılan mide bulantısı, baş dönmesi, baş ağrısı, göz yorgunluğu ve yorgunluk gibi fiziksel belirtilerin yanı sıra çeşitli bilişsel ve psikolojik semptomlara da yol açabilmektedir. VR deneyiminin başarılı olabilmesi için, kullanıcının baskın görsel uyaranlardan etkilenmesi ve kendisini sanal dünyada yaşıyormuş gibi hissetmesi gerekmektedir. Bu nedenle modern VR sistemleri, vestibüler uyumu sağlamak ve siber hastalık semptomlarını azaltmak için çeşitli teknikler geliştirmektedir.

VR teknolojisinin giderek artan popülaritesi, kullanıcıların sanal deneyimler sırasında hissettiği varlık hissiyatının, Metaverse olarak adlandırılan yeni bir dijital evrenin doğuşuna zemin hazırladığını göstermektedir. Metaverse, kullanıcıların sadece pasif izleyiciler olmak yerine, birbirleriyle ve sanal nesnelerle etkileşimde bulunabildiği, üç boyutlu, paylaşımlı ve sürekli bir çevrimiçi sanal dünyadır (Daşdemir 2022). Bu sanal evren, gerçek dünyanın bir simülasyonu olmanın ötesine geçerek, bireylerin simülasyonlar, oyunlar, pazarlama etkinlikleri, eğitim programları ve sosyal ilişkiler gibi çok çeşitli alanlarda aktif rol almasına olanak tanır (Park and Kim 2022).

Bu sanal evrenlerde veya diğer VR ortamlarında kullanıcıların hareket etmesine olanak tanıyan teknik, VR Lokomasyon olarak adlandırılmaktadır (Daşdemir 2023). Lokomasyon, VR araştırmacıları ve geliştiricileri için daima mücadele ettikleri bir zorluk olmuştur. Sınırlı izleme alanları ve kullanıcıların fiziksel hareketlerindeki kısıtlamalar, bu alandaki temel engelleri oluşturmuştur (Martinez et al. 2022). VR lokomasyon uygulamaları, sanal ortamda gerçekleştirilmesi istenen hareketlerin kullanıcılar üzerindeki etkilerinin incelenmesini amaçlar. Bu uygulamalar üzerine yapılan çalışmalarda, çeşitli hareket teknikleri araştırılmış ve uygulanmıştır.

Sanal ortamlarda hareket etme (lokomasyon) teknikleri, kullanıcı deneyiminin en kritik unsurlarından biridir. Fiziksel olarak mümkün olmayan hareketler dahil olmak üzere, VR lokomasyon üç boyutlu sanal ortamlarda benzersiz hareket tekniklerinin incelenmesinde oldukça önemlidir (Slater and Usoh 1994). Çoğu VR lokomasyon uygulamaları fiziksel ortamda yürüme ya da kontrolcülerin kullanımına bağlı olmaktadır. Bu durum, kullanıcıların sınırsız sanal dünyadaki deneyimlerini kısıtlamaktadır. Bu tür olumsuzlukları ortadan kaldırmak için koşu bandı benzeri ekipmanlar kullanılmaktadır (Daşdemir 2023). Bir tür koşu bandı olan bir cihazla, Yerinde Yürüme (Bruno et al. 2013; Wendt et al. 2010; Wilson et al. 2014; Wilson vd 2014), kol sallama (McCullough et al., 2015; Wilson et al., 2016), ışınlanma (Bozgeyikli et al. 2016a; Bozgeyikli et al. 2016b), yeniden yönlendirme (Paris et al., 2017) ve jest tabanlı hareketler (Ferracani et al. 2016) uygun şekilde geliştirilmiştir. Bu çalışmada incelenen on farklı lokomasyon tekniği arasında gerçek zamanlı yürüme, ışınlanma, kaydırma, sürekli hareket, sürekli el hareketi, tırmanma, asılarak tırmanma, dokunma, yürüme ve koşma yer almaktadır. Bu tekniklerin her biri, kullanıcılar üzerinde farklı fiziksel ve bilişsel yükler oluşturmaktadır. Özellikle

tırmanma ve asılarak tırmanma gibi fiziksel olarak daha zorlayıcı tekniklerin, NASA-TLX ölçümlerine göre daha yüksek iş yüküne neden olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışmalarda hem nesnel hem de öznel yöntemler kullanılmaktadır. Katılımcılardan doğrudan elde edilen elektroensefalogram (EEG), elektrokardiyogram (EKG) ve elektrookülogram (EOG) gibi fizyolojik sinyallerin işlenmesine dayanan nesnel yöntemlerin yanı sıra, katılımcılar tarafından doldurulan anket ve ölçeklerin istatistiksel analizine dayanan öznel yöntemler uygulanmaktadır. Bu çalışmada nesnel teknik olarak EEG ve öznel teknik olarak NASA-TLX kullanılmıştır.

1.2. Elektroensefalografi (EEG)

Beyinde elektriksel aktivitenin varlığı ilk kez 1875 yılında Richard Caton tarafından ortaya konmuştur. Caton, maymun ve kedilerin açık korteksine galvanometre uygulayarak elektriksel potansiyel değişimlerini tespit etmiştir. 1929 yılında ise Hans Berger, insan beyninin elektriksel aktivitelerini kafatası üzerine yerleştirdiği elektrotlar ve galvanometre aracılığıyla kaydetmeyi başarmıştır. Berger, bu ölçümler sonucunda alfa (8–13 Hz) ve beta (13–30 Hz) dalga ritimlerini tanımlayarak elektroensefalogram (EEG) adı verilen sinyallerin bilimsel temellerini atmıştır. EEG sinyalleri, beyin sinirsel faaliyetlerini izlemek açısından önemli bir biyolojik gösterge niteliği taşımaktadır. EEG'nin klinik ortamlarda tanı aracı olarak kullanımı, özellikle 1930'lu yıllarda epilepsi üzerine yapılan araştırmalarla yaygınlaşmıştır (Niedermeyer and Da Silva 2005).



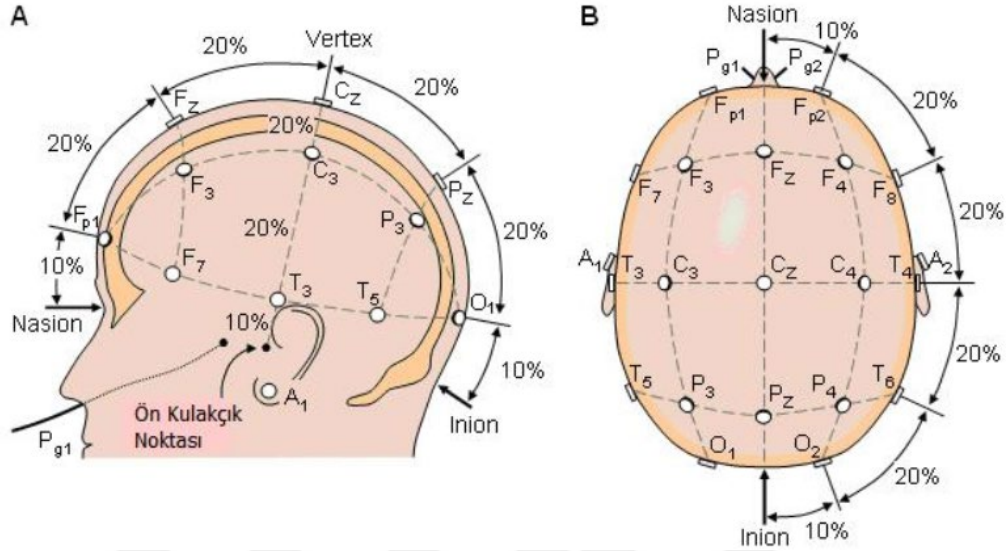
Şekil 1.3. 32 Kanallı Emotiv Flex 2 Saline

EEG sinyalleri, kafatası üzerine cerrahi girişim gerektirmeyen yöntemle yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla elde edilmektedir (Şekil 1.3.). Elektrotların doğru konumlandırılması, EEG sinyallerinin sağlıklı bir şekilde kaydedilmesi, analiz edilmesi ve yorumlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle uluslararası düzeyde standartlaştırılmış elektrot yerleşim sistemleri geliştirilmiştir. Elektrotlar genellikle beyinde yer alan; frontal, parietal, temporal ve oksipital loblar gibi anatomik bölgeler temel alınarak yerleştirilmektedir. En yaygın kullanılan sistemlerden biri, Uluslararası EEG Federasyonu tarafından kabul edilen 10-20 elektrot yerleşim sistemidir. Bu sistemde her bir elektrotun konumu, ait olduğu beyin bölgesini simgeleyen bir harf (örneğin F: Frontal, C: Merkez, P: Parietal, O: Oksipital) ve hemisfer konumunu belirten bir sayı ile ifade edilir.

Elektrotların yerleştirileceği noktaların belirlenmesinde, burnun alınla birleştiği nokta olan nazyon ve başın arkasında yer alan kemik çıkıntısı inyon temel referans noktalarıdır. İlk yerleştirme noktası frontal kutbu temsil eden Fp elektrotudur. Elektrotlar, nazyon-inyon mesafesinin %10'u ve %20'si oranında hesaplanan aralıklarla yerleştirilir.

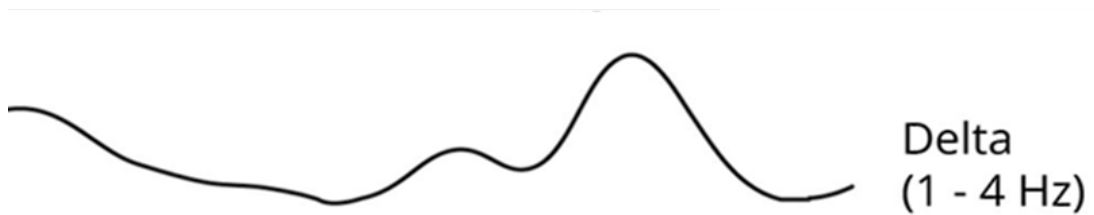
1. GİRİŞ

Bu şekilde oluşturulan düzenli yapı sayesinde EEG sinyalleri güvenilir ve karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmektedir. Şekil 1.4'te 10-20 sistemine göre elektrotların kafatası üzerindeki yerleşimi şematik olarak gösterilmektedir.



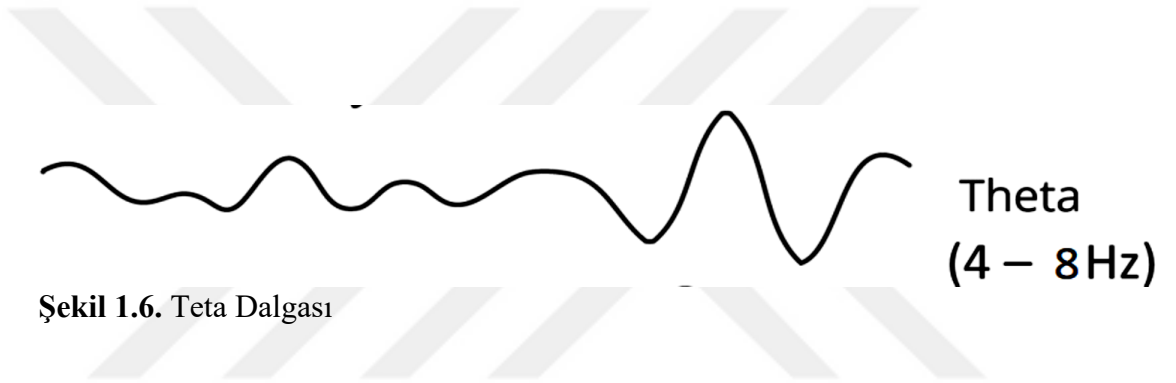
Şekil 1.4. Uluslararası 10-20 Standart EEG Elektrot Yerleşim Düzeni

EEG sinyalleri farklı frekans bantlarına ayrılarak incelenmektedir. Delta bandı, 1 ila 4 Hz frekans aralığında yer alan, beyindeki en yavaş ancak en yüksek genlikli sinyallerden biridir (Şekil 1.5.). Niedermeyer ve Da Silva (2005), bu frekans aralığındaki salınımları delta dalgaları olarak tanımlamaktadır. Genellikle yalnızca derin REM-dışı uykusunun üçüncü evresinde gözlemlenen delta aktivitesi, bireyin uyku derinliğini belirlemede önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Uyku laboratuvarlarında yapılan değerlendirmelerde, delta bandı gücünün artışı, uyku derinliğinin bir işareti olarak yorumlanmaktadır.



Şekil 1.5. Delta Dalgası

Teta bandı, 4-8 Hz frekans aralığına sahip EEG dalgalarıdır (Şekil 1.6.). Genellikle bu dalgalar zihinsel işlem gücü, dikkat düzeyi ve çalışma belleği ile ilişkilendirilmektedir (Niedermeyer and da Silva 2005). Frontal bölgelerdeki teta aktivitesi, özellikle bilgi alımı, öğrenme süreçleri ve bellek geri çağırımı gibi bilişsel işlemler sırasında artış göstermektedir (Klimesch 1996; O’keefe et al. 1999; Schack et al. 2005). Bu nedenle, teta dalgalarının güç düzeyi genellikle görev zorluğuyla orantılı olarak arttığı söylenebilmektedir. Teta aktivitesi, orta prefrontal korteksin yanı sıra paryetal ve temporal bölgelerde geniş bir sinirsel ağ tarafından üretildiği düşünülmektedir. Karmaşık navigasyon görevleri veya yüksek bilişsel yük gerektiren deneylerde teta bandı gücünün anlamlı şekilde yükseldiği rapor edilmiştir. Bu özellikleri nedeniyle teta bandı, bilişsel yük düzeylerinin değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olarak kabul edilir.



Alfa bandı; Şekil 1.7.’de gösterildiği üzere 8-12 Hz frekans aralığında ortaya çıkan ritmik salınımlardır (Niedermeyer and da Silva 2005). Alfa bandı, genellikle fiziksel ve zihinsel rahatlama durumlarında ortaya çıkarken, özellikle gözlerin kapalı olduğu anlarda daha belirgin hale gelmektedir. Ancak dikkat gerektiren herhangi bir uyarana karşı duyarlılığın arttığı durumlarda alfa dalgalarında baskılanma meydana gelmektedir. Bu nedenle alfa bandı gücündeki azalma bireyin bilişsel olarak aktif olduğunu gösteren nörofizyolojik bir işaret olarak kabul edilmektedir (Rana and Vaina 2014). Alfa dalgaları; dikkat, duyuşal işleme ve bellek ile ilişkili süreçlerde önemli rol oynamaktadır. Alfa bandı gücünün dikkat performansı, meditasyon düzeyi ve uyarana verilen tepki gibi birçok parametreyle ilişkili olduğu birçok çalışmayla gösterilmiştir (Klimecki et al. 2013)



Şekil 1.7. Alfa Dalgası

Beta frekans bandı, 12 ila 25 Hz aralığında yer almakta olup, aktif düşünme, konsantrasyon, karar verme ve motor hareket planlaması ile ilişkilidir (Şekil 1.8.) (Niedermeyer and da Silva, 2005). Bu dalgalar frontal ve motor korteks bölgelerinde daha yoğun olarak gözlemlenir. Özellikle ince motor hareketleri gerektiren görevlerde beta bandı gücü artış göstermektedir. Bununla birlikte, gözlem yoluyla başkalarının hareketlerine tepki verildiğinde de beta gücünde artış gözlenmiş, bu durum beynin taklit ve ayna nöron sistemleriyle bağlantılı olduğuna işaret etmiştir. Beta aktivitesi aynı zamanda uyarıcı etkilere, stres düzeyine ve dışsal bilişsel taleplere duyarlı bir gösterge olarak değerlendirilir (Zhang et al. 2008).



Şekil 1.8. Beta Dalgası

Gama bandı, 25 Hz üzerindeki beyin aktivitelerini kapsar ve EEG araştırmalarında hâlen en çok tartışılan frekans bantlarından biridir (Şekil 1.9.). Gama dalgalarının, farklı duyuşal girdileri birleştirerek bütünsel bir algı oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir. Bazı araştırmacılar, gama aktivitesinin dikkat ve bilinçli algı süreçleriyle bağlantılı olduğunu öne sürerken, bazıları da bu dalgaların göz hareketleri ya da fizyolojik yan etkilere kaynaklanabileceğini belirtmektedir (Dimigen et al. 2009). Yine de gama frekansı, özellikle yüksek dikkat gerektiren görevlerde ve karmaşık bilişsel süreçlerin takibinde incelenen önemli bir parametredir.



Şekil 1.9. Gama Dalgası

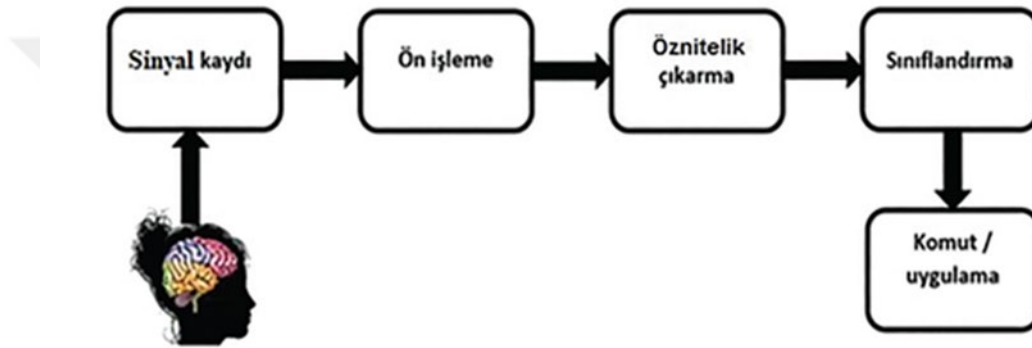
Güncel EEG araştırmalarında, geleneksel frekans bandı analizlerine ek olarak zaman-frekans analizleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Jungnickel ve Gramann (2016), mobil EEG sistemleriyle doğal ortamlarda yapılan çalışmalarda, hareket artefaktlarını azaltmak için geliştirdikleri yeni ön işleme algoritmalarını detaylandırmıştır.

1.3. Beyin Bilgisayar Arayüzü (BBA)

EEG, VR oyunlarının oyuncular üzerindeki bilişsel etkilerinin (Wan et al., 2021), insan-bilgisayar etkileşiminin ve sıklıkla beyin-bilgisayar arayüzlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Lai et al. 2018; Lotte et al. 2018). BBA, son yıllarda nöro bilim ve mühendislik disiplinlerinin kesişiminde önemli bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, insan beyninin elektriksel aktivitesini yorumlayarak doğrudan dijital sistemlerle iletişim kurmayı mümkün kılmaktadır. EEG tabanlı BBA sistemleri, cerrahi müdahale gerektirmeyen doğası ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle özellikle klinik uygulamalarda ve insan-bilgisayar etkileşimi üzerine yapılan araştırmalarda tercih edilmektedir. Günümüzde bu sistemler, felçli hastaların iletişim kurmasına yardımcı olmaktan, VR ortamlarda doğal etkileşimlere kadar geniş bir yelpazede uygulanmaktadır.

VR ortamları, BBA teknolojileri için ideal bir uygulama alanı sunmaktadır. VR-BBA entegrasyonu, kullanıcıların düşünce gücüyle sanal nesneleri kontrol edebilmesine veya ortamın kendi duygusal durumlarına göre dinamik olarak uyarlanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu alandaki son gelişmeler, motor imgelemeye dayalı sistemlerin yanı sıra dikkat seviyesi ve bilişsel yük ölçümlerine dayalı adaptif sistemler üzerinde yoğunlaşmaktadır.

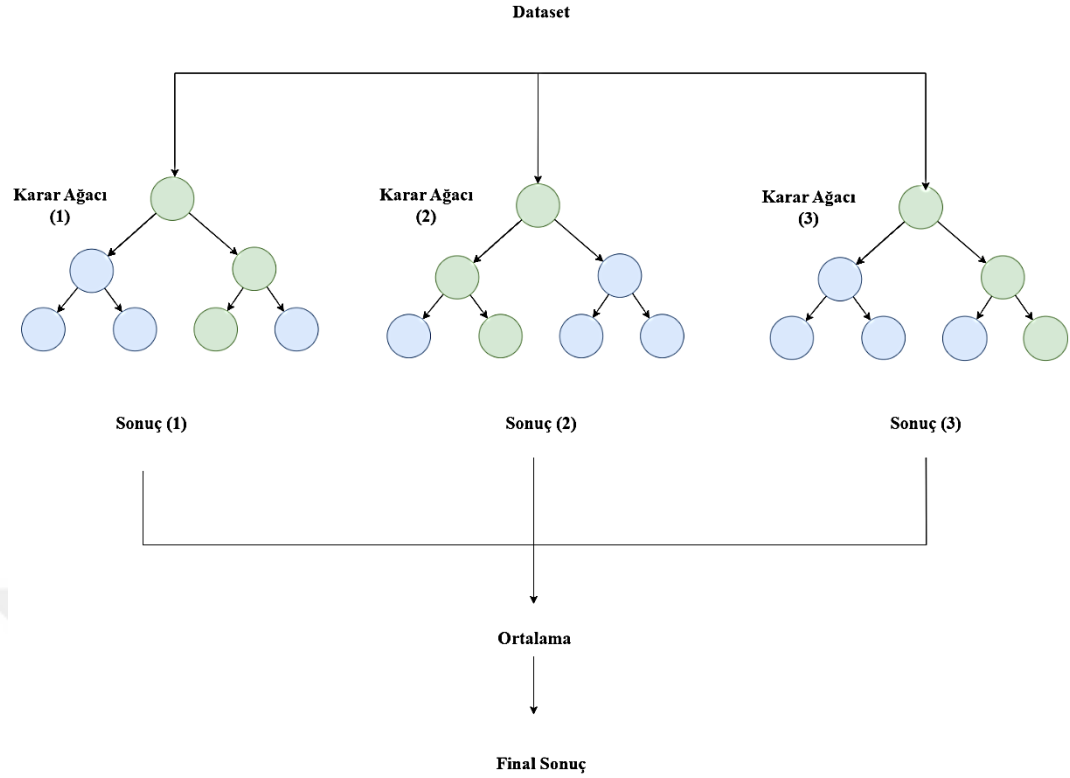
Şekil 1.10'da beyin sinyallerinin kaydından başlayarak ön işleme, öznelik çıkarımı, sınıflandırma ve son olarak uygulamaya dönüştürülmesine kadar uzanan temel BBA süreci adım adım gösterilmektedir. EEG tabanlı sistemlerde, kullanıcının belirli bir eylemi hayal etmesi sonucu oluşan ritim değişiklikleri, makine öğrenimi algoritmalarıyla analiz edilmektedir. Son çalışmalar, derin öğrenme tekniklerinin bu süreçteki sınıflandırma doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Özellikle evrişimli sinir ağları ve uzun-kısa vadeli bellek modelleri, EEG sinyallerindeki karmaşık örüntüleri tanımda geleneksel yöntemlere göre belirgin üstünlükler sergilemektedir.



Şekil 1.10. BBA Sisteminin Çalışma Prensiğini Gösteren Akış Şeması

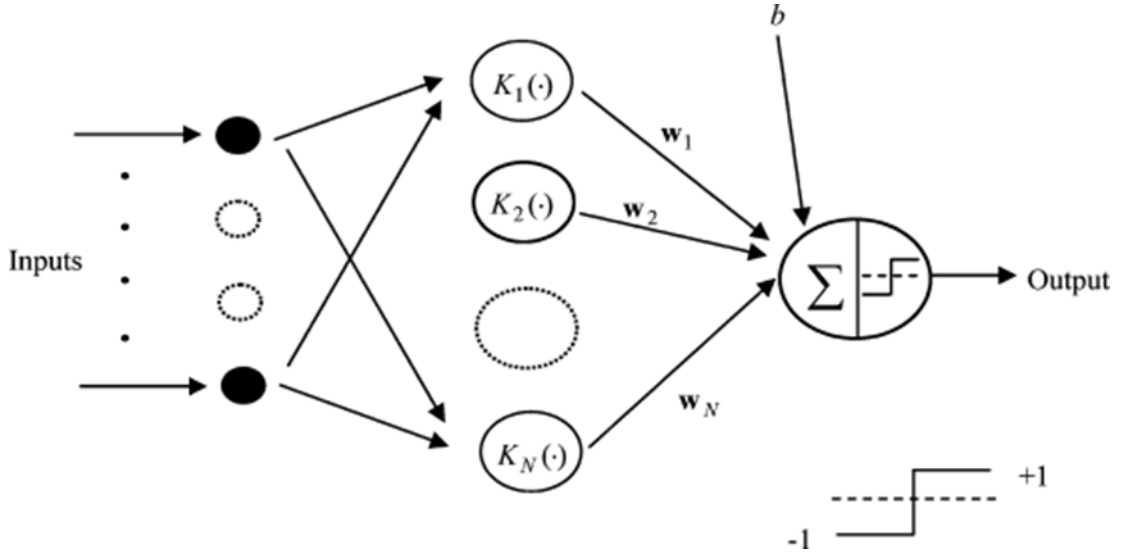
BBA sistemlerinde sinyal işleme ve örüntü tanıma aşamaları, makine öğrenimi algoritmalarının kritik rol oynadığı temel bileşenlerdir (Lotte et al. 2018). Bu tez bağlamında kullanılan Rastgele Orman (RF), Destek Vektör Makineleri (SVM) ve k-En Yakın Komşu (kNN) algoritmaları, EEG tabanlı BBA sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Bu algoritmalar, beyin sinyallerindeki karmaşık örüntülerin sınıflandırılmasında önemli avantajlar sunmaktadır.

Rastgele Orman (RF) algoritması, EEG sinyali analizinde özellikle çoklu kanal verilerinin işlenmesinde etkili sonuçlar vermektedir (Şekil 1.11.). Birden fazla karar ağacının kombinasyonuna dayanan bu yöntem, EEG verilerinde sıkça karşılaşılan yüksek boyutluluk problemini ele almakta ve özellik seçimi sürecinde istikrarlı performans sergilemektedir. RF'nin en önemli avantajlarından biri aşırı uyum riskini minimize edebilmesi ve gürültüye karşı dirençli olmasıdır (Pal 2005).



Şekil 1.11. RF Mimarisi

Destek Vektör Makineleri (SVM), EEG tabanlı BBA sistemlerinde en sık kullanılan sınıflandırıcılardan biridir. Şekil 1.12. SVM'nin mimarisini göstermektedir. SVM'nin doğrusal olmayan verilerde yüksek boyutlu özellik uzayında optimal ayırıcı hiperdüzlem oluşturma yeteneği, motor imgelemeye dayalı EEG örüntülerinin sınıflandırılmasında önemli başarılar sağlamaktadır. Özellikle RBF (Radyal Taban Fonksiyonu) çekirdeği kullanıldığında, EEG sinyallerindeki zamansal ve frekans özelliklerinin etkili şekilde modellenilebildiği gözlemlenmiştir (Guler and Ubeyli 2007; Suthaharan 2016). SVM'nin küçük veri kümelerinde bile iyi performans göstermesi, klinik uygulamalarda önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1.12. SVM Mimarisi (Guler and Ubeyli 2007)

K-En Yakın Komşu (kNN) algoritması, makine öğreniminde en temel ve sezgisel sınıflandırma yöntemlerinden biridir. KNN algoritması, sınıflandırılacak yeni bir veri noktasının, eğitim veri kümesindeki en yakın k komşusunun çoğunluk oylamasına göre sınıflandırılması prensibine dayanmaktadır. EEG sinyali analizinde, bir zaman penceresine ait öznitelik vektörü (örneğin, frekans bant güçleri) ile eğitim setindeki diğer örnekler arasındaki uzaklıklar hesaplanır. En küçük uzaklığa sahip k örnek belirlenerek, yeni örneğin sınıf etiketi bu komşuların etiketlerine göre belirlenir (Cover and Hart 1952). KNN algoritması, EEG sinyali sınıflandırmasında basit uygulanabilirliği ve yüksek yorumlanabilirliği ile öne çıkmaktadır. Özellikle gerçek zamanlı BBA sistemlerinde düşük hesaplama maliyeti avantajı sunan bu yöntem, uzaysal özelliklerin önemli olduğu EEG veri kümelerinde etkili sonuçlar vermektedir. KNN'nin parametre optimizasyonu sürecinde, EEG verilerinin zaman serisi karakteristiği dikkate alınarak uygun uzaklık metriği seçimi yapılması kritik önem taşımaktadır (Imandoust and Bolandraftar 2013).

1.4. NASA İş Yüğü Ölçeği (NASA-TLX)

Öznel yöntemler, deneysel çalışmalarda katılımcıların kişisel görüşlerine, deneyimlerine, hislerine veya algılarına dayanan değerlendirme ve ölçme yöntemleridir. Bu yöntemlerde, veriler genellikle gözlem, anket, mülakat veya öz değerlendirme gibi araçlarla toplanır. Kullanım kolaylığı, düşük maliyetli oluşu ve basit nicel sonuçlar

1. GİRİŞ

vermesiyle, öznel yöntemler araştırmalarda yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Yaygın kullanılan öznel yöntemlerden birisi NASA İş Yükü Ölçeği'dir.

NASA İş Yükü Ölçeği (NASA-TLX), Hart (1986) tarafından oluşturulmuş, bireylerin gerçekleştirdikleri görevlerin meydana getirdiği genel iş yükünü ölçme prensibine dayalı öznel bir metottur. Orijinal olarak havacılık ve uzay görevlerinde pilotların bilişsel yükünü değerlendirmek için tasarlanan bu yöntem, zaman içinde tıp, otomotiv, eğitim ve sanal gerçeklik gibi çok çeşitli alanlarda kullanım alanı bulmuştur.

NASA-TLX'in temel amacı, bir görevi gerçekleştiren bireyin algıladığı zihinsel, fiziksel ve zamansal talepleri çok boyutlu bir perspektifle ölçmektir. Geleneksel tek boyutlu iş yükü ölçeklerinden farklı olarak, NASA-TLX altı farklı boyutta değerlendirme yaparak daha kapsamlı bir analiz sunmaktadır.

Zihinsel Talep (Mental Demand): Görevi tamamlamak için gereken zihinsel çaba ve bilişsel işlem miktarını,

Fiziksel Talep (Physical Demand): Görevin fiziksel aktivite düzeyi ve bedensel çaba gereksinimini,

Zamansal Talep (Temporal Demand): Görevin hız veya zaman baskısı altında gerçekleştirilme derecesini,

Performans (Performance): Görev hedeflerini gerçekleştirmedeki başarı algısını,

Çaba (Effort): Görev hedeflerine ulaşmak için harcanan enerji miktarını,

Rahatsızlık (Frustration): Görev sırasında meydana gelen gerginlik veya motivasyon kaybı düzeyini ifade etmektedir.

NASA-TLX hem ağırlıklardan hem de derecelendirmelerden oluşan iki bölümlü bir değerlendirme prosedürüdür. İlk bölümde, katılımcılardan her faktörün, verilen

1. GİRİŞ

görevin iş yüküne ne derece katkıda bulunduğunu değerlendirmeleri istenir. Katılımcı, her bir boyutu 0-100 arasında puanlar. Boyut puanlarının daha sonra ağırlıklandırılmasıyla toplam iş yükü puanı hesaplanır. Sonraki bölümde altı faktörün ikili karşılaştırması yer almaktadır. Toplam 15 ikili karşılaştırma yapılarak, hangi boyutların görev yüküne daha fazla katkı yaptığı belirlenir. Örneğin, "Zihinsel Talep mi yoksa Fiziksel Talep mi bu görevde daha önemliydi?" sorusu yöneltilir. Her boyutun aldığı oy sayısı boyut ağırlık puanını oluşturur. Değerlendiricilerin bakış açısına göre, altı faktörün her birinin değerlendirilecek görevin iş yüküne ne ölçüde katkıda bulunduğu, altı faktör arasındaki ikili karşılaştırmalara verdikleri yanıtlarla belirlenmektedir (Hart 1986).

$$\text{Toplam İş Yükü Puanı} = \sum \frac{(\text{Boyut Ağırlık Puanı} \times \text{Boyut Puanı})}{15} \quad (1.1)$$

Bu formülle elde edilen puan 0-100 aralığında yer alır ve yüksek değerler daha fazla algılanan iş yükünü gösterir. Ölçeğin bu çift aşamalı yapısı, hem görevin niteliğine göre boyutların göreceli önemini hem de mutlak değerlendirmeleri yakalayabilmesini sağlar.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Günümüzde sanal gerçeklik pek çok alanda kendini göstermektedir. Sağlık (Bansal et al. 2022), eğitim (Lai and Cheong 2022), rehabilitasyon (Quintana et al. 2022) gibi alanlarda fırsatlar sunan sanal gerçeklik, bir ortam olarak sanal çevreleri meydana getirmektedir. Bu konuyla ilgili ‘Metaverse’ teriminden bahsedilmektedir. Metaverse; oluşturulan avatarların, siyasi, ekonomik, kültürel ve sosyal faaliyetlerde bulunmasına imkân sağlayan sanal bir evrendir (Park and Kim 2022).

Kullanıcılar için doğal hareket kabiliyetlerini oluşturmak amacıyla VR araştırmacılar ve geliştiriciler tarafından yüzlerce lokomasyon tekniği geliştirilmiştir. Bunun yanında, lokomasyon tekniklerini kategorize etmeye yarayacak çok sayıda sınıflandırma da yapılmıştır (Di Luca et al. 2021; Prinz et al. 2021). VR üzerine yapılan araştırmaların çoğu yatay düzlemde hareket etmeyi içermektedir. VR’da dikey hareketleri inceleyen bazı çalışmalarda merdiven çıkma deneyimi sunulmuştur (Kamboj et al. 2019; Slater and Usoh 1994).

Son yıllarda EEG ile VR arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar artmış durumdadır. EEG dalgalarının bilişsel performansı yansıttığı ve bilişsel değerlendirme için uygun yöntem olarak kullanılabileceği araştırmacılar tarafından kabul görmektedir. Son zamanlarda yapılan araştırmalar, bilişsel yük, dalma, mekânsal farkındalık, dijital ortamla etkileşim ve dikkat gibi alanlarda bilişsel işlevlere odaklanmaktadır (Gramouseni et al. 2023). Bu çalışmalar, VR ortamlarında kullanıcıların bilişsel yük seviyelerini belirlemek ve bu yüklerin farklı lokomasyon tekniklerine göre nasıl değiştiğini anlamak için EEG verilerini kullanmaktadır. Örneğin bazı araştırmalar, farklı lokomasyon tekniklerinin bilişsel yük üzerindeki etkilerini analiz ederek, hangi tekniklerin daha fazla zihinsel kaynak gerektirdiğini belirlemiştir (Lai and McMahan 2020). Bu tür bulgular, VR uygulamaların tasarımında kullanıcı deneyimini optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

VR sistemlerinde bilişsel yükün anlaşılması, kullanıcı deneyiminin optimizasyonu ve sistem tasarımının iyileştirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır (Gao and Kasneci 2024). Bu bağlamda, bilişsel yükün değerlendirilmesinde hem öznel

hem de objektif ölçüm yöntemlerinin bütünleşmiş bir şekilde kullanılması araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Öznel değerlendirmeler için anketler ve NASA-TLX gibi standart ölçekler kullanılırken, nesnel veri toplamak amacıyla EEG ile nöral aktivite ölçümleri, kalp atış hızı değişkenliği (HRV) ile otonom sinir sistemi tepkileri, elektrodermal aktivite (EDA) ile duygusal uyarılma düzeyi ve göz bebeği ölçümü (pupillometri) ile bilişsel çaba gibi çoklu fizyolojik metriklerden yararlanılmaktadır (Funk et al. 2019; Griffin et al. 2018). Özellikle sanal ortamlarda kullanılan farklı lokomasyon tekniklerinin bilişsel yük üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar, NASA-TLX ölçeğinin bu tekniklerin kullanıcı performansı ve deneyimi üzerindeki farklı etkilerini ortaya koymada etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Yapılan araştırmalar, örneğin ışınlanma, yürüme simülasyonu veya konsol kontrolleri gibi farklı hareket mekanizmalarının, kullanıcıların zihinsel çaba, zaman baskısı ve performans algısı gibi boyutlarda önemli farklılıklar yarattığını ortaya koymaktadır (Funk et al. 2019; Griffin et al. 2018). Bu bulgular, VR sistem tasarımcılarına, kullanıcı dostu ve bilişsel açıdan verimli arayüzler geliştirmeleri için değerli bilgiler sunmaktadır.

Kullanıcıların, Metaverse evrenini daha gerçekçi şekilde deneyimleyebilmeleri için varlık hissiyatının sağlanması son derece önemlidir. Soler-Domínguez vd (2020)'nin yaptığı çalışmada, iki farklı lokomasyon yöntemi (yerinde yürüme ve dolaylı yürüme) karşılaştırılmış ve bu tekniklerin varlık hissiyatı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmadığı bulunmuştur. Araştırmada, katılımcıların bir sanal labirentten kaçmaya çalıştıkları, anlatıdan bağımsız bir senaryo kullanılmıştır. Varlık hissini ölçmek için, öznel, davranışsal ve fizyolojik olmak üzere üç farklı boyuttan temsili metrikler kullanılmıştır. Öznel varlık hissi ITC-Varlık Duygusu anketi ile, davranışsal varlık katılımcıların tepkileri gözlemlenerek, fizyolojik varlık ise bir bileklik aracılığıyla kaydedilen EDA ile ölçülmüştür. Çalışmanın sonuçları iki önemli bulguya işaret etmektedir. İlk olarak, farklı varlık ölçütleri arasında herhangi bir korelasyon bulunmamıştır. Bu durum, varlık hissini ölçülmesinin, farklı metrikler kullanılarak daha basit ve nesnel bir şekilde yapılabileceğine dair bir kapı aralamaktadır. İkinci olarak, incelenen lokomasyon teknikleri arasında, varlık hissini herhangi bir boyutunda anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu sonuç, VR deneyiminin gerçekçiliğinin, sanal ortamda hareket etme biçiminden ziyade, başka faktörlere bağlı olabileceğini düşündürmektedir. Ancak çalışma, davranışsal ölçümlerde dolaylı yürüme yönteminin daha fazla doğal tepkiye yol

açtığını ortaya koyarak, kullanıcı deneyiminin kişiselleştirilmesinin önemine dikkat çekmiştir. Bu sonuçlar, genel olarak gerçekçi lokomasyon yöntemlerinin daha yüksek bir varlık hissiyatıyla ilişkili olduğu yönündeki yaygın kanıyı destekler niteliktedir (Soler-Domínguez et al. 2020).

Wei ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan bir araştırma, farklı sanal ortamların, özellikle film prodüksiyonu gibi alanlarda, öğrenme sonuçlarını nasıl etkilediğini araştırmıştır. Bu çalışma, sanal gerçeklik ortamlarının sinema eğitimi alanındaki potansiyelini inceleyerek, özellikle film aydınlatma tekniklerinin öğretiminde farklı sanal ortamların ve öğrenme biçimlerinin bireysel ve takım tabanlı öğrenme çıktıları üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. VR teknolojisinin, öğrencilere fiziksel stüdyo kısıtlamaları olmaksızın aydınlatma kurulumlarını deneyimleme ve pratik yapma imkânı sunarak sinema eğitimine önemli katkılar sağladığı belirtilmektedir. Ancak, farklı sanal ortamların bu öğrenme süreçlerini nasıl etkilediği konusunda sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu makale, bu boşluğu doldurmayı amaçlayarak, farklı sanal ortamların ve öğrenme modlarının etkileşimini incelemektedir. Çalışmada, katılımcıların film aydınlatma görevlerini yerine getirdikleri üç farklı sanal ortam belirlenmiştir: standart bir stüdyo ortamı, bir plaj sahnesi ve bir ofis ortamı. Bu ortamlar, artan karmaşıklık ve uyaran seviyelerine göre seçilmiştir; stüdyo ortamı en az karmaşık ve görev odaklı iken, plaj sahnesi en fazla dikkat dağıtıcı unsuru içermektedir. Katılımcılar, bu ortamlarda bireysel veya takım halinde çalışarak, sanal ışık kaynaklarını ayarlama görevlerini yerine getirmişlerdir. Araştırmada kullanılan öznel yöntemler arasında NASA-TLX anketi bulunmaktadır. Araştırmanın temel bulguları, sanal ortamın karmaşıklığının ve öğrenme modunun, öğrencilerin deneyimleri ve performansları üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir. Özellikle, bireysel öğrenenler için plaj gibi dinamik ve uyaran zengini bir ortam, bilişsel yükü ve zorlanmayı artırsa da aynı zamanda katılımı ve algılanan performansı olumlu yönde etkilemiştir. Bu durum, öğrenme sürecinde istenilen zorluklar kavramıyla ilişkilendirilmekte ve zorlayıcı ortamların daha derinlemesine öğrenmeyi teşvik edebileceğini düşündürmektedir. Takım tabanlı öğrenme ise, özellikle ofis gibi daha tanıdık ve yapılandırılmış ortamlarda, iş birliğini teşvik ederek bilişsel yükü azaltmış ve performansı artırmıştır. Bu bulgu, işbirlikçi öğrenmenin, özellikle karmaşık olmayan görevlerde, kolektif bilgi birikiminden yararlanma ve bilişsel yükü paylaşma yoluyla öğrenme çıktılarını iyileştirebileceğini desteklemektedir. Çalışma ayrıca, sanal ortamın

türü ile öğrenme modu arasında anlamlı bir etkileşim olduğunu ortaya koymuştur. Takım tabanlı öğrenme en iyi sonuçları standart stüdyo ortamında verirken, bireysel öğrenenler plaj gibi daha zorlu ortamlarda daha başarılı olmuştur. Bu durum, öğrenme ortamının tasarımının, öğrenme moduna uyum sağlamasının önemini vurgulamaktadır; daha karmaşık ve uyaran zengini ortamlar, bireysel öğrenmeyi destekleyerek kişisel problem çözme ve yaratıcılık becerilerini geliştirebilirken, yapılandırılmış ortamlar takım çalışmasını ve iş birliğini kolaylaştırabilir (Wei et al. 2025).

Babu vd (2025) ise VR ve EEG'nin eş zamanlı kullanımı yoluyla yeni bir EEG duygu veri seti geliştirmişlerdir. Bu veri seti kullanılarak duygu sınıflandırma performansı üzerine bir değerlendirme yapılmıştır. Bu uygulama hem sanal hem de gerçek ortamlarda olumsuz, nötr ve olumlu duyguları sınıflandırmadaki etkinliğini değerlendirmek için karşılaştırmalı bir analiz içermektedir. Çalışmada, katılımcılardan VR ortamında duygusal tepkiler alınırken, bir VR başlığı ve EEG kayıt cihazı kullanılmıştır. Bu kurulumun, duygusal uyaranlara verilen tepkileri güçlendirdiği ve daha yoğun duygusal deneyimler elde edilmesini sağladığı belirtilmektedir. Veri seti, 70 katılımcıdan toplanmış olup, 3 sınıflı (negatif, nötr, pozitif) ve 4 sınıflı (mutlu, üzgün, nötr, korku) alt kümelere ayrılmıştır. EEG sinyallerinden öznelik çıkarımında, Diferansiyel Entropi (DE) ve Güç Spektral Yoğunluğu (PSD) yöntemleri kullanılmış ve delta, teta, alfa, beta ve gama frekans bantları analiz edilmiştir. Sınıflandırma sonuçları, 3 sınıflı veri setinde %77,75 doğruluk oranıyla DE yönteminin en iyi performansı gösterdiğini ortaya koyarken, 4 sınıflı veri setinde aynı yöntemle %62,67 doğruluk elde edilmiştir. Makalede, insan etkileşiminde duyguların tanınmasının önemi vurgulanarak, bu yeteneğin sosyal ilişkiler, psikolojik sağlık ve yaşam kalitesi üzerindeki etkilerine dikkat çekilmektedir. BBA, bu bağlamda, beyin aktivitelerini yorumlayarak dış cihazlarla etkileşimi mümkün kılan önemli bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. EEG tabanlı BBA'lar, cerrahi müdahale gerektirmemesi ve gerçek zamanlı beyin aktivitesi ölçümü sağlayabilmeleri nedeniyle, duygu tanıma uygulamalarında özellikle umut vericidir (Babu et al. 2025).

VR teknolojisinin EEG titreşimli dokunsal (vibrotaktıl) geri bildirimi ile entegre edildiği bir çalışmada, lisans öğrencilerinin yaratıcılık performansı, dikkat değeri ve bilişsel yükü üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemek amaçlanmıştır. Wu vd

(2024) yaptığı çalışmada, VR teknolojisi gibi insan-bilgisayar etkileşimi yöntemlerindeki yeniliklerin, öğrencilere daha aktif ve katılımcı bir öğrenme deneyimi sunarak yaratıcılığı teşvik etme potansiyeli taşıdığı vurgulanmaktadır. Çalışmada, 149 lisans öğrencisi rastgele bir şekilde deney grubu ve kontrol grubu olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Öğrencilerin uzamsal yetenekleri arasındaki farklılıklar, Uzamsal Yetenek Testi (SAT) kullanılarak değerlendirilmiştir. Araştırmada kullanılan bir diğer öznel yöntem ise Bilişsel Yük Teorisidir. Araştırma sonuçları, deney grubunun kontrol grubuna kıyasla anlamlı derecede daha yüksek yaratıcılık performansı ve dikkat değeri sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, yüksek uzamsal yeteneğe sahip öğrencilerin, düşük uzamsal yeteneğe sahip öğrencilere kıyasla daha düşük bilişsel yük, daha yüksek yaratıcılık performansı ve dikkat değeri gösterdiği bulunmuştur. Bu bulgular, VR ve EEG teknolojilerinin entegrasyonunun, üniversite yaratıcılık eğitiminde öğrenmeyi olumlu yönde etkileyebileceğini ve geleneksel VR eğitim sistemlerini geliştirme potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır (Wu et al. 2024).

Chang vd. (2022), VR ortamlarında insan-aracı iş birliği bağlamında Akıllı Sanal Aracıların (IVA) çok modlu iletişiminin kullanıcıların bilişsel süreçleri üzerindeki etkilerini, özellikle beyin aktivitesi ve bilişsel yük açısından nesnel ve öznel ölçütler kullanarak inceleyen önemli bir pilot çalışma sunmuşlardır. Giyilebilir teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte, VR gibi üç boyutlu sanal ortamlarda bedenlenmiş IVA'larla etkileşim giderek önem kazanmaktadır. Önceden yapılan çalışmalar, VR'daki IVA'ların görev performansını artırma ve görev yükünü azaltma potansiyeline işaret etse de bu etkilerin altında yatan nörofizyolojik mekanizmalar, özellikle EEG sinyalleri aracılığıyla kullanıcıların biliş ve davranışlarının derinlemesine anlaşılması konusunda literatürde belirgin bir boşluk bulunmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmaya yönelik ilk adımlardan birini temsil etmektedir. Bahsi geçen çalışmada kullanılmak üzere çölde hayatta kalma senaryosuna dayalı işbirlikçi bir VR oyunu geliştirilmiştir. Bu platform, katılımcıların sanal bir aracı ile karar verme görevini yerine getirmesine olanak tanımıştır. Çalışmanın temel amacı, sanal aracının farklı iletişim yöntemlerinin kullanıcıların beyin aktivitesi üzerindeki etkilerini alfa bant gücü ve Olayla İlişkili Senkronizasyon/Desenkronizasyon (ERD/ERS) gibi EEG metrikleri aracılığıyla değerlendirmektir. Ayrıca, bilişsel yük ve iş birliği deneyimini değerlendirmek amacıyla görev performansı, birlikte bulunma hissi, Öznel Zihinsel Çaba Anketi (SMEQ) (Sauro

and Dumas 2009) ve NASA-TLX anketleri gibi öznel ölçütler de kullanılmıştır. Bu doğrultuda, denekler arası desene sahip bir pilot çalışma yürütülmüş ve üç farklı aracı koşulu karşılaştırılmıştır. Araştırmanın bulguları, görev performansında üç aracı koşulu arasında anlamlı bir fark olmadığını göstermiştir. Ancak, öznel ölçütler açısından bedenlenmiş ve hareketli araçların, yalnızca sesli aracıya kıyasla daha güçlü bir birlikte bulunma hissi sağladığı ve görev yükünü azalttığı tespit edilmiştir. Özellikle hareketli aracı, en yüksek birlikte bulunma derecesini elde etmiş ve görev yükünü azaltmada etkili olmuştur (Chang et al. 2022).

Bir başka çalışmada IVR kullanılarak, doğal ve kontrollü bir duygu indüksiyonu ile duygusal uyarılma ile ilişkili beyin-kalp etkileşimleri araştırılmıştır. Daha önceki araştırmalar, duygusal deneyimlerin fizyolojisini anlamak için kalp ve beynin birlikte analiz edilmesinin, her bir modalitenin tek başına incelenmesinden daha kapsamlı bilgiler sunabileceğini öne sürmüştür. Bu bağlamda, sanal gerçeklik, doğal ortamlardaki deneyimlere yakın ancak deneysel kontrolün daha yüksek olduğu senaryolar oluşturma yeteneği nedeniyle duygusal tepkileri ve bunların fizyolojik yanıtlarını incelemek için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışmada, 29 sağlıklı yetişkin katılımcı hız trenlerini içeren bir VR deneyimi içerisindeyken, bu katılımcılardan EEG ve EKG kayıtları alınmıştır. Deney sonrası derecelendirme aşamasında, katılımcılar deneylerinin video kaydını izlerken duygusal uyarılmalarını sürekli olarak bir kadrana kullanarak rapor etmişlerdir. Sonuç olarak, bu çalışma IVR'de duygusal uyarılma sırasında beyin-kalp etkileşimlerine dair değerli bilgiler sunmaktadır. Bulgular, duygusal uyarılmanın sadece beyin aktivitesini değil, aynı zamanda kalp aktivitesini ve bu iki sistem arasındaki etkileşimi de etkilediğini göstermektedir. Bu bütünlümlü anlayışın duygusal süreçleri daha iyi anlamak için önemli olduğu vurgulanmıştır. VR'nin çoklu fizyolojik kayıtlarla birlikte kullanılması, duyguların çoklu bileşenlerini eş zamanlı olarak incelemek için değerli bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Fourcade et al. 2024).

Ajami vd (2024), IVR deneyimlerinin kullanıcıların zihinsel yükü üzerindeki etkilerini, özellikle gerçekçi grafiklere sahip VR ortamları ile daha basit grafiklere sahip VR ortamları arasındaki farklılıkları EEG ve öznel ölçümler aracılığıyla karşılaştırarak incelemeyi amaçlamıştır. Sanal gerçeklik teknolojisinin eğitim, simülasyon, tedavi ve eğlence gibi çeşitli alanlarda artan kullanımıyla birlikte, farklı VR ortamlarının

kullanıcıların bilişsel kaynakları üzerindeki talebinin anlaşılması kritik önem taşımaktadır. Özellikle, grafik detay seviyesinin ve gerçekçiliğin kullanıcıların zihinsel yükünü nasıl etkilediği sorusu, optimize edilmiş ve kullanıcı dostu VR deneyimleri tasarlamak için temel teşkil etmektedir. Bu araştırma, gerçek bir ortamın 360 derece video kaydından oluşturulan 'Gerçek VR Ortamı' ve bilgisayar grafikleri ile oluşturulan, daha az detaylı bir 'Grafik VR Ortamı' olmak üzere iki farklı VR ortamına maruz kalan katılımcıların zihinsel yük seviyelerini karşılaştırmıştır. Çalışma, 16 sağlıklı katılımcı ile yürütülmüştür. Katılımcılar, her iki VR ortamında da 5 dakikalık pasif bir deneyime tabi tutulmuşlardır. Deney sırasında katılımcıların beyin aktiviteleri 32 kanallı bir EEG sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Ayrıca, her bir VR deneyiminden sonra katılımcılardan Zihinsel Yük Envanteri (MWI) anketini doldurarak öznel zihinsel yüklerini derecelendirmeleri istenmiştir. Çalışmanın bulguları, hem objektif (EEG) hem de öznel (MWI) ölçümler açısından Gerçek VR Ortamının Grafik VR Ortamına kıyasla anlamlı derecede daha yüksek zihinsel yüke neden olduğunu göstermiştir. EEG analizlerinde, Gerçek VR Ortamına maruz kalan katılımcılarda özellikle frontal ve paryetal bölgelerde teta bant gücünde belirgin bir artış gözlenmiştir. Teta aktivitesindeki artış, genellikle artan bilişsel çaba ve zihinsel yük ile ilişkilendirilmektedir. Aynı zamanda, Gerçek VR Ortamında paryetal ve oksipital bölgelerde alfa bant gücünde bir azalma tespit edilmiştir. Alfa gücündeki azalma ise genellikle artan dikkat ve bilgi işleme talebi ile ilişkilidir, bu da daha gerçekçi bir ortamın bilişsel kaynakları daha fazla meşgul ettiğini düşündürmektedir. Grafik VR Ortamında ise teta aktivitesi daha düşük, alfa aktivitesi ise daha yüksek seyretmiştir. Öznel değerlendirmeler de EEG bulgularını desteklemiştir. MWI anket sonuçlarına göre, katılımcılar Gerçek VR Ortamında Grafik VR Ortamına kıyasla daha yüksek bir zihinsel yük hissettiklerini rapor etmişlerdir (Ajami et al. 2024).

Tremmel vd (2019) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, IVR ortamında kullanıcıların bilişsel yükünü (CWL) tahmin etmek için EEG verilerinin kullanımı araştırılmıştır. Katılımcılardan deney öncesinde Hareket Hastalığı Duyarlılık Anketi kısa formunu (MSSQ-short) tamamlamaları istenmiştir. Bu anket, doğrudan bilişsel yükü ölçmek için kullanılmamış olsa da çalışmaya katılan bireylerin VR ortamlarına karşı duyarlılıklarını (siber hastalık açısından) belirlemeye yönelik bir öznel değerlendirme aracıdır ve çalışmanın metodolojisinin bir parçasıdır. Çalışma, VR'ın artan kullanım

alanlarına dikkat çekerek, kullanıcı deneyimini ve performansını optimize etmek için CWL'nin objektif olarak ölçülmesinin önemini vurgulamaktadır. Çalışma bağlamında araştırmacılar tarafından, katılımcıların bir VR ortamında nesneleri arama ve manipüle etme görevini yerine getirdiği kontrollü bir deney tasarlanmıştır. Katılımcıların beyin aktiviteleri görev sırasında EEG ile kaydedilmiş ve farklı CWL seviyeleri (düşük, orta, yüksek) ile ilişkili EEG özelliklerini belirlemek amacıyla analiz edilmiştir. Çalışma, EEG'nin etkileşimli VR ortamlarında CWL'yi tahmin etmek için geçerli bir yöntem olabileceğini ve bu tür objektif ölçümlerin adaptif VR sistemleri geliştirmede veya kullanıcı performansını izlemede kullanılabileceğini öne sürmektedir (Tremmel et al. 2019).

20 yetişkin sağlıklı katılımcı ile yapılan deneysel bir çalışmada, VR ortamlarında yaygın olarak kullanılan iki farklı lokomasyon tekniğinin (ışınlanma ve konsol), farklı fiziksel duruşlarla (ayakta ve oturarak) birleştirildiğinde katılımcıların zihinsel yükü üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Deney VR ortamında bir navigasyon görevini içermekteydi ve katılımcılardan sanal bir ortamda belirli hedeflere ulaşmaları istenmiştir. Görev, her lokomasyon tekniği ve duruş kombinasyonu için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Nesnel ölçümler için görev sırasında 32 kanallı bir EEG sistemi ve EKG sistemi kullanılmıştır. EEG verileri, özellikle bilişsel yük ile ilişkilendirilen teta ve alfa frekans bantlarındaki güç spektral yoğunluğu (PSD) açısından analiz edilmiştir. Artan teta gücü ve azalan alfa gücü genellikle yüksek bilişsel yük ile ilişkilendirilir. Öznel değerlendirmeler için ise her deney koşulundan sonra katılımcılara NASA-TLX ve Simülatör Hastalığı Anketi (SSQ) uygulanmıştır. Araştırmanın bulguları, lokomasyon tekniği ve duruşun zihinsel yük üzerinde anlamlı etkilere sahip olduğunu göstermiştir. EEG analizlerine göre, konsol lokomasyonu, ışınlanmaya kıyasla daha yüksek teta gücüne ve daha düşük alfa gücüne yol açmıştır. Bu durum, konsol kullanımının daha fazla bilişsel işlem gerektirdiğini ve dolayısıyla daha yüksek bir zihinsel yüke neden olduğunu düşündürmektedir. Duruş açısından, ayakta durmanın oturmaya kıyasla genel olarak daha yüksek teta gücü ve daha düşük alfa gücü ile ilişkili olduğu bulunmuştur, ancak bu etki lokomasyon tekniğine göre farklılık gösterebilmektedir. Özellikle, ayakta konsol kullanımı en yüksek zihinsel yükü ortaya koymuştur. Öznel değerlendirmeler de EEG bulgularını desteklemiştir. NASA-TLX sonuçlarına göre, konsol lokomasyonu, ışınlanmaya göre anlamlı derecede daha yüksek genel zihinsel yüke neden olmuştur. Alt

boyutlarda da benzer eğilimler gözlenmiştir. Duruş açısından, ayakta durma durumu oturmaya göre daha yüksek zihinsel yük bildirimiyle sonuçlanmıştır. SSQ sonuçları ise, özellikle joystick lokomasyonunun ve ayakta durma pozisyonunun simülör hastalığı semptomlarını artırma eğiliminde olduğunu göstermiştir (Kazemi et al. 2024).

Mondellini vd (2023), VR ortamlarının farklı özelliklerinin kullanıcıların zihinsel yükü üzerindeki etkilerini çok modlu bir yaklaşımla, özellikle EEG verilerini kullanarak incelemeyi amaçlamışlardır. VR ortamının karmaşıklığı, etkileşim seviyesi ve sunum şekli gibi unsurların kullanıcıların bilişsel kaynakları üzerindeki talebi belirleyebileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, farklı VR ortamlarının zihinsel yük üzerindeki etkilerinin hem nesnel fizyolojik ölçümler hem de öznel değerlendirmelerle kapsamlı bir şekilde araştırılması önem taşımaktadır. Bu çalışma, VR ortamının spesifik özelliklerinin zihinsel yük üzerindeki etkilerini derinlemesine inceleyerek literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir. Araştırmacılar, bu kontrollü deneysel çalışma için, daha az karmaşık ve statik bir ortam ile daha karmaşık ve dinamik bir ortam olmak üzere iki farklı VR ortamı tasarlamışlardır. Deneyde, 18 sağlıklı katılımcı bu iki farklı VR ortamına maruz bırakılmıştır. Deney sırasında katılımcıların fizyolojik verileri (EEG ve göz takibi) ve performans verileri toplanmıştır. Ek olarak, her deney koşulundan sonra katılımcılara NASA-TLX uygulanmıştır. Araştırmanın bulguları, VR ortamının özelliklerinin kullanıcıların zihinsel yükü üzerinde anlamlı etkileri olduğunu göstermiştir. EEG analizleri, daha karmaşık ve dinamik VR ortamında katılımcıların frontal ve paryetal bölgelerinde teta gücünde belirgin bir artış ve alfa gücünde bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Bu fizyolojik değişiklikler, daha karmaşık ortamın daha yüksek bilişsel çaba ve bilgi işleme gerektirdiğini düşündürmektedir. Göz takibi verileri de bu bulguları desteklemiştir; daha karmaşık ortamda göz kırpmaya hızında artış ve fiksasyon sürelerinde değişiklikler gözlenmiştir, bu da artan bilişsel yük ve görsel dikkat talebini yansıtabilir. Performans verileri açısından, daha karmaşık ortamda görev tamamlama sürelerinin daha uzun olduğu ve hata sayısının daha fazla olduğu gözlenmiştir, bu da artan zihinsel yükün görev performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu göstermektedir. Öznel değerlendirmeler de objektif ölçümlerle uyumlu sonuçlar vermiştir; katılımcılar daha karmaşık VR ortamında anlamlı derecede daha yüksek bir zihinsel yük hissettiklerini rapor etmişlerdir. NASA-TLX'in tüm alt boyutlarında daha karmaşık ortam lehine artışlar gözlenmiştir (Mondellini et al. 2023).

Sarailoo vd (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, eğitimsel çoklu ortam materyallerine maruz kalan bireylerin yaşadığı anlık bilişsel yükü EEG sinyallerini kullanarak değerlendirmeyi konu almaktadır. Eğitim teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, sunulan bilginin miktarı ve karmaşıklığı artmakta, bu da öğrenenler üzerinde bilişsel bir yüke neden olmaktadır. Araştırmada, 30 sağlıklı yetişkin katılımcıdan oluşan bir grupla çalışılmıştır. Katılımcılara farklı bilişsel yük seviyeleri oluşturmak amacıyla tasarlanmış eğitimsel çoklu ortam videoları izletilmiştir. Videolar, bilgi miktarı ve sunum hızı açısından farklılık göstererek düşük, orta ve yüksek bilişsel yük durumlarını temsil etmiştir. Katılımcılar rastgele iki gruba ayrılmış ve her grup farklı bir video versiyonunu izlemiştir. Deney sırasında katılımcıların beyin aktiviteleri 32 kanallı bir EEG sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Ayrıca katılımcıların bilişsel yükünü ölçmek için katılımcılara NASA-TLX uygulanmıştır. EEG sinyallerinin analizinde, PSD temelli özellikler çıkarılmış ve minimum fazlalık-maksimum ilgi (MRMR) yöntemiyle en iyi özellikler seçilmiştir. NASA-TLX puanları, EEG tabanlı bilişsel yük ölçümleriyle paralellik göstermiştir. Özellikle, yüksek yük koşullarında alfa bandı gücündeki azalma ve frontal bölge aktivitesindeki artış, öznel yük algısının nörofizyolojik göstergeleriyle örtüşmüştür (Sarailoo et al. 2022).

Luque vd (2024), VR teknolojisinin trafik ortamlarında yayaların bilişsel süreçlerini ve iş yükünü incelemek amacıyla kullanımını değerlendiren bir çalışmayı sunmaktadır. Çalışmanın temel motivasyonu, küresel çapta önemli bir sorun teşkil eden karayolu trafiği kazalarında yayaların karşılaştığı yüksek risk ve bu riskin altında yatan bilişsel mekanizmaların daha iyi anlaşılması gerekliliğidir. Çalışma, gerçek dünya trafik senaryolarının laboratuvar ortamında güvenli ve tekrarlanabilir bir şekilde simüle edilmesi zorluklarına karşın VR'ın sunduğu avantajları ön plana çıkarmaktadır. Deneysel protokol, katılımcıların VR ortamında dört farklı görevi yerine getirmesini içermiştir. NASA-TLX, SSQ ve VR ortamındaki Mevcudiyet Anketi (PQ) gibi öznel değerlendirmeler de periyodik olarak toplanmıştır. EEG sinyalleri, 32 kanallı kablosuz bir sistemle kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucu göstermektedir ki; mevcudiyet hissi arttıkça bilişsel iş yükü algısı ve çaba etkilenmektedir. Ayrıca mevcudiyetin siber hastalık semptomlarını (özellikle mide bulantısını) hafiflettiği görülmüştür. SSQ sonuçları, VR'a maruz kalmanın artmasıyla rahatsızlığın arttığını, ancak bunun bilişsel işlevleri veya iş yükünü olumsuz etkilemediğini göstermiştir.

NASA-TLX sonuçları, davranışsal katılım içeren paradigmaların bilişsel yükü artırdığını göstermiştir (Luque et al. 2024).

Bozgeyikli ve arkadaşlarının (2019) yaptığı çalışmada 15 katılımcıdan, takip edilen bir odada sekiz VR lokomasyon tekniğini yapmaları istenmiştir. Birçok VR lokomasyon tekniği araştırılmış olsa da bu teknikler genellikle geniş izleme alanlarında değerlendirilmiştir. Bunun aksine, günümüz ticari VR sistemleri tipik olarak daha küçük, oda ölçekli alanlarda (yaklaşık 7,5 metrekare) çalışmaktadır. Bu bağlamda, araştırmacılar, oda ölçekli izleme alanlarında sekiz farklı VR lokomasyon tekniğinin kullanıcı deneyimi açısından uygunluğunu araştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada bahsedilen sekiz teknik: yönlendirilmiş yürüme (redirected walking), yerinde yürüme (walk-in-place), adım makinesi, işaretle ve ışınlan (point & teleport), konsol (joystick), iz topu (trackball), el çırpma (hand flapping) ve uçma (flying) davranışlarıdır. Katılımcılar, her bir lokomasyon tekniğini kullanarak sanal bir ortamda on farklı hedef noktasına ulaşma görevini yerine getirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda işaretleme ve ışınlanma, konsol ve yönlendirilmiş yürüme görevlerinin VR lokomasyon tekniklerine uygun olduğu, ancak el çırpma ve uçma hareketlerinin uygun olmadığı anlaşılmıştır (Bozgeyikli et al. 2019).

Yapılan bir başka çalışmada, rehabilitasyon ve klinik için uzun vadeli kullanım amacıyla, sanal çevrede gerçek zamanlı yürüme ile gerçek ortamda yürüme karşılaştırılmıştır. Çalışma, uzun vadede VR'ın rehabilitasyon ve klinik uygulamalarda kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla, kullanıcıların sanal bir ortamda kendi vücutlarının sanal bir temsiline sahip olmasının etkisini de analiz etmektedir. Araştırma analizinde; hız kalıpları, hız zirvesi, adım uzunluğu, adım frekansı ve toplam mesafe gibi parametreler kullanılmıştır. Makalenin metodolojik yaklaşımı hem sanal hem de gerçek dünya yürüme koşullarında toplanan yürüyüş verilerinin biyomekanik analizine odaklanmaktadır. Çalışmaya katılan sağlıklı bireyler hem gerçek bir ortamda hem de HTC-Vive başlığı takılı olarak sanal bir ortamda belirli bir mesafeyi yürümüşlerdir. Sanal ortamda yürüme deneyimini daha da zenginleştirmek için, katılımcıların sanal bir avatara sahip olduğu ve olmadığı olmak üzere iki farklı sanal koşul incelenmiştir. Gerçek dünya yürüme verileri de aynı alanda, ancak VR başlığı olmaksızın toplanmıştır. Temel bulgular, sanal ortamda yürüme ile gerçek dünyada yürüme arasında yürüyüş

parametreleri açısından bazı anlamlı farklılıkların olduğunu göstermektedir. Özellikle adım uzunluğu ve adım frekansı gibi temel yürüyüş parametrelerinde sanal ortama geçişin etkileri gözlenmiştir. Bununla birlikte, çalışmanın önemli bir sonucu, sanal ortamda yürümenin, gerçek dünya yürüyüşü ile tamamen aynı olmasa da bazı temel yürüyüş desenlerini koruyabildiğini göstermesidir. Bu bulgu, VR'ın yürüme tabanlı rehabilitasyon ve eğitim uygulamaları için potansiyelini desteklemektedir(Canessa et al. 2019).

Üç genel kategoride, on adet lokomasyon tekniğinin gerçekleştirildiği çalışmada, VR lokomasyon'un 32 katılımcı üzerinde fizyolojik etkileri araştırılmıştır. Söz konusu araştırmada nesnel ve öznel teknikler kullanılmıştır (Boletsis 2017; Daşdemir 2023).

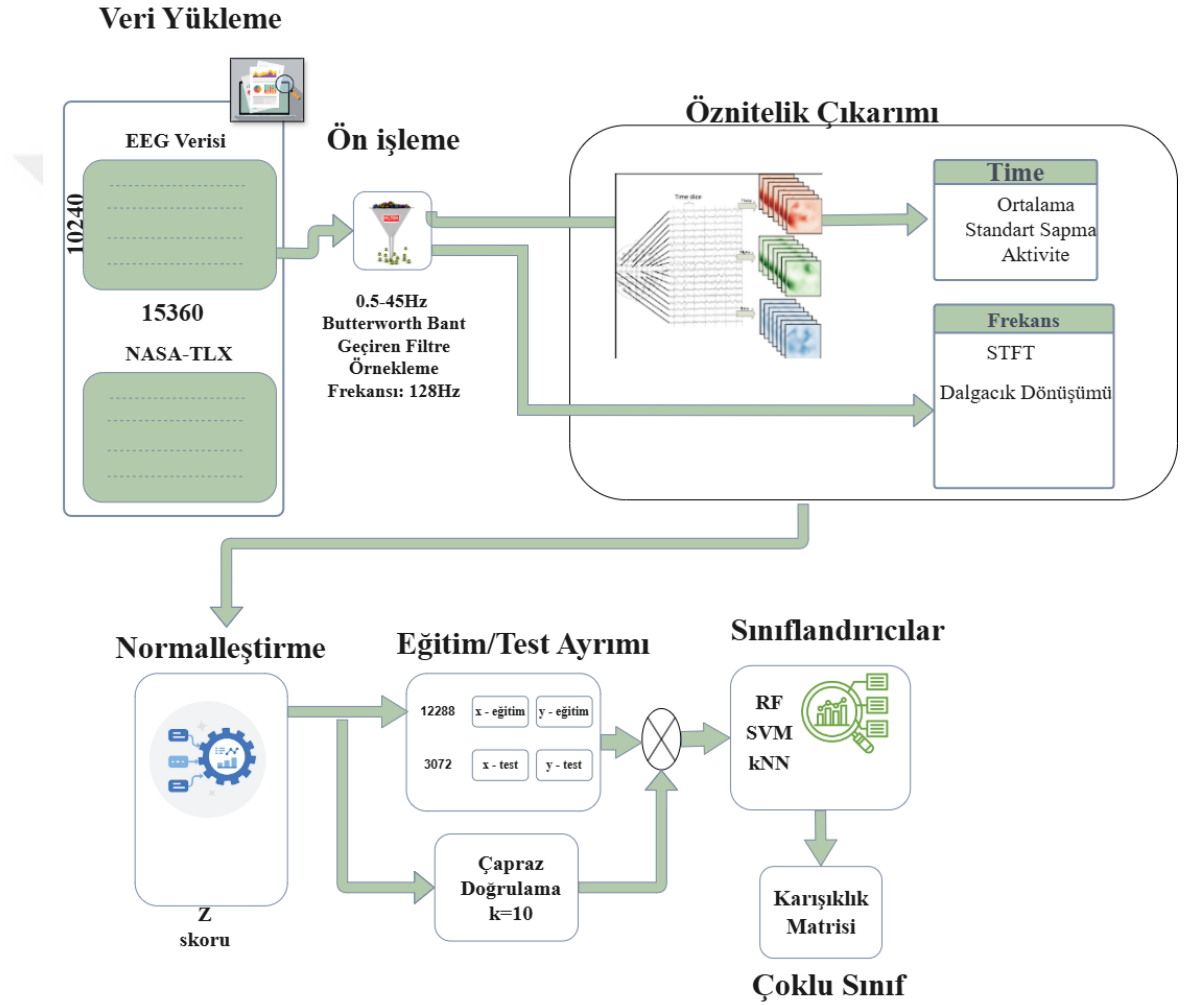
Bilişsel çalışma belleği görevini gerçekleştirmeyi içeren ikili görev yaklaşımını kullanarak üç farklı VR lokomasyon tekniğini, kullanılabilirlik ve bilişsel yük açısından değerlendiren bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada karşılaştırılan üç yürüme metaforu şunlardır: ölçeklendirilmiş yürüme (Scaled Walking), insan konsolu (Human Joystick), yerinde yürüme (Walking-In-Place). Ölçeklendirilmiş yürüme, kullanıcının fiziksel alanda yaptığı gerçek yürüyüşün sanal ortamda daha büyük bir ölçekte yansıtılmasıdır. Bu teknik, fiziksel alan sınırlı olsa bile kullanıcının sanal ortamda daha geniş mesafeleri yürütmesine olanak tanır. İnsan konsolu, kullanıcının fiziksel olarak bir yöne eğilmesi veya vücut ağırlığını o yöne vermesiyle sanal ortamda hareket etmesini sağlayan bir tekniktir. Kullanıcı, adeta kendi vücudunu bir konsol gibi kullanır. Yerinde yürüme, kullanıcının fiziksel olarak yerinde yürüme hareketi yapmasıyla sanal ortamda ileri doğru hareket etmesini sağlayan bir tekniktir. Ayak hareketleri veya diz sensörleri gibi yöntemlerle kullanıcının adımları algılanır ve sanal ortamdaki harekete dönüştürülür. Deneysel tasarım, 20 katılımcı ile gerçekleştirilen bir kullanıcı çalışmasına dayanmaktadır. Katılımcılar, her bir lokomasyon tekniğini kullanarak sanal bir ortamda belirli bir hedef noktasına ulaşma görevini yerine getirmişlerdir. Seyahat performansı (tamamlama süresi, seyahat edilen mesafe, verimlilik), SSQ, PQ ve algılanan kullanılabilirlik gibi çeşitli nesnel ve öznel ölçümler toplanmıştır. Çalışmanın sonucu göstermedir ki üç lokomasyon yönteminin bilişsel yükleri arasında önemli farklar mevcuttur (Lai and McMahan 2020).

EEG'nin avantajları arasında, anlık veriler sağlama kapasitesi ve kullanıcıların bilişsel durumlarını gerçek zamanlı olarak izleyebilme yeteneği bulunmaktadır. Bu özellik, VR deneyimleri sırasında bilişsel yük değişimlerini tespit etmeyi ve kullanıcıların nasıl tepki verdiklerini anlamayı mümkün kılmaktadır. Özellikle, EEG verilerinin kombinasyonu, kullanıcıların dikkat düzeylerini, dalma deneyimlerini ve bilişsel yüklerini ölçmek için etkili bir araçtır(Gramouseni et al. 2023) . Bununla birlikte, EEG kullanımı araştırmacılar için bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Örneğin, VR ortamında hareket eden kullanıcıların başlık ve elektrotlar üzerindeki etkileri, veri bütünlüğünü tehdit edebilmektedir. Ayrıca, EEG verilerinin yorumlanması karmaşık olabilmektedir. Çünkü, farklı bireyler arasında bilişsel yük seviyeleri ve tepkileri değişkenlik gösterebilmektedir. Bu durum, VR'da bilişsel yük ölçümü ve analizi için daha fazla standartlaşmış protokollerin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır (Lotte et al. 2018).

Sonuç olarak, EEG'nin, VR uygulamalarında bilişsel yük analizindeki rolü hem kullanıcı deneyimini iyileştirmek hem de sanal gerçeklik teknolojilerinin etkinliğini artırmak açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu alandaki ilerlemeler, gelecekte daha etkili VR sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunacak ve kullanıcıların sanal ortamlardaki etkileşimlerini daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, katılımcılar VR ortamdayken EEG sinyallerinin kaydedildiği Daşdemir (2023) tarafından oluşturulan ‘VREEG’ veri seti kullanılmıştır (Daşdemir 2023). Ayrıca katılımcıların VR lokomasyon deneyimlerini betimleyebilmek için NASA-TLX ölçeğinden elde edilen veriler analiz edilmiştir. Çalışmaya ilişkin akış diyagramı Şekil 3.1.’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Akış Diyagramı

3.1. Veri Seti

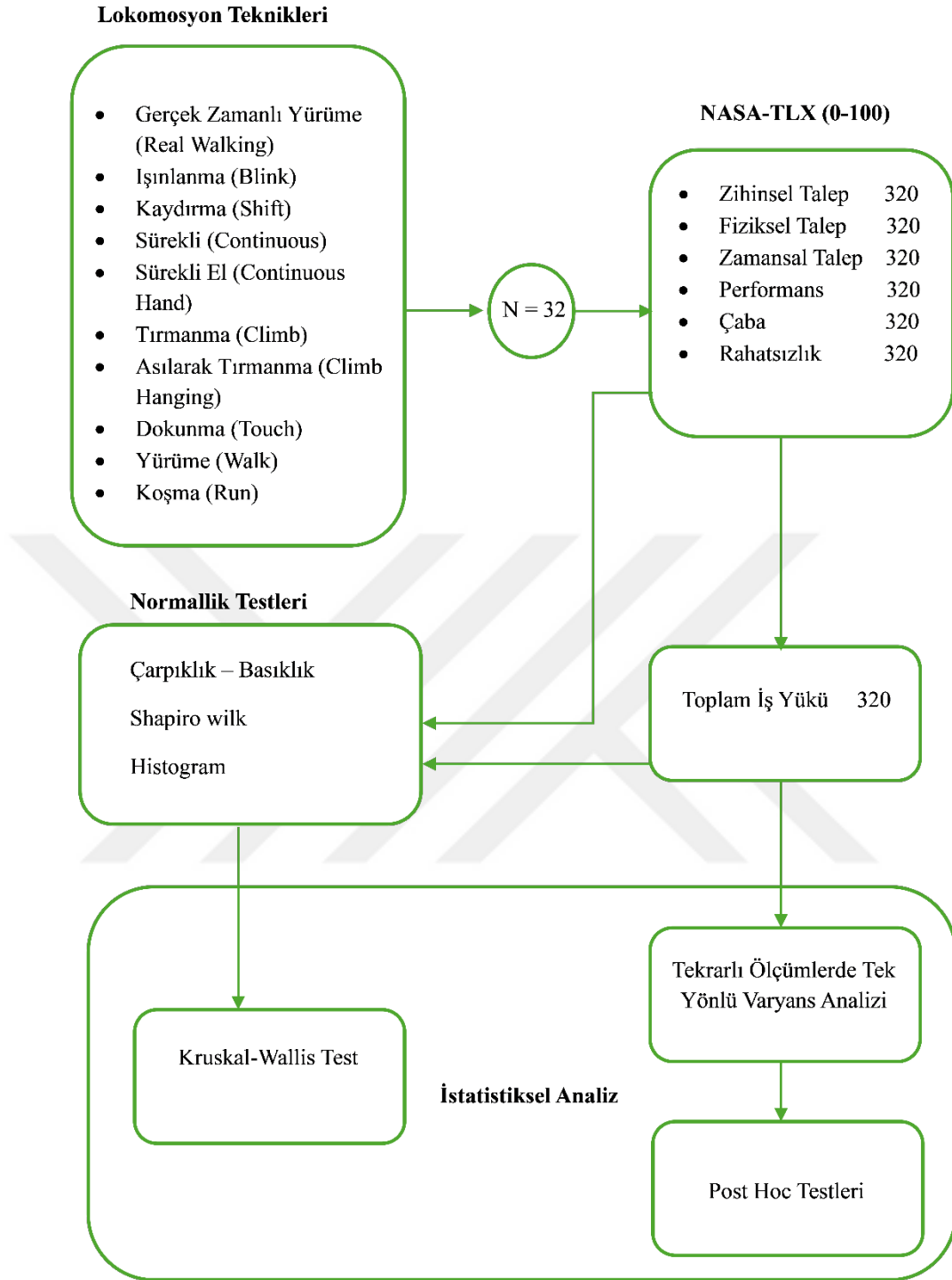
Bu çalışmada, Daşdemir (2023) tarafından oluşturulan VREEG veri seti temel alınmıştır. Veri seti, 18-30 yaş aralığında 21 erkek 11 kadın olmak üzere toplam 32

katılımcının sanal gerçeklik ortamında gerçekleştirdiği on adet lokomasyon teknikleri sırasında toplanan EEG sinyalleri ile katılımcıların NASA-TLX değerlendirmelerini içermektedir. Deney süresince katılımcıların VR deneyimleri için HTC Vive Pro Eye HMD tercih edilmiş; EEG verileri ise 32 kanallı Emotiv EPOC Flex cihazı aracılığıyla kaydedilmiştir (Daşdemir 2023).

Kontrollü bir laboratuvar deneyini içeren çalışma iki ayrı oturumda gerçekleşmiştir. İlk oturumda lokomasyon tekniklerine ait incelemeler yer alırken, ikinci oturumda duygusal ve denge durumları incelenmiştir. İki dakika süren her lokomasyon tekniğinin ardından katılımcılar bir müddet dinlenmiş ve anketleri doldurmuşlardır. EEG sinyalleri temel durum ve lokomasyon teknikleri sırasında kaydedilmiştir. Temel durum için 30 saniye, lokomasyon teknikleri için 120 saniye kayıt alınmıştır (Daşdemir 2023).

3.2. Öznel Değerlendirme

Lokomasyon tekniklerinin bireyler üzerinde oluşturduğu öznel iş yükünün kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla, bu çalışmada NASA-TLX kullanılmıştır. NASA-TLX, katılımcıların belirli görevler sırasında deneyimledikleri iş yükünü çok boyutlu olarak ölçen, geçerliliği ve güvenilirliği yüksek, standartlaştırılmış bir öznel değerlendirme aracıdır. Bu yöntem, Hart (1986) tarafından geliştirilmiş olup, görev performansının yanı sıra bireylerin psikolojik ve fizyolojik tepkilerini bütüncül bir şekilde ele almayı amaçlamaktadır. Ölçeğin temelini oluşturan altı alt faktör, iş yükünün farklı boyutlarını sistematik olarak değerlendirmek üzere tasarlanmıştır. Bu alt faktörler: zihinsel talep, fiziksel talep, zamansal talep, performans, çaba ve rahatsızlıktır. Her bir boyut, katılımcılar tarafından 0 (en düşük yük) ile 100 (en yüksek yük) arasında derecelendirilmiştir. Bu çalışmanın amacına yönelik hesaplamalarda kullanılan NASA-TLX Toplam İş Yükü puanları, ağırlıklı ortalamalar kullanılarak hesaplanmıştır. Ağırlıklı ortalamaların hesaplanabilmesi için katılımcıların alt faktörleri ikili karşılaştırma yoluyla değerlendirmesi gerekmektedir. İstatistiksel analiz sürecinin detayları ve uygulama adımları, Şekil 3.2.'de sunulan akış diyagramında ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İstatistiksel Analiz Akış Diyagramı

Öznel değerlendirmeye dair yapılan istatistiksel analizler IBM SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler öncesinde kullanılacak testlerin uygunluğunu belirlemek amacıyla tanımlayıcı bulgular ve uygulanan normallik testi sonuçları değerlendirilmiştir. Normallik testleri, verilerin dağılım özelliklerini

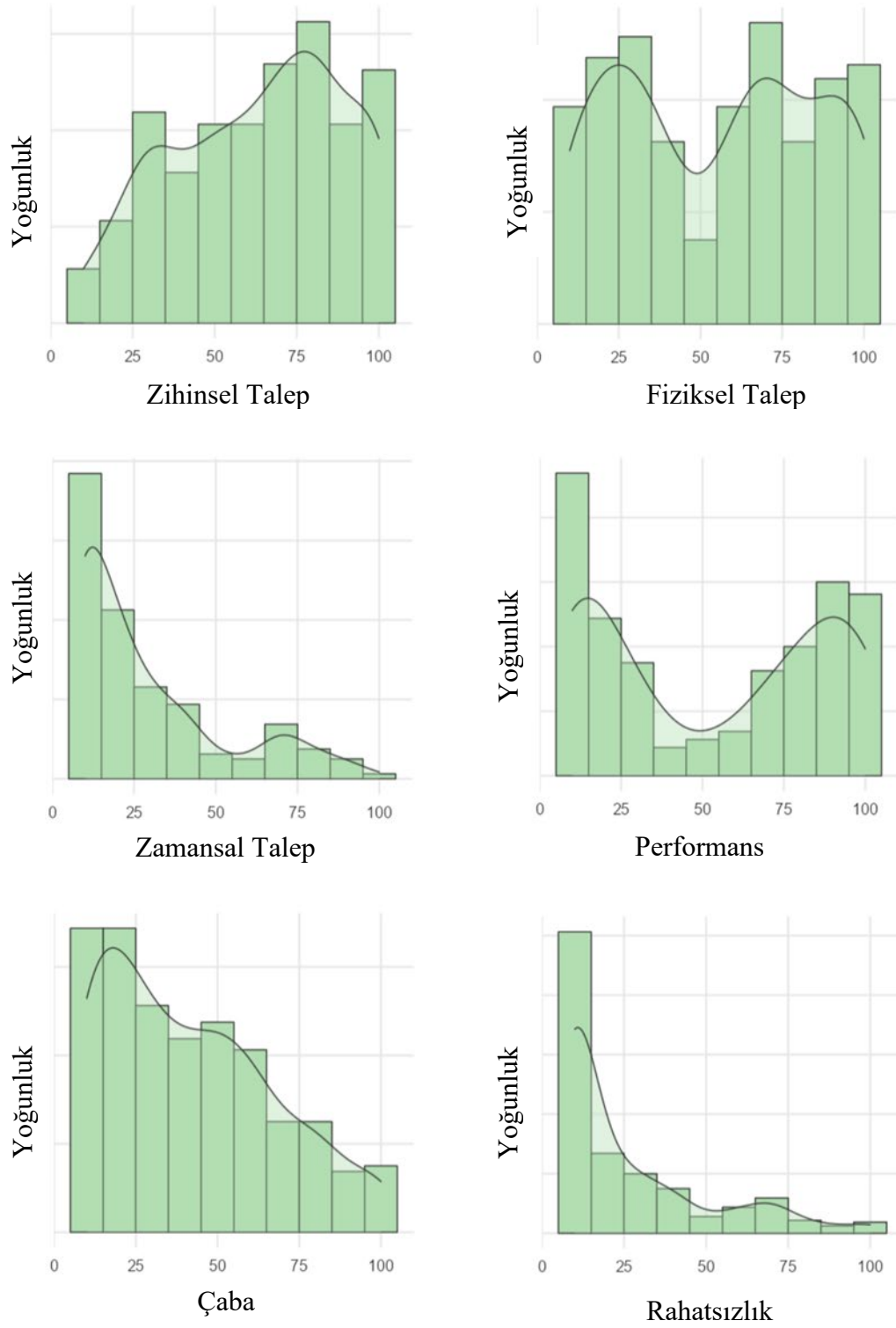
değerlendirmek ve sonraki istatistiksel testlerin seçimini doğru bir şekilde yönetmek için önem arz etmektedir. Çizelge 3.1.'de NASA-TLX'in alt faktörleri ve toplam iş yükü puanlarına dair çarpıklık, basıklık ve Shapiro-Wilk p değerleri yer almaktadır. Bu değerler, verilerin normal dağılım şartını yerine getirip getirmediğinin anlaşılmasında kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Normallik Testi Sonuçları

	Çarpıklık	Basıklık	p
Zihinsel Talep	-0,285	-0,993	<0,001
Fiziksel Talep	-0,015	-1,36	<0,001
Zamansal Talep	1,260	0,52	<0,001
Performans	0,010	-1,69	<0,001
Çaba	0,560	-0,67	<0,001
Rahatsızlık	1,440	1,11	<0,001
Toplam İş Yüğü	-0,042	-0,30	0,186

Verilerin istatistiksel analiz sürecinde öncelikle dağılım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kapsamlı bir normallik değerlendirmesi yapılmıştır. Alt faktörler düzeyinde yapılan analizler değerlendirildiğinde; zihinsel talep ($p < 0,001$), fiziksel talep ($p < 0,001$), zamansal talep ($p < 0,001$), performans ($p < 0,001$), çaba ($p < 0,001$) ve rahatsızlık ($p < 0,001$) boyutlarına ait p değerlerinin tümünün 0,05 anlamlılık düzeyinin altında kalması, bu alt ölçeklerin normal dağılım göstermediğine işaret etmektedir. Şekil 3.3.'te yer alan histogramlar da Çizelge 3.1.'i destekler niteliktedir.

Şekil 3.4.'te yer alan histogram, Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2.'de detaylandırılan tanımlayıcı istatistikler birlikte değerlendirildiğinde, NASA-TLX toplam iş yükü puanlarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir ($p = 0,186 > 0,05$). Bu bulgu, veri setinin parametrik test varsayımlarını karşıladığının bir göstergesidir.

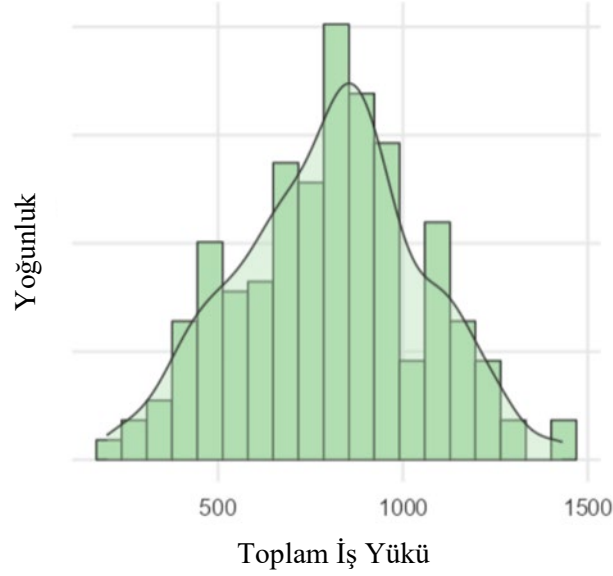


Şekil 3.3. NASA-TLX Alt Faktörleri için Histogram ve Yoğunluk Grafikleri

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.2. Lokomasyon Tekniklerinin Toplam İş Yüğü Puanlarına ait Tanımlayıcı Bulgular

	Ortalama	Standart Sapma	n
Gerçek Zamanlı Yürüme (Real Walking)	744,38	174,17	32
Işınlanma (Blink)	682,19	178,74	32
Kaydırma (Shift)	679,69	216,31	32
Sürekli (Continuous)	786,25	247,36	32
Sürekli El (Continuous Hand)	762,19	244,56	32
Tırmanma (Climb)	999,06	259,05	32
Asılarak Tırmanma (Climb Hanging)	965,00	233,67	32
Dokunma (Touch)	791,56	259,11	32
Yürüme (Walk)	773,75	214,71	32
Koşma (Run)	851,25	237,84	32



Şekil 3.4. NASA-TLX Toplam İş Yüğü Puanları için Histogram ve Yoğunluk Grafiği

Normallik testi sonuçları ve tanımlayıcı istatistikler ışığında, lokomasyon teknikleri arasındaki iş yükü farklılıklarını değerlendirmek üzere uygun istatistiksel yöntemler belirlenmiştir. Toplam iş yükü puanları için parametrik bir test olan Tekrarlı Ölçümlerde Tek Yönlü Varyans Analizi uygulanmıştır. Bu seçimde; bağımlı değişkenin sürekli ve normal dağılım göstermesi, aynı katılımcılar üzerinde farklı lokomasyon tekniklerinin karşılaştırılması, gruplar arası varyansın homojen olması etkili olmuştur. Tekrarlı Ölçümlerde Tek Yönlü Varyans Analizi sonrasında anlamlı farklılık durumunda, hangi grup çiftleri arasında fark olduğunu belirlemek amacıyla post-hoc testleri yapılmıştır. Normal dağılım göstermeyen alt faktörler için ise nonparametrik alternatif olarak Kruskal-Wallis Analizi uygulanmıştır.

3.3. Nesnel Değerlendirme

Bu çalışmada katılımcıların sanal gerçeklik ortamında gerçekleştirdikleri farklı lokomasyon teknikleri sırasında maruz kaldıkları bilişsel yükün nesnel olarak değerlendirilmesi amacıyla EEG sinyalleri kullanılmıştır. EEG, bireyin kortikal düzeydeki nöral aktivitelerinin anlık ve zamansal olarak izlenmesine imkân sağlayan, cerrahi işlem gerektirmeyen bir nörofizyolojik ölçüm yöntemidir. Bu bağlamda EEG, özellikle dikkat, zihinsel çaba, stres ve bilişsel yük gibi durumların değerlendirilmesinde yaygın olarak tercih edilen objektif bir araçtır.

Veri toplama sırasında örnekleme frekansı 128 Hz olarak belirlenmiş ve sinyal kalitesini artırmak amacıyla 0.5–45 Hz aralığında Butterworth bant geçiren filtre uygulanmıştır. Bu işlem, düşük frekanslı artefaktların ve yüksek frekanslı kas hareketlerinin filtrelenmesini sağlamıştır. Ardından, sinyaller Z-skor normalizasyonu ile ölçeklendirilmiştir.

Öznitelik çıkarımı süreci, EEG sinyallerinin hem zaman hem de frekans alanında analiz edilmesine dayanmıştır. EEG sinyallerinin zamana bağlı özelliklerini yansıtan ortalama, standart sapma, çarpıklık, basıklık, medyan, aralık (maksimum değer-minimum değer), toplam varyasyon ve ortalama mutlak değişim olmak üzere sekiz farklı öznitelik çıkarılmıştır. Frekans alanı analizinde ise kısa süreli Fourier dönüşümü ve dalgacık dönüşümü tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu analizler sayesinde delta (1–4 Hz), teta (4–8 Hz), alfa (8–12 Hz), beta (13–30 Hz) ve gama (>30 Hz) frekans bantlarına ait güç yoğunlukları hesaplanmıştır. EEG sinyallerinin farklı frekans bantlarındaki güçlerini temsil eden delta (0,5- 4 Hz), teta (4- 8 Hz), alfa (8- 13 Hz), beta (13- 30 Hz) ve gama (30- 45 Hz) bant güçleri olmak üzere beş farklı öznitelik hesaplanmıştır. Bu bantlar farklı bilişsel durumlarla ilişkilendirilmektedir. EEG sinyallerinin zaman-frekans analizini sağlayan dalgacık dönüşümü ile altı farklı seviyede dokuz farklı öznitelik çıkarılmıştır. Bununla birlikte 54 dalgacık özniteliği elde edilmiştir. Sonuç olarak, her bir EEG kaydı için toplamda 67 farklı öznitelik (8 zaman alanı, 5 frekans alanı, 54 dalgacık özniteliği) hesaplanmıştır (Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.3. EEG Sinyallerinden Öznitelikler

Öznitelik Grupları	Özellikler
Zaman Alanı	Ortalama Standart Sapma Çarpıklık Basıklık Medyan Aralık (Max. – Min.) Toplam Varyasyon Ortalama Mutlak Değişim

Çizelge 3.4. Devamı

Frekans Alanı	Delta Bant Gücü (0,5- 4 Hz) Teta Bant Gücü (4- 8 Hz) Alfa Bant Gücü (8- 13 Hz) Beta Bant Gücü (13- 30 Hz) Gama Bant Gücü (30- 45 Hz)
Dalgacık Özellikleri	Ortalama Mutlak Katsayı Standart Sapma Çeyrekler Açıklığı Shannon Entropisi Maksimum Mutlak Değer Çarpıklık Basıklık Spektral Entropi Log Enerji Entropisi

EEG verilerinin sınıflandırılmasında üç farklı makine öğrenimi algoritması kullanılmıştır: Rastgele Orman (RF), Destek Vektör Makineleri (SVM) ve k-En Yakın Komşu (kNN). Bu algoritmalar, lokomasyon tekniklerine göre değişen EEG örüntülerini sınıflandırmak amacıyla eğitilmiş ve test edilmiştir. Eğitim ve test verileri, 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile ayrılmıştır. Değerlendirme metrikleri olarak doğruluk (accuracy), F1-skoru, hassasiyet (precision) ve özgüllük (specificity) değerleri kullanılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, özellikle Tırmanma ve Asılarak Tırmanma görevleri sırasında EEG sinyallerinde belirgin değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu görevlerde teta ve beta bandı gücünde artış meydana gelmiş, bu da bilişsel yükün arttığını göstermiştir. RF algoritması, bu görevlerde diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek sınıflandırma başarısı göstermiştir. Bu bulgu, RF algoritmasının EEG sinyallerindeki örüntüleri etkili biçimde ayırt edebildiğini ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda yapılan EEG tabanlı analizler, kullanıcıların sanal ortamda gerçekleştirdikleri farklı lokomasyon tekniklerine bağlı olarak bilişsel yüklerinde anlamlı farklılıklar meydana geldiğini nesnel olarak ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, yalnızca kullanıcı deneyimini değil, aynı zamanda VR sistemlerinin tasarımını da optimize etmek açısından değerli bilgiler sunmaktadır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. NASA-TLX Bulguları

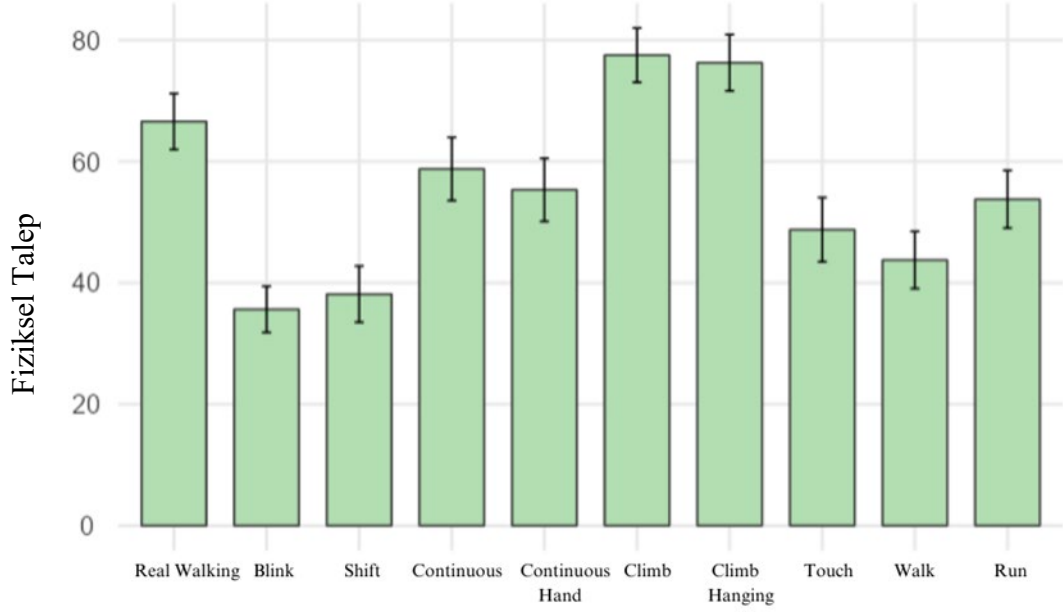
Lokomasyon tekniklerinin farklı boyutlara etkisi Kruskal-Wallis sonuçlarına dayanarak değerlendirilmiştir. NASA-TLX'e ait alt faktörlerde VR lokomasyon tekniklerinin etkisini incelemek adına yapılan Kruskal-Wallis testi sonucu Çizelge 4.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Kruskal-Wallis Testi Sonuçları

İş Yüğü	Lokomasyon Teknikleri
Zihinsel Talep	F (9,310) =1,58, p= 0,139
Fiziksel Talep	F (9,310) =9,51, p<0,001
Zamansal Talep	F (9,310) =2,24, p= 0,071
Performans	F (9,310) =1,71, p= 0,203
Çaba	F (9,310) =12,9, p<0,001
Rahatsızlık	F (9,310) =4,72, p<0,001

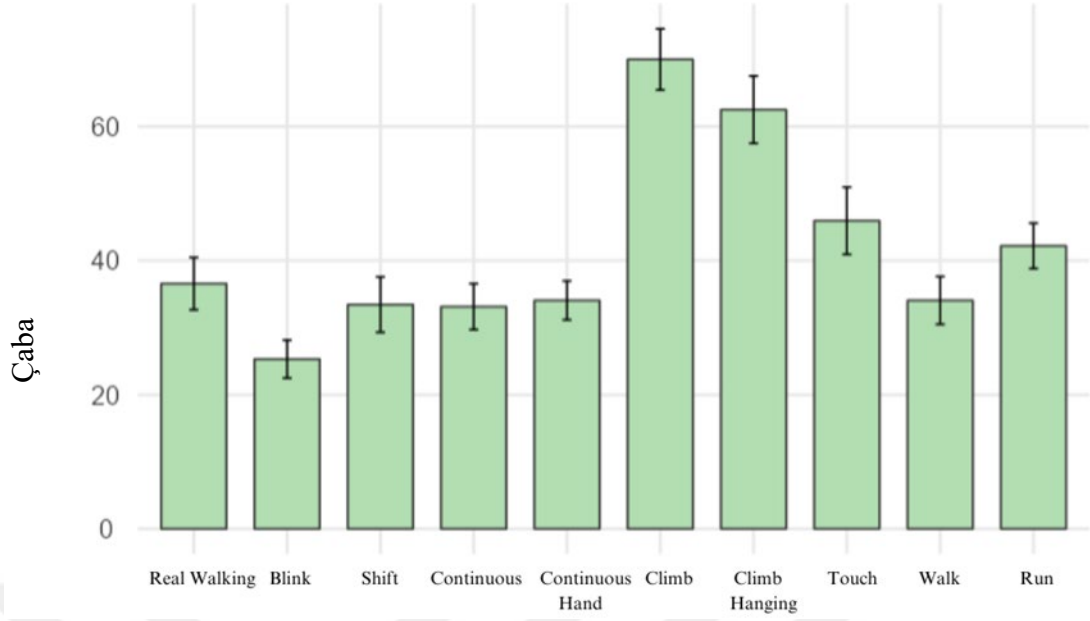
Çizelge 4.1. incelendiğinde, uygulanan lokomasyon tekniklerinin NASA-TLX alt faktörleri üzerindeki etkilerinin hem tekniklerin türüne hem de ilgili alt faktörlere göre değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.1.'de belirtildiği üzere, fiziksel talep, çaba ve rahatsızlık alt faktörlerinde lokomasyon teknikleri anlamlı düzeyde farklılık meydana getirmiştir (p <0,05). Bu bulgular, kullanılan lokomasyon yöntemlerinin katılımcıların fiziksel konforu ve harcadıkları çaba üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir. Buna karşılık, zihinsel talep, zamansal talep ve performans alt faktörlerinde anlamlı bir etki saptanmamıştır. Özellikle fiziksel talep ve rahatsızlık alt faktörlerinin yüksek düzeyde etkilenmiş olması, bazı lokomasyon tekniklerinin katılımcılar üzerinde daha fazla fiziksel yük oluşturduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, lokomasyon tekniklerinin belirli

iş yükü boyutlarında etkili olduğunu ve tekniklerin iş yükü üzerindeki farklı yansımalarını vurgulamaktadır.



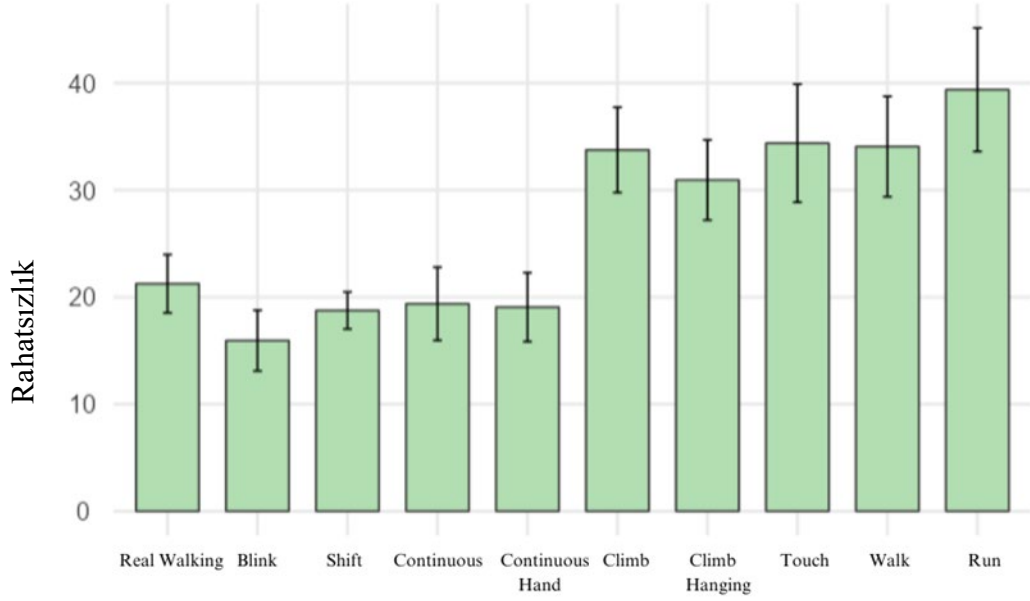
Şekil 4.1. Lokomasyon Tekniklerinin Fiziksel Talep Üzerindeki Etkileri

Şekil 4.1. incelendiğinde, farklı lokomasyon tekniklerinin fiziksel talep alt boyutunda anlamlı farklılıklara yol açtığı görülmektedir ($p < 0,05$). Gerçek Zamanlı Yürüme, Tırmanma ve Asılarak Tırmanma görevleri, diğer tekniklere kıyasla daha yüksek fiziksel talep oluşturmuştur. Özellikle Tırmanma ve Asılarak Tırmanma teknikleri, fiziksel talep açısından katılımcılar tarafından en yüksek puanlanan görevlerdir. Öte yandan Işınlanma ve Kaydırma gibi daha az bedensel hareket gerektiren teknikler, daha düşük fiziksel talep puanlarına sahiptir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda, birçok teknik çifti arasında anlamlı farklar tespit edilmiştir (örneğin $p < 0,001$: Gerçek Zamanlı Yürüme–Işınlanma; Işınlanma–Tırmanma; Işınlanma–Asılarak Tırmanma; Kaydırma–Tırmanma; Kaydırma–Asılarak Tırmanma; Tırmanma–Yürüme; Asılarak Tırmanma–Yürüme; $p=0,008$: Tırmanma–Dokunma; $p=0,012$: Gerçek Zamanlı Yürüme–Kaydırma; $p=0,013$: Tırmanma–Koşma; $p=0,014$: Asılarak Tırmanma–Dokunma; $p=0,043$: Asılarak Tırmanma–Koşma). Bu bulgular, lokomasyon yöntemi seçiminde kullanıcı konforu ve fiziksel efor düzeylerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.2. Lokomasyon Tekniklerinin Çaba Üzerindeki Etkiler

Şekil 4.2.'de görüldüğü üzere, en yüksek çaba düzeyleri Tırmanma ve Asılarak Tırmanma tekniklerinde gözlemlenmiştir. Bu tekniklerin, kullanıcıdan yoğun fiziksel katılım ve koordinasyon gerektirmesi, yüksek çaba puanlarının nedeni olarak değerlendirilebilir. Buna karşılık, Işınlanma, Kaydırma ve Sürekli gibi daha az fiziksel aktivite içeren tekniklerde çaba düzeyi görece düşük bulunmuştur. Yapılan ikili karşılaştırmalar sonucunda birçok teknik çifti arasında anlamlı farklar elde edilmiştir (örneğin $p < 0,001$: Gerçek Zamanlı Yürüme–Tırmanma; Işınlanma–Tırmanma; Sürekli El–Tırmanma; Tırmanma–Yürüme; Tırmanma–Koşma; $p=0,001$: Sürekli El–Asılarak Tırmanma; $p=0,003$: Asılarak Tırmanma–Yürüme; $p=0,005$: Sürekli–Asılarak Tırmanma; $p=0,007$: Gerçek Zamanlı Yürüme–Asılarak Tırmanma; $p=0,018$: Kaydırma–Asılarak Tırmanma; $p=0,026$: Asılarak Tırmanma–Koşma; $p=0,042$: Tırmanma–Dokunma). Bu bulgular, kullanıcı deneyimi açısından değerlendirildiğinde, lokomasyon tekniklerinin iş yükü alt boyutlarından biri olan çaba üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir.



Şekil 4.3. Lokomasyon Tekniklerinin Rahatsızlık Üzerindeki Etkileri

Şekil 4.3.'e bakıldığında ise Tırmanma, Asılarak Tırmanma, Dokunma, Yürüme ve Koşma lokomasyon tekniklerinin diğerlerine kıyasla bariz bir şekilde yüksek rahatsızlık düzeyine sahip oldukları görülmektedir. İkili karşılaştırmalar sonucu bazı teknikler arasında anlamlı farklılıkların olduğu görülmektedir (örneğin $p < 0,001$: Işınlanma-Tırmanma; Işınlanma-Dokunma; $p = 0,015$: Işınlanma-Asılarak Tırmanma; $p = 0,020$: Işınlanma-Koşma; $p = 0,030$: Işınlanma-Yürüme). Bu bulgular değerlendirildiğinde, lokomasyon tekniklerinin iş yükü alt boyutlarından biri olan rahatsızlık üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir.

NASA-TLX alt faktörler üzerinde yapılan incelemelerin ardından, lokomasyon tekniklerinin toplam iş yükü üzerine etkileri araştırılmıştır. Toplam iş yükü hesaplamaları, katılımcıların zihinsel talep, fiziksel talep, zamansal talep, performans, çaba ve rahatsızlık boyutlarını 0 – 100 puan aralığında değerlendirmelerinin yanı sıra, bu boyutlar arasında ikili karşılaştırma yaparak hangi boyutun katılımcılar üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunun belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Lokomasyon teknikleri arasında toplam iş yükü düzeyinde anlamlı farklılık olup olmadığını belirlemek üzere Tekrarlı Ölçümlerde Tek Yönlü Varyans Analizi uygulanmıştır. Tekrarlı Ölçümlerde Tek Yönlü Varyans Analizi sonuçlarının

okunabilmesi için gerekli olan Mauchly Küresellik Testi sonucuna göre küresellik varsayımı sağlanamamıştır ($p \leq 0,05$). Bu nedenle Greenhouse-Geisser bulguları dikkate alınmıştır. Çizelge 4.2.'de Greenhouse-Geisser bulguları dikkate alınmış ve lokomasyon tekniklerine ait toplam iş yükü puanlarının anlamlı farklılık gösterdiği tespit edilmiştir ($F_{(5,594-173,416)} = 13,727$; $p < 0,05$).

Çizelge 4.2. Tekrarlı Ölçümlerde Tek Yönlü Varyans Analizi Bulguları

Kaynak	dF	F	p	Np ²
Toplam İş Yükü Greenhouse-Geisser	5,594	13,727	0,000	0,307
Error (Toplam İş Yükü) Greenhouse-Geisser	173,416			

Lokomasyon teknikleri arasında anlamlı farklılık olanları tespit etmek amacıyla Post-hoc testi uygulanmıştır. Yapılan Post-hoc testi sonucuna göre katılımcıların gerçekleştirdiği lokomasyon teknikleri içerisinde Tırmanma ve Asılarak Tırmanma'ya ait NASA-TLX toplam iş yükü puanları; Gerçek Zamanlı Yürüme, Işınlanma, Kaydırma, Sürekli, Sürekli El, Dokunma ve Yürüme tekniklerine ait toplam iş yükü puanlarına göre yüksektir ve bu farklar anlamlı bulunmuştur ($p < 0,05$). Koşma tekniğine ait toplam iş yükü puanı ise Işınlanma ve Kaydırma tekniklerine göre anlamlı derecede yüksektir ($p = 0,032$: Koşma-Işınlanma; $p = 0,012$: Koşma-Kaydırma). Bu bulgulara dayanarak, lokomasyon teknikleri arasında Tırmanma ve Asılarak Tırmanma teknikleri, NASA-TLX toplam iş yükü puanlarına göre katılımcılarda iş yükünü anlamlı ölçüde arttıran bir etken olduğu söylenebilir.

4.2. EEG Tabanlı Sınıflandırma

EEG sinyallerinden çıkarılan öznitelikler kullanılarak, farklı lokomasyon tekniklerinin iş yükü üzerindeki etkileri sınıflandırılmıştır. Lokomasyon tekniklerini sınıflandırmak için RF, SVM ve kNN sınıflandırıcıları kullanılmıştır. Farklı yapılara sahip oldukları için bu sınıflandırıcılar tercih edilmiştir. Çizelge 4.3.'te sınıflandırıcılara ait parametreler sunulmaktadır.

Çizelge 4.3. Sınıflandırıcıların Hiperparametreleri

Sınıflandırıcı	Parametre	Değer	Açıklama
RF	Tekrarlama Sayısı (Iterations)	600	Rastgele ormandaki ağaç sayısı.
	Derinlik (Depth)	Sınırsız	Ağacın maksimum derinliği.
	Öznitelik Sayısı (Features)	0	Rastgele seçilen öznitelik sayısı (0 için $(\text{int}(\log_2(\# \text{öngörücü}) + 1))$ formülü kullanıldı.)
	Tohum (Seed)	1	Kullanılan rastgele sayı tohumu.
	Torba Boyutu (Bag size %)	%100	Eğitim kümesinin yüzdesi olarak her torbadaki örnek sayısı.
SVM	C	1.0	Karmaşıklık parametresi (c).
	Epsilon	1.0E-12	Yuvarlama hatası için epsilon değeri.
	Çekirdek (Kernel)	RBF Çekirdeği (RBFKernel)	Kullanılan çekirdek fonksiyonu (C=250007, Gama=0.01).
kNN	Komşu Sayısı (K)	9	Kullanılacak komşu sayısı.
	Arama Algoritması (Search Algorithm)	Doğrusal NN (Linear NN)	En yakın komşu araması için kullanılan algoritma.

Üç sınıflandırıcıya ait performans metrikleri çeşitli değerlendirme kriterlerinde farklı güçlü yönleri ve iyileştirme alanlarıyla Çizelge 4.4.'te gösterilmektedir

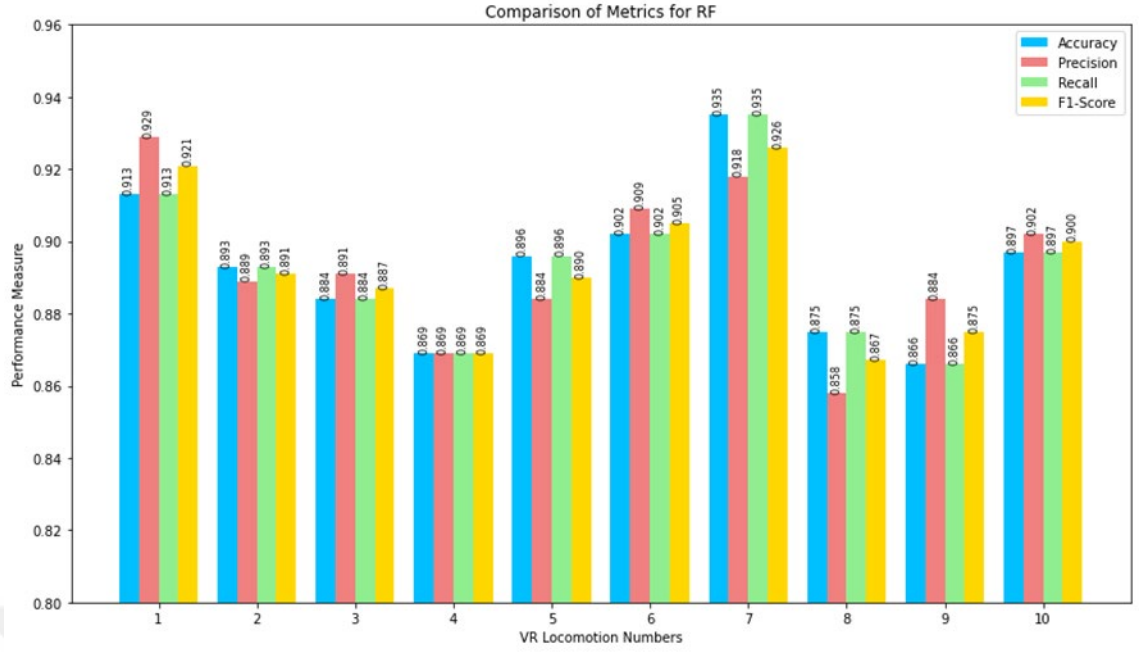
Çizelge 4.4. Sınıflandırıcıların Performans Metrikleri

Sınıflandırıcı	Gerçek Pozitif Oranı (TP Rate)	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Skoru	ROC Alanı
RF					
1.0	0,913	0,929	0,913	0,921	0,966
2.0	0,893	0,889	0,893	0,891	0,946
3.0	0,884	0,891	0,884	0,887	0,945
4.0	0,869	0,869	0,869	0,869	0,935
5.0	0,896	0,884	0,896	0,890	0,958
6.0	0,902	0,909	0,902	0,905	0,962
7.0	0,935	0,918	0,935	0,926	0,965
8.0	0,875	0,858	0,875	0,867	0,939
9.0	0,866	0,884	0,866	0,875	0,935
10.0	0,897	0,902	0,897	0,900	0,945
SVM					
1.0	0,894	0,871	0,894	0,882	0,976
2.0	0,846	0,829	0,846	0,837	0,963
3.0	0,841	0,810	0,841	0,825	0,958
4.0	0,811	0,812	0,811	0,811	0,952
5.0	0,857	0,822	0,857	0,839	0,965
6.0	0,837	0,849	0,837	0,843	0,968
7.0	0,870	0,866	0,870	0,868	0,978
8.0	0,799	0,815	0,799	0,807	0,957
9.0	0,782	0,816	0,782	0,799	0,956
10.0	0,828	0,877	0,828	0,852	0,965

Çizelge 4.4. Devamı

kNN					
1.0	0,917	0,927	0,917	0,922	0,970
2.0	0,890	0,884	0,890	0,887	0,960
3.0	0,881	0,888	0,881	0,884	0,959
4.0	0,866	0,873	0,866	0,870	0,948
5.0	0,899	0,883	0,899	0,891	0,968
6.0	0,901	0,908	0,901	0,904	0,964
7.0	0,933	0,917	0,933	0,924	0,979
8.0	0,875	0,864	0,875	0,869	0,959
9.0	0,861	0,883	0,861	0,872	0,955
10.0	0,900	0,898	0,900	0,899	0,962

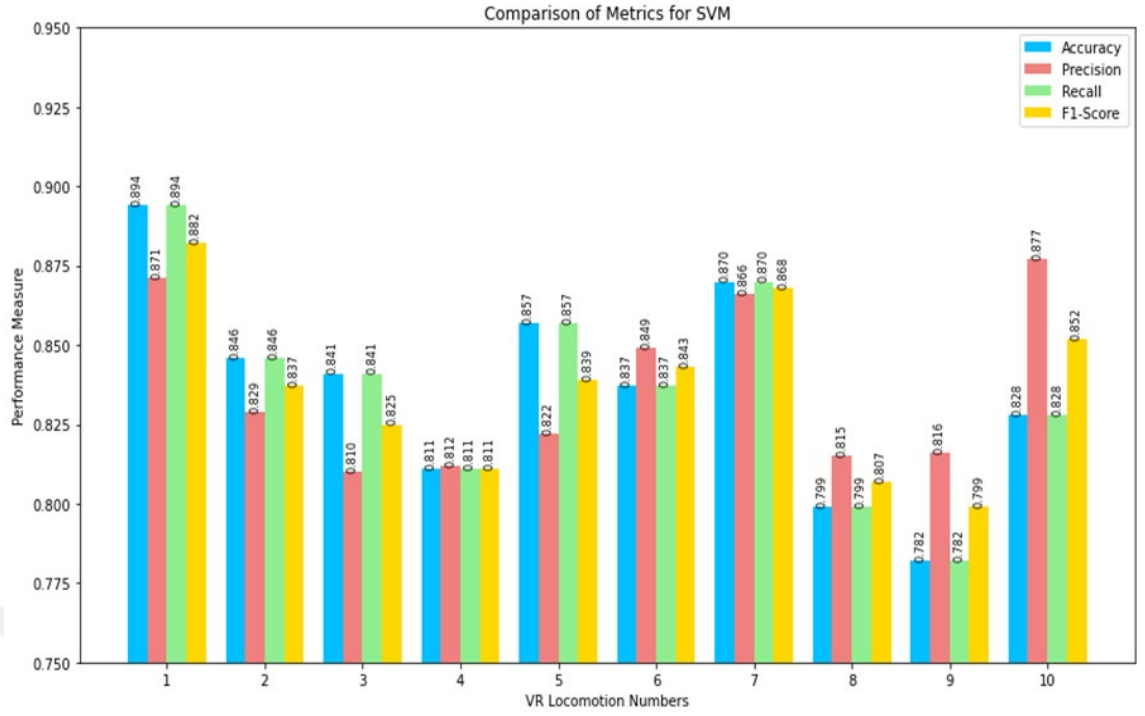
RF algoritması, özellikle Gerçek Pozitif Oranı (TP Rate) ve Kesinlik (Precision) metrikleri açısından oldukça başarılı sonuçlar elde etmiştir. Yapılan analizlerde, RF'nin ağırlıklı ortalama TP oranı 0,893 ve Kesinlik değeri 0,893 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. RF Algoritmasının Performans Metrikleri

Bu sonuçlar, algoritmanın sınıflandırma performansının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Duyarlılık (Recall) değerlerinin de büyük ölçüde yüksek çıkması, RF'nin özellikle çoğu sınıf için TP'leri etkili bir şekilde tanımlayabildiğini ve çok az sayıda yanlış negatif tespiti yaptığını ortaya koymaktadır. Algoritmanın ROC (Alıcı Çalışma Karakteristiği) eğrisi altında kalan alanın 0,949 olması RF'nin hassasiyet (sensitivity) ve özgüllük (specificity) arasında güçlü bir denge sağladığının önemli göstergeleridir (Çizelge 4.5.). Bu istatistikler, sınıflandırıcının tüm sınıflar genelinde tutarlı ve güvenilir tahminler yapabildiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, 0,893 olarak hesaplanan ağırlıklı F1-skoru, sınıflandırıcının genel doğruluk düzeyinin yüksek olduğunu ve dengeli bir performans sergilediğini açıkça göstermektedir. RF'nin bu üstün performansı, özellikle karmaşık veri setlerinde ve çok sınıflı problemlerde tercih edilmesinin temel nedenlerini oluşturmaktadır.

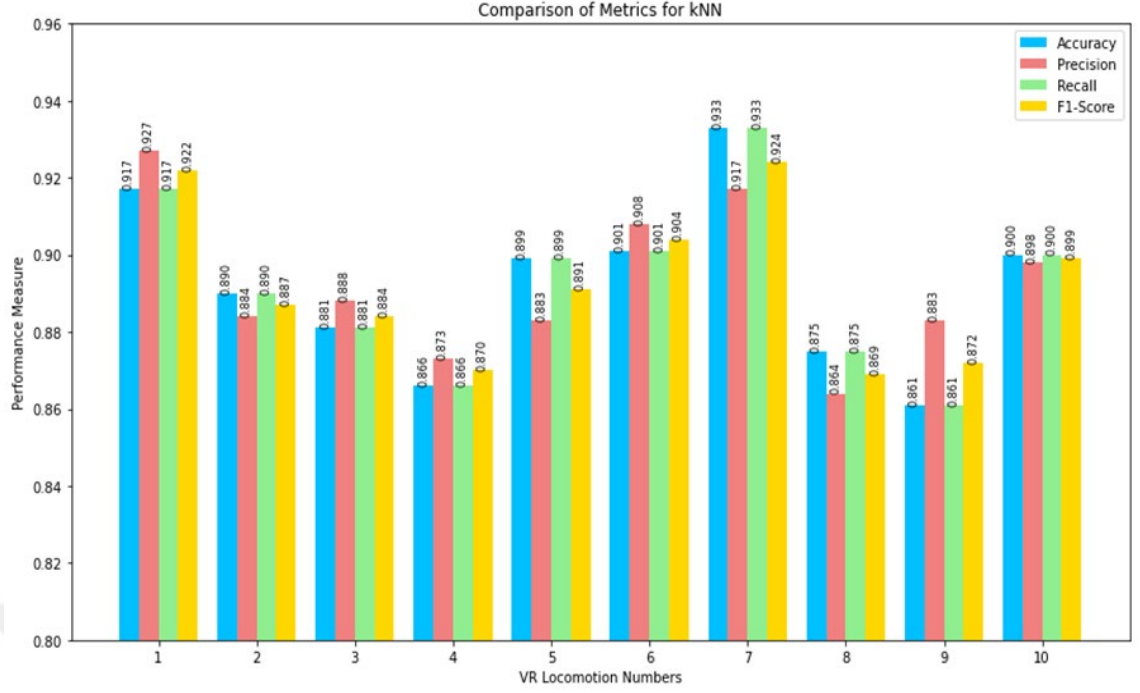
SVM algoritması RF ile karşılaştırıldığında performans açısından bir miktar daha düşük sonuçlar vermesine rağmen, yine de oldukça başarılı bir performans sergilemiştir. Analiz sonuçlarına göre, SVM'nin ağırlıklı TP oranı 0,836 ve Kesinlik (Precision) değeri 0,837 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. SVM Algoritmasının Performans Metrikleri

Algoritmanın 0,836'lık F1-skoru ve 0,964'lük ROC alanı değerleri, sınıflar arasındaki ayrımı başarılı bir şekilde yapabildiğini göstermektedir (Çizelge 4.5.). Bununla birlikte, özellikle bazı sınıflarda nispeten daha düşük olan Duyarlılık (Recall) değerleri ve 0,018 gibi RF'ye kıyasla daha yüksek olan Yanlış Pozitif Oranı (FP Rate), SVM'nin RF kadar çok sayıda TP yakalayamadığını düşündürmektedir. Ancak tüm bu faktörlere rağmen, SVM genel olarak iyi bir performans sergilemiş ve kesinlik ile duyarlılık arasında dengeli bir sonuç elde etmiştir.

KNN algoritması ise RF ile karşılaştırılabilir düzeyde olağanüstü bir performans göstermiştir. Yapılan değerlendirmelerde, kNN'nin ağırlıklı TP oranı 0,892 ve Kesinlik (Precision) değeri yine 0,892 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. KNN Algoritmasının Performans Metrikleri

Algoritmanın 0,962’lik ROC alanı, sınıflar arasında son derece etkili bir ayırım yapabildiğinin açık bir göstergesidir. RF’de olduğu gibi kNN’nin de özellikle ilk birkaç sınıfta oldukça yüksek Duyarlılık (Recall) sergilediği ve tüm sınıflar genelinde yüksek Kesinlik (Precision) değerlerini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu istikrarlı performans, algoritmanın 0,892 gibi oldukça başarılı bir ağırlıklı F1-skoru elde etmesini sağlamıştır (Çizelge 4.5.). KNN’nin bu dikkat çekici sonuçları, özellikle VR lokomasyon tekniklerinin sınıflandırılmasında RF kadar etkili bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.5. Sınıflandırıcıların Performans Metrikleri Ortalamaları

Sınıflandırıcı	TP Oranı	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-Skoru	ROC Alanı (ROC Area)
RF	0,893	0,893	0,893	0,893	0,949
SVM	0,836	0,837	0,836	0,836	0,964
kNN	0,892	0,892	0,892	0,892	0,962

4.3. NASA-TLX Puanları ile EEG Tabanlı Sınıflandırma Doğruluğu Arasındaki Korelasyonlar

NASA-TLX puanları ile RF algoritmasının sınıflandırma doğruluğu arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla Pearson korelasyon analizi uygulanmıştır. Yapılan analizler neticesinde, sınıflandırma doğruluğu ile zihinsel talep arasında güçlü bir negatif ilişki olduğu görülmektedir ($r=-0,799$, $p=0,005$) (Çizelge 4.6.). Bu bulgu, daha yüksek sınıflandırma doğruluğunun daha düşük bilişsel iş yükü ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde, sınıflandırma performansı ile katılımcıların rahatsızlık düzeyi arasında da anlamlı bir negatif ilişki tespit edilmiştir ($r=-0,724$, $p=0,018$) (Çizelge 4.6.). Bu sonuç, sınıflandırma performansındaki iyileşmelerin katılımcıların rahatsızlık düzeyini azalttığını ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, fiziksel talep ($r=0,758$, $p=0,011$) ve çaba ($r=0,772$, $p=0,009$) faktörlerinde güçlü pozitif ilişkiler gözlemlenmiştir (Çizelge 4.6.). Bu bulgular, daha yüksek doğrulukla sınıflandırılan tekniklerin katılımcılar tarafından daha fazla fiziksel kuvvet gerektiren ve daha yorucu olarak algılandığını göstermektedir.

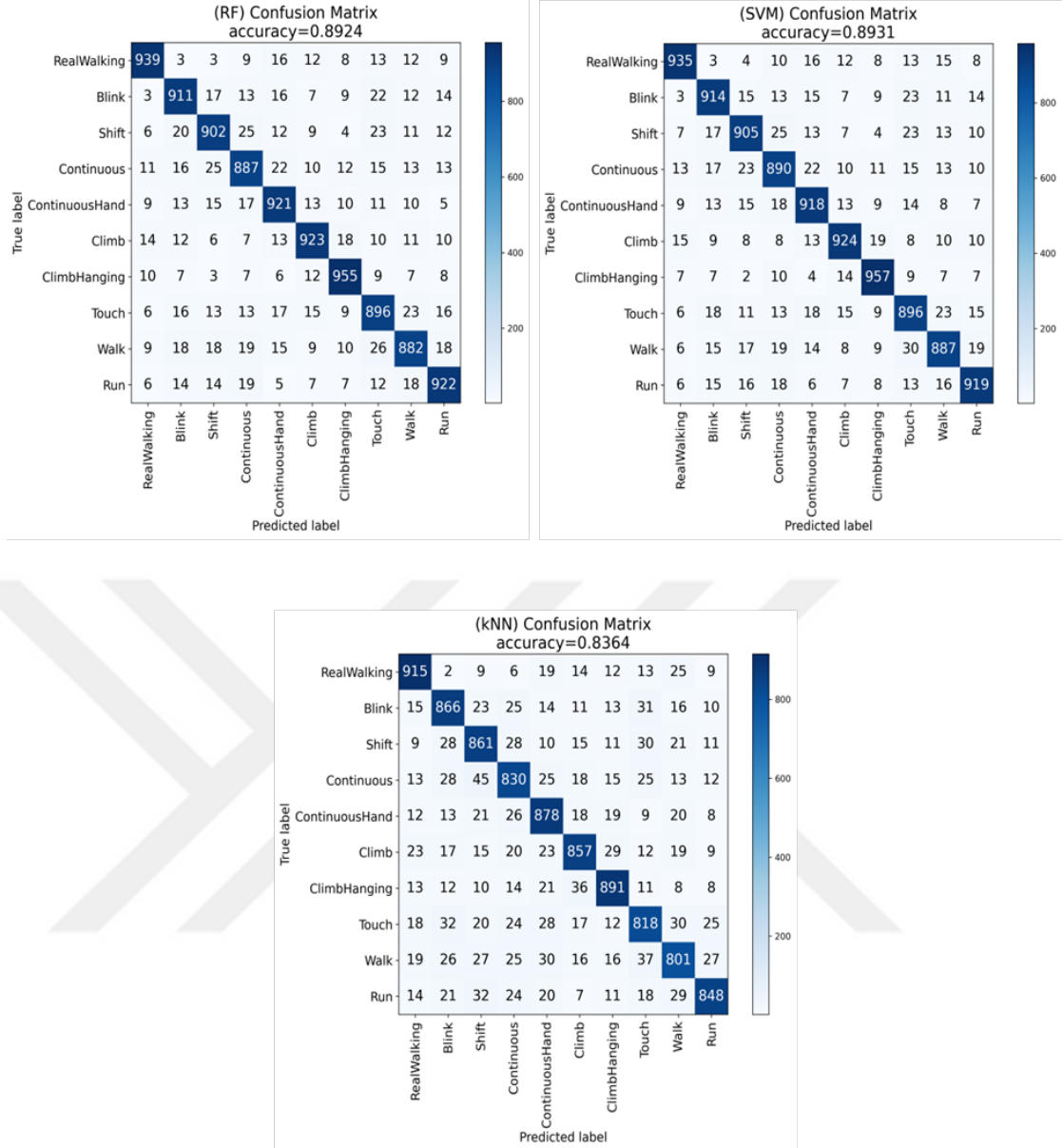
Diğer yandan, zamansal talep ($r=-0,161$, $p=0,656$) ve performans ($r=0,008$, $p=0,982$) ile sınıflandırma doğruluğu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir (Çizelge 4.6.). Bu sonuçlar, sınıflandırma doğruluğunun kullanıcıların zaman algılarını veya öznel performans değerlendirmelerini anlamlı ölçüde etkilemediğini göstermektedir.

Elde edilen bulguların bütünsel değerlendirmesi, sınıflandırma doğruluğundaki iyileşmelerin bir yandan zihinsel talep ve rahatsızlık düzeyini azaltırken, diğer yandan fiziksel talep ve çaba hissini artırabileceğini ortaya koymaktadır. Bu çift yönlü etki, kullanıcı deneyimi ve görev katılımı üzerinde önemli sonuçlar doğurabilecek niteliktedir. Özellikle VR tabanlı lokomasyon tekniklerinin tasarımında bu denge unsurlarının dikkate alınması gerektiği açıktır.

Çizelge 4.6. NASA-TLX Alt Faktörleri ile Sınıflandırma Doğruluğu Arasındaki Pearson Korelasyon Analizi Sonuçları

NASA-TLX Faktörleri	Alt	r (Korelasyon Katsayısı)	p Değeri	Anlamlılık Düzeyi	Yorum
Zihinsel Talep		-0,799	0,005	$p < 0,01$	Yüksek negatif ilişki
Fiziksel Talep		0,758	0,011	$p < 0,05$	Yüksek pozitif ilişki
Zamansal Talep		-0,161	0,656	$p > 0,05$	Anlamlı ilişki yok
Performans		0,008	0,982	$p > 0,05$	Anlamlı ilişki yok
Çaba		0,772	0,009	$p < 0,01$	Yüksek pozitif ilişki
Rahatsızlık		-0,724	0,018	$p < 0,05$	Yüksek negatif ilişki

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.7. RF, SVM ve KNN Algoritmalarının Karışıklık Matrisleri

Şekil 4.7., RF, SVM ve kNN algoritmalarına ait karışıklık matrislerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Karışıklık matrisleri, her algoritmanın farklı lokomasyon tekniğini ne ölçüde doğru sınıflandırabildiğini ayrıntılı bir şekilde göstermektedir. RF ve kNN algoritmaları genel olarak daha yüksek doğru sınıflandırma oranları sergileyerek, hedef sınıflara ait örnekleri başarılı bir şekilde tanımlayabilmektedir. Özellikle, Asılarak Tırmanma tekniğinde RF'nin belirgin bir başarı gösterdiği, yanlış sınıflandırma oranlarının düşük seviyede kaldığı gözlenmektedir. SVM algoritması ise bazı tekniklerde göreceli olarak daha düşük doğruluk oranları sunmuş, bununla birlikte bazı tekniklerde (örneğin Işınlanma ve Kaydırma) dengeli bir dağılım sergileyebilmiştir. Karışıklık matrislerinin genel yapısı değerlendirildiğinde, RF ve kNN algoritmalarının

sınıflar arası ayrımı daha net biçimde yapabildiği ve veri setindeki örüntüleri daha etkili yakalayabildiği anlaşılmaktadır. Bu bulgular, EEG temelli sınıflandırma uygulamalarında bu iki algoritmanın kullanımının daha avantajlı olabileceğine işaret etmektedir.

4.4. Literatürle Karşılaştırmalı Bulguların Değerlendirilmesi

Çalışmanın bulguları, literatürde EEG ve VR tabanlı bilişsel yük ölçümüne yönelik yürütülen önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli benzerlikler ve farklılıklar ortaya koymaktadır. Bu karşılaştırmalar hem yöntemsel tercihler hem de elde edilen sonuçlar açısından mevcut çalışmanın alana katkı düzeyini değerlendirme açısından kritik önem taşımaktadır. Çizelge 4.7.'de sunulan özet bilgiler, bilişsel yükün EEG tabanlı ölçümüne yönelik önceki araştırmalarda kullanılan katılımcı sayıları, uyarıcı türleri, frekans bantları, öznelite çıkarma ve sınıflandırma teknikleri gibi başlıca değişkenleri derlemektedir. Görüldüğü üzere, farklı araştırmalarda çoğunlukla benzer frekans bantları (özellikle θ , α ve β) kullanılırken, veri ön işleme aşamasında genellikle ICA (Bağımsız Bileşen Analizi), band geçiren filtreleme, EEGLAB, FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) gibi yöntemler tercih edilmiştir. Sınıflandırma algoritmaları olarak SVM, LDA (Doğrusal Diskriminant Analizi), GWO (Gri Kurt Optimizasyonu), RF ve benzeri yöntemlerin yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.7. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma

Yazar(lar), Yıl	Katılımcı Sayısı	Deneysel Ortam	Frekans Band Aralığı	Veri Ön İşleme Yöntemleri	Sınıflandırma Yöntemi / İstatistiksel Analiz Teknikleri	Ölçekler /Anketler
Wu et al. (2024)	149	VTF-VR (VR'de Vibrotaktik geri bildirim) ve NON-VTF-VR	θ, α, β	FFT	ANOVA (Varyans Analizi), ANCOVA (Kovaryans Analizi)	SAT (Uzamsal Yetenek Testi), CLT (Bilişsel Yük Testi)
Chang et al. (2022)	11	VR çölde hayatta kalma oyunu	α	ICA	ERD/ERS, ANOVA	NASA-TLX
Fourcade et al. (2024)	29	VR	$\delta, \theta, \alpha, \beta, \gamma$	ICA, EEGLAB	CWT (Sürekli Dalgacık Dönüşümü), Source Localization – eLORETA (Tam düşük çözünürlüklü tomografi analizi), LMM (Doğrusal Karma Model), Küme Tabanlı Permütasyon Testleri, Bağımlı t-testleri ve ANOVA	-
Ajami et al. (2024)	15	Gerçek ve Grafik VR	Θ ve α	ICA, Bant Geçiren Filtre	GWO, İki örneklem t-Testi	NASA-TLX

Çizelge 4.7. Devamı

Mondelini et al. (2023)	27	Masaüstü bilgisayar ve HMD	Θ ve α	ICA, ASR (Artefakt Alt Uzayı Yeniden Yapılandırması), EEGLAB	Tekrarlı ölçümlerde çift yönlü ANOVA	NASA-TLX
Tremmel et al. (2019)	15	Sanal bir podyuma sunulan bir dizi renkli top: VR kulaklığı.	θ , α , β , γ	Hampel filtresi	rLDA (Düzenli Doğrusal Diskriminant Analizi), Spearman's korelasyonu	MSSQ (Hareket Hastalığı Duyarlılık Anketi)
Kazemi et al. (2024)	60	VR oyunu	Θ ve α	EEGLAB	ANOVA	NASA-TLX
Sarailoo et al. (2022)	36	Multimedya	δ , θ , α , β	EEGLAB, FIR, Bant geçiren filtre, ICA	MRMR (Minimum Fazlalık-Maksimum İlgi), LDA, SVM	NASA-TLX
Luquet et al. (2024)	12	VR uygulaması	0.1 – 30 Hz	BrainVision Analyzer Software, EEGLAB, ICA	Tekrarlı ölçümlerde varyans analizi, ANOVA	NASA-TLX, SSQ (Simülasyon Hastalık Anketi), PQ (Mevcudiyet Anketi)
Bu Çalışma	32	VREEG	δ , θ , α , β , γ	Bant geçiren filtre, STFT	RF, SVM, kNN, Tekrarlı ölçümlerde tek yönlü ANOVA	NASA-TLX

Mevcut çalışmada, daha geniş bir frekans bandı aralığı (δ - γ) değerlendirilmiş ve bu sayede bilişsel yükün daha geniş bir nörofizyolojik spektrumda analiz edilmesi mümkün olmuştur. Ayrıca farklı lokomasyon tekniklerinin EEG üzerinden sınıflandırılmasında RF, SVM ve kNN algoritmalarının performansı karşılaştırılarak literatüre özgün bir katkı sunulmuştur. Literatürde çoğu çalışma bilişsel yük düzeylerini

ölçmeye odaklanırken, bu tez çalışması sınıflandırma doğruluğunu NASA-TLX alt boyutlarıyla ilişkilendirerek hem öznel hem nesnel ölçümlerin entegrasyonunu sağlamıştır. Bu yönüyle tez çalışması hem yöntem hem de bulgu düzeyinde literatürdeki bilgi birikimine değerli katkılar sağlamaktadır.

Çizelge 4.8. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma – Ana Bulgular

Yazar(lar), Yıl	Ana Bulgular
Wu et al. (2024)	EEG tabanlı geri bildirim, bilişsel yükü azaltırken yaratıcılığı, performansı ve dikkati geliştirir. Etkiler, yüksek uzamsal yeteneğe sahip öğrenciler için daha güçlüdür, ancak geri bildirim, düşük uzamsal yeteneğe sahip öğrenciler için bilişsel talepleri eşitlemeye yardımcı olur.
Chang et al. (2022)	Görsel düzenlemeler (bakışlar, hareketler) kullanıcı deneyimini iyileştirir ve iş yükünü azaltır. Çok fazla hareket bilişsel talebi artırabilir, bu nedenle denge gereklidir.
Fourcade et al. (2024)	VR ortamında duygusal uyarılma sırasında beyin (EEG) ve kalp (EKG) aktivitelerinin etkileşimini incelemiş ve duygusal tepkilerin yalnızca tek bir sistemle değil, çoklu fizyolojik sistemlerin bütünleşmiş analiziyle daha kapsamlı anlaşılabilirliğini göstermiştir.
Ajami et al. (2024)	Grafik VR, daha fazla bilişsel kaynak gerektirir ve bu da onu yüksek zihinsel katılım gerektiren görevler için daha uygun hale getirir. Gerçek VR, daha düşük bilişsel yük ile daha doğal ve sürükleyici bir deneyim sunarak terapi ve rahatlama gibi uygulamalar için daha iyi hale getirir.
Tremmel et al. (2019)	VR ortamlarında EEG tabanlı bilişsel iş yükü tahmini mümkündür
Kazemi et al. (2024)	Konsol, bilişsel verimlilik açısından ışınlanmaya göre daha avantajlıdır. Oturma pozisyonu, ayakta durma pozisyonuna kıyasla daha düşük zihinsel yük gerektirir.
Mondellini et al. (2023)	Çalışma, Masaüstü ve HMD koşulları arasında öznel zihinsel iş yükü (NASA-TLX puanları) veya görev performansı (tepki süreleri, hata oranları) açısından anlamlı bir fark bulamadı. EEG ölçümleri, dinlenme durumuna kıyasla zihinsel yükte önemli bir artış gösterdi, ancak görev zorluk seviyeleri arasında tutarlı bir şekilde ayırım yapmadı.

Çizelge 4.8. Devamı

Sarailoo et al. (2022)	Çalışma, EEG kullanarak eğitimsel multimedyaadaki anlık bilişsel yükü başarıyla ölçtü. Bir SVM modeli, bilişsel yükü sınıflandırmada %84,5 doğruluk elde ederek öğretim içeriğini optimize etmek için gerçek zamanlı izlemeyi mümkün kıldı.
Luque et al. (2024)	VR, gerçek dünyadaki bilişsel talepleri başarılı bir şekilde çoğaltır ve yol geçişi senaryolarında karar vermeyle ilgili temel sinirsel tepkileri uyandırır. Artan bilişsel talep nöral aktiviteyi etkiledi, ancak genç katılımcılar iyi uyum sağladılar ve bilişsel-motor girişim beklentilerine rağmen çift görev koşullarında daha yüksek P3 genlikleri gösterdiler.
Bu Çalışma (2025)	EEG destekli analizler, farklı VR lokomasyon tekniklerinin kullanıcı üzerinde farklı düzeylerde bilişsel yük oluşturduğunu göstermiştir; özellikle tırmanma temelli görevler yüksek fiziksel ve zihinsel çaba gerektirerek EEG dalga güçlerinde belirgin artışlara yol açmıştır. RF ve kNN algoritmaları, EEG verilerinden bilişsel yükü yüksek doğrulukla sınıflandırabilmiş ve bu da VR ortamlarında görev türüne göre kişiselleştirilmiş kullanıcı deneyimlerinin geliştirilebileceğini göstermiştir.

Çizelge 4.8., literatürdeki çeşitli çalışmaların ve bu tez kapsamında yapılan araştırmanın bilişsel yük, VR deneyimleri ve EEG tabanlı analizlerle ilgili temel bulgularını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Tablodaki bulgular, EEG tabanlı geri bildirimlerin bilişsel yükü azaltırken yaratıcılık, performans ve dikkat üzerinde olumlu etkileri olduğunu (Wu et al., 2024), ayrıca VR ortamlarında duygusal ve bilişsel süreçlerin çoklu fizyolojik sistemlerle daha kapsamlı analiz edilebileceğini (Fourcade et al., 2024) ortaya koymaktadır. Bunun yanında, grafik tabanlı VR'ın yüksek zihinsel katılım gerektiren görevler için daha uygun olduğu (Ajami et al., 2024), gerçekçi VR'ın ise terapötik uygulamalarda daha etkili olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, farklı VR lokomasyon tekniklerinin bilişsel yük üzerindeki etkilerini EEG verileriyle doğrulamakta ve makine öğrenmesi algoritmalarının (RF, kNN) bu verileri yüksek doğrulukla sınıflandırabileceğini göstermektedir. Literatürle uyumlu şekilde,

VR'ın gerçek dünya bilişsel taleplerini simüle edebildiği (Luque et al. 2024) ve EEG tabanlı izlemenin öğrenme süreçlerini optimize edebileceği (Sarailoo et al. 2022) desteklenmiştir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma, sanal gerçeklik (VR) ortamlarında uygulanan farklı lokomasyon tekniklerinin kullanıcılar üzerindeki etkilerini hem öznel hem de nesnel ölçüm yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak analiz etmeyi amaçlamıştır. Araştırma kapsamında, EEG sinyallerine dayalı fizyolojik ölçümler ile NASA-TLX ölçeği üzerinden elde edilen öznel değerlendirmeler kullanılarak, lokomasyon tekniklerinin kullanıcı deneyimi üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, lokomasyon tekniklerinin özellikle fiziksel talep, çaba ve rahatsızlık boyutlarında anlamlı farklılıklara neden olduğunu ortaya koymuştur. Zihinsel talep, zamansal talep ve performans algısı gibi boyutlarda ise istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar gözlenmemiştir. Bu sonuçlar, sanal ortamlarda fiziksel eylem gerektiren görevlerin kullanıcılar üzerinde daha yüksek iş yükü oluşturduğunu, ancak bilişsel olarak tüm görevlerin benzer düzeyde algılandığını göstermektedir.

NASA-TLX Toplam İş Yüğü puanları açısından değerlendirildiğinde, Tırmanma ve Asılarak Tırmanma tekniklerinin en yüksek iş yükü seviyelerine neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu görevlerin fiziksel olarak yoğun ve motor koordinasyon açısından zorlayıcı yapısı, bu sonuçların başlıca nedeni olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, Koşma tekniğinin de bazı diğer tekniklere kıyasla daha yüksek iş yükü oluşturduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, kullanıcıların sanal ortamdaki etkileşim kalitesinin yalnızca görsel ve deneyimsel unsurlara değil, aynı zamanda seçilen lokomasyon yöntemlerinin fiziksel zorluk düzeyine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Sınıflandırma algoritmaları üzerinden yapılan analizlerde, RF ve kNN algoritmalarının bilişsel yük düzeylerinin sınıflandırılmasında yüksek doğruluk ve dengeli performans sergilediği görülmüştür. Özellikle Asılarak Tırmanma görevinde her iki algoritma da oldukça yüksek F1 skorlarıyla (sırasıyla 0.926 ve 0.924) ön plana çıkmıştır. SVM algoritması ise bazı görevlerde daha düşük doğruluk göstermiştir. Bu sonuçlar, EEG sinyallerine dayalı sistemlerde RF ve kNN algoritmalarının, kullanıcı bilişsel yükünü gerçek zamanlı olarak tahmin etme potansiyelini taşıdığını göstermektedir.

Korelasyon analizleri ise, sınıflandırma doğruluğu ile zihinsel talep ve rahatsızlık arasında negatif; fiziksel talep ve çaba arasında ise pozitif yönlü anlamlı ilişkilerin bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, sistem doğruluğu arttıkça kullanıcıların zihinsel olarak daha az zorlandığını ve rahatsızlık düzeylerinin azaldığını, ancak fiziksel çaba gerektiren görevlerde sınıflandırma doğruluğunun artmasıyla birlikte daha fazla fiziksel yüklenmenin oluşabileceğini göstermektedir.

Bu bağlamda, VR uygulamalarının kullanıcı merkezli tasarımı açısından bazı önemli çıkarımlar elde edilmiştir. Kullanıcıların uzun süreli VR deneyimlerinde konforunun sağlanabilmesi için düşük fiziksel çaba gerektiren lokomasyon tekniklerinin tercih edilmesi önerilmektedir. Ancak uygulamanın bağlamına göre (örneğin rehabilitasyon veya fiziksel performans eğitimi gibi) daha yüksek fiziksel çaba gerektiren tekniklerin de bilinçli olarak tercih edilebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca sınıflandırıcı algoritmaların, kullanıcı davranışlarını ve yüklenme düzeylerini önceden tahmin ederek sistemin adaptif olarak uyum sağlaması, kullanıcı etkileşimini daha akıcı hale getirebilir ve bilişsel yükü azaltabilir. Bu doğrultuda geliştirilecek sistemler, özellikle dikkat ve karar verme süreçlerinin sürdürülebilir olduğu uygulamalarda kullanıcı deneyimini iyileştirme potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, bu tez kapsamında elde edilen bulgular, VR ortamlarında kullanılan lokomasyon tekniklerinin kullanıcıların bilişsel ve fiziksel yükleri üzerinde farklı etkiler yarattığını ortaya koymakta ve bu etkilerin hem teknik tasarım hem de kullanıcı odaklı sistem iyileştirmeleri açısından dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, daha geniş yaş aralığına ve farklı bilişsel profillere sahip kullanıcı gruplarının dahil edilmesi, bireysel farklılıkların bilişsel yük üzerindeki etkisinin daha detaylı bir biçimde incelenmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, gerçek zamanlı biyolojik geri bildirim sistemlerinin kullanımı ile EEG verilerine dayalı sınıflandırma algoritmalarının gerçek uygulamalarda test edilmesi, adaptif VR sistemlerinin geliştirilmesi adına önemli bir adım olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ajami, M. M., Rasti, J., Yazdchi, M., Nasimi, F. 2024. Comparative Analysis of Mental Workload in Real vs. Graphic Virtual Reality Environments: Insights from EEG and Subjective Assessments. SSRN, 5210145.
- Babu, N., Satija, U., Mathew, J., Vinod, A. P. 2025. Emotion recognition in virtual and non-virtual environments using EEG signals: Dataset and evaluation. *Biomedical Signal Processing and Control*, 106.
- Bansal, G., Rajgopal, K., Chamola, V., Xiong, Z., Niyato, D. 2022. Healthcare in Metaverse: A Survey on Current Metaverse Applications in Healthcare. *IEEE Access*, 10, 119914–119946.
- Boletsis, C. 2017. The new era of virtual reality locomotion: A systematic literature review of techniques and a proposed typology. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4), 24.
- Bozgeyikli, E., Raij, A., Katkoori, S., Dubey, R. 2016a. Locomotion in virtual reality for individuals with autism spectrum disorder. *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction*, 33–42.
- Bozgeyikli, E., Raij, A., Katkoori, S., Dubey, R. 2016b. Point & teleport locomotion technique for virtual reality. *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 205–216.
- Bozgeyikli, E., Raij, A., Katkoori, S., Dubey, R. 2019. Locomotion in virtual reality for room scale tracked areas. *International Journal of Human Computer Studies*, 122, 38–49.
- Bruno, L., Pereira, J., Jorge, J. 2013. A new approach to walking in place. *Human-Computer Interaction–INTERACT 2013: 14th IFIP TC 13 International Conference*, Cape Town, South Africa, September 2-6, 2013, *Proceedings, Part III* 14, 370–387.
- Canessa, A., Casu, P., Solari, F., Chessa, M. 2019. Comparing real walking in immersive virtual reality and in physical world using gait analysis. *VISIGRAPP 2019 - Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 2, 121–128.
- Chang, Z., Bai, H., Zhang, L., Gupta, K., He, W., Billinghamurst, M. 2022. The impact of virtual agents' multimodal communication on brain activity and cognitive load in Virtual Reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 3.
- Cover, T. M., Hart, P. E. 1952. Approximate formulas for the information transmitted by a discrete communication channel. In *IEEE Transactions On Information Theory*, Vol. (24), Issue 1.

- Daşdemir, Y. 2022. Cognitive investigation on the effect of augmented reality-based reading on emotion classification performance: A new dataset. *Biomedical Signal Processing and Control*, 78.
- Daşdemir, Y. 2023. Locomotion techniques with EEG signals in a virtual reality environment. *Displays*, 80.
- Di Luca, M., Seifi, H., Egan, S., Gonzalez-Franco, M. 2021. Locomotion vault: the extra mile in analyzing vr locomotion techniques. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–10.
- Dimigen, O., Valsecchi, M., Sommer, W., Kliegl, R. 2009. Human microsaccade-related visual brain responses. *Journal of Neuroscience*, 29(39), 12321–12331.
- Ferracani, A., Pezzatini, D., Bianchini, J., Biscini, G., Del Bimbo, A. 2016. Locomotion by natural gestures for immersive virtual environments. *Proceedings of the 1st International Workshop on Multimedia Alternate Realities*, 21–24.
- Fourcade, A., Klotzsche, F., Hofmann, S. M., Mariola, A., Nikulin, V. V., Villringer, A., Gaebler, M. 2024. Linking brain-heart interactions to emotional arousal in immersive virtual reality.
- Funk, M., Müller, F., Fendrich, M., Shene, M., Kolvenbach, M., Dobbertin, N., Günther, S., Mühlhäuser, M. 2019. Assessing the accuracy of point & teleport locomotion with orientation indication for virtual reality using curved trajectories. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12.
- Gao, H., Kasneci, E. 2024. Exploring Eye Tracking as a Measure for Cognitive Load Detection in VR Locomotion. *Proceedings of the 2024 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, 1–3.
- Gramouseni, F., Tzimourta, K. D., Angelidis, P., Giannakeas, N., Tsipouras, M. G. 2023. Cognitive Assessment Based on Electroencephalography Analysis in Virtual and Augmented Reality Environments, Using Head Mounted Displays: A Systematic Review. *Big Data and Cognitive Computing*, 7(4), 163.
- Griffin, N. N., Liu, J., Folmer, E. 2018. Evaluation of handsbusy vs handsfree virtual locomotion. *Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, 211–219.
- Güler, I., Übeyli, E. D. 2007. Multiclass support vector machines for EEG-signals classification. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 11(2), 117–126.
- Hart, S. G. 1986. NASA task load index (TLX).
- Imandoust, B. S., Bolandraftar, M. 2013. Application of K-Nearest Neighbor (KNN) Approach for Predicting Economic Events: Theoretical Background. *Journal of Engineering Research and Applications*, 3(5), 605–610.
- Jungnickel, E., Gramann, K. 2016. Mobile brain/body imaging (MoBI) of physical interaction with dynamically moving objects. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10.

- Kamboj, V., Bhuyan, T., S. Pillai, J. 2019. Vertical locomotion in vr using full body gestures. *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 1–2.
- Kazemi, R., Kumar, N., Lee, S. C. 2024. Comparative Analysis of Teleportation and Joystick Locomotion in Virtual Reality Navigation with Different Postures: A Comprehensive Examination of Mental Workload. *International Journal of Human-Computer Interaction*. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2429891>
- Klimecki, O. M., Leiberger, S., Lamm, C., Singer, T. 2013. Functional neural plasticity and associated changes in positive affect after compassion training. *Cerebral Cortex*, 23(7), 1552–1561.
- Klimesch, W. 1996. processes, brain oscillations and EEG synchronization. In *Memory International Journal of Psychophysiology*, Vol. (24).
- Lai, C., McMahan, R. P. 2020a. The cognitive load and usability of three walking metaphors for consumer virtual reality. 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 627–638.
- Lai, C., McMahan, R. P. 2020b. The Cognitive Load and Usability of Three Walking Metaphors for Consumer Virtual Reality. *Proceedings - 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2020*, 627–638.
- Lai, C. Q., Ibrahim, H., Abdullah, M. Z., Abdullah, J. M., Suandi, S. A., Azman, A. 2018. Literature survey on applications of electroencephalography (EEG). *AIP Conference Proceedings*, 2016(1), 20070.
- Lai, J. W., Cheong, K. H. 2022. Adoption of Virtual and Augmented Reality for Mathematics Education: A Scoping Review. *IEEE Access*, 10, 13693–13703.
- LaValle, S. M. 2023. *Virtual Reality*. Cambridge University Press.
- Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., Clerc, M., Congedo, M., Rakotomamonjy, A., Yger, F. 2018a. A review of classification algorithms for EEG-based brain–computer interfaces: a 10 year update. *Journal of Neural Engineering*, 15(3), 31005.
- Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., Clerc, M., Congedo, M., Rakotomamonjy, A., Yger, F. 2018b. A review of classification algorithms for EEG-based brain–computer interfaces: a 10 year update. *Journal of Neural Engineering*, 15(3), 31005.
- Luque, F., Armada, V., Piovano, L., Jurado-Barba, R., Santamaría, A. 2024. Understanding Pedestrian Cognition Workload in Traffic Environments Using Virtual Reality and Electroencephalography. *Electronics (Switzerland)*, 13(8).
- Martinez, E. S., Wu, A. S., McMahan, R. P. 2022. Research Trends in Virtual Reality Locomotion Techniques. *Proceedings - 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2022*, 270–280.
- McCullough, M., Xu, H., Michelson, J., Jackoski, M., Pease, W., Cobb, W., Kalescky, W., Ladd, J., Williams, B. 2015. Myo arm: swinging to explore a VE. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, 107–113.

- Mondellini, M., Pirovano, I., Colombo, V., Arlati, S., Sacco, M., Rizzo, G., Mastropietro, A. 2023. A Multimodal Approach Exploiting EEG to Investigate the Effects of VR Environment on Mental Workload. *International Journal of Human-Computer Interaction*.
- Niedermeyer, E., da Silva, F. H. L. 2005. *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields*. Lippincott Williams & Wilkins.
- O'keefe, J., Burgess, N., O'keefe, J., Burgess, N. 1999. Theta activity, virtual navigation and the human hippocampus.
- Pal, M. 2005. Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217–222.
- Paris, R. A., McNamara, T. P., Rieser, J. J., Bodenheimer, B. 2017. A comparison of methods for navigation and wayfinding in large virtual environments using walking.
- Park, S. M., Kim, Y. G. 2022. A Metaverse: Taxonomy, Components, Applications, and Open Challenges. *IEEE Access*, 10, 4209–4251.
- Prinz, L. M., Mathew, T., Klüber, S., Weyers, B. 2021. An overview and analysis of publications on locomotion taxonomies. 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), 385–388.
- Quintana, D., Rodríguez, A., Boada, I. 2022. Authoring Tools for Procedural Modeling of Virtual Reality-Based Rehabilitation Exercises. *IEEE Access*, 10, 131567–131578.
- Rana, K. D., Vaina, L. M. 2014. Functional roles of 10 Hz alpha-band power modulating engagement and disengagement of cortical networks in a complex visual motion task. *PLoS ONE*, 9(10).
- Sarailoo, R., Latifzadeh, K., Amiri, S. H., Bosaghzadeh, A., Ebrahimpour, R. 2022. Assessment of instantaneous cognitive load imposed by educational multimedia using electroencephalography signals. *Frontiers in Neuroscience*, 16.
- Sauro, J., Dumas, J. S. 2009. Comparison of three one-question, post-task usability questionnaires. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1599–1608.
- Schack, B., Klimesch, W., Sauseng, P. 2005. Phase synchronization between theta and upper alpha oscillations in a working memory task. *International Journal of Psychophysiology*, 57(2), 105–114.
- Seth, A., Vance, J. M., Oliver, J. H. 2011. Virtual reality for assembly methods prototyping: A review. *Virtual Reality*, 15(1), 5–20.
- Slater, M., Usoh, M. 1994. Body centred interaction in immersive virtual environments. *Artificial Life and Virtual Reality*, 1(1994), 125–148.
- Soler-Domínguez, J. L., De Juan, C., Contero, M., Alcañiz, M. 2020. I walk, therefore i am: A multidimensional study on the influence of the locomotion method upon

- presence in virtual reality. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(5), 577–590.
- Suthaharan, S. 2016. Support vector machine. In *Machine learning models and algorithms for big data classification: thinking with examples for effective learning*, Springer, 207–235.
- Tremmel, C., Herff, C., Sato, T., Rechowicz, K., Yamani, Y., Krusienski, D. J. 2019. Estimating Cognitive Workload in an Interactive Virtual Reality Environment Using EEG. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13.
- Wan, B., Wang, Q., Su, K., Dong, C., Song, W., Pang, M. 2021. Measuring the Impacts of Virtual Reality Games on Cognitive Ability Using EEG Signals and Game Performance Data. *IEEE Access*, 9, 18326–18344.
- Wei, Z., Sun, J., Liao, J., Lee, L. H., Sio, C. I., Hui, P., Qu, H., Tong, W., Xu, X. 2025. Illuminating the Scene: How Virtual Environments and Learning Modes Shape Film Lighting Mastery in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*.
- Wendt, J. D., Whitton, M. C., Brooks, F. P. 2010. Gud wip: Gait-understanding-driven walking-in-place. *IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, 51–58.
- Wilson, P. T., Kalescky, W., MacLaughlin, A., Williams, B. 2016. VR locomotion: walking> walking in place> arm swinging. *Proceedings of the 15th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry-Volume 1*, 243–249.
- Wilson, P. T., Nguyen, K., Harris, A., Williams, B. 2014. Walking in place using the Microsoft Kinect to explore a large VE. *Proceedings of the 13th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 27–33.
- Wu, L., Chau, K. T., Wan Yahaya, W. A. J., Wang, S., Wu, X. 2024. The Effect of Electroencephalogram Feedback in Virtual Reality Interactive System on Creativity Performance, Attention Value, and Cognitive Load. *International Journal of Human-Computer Interaction*.
- Zhang, Y., Chen, Y., Bressler, S. L., Ding, M. 2008. Response preparation and inhibition: The role of the cortical sensorimotor beta rhythm. *Neuroscience*, 156(1), 238–246.