

EĞİTİMDE BİYOMETRİK VERİ

SİSTEMLER, UYGULAMALAR VE ETİK YAKLAŞIMLAR

EDİTÖRLER

DR. ÖĞR. ÜYESİ LOKMAN ŞILBİR
DR. ÖĞR. ÜYESİ DUYGU SOLAK BERİGEL

 SERÜVEN
YAYINEVİ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8559-32-3

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz. The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

EĞİTİMDE BİYOMETRİK VERİ:

SİSTEMLER, UYGULAMALAR VE ETİK YAKLAŞIMLAR

ARALIK 2025

EDİTÖRLER

DR. ÖĞR. ÜYESİ LOKMAN ŞILBIR

DR. ÖĞR. ÜYESİ DUYGU SOLAK BERİGEL

ÖNSÖZ

Eğitim alanı, dijital teknolojilerin hızla gelişmesiyle birlikte köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşümün en dikkat çekici unsurlarından biri, öğrenme süreçlerinin daha derinlemesine anlaşılmasına olanak tanıyan biyometrik sistemler ve yapay zeka temelli veri işleme yaklaşımlarıdır. Yüz ifadeleri, göz hareketleri, ses özellikleri gibi fizyolojik ve davranışsal veriler öğrencilerin dikkat, duygu durumu, bilişsel yük ve öğrenme performanslarına ilişkin önemli ipuçları sunmaktadır.

Biyometrik verilerin eğitim ortamlarında kullanımı, öğrenme süreçlerinin yalnızca çıktılar üzerinden değil, sürecin kendisi üzerinden değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, kişiselleştirilmiş öğrenme ortamlarının tasarlanması, öğrenme güçlüklerinin erken aşamada belirlenmesi, öğretim stratejilerinin iyileştirilmesi ve sınıf içi etkileşimlerin daha etkili biçimde analiz edilmesi gibi pek çok alanda yeni olanaklar sağlamaktadır. Özellikle yapay zeka destekli veri analitiği yöntemleri, büyük ölçekli biyometrik verilerin anlamlı bilgiye dönüştürülmesinde kritik bir rol üstlenmektedir.

Bu kitap, eğitimde kullanılan biyometrik sistemler ve yapay zeka uygulamalarını teknik, hukuki ve etik boyutlarıyla bütüncül bir yaklaşımla ele almak amacıyla hazırlanmıştır. Kitapta öncelikle biyometrik sistemler ve cihazların temel kavramları, türleri ve teknik özellikleri açıklanmakta; ardından biyometrik verilerin eğitim ortamlarında kullanım biçimleri ve yapay zeka ile veri işleme yöntemleri ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Ayrıca eğitim araştırmalarında biyometrik veri kullanımına ilişkin etik ilkeler, kişisel verilerin korunması, mahremiyet ve hukuki sorumluluklar kapsamlı bir şekilde tartışılmaktadır. Eserde yer verilen örnek uygulamalar ve analizler, biyometrik veri temelli yaklaşımların eğitim ortamlarında nasıl kullanılabileceğine ilişkin somut bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır.

Bu yönüyle eser; eğitim teknolojileri alanında çalışan akademisyenler, lisansüstü öğrenciler, araştırmacılar ve uygulayıcılar için hem kuramsal hem de uygulamaya dönük bir başvuru kaynağı niteliği

taşımaktadır. Disiplinlerarası bir perspektifle hazırlanan kitap, eğitimde biyometrik sistemler ve yapay zeka kullanımına ilişkin güncel tartışmalara katkı sunmayı ve alandaki uygulamaların gelişimini desteklemeyi amaçlamaktadır.

Editörler

Dr. Öğr. Üyesi Lokman ŞILBİR

Dr. Öğr. Üyesi Duygu SOLAK BERİGEL

BÖLÜMLER

Bölüm 1. Biyometrik Sistemler ve Cihazlar: Tanımlar, Türler ve Teknik Özellikler

Dr. Öğr. Üyesi Lokman ŞILBİR

Bölüm 2. Eğitim Ortamlarında Biyometrik Verilerin Kullanımı

Dr. Öğr. Üyesi Suheda MUMCU

Bölüm 3. Eğitimde Yapay Zeka ile Biyometrik Veri İşleme: Yöntemler ve Uygulamalar

Dr. Öğr. Üyesi Gülbahar Merve ŞILBİR

Bölüm 4. Eğitimde Biyometrik Veri Kullanım Örnekleri

Dr. Öğr. Üyesi Muharrem AYDIN

Bölüm 5. Eğitim Araştırmalarında Biyometrik Veri İşlemenin Hukuki ve Etik Çerçevesi

Dr. Öğr. Üyesi Duygu SOLAK BERİGEL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	IV
------------	----

BÖLÜM 1

BİYOMETRİK SİSTEMLER VE CİHAZLAR: TANIMLAR, TÜRLER VE TEKNİK ÖZELLİKLER.....	1
---	----------

1. Biyometrik Veri Kavramı ve Sınıflandırılması.....	1
2. Fizyolojik Özelliklere Dayalı Biyometrik Veriler	5
2.1. Anatomik ve Morfolojik Veriler.....	5
2.2. Görsel Algı Verileri	8
2.3. Nörofizyolojik Veriler	10
2.4. Fiziksel Veriler	13
3. Davranışsal Özelliklere Dayalı Biyometrik Veriler.....	16

BÖLÜM 2

EĞİTİM ORTAMLARINDA BİYOMETRİK VERİLERİN KULLANIMI...23	
--	--

1. Biyometrik Verilerin Elde Edilmesinde Nesnelerin İnternetinin (IoT) Rolü	24
2. Eğitim Ortamlarında Biyometrik Verilerin Kullanım Alanları.....	29
3. Biyometrik Veriler ve Eğitsel Veri Bilimi.....	34
4. Eğitimin Geleceği (Education 4.0)	36

BÖLÜM 3

EĞİTİMDE YAPAY ZEKA İLE BİYOMETRİK VERİ İŞLEME: YÖNTEMLER VE UYGULAMALAR	42
---	-----------

1. Eğitim Ortamlarında Kullanılan Biyometrik Veriler	42
2. Biyometrik Verilerin Toplanması ve Veri İşleme Süreçleri	43
3. Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri	48
3.1. Geleneksel Makine Öğrenmesi Modelleri	50
3.2. Derin Öğrenme Modelleri.....	53
3.3. Diğer Özelleşmiş Yaklaşımlar	55
4. Biyometrik Veriye Dayalı Yapay Zeka Destekli Eğitim Uygulamaları .57	

BÖLÜM 4	
EĞİTİMDE BİYOMETRİK VERİ KULLANIM ÖRNEKLERİ.....	64
1. Kimlik Doğrulama ve Yönetim Süreçlerinde Biyometrik Veri Kullanımı	65
2. Öğrenci Analizi ve Takibinde Biyometrik Veri Kullanımı	69
3. Kişiselleştirilmiş Öğrenme Süreçlerinde Biyometrik Veri Kullanımı	76

BÖLÜM 5	
EĞİTİM ARAŞTIRMALARINDA BİYOMETRİK VERİ İŞLEMENİN HUKUKİ VE ETİK ÇERÇEVESİ.....	85
1. Biyometrik Veri İşlemenin Hukuki Boyutu: Mevzuat, İlkeler ve Sorumluluklar	86
1.1. Anayasal Dayanak	86
1.2. 6698 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK)’nda Biyometrik Veri	87
1.3. Özel Kanunlarda Biyometrik Veri Düzenlemeler.....	92
1.4. Türkiye’de Biyometrik Veri ile İlişkili Yönetmelikler	94
1.5. Biyometrik Verilerin İşlenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlara İlişkin Rehber.....	96
2. Eğitim Araştırmalarında Biyometrik Veri Kullanımı: Etik İlkeler ve Uygulama Sorumlulukları.....	99
2.1. Etik Temel İlkeler ve Biyometrik Veriye Özgü Duyarlılık	100
2.2. Etik Kurul Süreci, Açık Rıza ve Katılımcı Hakları	103
2.3. Güvenli Veri Yönetimi: Teknik ve İdari Sorumluluklar.....	105

BÖLÜM 1

BİYOMETRİK SİSTEMLER VE CİHAZLAR: TANIMLAR, TÜRLER VE TEKNİK ÖZELLİKLER

Lokman ŞILBIR¹

Bu bölümde, eğitim araştırmalarında önemi giderek artan biyometrik veri kavramı; fizyolojik ve davranışsal biyometrikler ekseninde ele alınarak biyometrik sistemlerde yararlanılan veri kaynakları, cihazlar ve sensör teknolojileri bütüncül bir perspektifle incelenmiştir. Bu kapsamda anatomik ve morfolojik verilerden görsel algı, nörofizyolojik ve fiziksel (yaşamsal) ölçümlere; yürüme biçimi, klavye dinamikleri, dokunmatik ekran etkileşimleri ve uyku düzeni gibi davranışsal biyometriklere uzanan geniş bir veri yelpazesi tanımlanmıştır. Ayrıca biyometrik verilerin elde edilmesinde kullanılan kamera tabanlı sistemler, göz izleme (eye-tracking) cihazları, elektroensefalografi (EEG) ve beyin-bilgisayar arayüzü (Brain Computer Interface, BCI) teknolojileri ile giyilebilir sensör platformlarının teknik özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

1. Biyometrik Veri Kavramı ve Sınıflandırılması

Dijitalleşmenin ve yapay zeka temelli sistemlerin eğitim ortamlarında giderek yaygınlaşmasıyla birlikte, öğrenenlerin bilişsel, duyuşsal ve davranışsal özelliklerinin daha bütüncül biçimde analiz edilmesine olan ihtiyaç artmıştır. Bu bağlamda biyometrik veriler, bireyin öğrenme sürecine ilişkin nesnel, sürekli ve çok boyutlu bilgiler sunmaları nedeniyle eğitim araştırmalarında önemli bir veri kaynağı haline gelmiştir. Biyometrik verilerin analizi ile geliştirilen sistemler, öğrenme süreçlerinin izlenmesine, değerlendirilmesine ve kişiselleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Avrupa Birliği Genel Veri Koruma Tüzüğü'nde (General Data Protection Regulation, GDPR) biyometrik veriler, bir kişinin özgün biçimde tanımlanmasını veya doğrulanmasını sağlayan; fiziksel, fizyolojik ya da davranışsal özelliklerine ilişkin teknik işlemler sonucunda elde

¹ Dr. Öğr. Üyesi Lokman ŞILBIR
Trabzon Üniversitesi, Çarşıbaşı Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü,
Trabzon, TÜRKİYE
ORCID: 0000-0003-3655-2512, lokmansilbir@trabzon.edu.tr

edilen kişisel veriler olarak tanımlanmaktadır (European Union, 2016). Bu tanımlamada fiziksel, fizyolojik ve davranışsal olmak üzere üç ayrı kategoriye yer verildiği görülmektedir. Bununla birlikte, fiziksel özellikler çoğunlukla fizyolojik yapının bir alt bileşeni olarak ele alınmaktadır. Dolayısıyla biyometrik veriler genel olarak fizyolojik ve davranışsal olmak üzere iki temel kategori altında sınıflandırılabilir (Yalçın ve Gürbüz, 2015; Çiçek, 2024). Bu sınıflandırma, biyometrik verinin kaynağı olan biyolojik sistemin niteliği ile bireyin bedensel ya da davranışsal özellikleri arasındaki ilişkiye dayanmaktadır.

Fizyolojik biyometrik veriler, bireyin doğuştan gelen ya da biyolojik gelişim sürecinde oluşan fiziksel ve yapısal özelliklerine dayalı olup, genellikle zaman içerisinde büyük değişiklikler göstermeyen, görece kararlı veri türlerinden oluşmaktadır. Parmak izi, yüz geometrisi, kulak yapısı, el ve avuç içi geometrisi, iris ve retina yapısı ile ses gibi biyometrik özellikler bu kapsama dahil edilmektedir. Literatürde fizyolojik biyometrik verilerin, yüksek ayırt edicilik düzeyleri nedeniyle, kimlik doğrulama ve tanıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan veri türleri arasında yer aldığı vurgulanmaktadır (Jain vd., 2004; Özer Deniz ve Özer, 2022).

Davranışsal biyometrik veriler, bireylerin belirli bir görevi veya eylemi gerçekleştirirken sergiledikleri, dinamik, zamana bağlı ve tekrarlanabilir davranış örüntülerine dayanmaktadır. Bu veri türleri, fizyolojik biyometrik verilere kıyasla zaman içerisinde değişkenlik gösterebilmekte ve uzun vadede bireye özgü karakteristik kalıplar sundukları için biyometrik tanıma süreçlerinde kullanılabilir. Yürüme biçimi, yazı yazma ve klavye kullanım dinamikleri, uyku düzeni, imza atma davranışı, dokunmatik ekran etkileşimleri ve günlük hareket örüntüleri davranışsal biyometrik verilere örnek olarak gösterilebilir. Bu çerçevede fizyolojik ve davranışsal biyometrik verilerin birlikte kullanılması, bireyin hem bedensel hem de davranışsal özelliklerini kapsayan daha bütüncül ve güvenilir biyometrik sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Tablo 1’de fizyolojik ve davranışsal veri türleri ve bunların alt veri türlerine yönelik çeşitli biyometrik veri kaynaklarına ait açıklamalar sunulmaktadır.

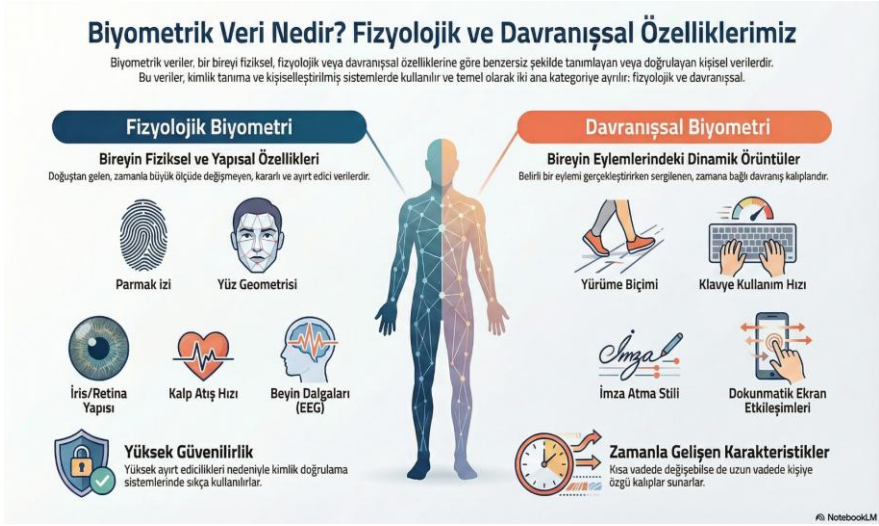
Tablo 1. Fizyolojik ve Davranışsal Veri Türlerine Yönelik Çeşitli Biyometrik Veri Kaynakları

Veri Türü	Alt Veri Türü	Açıklama	Biyometrik Veri Kaynakları
Fizyolojik Özellikler	Anatomik ve Morfolojik Veriler	Bireyin fiziksel ve yapısal beden özelliklerinden elde edilen biyometrik veriler.	• Parmak izi desenleri • Yüz geometrisi • El ve avuç içi geometrisi • Kulak yapısı • İris yapısı • Retina yapısı
	Görsel Algı Verileri	Göz hareketleri ve görsel dikkat mekanizmalarından elde edilen biyometrik veriler.	• Göz sabitlemeleri (fixation) • Sekme (saccade) • Göz kırpması sıklığı • Pupilla genişliği • Görsel tarama örüntüleri
	Nörofizyolojik Veriler	Merkezi sinir sistemi ve beyin aktivitelerinden elde edilen biyometrik veriler.	• EEG (alfa, beta, teta, gama dalgaları) • ERP (uyaranla ilişkili potansiyeller) • BCI (beyin-bilgisayar arayüzü) sinyalleri
	Fiziksel Veriler	Bireyin yaşamsal fonksiyonlarını yürüten biyolojik sistemlerden elde edilen veriler.	• Kalp atım hızı (HR) • Kalp atım değişkenliği (HRV) • Elektrokardiyogram (ECG) • Termoregülasyon (vücut sıcaklığı) • Deri iletkenliği (GSR / EDA) • Kan oksijen seviyesi (SpO₂)
Davranışsal Özellikler	Davranışsal Veriler	Bireyin belirli eylemleri gerçekleştirirken ortaya koyduğu dinamik ve zamana bağlı davranış örüntüleri.	• Yürüme biçimi (gait) • Yazı yazma ve klavye dinamikleri • İmza atma davranışı • Dokunmatik ekran etkileşimleri • Günlük hareket ve aktivite kalıpları

Bireylerin fizyolojik özelliklerinden hareketle, anatomik ve morfolojik, görsel algı, nörofizyolojik ve fiziksel alt veri türlerinde biyometrik veriler elde edilebilmektedir. Anatomik ve morfolojik çerçevede elde edilen biyometrik veriler, bireyin fiziksel ve yapısal beden

özelliklerinden elde edilen biyometrik verileri kapsamaktadır. Parmak izi desenleri, yüz geometrisi, kulak yapısı, el ve avuç içi geometrisi, iris ve retina yapısı bu çerçevede elde edilen veri türleri olarak ele alınmaktadır. Bu veriler klasik fizyolojik biyometrik veriler olarak değerlendirilmekte ve kimlik doğrulama sistemlerinde en yaygın ve güvenilir veri kaynakları arasında yer aldığını vurgulamaktadır (Jain vd., 2004). Anatomik ve morfolojik biyometrik verilerin yanı sıra, günümüzde teknolojik gelişmelerle birlikte görsel algı, nörofizyolojik ve fizyolojik veri türleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Görsel algı çerçevesinde elde edilen biyometrik veriler, bireyin göz hareketleri ve görsel dikkat süreçlerine dayalı olarak elde edilmektedir. Bu veriler göz sabitlemeleri (fixation), sekme (saccade), pupilla tepkileri ve görsel tarama örüntüleri gibi fizyolojik veriler sunmaktadır (Holmqvist vd., 2011). Nörofizyolojik veriler ise, EEG ve beyin-bilgisayar arayüzü sinyalleri gibi merkezi sinir sistemi aktivitelerinin doğrudan ölçülmesinden elde edilen verilerdir (Schalk ve Leuthardt, 2011; Orban vd., 2022). Diğer yandan kalp atım hızı, kalp atım değişkenliği, deri iletkenliği ve kan oksijen seviyesi gibi fiziksel veriler, özellikle giyilebilir teknolojiler aracılığıyla bireyin anlık fizyolojik durumu ve stres düzeyinin izlenmesinde kullanılabilecek biyometrik veriler sağlamaktadır (Hickey vd., 2021; Volpes vd., 2024).

Biyometrik veri elde edilebilecek diğer bir alan ise davranışsal biyometriklerdir. Davranışsal biyometrik veriler, bireyin belirli eylemleri yerine getirirken ortaya koyduğu davranışların, dinamik, zamana bağlı ve tekrarlanabilir örüntülerine dayalı olarak elde edilen veri türlerini ifade etmektedir. Bu veriler, bireyin anatomik yapısından ziyade, hareket, etkileşim ve motor kontrol süreçlerinin nasıl gerçekleştirildiğine odaklanmakta; yürüme biçimi, uyku süresi, klavye-fare kullanımı ile günlük hareket ve aktivite kalıpları gibi göstergeleri içermektedir. Davranışsal biyometrik veriler, kısa vadede bireyin tanımlanmasında tek başına yeterli bir veri olmamakla birlikte uzun vadede bireye özgü örüntüler sunan önemli bir biyometrik veri kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Stragapede vd., 2023). Fizyolojik ve davranışsal biyometrik verilerin genel bir özeti Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Fizyolojik ve Davranışsal Biyometrik Veriler

2. Fizyolojik Özelliklere Dayalı Biyometrik Veriler

Bu bölümde, fizyolojik özelliklere dayalı biyometrik veri kaynakları, kullanılan cihaz ve sensör teknolojileri ve elde edilen veri türlerinin teknik özellikleri ele alınmaktadır.

2.1. Anatomik ve Morfolojik Veriler

Anatomik ve morfolojik biyometrik veriler, bireyin doğuştan gelen ya da biyolojik gelişim süreci boyunca şekillenen fiziksel ve yapısal özelliklerine dayanmaktadır. Parmak izi desenleri, yüz geometrisi, kulak yapısı, el ve avuç içi geometrisi, iris ve retina yapısı ile ses tonu gibi biyometrik göstergeler bu gruba dahil edilmektedir. Söz konusu özellikler, bireyler arasında benzersiz yapısal farklılıklar göstermeleri ve yaşam süresi boyunca sınırlı değişime uğramaları nedeniyle biyometrik tanıma sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu verilerin en önemli avantajları ölçüm tekrarlanabilirliğinin yüksek olması, çevresel etkilere dayanıklılık göstermeleri ve kullanıcıdan aktif bir çaba gerektirmeden elde edilebilmeleridir. Özellikle parmak izi ve yüz geometrisi gibi veri türlerinin kullanımında, gelişen sensör teknolojileri sayesinde hem doğruluk hem de erişilebilirlik açısından önemli ilerlemeler sağlanmıştır. Anatomik biyometrik veriler kimlik doğrulama sistemlerinde en yaygın ve güvenilir veri kaynakları arasında yer almaktadır (Jain vd., 2004). Bununla birlikte günümüzde bu veri türleri, yalnızca güvenlik ve erişim kontrolü

alanlarında değil, aynı zamanda eğitim teknolojileri, insan-bilgisayar etkileşimi ve kullanıcı deneyimi araştırmaları gibi farklı disiplinlerde de bireye özgü özelliklerin analiz edilmesinde önemli bir potansiyel sunmaktadır.

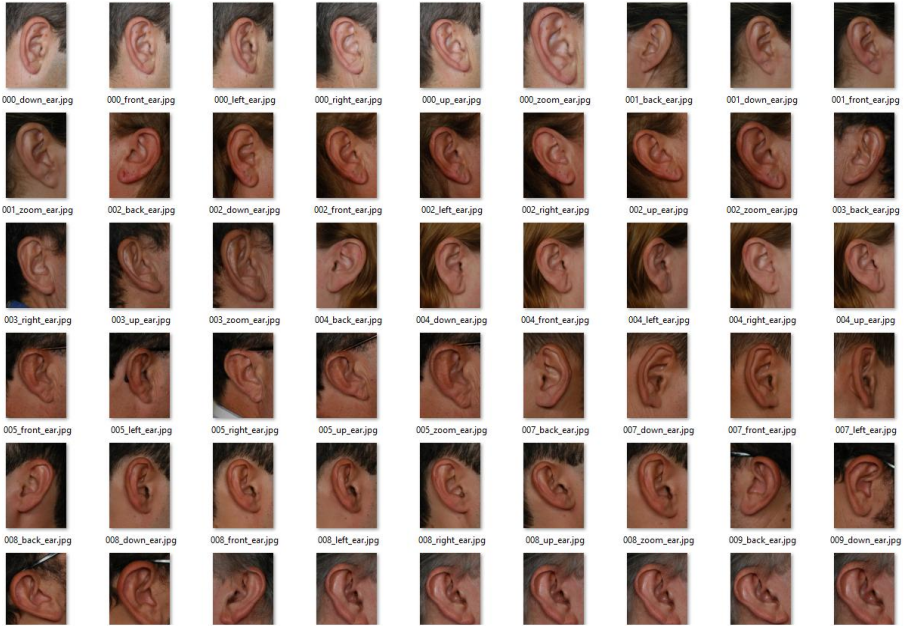
Parmak izleri, bireylerin sahip olduğu benzersiz desenler bütünü olup, her bir kişiye özgü biyometrik tanımlayıcılardır. Parmak izi okuma için optik, kapasitif ve ultrasonik sensörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, biyometrik verilerin benzersizliği ve zaman içinde gösterdiği kararlılık nedeniyle yaygın olarak benimsenmiştir. *Optik sensörler*, parmağın ışıklandırılarak bir görüntü sensörü aracılığıyla desenini yakalarken, *kapasitif sensörler* parmak çizgilerindeki sırtlar ve çukurlar arasındaki elektriksel yük farklarını kullanarak yüksek güvenli bilgileri elde ederler. *Ultrasonik sensörler* ise parmaktan gönderilen ultrasonik dalgaların yankılarını analiz ederek daha derinlemesine, üç boyutlu parmak izi verisi elde etme kapasitesine sahiptir. Bu sensör teknolojileri arasında kapasitif yöntem, özellikle mobil cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2’de parmak izi için kullanılan birkaç örnek cihaz gösterilmiştir.



Şekil 2. Parmak İzi Okuyucu Örnekleri

Yüz geometrisi, el-avuç içi geometrisi ve kulak yapısı gibi biyometrik verilerin elde edilmesinde *kamera tabanlı görüntüleme sistemleri* yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüz tanıma sistemleri, bireyin yüz yapısına ilişkin iki göz arasındaki mesafe, elmacık kemiklerinin konumu, çene hattının biçimi ve burun genişliği gibi ayırt edici anatomik unsurları analiz etmektedir. Yüz tanıma süreçlerinde, yüzdeki belirgin referans noktalarının geometrik oranları ve bu noktalar arasındaki mesafeler hesaplanarak bireye özgü bir yüz temsili

oluşturulmaktadır. Bu işlem 2B (2D) ya da 3B (3D) görüntü işleme teknikleri aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir. Özellikle 3D yüz tanıma sistemleri, derinlik bilgisini de kullanmaları sayesinde poz değişimleri ve kısmi örtülmelere karşı daha dayanıklı çözümler sunmaktadır. Kulak yapısı da dış kulak kepçesinin kendine özgü şekli, kıvrımları ve anatomik detayları nedeniyle kişiye özgü bir biyometrik özellik olarak değerlendirilmektedir (Şekil 3). Literatürde, kulak yapısının yüz ifadeleri gibi istemli değişikliklerden daha az etkilenmesi, bu biyometrik özelliğin kimlik doğrulama açısından önemli bir avantajı olarak ele alınmaktadır (Bostaji ve Jaha, 2023). Benzer şekilde el ve avuç içi geometrisine dayalı biyometrik sistemler, elin genel şekli, parmak uzunlukları, avuç içi çizgileri ve bazı uygulamalarda damar yapıları gibi morfolojik özellikleri analiz ederek bireysel farklılıkların belirlenmesini amaçlamaktadır. Yüz geometrisi, kulak yapısı gibi fizyolojik biyometrik özelliklerin elde edilmesinde kamera teknolojisinin kullanılması, bu verilerin tekrarlanabilir biçimde ölçülmesine ve verilerin temassız olarak toplanmasına imkan sağlar.



Şekil 3. AMI Kulak Datasetinden Örnek Görseller (Gonzalez vd.,2012)

İris tarama, göz bebeğini çevreleyen ve renkli kısmı oluşturan iris dokusunun benzersiz desenlerini analiz eder. İris üzerindeki çizgiler, benekler ve lif yapıları bireye özgüdür ve yaşam boyunca büyük ölçüde

değişmez. İris tarama sistemleri, genellikle *yakın kızılötesi (NIR) kameralar* kullanarak gözün ön kısmını temassız biçimde görüntüler. **Retina tarama** ise gözün arka kısmında yer alan retina tabakasındaki kan damarlarının dağılımını ve yapısını ölçer. Retina damar ağı, her birey için son derece özgün bir biyolojik örüntü sunar. Retina tarama sistemleri, düşük güçlü *lazer veya optik tarama teknolojileri* kullanarak gözün arka bölümündeki damar yapısını analiz eder. Ölçüm sırasında kullanıcının belirli bir noktaya sabit bakması gerekmektedir. İris tarama ve retina tarama yoluyla elde edilen görüntüler özel algoritmalar aracılığıyla işlenerek benzersiz bir şablon oluşturulur ve bu şablon veri tabanında saklanır. Tablo 2’de iris ve retina tarama için kullanılan teknolojilere yönelik özellikler özet şekilde sunulmuştur.

Tablo 2. İris ve Retina Tarama İçin Kullanılan Teknolojilere Yönelik Özellikler

Özellik	İris Tarama	Retina Tarama
Ölçülen yapı	Gözün renkli kısmı	Retina damar ağı
Sensör türü	NIR kamera	Lazer/optik tarayıcı
Temas	Temassız	Temassız ancak yakın ve sabit bakış gerekli
Kullanıcı konforu	Yüksek	Düşük

2.2. Görsel Algı Verileri

Görsel algı verileri, bireyin göz hareketleri ve görsel dikkat mekanizmalarından elde edilen biyometrik veriler arasında yer almakta olup, algısal ve bilişsel süreçlere ilişkin önemli göstergeler sunmaktadır. Bu kapsamda göz sabitlemeleri, sekme hızı, göz kırpmaya sıklığı, pupilla genişliği ve görsel tarama örüntüleri, görsel algı verilerinin temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Görsel algı verilerinin toplanmasında göz izleme (eye-tracking) teknolojileri kullanılmakta olup, bu teknolojiler masaüstü göz izleme sistemleri, başa takılan (head-mounted) gözlük tipi göz izleme cihazları ve mobil göz izleme sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Masaüstü göz izleme sistemleri, genellikle bilgisayar ekranı karşısında kullanılan ve kızılötesi kameralar aracılığıyla göz bebeği

hareketlerini temassız biçimde ölçen cihazlardan oluşurken gözlük tipi göz izleme cihazları, bireyin doğal hareket halindeyken gerçek yaşam ortamlarında göz hareketlerinin izlenmesine olanak tanımaktadır. Mobil göz izleme çözümleri ise tablet, sanal gerçeklik (Virtual Reality, VR) ve artırılmış gerçeklik (Augmented Reality, AR) ortamlarıyla bütünleşik olarak çalışabilmektedir.

Göz hareketleri kişiye özgü, tekrarlanabilir ve zamansal olarak tutarlı örüntüler oluşturduğu için görsel algı verileri, biyometrik bir veri kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Holmqvist vd., 2011). Günümüzde göz izleme cihazlarının örnekleme hızlarının artması, ölçüm hassasiyetlerinin gelişmesi ve taşınabilir hale gelmesiyle birlikte, görsel algı verileri eğitim teknolojileri, öğrenme analitiği, dikkat izleme ve kullanıcı deneyimi araştırmalarında giderek daha yaygın ve çok boyutlu biçimde kullanılmaktadır. Bu cihazlar, ekran üzerinde kullanıcının nereye, ne kadar süreyle ve kaç kez baktığına dair bilgiler toplayarak anlık ve geçmiş dikkat odaklarını değerlendirme imkanı sunar (Tekeli vd., 2022). Bu sayede, laboratuvar ortamında geleneksel deneylerle elde edilemeyen temel karar verme süreçlerine ilişkin araştırmacılara bilgi sağlayabilmektedir.

Masaüstü göz izleme sistemlerine örnek olarak, Tobii Pro Spectrum ve EyeLink 1000 Plus gibi cihazlar gösterilebilir. Bu cihazlar, özellikle okuma eylemi sırasında kelime üzerinde yapılan kısa beklemler ve sıçramalı hareketler gibi bilinçaltı göz hareketlerini yüksek hassasiyetle ölçerek bilişsel yükün ve beynin muhakeme düzeyinin artışıyla ilişkilendirilen sabitleme sayılarındaki artışları belirleyebilir (Ömür ve Aydoğdu, 2017). Gözlük tipi takılabilir göz izleme cihazları ise doğal ortamlarda ve hareket halindeki deneklerin davranışlarını incelemek amacıyla tasarlanmıştır (Güler ve Erdoğan, 2024). Bu cihazlar, kullanıcıların doğal ortamlarında serbestçe hareket etmelerine olanak tanıırken, görsel dikkatlerini ve etkileşimlerini kaydederek gerçek dünya senaryolarında veri toplamaya imkan sağlar. Göz izleme teknolojilerinin kullanım ortamlarına göre karşılaştırması Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. Göz İzleme Teknolojilerinin Kullanım Ortamlarına Göre Karşılaştırması

Özellik	Masaüstü Sistemler	Taşınabilir Sistemler	Takılabilir Sistemler
Ortam	Kontrollü	Yarı kontrollü	Doğal / gerçek yaşam
Kullanıcı hareketi	Sınırlı	Kısmen serbest	Serbest
Veri doğruluğu	Çok yüksek	Orta	Orta
Gerçek dünya deneyimi	Düşük	Orta	Yüksek

Masaüstü göz izleme sistemleri yüksek ölçüm hassasiyeti, takılabilir sistemler ise yüksek gerçek dünya deneyimi sunmalarıyla öne çıkmaktadır. Taşınabilir sistemler ise bu iki yaklaşım arasında denge kurarak, eğitim teknolojileri ve öğrenme analitiği çalışmalarında esnek bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle göz izleme sisteminin seçimi, araştırmanın amacı, ortamın doğası ve beklenen veri türüne bağlı olarak yapılmalıdır.

2.3. Nörofizyolojik Veriler

Nörofizyolojik veriler, bireyin merkezi sinir sistemi ve özellikle beyin aktivitelerinden elde edilen biyometrik verileri kapsamaktadır. Bu veri türleri, sinir hücrelerinin elektriksel ve elektrofizyolojik etkinliklerinin ölçülmesine dayanmaktadır. Nörofizyolojik verilerin elde edilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmakla birlikte, en yaygın olarak başvuru teknikler arasında EEG, ERP ve BCI sinyalleri bulunmaktadır. Bu yöntemler, beynin elektriksel aktivitesini ölçerek çeşitli nörolojik durumlar ve bilişsel süreçler hakkında değerli bilgiler sunar. Bu kapsamda en yaygın kullanılan nörofizyolojik veri türlerinden biri Elektroensefalografi (EEG) verileridir (Demir vd., 2022; Koçak, 2020). EEG verileri, milisaniye düzeyinde zamansal çözümleme sağlaması nedeniyle bilişsel süreçlerin anlık değişimlerini izleme açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Koçak, 2020). EEG, kafa derisi üzerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla beynin elektriksel aktivitelerini ölçmekte ve bu aktiviteler frekans bantlarına ayrılarak analiz edilmektedir. Delta (0.5-4 Hz), Teta (4-8 Hz), Alfa (8-12 Hz), Beta (12-30 Hz) ve Gama (30-50 Hz) dalgaları; dikkat, uyanıklık, bilişsel yük, hafıza ve öğrenme gibi farklı zihinsel

durumlarla ilişkilendirilmektedir (Spezialetti vd., 2018). Özellikle, alfa (8-12 Hz) ve beta (12-30 Hz) dalgaları, uyanıklık ve dikkat gibi durumlarla ilişkilendirilirken, teta (4-8 Hz) dalgaları uyku veya gevşeme durumlarında gözlemlenir. Gama dalgaları ise yüksek bilişsel işlevler ve öğrenme süreçleriyle ilişkilendirilmekte olup, bu frekans bantları beynin fonksiyonel durumu hakkında detaylı bilgi sunar. EEG, düşük maliyeti, taşınabilirliği ve invaziv olmayan yapısı sayesinde beyin aktivitesini izlemek için yaygın olarak kullanılan bir teknik olup, nörobilim, nörofizyoloji ve psikoloji alanındaki birçok çalışmada kullanılmaktadır (Erat ve Durdu, 2021).

Nörofizyolojik verilerin elde edilmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise ERP'dir (Event-Related Potentials). ERP'ler, belirli bir uyaran veya olaya karşı beynin verdiği elektriksel tepkileri milisaniye düzeyinde kaydederek, bilişsel süreçlerin zamanlaması ve dizilimi hakkında ayrıntılı bilgiler sağlar. Bu potansiyeller, tüm beyin aktivitesini içeren EEG sinyallerinden farklı olarak, yalnızca spesifik olaylara zaman kilitli beyin yanıtlarını temsil eder (Smith, 2022). Bu yanıtlar genellikle bir uyaran sunulduktan sonra ortaya çıkan dalgalanmalar şeklinde incelenir ve genlik, gecikme süresi gibi özellikleriyle bilişsel işlemlenin farklı aşamalarını yansıtır. ERP tipik olarak uyaran sunumundan sonraki ilk 100-200 ms içinde gözlenen P1, N1, P2 gibi erken bileşenler duyuşsal işlemleri yansıtırken, daha geç bileşenler olan N400 ve P300 gibi dalgalar bilişsel süreçlerin karmaşıklığını ve bellek, dil anlama gibi üst düzey işlevleri işaret eder. Örneğin, P300, uyarıyı takiben yaklaşık 300 milisaniye sonra ortaya çıkan pozitif bir tepe olarak bilinir ve özellikle seçici dikkat ve bilgi işleme mekanizmalarını incelemede popüler olarak kullanılmaktadır (Moon ve Lee, 2016; Gray vd., 2004). Aynı şekilde, 100 ms ve 400 ms'de gözlenen negatif tepkiler sırasıyla N100 ve N400 olarak isimlendirilmektedir. Bu bileşenler, belirli uyaranlara verilen beyin tepkilerinin polaritesini ve zamanlamasını gösterir.

Ayrıca Beyin Bilgisayar Arayüzü (Brain Computer Interface, BCI) sinyalleri, nörofizyolojik verilerin uygulamaya dönük bir kullanım alanını temsil etmektedir. BCI sistemleri, bireyin beyin aktivitelerini doğrudan dijital sistemlere aktararak herhangi bir kas hareketine ihtiyaç duyulmaksızın cihazların kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır. BCI sinyalleri, doğrudan beyinden gelen elektriksel aktiviteleri algılayarak, bireylerin düşünce yoluyla harici cihazları kontrol etmelerine olanak tanıyan bir teknoloji alanını temsil etmektedir. Bu sinyaller, özellikle

motor nöron hastalıkları veya ciddi felç gibi durumlar nedeniyle fiziksel hareket kabiliyetini kaybetmiş kişilerin iletişim kurmasına ve çevreleriyle etkileşimde bulunmasına yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiştir. BCI sistemleri, kullanıcının niyetini nöral aktivite kalıplarından çıkararak, protez uzuvları kontrol etmekten bilgisayar imleçlerini hareket ettirmeye kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır (Haltas ve Ergüzen, 2024). Bu sistemler invaziv (örneğin elektrokortikografi) veya non-invaziv (örneğin EEG tabanlı) yöntemlerle elde edilen sinyalleri işleyerek çalışır ve kullanıcı tarafından üretilen spesifik beyin aktivitesi paternlerini tanımayı hedefler. Bu bağlamda, P300 sinyallerine dayalı beyin-bilgisayar arayüzleri, duyu organlarından gelen beklenmedik algılamalara karşı beyinde yaklaşık 300 milisaniye sonra oluşan pozitif genlik artışını kullanarak bir arayüz mekanizması sunmaktadır (Aydemir, 2022). Diğer yandan EEG tabanlı BCI sistemleri, dikkat izleme, adaptif öğrenme ortamları ve özel gereksinimli bireyler için geliştirilen eğitim uygulamalarında giderek artan bir ilgi görmektedir.

Genel olarak nörofizyolojik veriler, bireyin bilişsel ve zihinsel durumlarını doğrudan sinirsel ölçümler üzerinden değerlendirmesi nedeniyle yüksek hassasiyet sunmaktadır. Ancak ölçüm sürecinin teknik karmaşıklığı, veri analizinin uzmanlık gerektirmesi ve etik-gizlilik boyutları nedeniyle dikkatli kullanım gerektiren bir biyometrik veri türü olarak değerlendirilmektedir. Tablo 4'te nörofizyolojik verilere ilişkin biyometrik veriler, ölçülen sinyal verileri, veri türleri ve eğitim bağlamında kullanımına yönelik özet bilgiler sunulmuştur.

Tablo 4. Nörofizyolojik Verilere Yönelik Özet Bilgiler

Ölçüt	EEG (Elektroensefalografi)	ERP (Uyaranla İlişkili Potansiyeller)	BCI (Beyin– Bilgisayar Arayüzü)
Temel Tanım	Beynin elektriksel aktivitelerinin sürekli ölçümü	Belirli bir uyaran sonrasında ortaya çıkan zaman kilitli beyin tepkileri	Beyin sinyallerinin doğrudan bir sistemi veya cihazı kontrol etmek için kullanılması
Ölçülen Sinyal	Elektriksel beyin dalgaları	Uyaran sonrası ortaya çıkan EEG bileşenleri	EEG, ERP
Veri Türü	Sürekli, zamana bağlı	Olay temelli, zaman kilitli	Sürekli veya olay temelli

Eğitim	Öğrenme süreci izleme,	Uyaran işleme, geri	Kişiselleştirilmiş
Bağlamın	zihinsel yük analizi	bildirim ve dikkat	öğrenme, özel
da		ölçümü	gereksinimli
Kullanım			bireyler

EEG ve ERP, bilişsel süreçlerin sinirsel temellerini yüksek zamansal çözünürlükle incelemeye olanak tanırken, BCI sistemleri bu sinyalleri etkileşimsel ve uygulamaya dönük bir yapıya dönüştürmektedir. Eğitim araştırmalarında EEG ve ERP daha çok analiz ve değerlendirme amacıyla kullanılırken, BCI sistemleri uyarlanabilir ve kullanıcı merkezli öğrenme ortamlarının geliştirilmesinde öne çıkmaktadır.

2.4. Fiziksel Veriler

Fizyolojik biyometriklerin son grubunu oluşturan fiziksel (yaşamsal) veriler, bireyin yaşamsal fonksiyonlarını sürdüren biyolojik sistemlerden elde edilen ölçümleri kapsamaktadır. Bu veri türleri, bireyin anatomik yapısından ziyade vücudun işlevsel durumu hakkında bilgi sunmaktadır. Bu kapsamda kalp atım hızı (HR) ve kalp atım değişkenliği (HRV), kardiyovasküler sistemin en sık kullanılan biyometrik göstergeleri arasında yer almaktadır. Bu veriler bireyin stres, dikkat ve bilişsel yük düzeyleriyle güçlü ilişkiler sergilemektedir. HRV özellikle otonom sinir sisteminin sempatik ve parasempatik dengesi hakkında bilgi sunduğu için, bilişsel ve duygusal durumların değerlendirilmesinde kritik bir ölçüt olarak kabul edilmektedir (Kalaganis vd., 2021). Elektrokardiyogram (ECG) verileri ise kalp ritmi ve elektriksel iletim örüntülerini ayrıntılı biçimde analiz etmeye olanak tanımaktadır. Kalp atım hızı HR ve kalp atım değişkenliği (HRV) klinik düzeyde ölçülebileceği gibi güncel sensör teknolojileri sayesinde akıllı saatler veya bileklikler yoluyla da ölçülebilmektedir. Klinik ortamlarda yapılan ölçümlerde, ECG ölçümleri göğüs veya ekstremitelere yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla yapılır. Akıllı saat veya bileklikler aracılığıyla yapılan ölçümlerde ise ışığın doku içindeki kan hacmi değişimlerine verilen tepkiler (PPG) değerlendirilir.

Diğer bir fiziksel veri türü deri iletkenliğidir (GSR / EDA). Ter bezlerinin aktivitesine bağlı olarak değişen elektriksel iletkenliği ölçülerek bireyin stres düzeyini yansıtan fizyolojik göstergelerden biri olarak değerlendirilmektedir (Chen vd., 2023). Deri iletkenliğini klinik ortamlarda ölçmek amacıyla el parmak uçları, avuç içi veya bileklere takılan Ag/AgCl elektrotlar kullanılır. Buna karşın gelişen sensör teknolojileri sayesinde taşınabilir bileklik tipi biyosensörler kullanan

cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlarda kuru elektrotlar kullanılarak ölçümler yapılabilir. Giyilebilir teknolojilere deri iletkenliği ölçümü özelliğinin kazandırılması sayesinde uzun süreli ve doğal ortamında ölçümler yapılmasına imkan sağlamaktadır. Literatürde GSR/EDA, özellikle diğer fizyolojik (HR, HRV) ve davranışsal verilerle birlikte kullanıldığında daha güçlü sonuçlar sunduğu belirtilmektedir. Bu nedenle güncel çalışmalarda GSR/EDA, çoklu biyometrik sistemlerin tamamlayıcı bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir (El-Raheb vd., 2022).

Kan oksijen seviyesi (SpO_2) ise dolaşım ve solunum sistemlerinin etkinliğine ilişkin bilgi sunarak, yorgunluk, bilişsel performans düşüşü ve fizyolojik zorlanma durumlarının izlenmesinde kullanılmaktadır. SpO_2 ölçümü, fotopletismografi (PPG) tekniğine dayanmaktadır. Bu yöntemde, oksijenlenmiş (HbO_2) ve oksijensiz hemoglobinin (Hb) ışığı farklı dalga boylarında farklı oranlarda soğurması prensibinden yararlanılır. Parmak Tipi ölçüm cihazları veya akıllı saat ve bileklik gibi giyilebilir cihazlar yardımıyla ölçüm yapılabilir.

Diğer bir fizyolojik biyometrik veri türü ise vücut sıcaklığıdır. Vücut sıcaklığı verisi klasik temaslı termometreler aracılığıyla ölçülebileceği gibi giyilebilir sensörler (akıllı saatler ve bileklikler) veya temassız kızılötesi sistemler ile ölçülebilmektedir. Vücut sıcaklığının tek başına bireysel ayırtediciliği olmamakla birlikte, çoklu biyometrik sistemler içerisinde tamamlayıcı bir fizyolojik gösterge olarak ele alınmakta ve bireyin stres, yorgunluk ve bilişsel durumunun değerlendirilmesinde destekleyici rol üstlenmektedir. Tablo 5'te genel olarak fiziksel veri türleri ve özelliklerine yönelik özet bilgiler sunulmuştur.

Tablo 5. Fiziksel Veri Türleri ve Özellikleri

Fiziksel Veri Türü	Ölçtüğü Temel Özellik	Biyometrik Değeri	Yaygın Kullanım Alanları	Sensör Teknolojileri
HR	Uyarılmışlık, stres	Orta	Dikkat, stres analizi	Akıllı saatler, göğüs bantları, bileklikler (PPG tabanlı)
HRV	Otonom denge	Yüksek	Bilişsel duygu	Akıllı saatler, göğüs bandı sensörleri, biyosensör platformları

ECG	Kalp ritmi örüntüsü	Yüksek	Klinik araştırma	ve Tek derivasyonlu taşınabilir ECG sensörleri, göğüs bandı sistemleri
Vücut sıcaklığı	Metabolik durum	Düşük- Orta	Destekleyici ölçüm	Akıllı saatler, cilt altı sensörler, kızılötesi (IR) temassız sistemler
GSR / EDA	Duygusal uyarılmışlık	Yüksek	Duygu, stres	Bileklik tipi EDA sensörleri, kuru elektrotlu giyilebilir cihazlar
SpO₂	Oksijenlenm e	Düşük- Orta	Yorgunluk, sağlık	Akıllı saatler, bileklikler, PPG tabanlı sensörler

Günümüzde bu fiziksel fizyolojik veriler, akıllı saatler, akıllı bileklikler ve çoklu biyosensör platformları gibi giyilebilir teknolojiler aracılığıyla sürekli, temassız ve gerçek zamanlı olarak toplanabilmektedir. Bu yönüyle söz konusu veriler, eğitim teknolojileri, öğrenme analitiği ve insan-bilgisayar etkileşimi çalışmalarında bireyin anlık fizyolojik durumunu izlemeye olanak tanıyan tamamlayıcı biyometrik veri kaynakları olarak öne çıkmaktadır.

Klinik ortamlarda kullanılan ECG ve EDA sistemleri yüksek doğruluk ve standartlaşma sağlarken; giyilebilir sensör teknolojileri, bireyin fizyolojik durumunun uzun süreli, gerçek zamanlı ve bağlamsal olarak izlenmesine olanak tanımaktadır. Literatürde özellikle HR, HRV ve GSR/EDA verilerinin birlikte kullanıldığı çoklu biyometrik yaklaşımların, stres, bilişsel yük ve duygusal durum analizlerinde daha güçlü ve güvenilir sonuçlar sunduğu vurgulanmaktadır. Bu yönüyle fiziksel fizyolojik veriler, tek başına kimlik doğrulamadan ziyade, tamamlayıcı biyometrik veri kaynakları olarak eğitim teknolojileri, öğrenme analitiği ve insan-bilgisayar etkileşimi çalışmalarında kritik bir rol üstlenmektedir. Şekil 4'te fizyolojik verilere yönelik genel bir özet bilgi grafiği sunulmuştur.

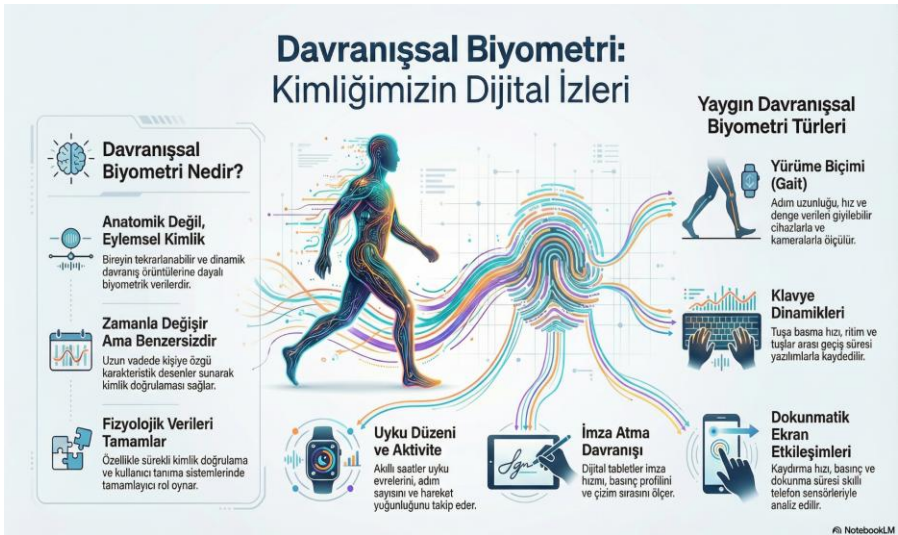
aktivite kalıpları, giyilebilir sensörler aracılığıyla elde edilen adım sayısı, hareket yoğunluğu ve uyku–aktivite döngüleri gibi veriler üzerinden bireyin davranışsal profiline ilişkin bütüncül bilgiler sunmaktadır. Bu yönüyle davranışsal biyometrik veriler, özellikle sürekli kimlik doğrulama, kullanıcı tanıma ve insan-bilgisayar etkileşimi çalışmalarında fizyolojik biyometrik verileri tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Tablo 6’da genel olarak davranışsal veri türleri ve özelliklerine yönelik özet bilgiler sunulmuştur.

Tablo 6. Davranışsal Veri Türleri ve Özellikleri

Davranışsal Özellik	Ölçüm Aracı / Teknoloji	Kullanılan Sensörler / Sistemler	Elde Edilen Veri Türleri
Yürüme biçimi (Gait)	Giyilebilir cihazlar, akıllı telefonlar, video tabanlı sistemler	İvmeölçer, jiroskop, manyetometre, kameralar	Adım uzunluğu, adım frekansı, yürüme hızı, denge, ivme örüntüleri
Uyku süresi ve uyku düzeni	Akıllı saatler, akıllı bileklikler, mobil uygulamalar	İvmeölçer, jiroskop, PPG, cilt sıcaklığı sensörleri	Toplam uyku süresi, uykuya dalma süresi, uyanma sayısı, uyku evreleri (hafif-derin), uyku düzenliliği
Klavye dinamikleri	Bilgisayar ve mobil cihazlar	Yazılım tabanlı tuş kaydı sistemleri	Tuşa basma süresi, tuşlar arası geçiş süresi, yazma ritmi
Yazı yazma (el yazısı)	Grafik tabletler, dijital kalem, dokunmatik ekranlar	Basınç sensörleri, hız ve yön sensörleri	Yazma hızı, basınç, çizim açısı, zamanlama
İmza atma davranışı	Dijital imza tabletleri	Basınç, zaman ve konum sensörleri	İmza süresi, basınç profili, çizim sırası, dinamik imza örüntüleri
Dokunmatik ekran etkileşimleri	Akıllı telefonlar, tabletler	Kapasitif dokunmatik sensörler	Dokunma süresi, basınç, kaydırma hızı, jest örüntüleri
Günlük hareket ve aktivite kalıpları	Akıllı saatler, bileklikler	İvmeölçer, jiroskop, PPG sensörleri	Adım sayısı, hareket yoğunluğu, aktivite süresi, uyku-uyanıklık döngüleri

Tablo 6’da sunulan davranışsal biyometrik veriler, bireyin motor becerileri, etkileşim alışkanlıkları ve kullanım örüntülerine dayalı olarak

elde edilmekte olup, çoğunlukla giyilebilir sensörler, mobil cihazlar ve yazılım tabanlı izleme sistemleri aracılığıyla ölçülmektedir. Bu veriler, tekil bir ölçümden ziyade zaman içinde biriken örüntüler üzerinden değerlendirildiğinden, davranışsal biyometriklerin ayırt ediciliği uzun vadeli ölçümlerde ortaya çıkmaktadır. Literatürde özellikle gait analizi, klavye dinamikleri ve dokunmatik ekran etkileşimlerinin, sürekli kimlik doğrulama ve kullanıcı tanıma sistemlerinde fizyolojik biyometrik verileri tamamlayıcı nitelikte güçlü göstergeler sunduğu vurgulanmaktadır (Monrose ve Rubin, 2000; Yampolskiy ve Govindaraju, 2008; Jain vd., 2004). Uyku süresi ve uyku düzeni; bireyin günlük davranış alışkanlıkları ve yaşam tarzına bağlı olarak şekillenmekte ve zaman içinde bireye özgü örüntüler oluşturmaktadır. Bu nedenle literatürde uykuya ilişkin veriler, fizyolojik ölçümlerle elde edilse bile davranışsal biyometrik veri kapsamında değerlendirilmektedir. Özellikle giyilebilir sensörler aracılığıyla uzun süreli olarak toplanan uyku verilerinin, bireysel tanımlama, kullanıcı profilleme ve yaşam tarzı analizi çalışmalarında ayırt edici özellikler sunduğu belirtilmektedir (Depner vd., 2020). Şekil 5'te davranışsal verilere yönelik genel bir özet bilgi grafiği sunulmuştur.



Şekil 5. Davranışsal Verilere Genel Bakış

Sonuç olarak, biyometrik sistemler ve cihazlar, yalnızca güvenlik ve kimlik doğrulama uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp, eğitim teknolojileri, öğrenme analitiği ve insan-bilgisayar etkileşimi gibi

alanlarda bireyin bilişsel, fizyolojik ve davranışsal durumlarının nesnel olarak izlenmesine olanak tanıyan güçlü araçlar haline gelmiştir. Özellikle giyilebilir sensörler ve mobil teknolojiler sayesinde biyometrik verilerin sürekli, temassız ve gerçek yaşam koşullarında toplanabilmesi, bu sistemlerin gerçek dünya koşulları için geçerliliğini artırmıştır. Fizyolojik biyometrikler bireyin bedensel durumuna ilişkin anlık göstergeler sunarken, davranışsal biyometrikler zaman içinde biriken örüntüler aracılığıyla bireye özgü karakteristik profillerin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

Kaynaklar

- Aydemir, Ö. (2022). Beyin Bilgisayar Arayüzü ve Geleceği. *DergiPark (Istanbul University)*.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/jiet/issue/74646/1212389>
- Bostaji, G. T., ve Jaha, E. S. (2023). Fine-Grained Soft Ear Biometrics for Augmenting Human Recognition. *Computer Systems Science and Engineering*, 47(2), 1571.
<https://doi.org/10.32604/csse.2023.039701>
- Chen, K., Han, J., Baldauf, H., Wang, Z., Chen, D., Kato, A., ... ve Kunze, K. (2023, March). Affective Umbrella—A Wearable System to Visualize Heart and Electrodermal Activity, towards Emotion Regulation through Somaesthetic Appreciation. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023* (pp. 231-242).
- Çiçek, M. (2024). Türkiye’de Biyometrik Veri Güvenliği: Kişisel Verilerin Korunması Kanunu Çerçevesinde Etik Bir Değerlendirme. *Kişisel Verileri Koruma Dergisi*, 6(2), 54-76.
- Demir, A. D., Bekiryazıcı, Ş., Coşkun, O., Eken, R., ve Yılmaz, G. (2022). Detection and analysis of driver fatigue stages with EEG signals. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 28(5), 643.
<https://doi.org/10.5505/pajes.2022.89327>
- Depner, C. M., Cheng, P. C., Devine, J. K., Khosla, S., De Zambotti, M., Robillard, R., ... ve Drummond, S. P. (2020). Wearable technologies for developing sleep and circadian biomarkers: a summary of workshop discussions. *sleep*, 43(2), zsz254.
- El-Raheb, K., Kalampratsidou, V., Issari, P., Georgaca, E., Koliouli, F., Karydi, E., ... ve Ioannidis, Y. (2022). Wearables in sociodrama: An embodied mixed-methods study of expressiveness in social interactions. *Wearable technologies*, 3, e10.
- Erat, K., ve Durdu, P. O. (2021). User experience evaluation of low cost EEG headsets. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(5), 646. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.78910>
- European Union. (2016). Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and

- on the free movement of such data (General Data Protection Regulation). *Official Journal of the European Union*, L119, 1–88.
- Gonzalez, E., Alvarez, L. ve Mazorra, L.: Ami ear database (2012). http://ctim.ulpgc.es/research_works/ami_ear_database/
- Gray, H. M., Ambady, N., Lowenthal, W. T., ve Deldin, P. (2004). P300 as an index of attention to self-relevant stimuli. *Journal of experimental social psychology*, 40(2), 216-224.
- Güler, E. G., ve Erdoğan, E. Ç. (2024). Destination Marketing within the Framework of Neuromarketing: Eye–Tracking Method. *DergiPark (Istanbul University)*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bauniibfd/issue/85398/1487775>
- Haltas, K., ve Ergüzen, A. (2024). Enhancing Speech Impairment Support: Designing an EEG-Based BCI System for Turkish Vowel Recognition. *Traitement Du Signal*, 41(3), 1205. <https://doi.org/10.18280/ts.410310>
- Hickey, B. A., Chalmers, T., Newton, P., Lin, C. T., Sibbritt, D., McLachlan, C. S., ... ve Lal, S. (2021). Smart devices and wearable technologies to detect and monitor mental health conditions and stress: A systematic review. *Sensors*, 21(10), 3461.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., ve Van de Weijer, J. (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Jain, A. K., Ross, A., ve Prabhakar, S. (2004). An introduction to biometric recognition. *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, 14(1), 4-20.
- Koçak, G. (2020). Beyin Araştırmalarının Eğitime Yansımaları: Geleceğin Eğitimi Üzerine. *DergiPark (Istanbul University)*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/edu7/issue/59006/731860>
- Orban, M., Elsamanty, M., Guo, K., Zhang, S., ve Yang, H. (2022). A review of brain activity and EEG-based brain–computer interfaces for rehabilitation application. *Bioengineering*, 9(12), 768.
- Ömür, S., ve AYDOĞDU, A. G. (2017). Eye tracking researches and new trends in the field of communication. *International Journal of Social*

- Sciences and Education Research*, 3(4), 1296.
<https://doi.org/10.24289/ijsser.321815>
- Özer Deniz, M. ve Özer, M.T. (2022). Biyometrik Verilerin İşlenmesinin Yargı Kararları Işığında Değerlendirilmesi. *ÇÜHAD*, (1), 92-110
- Schalk, G., ve Leuthardt, E. C. (2011). Brain-computer interfaces using electrocorticographic signals. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 4, 140-154.
- Smith, H. P. (2022). Assessing Mild Cognitive Impairment Using Portable Electroencephalography: The P300 Component. *The Arbutus Review*, 13(1). <https://doi.org/10.18357/tar131202220753>
- Spezialetti, M., Cinque, L., Tavares, J. M. R., ve Placidi, G. (2018). Towards EEG-based BCI driven by emotions for addressing BCI-Illiteracy: a meta-analytic review. *Behaviour & Information Technology*, 37(8), 855-871.
- Stragapede, G., Vera-Rodriguez, R., Tolosana, R., ve Morales, A. (2023). BehavePassDB: public database for mobile behavioral biometrics and benchmark evaluation. *Pattern Recognition*, 134, 109089.
- Tekeli, P., Kumova Metin, S., ve Altun, A. (2022). Bilgisayar Destekli Duyuşsal Öneri Sisteminin Otantik Görevler Ve Göz İzleme Yöntemiyle Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi. *Eğitim Teknolojisi Kuram ve Uygulama*, 12(2), 282-307.
<https://doi.org/10.17943/etku.969464>
- Volpes, G., Valenti, S., Genova, G., Barà, C., Parisi, A., Faes, L., ... ve Pernice, R. (2024). Wearable ring-shaped biomedical device for physiological monitoring through finger-based acquisition of electrocardiographic, photoplethysmographic, and galvanic skin response signals: Design and preliminary measurements. *Biosensors*, 14(4), 205.
- Yalçın, N., ve Gürbüz, F. (2015). Biyometrik Güvenlik Sistemlerinin İncelenmesi. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 3(2), 398-413.
- Yampolskiy, R. V., ve Govindaraju, V. (2008). Behavioural biometrics: a survey and classification. *International Journal of Biometrics*, 1(1), 81-113.

EĞİTİM ORTAMLARINDA BİYOMETRİK VERİLERİN KULLANIMI

Suheda MUMCU²

Biyometri (biyoistatistik) organizmayı ilgilendiren biyolojik özelliklerin istatistiksel yöntemlerle anlatılmasını sağlayan bir bilim dalıdır (Türk Dil Kurumu [TDK], 2025). Biyometri sağlık bilimleri alanında verilerin toplanması, işlenmesi, topluma ilişkin kararların alınması için özgün yöntemleri içermektedir (TDK, 2025). Biyometrik veri ise kişilerin kim olduğunu kolaylıkla ayırt etmeye imkan tanıyan özel nitelikli kişisel veriler olarak ele alınmaktadır (Kişisel Verileri Koruma Kurumu [KVKK], 2025a). Biyometrik verilerin neler olduğuna ilişkin en kapsamlı tanımlama “Genel Veri Koruma Tüzüğü” ile Avrupa Parlamentosu tarafından 14 Nisan 2016 tarihinde onaylanan belgede açıklanmıştır (KVKK, 2025a). Bu tanıma göre biyometrik veri kişinin fizyolojik ya da davranışsal özellikleri gibi kişisel verilerini içeren bilgilerden oluşmaktadır (General Data Protection Regulation [GDPR], 2016). Fizyolojik biyometrik veriler arasında parmak izi, retina, avuç içi, yüz, iris gibi özellikler yer alırken; davranışsal biyometrik veriler ise yürüyüş şekli, klavyede tuş basma biçimi, fare kullanım alışkanlıkları, araç sürüş tarzı gibi davranışsal göstergelerden oluşmaktadır. Diğer bir deyişle fizyolojik biyometrik veriler, genellikle bireyin vücudunda sabit kalan ve değişmeyen parmak izi gibi fiziksel özellikleri temsil ederken; davranışsal biyometrik veriler bireylerin günlük yaşamlarında sergiledikleri ekran kaydırma hareketleri gibi değişken tavırları yansıtmaktadır (GDPR, 2016; KVKK, 2025a; 2025b). Öte yandan bir bireye ait kişisel verilerin biyometrik veri olarak değerlendirilebilmesi için ayırt edici özelliklerin veri işleme yollarıyla elde edilmesi gerekmektedir (KVKK, 2025b). Çeşitli yollarla elde edilen bu veriler aynı zamanda kişinin kimliğini tanımlayabilecek ve ayırt edebilecek bir niteliğe sahip ise ancak o zaman biyometrik veri olarak değerlendirilmektedir (KVKK, 2025b). Bu açıdan bakıldığında kişinin kendi kontrolü dışında elde edilen biyometrik verilerin rastgele verilerden oluşmadığı ve herhangi bir konuda muhtemelen kişinin

²Dr. Öğr. Üyesi Suheda MUMCU
Trabzon Üniversitesi, Çarşıbaşı Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü,
Trabzon, TÜRKİYE
ORCID:0000-0001-6691-3054, suhedamumcu@trabzon.edu.tr

kendi beyanına göre daha nesnel bilgiler sunarak kişiyi tanımlamaya imkan verdiği söylenebilir.

Özel nitelikli kişisel bilgiler içermesi bakımından kimlik doğrulama, takip ve izleme, anlık durum tespiti vb. amaçlarla, eğitimden sağlığa, ulaşımdan ticarete gündelik yaşamın birçok alanında biyometrik veriler kullanılabilir. Bu bölümde ise temel olarak biyometrik verilerin eğitim süreçlerindeki kullanım alanlarına ve etkilerine değinilecektir. Eğitim süreçlerinde kullanabilmek üzere biyometrik verilerin nasıl elde edilebileceği, elde edilen verilerle hangi tespitlerin yapılabileceği ve biyometrik veriler ışığında eğitime dair gelecekte bizi nelerin beklediği şeklindeki ana temaların çerçevesinde ilgili konular bu bölümdeki ilerleyen başlıklarda sunulmuştur.

1. Biyometrik Verilerin Elde Edilmesinde Nesnelerin İnternetinin (IoT) Rolü

Biyometrik veriler sundukları bilgiler sayesinde merkezinde insanın olduğu neredeyse tüm araştırma alanlarında kendine bir yer bulabilmektedir. Sağlıktan eğitime, ulaşımdan sanayiye çokça alanda kullanılan ve farklı veri türlerinden oluşan biyometrik verilerin elde edilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Biyometrik verilerin elde edilmesinde yaygın kullanılan araçlar, sağladıkları bilgiler ve eğitimdeki örnek uygulamaları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Biyometrik Verilerin Karşılaştırılması

Elde Edilme Yöntemi	Biyometrik Veri/Sinyal	Açıklama	Araçlar	Eğitimdeki örnek uygulamalar
İnsan Bilgisayar Etkileşimi	Klavye Vuruş Dinamikleri (Keystroke Dynamics)	Kullanıcının klavyede tuşlara vuruş ritminin, tuşlara basma, serbest bırakma, basılı tutma ve tuşlar arasındaki gecikme sürelerinin analizi.	Klavye	Çevrimiçi öğrenme ortamlarında (LMS) öğrenci kimliğinin belirlenmesi, ödevlerde sahteciliğin önlenmesi ve öğretimin değerlendirilmesi.
	Fare Dinamikleri (Mouse Dynamics)	Kullanıcının fare hareketleri (hız, açısall hareket), ivmesi, tıklama ve sürüklenme kalıpları ile fare imlecinin konumu/göz pozisyonu	Fare	

		arasındaki ilişkilerin analizi.		
	Yazı Stili (Stylometry)	Kullanıcının yazılı metinler oluştururken kullandığı dilsel özelliklerin ve üslubun analizi.	Yazılı içerik girişi sağlayan sistemler (LMS/Bilgisayar)	
	Yüz Tanıma ve Kimlik Doğrulama	Video ve görüntü işleme algoritmaları ile mikro-ifade analizi, bakış yönü/göz takibi gibi yollarla öğrencinin kimliğini doğrulamak veya sahtekarlığı önlemek için yüz hatlarının analizi.	Yüksek çözünürlüklü kameralar, derinlik sensörleri	Öğrenci kimliğinin doğrulanması ve içerikle etkileşimle olduğu öğrenme süreçlerinde öğrencinin anlık durum takibinin yapılması.
Bilgisayarlı Görme Sistemleri	İris- Retina Tarama	Kişinin gözlerine ait karmaşık biyometrik yapısının ve retina kan damarlarındaki benzersiz desenlerinin analizi.	İris/Retina tarayıcıları, yüksek çözünürlüklü kamera sensörleri	
	Kafa Hareketleri ve Göz Pozisyonu	Kişinin göz hareketlerinin (göz kırpma sıklığı, bakış süresi, odak noktası) ve kafasının duruş pozunun/hareketlerinin analizi.	Özel göz takip sensörleri, web kameraları, ivmeölçer/jirosk op içeren akıllı saatler/telefonlar, 3-eksenli kafa ivmeölçeri, kinect gibi derinlik sensörleri.	
Biyosensörler	Kardiyak Aktivite (HR, HRV, PPG/BVP)	Kalp atış hızı (HR), kalp atış hızı değişkenliği (HRV), kan hacmi nabızı (BVP/PPG) ölçümü vb. gibi kalbin elektriksel aktivitelerin ölçülmesi.	Akıllı saatler/bileklikler/yüzükler, EKG sensörleri	Öğrencilerin algı, dikkat, stres, katılım, duygusal durum, uyku kalitesi gibi öğrenme üzerinde etkisi olabilecek biyometrik
	Elektrodermal Aktivite (EDA)/	Deri iletkenliğindeki değişiklikler aracılığıyla duygusal uyarılma ve	Galvanik Sensör Tepkisi (GSR) üniteleri, Empatica E4/E3	

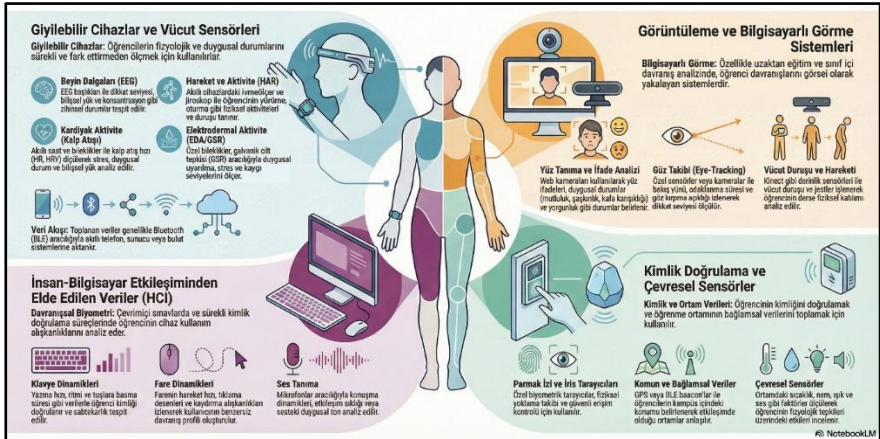
Galvanik Cilt Tepkisi (GSR)	stres seviyelerinin ölçülmesi.	gibi bileklikler veya özel sensörler	verilerini kullanarak öğrenme sürecinin kalitesinin iyileştirilmesi. Öğrenciye özgü kişiselleştirilebilir ve duruma özgü uyarlanabilir eğitim ortamlarının tasarlanması.
Beyin Dalgaları (EEG)	Elektroensefalografi (EEG) olarak bilinen beyin dalgalarının elektriksel aktivitesinin kaydedilmesi ile bilişsel yük, dikkat, odaklanma ve konsantrasyon seviyesinin ölçülmesi.	EEG başlıkları/bantları	
Parmak izi	Optik/katı hal sensörlerine sahip özel biyometrik tarayıcılar aracılığıyla parmak izinin ölçülmesi.	Parmak izi tarayıcıları	
Manyetoensefalografi (MEG)	Beyinde oluşan manyetik alanların ölçümü	Magnetometers (Manyetometreler)	
Diğer fizyolojik sinyaller	Deri sıcaklığı, kan basıncı (BP), oksijen doygunluğu (SpO2), kas aktivitesi (EMG) vb.	Akıllı bileklikler, Empatica E4, akıllı telefon sensörleri, özel EMG sensörleri vb.	

Tablo 1 incelendiğinde örneğin; Elektroensefalografi (EEG) ve Manyetoensefalografi (MEG) gibi beyin sinyallerini elde edebilmek için bir laboratuvar ortamı gerekmektedir. Medikal cihazlar biyometrik veri açısından laboratuvar ortamlarında kontrollü ve yüksek doğrulukta ölçümler sağlamaktadır. Ancak bu cihazların yüksek maliyetlerinin ve laboratuvar gereksinimlerinin olması eğitim ortamlarında doğal akışta kullanılmasına engel olmaktadır (Hernández-Mustieles vd., 2024). Diğer bir deyişle bilimsel araştırmalar için daha sağlıklı veri sunsa da gündelik yaşamda biyometrik verilerinin analizi yapılmak istenen tüm bireylerin tek tek laboratuvar ortamlarında test edilmesi senaryosu eğitim ortamları için uygulanabilir ve gerçekçi değildir. Bu nedenle eğitim ortamlarında biyometrik verileri kullanabilme noktasında laboratuvar ortamları kadar yüksek doğrulukta veri sunmasa da insan yaşamına daha kolay adapte edilebilen giyilebilir cihazlar gibi teknolojiler ön plana çıkmaktadır. Özellikle giyilebilir cihazların ucuzlaşması ve yaygınlaşması bu noktada sınıf ortamlarında öğrenme süreçlerini anlamlandırabilmek için eğitimcilere ve araştırmacılara çeşitli araçlar sunmaktadır. Eğitim

ortamlarındaki öğrenme sürecinin iyileştirilmesinde biyometrik verilerin kullanılabilmesi amacıyla maliyeti, uygulanabilirliği ve internet ağına bağlantı sağlayabilmesi açısından giyilebilir sensörler içeren teknolojiler önemli kaynaklardır. Bu teknolojilerin günümüzde daha erişilebilir bir hale gelmesi eğitim süreçlerinde öğrenenin mevcut durumunun takip edilebilmesine olanak sağlayacak sınıf içi uygulamaların yanı sıra, biyometrik verilerin öğrenme sürecinin iyileştirilmesi noktasında kullanılmasını da güncel bir araştırma alanı haline getirmektedir (Hernández-Mustieles vd., 2024).

Eğitim ortamlarında rahat kullanım sunan giyilebilir sensörler aracılığıyla biyometrik veriler elde edildikten sonra, toplanan bu verilerin kaydedilmesi ve işlenmesi için çok yönlü etkileşime imkan tanıyacak kapsamlı bir ekosisteme ihtiyaç vardır. Gündelik yaşamdaki nesneler ile sistemleri ve makineleri iletişime geçirebildiği için “Nesnelerin İnterneti (IoT)” uygulamaları bu ihtiyacı giderme noktasında dikkat çekicidir. Özellikle ekonomik ve ulaşılabilir bir seçenek olarak IoT uygulamaları eğitim ortamlarında biyometrik veriye dayalı araştırmalarda sıklıkla ön plana çıkmaktadır (Badshah vd., 2023; Meini vd., 2025). IoT en genel tanımıyla çok sayıda cihazın internete bağlanması ile oluşturulan bir ağ yapısını ifade eder (Ocak ve Efe, 2021). IoT tarafından sağlanan teknolojik altyapı, mevcut verilerin toplanmasını, aktarılmasını ve analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır. IoT sıradan nesneleri buluttaki diğer nesneler ve uygulamalara bağlayabildiğinden, IoT uygulamaları sayesinde nesneler daha zeki ve etkileşimli hale getirilebilmektedir. Farklı türdeki nesnelerin internet üzerinden birbirleriyle iletişime geçebilmesini sağlayan IoT uygulamaları güvenlik, sağlık, ulaşım, eğitim ve gündelik yaşam gibi pek çok alanda farklı amaçlarla kullanılmaktadır (Badshah vd., 2023; Li vd., 2024). Her ne kadar farklı ortamlar ve amaçlar için kullanılsa da aslında IoT teknolojilerinin genel kapsamını; nesneler (*sensörler, kontrolörler, aktüatörler*), ağ bağlantıları (*Wi-Fi, 4G/5G, Bluetooth, Zigbee, NFC, LoraWan*), mikroişlemciler, insan ve veri bileşenleri oluşturmaktadır. Çalışma mantığı bakımından fiziksel sensörler aracılığıyla bağlantı kurulabilecek tüm nesnelerin internete erişmesini sağlayabilen IoT uygulamalarının eğitimde hem insana dair biyometrik veri temelli araştırmalarda hemde akıllı kampüs temalı eğitimin fiziksel çevresine dair verilere odaklanan araştırmalarda kullanımı yaygındır. Özellikle eğitimcilerin ve akademisyenlerin bu alana yönelmesiyle IoT temelli akıllı sınıflar oluşturma araştırmaları ve yöntemleri hız kazanmıştır.

IoT uygulamalarının alt bileşenleri sayesinde eğitimin fiziksel ortamlarında enerji tüketimi ve yerleşke genelindeki sistemlerin işleyişleri (yangın tespiti, elektrik kaçağı bildirimleri ve arıza takibi vb.) kolaylıkla takip edilebilir, hatta sensör verilerine dayalı programlanarak tüm bu süreçlerin duruma göre optimizasyonu otomatikleştirilebilir. Örneğin, biyometrik sensörlerden elde edilen bilgiler ışığında öğrencilerin fiziksel olarak bulunmadıkları mekanlarda gereksiz kullanımların önüne geçilerek enerji tasarrufu sağlanabilir. Yükseköğretimde IoT ve biyometrik verilerin birlikte kullanılmasıyla özellikle kimlik doğrulama, anlık öğrenci takibi, kampüste enerji tasarrufu gibi uygulamaları yapılabilmektedir (Adegbenjo, 2023). IoT alt yapısının Şekil 1’de gösterilen alanlarda biyometrik verilerle birlikte kullanılması sonucu eğitim ortamlarında Tablo 1 ile özetlenen verilere dair uygulamalar çeşitlendirilebilir. Öte yandan kullanışlılığına karşın, insana dair ayırt edici bilgiler kendi kontrolü dışında araçlarla elde edildiğinden ve çokça ağ bağlantısından oluşturduğundan IoT uygulamalarında daima gizlilik ve güvenlik riskleri bulunmaktadır (Kalantari vd., 2018; Sun vd.,2025).



Şekil 1. IoT ile Birlikte Biyometrik Verilerin Kullanım Alanları

Şekil 1 incelendiğinde eğitim ortamlarında akıllı kampüsler ve uyarlanabilir öğrenme süreçleri gibi alanlarda kullanılacak biyometrik veri temelli tasarımların IoT teknolojisinden bağımsız düşünülemeyeceği söylenebilir. Çünkü IoT sadece insanlar ve eğitim odağında değil fiziksel mekanlara dair bilgilerin toplanmasında da geniş uygulama alanlarına sahiptir. Buradan hareketle IoT teknolojisinin sağladığı bağlantı mekanizmaları insanlardan gelen biyometrik verileri iletmek ve işlemek için işe koşulursa eğitim ortamlarında insana dair anlık durum tespitleri

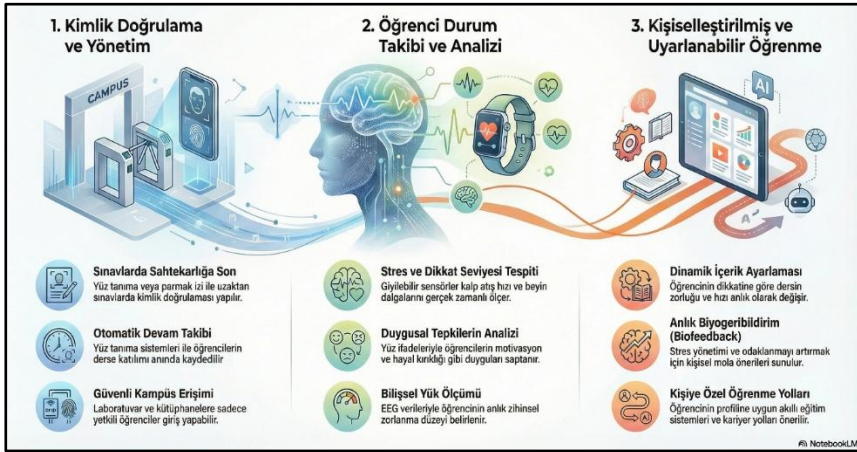
kolayca yapılabilir, bu tespitlere dayalı fiziksel çevreye yönelik aksiyonlar da rahatlıkla alınabilir.

2. Eğitim Ortamlarında Biyometrik Verilerin Kullanım Alanları

Eğitim, odağını öğrenci ve öğretmenin oluşturduğu ancak bilişsel, duyuşsal ve çevresel değişkenlerden de etkilenen çok boyutlu ve dinamik bir süreçtir. Eğitim ortamları ise öğrencinin öğrenme süreçlerini deneyimlediği alanlar olarak ifade edilebilir. Öğrenciler kendi öğrenme süreçlerine bedensel ve zihinsel açılarından bir bütün olarak dahil olurlar ve doğal olarak kendi öğrenme deneyimlerinde eğitim ortamıyla pek çok açıdan etkileşime girerler. Araştırmalar öğrenmenin sadece bilişsel bir süreç olmadığını, hatta öğrenenin duygusal ve fizyolojik durumlarının da bu süreci oldukça etkilediğinin altını çizmektedir (K Kasap ve Kurt, 2025). Buradan hareketle bir eğitim sürecinin başarıyla sürdürülmesinde öğrencilerin öğrenmeye ne kadar hazır olduklarının belirlenmesi ve öğrencinin durumuna göre anlık aksiyon alabilen öğretmenlerin varlığı oldukça önemlidir. Geleneksel sınıf ortamlarında öğrenene özgü durumlar eğitimci tarafından genellikle önceki deneyimlere dayalı kişisel yargılar yoluyla tespit edilmeye çalışılmaktadır. Günümüzde ise farklı teknolojilerin sağladığı araçlarla, öğrenene özgü ve anlık değişebilen bu durumlara yönelik doğrudan elde edilebilen verilerle daha nesnel ölçümlere dayalı bir şekilde tespitler yapılabilir. Bu noktada çeşitli yollarla elde edilebilen biyometrik verilerin kişinin fizyolojik ve psikolojik durumuyla ilgili bilgiler sunduğu göz önünde bulundurulursa, öğrenenlerin biyometrik verileri kullanılarak tespit edilecek anlık durumlarının öğrenme sürecini yönetmek adına kullanılması mümkündür. Biyometrik verilere dayalı analizler yapan araştırmalar, bu verileri almaya imkan tanıyan teknolojilerin öğrencileri izleme noktasında önemli katkılar sunduğunu ifade etmektedir. (Hernández-Mustieles vd., 2024; Sajja vd., 2025). İnsanların ve teknolojinin birlikte oluşturduğu bu yeni ekosistem içerisinde özellikle sensörlerden elde edilecek biyometrik verilerin içereceği bilgiler kişisel yanlılığa mahal vermeden eğitimi yönlendirmeye imkan sağlamaktadır. Öğrenmenin gerçekleşebilmesi adına öğrencilerin öğrenme sürecine hazırbulunuşluğunun veya öğrenme esnasındaki durumunun tarafsız bir şekilde belirlenebilmesi oldukça önemlidir. Çünkü öğrencilerin algı, dikkat, motivasyon gibi değişken ve öznel durumları dolayısıyla akademik başarıları doğrudan etkilenecektir (Hernández-Mustieles vd.,

2024; K Kasap ve Kurt, 2025). Bu nedenle öğretmene ek bir yük getirmeden öğrencilerin biyometrik verileri kullanılarak algı, dikkat ve motivasyon gibi durumları anlık olarak tespit etmek, eğitim ortamlarında ihtiyaca yönelik uyarlamalar yapabilmek için etkili bir yoldur.

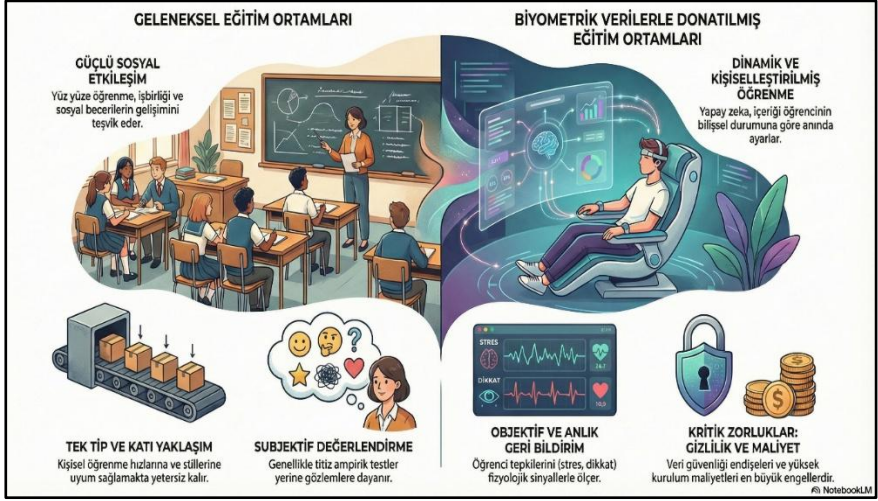
Eğitim ortamlarında biyometrik veriler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; kimlik doğrulama (Rukhiran vd., 2023; Subash vd., 2025), otomatik yoklama alma (Hoo ve Ibrahim, 2019), öğrencinin anlık algı, dikkat, stres gibi durumlarının takibi (Ciolacu vd., 2020; Hernandez-Ortega vd., 2019; Otaboyeva vd., 2025) duyguları tanıma (Hernandez-de-Menendez vd., 2021; Otaboyeva vd., 2025), odaklanma ve katılım durumlarının tespiti (Hernandez-de-Menendez vd., 2021), öğrenmenin kişiselleştirilmesi ve uyarlanabilmesi (Meini vd., 2025; Mukul ve Büyüközkan, 2023) gibi amaçlarla biyometrik verilerin kullanıldığı görülmektedir. Eğitimdeki kullanım alanlarına bakıldığında biyometrik verilerin geleneksel eğitim ortamlarındaki bazı süreçleri değiştirdiğini söylemek mümkündür. Eğitim ortamlarındaki biyometrik verilerin kullanım alanları en genel tanımıyla; kimlik doğrulama ve yönetim, öğrencinin anlık durum analizi ve takibi, kişiselleştirilmiş öğrenmenin tasarlanması şeklinde özetlenebilir (Şekil 2).



Şekil 2. Eğitim Ortamlarında Biyometrik Verilerin Kullanım Alanları

Şekil 2 ile özetlenen eğitime dair alanlarda biyometrik verilerin çeşitli amaçlarla kullanımı geleneksel sınıf ortamlarında insan kontrolünde yürütülen bir çok sürecin veriye dayalı otomatikleştirilmesini sağlayacak ve ilgili süreçlerin yönetimini kolaylaştıracaktır. Örneğin, yükseköğretimde yoklama alma süreçleri hem zaman alıcıdır hem de

sahteciliğe fırsat verebilen klasik imza alma yöntemine dayanmaktadır. Klasik devam yoklaması yerine yüz tanıma ve parmak izi gibi biyometrik verileri kullanan sistemler sayesinde devam takibi otomatikleştirilebilir. Böylelikle hem zaman tasarrufu sağlanır hemde yoklama alma sürecine ayrılan insan eforu en aza indirilmiş olur. Biyometrik verilerle otomatik yoklama alabilen bu çalışmalarda elde edilen verilerin iletiminde ise Wi-Fi, GSM, ZigBee, Wireless gibi IoT bağlantı protokolleri tercih edilmektedir. Benzer şekilde bir sınıf ortamında öğretmenin sınıftaki tüm öğrenciler her saniye tek tek analiz edebilmesi pek mümkün değildir. Buna karşın kamera takip sistemleri ile öğrencilerin anlık derse katılım durumları her saniye otomatik olarak analiz edilebilir ve elde edilen bu verilere dayalı bildirimler yine anlık olarak öğretmene gönderilebilir. Eğitimci için kontrolü zor olan bir diğer süreç ise ders anlatımları esnasında öğrenme üzerinde önemli bir değişken olan stresi birey ve sınıf bazında yönetebilmektir. İnsan eliyle yönetimi zor olan bu değişkeni yordamaya yönelik sensörlere sahip çeşitli araçlarla (akıllı bileklik, saat, yüzük vb.) donatılan bir sınıf ortamında öğrencilerin anlık kalp atış hızı, stres durumu gibi biyometrik verileri alınarak bir müdahale gerekmesi durumunda aksiyon alması için öğretmene geri bildirim gönderilebilir. Bu açıdan bakıldığında IoT tabanlı sistemlerle öğrenci farkında olmadan izlenir ve izlemeye dayalı yapılacak doğru müdahalelerle öğrencilerin aktif öğrenme süreci desteklenir (Hernandez-de-Menendez vd., 2021). Eğitim ortamlarında biyometrik verilerin kullanımına dair ele alınan bu örneklerde olduğu gibi, öğrenme süreçlerinin iyileştirilmesinden, kişiselleştirilmiş öğrenme alanları oluşturmaya, sınıf yönetiminden devamsızlık takibine kadar bir çok alanda biyometrik veriye dayanan teknolojiler klasik yöntemlere kıyasla çeşitli avantajlar sağlamaktadır (Şekil 3). Biyometrik verilerin eğitim ortamlarında sunduğu bu avantajlar, geleneksel yüz yüze öğrenmenin sosyal etkileşim ve iş birliği gibi insan odaklı güçlü yönlerini teknolojiyle destekleyerek yenilikçi öğrenme deneyimlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.



Şekil 3. Geleneksel ve Biyometrik Verilerle Desteklenmiş Eğitim Ortamlarının Karşılaştırılması

Öte yandan öğrenci başarısını bütüncül bir yaklaşımla desteklemek için öğrenme süreçlerinin gerçekleşeceği fiziksel çevrenin unsurlarını da dikkate almak gerekir. Eğitim ortamlarını içerdiği çevresel bileşenleri açısından fiziksel olarak ele aldığımızda ise biyometrik veri sağlayacak sensörler farklı amaçlarla işe koşulabilir. Bu amaçla çeşitli fiziksel düzenlemeler ve sensör entegrasyonları ile elde edilecek biyometrik veriler; kampüsün genel güvenliği, enerji tasarrufu, yerleşke genelindeki işleyişin takip edilmesi gibi tesisin idari yönetiminde kullanılabilir. Yönetim süreçlerinin bu yollarla otomatikleştirildiği eğitim ortamlarında aydınlatma, ısıtma ve havalandırma gibi sistemler anlık verilere dayalı bir şekilde dinamik olarak insan müdahalesi olmadan ayarlanabilir (Adegbenjo, 2023; Badshah vd., 2023; Kumar vd., 2024). Örneğin, öğrencilerin fiziksel alanlara girişinin biyometrik verilerle takip edildiği bir eğitim ortamında öğrencilerin sayıca fazlaca bulunduğu konumlarda iklimlendirme ve aydınlatma gibi sistemler aktifleştirilebilir, öğrencilerin fiziksel olarak bulunmadığı mekanlarda ise çevresel koşullar minimum enerji harcayacak hale getirilebilir veya sistemler tamamen kapatılabilir, böylelikle biyometrik verilerin desteğiyle eğitim ortamlarında otomatik bir şekilde enerji verimliliğine katkı sağlanacaktır.

Tablo 1’ de özetlenen biyometrik veri türlerinin önemli bir kısmının günümüzde yaygın kullanıma sahip giyilebilir cihazlara entegre biyosensörlerle elde edilebilmesi ve IoT altyapısı ile bu verilerin bulut ortamlarına aktararak işlenebilmesi gibi gelişmeler eğitim teknolojileri

alanında biyometrik veriye dayalı uygulamaların yaygınlaşmasına neden olmuştur (Ciolacu vd., 2020; Sano vd., 2015). Bu eğilimin temel nedenlerinden biri, bir görev esnasında duygusal durumları ve katılım düzeylerini izlemede kullanılabilecek giyilebilir cihazların göze çarpmadan çalışacak şekilde tasarlanması sayesinde uyarlanabilir öğrenme müdahalelerini kolaylaştıran biyometrik ve bağlamsal verileri sürekli olarak toplayabilmeleridir (Hong vd., 2025). Özellikle giyilebilir cihazların ucuzlaşması ve günümüzde daha çok kullanıcı tarafından tercih edilmesi sınıf ortamlarında öğrenme süreçlerini anlamlandırabilmek için eğitimcilere ve araştırmacılara çeşitli araçlar sunmaktadır (Glasserman-Morales vd., 2023). Bir başka deyişle IoT teknolojisinin sağladığı esneklik, biyometrik verilere dayalı araştırmaları deneylere özel geliştirilen laboratuvar ortamlarından çıkarak gündelik yaşamda eğitim, sağlık vb. alanlarda rahatlıkla kullanabilmeyi mümkün hale getirmiştir. Örneğin, normalde laboratuvar ortamında izlenen EEG verileri öğrenme, dikkat, çalışma belleği ve zihinsel yorgunlukla ilgili nörofizyolojik aktiviteyi ölçmek için kullanılmaktadır (Meini vd., 2025). IoT altyapısı ise bu aktiviteleri ölçmek için giyilebilir bir EEG tasarımı geliştirmeye imkan verir, hatta akademik performansı tahmin etmek için öğrencilerin okul günleri boyunca elektrodermal sensörleri içeren EEG özellikli şapka takmasını zorunlu kılan okullar bulunmaktadır (Zhang vd., 2018).

Tüm bunlara ek olarak eğitim ortamlarında sadece akademik başarı veya eğitim süreçlerine yönelik olumlu durumları desteklemek için değil anormallikleri tespit edebilmek için de biyometrik veriler kullanılmaktadır. Örneğin, eğitim ortamlarında biometrik veriye dayalı devamsızlık takibi araştırmalarında özellikle parmak izi ve yüz gibi bilgilerin IoT ile işlenmesi sıklıkla kullanılmaktadır. Parmak izi ve yüz, iris ve sese kıyasla kolaylık ve yüksek kabul edilebilirlik oranı nedeniyle öğrenci devam yoklamasına dair sistemlerde veri giriş yanılgılarını kontrol etmekte kullanılan en yaygın iki biyometrik özelliktir (Hoo ve Ibrahim, 2019). Sınıf ortamında biometrik verilere dayalı yoklama almaya benzer çalışmalar çevrimiçi eğitimlerde de kimlik tanıma amacıyla farklı biyometrik veriler etrafında kurgulanmıştır (Muratuly vd., 2022). Giderek gelişen teknoloji artık biyometrik veri alabilen çeşitli sensörlerin akıllı telefonlara da rahatça entegre edilebilmesine imkan tanımıştır. Böylelikle teknolojinin mobilite kabiliyetinin arttığı IoT çağında biyometrik veriye dayalı sistemler modern akıllı telefonlara bulunan kamera, iris veya parmak izi sensörü gibi yerleşik donanım bileşenleriyle birlikte eğitim ortamları için rahatlıkla

kurgulanabilmektedir. Benzer şekilde güncel araçların sağladığı teknoloji sayesinde çevrimiçi veya yüz yüze eğitim ortamlarında değerlendirmeler esnasında hile, kopya gibi girişimleri tespit etmek amacıyla da kullanıcılardan alınan stres seviyeleri, dikkat seviyeleri veya nabız hızları gibi biyometrik veriler kullanılmaktadır. (Hernandez-Ortega vd., 2019).

Özetle eğitim ortamlarında akademik alandaki öğretme/öğrenme süreçlerini iyileştirmek için biyometrik veriler kritik uygulamalara sahiptir. Biyometrik teknolojinin temel faydası, her kişi için benzersiz insan özelliklerini toplamasıdır. Biyometrik verilerin bir kişiyi tanımlayabilme başarısı oldukça yüksektir, örneğin; bir parmak izi verisinin doğruluğu %99.9 iken klavye tuş vuruş dinamiklerinin sağladığı veri ise %90 üzerinde doğruluk sağlamaktadır. Kimlik yönetim sistemi, sınıf katılımı, e-değerlendirme, güvenlik, öğrenci motivasyonu ve öğrenme analitiği, biyometrik teknolojinin en yoğun olarak kullanıldığı alanlardır (Hernandez-de-Menendez vd., 2021). Ancak giderek yaygınlaşan bu teknolojinin aşması gereken en büyük zorluk, teknolojinin tam potansiyeline ulaşması için ele alınması gereken güvenlik ve gizlilik sorunlarıdır. Bu kapsamda giyilebilir teknolojilerin eğitim ortamlarında uygulanmasını içeren araştırmalarda etik standartlara uygun şekilde elde edilecek biyometrik verilerin gizliliği korunmalıdır (Hong vd., 2025). Faydaları ve riskleri açısından birlikte ele aldığımızda, merkezinde insanın olduğu eğitim süreçlerinde öğrenenin mevcut durumunun takip edilebilmesi açısından etkili yollar sunan biyometrik verilerin kullanılması ve etik ile ilgili tartışmaları güncelliğini koruyan önemli bir araştırma alanı olmaya devam edeceğini söylemek mümkündür.

3. Biyometrik Veriler ve Eğitsel Veri Bilimi

Biyometrik verilerin eğitim ortamlarında kullanılmasında hem teknik hem de pedagojik faydalar sağlayabilmek için elde edilen bu verilerin doğru yöntemlerle işlenmesi gerekmektedir. Buradan hareketle bu başlıkta eğitim ortamlarında verilerin işlenmesine dair temel kavramlarla eğitimde veri bilimine kısaca değinilecektir. Eğitim süreçlerine yönelik verilerle karar verme mekanizmalarını incelediğimizde karşımıza temel olarak “Öğrenme Analitiği/Learning Analytics (LA)” ve “Eğitsel Veri Madenciliği/Educational Data Mining (EDM)” kavramları çıkmaktadır. LA ve EDM bazı çalışmalarda birbirinin yerine kullanılmakta iken, bazı çalışmalarda ise farklılıkları vurgulanarak ayrı iki kavram şeklinde ele alınmaktadır (Baek ve Doleck, 2023). Çalışma alanlarının

ortak odağı eğitim olan bu iki kavramın benzeştiği ve farklılaştığı durumlar bu bölümde eğitimde biyometrik verilerin kullanımı açısından karşılaştırmaları olarak ele alınmıştır.

Literatürde uzun süredir kendine yer bulan LA kavramı *“öğrenmeyi ve öğrenmenin gerçekleştiği ortamları anlamak ve optimize etmek amacıyla, öğrenenler ve onların bağlamları hakkındaki verilerin ölçülmesi, toplanması, analizi ve raporlanması”* olarak tanımlanmaktadır (Siemens ve Baker, 2012). LA, eğitim süreçlerine yönelik karar mekanizmaları geliştirirken insan yargılarını merkeze alan bir yaklaşıma sahiptir ve ulaştığı verilerle öğretmenleri/öğrencileri desteklemeye odaklanır. Eğitimi bir bütün olarak ele alan LA, daha çok eğitimin sosyal ve pedagojik boyutlarını anlamaya yönelik yöntemler kullanır. Özetle LA, öğrencilerin öğrenme süreçlerini ve bu süreçlerin gerçekleştiği ortamları anlamak ve optimize etmek amacıyla; öğrenciler ve bağlamları hakkındaki verilerin ölçülmesi, toplanması, analiz edilmesi ve raporlanmasıdır.

EDM kavramı ise *“Eğitim ortamlarından elde edilen benzersiz veri türlerini araştırmak için yöntemler geliştirmek ve bu yöntemleri öğrencileri ve onların öğrenim gördükleri ortamları daha iyi anlamak için kullanmakla ilgilenen, yeni ortaya çıkan bir disiplin”* olarak tanımlanmaktadır (Baker ve Yacef, 2009). EDM aynı zamanda öğretim yönetim sistemi gibi eğitim ortamlarından gelen benzersiz veri türlerini analiz ederek gizli örüntüleri keşfetmek ve öğrenme süreçlerini anlamlandırmak için teknik yöntemler geliştiren bir disiplindir (Baek ve Doleck, 2023). Eğitim ortamlarında EDM, insan yargısından ziyade sistemlerin insan müdahalesi olmadan otomatik bir şekilde adapte edilmesine odaklanmaktadır. Kullandığı yöntemlerle EDM, geleneksel veri madenciliğinden ayrı bir çalışma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır (Kayri, 2023). Özetle eğitimin kalitesinin artırılması odağında uygulanan EDM ile araştırmacılar öğrenci davranışlarını, başarı durumlarını analiz edebilmekte ve sürecin iyileşmesine yönelik geri bildirimler sağlayabilmektedir (Kayri, 2023).

Bu iki kavramı birlikte ele aldığımızda ise; EDM, eğitim verilerindeki desenleri keşfetmeye odaklanırken buna karşın LA, öğrencilerden elde edilen verilerle sosyal ve pedagojik boyutları anlamaya çalışmaktadır. Diğer bir deyişle EDM ve LA kavramlarını, eğitim süreçlerini optimize etme ve iyileştirme gibi ortak hedefleri paylaşan, ancak farklı odak noktaları ve kökenleri olan, birbiriyle yakından ilişkili

iki disiplin olarak tanımlamak mümkündür. EDM yaklaşımı LA'nın eğitimi tüm bağlamlarıyla ele alan bütüncül bakış açısının aksine karmaşık olayları analiz edilebilecek küçük parçalara ayırma yöntemini kullanır. Bu nedenle EDM, LA'nın bir alt kümesi olarak ele alınabilir.

Özetle EDM ve LA yaklaşımları biyometrik verileri öğrenenlerin dikkat seviyesi, bilişsel yük vb. durumlarını takip etmek ve iyileştirmek için temel bir araç olarak kabul etmektedir. Güncel araştırmalarda ise biyometrik verilerin eğitimde kullanımı odağında eğitim araştırmalarında giderek daha fazla yer bulan EDM ve LA kavramlarının yanı sıra yapay zeka gibi diğer güncel alanları da bütünleştiren “Eğitsel Veri Bilimi/Educational Data Science” şeklinde bir çatı kavrama atıfta bulunmaktadır (Cerezo vd., 2024). Başka bir deyişle EDM ve LA, ilerleyen çalışmalarda biyometrik sinyalleri hem teknik yeterlilik hem de pedagojik fayda sağlamak amacıyla diğer güncel teknolojilerle birlikte, eğitsel veri bilimi çatısı altında ele alınacaktır. Eğitsel veri bilimi yalnızca EDM ve LA'yı değil, aynı zamanda eğitimle ilişkili diğer güncel teknolojik alanları ve araştırma topluluklarını da bir araya getiren geniş kapsamlı yeni bir araştırma alanı olarak literatürde yerini almıştır.

4. Eğitimin Geleceği (Education 4.0)

Yakın gelecekte, öğrenci odaklı eğitim ortamları uyarlamalarına dair kullanılan sistemlerin, IoT ve Yapay Zeka alanlarının kombinasyonu ve eklenecek yeni teknolojik gelişmelerle daha kaliteli bir hale evrileceği tahmin edilmektedir. Bu kapsamda başlangıçta sadece üretim takibi, otomasyon ve güvenlik gibi alanlarda yaygın kullanıma sahip IoT uygulamalarının sınıfların ayrılmaz bir parçası haline geleceği öngörülmektedir. Hatta teknoloji odaklı ve deneyim temelli olarak nitelendirebileceğimiz bu yeni eğitim anlayışı, sanayi alanında ortaya çıkan Endüstri 4.0 kavramına paralel olarak Eğitim 4.0 (Education 4.0) şeklinde nitelendirilmektedir (Ocak ve Efe, 2021). Eğitim 4.0, geleneksel öğretilere dayalı sınıf içi öğretim yöntemlerinden farklı olarak, teknolojinin sağladığı imkanlarla; öğrenciyi merkeze alan, kişiselleştirilmiş ve esnek öğrenme süreçlerini öne çıkaran yeni bir yaklaşımdır (Mukul ve Büyüközkan, 2023). Eğitim 4.0 uygulamaları daha çok IoT, giyilebilir cihazlar ve sahip oldukları sensörler ile bunları işleyebilecek yapay zeka teknolojilerinin birlikte kullanımının üzerine inşa edilmiştir. Bu kapsamda Eğitim 4.0 teknolojisi, öğrenen odaklı kişiselleştirilmiş bir öğrenme deneyimi sunabilmek adına gömülü

sensörler aracılığıyla gerçek zamanlı biyosinyalleri toplar, bu verileri yapay zeka yöntemleri ile analiz eder ve risk altındaki öğrenciler konusunda önceden uyarılarda bulunabilir. Biyometrik verilere dayalı geri bildirimler oluşturabilme noktasında giyilebilir cihazlara gömülü olan sensörler oldukça önemlidir. UNESCO, OECD gibi eğitim adına söz sahibi olan kurumların eğitimin geleceğine dair 2030 yılında öngörülen dünya ile ilgili yazılarında dahi giyilebilir cihazlardan elde edilen verilerin eğitim ortamlarında öğrenme deneyimlerini kişiselleştirmede önemli bir potansiyeli olduğu vurgulanmaktadır (Hong vd., 2025). Sensörler bilinç dışı verileri elde etmenin güçlü bir yoludur ve öğrenme sürecinde öğrenenin vücudunda bilinçli veya bilinçsiz bir çok değişikliğin gerçekleştiği bilinmektedir. Bu açıdan bakıldığında öğrencinin öğrenme kalitesinin gerçek zamanlı artırılmasına ve motivasyonunun sağlanmasına biyometrik verilerle katkıda bulunmak, öğrenenin söylemlerine dayalı verilere göre daha gerçekçi bir seçenektir (Ciolacu vd., 2020). Gelecekteki araştırmalarda ayrı ayrı bileşenlere sahip laboratuvarlar kurmak yerine, gelişen teknolojiyle gömülü sensörleri kullanarak yalnızca akıllı telefonlar yoluyla dahi biyometrik özellikleri yakalayabilme fırsatı ortaya çıkacaktır (Hoo ve Ibrahim, 2019).

Bu bölümde vurgulanan Eğitim 4.0'ın sağlayacağı tüm avantajlarına rağmen halihazırda eğitim süreçlerinin merkezinde karar verici olarak otomatikleştirilmiş sistemlerin değil insanın yer aldığı unutulmamalıdır. Bu nedenle gelenekten ayrılmadan geleceğe hazırlanmak önemlidir. Biyometrik verilerin eğitimde kullanım alanları giderek artacaktır ancak klasik sınıf ortamında öğretmen ve öğrenci arasındaki insani yön de dikkate alınmalıdır. Bir çok süreç otomatikleştirilmeye uygun olsa da insan-insan etkileşiminin güçlü yönlerinin tamamını biyometrik verilere dayalı sistemlerin tıpkı bir insanmışçasına karşılamasının henüz gerçekçi olmadığı ancak bu sistemlerin gelişmeye devam ettiği söylenebilir. Bununla birlikte, artan mobil bağlantı dünyasında, araştırmacıların IoT teknolojisinin çalışma katmanlarını iyi kurgulaması ve toplanan biyometrik verilerin güvenliği/gizliliği konularında da ekstra dikkatli olmaları gerekir.

Kaynaklar

- Adegbenjo, A. A., Onuiri, E. E., Kalesanwo, O. B., Agbaje, M. O., Abel, S. B., Fatade, O. B., ... ve Onamade, K. O. (2023). Design and analysis of an automated IoT system for data flow optimization in higher education institutions. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 56(5), 889.
- Amigud, A., Arnedo-Moreno, J., Daradoumis, T., ve Guerrero-Roldan, A. E. (2016). A behavioral biometrics based and machine learning aided framework for academic integrity in e-assessment. In *2016 International conference on intelligent networking and collaborative systems (INCoS)* (pp. 255-262). IEEE.
- Badshah, A., Ghani, A., Daud, A., Jalal, A., Bilal, M., ve Crowcroft, J. (2023). Towards smart education through internet of things: A survey. *ACM Computing Surveys*, 56(2), 1-33.
- Baek, C., ve Doleck, T. (2023). Educational data mining versus learning analytics: A review of publications from 2015 to 2019. *Interactive Learning Environments*, 31(6), 3828-3850.
- Baker, R. S., ve Yacef, K. (2009). The state of educational data mining in 2009: A review and future visions. *Journal of educational data mining*, 1(1), 3-17.
- Cerezo, R., Lara, J. A., Azevedo, R., ve Romero, C. (2024). Reviewing the differences between learning analytics and educational data mining: Towards educational data science. *Computers in Human Behavior*, 154, 108155.
- Ciolacu, M. I., Svasta, P., Hartl, D., Görzen, S. (2020). Education 4.0: smart blended learning assisted by artificial intelligence, biofeedback and sensors. In *2020 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, 1-4. IEEE.
- General Data Protection Regulation (GDPR). (2016). Article 4. Erişim adresi: <https://gdpr-info.eu/art-4-gdpr/>.
- Glasserman-Morales, L. D., Carlos-Arroyo, M., Ruiz-Ramirez, J. A., Alcantar-Nieblas, C. (2023). Use of wearable devices in the teaching-learning process: a systematic review of the literature. *Frontiers in Education*, 8, 1220688.

- Hernandez-de-Menendez, M., Morales-Menendez, R., Escobar, C. A., ve Arinez, J. (2021). Biometric applications in education. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 15(2), 365-380.
- Hernández-Mustieles, M. A., Lima-Carmona, Y. E., Pacheco-Ramírez, M. A., Mendoza-Armenta, A. A., Romero-Gómez, J. E., Cruz-Gómez, C. F., ... Lozoya-Santos, J. D. J. (2024). Wearable biosensor technology in education: A systematic review. *Sensors*, 24(8), 2437.
- Hernandez-Ortega, J., Daza, R., Morales, A., Fierrez, J., ve Ortega-Garcia, J. (2019). edBB: Biometrics and behavior for assessing remote education. *arXiv preprint arXiv:1912.04786*.
- Hong, H., Dai, L., ve Zheng, X. (2025). Advances in Wearable Sensors for Learning Analytics: Trends, Challenges, and Prospects. *Sensors*, 25(9), 2714.
- Hoo, S. C., ve Ibrahim, H. (2019). Biometric-Based Attendance Tracking System for Education Sectors: A Literature Survey on Hardware Requirements. *Journal of Sensors*, 2019(1), 7410478.
- Kalantari, K., Contreras-Vidal, J. L., Smith, J. S., Cruz-Garza, J. G., ve Banner, P. (2018). Evaluating educational settings through biometric data and virtual response testing. In *ACADIA*.
- Kayri, M. (2023). Eğitimde veri madenciliği, M. Kayri ve H. Şevgin içinde *Eğitimde Veri Madenciliği ve Bilgisayar Uygulamaları* (1-11) Ankara: Pegem Akademi.
- K Kasap, ve A., Kurt, B. (2025). Exploring the correlation of physiological stress signals with student exam performance: A preliminary study. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 50(1), 149-164.
- Kişisel Verileri Koruma Kurumu (KVKK). (2025a, Mart). Biyometrik Verilerin İşlenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlara İlişkin Rehber. Erişim adresi: <https://www.kvkk.gov.tr/SharedFolderServer/CMSFiles/bd06f5f4-e8cc-487e-abe1-d32dc18e2d7e.pdf>
- Kişisel Verileri Koruma Kurumu (KVKK). (2025b, Şubat). Özel Nitelikli Kişisel Verilerin İşlenmesine İlişkin Rehber. Erişim adresi: <https://www.kvkk.gov.tr/SharedFolderServer/CMSFiles/70f95c73-06a2-44dc-81e9-34201bdd7f5c.pdf>

- Kumar, A., Rani, M., Sisodia, D. R., Perwej, Y., Kakde, A. C., ve Rakhimjonovna, F. M. (2024). Transforming Education Through Iot And AI Opportunities And Challenges. *Educational Administration: Theory and Practice*, 30(5), 11610-11622.
- Li, C., Wang, J., Wang, S., ve Zhang, Y. (2024). A review of IoT applications in healthcare. *Neurocomputing*, 565, 127017.
- Ocak, M. A., ve Efe, A. A. (2021). Nesnelerin İnterneti. Ankara: Anı Yayıncılık.
- Meini, V., Bachi, L., Omezzine, M. A., Procissi, G., Pigni, F., ve Billeci, L. (2025). Artificial Intelligence for the Analysis of Biometric Data from Wearables in Education: A Systematic Review. *Sensors*, 25(22), 7042. <https://doi.org/10.3390/s25227042>
- Mukul, E., ve Büyüközkan, G. (2023). Digital transformation in education: A systematic review of education 4.0. *Technological forecasting and social change*, 194, 122664.
- Muratuly, D., Denissova, N. F., Krak, Y. V., ve Apayev, K. S. (2022). Biometric authentication of students to control the learning process in online education. *Scientific Journal of Astana IT University*.
- Otaboyeva, M., Sharifbaeva, R., Radjapov, B., Xaitbayeva, D., Sharipov, S., ve Saparbayev, A. (2025). Applying Biometric Technologies for Personalized Learning in Education Management Systems. In *2025 IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)* (pp. 2020-2025). IEEE.
- Rukhiran, M., Wong-In, S., ve Netinant, P. (2023). IoT-based biometric recognition systems in education for identity verification services: Quality assessment approach. *IEEE Access*, 11, 22767-22787
- Sajja, R., Sermet, Y., Cwiertny, D., ve Demir, I. (2025). Integrating AI and learning analytics for data-driven pedagogical decisions and personalized interventions in education. *Technology, knowledge and learning*, 1-31.
- Sano, A., Phillips, A. J., Amy, Z. Y., McHill, A. W., Taylor, S., Jaques, N., ... ve Picard, R. W. (2015). Recognizing academic performance, sleep quality, stress level, and mental health using personality traits, wearable sensors and mobile phones. In *2015 IEEE 12th*

international conference on wearable and implantable body sensor networks (BSN) (pp. 1-6). IEEE.

Siemens, G., ve Baker, R. S. D. (2012). Learning analytics and educational data mining: towards communication and collaboration. In *Proceedings of the 2nd international conference on learning analytics and knowledge* (pp. 252-254).

Subash, A., Song, I., Lee, I., ve Lee, K. (2025). Integrating user demographic parameters for mouse behavioral biometric-based assessment fraud detection in online education platforms. *EURASIP Journal on Information Security*, 2025(1), 1-17

Sun, P., Wan, Y., Wu, Z., Fang, Z., ve Li, Q. (2025). A survey on privacy and security issues in IoT-based environments: Technologies, protection measures and future directions. *Computers ve Security*, 148, 104097.

Türk Dil Kurumu (TDK). (2025). Erişim adresi: <https://sozluk.gov.tr/>.

Zhang, Y., Qin, F., Liu, B., Qi, X., Zhao, Y., ve Zhang, D. (2018). Wearable neurophysiological recordings in middle-school classroom correlate with students' academic performance. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12,1–8.

EĞİTİMDE YAPAY ZEKA İLE BİYOMETRİK VERİ İŞLEME: YÖNTEMLER VE UYGULAMALAR

Gülbahar Merve ŞILBIR³

Bu bölümde, eğitim ortamlarında biyometrik verilerin yapay zeka temelli yaklaşımlar aracılığıyla nasıl anlamlandırıldığı ele alınmaktadır. Biyometrik verilerin, eğitim araştırmalarında kuramsal ve uygulamalı bir çerçeve sunan Öğrenme Analitikleri (Learning Analytics), Duygusal Hesaplama (Affective Computing) ve Eğitimde Veri Madenciliği (Educational Data Mining) yaklaşımları kapsamında öğrenme süreçlerine nasıl entegre edildiği, güncel çalışmalar ışığında tartışılmaktadır. Bu bağlamda, bu bölümde, biyometrik verilerin işlenmesi sürecinden başlanarak makine öğrenmesi modelleri, derin öğrenme modelleri ve diğer özelleşmiş yöntemler gibi yapay zeka temelli yaklaşımların öğrenme süreçlerindeki bilişsel ve duyuşsal durumların modellenmesi ve yorumlanmasında nasıl kullanıldığı ele alınmaktadır.

1. Eğitim Ortamlarında Kullanılan Biyometrik Veriler

Bilgi ve iletişim teknolojilerinde yaşanan hızlı gelişmeler, eğitim alanında yenilikçi ve veri temelli yaklaşımların ortaya çıkması kaçınılmaz olmuştur. Bu doğrultuda son yıllarda, öğrenme süreçlerinin derinlemesine ve bütüncül biçimde anlaşılabilmesi amacıyla öğrenme analitikleri, duygusal hesaplama ve eğitimde veri madenciliği uygulamalarına dayalı yaklaşımlar eğitim araştırmalarında giderek daha fazla ön plana çıkmıştır (Lampropoulos ve Evangelidis, 2025; Kalita vd., 2025). Öğrenme analitikleri, öğrencilerin öğrenme sürecine ilişkin performans ve etkileşim verilerini bütüncül biçimde ele alarak öğretmenler ve eğitim tasarımcıları için kanıta dayalı karar alma süreçlerini desteklemektedir (Banihashem vd., 2019). Buna paralel olarak duygusal hesaplama, öğrenenlerin motivasyon, ilgi ve duygu durumlarını dikkate alarak öğrenme deneyimlerinin bireysel farklılıklara göre uyarlanmasına olanak tanımaktadır (Cernea ve Kerren, 2015). Eğitimde veri madenciliği ise geniş ölçekli eğitim verilerinden anlamlı örüntüler ortaya çıkararak öğrenci

³ Dr. Öğr. Üyesi Gülbahar Merve ŞILBIR

Trabzon Üniversitesi, Çarşıbaşı Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü,
Trabzon, Türkiye
ORCID:0000-0003-0321-7259, gmervecakmak@trabzon.edu.tr

davranışları ve akademik performansla ilişkili kritik noktaların belirlenmesini sağlamaktadır (Baker ve Inventado, 2014).

Eğitim araştırmalarında duyguların ve bilişsel durumların değerlendirilmesine yönelik yaklaşımlar incelendiğinde, algı temelli ölçümler, fizyolojik göstergeler ve öznel değerlendirmeler olmak üzere farklı veri kaynaklarının kullanıldığı görülmektedir (Banihashem vd., 2019). Bu kaynakların birlikte ele alınması, öğrenenlerin bilişsel ve duyuşsal durumlarının daha kapsamlı ve güvenilir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Hong vd., 2025). Özellikle öz-bildirim verileri ile fizyolojik ve davranışsal verilerin eş zamanlı olarak toplanması, öğrenme sürecine ilişkin çok boyutlu bir bakış açısı sunmaktadır. Bu bağlamda biyometrik veriler, öğrenme analitikleri, duygusal hesaplama ve eğitimde veri madenciliği uygulamalarını tamamlayan önemli bir veri kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Giyilebilir teknolojiler, biyomedikal sensörler ve nörofizyolojik ölçümler aracılığıyla elde edilen bu veriler, öğrenme süreçlerinin daha bütüncül, etkili ve uyarlanabilir biçimde tasarlanmasına katkı sağlamaktadır (Hong vd., 2025).

2. Biyometrik Verilerin Toplanması ve Veri İşleme Süreçleri

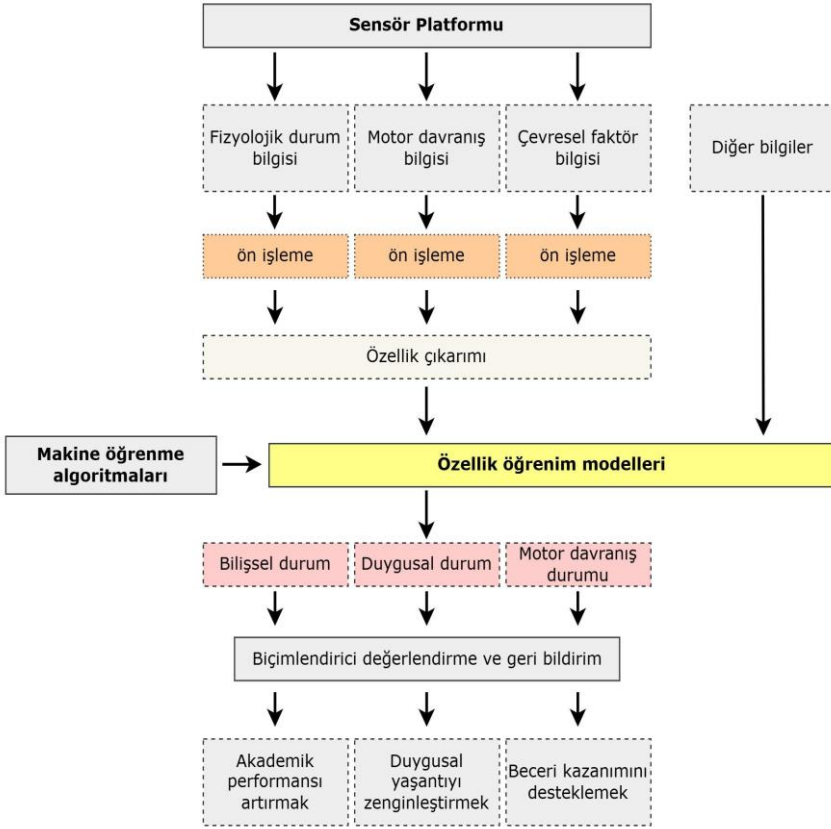
Sensör tabanlı giyilebilir cihazlar, öğrenci etkileşimi ve deneyimine ilişkin yeni sinyaller sağlayarak öğrenme süreçlerinin daha dinamik ve anlık bir şekilde izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, öğrenme analitiklerini yalnızca davranışsal verilere dayandırmak yerine, öğrenci deneyimini “bilişsel + duyuşsal + fizyolojik” olarak üç boyutlu analiz etmeyi mümkün kılarak eğitim araştırmalarında yeni bir paradigmaya işaret etmektedir.

Akıllı eğitim altyapılarıyla bütünleşik sensör teknolojileri ve giyilebilir cihazlar, uyarlanabilir ve etkileşime duyarlı öğrenme ortamlarının oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu kapsamda literatürde; Elektroensefalografi (EEG) sistemleriyle donatılmış başa takılan sensörler, göğüs bölgesine yerleştirilen sensörler, bilek tabanlı giyilebilir sensörler ve sanal gerçeklik özellikleriyle entegre edilmiş başa takılan sensör sistemleri gibi farklı uygulamaların kullanıldığı görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Eğitim Ortamlarında Biyometrik Verilerin Elde Edildiği Bütünleşik Sensör Teknolojileri Ve Giyilebilir Cihazlar (Hong vd., 2025): **A.** EEG sistemli başa takılabilen sensörler (Alvarez vd., 2016); **B.** Göğse takılabilen biyomedikal sensörler (Cowperthwait vd., 2015); **C.** Bileğe takılabilen çoklu sensörler (Laverde vd., 2018); **D.** Başa takılabilen sanal gerçeklik özelliklerine sahip sensörler (Khosravi vd., 2022).

Eğitimde biyometrik verilerin toplanması ve işlenmesi süreci, yalnızca fizyolojik sinyallerin elde edilmesiyle sınırlı kalmayıp; bu verilerin makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak anlamlı pedagojik çıkarımlara dönüştürülmesini de kapsamaktadır. Bu kapsamda geliştirilen modeller eğitim ortamlarındaki bilişsel ve duyuşsal durumların tanımlanması ve tahmini için kullanılabilmektedir (Meini vd., 2025). Biyometrik verilerin öğrenme analitikleri çerçevesinde kullanımını araştıran Hong ve arkadaşları (2025), giyilebilir sensörler, fizyolojik sinyaller (EEG, Elektrokardiyografi (EKG), Elektrodermal aktivite (EDA) vb.), motor davranış verileri (ivmeölçerler, jiroskoplar vb.) ve çevresel faktörler (sıcaklık, gürültü seviyeleri vb.) dahil olmak üzere çok modlu verilerin sürekli bir şekilde toplanmasının eğitim açısından önemli bir rol oynadığını öne sürmüştür (Pelánek vd., 2016; Fidalgo-Blanco vd., 2015). Öğrenme analitikleri çerçevesinde biyometrik verilere ilişkin veri toplama, ön işleme ve analiz süreçleri Şekil 2’de sunulmuştur (Hong vd., 2025).



Şekil 2. Öğrenme Analitikleri Çerçevesinde Sensör Verilerinin İşlenmesi (Hong vd., 2025'ten Türkçe'ye çevrilmiştir.)

Şekil 2'de sunulan şema incelendiğinde öncelikle giyilebilir cihazlar veya bütünleşik sensör teknolojileri yoluyla fizyolojik durum, motor davranış ve çevresel faktör bilgileri toplanmaktadır. Bu verilere ek olarak yapılandırılmış/yapılandırılmamış veriler (anket/ölçek puanı, sınav puanı, memnuniyet düzeyi, derse katılım durumu vb.) de öğrenme analitikleri çerçevesinde kullanılmak üzere çeşitli veri toplama araçları (öğrenme yönetim sistemi log kayıtları, çevrimiçi anketler, bilgi yönetim sistemleri vb.) ile elde edilebilmektedir. Birçok kaynaktan elde edilen bu verilerin analiz sürecine uygun hale getirilebilmesi için ön işleme adımlarından geçirilmesi gerekmektedir. Ön işleme aşamasında, verilerdeki eksik veya hatalı kayıtlar belirlenerek uygun yöntemlerle ele alınmakta; sensör tabanlı ölçümlerden kaynaklanan gürültüler filtreleme teknikleri aracılığıyla giderilmekte ve böylece verilerin tutarlılığı ile

bütünlüğü sağlanmaktadır. Bu işlemin ardından farklı kaynaklardan elde edilen verilerden anlamlı örüntülerin ortaya çıkarılabilmesi amacıyla özellik çıkarımı süreci uygulanmaktadır. Çıkarılan özellikler, makine öğrenmesi ve yapay zeka temelli özellik öğrenim modelleri aracılığıyla analiz edilerek öğrenenin bilişsel durumu, duygusal durumu ve motor davranış durumuna ilişkin çıkarımlar üretilmektedir. Bu çıkarımlar, öğrenme sürecinin anlık ve süreç odaklı biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyan biçimlendirici değerlendirme ve geri bildirim mekanizmalarına girdi sağlamaktadır. Böylece elde edilen bulgular, akademik performansın artırılması, öğrenenin duygusal yaşantısının zenginleştirilmesi ve beceri kazanımının desteklenmesi gibi pedagojik hedeflere yönelik olarak uyarlanabilir öğrenme ortamlarının ve kişiselleştirilmiş eğitim uygulamalarının geliştirilmesinde kullanılabilir. Şekil 2’de sunulan bu bütüncül yapı ile sensör verileri kullanılarak öğrenme analitikleri çerçevesinde, öğrenme süreçlerini yalnızca çıktı odaklı değil; bilişsel, duyuşsal ve davranışsal boyutlarıyla ele alan çok boyutlu bir değerlendirme yaklaşımı sunulmaktadır.

Biyometrik verilerin eğitim alanındaki çeşitli problemlerde kullanımına yönelik literatür incelendiğinde, giyilebilir cihazlar ve mobil sensörler aracılığıyla toplanan fizyolojik, davranışsal ve çevresel verilerin çeşitli düzenleme ve dönüştürme adımlarından sonra analiz edildiği görülmektedir. Bu süreçte, veri toplama süresinin öğrenme etkinlikleriyle uyumlu olacak biçimde sınırlandırılması, ölçüm dışı zaman dilimlerinin ayıklanması ve analiz kapsamına yalnızca geçerli gözlemlerin dahil edilmesi temel uygulamalar arasında yer almaktadır (Amin vd., 2022; Abromavičius vd., 2023). Veri işleme sürecinin bir diğer önemli adımı ise zaman serisi yapısındaki sinyallerin analiz edilebilir parçalara ayrılmasıdır. Eğitim araştırmalarında sıklıkla kullanılan bu yaklaşımda, öncelikle öğrenme etkinliği, sınav ya da günlük yaşam döngüsü gibi bağlamsal olaylara karşılık gelen zaman aralıkları belirlenmektedir. Belirlenen bu zaman aralıklarına göre veriler, sabit uzunlukta veya oransal şekilde pencerelere bölünerek segmentasyon işlemi gerçekleştirilmektedir (Neigel vd., 2025). Bunun yanı sıra, bazı çalışmalarda biyometrik sinyallerin zaman ve dalgacık (wavelet) tabanlı özelliklere dönüştürülerek günlük yaşam aktivitelerinin ve davranış örüntülerinin tanımlanmasında kullanıldığı görülmektedir. Bu tür özellikler, sensör verilerinin ham haliyle değil, dönüştürülmüş ve anlamlı öznitelikler aracılığıyla sınıflandırma

modellerine girdi olarak verilmesini sağlamaktadır (Herrera-Alcántara vd., 2019). Bu sayede öğrenme süreci boyunca ortaya çıkan fizyolojik tepkilerin zamansal değişimi daha ayrıntılı biçimde incelenebilmekte ve bireyler arası farklılıkların etkisi kısmen dengelenebilmektedir.

Segmentasyon işlemi sonrasında biyometrik veriler, makine öğrenmesi ve öğrenme analitikleri modellerinde kullanılabilecek nicel temsillere (vektörlere) dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm süreci, fizyolojik sinyallerin belirlenen zaman pencereleri içinde istatistiksel olarak özetlenmesi ve her bir pencerenin öğrenme sürecine ilişkin ayırt edici bilgileri yansıtacak şekilde temsil edilmesi esasına dayanmaktadır (Amin vd., 2022). Literatürde, farklı sensörlerden elde edilen çoklu biyometrik sinyaller için özellik çıkarımının sistematik bir biçimde ele alındığı görülmektedir. Biyometrik verilerden çıkarılan özelliklerin sayıca artması, modelleme sürecinde yüksek boyutlu bir özellik uzayının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle sınırlı örneklem büyüklüğüne sahip eğitim araştırmalarında biyometrik verilere dayalı geliştirilen makine öğrenmesi modellerinin aşırı uyum (overfitting) riski oluşturmaya neden olmakta ve modelin genellenebilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle literatürde, model performansını artırmak ve hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla çeşitli özellik seçimi ve boyut indirgeme yaklaşımlarının uygulandığı görülmektedir. Özellik çıkarım işleminde, temel istatistiksel göstergeler, zaman serisi temelli göstergeler, spektral analiz çıktıları ve ileri düzey istatistiksel tanımlayıcılar olmak üzere çeşitli hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır (Amin vd., 2022). Ayrıca ki-kare testi, ANOVA, ReliefF ve Kruskal-Wallis gibi istatistiksel ve filtre tabanlı yöntemler, en ayırt edici özelliklerin belirlenmesinde sıklıkla tercih edilen teknikler arasında yer almaktadır (Abromavičius vd., 2023). Bu yaklaşımlar, biyometrik sinyallerin hem zamansal yapısını hem de frekans bileşenlerini dikkate alan bütüncül bir temsil yapısının elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Özellik çıkarımı sürecinin ardından, biyometrik verileri daha anlamlı ve ayırt edici biçimde temsil eden özellik kümeleri oluşturulabilmektedir. Bu sayede söz konusu verilerin öğrenme çıktılarıyla olan ilişkisi daha açık biçimde ortaya konulmakta ve makine öğrenmesi modellerinin tahmin başarımı belirgin ölçüde iyileşmektedir. Nitekim sınav performansı, stres düzeyi ve akademik başarı gibi değişkenlerin öngörülmesine yönelik yapılan çalışmalarda, özellik çıkarımı ile eğitilen modellerde, doğruluk, AUROC ve F1 skoru gibi performans ölçütlerinde

belirgin iyileşmeler sağlandığı rapor edilmiştir (Amin vd., 2022; Abromavičius vd., 2023). Bu yönüyle özellik çıkarımı aşaması, biyometrik verilerin eğitim bağlamında güvenilir ve yorumlanabilir analizlere dönüştürülmesinde kritik bir aşama olarak değerlendirilmektedir.

3. Yapay Zeka ve Makine Öğrenmesi Yöntemleri

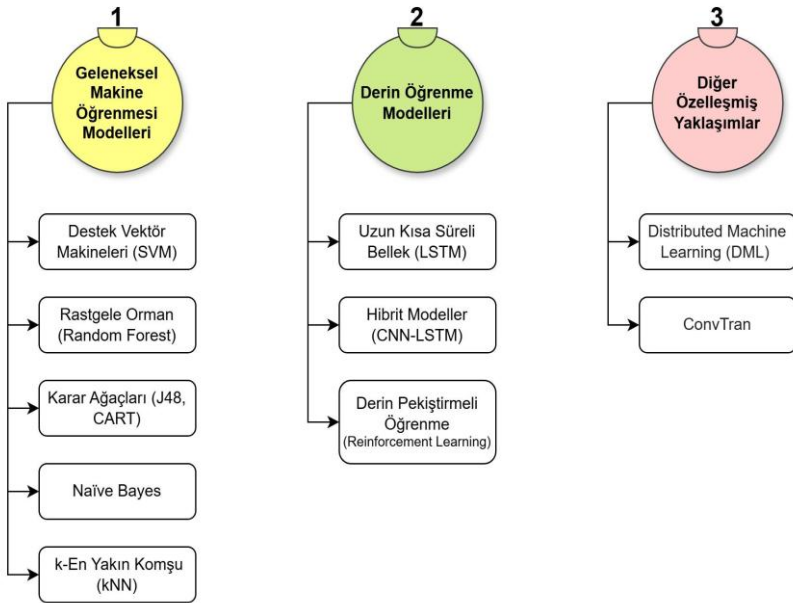
Yapay zeka (Artificial Intelligence, AI), bilgisayar sistemlerinin veya bilgisayar temelli makinelerin; problem çözme, anlama ve yorumlama, çıkarımda bulunma, genelleme yapma ve geçmiş deneyimlerden öğrenme gibi çoğunlukla insan bilişine atfedilen üst düzey zihinsel süreçleri gerçekleştirebilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (Nabiyev, 2012). Makine öğrenmesi (Machine Learning, ML) ise bilgisayar sistemlerinin belirli görevler ve performans ölçütleri doğrultusunda, deneyim kazandıkça performansını artırmasını sağlayan yapay zeka alt alanıdır (Jordan ve Mitchell, 2015). Makine öğrenmesi algoritmaları, problem alanına özgü veriler üzerinden yinelemeli biçimde öğrenerek, verilerdeki gizli örüntüleri ve karmaşık ilişkileri ortaya çıkarabilmektedir. Özellikle sınıflandırma, regresyon ve kümeleme gibi yüksek boyutlu verilere yönelik problemlerde etkin biçimde kullanılan bu yöntemler, tutarlı ve güvenilir kararların üretilmesinin yanında genelleme yapma ve yeni durumlara uyum sağlama yetenekleriyle yapay zeka sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Derin öğrenme (Deep Learning, DL), makine öğrenmesinin bir alt alanı olup, karmaşık gerçek dünya problemlerinin çözümünde insan beyninin bilgi işleme biçimini modellemeyi amaçlayan yapay sinir ağlarına dayalı yöntemleri kapsamaktadır (Mijwil vd., 2022). Bu yaklaşım, çok katmanlı sinir ağları aracılığıyla girdilerden anlamsal özelliklerin otomatik olarak öğrenilmesini ve bu temsiller üzerinden anlamlı çıktılar üretilmesini sağlar. İnsan beynindeki nöronal bağlantılardan esinlenen derin öğrenme modelleri; girdi katmanı, çıktı katmanı ve bir veya daha fazla gizli katmandan oluşmakta, her bir katmanda yer alan ağırlıklı düğümler aracılığıyla veriler üzerinde hiyerarşik bir temsil öğrenimi gerçekleştirmektedir. Büyük ölçekli ve yüksek boyutlu veri kümeleriyle etkin biçimde çalışabilen derin öğrenme yöntemleri, karmaşık örüntüleri insan müdahalesi olmaksızın keşfedebilme yeteneği sayesinde görüntü tanıma, doğal dil işleme, sağlık ve eğitim gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3'te yapay zeka, makine öğrenmesi ve derin öğrenme alanlarının ilişkisi bir şema üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3. Yapay Zeka ve Alt Alanları (Mijwil vd., 2022'den esinlenilmiştir.)

Giyilebilir cihazlar ve sensör tabanlı sistemler aracılığıyla toplanan biyometrik veriler, yüksek boyutlu, zamana dayalı ve bireyler arası değişkenlik gösteren bir yapıya sahiptir. Bu tür verilerin eğitim araştırmaları çerçevesinde anlamlı pedagojik çıktılara dönüştürülebilmesi için klasik istatistiksel yaklaşımların ötesinde, örüntü tanıma ve temsil öğrenme kapasitesi yüksek yapay zeka yöntemlerinin kullanılmasını gerektirmiştir. Özellikle giyilebilir cihazlar ve sensör tabanlı sistemlerden elde edilen zaman damgalı ve yüksek boyutlu biyometrik veriler, öğrenme analitikleri ve eğitimde veri madenciliği bağlamında daha gelişmiş modelleme stratejilerine olan ihtiyacı artırmıştır. Aynı biyometrik veri kümesi, kullanılan yapay zeka yöntemine bağlı olarak farklı düzeylerde bilgi üretme potansiyeline sahiptir. Örneğin, belirli istatistiksel özniteliklere dayalı geleneksel makine öğrenmesi yaklaşımları daha yorumlanabilir çıktılar sunarken, zaman serisi temelli derin öğrenme modelleri biyometrik sinyallerin dinamik ve bağlamsal yapısını doğrudan modelleyebilmektedir. Benzer biçimde, tek bir sensörden alınan verilere dayalı analizler ile çoklu veri kaynaklarını bütünleştiren yaklaşımlar, öğrenme süreçlerine ilişkin elde edilen içgörülerin kapsamını ve derinliğini önemli ölçüde değiştirmektedir. Dolayısıyla, eğitim ortamlarında biyometrik verilere dayalı yapay zeka analizlerinde kullanılan yöntemlerin türü, araştırma sorularının yanıtlanma biçimini ve öğrenme süreçlerindeki bilişsel, duyuşsal ve davranışsal boyutlara yönelik edilen pedagojik çıkarımların niteliğini doğrudan etkilemektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, öğrencilerin stres, dikkat ve duygusal durumlarının tanımlanması, öğrenme sürecindeki etkinlik ve katılım düzeylerinin izlenmesi, akademik performansın tahmin edilmesi ve erken uyarı mekanizmalarının geliştirilmesi gibi çeşitli eğitimsel hedefler doğrultusunda yapay zeka yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Özellikle öğrenme analitikleri, duygusal hesaplama ve eğitimde veri madenciliği alanlarında yürütülen araştırmalarda, biyometrik verilerin yapay zeka destekli analizi ile öğrenme süreçlerine ilişkin çok boyutlu bir bakış açısı sunduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda, eğitim araştırmalarında biyometrik verilerin analizinde yaygın olarak başvuru olan yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri, literatürdeki sınıflandırmalar esas alınarak Şekil 4’te bütüncül bir çerçeve içinde sunulmuştur.



Şekil 4. Eğitim Araştırmalarında Biyometrik Verilerin Analizinde Kullanılan Yapay Zeka Yöntemleri

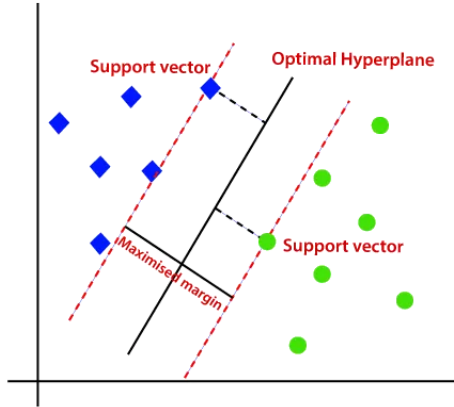
3.1. Geleneksel Makine Öğrenmesi Modelleri

Geleneksel makine öğrenmesi modelleri, biyometrik verilerin eğitim araştırmalarında sıklıkla kullanılan yapay zeka yöntemleri arasında yer almaktadır. Giyilebilir cihazlardan elde edilen kalp atış hızı, aktivite düzeyi, uyku süresi ve elektrodermal aktivite gibi biyometrik göstergelerin sınıflandırılması ve tahmin edilmesinde bu yöntemlerin etkin biçimde

kullanıldığı görülmektedir (Sano vd., 2015; Kim vd., 2021; Meini vd., 2025).

- **Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM)**

Destek Vektör Makineleri, biyometrik verilere dayalı eğitim problemlerinde sıklıkla kullanılan sınıflandırma algoritmalarından biridir. SVM, yüksek boyutlu veri uzaylarında sınıflar arasındaki en uygun ayırıcı hiper-düzlemi (karar doğrusu) belirlemek ve özellikle küçük/orta ölçekli örneklere sahip veri setlerinde güçlü genelleme performansı sunmaktadır (Şekil 5). Eğitim alanında SVM kullanılarak yapılan çalışmalarda, öğrencilerin stres düzeyi, dikkat durumu ve bilişsel yük gibi değişkenlerin sınıflandırılmasında başarılı sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir (Sano vd., 2015; Amin vd., 2022). Kontrollü deneysel ortamlarda belirli görevler için oldukça yüksek doğruluk değerlerine ulaşıldığı belirtilmekle birlikte, bu tür sonuçların genellikle bağlama ve veri yapısına özgü olduğu vurgulanmaktadır (Meini vd., 2025).

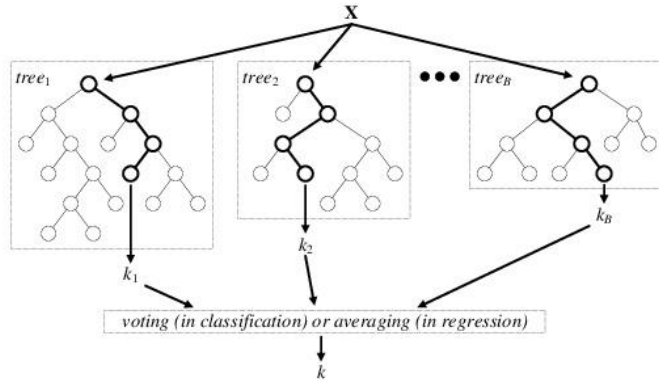


Şekil 5. SVM Hiper-düzlemi (Dhamdhere vd., 2023)

- **Rastgele Orman (Random Forest, RF)**

Rastgele Orman algoritması, veri kümesi üzerinde birden fazla karar ağacının inşa edilmesi ve her bir ağacın bağımsız olarak bir tahmin üretmesi üzerine çalışan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Şekil 6). Elde edilen bu tahminlerin bir araya getirilerek nihai kararı oluşturması, tek bir karar ağacına kıyasla daha yüksek doğruluk ve genelleme başarımı sağlanmaktadır. RF

algoritmasında, her düğümde değerlendirilecek özellik sayısı ve oluşturulacak ağaç sayısı kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Her bir karar ağacı, eğitim verisi içerisinde rastgele seçilen örnekler ve değişkenler kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu rastlantısal seçim süreci, algoritmanın “rastgele” niteliğinin temelidir. Eğitim bağlamında yapılan çalışmalarda RF algoritmasının, öğrencilerin stres düzeylerinin sınıflandırılması ve dikkat durumlarının tahmini gibi görevlerde yüksek doğruluk ve hassasiyet değerleri ürettiği rapor edilmiştir (Kim vd., 2021; Meini vd., 2025). Ayrıca algoritmanın sunduğu özellik önem sıralaması (feature importance) çıktıları, hangi biyometrik göstergelerin öğrenme süreciyle daha güçlü ilişkili olduğunun belirlenmesine olanak tanıyarak pedagojik yorumlanabilirliği artırmaktadır.



Şekil 6. RF Mimarisi (Verikas vd., 2016)

- **Karar Ağaçları (Decision Tree)**

Karar ağacı tabanlı yöntemler, veriyi belirli kurallar çerçevesinde dallara ayırarak sınıflandırma yapan, yorumlanabilirliği yüksek modellerdir. Eğitim araştırmalarında bu yöntemler, öğrencilerin algılanan zorluk düzeyi, ilgi durumu ve öğrenme etkinliği gibi değişkenlerin modellenmesinde kullanılmaktadır (Meini vd., 2025). Özellikle gradyan artırma temelli bir yaklaşım olan XGBoost, klasik karar ağaçlarına kıyasla daha yüksek tahmin başarımı sunmakta ve duygusal durum tespiti ile akademik

performans tahmini gibi karmaşık görevlerde öne çıkmaktadır (Meini vd., 2025).

- ***Naïve Bayes***

Naïve Bayes, bir sonucun ortaya çıkmasında etkili olan değişkenlerin katkılarını olasılık kuramı çerçevesinde değerlendirerek sınıflandırma yapan bir yaklaşıma dayanmaktadır. Naïve Bayes, değişkenler arasındaki koşullu bağımsızlık varsayımına dayanmasına rağmen, düşük hesaplama maliyeti ve hızlı çalışması sayesinde özellikle ön analizlerde tercih edilmektedir. Eğitim araştırmalarında ise hareket tanıma ve stres tespitinde referans noktası olarak kullanılmaktadır (Meini vd., 2025).

- ***K-En Yakın Komşu Algoritması (kNN)***

k-En Yakın Komşu algoritması, sınıflandırma alanında en temel ve köklü yöntemlerden biri olarak bilinmektedir. Bu yaklaşımda, sınıfı belirlenecek yeni bir veri örneği ile önceden etiketlenmiş en yakın k komşu arasındaki uzaklıklar hesaplanarak karar verme işlemi gerçekleştirilmektedir. Naïve Bayes algoritmasında belirtildiği gibi kNN algoritması da benzer şekilde eğitim araştırmalarında hareket tanıma ve stres tespitinde başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir (Meini vd., 2025).

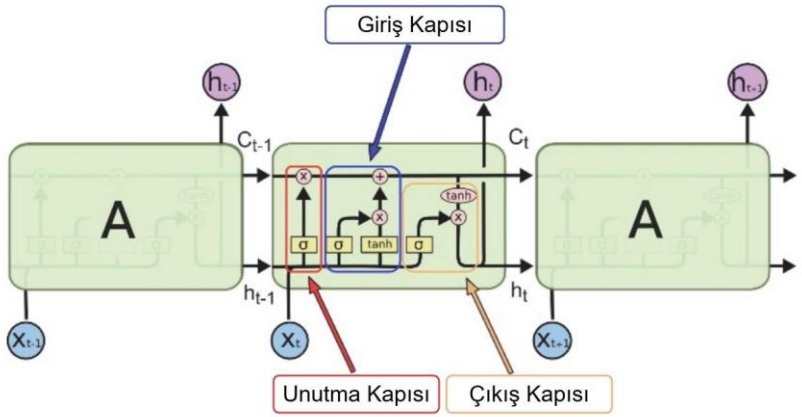
3.2. Derin Öğrenme Modelleri

Derin öğrenme modelleri, kalp atış hızı, EEG, EDA ve hareket verileri gibi zamana bağlı elde edilen ve yüksek boyutlu yapıya sahip biyometrik verilerin analizinde geleneksel makine öğrenmesi modellerine kıyasla daha bütüncül ve bağlama duyarlı biçimde geliştirilebilmektedir. Literatürde, derin öğrenme modellerinin öğrenme sürecindeki bilişsel ve davranışsal durumları tahmin etmede özellikle zaman serisi temelli görevlerde yüksek performans sergilediği belirtilmiştir (Zhou vd., 2019).

- ***Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM)***

Uzun Kısa Süreli Bellek, yinelemeli sinir ağlarının (Recurrent Neural Networks, RNN) gelişmiş bir türü olup, ardışık ve uzun süreli zamana bağlı ölçülen verilerden bilgileri öğrenebilme yeteneği ile öne çıkmaktadır. LSTM ağları, bellek hücreleri, giriş,

çıkış ve unutma kapılarından oluşan yapısı sayesinde bilginin zaman boyunca korunmasını ve denetlenmesini sağlamaktadır (Şekil 7). Eğitim bağlamında yürütülen çalışmalarda, LSTM modellerinin öğrencilerin kalp atış hızı, kalori tüketimi ve benzeri fizyolojik göstergelere dayalı olarak öğrenme durumlarını modellemede etkili olduğu gösterilmiştir. Örneğin, Zhou vd. (2019) tarafından yapılan bir araştırmada, giyilebilir cihazlardan elde edilen fizyolojik verilerle eğitilen LSTM tabanlı bir modelin, öğrencilerin “aktif” ve “inaktif” öğrenme durumlarını yüksek doğrulukla sınıflandırabildiği belirlenmiştir. Bu bulgular, LSTM’nin öğrenme süreçlerinin zamansal dinamiklerini yakalamada güçlü bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7. LSTM Mimarisi (Liao vd., 2022’den esinlenilmiştir.)

- **Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN)**

Evrişimli Sinir Ağları, her ne kadar ağırlıklı olarak görüntü işleme alanında kullanılsa da, giyilebilir cihazlardan elde edilen ivmeölçer ve jiroskop gibi sensör verilerinin işlenmesinde etkin biçimde kullanılan derin öğrenme modelleridir. Literatürde, ham sensör verilerinin iki boyutlu “aktivite görüntülerine” dönüştürülerek CNN mimarileriyle analiz edilmesinin, aktivite tanıma performansını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir (Jiang ve Yin, 2015). CNN’ler, sensör verilerindeki yerel örüntüleri otomatik olarak öğrenebilme yetenekleri sayesinde, manuel özellik çıkarımına olan bağımlılığı azaltmakta ve gürültülü verilerde dahi ayırt edici temsiller elde edilmesini sağlamaktadır.

Ayrıca CNN'lerin, zamansal bağımlılıkları modelleyen LSTM yapılarıyla birlikte kullanıldığı hibrit mimarilerin, tek bir model üzerinde geliştirilen derin öğrenme modellerine kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığı belirtilmiştir (Ordóñez ve Roggen, 2016; Li vd., 2018).

- ***Derin Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning)***

Derin pekiştirmeli öğrenme yaklaşımları, eğitim ortamlarında biyometrik verilere dayalı olarak dinamik ve uyarlanabilir karar mekanizmalarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşımlarda sistem, öğrencinin anlık durumunu (örneğin uyku hali, dikkat düzeyi veya bilişsel yük) bir “durum” olarak ele almaktadır. Farklı pedagojik müdahaleleri ise “eylem” olarak tanımlamaktadır. Taherisadr vd. (2023) tarafından geliştirilen ERUDITE, öğrencilerin öğrenme süreçlerini fizyolojik sinyaller üzerinden izleyerek uyarlanabilir kararlar almayı amaçlayan, yapay zeka tabanlı bir öğrenme destek sistemidir. Bu tür sistemlerde sıklıkla kullanılan Q-öğrenme (Q-Learning) algoritması, pekiştirmeli öğrenme yaklaşımına dayalı olup, sistemin farklı öğrenme durumlarında hangi eylemin en uygun sonucu doğurduğunu deneyim yoluyla öğrenmesini sağlar. ERUDITE kapsamında, öğrencilerden elde edilen EEG verileri, öğrenme durumundaki iyileşme düzeyi ve sınav performansı gibi çıktılar, sistem tarafından birer ödül sinyali olarak değerlendirilmektedir. Bu ödüller doğrultusunda sistem, zaman içinde ara verme, öğrenme ortamını değiştirme ya da sanal gerçeklik destekli içerik sunma gibi müdahalelerden hangisinin öğrenme sürecini daha olumlu etkilediğini belirlemektedir (Taherisadr vd., 2023). Bu tür yaklaşımlar, biyometrik verilerin yalnızca analiz edilmesiyle sınırlı kalmayıp, doğrudan uyarlanabilir öğrenme ortamlarının tasarımına entegre edilebileceğini göstermektedir.

3.3. Diğer Özelleşmiş Yaklaşımlar

Son yıllarda, eğitim ortamlarında biyometrik verilerin analizinde yalnızca geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleriyle sınırlı kalınmadığı; veri hacmi, hesaplama gereksinimleri ve gerçek zamanlı analiz ihtiyacına bağlı olarak özelleşmiş yapay zeka

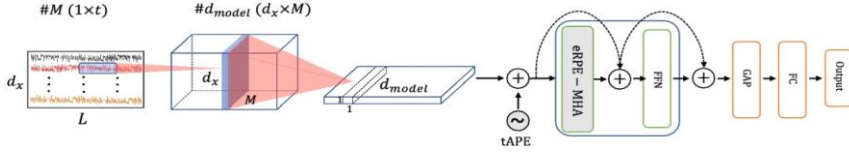
yaklaşımlarının da geliştirildiği görülmektedir. Özellikle büyük ölçekli öğrenci verilerinin işlenmesi, gerçek zamanlı öğrenme analitiklerinin oluşturulması ve bilişsel süreçlerin modellenmesi gibi gereksinimler, dağıtık ve mimari açıdan özgün modellerin eğitim araştırmalarına entegre edilmesine zemin hazırlamıştır.

- ***Distributed Machine Learning (DML)***

DML yaklaşımları, büyük hacimli ve yüksek frekanslı verilerin tek bir merkezde işlenmesi yerine, farklı bilişim düğümleri (computing nodes) arasında paylaştırılarak paralel biçimde analiz edilmesini amaçlamaktadır. Eğitim bağlamında bu yöntemler, özellikle sınav ve değerlendirme süreçlerinde öğrencilerden eş zamanlı olarak toplanan biyometrik ve davranışsal verilerin gerçek zamanlı analizinde kullanılmaktadır. Örneğin, sınav esnasında öğrencilerin bakış yönü ve desenleri, yazma hızı gibi veriler, DML sayesinde gerçek zamanlı analiz edilebilmektedir (Patil vd., 2023).

- ***ConvTran***

ConvTran, çok değişkenli zaman serisi verilerinin sınıflandırılması için geliştirilmiş, CNN ile transformatör mimarisini birleştiren bir derin öğrenme modelidir. Model, konvülyasyon katmanları aracılığıyla zaman serilerindeki yerel örüntüleri öğrenirken, transformatörün dikkat mekanizması sayesinde uzun vadeli zamansal ilişkileri etkili biçimde modelleyebilmektedir (Foumani vd., 2024). Ayrıca ConvTran, zaman serilerinde konum bilgisinin daha doğru temsil edilmesini sağlayan geliştirilmiş konum kodlama yaklaşımları kullanarak, farklı zaman adımlarındaki veriler arasındaki ilişkilerin daha iyi yakalanmasına olanak tanımaktadır (Şekil 8). Bu özellikleriyle ConvTran, biyometrik zaman serilerinin analizinde güçlü ve esnek bir model olarak öne çıkmaktadır. Eğitim ortamlarında öğrencilerin üstbilişsel (planlama, izleme) ve düşük bilişsel süreçlerini tahmin etmede başarılı bir model olarak kullanıldığı görülmektedir (Raković vd., 2024).



Şekil 8. ConvTran Mimarisi (Foumani vd., 2024)

Şekil 8’de, ConvTrans modeli ile çok değişkenli zaman serisi verileri üzerindeki örüntülerin ve değişkenler arasındaki ilişkilerin nasıl anlamlandırıldığı gösterilmektedir. Modelin ilk aşamasında zaman boyutuna odaklanarak giriş verisine birden fazla zamansal filtre uygulanmakta ve zaman içerisindeki tekrar eden desenler (örneğin artış-azalış eğilimleri, ritimler) öğrenilmektedir. İkinci aşamada ise, zamansal filtreleme sonucunda elde edilen çıktı üzerine uzamsal (spatial) filtreler uygulanmaktadır. Bu işlemle, çok değişkenli zaman serilerinde farklı değişkenler (örneğin kalp atışı, hareket, solunum) arasındaki ilişkiler yakalanmakta ve bu bilgiler birer gömülü temsil (embedding) haline dönüştürülmektedir. Benzer şekilde, Transformer mimarisindeki Feed Forward Network (FFN) katmanları da önce boyutu genişletip sonra tekrar daraltarak değişkenler arası etkileşimleri öğrenmektedir. Bu nedenle ConvTran’daki bu tasarım, Transformer yapılarıyla kavramsal olarak uyumludur.

4. Biyometrik Veriye Dayalı Yapay Zeka Destekli Eğitim Uygulamaları

Son yıllarda, giyilebilir cihazlar ve sensör tabanlı sistemler yoluyla elde edilen biyometrik verilerin, eğitim bağlamında yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak incelendiği çok sayıda bilimsel çalışma literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalar, öğrencilerin akademik performansları, bilişsel ve duyuşsal durumları ile bireysel özelliklerinin, bireylerin fizyolojik ve davranışsal verileri üzerinden modellenebileceğini göstermektedir. Aşağıda, biyometrik verilerin eğitim araştırmalarında yapay zeka temelli yaklaşımlarla ele alındığı ve literatürde öne çıkan bazı temsili çalışmalar özetlenmiştir.

Sano vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 66 üniversite öğrencisinden 30 gün boyunca akıllı telefonlar ve giyilebilir sensörler aracılığıyla biyometrik veriler toplanmıştır. Bu veriler akademik başarı, uyku kalitesi, stres düzeyi ve zihinsel sağlık göstergeleriyle

ilişkilendirilmiştir. Çalışma kapsamında, deney öncesi ve sonrası çeşitli psikometrik ölçekler uygulanmış ve günlük öz-bildirimler alınmıştır. Toplanan yaklaşık 700 değişken üzerinden, biyometrik verilerin farklı başarı, uyku ve stres gruplarını ayırt etme gücü incelenmiştir. SVM kullanılarak geliştirilen sınıflandırma modellerinde %67-%92 arasında değişen doğruluk değerleri rapor edilmiştir. Bulgular, nesnel biyometrik verilerin öznel bildirimlerle birlikte anlamlı öngörüler sunabildiğini göstermektedir.

Kim vd. (2021) tarafından yürütülen başka bir çalışmada, bir dönem boyunca 138 birinci sınıf üniversite öğrencisinden akıllı telefon sensörleri, giyilebilir cihazlar ve öz-bildirim anketleri yoluyla çok boyutlu veriler toplanmıştır. Fiziksel sağlık, hareketlilik, sosyal etkileşim ve zihinsel sağlık göstergelerini içeren bu veriler, akademik başarıyla ilişkili faktörlerin belirlenmesinde kullanılmıştır. Lojistik regresyon ve SVM modelleriyle yapılan analizler, yüksek akademik başarı gösteren öğrencilerin akademik ortamlarda daha fazla zaman geçirdiğini, uyku süresindeki azalışın başarıyla ilişkili olduğunu; buna karşın stresin doğrudan etkisinin sınırlı, depresyon ve anksiyetenin ise olumsuz etkilerinin belirgin olduğunu ortaya koymuştur.

Herrera-Alcántara vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sekiz bilgisayar mühendisliği öğrencisinden bir dönem boyunca akıllı saatler aracılığıyla toplanan biyometrik veriler kullanılarak günlük yaşam aktivitelerinin tanınması amaçlanmıştır. Katılımcıların etiketlediği aktivitelerden elde edilen veriler, zaman ve dalgacık tabanlı özelliklere dönüştürülmüş ve çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarıyla sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle RF algoritmasının %86,9 doğruluk oranı ile aktivite tanıma görevinde öne çıktığını göstermiştir. Bu çalışma, giyilebilir sensör verilerinin güvenilir biçimde davranış tanıma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Amin vd. (2022) tarafından yapılan araştırmada ise gerçek sınav koşullarında giyilebilir cihazlardan elde edilen fizyolojik sinyaller kullanılarak akademik performans tahmini gerçekleştirilmiştir. Üç farklı sınav sürecinde toplanan EDA, kalp atış hızı ve cilt sıcaklığı verileri, farklı zaman pencerelerine bölünerek çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarıyla (kNN, SVM, Karar Ağaçları) analiz edilmiştir. Bulgular, sınav performansının %70-80 doğruluk aralığında tahmin edilebildiğini ve en iyi sonuçların kısa zamanlı segmentasyonla eğitilen kNN modeliyle elde

edildiğini göstermiştir. Bu çalışma, gerçek yaşam stres koşullarında biyometrik verilerin akademik başarı öngörüsünde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Zufferey vd. (2023) tarafından yürütülen çalışmada, giyilebilir aktivite takip cihazlarından elde edilen biyometrik veriler kullanılarak üniversite öğrencilerinin beş faktör kişilik özelliklerinin tahmin edilebilirliği incelenmiştir. Dört ay boyunca toplanan çoklu sensör verileriyle geliştirilen makine öğrenmesi modelleri (SVM, RF), özellikle Açıklık, Dışadönüklük ve Nevrotiklik boyutlarında rastgele tahminden anlamlı derecede daha iyi sonuçlar üretmiştir. Bulgular, biyometrik verilerin yalnızca davranışsal ya da akademik değişkenler için değil, bireysel özelliklerin modellenmesi açısından da potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Bu bölümde ele alınan çalışmalar, giyilebilir cihazlar ve sensör tabanlı sistemler aracılığıyla toplanan biyometrik verilerin, yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edilmesinin eğitim süreçlerine ilişkin çok boyutlu ve derinlemesine çıkarımlar sunabildiğini ortaya koymaktadır. Literatürden hareketle, öğrencilerin bireysel özellikleri, akademik performansları, bilişsel ve duyuşsal durumları yalnızca geleneksel ölçme araçlarıyla değil, günlük yaşam içinde pasif ve sürekli biçimde toplanan biyometrik veriler üzerinden de yapay zeka ile güvenilir biçimde modellenebileceği gösterilmiştir. Gelecek çalışmalarda, çoklu veri kaynaklarını bir araya getiren, gerçek zamanlı ve uyarlanabilir yapay zeka temelli öğrenme analitiklerinin geliştirilmesi, kişiselleştirilmiş ve sürdürülebilir eğitim yaklaşımları açısından literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Abromavičius, V., Serackis, A., Katkevičius, A., Kazlauskas, M. ve Sledevič, T. (2023). Prediction of exam scores using a multi-sensor approach for wearable exam stress dataset with uniform preprocessing, *Technology and Health Care*, 31(6), 2499-2511.
- Alvarez, V., Bower, M., de Freitas, S., Gregory, S. ve De Wit, B. (2016). The use of wearable technologies in Australian universities: Examples from environmental science, cognitive and brain sciences and teacher training. In *World Conference on Mobile and Contextual Learning* (15th: 2016) (pp. 25-32). University of Technology, Sydney.
- Amin, M.R., Wickramasuriya, D.S. ve Faghih, R.T. (2022). A wearable exam stress dataset for predicting grades using physiological signals, *IEEE Healthcare Innovations and Point of Care Technologies (HI-POCT)*, 30-36.
- Baker, R. S. ve Inventado, P.S. (2014). *Learning analytics*. Editör: Larusson, J. ve White, B.. New York: Springer. Sayfa 61-75.
- Banihashem, S., Aliabadi, K., Pourroostaei Ardakani, S., Nili AhmadAbadi, M. ve Delavar, A. (2019). Investigation on the role of learning theory in learning analytics, *Interdisciplinary Journal of Virtual Learning in Medical Sciences*, 10, 14-27.
- Cernea, D. ve Kerren, A. (2015). A survey of technologies on the rise for emotion-enhanced interaction, *J. Vis. Lang. Comput.*, 31, 70-86, doi: 10.1016/j.jvlc.2015.10.001.
- Cowperthwait, A.L., Campagnola, N., Doll, E.J., Downs, R.G., Hott, N.E., Kelly, S.C., Montoya, A., Bucha, A.C., Wang, L. ve Buckley, J.M. (2015). Tracheostomy overlay system: An effective learning device using standardized patients, *Clinical Simulation in Nursing*, 11(5), 253-258.
- Dhamdhere, D., Sonawane, A., Sonawane, S., Shinde, O. ve Shimpi, A. (2023). Detection of phishing sites using machine learning, *International Journal of Software Computing and Testing*, 9(1), 33-39.

- Fidalgo-Blanco, Á., Sein-Echaluce, M.L., García-Peñalvo, F.J., ve Conde, M.Á. (2015). Using learning analytics to improve teamwork assessment, *Computers in Human Behavior*, 47, 149-156.
- Foumani, N.M., Tan, C.W., Webb, G.I. ve Salehi, M. (2024). Improving position encoding of transformers for multivariate time series classification, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 38(1), 22-48.
- Herrera-Alcántara, O., Barrera-Animas, A.Y., González-Mendoza, M. ve Castro-Espinoza, F. (2019). Monitoring student activities with smartwatches: On the academic performance enhancement, *Sensors*, 19(7), 1605.
- Hong, H., Dai, L. ve Zheng, X. (2025). Advances in wearable sensors for learning analytics: Trends, challenges, and prospects. *Sensors*, 25(9), 2714.
- Jiang, W. ve Yin, Z. (2015, October). Human activity recognition using wearable sensors by deep convolutional neural networks. *In Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia* (pp. 1307-1310).
- Jordan, M.I. ve Mitchell, T.M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects, *Science*, 349(6245), 255-260.
- Kalita, E., Oyelere, S.S., Gaftandzhieva, S., Rajesh, K.N., Jagatheesaperumal, S.K., Mohamed, A., Elbarawy, Y.M., Desuky, A.S., Hussain, S., Cifci, M.A., Theodorou, P., Hilčenko, S., Hazarika, J. ve Ali, T. (2025). Educational data mining: A 10-year review, *Discover Computing*, 28(1), 81.
- Khosravi, S., Bailey, S.G., Parvizi, H. ve Ghannam, R. (2022). Wearable sensors for learning enhancement in higher education, *Sensors*, 22(19), 7633.
- Kim, A., Nikseresht, F., Dutcher, J.M., Tumminia, M., Villalba, D., Cohen, S., Creswel, K., Creswell, D., Dey, A.K., Mankoff, J. ve Doryab, A. (2021). Understanding health and behavioral trends of successful students through machine learning models, *International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies*, 516-525. Springer International Publishing.
- Lampropoulos, G. ve Evangelidis, G. (2025). Learning analytics and educational data mining in augmented reality, virtual reality, and the

- metaverse: A systematic literature review, content analysis, and bibliometric analysis, *Applied Sciences*, 15(2), 971.
- Laverde, R., Rueda, C., Amado, L., Rojas, D. ve Altuve, M. (2018, July). Artificial neural network for laparoscopic skills classification using motion signals from apple watch. In *2018 40th annual international conference of the ieee engineering in medicine and biology society (embc)* (pp. 5434-5437). IEEE.
- Liao, Y., Poudel, B., Kumar, P. ve Sensemier, M. (2022, October). Long short-term memory neural networks for predicting dynamic response of structures of high complexities. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 86670, p. V005T07A065). American Society of Mechanical Engineers.
- Li, F., Shirahama, K., Nisar, M. A., Köping, L. ve Grzegorzec, M. (2018). Comparison of feature learning methods for human activity recognition using wearable sensors, *Sensors*, 18(2), 679.
- Meini, V., Bachi, L., Omezzine, M.A., Procissi, G., Pigni, F. ve Billeci, L. (2025). Artificial intelligence for the analysis of biometric data from wearables in education: A systematic review, *Sensors*, 25(22), 7042.
- Mijwil, M.M., Aggarwal, K., Sonia, S., Al-Mistarehi, A.H., Alomari, S., Gök, M., Zein Alaabdin, A.M. ve Abdulrhman, S.H. (2022). Has the future started? The current growth of artificial intelligence, machine learning, and deep learning, *Iraqi Journal for Computer Science and Mathematics*, 3(1), 13.
- Nabiyev, V. V. (2012). *Yapay Zekâ: İnsan-Bilgisayar Etkileşimi*. Seçkin Yayıncılık.
- Niegel, P., Vargo, A., Tag, B. ve Kise, K. (2025). Unobtrusive stress detection using wearables: Application and challenges in a university setting, *Frontiers in Computer Science*, 7(3).
- Ordóñez, F. J. ve Roggen, D. (2016). Deep convolutional and LSTM recurrent neural networks for multimodal wearable activity recognition, *Sensors*, 16(1), 115.
- Patil, S., Sungheetha, A., Kalaivaani, P.T., Kandaswamy, V.A. ve Jagannathan, S.K. (2023, November). Design and behavioral analysis of students during examinations using distributed machine learning. In *2023 International Conference on Research*

- Methodologies in Knowledge Management, Artificial Intelligence and Telecommunication Engineering (RMKMATE)* (pp. 1-6). IEEE.
- Pelánek, R., Rihák, J. ve Papoušek, J. (2016, April). Impact of data collection on interpretation and evaluation of student models. *In Proceedings of the sixth international conference on learning analytics & knowledge* (pp. 40-47).
- Raković, M., Li, Y., Foumani, N.M., Salehi, M., Kuhlmann, L., Mackellar, G., Martinez-Maldonado, R., Haffari, G., Swiecki, Z., Li, X., Guanliang Chen, G. ve Gašević, D. (2024, March). Measuring affective and motivational states as conditions for cognitive and metacognitive processing in self-regulated learning. *In Proceedings of the 14th Learning Analytics and Knowledge Conference* (pp. 701-712).
- Sano, A., Phillips, A.J., Amy, Z.Y., McHill, A.W., Taylor, S., Jaques, N., Czeisler, C.A., Klerman, E.B. ve Picard, R.W. (2015). Recognizing academic performance, sleep quality, stress level, and mental health using personality traits, wearable sensors and mobile phones. *2015 IEEE 12th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*, 1-6. IEEE.
- Taherisadr, M., Al Faruque, M. A. ve Elmalaki, S. (2023). Erudite: Human-in-the-loop iot for an adaptive personalized learning system, *IEEE Internet of Things Journal*, 11(8), 14532-14550.
- Verikas, A., Vaiciukynas, E., Gelzinis, A., Parker, J. ve Olsson, M.C. (2016). Electromyographic patterns during golf swing: Activation sequence profiling and prediction of shot effectiveness. *Sensors*, 16(4), 592.
- Zhou, Z.X., Tam, V., Lui, K.S., Lam, E.Y., Yuen, A., Hu, X. ve Law, N. (2019, November). Applying deep learning and wearable devices for educational data analytics. *In 2019 IEEE 31st International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)* (pp. 871-878). IEEE.
- Zufferey, N., Humbert, M., Tavenard, R. ve Huguenin, K. (2023). Watch your watch: Inferring personality traits from wearable activity trackers. *32nd USENIX Security Symposium (USENIX Security 23)*, 193-210.

EĞİTİMDE BİYOMETRİK VERİ KULLANIM ÖRNEKLERİ

Muharrem AYDIN⁴

Öğrenme ortamları, günümüzde yalnızca bilgi aktarımının yapıldığı fiziksel mekanlar olmaktan çıkarak, öğrenme süreçlerinin dijitalleştiği, kişiselleştirildiği ve veriye dayalı kararların alındığı dinamik bir ekosisteme dönüşmektedir. Bu dönüşüm sürecinde, öğrenci kimliğinin doğrulanmasından öğrenme deneyiminin nörobiyolojik temellerinin anlaşılmasına kadar geniş bir yelpazede biyometrik teknolojiler kritik bir rol oynamaktadır (Badshah vd., 2023). Biyometrik sistemler, bireylerin kendine özgü fiziksel (parmak izi, iris, yüz) veya davranışsal özelliklerini analiz ederek kimlik tespiti ve doğrulama sağlayan bilimsel yöntemler bütünüdür (Jain vd., 2004). Geleneksel eğitim araştırmaları, öğrenme çıktılarını ve öğrenci durumlarını değerlendirmek için genellikle öz bildirim ölçeklerine dayanmaktadır; ancak bu yöntemler öznel, hatırlama hatalarına açıktır ve gerçek zamanlı veri sunma konusunda sınırlıdır (Kim vd., 2024). Buna karşılık, biyometrik ve giyilebilir sensör teknolojileri, öğrenme sürecindeki bilişsel, duyuşsal ve fiziksel durumları sürekli, objektif ve gerçek zamanlı olarak izleme imkanı sunarak "Eğitimsel Sinirbilim" ve "Öğrenme Analitiği" alanlarında yeni bir paradigma yaratmaktadır (Glasserman-Morales vd., 2023).

Önceleri dijital sistem kayıtlarından elde edilen veriler doğrultusunda öğrenme sürecine yönelik veri sağlayan öğrenme analitiği süreçleri, biyometrik verilerin dahil edilmesiyle fiziksel alan (yüz ifadeleri, göz hareketleri vb.), dijital alan (sistem log kayıtları, tıklama hareketleri vb.), fizyolojik alan (EEG, kalp atış hızı, vücut sıcaklığı vb.), psikometrik alan (anketler, ölçekler vb.) ve çevresel alandan (ışık yoğunluğu, ortam sıcaklığı, nem vb.) elde edilen verilerle bütünleştirilerek çok modlu öğrenme analitiklerinin geliştirilmesine olanak sağlamakta, yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmalarının bu fizyolojik verilerle entegrasyonu, eğitimcilerin öğrenci katılımını, stres seviyelerini ve bilişsel yüklerini biyometrik yöntemlerle takip etmelerine olanak tanımaktadır

⁴ Dr. Öğr. Üyesi Muharrem AYDIN

Trabzon Üniversitesi, Çarşıbaşı Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü,
Trabzon, TÜRKİYE

ORCID: 0000-0001-7184-9544, muharremaydin@trabzon.edu.tr

(Mohammadi vd., 2025; Meini vd., 2025). Bu teknolojik entegrasyon, yalnızca yönetsel yükleri hafifletmekle kalmamakta, aynı zamanda öğrencinin zihinsel ve fiziksel iyilik halini merkeze alan kişiselleştirilmiş öğrenme ortamlarının tasarlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda eğitimde biyometrik verilerin kullanım alanları ve bu teknolojilerin odaklandığı temel süreçler, kimlik doğrulama ve yönetim, öğrenci analizi ve takibi ve kişiselleştirilmiş öğrenme olmak üzere üç temel eksenle ele alınabilir.

İzleyen başlıklarda, bu üç temel eksen; kullanılan sensör teknolojileri, analiz yöntemleri ve alanyazındaki güncel çalışmalar ışığında ayrıntılı olarak ele alınmış ve örnek uygulamalara yer verilmiştir.

1. Kimlik Doğrulama ve Yönetim Süreçlerinde Biyometrik Veri Kullanımı

Eğitim süreçlerinde biyometrik teknolojilerin ilk ve en yaygın kullanım alanı, kampüs güvenliğinin sağlanması, kimlik doğrulama süreçlerinin güçlendirilmesi ve idari süreçlerin verimliliğinin artırılmasıdır. Geleneksel yoklama yöntemleri (kağıt-kalem, isim okuma) zaman alıcıdır ve sahteciliklere açıktır (Necochea-Chamorro vd., 2024). Biyometrik sistemler, parmak izi, yüz tanıma ve iris tarama gibi teknolojiler aracılığıyla bu süreçleri otomatize ederek hem zaman tasarrufu sağlamak hem de kayıtların bütünlüğünü garanti altına almaktadır (Hoo ve Ibrahim, 2019).

Yoklama yönetiminin fiziksel verilerle alınmasının yanı sıra özellikle çevrimiçi sınavlarda ve uzaktan eğitim platformlarında akademik dürüstlüğü sağlanması büyük bir zorluktur. Bu bağlamda, yüz takibi, baş duruşu analizi ve göz izleme sistemleri, sınav esnasında öğrencinin odağını ve potansiyel kopya çekme davranışlarını tespit etmek için kullanılmaktadır (Kaddoura vd., 2023). Örneğin, öğrencinin başını belirli bir eşik değerin üzerinde çevirmesi veya bakışlarını ekrandan uzun süre ayırması, makine öğrenmesi algoritmaları tarafından şüpheli davranış olarak işaretlenebilmektedir. Ayrıca, klavye tuş vuruş dinamikleri ve IP sahteciliğini önleyen ağ trafiği analizleri de biyometrik güvenlik katmanları olarak işlev görmektedir (Ghosh vd., 2018). Aşağıda bu alanda yürütülen çalışmalara ilişkin örnek uygulamalara yer verilmiştir.

Örnek Uygulama: Parmak izi ile mobil uygulama entegreli akıllı yoklama sistemi

- Kullanılan Teknolojiler: Parmak izi sensörü, Bluetooth Modülü
- Kullanılan Algoritmalar: Biyometrik şablon eşleştirme ve kayıt algoritmaları

Ghosh vd. (2018), eğitim kurumlarında geleneksel yoklama yöntemlerinin ders süresinin yaklaşık %20'sini harcadığını tespit etmiş ve idari yükü hafifleterek öğretim süresini artırmak ve "başkası yerine imza atma" gibi sahtecilikleri önlemek için Akıllı Yoklama Sistemi (SAS) adını verdikleri biyometrik bir cihaz geliştirmiştir. Bu taşınabilir cihaz, Arduino UNO mikrodenetleyicisi ve parmak izi sensörü kullanarak yoklama sürecini otomatize etmekte; verileri bluetooth aracılığıyla öğretim üyesinin telefonundaki bir Android uygulamasına anlık olarak aktarmaktadır. Geliştirilen cihazın ve Android uygulamanın bir görüntüsü Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Geliştirilen Android Uygulama ve Biyometrik Cihaz
(Ghost vd., 2018)

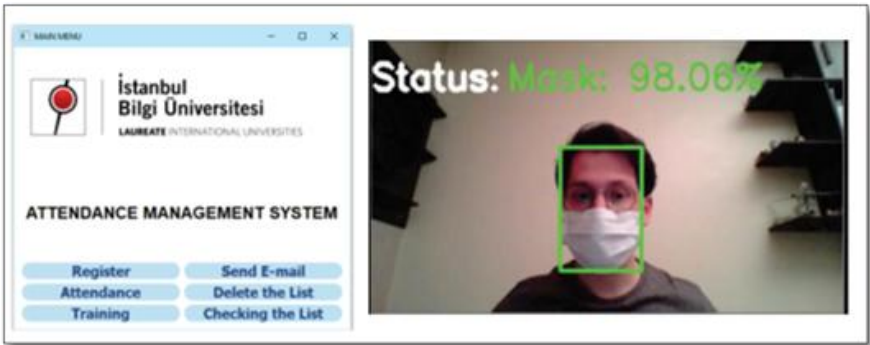
Geliştirilen sistem Hindistan'ın Pune şehrinde bulunan Ajeenkya DY Patil Üniversitesi, Mühendislik Fakültesinde kullanılmıştır. Biyometrik verilerin toplanması için optik parmak izi sensörü kullanılmış, Arduino UNO, bluetooth modülü ve LCD ekran ile sistem tamamlanmıştır. Yoklama sürecinde geliştirilen cihazın kullanımıyla birlikte ders başına ortalama 11 dakika 53 saniye ve gün başına toplam 57 dakika 30 saniye tasarruf edildiği tespit edilmiştir. RFID kartların aksine parmak izinin

kopyalanamaması sahte katılımı önlemiştir. Ayrıca elde edilen verilerin mobil uygulamaya aktarılması ve e-posta ile idari birimlere gönderilebilmesi biyometrik sistemlerin idari ve operasyonel olarak dijital okul yönetimiyle nasıl bütünleşebileceğine iyi bir örnektir.

Örnek Uygulama: Yüz tanıma ve maske tespiti kullanan otomatik öğrenci yoklama sistemi

- Kullanılan Teknolojiler: Web Kamera
- Kullanılan Algoritmalar: HOG ve Haar-Cascade (Yüz tespiti), CNN (Yüz tanıma/kodlama), SVM (Sınıflandırma), Yüz İşaret Noktası Kestirimi

Akay vd. (2020), Covid-19 pandemi döneminde zaman alıcı ve temas gerektiren geleneksel yöntemlerin yerine bilgisayarlı görü ve yüz tanıma teknolojisini kullanarak akıllı yoklama sistemi geliştirmişlerdir. Ayrıca öğrencilerin maske takıp takmadıklarını denetleyen bir kontrol yapısını da sisteme entegre etmişlerdir. Türkiye'de bulunan İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü bünyesinde gerçekleştirilen çalışmada yüz tespiti için "Yönlendirilmiş Gradyanların Histogramı" (HOG) ve "Haar-Cascade" algoritmalarını karşılaştırmış, yüz tanıma için ise Evrişimli Sinir Ağları (CNN) kullanmışlardır. Sistemin öğretim elemanları tarafından kullanılabilmesi için Python tabanlı bir grafiksel kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Bu arayüz üzerinden öğrenci kaydı, yoklama alma, model eğitimi ve raporlama işlemleri yapılabilmektedir. Sistem arayüzünün ve maske tanıma işleminin bir görüntüsü Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. Görüntü İşleme İle Yoklama ve Maske Kontrolü Uygulaması (Akay vd. 2020)

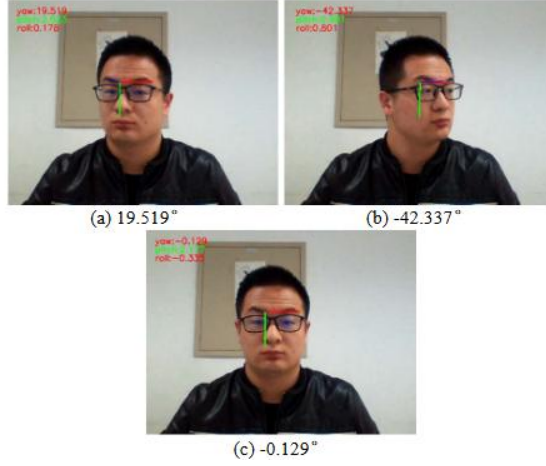
Uygulamada tespit edilen yüz üzerinde göz, burun ve dudak gibi yapıları içeren 68 farklı yüz işareti (landmark) belirlenmiş ve CNN algoritmaları kullanılarak her yüz verisi 128 boyutlu bir vektöre dönüştürülmüştür. Elde edilen vektörler, veri tabanında kayıtlı vektörlerle eşleştirilmiş ve öğrencinin kimliği tespit edilmiştir.

Biyometrik sistemlerin kimlik tespiti aracı olarak kullanılmasının yanı sıra maske kullanımı gibi kritik sağlık protokollerinin denetimiyle bütünleşen hibrit bir güvenlik mekanizması olarak kullanılması, değişen aydınlatma ve duruş koşullarında dahi yüksek doğruluk payı sunması yönleriyle çalışma eğitim kurumlarının operasyonel süreçlerinde biyometrik veri ve yapay zeka teknolojilerinin bir arada kullanılmasına örnek gösterilebilir.

Örnek Uygulama: Baş duruşu ve ağız durumu analizi ile çevrimiçi sınavlarda anormal davranış tespiti

- Kullanılan Teknolojiler: Web Kamera
- Kullanılan Algoritmalar: AdaBoost ve Haar (Yüz tespiti), CNN (Baş pozisyonu kestirimi), Sobel Kenar Tespiti (Ağız durumu), Kural tabanlı çıkarım

Hu, Jia ve Fu (2018) çevrimiçi sınavlarda sadece öğrenci kimliğini doğrulamaya odaklanan geleneksel yöntemlerin yerine sınav süresince öğrencinin sergilediği "anormal davranışları" (kopya çekme şüphesini) otomatik olarak tespit edebilen, görüntü tabanlı bir izleme sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen sistem, standart bir web kamerası kullanarak öğrencinin kafa duruşunu ve ağız hareketlerini analiz etmekte; öğrencinin ekrandan başka bir yere bakıp bakmadığını veya konuşup konuşmadığını belirlemektedir. Kafa duruşunun hesaplanmasında üç boyutlu uzayda Euler açılarıyla (yaw, pitch ve roll) sağlanmaktadır. Üç boyutlu düzlemde sağa-sola dönüş Yaw açısıyla, yukarı-aşağı eğilme Pitch açısıyla ve yana eğilme Roll açısıyla elde edilmektedir. Çalışmada öğrencinin kafasını sağa yada sola çevirmesi, yukarı yada aşağı eğmesi "anormal davranış" olarak nitelendirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Sınav Katılımcısının Baş Duruşu Tahmini (Hu, Jia ve Fu, 2018)

Çin’de bulunan Dalian Denizcilik Üniversitesi (Dalian Maritime University) Bilgi Bilimi ve Teknolojisi Fakültesinde gerçekleştirilen uygulamada araştırmacılar web kamerası aracılığıyla yüz tespiti yapmış ve CNN algoritmaları ile kafa açısını hesaplamışlardır. Sistem, öğrencinin kafasını 20 ardışık kare boyunca 15 dereceden fazla sağa/sola çevirmesini "anormal davranış" olarak etiketlemektedir. Benzer şekilde öğrencinin ağız açıklığı da tespit edilerek 20 ardışık kare boyunca yarıdan fazla ağız açıklığını “anormal davranış” olarak nitelemektedir. Yapılan araştırmada sistemin %90 doğruluk oranı ve %5 yanlış alarm oranı ile insan gözetmenlere yakın bir performans sergilediği belirtilmiştir.

Yapılan çalışma insan gözetmenlerin çok sayıda öğrenciyi aynı anda izlemesinin zorluğunu ve maliyetini göz önünde bulundurulduğunda sürekli davranışsal gözetim sağlaması, gerçek zamanlı anormal davranış ölçümü ve daha geniş öğrenci grupları için insan faktörünü azaltması yönleriyle biyometrik verilerin verimli ve nispeten daha ucuz kaynaklarla sınav süreçlerinin yönetilmesinde kullanımına örnek gösterilebilir.

2. Öğrenci Analizi ve Takibinde Biyometrik Veri Kullanımı

Eğitim süreçlerinde biyometrik verilerin kullanıldığı bir diğer alan öğrencinin zihinsel çabasını ve bilgi işleme kapasitesini objektif olarak ölçerek gerçekleştirilen bilişsel durum ve dikkat izleme alanıdır. Bu alanda biyometrik verilerin elde edilmesi için en sık kullanılan yöntemler

Elektroensefalografi (EEG), Fonksiyonel Yakın Kızılötesi Spektroskopi (fNIRS) ve göz izleme (eye-tracking) teknolojileridir (Jeun vd., 2022). EEG sinyalleri, öğrencinin dikkat seviyesini ve zihinsel iş yükünü milisaniye hassasiyetinde takip edebilmektedir. Araştırmalar, özellikle teta beyin dalgası aktivitesindeki artışın ve alfa beyin dalgası aktivitesindeki düşüşün, artan bilişsel yük ve zihinsel çaba ile ilişkili olduğunu göstermektedir (Gkintoni vd., 2025). Örneğin, sanal gerçeklik veya 3 boyutlu öğrenme ortamlarında, öğrencilerin bilişsel yüklerinin dengelenmesi için göz bebeği büyümesi ve bakış sabitleme süreleri gibi göz izleme metrikleri kullanılmaktadır (Chiossi vd., 2025). Bu veriler, yapay zeka destekli uyarlanabilir öğrenme sistemlerini besleyerek, içeriğin zorluk derecesinin öğrencinin anlık bilişsel durumuna göre gerçek zamanlı olarak ayarlanmasını sağlamaktadır. Böylece, öğrencinin "bilişsel aşırı yüklenme yaşamadan optimum öğrenme bölgesinde kalması hedeflenmektedir. Bununla birlikte öğrenme, zihinsel çaba gerektiren bilişsel işlemlerin yanı sıra yoğun duygusal süreçleri de barındıran çok katmanlı bir eylemdir. Geleneksel ölçme araçlarının aksine, giyilebilir sensörler ve biyometrik teknolojiler; zihinsel süreçlerle birlikte öğrencinin o anki duygu durumunu kesintisiz ve objektif verilerle analiz etme imkanı da sunmaktadır. Özellikle otonom sinir sistemi aktivitesini yansıtan elektrodermal aktivite (EDA/GSR), kalp atış hızı değişkenliği (HRV), yüz ifadesi analizi ve termal görüntüleme araçlarıyla öğrencinin duygu durumuna yönelik çıkarım yapılabilmektedir. Fizyolojik olarak stresli durumlarda sempatik sinir sistemi aktivitesi artarken, kalp atış hızı değerlerinde belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş, öğrencinin maruz kaldığı bilişsel ve ya duygusal yükün objektif bir göstergesi olarak kabul edilir. Ayrıca nano-biyosensör teknolojilerindeki gelişmeler, tükürük veya ter analizleri aracılığıyla kortizol, dopamin ve serotonin seviyelerinin moleküler düzeyde takibini mümkün kılarak stres ve anksiyete tespitinde yeni bir boyut açmaktadır. Bu verilerin yapay zeka algoritmalarıyla işlenmesi, eğitim ortamlarında duygu durumuna yönelik sınıf genelinde stres veya sıkılma belirtileri arttığında öğretmeni uyararak ders temposunun değiştirilmesini sağlayan "Duygu Haritaları" oluşturulması ve aşırı kaygı-stres yaşayan öğrencilerin tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Alanyazında bu alanda yapılan güncel çalışmalar, farklı eğitim kademeleri ve bağlamlarında biyometrik verilerin eğitim süreçlerini iyileştirmek adına nasıl kullanıldığını somut örneklerle ortaya koymaktadır. Aşağıda bu alanda yapılan çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

Örnek Uygulama: Aktif ders anlatımında göz izleme ile dikkat izleme

- Kullanılan Teknolojiler: Tobii Glasses (Göz izleme/Kızılötesi kamera)
- Kullanılan Algoritmalar: Göz bebeği merkezli kornea yansıması takibi (Dark pupil tracking), İstatistiksel analiz (ANOVA, Wilcoxon)

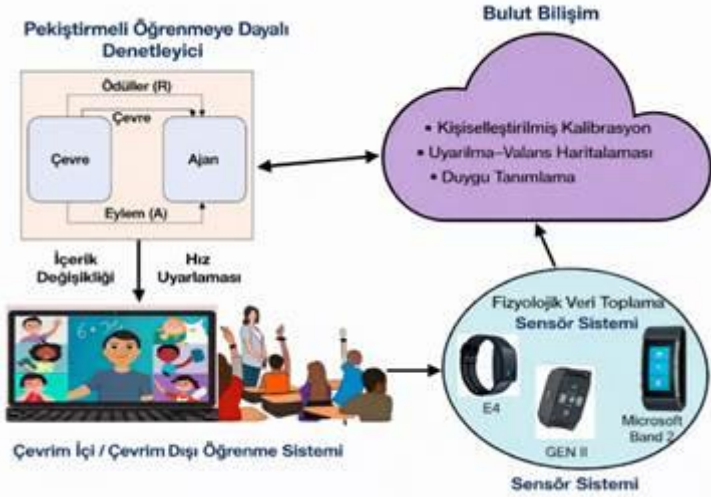
Rosengrant vd. (2021) öğrenci dikkatinin ders boyunca izlenebilmesi için giyilebilir göz izleme teknolojisi (Tobii Glasses 1) kullanılarak öğrencilerin görsel dikkatlerini izlemişlerdir. ABD'de bir devlet üniversitesinde, Entegre Fiziksel Bilimler dersi sürecinde ders anlatımı boyunca öğrencilerin göz hareketleri izlenmiştir. Beş yarıyıl boyunca toplanan ve kodlanan veriler, geleneksel görüşün aksine, etkileşimli pedagojik yaklaşımların uygulandığı sınıflarda öğrencilerin aktif dikkat oranının %89 seviyelerinde seyrettiğini ve 67 dakikaya varan kesintisiz odaklanma sürelerine ulaşabildiğini ortaya koymuştur. Eğitim sürecinde araştırmacılar, öğrencilerin görsel odaklarını detaylandırarak (Tahta: %32.9, Profesör: %25.8, Notlar: %22.1), aktif öğrenme stratejilerinin öğrenciyi pasif bir dinleyici olmaktan çıkarıp dikkatin dağılmasını engellediğini ders süreci boyunca toplanan biyometrik verilerle kanıtlamışlardır. Bu bağlamda çalışma biyometrik verilerin eğitim sürecinde dikkat izlemeye yönelik kullanımına örnek teşkil etmektedir.

Örnek Uygulama: Akıllı saatler ve pekiştirmeli öğrenme ile duygu durumuna göre uyarlanan öğretim sistemi: SensEmo

- Kullanılan Sensör Teknolojileri: Akıllı bileklik (Microsoft Band 2) aracılığıyla kalp atış hızı (HR), kalp atış hızı değişikliği (HRV), elektrodermal aktivite (EDA/GSR)
- Kullanılan Algoritmalar: Fine Gaussian SVM (Duygu tanıma), Pekiştirmeli Öğrenme (Markov Karar Süreçleri - MDP), Bulanık Duygu Modellemesi

Choksi vd. (2024) öğrencilerin ders sürecindeki motivasyon ve konsantrasyon seviyelerini gerçek zamanlı izleyerek eğitime içeriğin hızı veya zorluğu konusunda anlık tavsiyeler veren "SensEmo" adında akıllı

bileklik tabanlı bir duyuşsal öğrenme sistemi geliştirmişlerdir. SensEmo sistemi, kamera veya yüz tanıma yerine, akıllı bileklik aracılığıyla öğrencilerin kalp atış hızı (HR), kalp atış hızı değişikliği (HRV), elektrodermal aktivite (EDA/GSR) ve deri sıcaklığı biyometrik verilerinden yola çıkarak öğrencilerin motivasyon ve konsantrasyonlarına yönelik anlık çıkarım yapmaktadır. Her bireyin fizyolojik tepkisi farklı olduğu için (örneğin birinin heyecanlandığında nabızı 100'e çıkarken diğerinin 120'ye çıkabilir), sistem önce kişiye özel bir kalibrasyon (min-max normalizasyonu) yaparak verileri standartlaştırmıştır. Elde edilen biyometrik verilerle öğrencinin duygu durumu meraklı, memnun, sıkılmış ve kafası karışık olmak üzere dört kategoride sınıflandırmıştır. Ardından pekiştirmeli öğrenmeye dayalı denetleyici aracılığıyla ders öğretim elemanına "hızı artır" veya "içeriği basitleştir" uyarıları vermektedir. Böylece öğretim elemanı hem yüz yüze hem de çevrimiçi derslerde öğrencilerin duygu durumuna göre ders içeriğini anlık olarak uyarlayabilmektedir. Sistemin genel işleyişi Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. SensEmo Sisteminin Genel İşleyişi (Choksi vd. (2024)'den Türkçeye çevrilmiştir.)

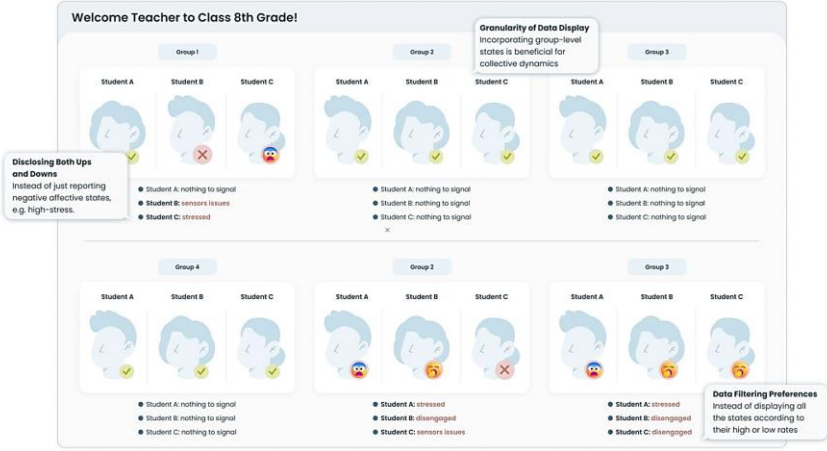
Çalışma, sınıf ortamında veya evde öğrencilerin yüzlerini kamerayla kaydetmenin yarattığı gizlilik ve ışık/açı sorunlarına karşı, akıllı bilekliklerden elde edilen fizyolojik verilerle %88.9 doğrulukla duygu tespiti yapabildiğini göstermektedir. Ayrıca çalışmada SensEmo

kullanılan çevrimiçi derslerde, sistemin öğretim hızını ve içeriğini öğrencinin duygusuna göre ayarlaması sonucunda, öğrencilerin test notlarının geleneksel yöntemlere göre ortalama %40 daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Bu yönüyle çalışma akıllı bileklik gibi giyilebilir teknolojiler aracılığıyla elde edilen biyometrik verilerin eğitim ortamında duygu ve stres ölçümünde kullanımının bir örneğini sunmaktadır.

Örnek Uygulama: K-12 öğretmenleri için öğrencilerin duygu durumlarını görselleştiren çok modlu öğrenme analitiği paneli

- Kullanılan Sensör Teknolojileri: Empatica E4 Bileklik (EDA/GSR, Nabız, İvmeölçer), Web Kamerası
- Kullanılan Algoritmalar: PyEmotion (Yüz ifadesi analizi), İstatistiksel veri toplama ve eşikleme algoritmaları

Possaghi vd. (2025) öğrenme etkinlikleri sırasında öğretmenlerin öğrencilerin duygusal durumlarını gerçek zamanlı izleyebilmeleri için Çok Modlu Öğrenme Analitiği (Multi-Modal Learning Analytics - MMLA) tabanlı bir gösterge paneli geliştirmişlerdir. 8. Sınıf seviyesindeki 44 öğrenciyle yürütülen çalışmada Empatica E4 akıllı bileklik aracılığıyla elektrodermal aktivite (EDA) ve kalp atış hızı değişkenliği (HRV) verileri ile öğrencilerin fizyolojik stres ve derse katılım seviyeleri belirlenmiştir. Aynı zamanda öğrencilerin kullandığı bilgisayarların web kameralarından alınan veriler PyEmotion yazılımı ile analiz edilerek öfke, korku, mutluluk, üzüntü, şaşkınlık, öğrenme ve nötr olmak üzere 7 farklı duygu durumu haritalandırılmıştır. Elde edilen veriler gösterge paneline anlık olarak yansıtılarak ders sürecinde öğretmenlerin öğrencilerin duygusal durumlarını anlık olarak takip etmeleri sağlanmıştır. Araştırma sürecinde geliştirilen gösterge panelinin görüntüsü Şekil 5’te sunulmuştur.



Şekil 5. Duygu Durumu Gösterge Paneli (Possaghi vd., 2025)

Araştırma Norveç'in Vestfold bölgesindeki bir ortaokulda gerçek derslerde yürütülmüştür. Araştırma sonucunda öğretmen görüşlerine göre panel aracılığıyla öğretmenler sınıfta rastgele dolaşmak yerine doğrudan ihtiyacı olan öğrencilerle iletişime geçmişler bu durum sınıf yönetimini kolaylaştırarak zaman kaybını önlemiştir. Ayrıca arayüzün sınıf oturma düzeniyle uyuşması ve anlaşılabilir renk kodları içermesi sayesinde öğrencinin durumu daha hızlı anlaşılabilmiştir. Sonuç olarak çalışma, biyometrik verilerden türetilen duygu durumu ve stres göstergelerinin, uygun arayüzler ve etik çerçevelerle sunulduğunda, öğretmenlerin farkındalığını artıran ve pedagojik müdahaleleri zamanında ve hedefli hale getiren etkili bir destek mekanizması sunduğunu göstermektedir.

Ele alınan sınıf içi öğrenme etkinlikleri, bilişsel performans ve duyuşsal durumun yanı sıra eğitim ortamı dışındaki yaşam tarzı değişkenleri de öğrenmeyi etkilemektedir. Bu bağlamda uyku düzeni, fiziksel aktivite düzeyi ve genel sağlık durumu, akademik çıktılarla yakından ilişkili temel faktörler olarak öne çıkmaktadır (Fatima vd., 2024). Öğrencilerin sınıf ortamı dışındaki günlük yaşam aktivitelerinin değerlendirilmesi geleneksel yöntemlerle kısıtlı olarak gerçekleştirilebilse de akıllı saatler (ör. Fitbit, Oura Ring), adım sayar ve uyku sensörleri gibi giyilebilir teknolojiler aracılığıyla toplanan biyometrik ve davranışsal veriler, öğrencilerin günlük yaşam pratiklerinin akademik başarı üzerindeki etkilerinin nicel olarak incelenmesine olanak tanımaktadır.

(Broaddus vd., 2021). Aşağıda biyometrik verilerin günlük aktivite takibinde kullanıldığı örnek bir uygulama paylaşılmıştır.

Örnek Uygulama: Günlük adım sayısının akademik başarıyla ilişkilendirilmesi

- Kullanılan Sensör Teknolojileri: Fitbit (İvmeölçer, Kalp atış hızı)
- Kullanılan Algoritmalar: Metabolik Eşdeğer (MET) hesaplaması (Aktif dakika için), İstatistiksel korelasyon ve regresyon modelleri

Broaddus vd. (2019) fiziksel hareketlilik ile okul başarısı arasındaki bağı üniversite seviyesindeki öğrenciler üzerinden inceledikleri çalışmalarında Fitbit cihazlarından gelen verileri ve sağlık anketlerini kullanarak, aktif bir yaşam tarzının yüksek not ortalamasıyla doğrudan bağlantılı olduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırma sürecinde göğüs kemeri gerektirmeden kalp atış hızını ölçebilmesi, adım sayısı, aktif dakikalar, kat edilen mesafe, uyku süresi ve kalitesi gibi çok boyutlu verileri sağlayabilmesi ve mobil uyumlu olması yönüyle Fitbit cihazı tercih edilmiştir. Ayrıca cihazların akıllı telefonlarla senkronize edilmesi ve Fitbit API aracılığıyla biyometrik verilere erişilebilmesi kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Çalışmada Fitbit API aracılığıyla elde edilen veriler ders notunun bir parçasını oluşturmuştur. Günde 10.000 adım atma hedefi, ders notunun %10'una etki etmektedir. Araştırma sürecinde toplanan biyometrik verilerin akademik performansla ilişkisini incelemek amacıyla istatistiksel analizler R programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Fitbit uygulaması farklı kalp atış hızı bölgelerini (Yağ Yakımı, Kardiyo, Zirve) takip etmektedir. Araştırma sürecinde özellikle yağ yakımına yönelik aktif dakikalar ve akademik başarı arasında anlamlı bir ilişki bulunmuştur. Çalışma eğitimin içine entegre edilmiş giyilebilir sensörlerin sağladığı objektif biyometrik verilerin, istatistiksel analiz yöntemleri ile incelendiğinde, üniversite öğrencilerinin akademik başarılarını öngörmeye anlamlı bir gösterge olabileceğini ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde, fiziksel aktivite düzeyi ile akademik başarı ve motivasyon arasında pozitif ve anlamlı ilişkiler saptanmıştır. Günlük adım sayısı ve kardiyovasküler zindelik gibi göstergelerin, üniversite öğrencilerinin dönem sonu not ortalamalarıyla ilişkili olduğu; düzenli

fiziksel aktivitenin beyne giden kan akışını artırarak hafıza ve yürütücü işlevleri destekleyen nörobiyolojik mekanizmaları tetiklediği belirtilmektedir (Mwakalebela vd., 2025). Buna karşılık, yetersiz beslenme veya obezite gibi sağlık durumlarının bilişsel performans üzerinde olumsuz etkiler yaratabildiği, ancak bu etkilerin fiziksel aktivite düzeyi ve sosyoekonomik değişkenlerle karmaşık bir etkileşim içinde olduğu belirtilmektedir. Bu çerçevede giyilebilir teknolojiler, öğrencilerin kendi sağlık ve yaşam tarzı verilerini izlemelerine imkan tanıyarak sağlık farkındalığını artırmakta; dolaylı olarak akademik motivasyonun ve öğrenme performansının desteklenmesine katkı sunmaktadır.

3. Kişiselleştirilmiş Öğrenme Süreçlerinde Biyometrik Veri Kullanımı

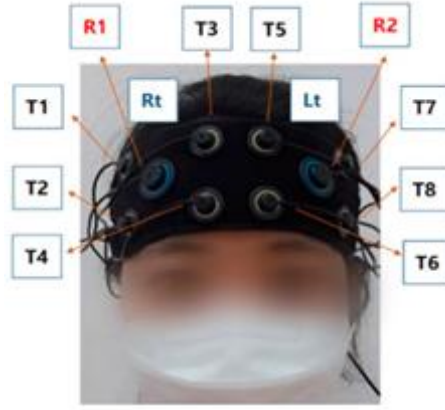
Kișiselleştirilmiş öğrenme yaklaşımları, geleneksel eğitim modellerine nazaran öğrenme deneyimini bireyin anlık ihtiyaçlarına, bilişsel kapasitesine ve duyuşsal durumuna göre uyarlamayı hedeflemektedir. Günümüzde bu yaklaşımlar, yapay zeka ve biyometrik sensör teknolojilerinin entegrasyonu ile önemli bir dönüşüm yaşamaktadır. Bilişsel Yük Teorisi (Cognitive Load Theory) ve Eğitimsel Sinirbilim (Educational Neuroscience) ilkelerine dayanan bu çerçeve, öğrenme sürecini yalnızca sınav sonuçları gibi gecikmeli ve dolaylı çıktılar üzerinden değil, öğrencinin fizyolojik ve nörolojik tepkilerinden elde edilen gerçek zamanlı ve objektif veriler aracılığıyla izlemeyi mümkün kılmaktadır (Mohammadi vd., 2025). Aşağıda bu alanda yapılan çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

Örnek Uygulama: Anlık beyin aktivitesine göre zorluk seviyesinin otomatik belirlendiği sanal gerçeklik tabanlı uzamsal bilişsel eğitim

- Kullanılan Sensör Teknolojileri: Fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi (fNIRS) teknolojisi
- Kullanılan Algoritmalar: Lojistik Regresyon (En iyi performans), SVM, KNN, Karar Ağacı (Zorluk sınıflandırması için)

Jeun ve arkadaşları (2022) sağlıklı genç yetişkinlerde "Nöral Verimlilik" sağlamak amacıyla, kişinin anlık beyin aktivitesine göre zorluk seviyesini otomatik ayarlayan kişiselleştirilmiş bir bilişsel eğitim sistemi geliştirmiştir. Çalışmada standart bir zorluk seviyesi sunmak yerine, öğrencinin Prefrontal Korteks (PFC) aktivitesine dayalı olarak

yapay zeka ile optimize edilmiş bir eğitim sunulmuştur. Güney Kore'de bulunan Soonchunhyang Üniversitesi (Soonchunhyang University) bünyesindeki Bilgisayar Mühendisliği bölümünde yürütülen çalışmada ilk olarak 45 katılımcıdan fonksiyonel yakın kızılötesi spektroskopisi (fNIRS) teknolojisi yöntemiyle prefrontal kortekste yer alan hemoglobin seviyelerine bakarak kişinin zorlandığı veya zorlanmadığı anları tahmin eden bir makine öğrenmesi algoritması geliştirilmiştir (%86.24 doğruluk düzeyi). Ardından beyin aktivitelerinin anlık olarak izlendiği Sanal Gerçeklik (VR) tabanlı uzamsal bilişsel eğitim verilmiştir. Eğitim sürecinde beyin aktivitelerine göre eğitimin zorluğu anlık olarak öğrenciye göre uyarlanmıştır. Çalışma sürecinde kullanılan fNIRS cihazının bir görüntüsü Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Araştırma Sürecinde Kullanılan OctaMon (fNIRS) cihazının bir görüntüsü (Jeun vd., 2022)

Eğitim sonrasında yapılan testlerde, katılımcıların işlem süreleri kısalmışken, aynı işi yaparken harcadıkları beyin enerjisinin anlamlı derecede düştüğü gözlemlenmiştir. Çalışma beyin aktivitelerinin ve yapay zekanın birlikte kullanılarak, öğrencinin zihinsel kapasitesine tam uyum sağlayan uyarlanabilir öğrenme ortamları geliştirilmesi yönüyle biyometrik verilerin öğrencilerin bilişsel durumlarının izlenmesinde kullanılmasına örnek olarak gösterilebilir.

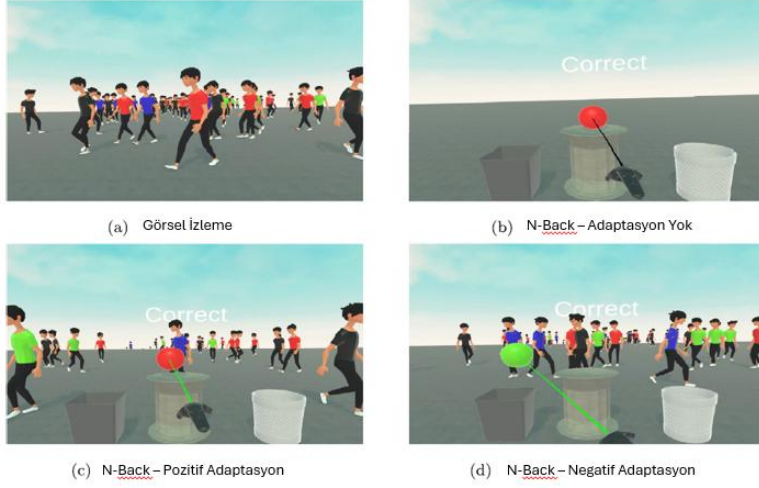
Örnek Uygulama: Anlık beyin aktivitesine göre dikkat durumuna duyarlı uyarlanabilir sistem

- Kullanılan Sensör Teknolojileri: EEG (Beyin aktivitesi), HTC Vive Pro (VR başlığı)

- Kullanılan Algoritmalar: Welch Yöntemi (Güç spektrumu), Doğrusal Diskriminant Analizi (LDA), Kural tabanlı uyarlama mantığı

Chiossi vd. (2025) tarafından yürütülen çalışma, EEG tabanlı biyometrik verilerin kullanımıyla sanal gerçeklik ortamlarında dikkat durumuna duyarlı uyarlanabilir sistemlerin nasıl tasarlanabileceğini ortaya koymaktadır. Araştırmanın temel amacı, yoğun görsel uyaranlar içeren VR ortamlarında kullanıcının içsel ve dışsal dikkat durumlarını gerçek zamanlı olarak izlemek ve bu durumlara bağlı olarak sanal ortamın görsel karmaşıklığını dinamik biçimde düzenlemektir. Bu yaklaşım, bilişsel durum izleme ile uyarlanabilir öğrenme sistemlerini birleştiren ileri düzey bir nöro-ergonomik tasarım örneği sunmaktadır.

Çalışmada katılımcılar, VR ortamında içsel dikkati yoğun biçimde gerektiren bir N-Back çalışma belleği görevi (N sayısı kadar önceki bilgileri hatırlamayı gerektiren görevler) gerçekleştirmiştir. Katılımcıların dikkat durumları, EEG verilerinden elde edilen alfa ve teta frekans bantları aracılığıyla izlenmiştir; alfa bantları duyuşsal işleme ve dikkat baskılama, teta bantları ise çalışma belleği ve bilişsel kontrol süreçleriyle ilişkilendirilmiştir. Sistem, bu sinyallere dayalı olarak kullanıcının içsel ya da dışsal dikkat durumunda olduğunu belirlemiş ve ortamdaki dikkat dağıtıcı unsurları temsil eden oyuncu olmayan (Non-Player) karakterlerin sayısını artırıp azaltarak çevresel karmaşıklığı uyarlamıştır. Böylece kullanıcı dışsal dikkate kaydığında dikkat dağıtıcıların azaltılması, içsel dikkatin desteklenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen uygulamanın bir görüntüsü Şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. EEG Verilerine Göre Anlık Ortam Uyarlaması Chiossi vd. (2025)'den Türkçeye çevrilmiştir.

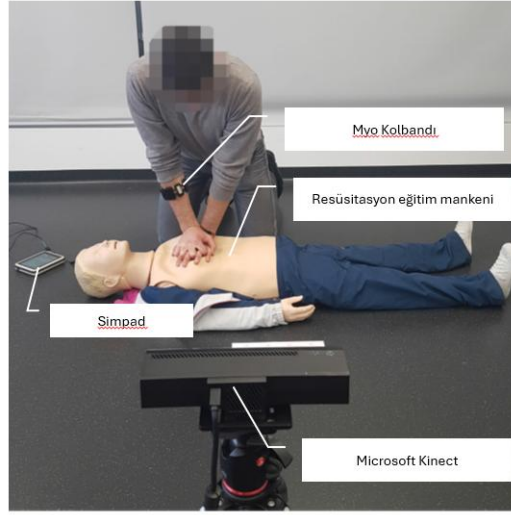
Araştırma sonuçlarına göre içsel dikkati destekleyen uyarlama stratejisi katılımcıların çalışma belleği performansını artırmış ve algılanan bilişsel iş yükünü azaltmıştır. Bu sonuçlar, öğrencinin zihinsel durumuna duyarlı, çevresel uyarıları bilişsel gereksinimlere göre düzenleyen nöro-ergonomik öğrenme ortamlarının, odaklanmayı ve öğrenme performansını anlamlı biçimde artırabileceğini ortaya koymaktadır.

Örnek Uygulama: Eklem ve kas aktivitelerine göre anlık geri bildirim

- Kullanılan Sensör Teknolojileri: Microsoft Kinect v2 (Derinlik/Kinematik), Myo Kol Bandı (EMG, IMU)
- Kullanılan Algoritmalar: Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) Sinir Ağları, Kural tabanlı hareket algılama

Di Mitri vd. (2022) tarafından geliştirilen “CPR Tutor” sistemi, çok modlu öğrenme analitiği (Multimodal Learning Analytics – MMLA) yaklaşımını temel alarak, tıbbi eğitimde kritik öneme sahip psikomotor becerilerin gerçek zamanlı olarak izlenmesi ve desteklenmesini amaçlamışlardır. Bu doğrultuda, kalp masajı gibi yüksek doğruluk ve zamanlama gerektiren becerilerin öğretiminde, öğrencinin hareketlerine ilişkin kinematik ve kas aktivitesi verilerinin eşzamanlı olarak toplanması

ve bu veriler üzerinden anlık geri bildirim sağlanması yer almaktadır. Bu kapsamda Microsoft Kinect aracılığıyla vücut duruşu ve eklem hareketleri, Myo kol bandı ile elektromiyografi (EMG) temelli kas aktivitesi izlenmiş; elde edilen veriler derin öğrenme modelleri kullanılarak analiz edilmiştir. Sistem, CPR uygulamasında sık karşılaşılan beş temel hatayı (hız, derinlik, serbest bırakma, kol kilidi ve vücut ağırlığı kullanımı) otomatik olarak tespit edebilmekte ve hata algılandığında uygulama esnasında öğrenciye anında sesli komutlar veya metronom geri bildirimi sunmaktadır. Uygulama sürecine yönelik görsel Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. CRP Tutor Uygulama Görseli (Di Mitri vd., 2022)

Bulgular, gerçek zamanlı geri bildirim öğrencilerin anlık performansını anlamlı biçimde iyileştirdiğini; özellikle geri bildirim verildikten sonraki ilk saniyelerde hata oranlarında belirgin bir düşüş yaşandığını göstermektedir. Metronom tabanlı sesli uyarıların, ritim ve hız hatalarının düzeltilmesinde diğer geri bildirim türlerine kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte çalışma, geri bildirim açık olduğu durumlarda performansın yükselmesine karşın, geri bildirim kapatıldığında kalıcı öğrenme açısından kontrol grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını ortaya koymuştur. Bu sonuç, anlık performans iyileşmesi ile uzun vadeli öğrenme kazanımları arasındaki ayrımı vurgularken; aynı zamanda sensör verilerinden geri bildirim uzanan süreci yaklaşık 70 milisaniyelik gecikme ile

gerçekleştiren mimarının, gerçek zamanlı MMLA sistemlerinin pedagojik uygulamalar için teknik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde biyometrik ver analitiğinin eğitimde kullanımına yönelik örneklerden yola çıkarak biyometrik veri analitiğinin veriye dayalı sistemler ve karar verme mekanizmalarıyla öğrenme ortamlarını giderek dijitalleştirdiği söylenebilir. Geleneksel yöntemlerinin aksine, giyilebilir sensörler ve göz izleme gibi araçlar sayesinde öğrenme süreçleri daha nesnel ve bilimsel verilerle optimize edilmektedir. Sonuç olarak bu teknolojiler, eğitim süreçlerinin yönetimini kolaylaştırmanın yanı sıra bireysel ihtiyaçlara duyarlı ve etkileşimli dijital eğitim ekosistemlerinin kurulmasına imkan tanımaktadır.

Kaynaklar

- Akay, E. O., Canbek, K. O., ve Oniz, Y. (2020). Automated student attendance system using face recognition. In *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9255052>
- Badshah, A., Ghani, A., Daud, A., Jalal, A., Bilal, M., ve Crowcroft, J. (2023). Towards smart education through internet of things: A survey. *ACM Computing Surveys*, 56(2), 1-33. <https://doi.org/10.1145/361040>
- Broaddus, A. M., Jaquis, B. J., Jones, C. B., Jost, S. R., Lang, A. S., Li, A., ... ve Spear, E. M. (2021). Fitbits, field-tests, and grades: The effects of a healthy and physically active lifestyle on the academic performance of first year college students. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 19(1), 90-101. <https://doi.org/10.1080/1612197X.2019.1623062>
- Chiossi, F., Ou, C., Gerhardt, C., Putze, F., ve Mayer, S. (2025). Designing and evaluating an adaptive virtual reality system using eeg frequencies to balance internal and external attention states. *International Journal of Human-Computer Studies*, 196, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103433>
- Choksi, K., Chen, H., Joshi, K., Jade, S., Nirjon, S., ve Lin, S. (2024, September). SensEmo: Enabling affective learning through real-time emotion recognition with smartwatches. In *2024 IEEE 21st International Conference on Mobile Ad-Hoc and Smart Systems (MASS)* (pp. 453-459). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MASS62177.2024.00066>
- Di Mitri, D., Schneider, J., ve Drachsler, H. (2022). Keep me in the loop: Real-time feedback with multimodal data. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 32(4), 1093-1118. <https://doi.org/10.1007/s40593-021-00281-z>
- Ghosh, S., Mohammed, S. K., Mogal, N., Nayak, P. K., ve Champaty, B. (2018, January). Smart attendance system. In *2018 international conference on smart city and emerging technology (ICSCET)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSCET.2018.8537298>

- Gkintoni, E., Antonopoulou, H., Sortwell, A., ve Halkiopoulos, C. (2025). Challenging cognitive load theory: The role of educational neuroscience and artificial intelligence in redefining learning efficacy. *Brain Sciences*, 15(2), 203. <https://doi.org/10.3390/brainsci15020203>
- Glasserman-Morales, L. D., Carlos-Arroyo, M., Ruiz-Ramirez, J. A., ve Alcantar-Nieblas, C. (2023, September). Use of wearable devices in the teaching-learning process: a systematic review of the literature. In *Frontiers in Education* (Vol. 8, p. 1220688). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1220688>
- Hoo, S. C., ve Ibrahim, H. (2019). Biometric-Based Attendance Tracking System for Education Sectors: A Literature Survey on Hardware Requirements. *Journal of Sensors*, 2019(1), 7410478. <https://doi.org/10.1155/2019/7410478>
- Hu, S., Jia, X., ve Fu, Y. (2018, August). Research on abnormal behavior detection of online examination based on image information. In *2018 10th international conference on intelligent human-machine systems and cybernetics (IHMSC)* (Vol. 2, pp. 88-91). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2018.10127>
- Jain, A. K., Ross, A., ve Prabhakar, S. (2004). An introduction to biometric recognition. *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, 14(1), 4-20. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2003.818349>
- Jeun, Y. J., Nam, Y., Lee, S. A., ve Park, J. H. (2022). Effects of personalized cognitive training with the machine learning algorithm on neural efficiency in healthy younger adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13044. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013044>
- Kaddoura, S., Vincent, S., ve Hemanth, D. J. (2023). Computational intelligence and soft computing paradigm for cheating detection in online examinations. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2023(1), 3739975. <https://doi.org/10.1155/2023/3739975>
- Kim, H. J., Park, Y., ve Lee, J. (2024). The validity of heart rate variability (HRV) in educational research and a synthesis of

- recommendations. *Educational Psychology Review*, 36(2), 42. <https://doi.org/10.1007/s10648-024-09878-x>
- Meini, V., Bachi, L., Omezzine, M. A., Procissi, G., Pigni, F., ve Billeci, L. (2025). Artificial Intelligence for the Analysis of Biometric Data from Wearables in Education: A Systematic Review. *Sensors*, 25(22), 7042. <https://doi.org/10.3390/s25227042>
- Mohammadi, M., Tajik, E., Martinez-Maldonado, R., Sadiq, S., Tomaszewski, W., ve Khosravi, H. (2025). Artificial intelligence in multimodal learning analytics: a systematic literature review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 100426. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100426>
- Necochea-Chamorro, J. I., Sotelo Asalde, C. M., Loli Nuñez, M. E., ve del Rosario Vasquez Valencia, Y. (2024). Systematic Literature Review: Biometric Technology Applied to Educational Institutions. *TEM Journal*, 13(1). <https://doi.org/10.18421/TEM131-60>
- Possaghi, I., Vesin, B., Zhang, F., Sharma, K., Knudsen, C., Bjørkum, H., ve Papavlasopoulou, S. (2025). Integrating multi-modal learning analytics dashboard in K-12 education: insights for enhancing orchestration and teacher decision-making. *Smart Learning Environments*, 12(1), 1-34. <https://doi.org/10.1186/s40561-025-00410-4>
- Rosengrant, D., Hearrington, D., ve O'Brien, J. (2021). Investigating student sustained attention in a guided inquiry lecture course using an eye tracker. *Educational psychology review*, 33(1), 11-26. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09540-2>

EĞİTİM ARAŞTIRMALARINDA BİYOMETRİK VERİ İŞLEMENİN HUKUKİ VE ETİK ÇERÇEVESİ

Duygu SOLAK BERİGEL⁵

Biyometrik veriler, bireylerin fiziksel ve davranışsal özelliklerine dayalı kimlik doğrulama süreçlerinde giderek yaygınlaşan bir araç haline gelmiş; güvenlik, mahremiyet ve etik bağlamında önemli tartışmaları da beraberinde getirmiştir. Yüz tanıma, parmak izi, ses, iris ve damar yapısı gibi benzersiz biyometrik göstergelerin dijital sistemlerde kullanımının artmasıyla birlikte, bu verilerin korunması, işlenmesi ve paylaşılması giderek daha kritik bir sorun alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Biyometrik verilerin değiştirilemez niteliği, onları hem yüksek güvenlik sağlayan hem de potansiyel olarak yüksek risk barındıran veri türleri haline getirmekte; bu durum ise veri sorumlularına teknik, idari ve etik yükümlülükler yüklemektedir.

Teknolojinin hızlı gelişimiyle birlikte ortaya çıkan sürekli gözetim endişeleri, algoritmik önyargılar ve kullanıcı mahremiyetine yönelik tehditler, biyometrik sistemlerin yalnızca teknik bir olay olmadığını, aynı zamanda çok boyutlu bir toplumsal sorun alanı oluşturduğunu göstermektedir. Bu kitap bölümü, eğitim araştırmalarında biyometrik veri kullanımını hukuki ve etik boyutlarıyla birlikte ele almayı amaçlamaktadır. Bölümde, biyometrik veri işlemenin yürürlükteki mevzuat kapsamında doğurduğu yükümlülükler ile bu yükümlülüklerin eğitim araştırmalarına özgü etik sorumluluklarla nasıl kesiştiği tartışılmaktadır.

Yasal uygunluğun etik yeterlilik anlamına gelmediği varsayımından hareketle, araştırmacıların yalnızca mevzuata uyum sağlamakla yetinmeyip aynı zamanda etik ilkelere dayalı bir muhakeme geliştirmelerinin gerekliliği vurgulanmaktadır. Bu kapsamda etik kurul süreçleri, açık rıza, katılımcı hakları ve güvenli biyometrik veri yönetimine ilişkin uygulama sorumlulukları bütüncül bir çerçeve içinde ele alınmaktadır. Bölüm, eğitim araştırmacılarının biyometrik verilerin

⁵ Dr. Öğr. Üyesi Duygu SOLAK BERİGEL

Trabzon Üniversitesi, Çarşıbaşı Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

ORCID: 0000-0002-0309-7819, duyguberigel@trabzon.edu.tr

kullanımı konusunda bilgilendirilmesini ve etik sorumluluk çerçevesinde yürütülen araştırmaları desteklemeyi hedeflemektedir.

1. Biyometrik Veri İşlemenin Hukuki Boyutu: Mevzuat, İlkeler ve Sorumluluklar

Dijitalleşmenin hızla yayıldığı günümüzde biyometrik veriler; araştırma, güvenlik, kamu hizmetleri, finans, sağlık ve teknolojik araçlar gibi birçok farklı amaçla kullanılmakta; bu durum ise uyulması gereken çeşitli yasal yükümlülükleri beraberinde getirmektedir (De Keyser vd., 2021). Biyometrik verilerin yaygınlaşması ve birçok alanda farklı amaçlarla kullanılması, bu verilerin hukuki açıdan yüksek riskli veri kategorisi içerisinde değerlendirilmesine neden olmaktadır (Epstein, 2008). Biyometrik veriler, bireylerin mahremiyetinin ve temel haklarının korunması açısından en hassas veri gruplarından biri olarak kabul edilmekte olup bu hassasiyet, ulusal ve uluslararası düzenlemelerle güvence altına alınmıştır (URL-1, URL-2).

Türkiye’de biyometrik verilerin korunması, öncelikli olarak Türkiye Cumhuriyeti Anayasası’nın 20. maddesinde temel bir hak olarak tanımlanmaktadır. Bu anayasal güvence, biyometrik verilerin işlenmesinin bireylerin temel haklarını koruyan açık bir yasal zemine dayanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, biyometrik verilerin işlenmesi ve kullanımına yönelik çeşitli kanuni düzenlemeler yapılmıştır. Türkiye Cumhuriyeti mevzuatında biyometrik verilere ilişkin düzenlemeler aşağıdaki başlıklar altında yer almaktadır.

- I. Anayasal Dayanak
- II. 6698 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK)’nda Biyometrik Veri
- III. Özel Kanunlardaki Düzenlemeler
- IV. Türkiye’de Biyometrik Veri ile İlişkili Yönetmelikler
- V. Biyometrik Verilerin İşlenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlara İlişkin Rehber

1.1. Anayasal Dayanak

Türkiye Cumhuriyeti Anayasası’nın 20. Maddesi;

“Herkes, kendisiyle ilgili kişisel verilerin korunmasını isteme hakkına sahiptir. Bu hak; kişinin kendisiyle ilgili kişisel veriler hakkında bilgilendirilme, bu verilere erişme, bunların düzeltilmesini veya silinmesini talep etme ve amaçları doğrultusunda kullanılıp kullanılmadığını öğrenmeyi de kapsar. Kişisel veriler, ancak kanunda öngörülen hallerde veya kişinin açık rızasıyla işlenebilir. Kişisel verilerin korunmasına ilişkin esas ve usuller kanunla düzenlenir.” (URL-1)

Türkiye’de kişisel verilerin korunmasına ilişkin en üst düzey hukuki güvence, Anayasa’nın 20. Maddesi ile sağlanmakta; bu madde kapsamında veri işleme faaliyetleri kanunla belirlenen usul ve esaslara bağlanmakta ve biyometrik veriler de doğrudan koruma altına alınmaktadır. Değiştirilemez nitelikleri nedeniyle en hassas veri kategorilerinden biri olarak kabul edilen biyometrik verilerin işlenmesi, bu madde uyarınca yalnızca kanunda öngörülen hallerde veya ilgili kişinin açık rızasıyla mümkündür. Ayrıca, kişisel verilerin işlenmesi, saklanması, aktarılması ve imhasına ilişkin esasların kanunla düzenleneceğinin açıkça belirtilmesi, biyometrik verilerin yüksek güvenlik gerektiren yapısı nedeniyle bu alandaki düzenlemelerin alt mevzuata bırakılmasını engellemektedir. Bu anayasal temel, 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu’nun hazırlanmasına zemin oluşturmuş ve biyometrik verilerin “özel nitelikli kişisel veri” olarak sınıflandırılmasının hukuki dayanağını sağlamıştır. Kısacası, Anayasa’nın 20. maddesi biyometrik verilerin korunmasına hak temelli bir yaklaşım getirmekte ve bu verilerin işlenmesini sıkı bir yasal denetime tabi tutmaktadır.

1.2. 6698 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK)’nda Biyometrik Veri

6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu (KVKK) (URL-2), Türkiye’de kişisel verilerin işlenmesine ve kullanılmasına ilişkin temel hukuki çerçeveyi oluşturmaktadır. Bu Kanun’da biyometrik veriler, “özel nitelikli kişisel veri” olarak sınıflandırılmaktadır. Söz konusu sınıflandırma, biyometrik verilerin işlenmesi sürecinde üst düzey teknik ve idari tedbirlerin alınmasını zorunlu hale getirmiştir. KVKK’de biyometrik

veriler doğrudan isimlendirilerek tanımlanmamış olmakla birlikte, Kanun hükümlerinde açıkça “özel nitelikli kişisel veri” kategorisi kapsamında değerlendirilmektedir. Aşağıda verilen Tablo 1’de, 6698 sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu’nda biyometrik verilerle doğrudan veya dolaylı olarak ilişkili olan kanun maddeleri tam metinleriyle sunulmakta; ardından bu maddelerin biyometrik veri bağlamındaki anlamı ve hukuki etkileri açıklanmaktadır.

Tablo 1. Biyometrik Verilerle İlişkili KVKK Hükümleri ve Hukuki Etkileri

6698 Sayılı Kişisel Verilerin Korunması Kanunu	Biyometrik Veri Bağlamındaki Anlamı ve Hukuki Etkileri
Madde 6 Özel nitelikli kişisel verilerin işleme şartları <i>“Kişilerin ırkı, etnik kökeni, siyasi düşüncesi, felsefi inancı, dini, mezhebi veya diğer inançları, kılık ve kıyafeti, dernek, vakıf ya da sendika üyeliği, sağlığı, cinsel hayatı, ceza mahkûmiyeti ve güvenlik tedbirleriyle ilgili verileri ile biyometrik ve genetik verileri özel nitelikli kişisel veridir”.</i>	Biyometrik veriler, KVKK kapsamında açıkça “özel nitelikli kişisel veri” olarak kabul edildiğinden, kural olarak ilgilinin açık rızası olmadan işlenemez. Bununla birlikte Kanun, bazı istisnai durumlarda biyometrik verilerin açık rıza aranmaksızın işlenmesine de izin vermektedir. Örneğin, nüfus hizmetleri, pasaport işlemleri, sınır kapılarında kimlik doğrulama ile hastaneler ve sağlık uygulamaları gibi Kanun’da açıkça öngörülen hallerde açık rıza şartı aranmamaktadır. Öte yandan, biyometrik verilerin yüksek hassasiyet düzeyi nedeniyle, bu verilerin veri sorumluları tarafından işlenmesi sürecinde daha sıkı güvenlik protokollerinin uygulanması zorunludur. Kişisel Verileri Koruma Kurulu tarafından belirlenen teknik ve idari tedbirler çerçevesinde; biyometrik verilerin güçlü şifreleme yöntemleriyle korunması, erişim yetkilerinin sınırlandırılması, çift faktörlü kimlik doğrulama mekanizmalarının kullanılması, erişim kayıtlarının (logların) tutulması, anahtar yönetiminin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi ve geri döndürülemez şablon yöntemlerinin tercih edilmesi öngörülmektedir. Bu düzenlemeler, biyometrik verilerin yetkisiz erişim ve kötüye kullanım risklerine karşı en üst düzeyde korunmasını amaçlamaktadır.

Madde 10**Veri sorumlusunun aydınlatma yükümlülüğü**

“Kişisel verilerin elde edilmesi sırasında veri sorumlusu veya yetkilendirdiği kişi, ilgili kişilere;

- 1. Veri sorumlusunun ve varsa temsilcisinin kimliği,*
- 2. Kişisel verilerin hangi amaçla işleneceği,*
- 3. İşlenen kişisel verilerin kimlere ve hangi amaçla aktarılabilceği,*
- 4. Kişisel veri toplamının yöntemi ve hukuki sebebi,*
- 5. İlgili kişinin 11 inci madde kapsamında sahip olduğu haklar, konularında bilgi vermekle yükümlüdür.”*

Biyometrik verilerin yüksek düzeyde hassasiyet taşıması nedeniyle, KVKK’nın 10. maddesi kapsamında düzenlenen aydınlatma yükümlülüğü bu veri türü açısından kritik bir önem arz etmektedir. Buna göre veri sorumlusu, biyometrik verileri elde etmeden önce ilgili kişiye; hangi verilerin toplandığını, bu verilerin hangi amaçlarla işleneceğini, ne kadar süreyle saklanacağını ve kimlere aktarılacağını açık, anlaşılır ve ayrıntılı bir şekilde bildirmekle yükümlüdür.

Yüz tanıma, parmak izi, iris taraması, damar izi veya ses kaydı gibi hangi biyometrik veri türlerinin işleneceği açıkça belirtilmeli; ilgili kişiye açık rıza verip vermeme konusunda özgür ve bilgilendirilmiş bir tercih hakkı tanınmalıdır. Ayrıca veri toplamının hukuki dayanağı, veri işleme yöntemleri ile ilgili kişinin KVKK’nın 11. maddesi kapsamında sahip olduğu haklar net bir biçimde ifade edilmelidir.

Bu düzenleme, biyometrik veriler üzerinde bireyin bilgi sahibi olmasını ve denetim yetkisini güçlendirmekte; şeffaf ve hesap verebilir veri işleme süreçlerini zorunlu kılmaktadır.

Madde 11**İlgili kişinin hakları**

“Herkes, veri sorumlusuna başvurarak kendisiyle ilgili;

- 1. Kişisel veri işlenip işlenmediğini öğrenme,*
- 2. Kişisel verileri işlenmişse buna ilişkin bilgi talep etme,*
- 3. Kişisel verilerin işlenme amacını ve bunların amacına uygun kullanılıp kullanılmadığını öğrenme,*
- 4. Yurt içinde veya yurt dışında kişisel verilerin aktarıldığı üçüncü kişileri bilme,*
- 5. Kişisel verilerin eksik veya yanlış işlenmiş olması hâlinde bunların düzeltilmesini isteme,*
- 6. Kişisel verilerin işlenmesini gerektiren sebeplerin ortadan kalkması hâlinde silinmesini veya yok edilmesini isteme,*
- 7. (5) ve (6) numaralı bentler kapsamında yapılan işlemlerin, verilerin aktarıldığı üçüncü kişilere bildirilmesini isteme,*
- 8. İşlenen verilerin münhasıran otomatik sistemler vasıtasıyla analiz edilmesi suretiyle kişinin aleyhine bir sonucun ortaya çıkmasına itiraz etme,*
- 9. Kişisel verilerin kanuna aykırı olarak işlenmesi sebebiyle zarara uğraması hâlinde zararın giderilmesini talep etme, haklarına sahiptir.”*

KVKK’nın 11. maddesi, bireylerin kendi biyometrik verileri üzerindeki denetim ve kontrol haklarını güvence altına almaktadır. Bu hüküm uyarınca kişiler; biyometrik verilerinin işlenip işlenmediğini öğrenme, işlenme amacını ve bu amaca uygun kullanılıp kullanılmadığını sorgulama, yanlış veya eksik işlenen verilerin düzeltilmesini talep etme ve veri işleme sebebinin ortadan kalkması halinde verilerinin silinmesini veya yok edilmesini isteme haklarına sahiptir.

Bunun yanı sıra, otomatik sistemler aracılığıyla verilen kararlara itiraz etme hakkı, özellikle yüz tanıma sistemleri gibi algoritmik veri işleme süreçlerinde bireyleri koruyan önemli bir hukuki güvence niteliği taşımaktadır. Bu madde, biyometrik verilerin işlenmesine ilişkin süreçlerde şeffaflığı ve hesap verebilirliği artırmakta; veri sahiplerinin temel hak ve özgürlüklerini güçlendirmektedir.

Madde 12**Veri güvenliğine ilişkin yükümlölükler**

“Veri sorumlusu,

a) Kişisel verilerin hukuka aykırı olarak işlenmesini önlemek,

b) Kişisel verilere hukuka aykırı olarak erişilmesini önlemek,

c) Kişisel verilerin muhafazasını sağlamak, amacıyla uygun güvenlik düzeyini temin etmeye yönelik gerekli her türlü teknik ve idari tedbirleri almak zorundadır.

(2) Veri sorumlusu, kişisel verilerin kendi adına başka bir gerçek veya tüzel kişi tarafından işlenmesi hâlinde, birinci fıkrafta belirtilen tedbirlerin alınması hususunda bu kişilerle birlikte müştereken sorumludur.

(3) Veri sorumlusu, kendi kurum veya kuruluşunda, bu Kanun hükümlerinin uygulanmasını sağlamak amacıyla gerekli denetimleri yapmak veya yaptırmak zorundadır.

(4) Veri sorumluları ile veri işleyen kişiler, öğrendikleri kişisel verileri bu Kanun hükümlerine aykırı olarak başkasına açıklayamaz ve işleme amacı dışında kullanamazlar. Bu yükümlölük görevden ayrılmalardan sonra da devam eder.

(5) İşlenen kişisel verilerin kanuni olmayan yollarla başkaları tarafından elde edilmesi hâlinde, veri sorumlusu bu durumu en kısa sürede ilgilisine ve Kurula bildirir. Kurul, gerekmesi hâlinde bu durumu, kendi internet sitesinde ya da uygun göreceği başka bir yöntemle ilan edebilir.

KVKK’nın 12. Maddesi, özellikle biyometrik verilerin yüksek riskli yapısı nedeniyle veri sorumlularına kapsamlı bir güvenlik yükümlölüğü getirir. Buna göre veri sorumlusu, biyometrik verilerin hukuka aykırı erişim, kayıp, sızma veya kötüye kullanımını engellemek amacıyla güçlü teknik ve idari tedbirler almak zorundadır. Bu tedbirler arasında gelişmiş şifreleme teknikleriyle veri koruma, yetki matrisi oluşturma, erişim loglarının tutulması, çift faktörlü doğrulama, ağ güvenliği önlemleri, anahtar yönetimi, sızma testleri ve geri döndürülemez biyometrik şablon kullanımı yer alır. Ayrıca, biyometrik veri işleme faaliyetinin veri sorumlusu adına üçüncü kişiler tarafından yürütülmesi halinde, aynı güvenlik tedbirlerinin bu kişiler tarafından da uygulanmasının sağlanması veri sorumlusunun sorumluluğundadır. Kurum içi denetim zorunluluğu, biyometrik veri işlemenin sürdürülebilir güvenlik standartlarıyla yürütülmesini sağlar. Bunun yanı sıra, biyometrik verilerin yetkisiz şekilde ele geçirilmesi, sızdırılması veya çalınması gibi bir veri ihlali durumunda veri sorumlusu, durumu en kısa sürede ilgili kişiye ve Kişisel Verileri Koruma Kurulu’na bildirmelidir. Bu madde, biyometrik verilerin korunmasında en yüksek güvenlik seviyesini yasal bir zorunluluk haline getirmektedir.

KVKK, biyometrik verileri “özel nitelikli kişisel veri” olarak tanımlamak suretiyle bu verilerin işlenmesini hem hukuki hem de teknik açıdan en sıkı güvenlik tedbirlerine tabi tutmuştur. Kanun, biyometrik verilerin kural olarak yalnızca ilgili kişinin açık rızasıyla işlenebileceğini; ancak kanunda açıkça öngörülen istisnai hallerde açık rıza aranmaksızın

da işlenebileceğini hükme bağlamaktadır. Aydınlatma yükümlülüğü ve veri güvenliğine ilişkin tedbirler aracılığıyla bireyin kendi biyometrik verileri üzerindeki bilgi ve denetim hakkı güçlendirilmiş; veri sorumlularına ise şeffaf, hesap verebilir ve güvenli veri işleme süreçleri oluşturma yükümlülüğü getirilmiştir. Bu çerçevede KVKK, biyometrik verilerin kullanımını düzenleyerek hem bireylerin temel haklarını korumakta hem de veri güvenliğinde yüksek standartların uygulanmasını zorunlu hale getirmektedir.

1.3. Özel Kanunlarda Biyometrik Veri Düzenlemeler

Biyometrik veriler, kimlik doğrulama süreçlerinde en güvenilir tekniklerden biri olarak birçok kamu hizmetinde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu verilerin yüksek düzeyde hassasiyet taşıması, ulusal mevzuatta açık veya dolaylı düzenlemeler yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Türkiye’de biyometrik verilerin hangi kurumlar tarafından, hangi amaçlarla ve hangi hukuki dayanaklar çerçevesinde işlenebileceği, farklı özel kanunlarda düzenlenmiştir. Tablo 2 biyometrik verilerin kullanımını doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyen özel kanunları, bu kanunlarda yer alan ilgili hükümleri ve uygulamada kullanılan biyometrik veri türlerini özetlemektedir.

Tablo 2. Türkiye’de Biyometrik Verilerin Kullanımını Düzenleyen Özel Kanunlar ve Uygulama Alanları

İlgili Kanun ve Maddesi	Biyometrik Veri Kullanım Şekli	Kullanılan Biyometrik Veri Türü
5490 Sayılı Nüfus Hizmetleri Kanunu (URL-3) Madde 41 <i>“Kimlik kartında yer alacak biyometrik verinin türü, niteliği ve alınma yaşı Bakanlıkça belirlenir. Biyometrik verisi alınacak kişilerin şahsen müracaatı esastır. Merkezi veri tabanında tutulan biyometrik veriler kimlik doğrulama işlemleri dışında kullanılamaz.”</i>	Kimlik kartı ve nüfus hizmetlerinde biyometrik verinin alınması ve saklanması düzenlenir.	Parmak izi, biyometrik fotoğraf (kimlik doğrulama)

6458 Sayılı Yabancılar ve Uluslararası Koruma Kanunu (URL-4) Madde 6 - Belge Kontrolü <i>“Türkiye’ye giriş yapmak isteyen yabancılar pasaport veya pasaport yerine geçen belgeleri ibraz etmek zorundadır.”</i> Madde 7 - Girişte Kimlik Tespiti <i>“Yabancıların kimliğinin tespiti amacıyla gerekli kontroller yapılır.”</i> Madde 8 - Uluslararası Koruma Başvurusu <i>“Başvurular kayıt altına alınır.”</i> Madde 53–55 - Sınır dışı ve idari gözetim işlemleri <i>“Kimliğin tespiti ve doğrulanması” süreçlerinin yürütüleceği belirtilir.</i>	Kanun biyometrik veriyi adını söyleyerek düzenlemez. Ancak kimlik tespiti, kayıt, başvuru ve sınır kontrolü işlemleri nedeniyle biyometrik veri alınmasına dolaylı yasal dayanak oluşturur.	Parmak izi, yüz fotoğrafı (kimlik doğrulama ve kayıt)
5901 Sayılı Türk Vatandaşlığı Kanunu (URL-5) Madde 18 - Başvuru İnceleme Komisyonu <i>“Başvuru şartlarını taşıyıp taşımadıklarının tespiti...”</i> Madde 19 - Başvuru Usulü <i>“Başvurudan gerekli şartları taşıyanların adına dosya düzenlenir...”</i> Madde 36 - Türk vatandaşlığının ispatı <i>“...Pasaport veya pasaport yerine geçen belgeler resmi kayıt sayılır.”</i> Bu maddeler kimlik doğrulama yükümlülüğünü doğurur.	Kanun biyometrik veri ifadesini hiç kullanmaz. Ancak vatandaşlık başvurusu, kimlik tespiti, inceleme ve kayıt süreçlerinde şahsen başvuru zorunluluğu getirilerek biyometrik fotoğraf çekilmesi ve kimlik doğrulama verilerinin alınmasına dolaylı dayanak oluşturur.	Biyometrik fotoğraf, yüz tanıma verisi, elektronik kimlik doğrulama bileşenleri kanunda geçmez. Ancak başvuru sistemleri ve nüfus kayıt uygulamalarında zorunlu hale gelmiştir.

Özel kanunlarda yer alan hükümler incelendiğinde, Türkiye’de biyometrik veri kullanımının hem doğrudan mevzuat düzenlemeleri hem de belirli idari ve teknik süreçlerin doğal gereklilikleri nedeniyle giderek yaygınlaştığı görülmektedir. Bazı kanunlar biyometrik veri türlerini açıkça düzenlerken, bazıları ise kimlik doğrulama ve kayıt yükümlülükleri aracılığıyla biyometrik veri işlemenin dolaylı hukuki dayanaklarını oluşturmaktadır. Bu çerçevede biyometrik verilerin işlenmesi, yalnızca teknik bir gereklilik olmanın ötesine geçerek hukuki güvenliğin sağlanması, doğru kimlik tespitinin yapılması ve kamu hizmetlerinin etkin

ve güvenilir biçimde yürütülmesi açısından zorunlu bir araç haline gelmiştir. Bununla birlikte, bu süreçlerin tamamında KVKK'nın öngördüğü yüksek düzeyli güvenlik ve veri koruma standartlarının titizlikle uygulanması, bireylerin mahremiyetinin korunması bakımından kritik bir önem taşımaktadır.

1.4. Türkiye’de Biyometrik Veri ile İlişkili Yönetmelikler

Türkiye’de biyometrik verilerin işlenmesi, yalnızca kanun hükümleriyle değil, aynı zamanda bu kanunların uygulanmasına ilişkin usul ve esasları belirleyen çeşitli yönetmeliklerle de ayrıntılı biçimde düzenlenmektedir. Söz konusu yönetmelikler; hangi kurumların, hangi tür biyometrik verileri, hangi amaçlarla toplayabileceğini ve bu verilerin hangi yöntemlerle saklanacağını açıklığa kavuşturmaktadır. Kimlik kartları, pasaportlar, yabancıların kayıt işlemleri ve sürücü belgeleri gibi uygulama alanlarında biyometrik veri kullanımını doğrudan etkileyen ayrıntılı düzenlemelere bu ikincil mevzuatta yer verilmektedir. Tablo 3 Türkiye’de biyometrik veri işleyen başlıca yönetmelikleri ve bu yönetmeliklerde biyometrik verilere ilişkin kritik hükümleri özetlemektedir.

Tablo 3. Türkiye’de Biyometrik Verilere İlişkin Yönetmelik Düzeyindeki Düzenlemeler

Yönetmelik Adı/ İlgili Kurum / Tarih	Dayandığı Kanun	Amaç	Biyometrik Veri ile İlgili Önemli Hükümler
Türkiye Cumhuriyeti Kimlik Kartı Yönetmeliği (URL-6) İçişleri Bakanlığı- Nüfus ve Vatandaşlık İşleri Genel Müdürlüğü (NVİGM) / 2014	5490 Sayılı Nüfus Hizmetleri Kanunu	Kimlik kartlarının düzenlenme si, verilmesi, kimlik doğrulama süreçlerinin belirlenmesi	•Kimlik kartında kullanılacak biyometrik veri türleri Bakanlıkça belirlenir •Biyometrik verinin şahsen başvuru ile alınması zorunludur •Veriler sadece kimlik doğrulama amacıyla kullanılabilir. •Merkezi veri tabanında saklanan biyometrik veriler başka amaçla kullanılamaz.

Pasaport Kanunu'nun Uygulanmasına Dair Yönetmelik (URL-7)	5682 Sayılı Pasaport Kanunu, 5490 Sayılı Kanun (URL-8)	Pasaport başvurularının alınması, düzenlenmesi, kimlik doğrulama süreçlerinin belirlenmesi	•E-pasaportlarda biyometrik fotoğraf zorunludur. •Parmak izi bilgisi pasaport düzenleme sırasında alınır (uygulama) •Veriler Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) standartlarına uygun şekilde biyometrik çip içinde saklanır.
İçişleri Bakanlığı ve Dışişleri Bakanlığı / 2010			
Yabancılar ve Uluslararası Koruma Kanununun Uygulanmasına İlişkin Yönetmelik (URL-9)	6458 Sayılı Yabancılar ve Uluslararası Koruma Kanunu (YUKK) (URL-10)	6458 sayılı YUKK kapsamında ki yabancılarla ilgili işlemlerin usul ve esaslarını belirler	•Türkiye'ye giriş yapan yabancıların parmak izi alınabilir. •Uluslararası koruma başvurularında biyometrik veri alınması zorunludur. •Veriler kimlik doğrulama, göç kayıt sistemi ve güvenlik amaçlarıyla işlenir.
İçişleri Bakanlığı-Göç İdaresi Başkanlığı/ 2014			
Karayolları Trafik Yönetmeliği (URL-11)	2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu (URL-12)	Sürücü belgelerinin düzenlenmesi ve kimlik doğrulama süreçleri	•Yeni nesil sürücü belgelerinde biyometrik fotoğraf zorunludur. •Kimlik doğrulamada elektronik bileşenler ve nüfus veri tabanı kullanılır. •Parmak izi doğrudan yönetmelikte geçmez ancak kimlik doğrulama altyapısı biyometrik bileşenlerle çalışır.
İçişleri Bakanlığı - Emniyet Genel Müdürlüğü / 2016 (son güncelleme)			

Yönetmelikler incelendiğinde, Türkiye'de biyometrik verilerin kullanımının özellikle kimlik doğrulama, kamu güvenliği ve hizmet sunumu süreçlerinde sistematik bir biçimde düzenlendiği görülmektedir. Bu düzenlemeler, bir yandan kurumsal sorumlulukları netleştirirken, diğer yandan biyometrik verilerin hangi amaçlarla ve hangi koşullar altında işlenebileceğine ilişkin önemli sınırlar ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, incelenen tüm yönetmeliklerde ortak bir ilke olarak biyometrik verilerin yalnızca ilgili mevzuat çerçevesinde ve ağırlıklı olarak kimlik doğrulama amacıyla kullanılacağı vurgulanmaktadır. Dolayısıyla yönetmelikler, KVKK'nın öngördüğü özel nitelikli kişisel veri koruma yükümlülükleriyle birlikte değerlendirildiğinde, Türkiye'de biyometrik veri işleme süreçlerinin hukuki güvenliğini tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir.

1.5. Biyometrik Verilerin İşlenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlara İlişkin Rehber

Kişisel Verileri Koruma Kurumu tarafından yayımlanan “Biyometrik Verilerin İşlenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlara İlişkin Rehber” (Kişisel Verileri Koruma Kurumu, 2018), biyometrik verilerin işlenmesi sürecinde uyulması gereken hukuki, teknik ve idari yükümlülükleri açıklığa kavuşturmak amacıyla hazırlanmıştır. Rehber, 6698 sayılı Kanun’un özel nitelikli kişisel verilere ilişkin hükümlerini biyometrik veri bağlamında somutlaştırmakta; veri sorumlularının hangi şartlar altında biyometrik veri işleyebileceğini, hangi ilkelere uyması gerektiğini ve bu verilerin güvenliğine ilişkin özel tedbirlerin nasıl uygulanacağını ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Bu yönüyle rehber, biyometrik veri işlemenin yalnızca gerekli ve ölçülü olduğu durumlarda kullanılmasını sağlamak ve ilgili kişilerin temel hak ve özgürlüklerini koruma amacı taşımaktadır. Rehberin özeti Tablo 4’te sunulmuştur.

Tablo 4. Biyometrik Verilerin İşlenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlara İlişkin Rehberin Özeti

Başlık / Tema	Rehberde Ele Alınan Konu	Rehberin Temel Yaklaşımları
Rehberin Amacı	Biyometrik veri işleme süreçlerine yön vermek	Biyometrik verilerin yüksek risk taşıması nedeniyle veri sorumlularının uyması gereken hukuki, teknik ve idari yükümlülükleri somutlaştırır; KVKK Madde 6 kapsamındaki “özel nitelikli veri” korumasını detaylandırır.
Biyometrik Verinin Tanımı ve Türleri	Fiziksel ve davranışsal biyometrik veriler	Parmak izi, yüz tanıma, iris, retina, avuç içi damar izi, ses, yürüme analizi gibi veriler örneklenir. Ham veri, şablon, geri döndürülemez şablon arasındaki farklar açıklanır.
Hukuki Dayanaklar	KVKK Madde 4, 5, 6, 10, 12	Biyometrik veri işleme ancak açık rıza veya kanuni zorunluluk halinde yapılabilir. İşleme faaliyetlerinin meşru amaç-ölçülülük- gereklilik-veri minimizasyonu ilkelerine uygun olması zorunludur.
İşlemenin Temel İlkeleri	Veri minimizasyonu, amaçla sınırlılık, ölçülülük, şeffaflık	Biyometrik veri, zorunlu değilse kullanılmamalıdır. Alternatif doğrulama yöntemleri mevcutsa tercih edilmelidir. Veri işleme amacı dışına çıkılamaz.

Açık Rıza ve Aydınlatma	Açık rızanın koşulları, özgür irade	Açık rızanın baskı altında alınmayacağı, örneğin işyerlerinde parmak izi gibi yöntemlerin zorunlu kılınmayacağı vurgulanır. Aydınlatma yükümlülüğü ayrıntılandırılır.
Biyometrik Verinin Kullanım Alanları	Kimlik doğrulama, erişim kontrolü, güvenlik sistemleri	Biyometrik sistemlerin en yaygın kullanım alanları “kimlik doğrulama” ve “erişim kontrolü”dür. Ancak her kullanım alanı için gereklilik analizi yapılmalıdır.
Yasak veya Sakıncalı Kullanım Senaryoları	Gereksiz biyometrik işleme örnekleri	İşyerlerinde çalışanların devam takip sistemi için parmak izi zorunluluğu; spor salonlarında zorunlu parmak izi, sitelerde yüz tanıma sistemi gibi örneklerin hukuka aykırı olabileceği belirtilir.
Teknik Tedbirler	Şifreleme, hashleme, güvenli şablon, anahtar yönetimi	Biyometrik veriler asla düz (ham) halde saklanmamalıdır. AES-256 şifreleme, hashing + salt, güvenli biyometrik şablon kullanımı zorunlu tutulur. Anahtar yönetimi özel güvenlik gerektirir.
İdari Tedbirler	Yetki matrisi, erişim kontrolleri, politika dokümanları	Erişim loglarının tutulması, rol tabanlı yetkilendirme, personel eğitimi, gizlilik sözleşmeleri, saklama–imha politikalarının oluşturulması zorunludur.
Biyometrik Sistem Yaşam Döngüsü	Sistem tasarımı, test, kullanım, bakım, imha	Biyometrik veri işleme süreci tasarımdan imhaya kadar tüm aşamalarıyla güvenlik kontrolüne tabi olmalıdır. Güvenlik testleri düzenli yapılmalıdır.
Risk Analizi ve DPIA (Veri Koruma Etki Değerlendirmesi)	Yüksek riskli veri işleme	Biyometrik veri işlemede Veri Koruma Etki Değerlendirmesi (DPIA) yapılması önerilir; zorunlu olarak risk-tehdit analizi değerlendirilmelidir.
Çocuklara ait Biyometrik Veri	Hassasiyetin artması	Çocuklara ait biyometrik veri işleme, çok daha sıkı tedbir gerektirir; çocuğun yararı ilkesi esas alınır.
Saklama ve İmha Yükümlülükleri	Saklama süresi sınırlaması	Biyometrik veriler amacı sona erdiğinde derhal imha edilmelidir. Şablonlar bile gereksizse silinmelidir.
Kurul Kararlarına Referanslar	Parmak izi ve yüz tanıma kararları	Rehber, Kurulun parmak izi–yüz tanıma–erişim kontrol sistemleri kararlarını örnek gösterir ve uygulanması gerektiğini belirtir.
En Yaygın Hatalar	Hatalı işleme örnekleri	Ham veri saklama, gereksiz biyometri kullanma, açık rıza olmadan işlem yapma, alternatif yöntem sunmama gibi ihlaller listelenir.

Rehberin Genel Mesajı	Biyometrik verinin en son çare olarak kullanılması	Rehber, biyometrik verinin yalnızca mutlaka gerekli olan durumlarda ve en yüksek güvenlik tedbirleriyle işlenmesi gerektiğini vurgular.
-----------------------	--	---

Rehber, biyometrik verilerin neden özel nitelikli kişisel veri olarak kabul edildiğini ve bu verilerin işlenmesinde neden diğer veri türlerine kıyasla çok daha yüksek düzeyde güvenlik önlemleri gerektirdiğini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Rehber, yalnızca teknik standartlara odaklanmakla sınırlı kalmayıp; hukuki yükümlülükleri, etik ilkeleri ve uygulamada karşılaşılabilecek risk ve hataları da ele alarak biyometrik veri yönetimine bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yönüyle söz konusu rehber, kurumların biyometrik veri işleme süreçlerini tasarlarırken ve yürütürken başvurması gereken temel bir referans doküman niteliğindedir.

Sonuç olarak, bu hukuki çerçeve bütüncül olarak değerlendirildiğinde, biyometrik verilerin Türkiye’de sıradan bir kişisel veri türü olarak değil, en sıkı koruma gerektiren özel bir veri kategorisi olarak ele alındığı görülmektedir. Anayasa’nın 20. maddesi ile kişisel verilerin korunması temel bir hak olarak güvence altına alınmış; KVKK ise biyometrik verileri “özel nitelikli kişisel veri” kapsamında değerlendirerek araştırma, güvenlik, kimlik doğrulama, vatandaşlık ve göç işlemleri gibi alanlarda gerçekleştirilecek her türlü veri işleme faaliyetini açık rıza, kanuni dayanak, ölçülülük ve veri minimizasyonu ilkelerine bağlamıştır. Nüfus, vatandaşlık, yabancılar, pasaport, ceza infaz ve trafik mevzuatı ile bunlara bağlı yönetmelikler; hangi kurumların hangi amaçlarla biyometrik veri toplayabileceğini ve bu verilerin ne şekilde saklanıp kullanılacağını belirleyerek çok katmanlı bir normatif yapı oluşturmaktadır. Biyometrik Verilerin İşlenmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlara İlişkin Rehber ise bu normatif çerçeveyi uygulamaya aktaran bir “yol haritası” işlevi görmekte; teknik (şifreleme, şablon koruma, anahtar yönetimi, erişim loglarının tutulması) ve idari (yetki matrisi oluşturulması, politika dokümanlarının hazırlanması, personel eğitimi, saklama ve imha süreçleri) tedbirleri somutlaştırmakta ve kurul kararlarıyla desteklenen yasaklı veya sınırlı kullanım senaryolarını açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu kapsamda biyometrik veriler, yalnızca dijital dönüşüm ve teknolojik gelişmelerin bir aracı olarak değil; aynı zamanda çok boyutlu hukuki, teknik ve etik sorumluluklar doğuran özel bir veri alanı olarak konumlandırılmaktadır.

Eğitim araştırmalarında biyometrik veriyi kullanmak isteyen bir araştırmacı bakımından bu çerçeve, hem araştırma etiği hem de hukuki uyum açısından referans niteliğindedir. Araştırmacı, çalışmanın tasarım aşamasından itibaren hangi biyometrik verilerin gerçekten gerekli olduğunu gerekçelendirmeli; mümkün olan her durumda daha az müdahaleci alternatifleri (anonimleştirilmiş performans verisi, gözlem, anket vb.) değerlendirmeli ve ancak bilimsel olarak zorunlu olduğunda biyometrik veri toplamaya yönelmelidir (Erdiñ, 2020). Biyometrik veri toplanacaksa, katılımcılara kapsamlı ve anlaşılır bir aydınlatma yapılması, özğür iradeye dayalı açık rızanın alınması, verilerin sadece belirtilen amaçlar için ve sınırlı süreyle işlenmesi, çocuklar veya hassas gruplar söz konusu olduğunda ilave koruyucu önlemler uygulanması gerekir (National Committee on Research Ethics in the Social Sciences and Humanities, 2021). Ayrıca veri güvenliği, yalnızca belirli aralıklarla kontrol edilmesi gereken teknik bir ayrıntı değil; araştırma sürecinin tamamı boyunca sürekli olarak gözden geçirilmesi gereken temel bir araştırma bileşenidir. Bu kapsamda güçlü şifreleme yöntemlerinin kullanılması, erişim yetkilerinin sınırlandırılması, düzenli güvenlik denetimlerinin yapılması ve olası veri ihlallerine yönelik önceden tanımlanmış müdahale planlarının oluşturulması, araştırma protokolünün ayrılmaz unsurları arasında yer almalıdır. Son olarak, biyometrik verilerin hukuki boyutuna hakim olmak, araştırmacıyı yalnızca idari yaptırımlara karşı korumakla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda katılımcıların güvenliğini güçlendirmekte, araştırmanın etik meşruiyetini pekiştirmekte ve üretilen bilimsel bilginin hem ulusal hem de uluslararası düzeyde kabul edilebilirliğini artırmaktadır.

2. Eğitim Araştırmalarında Biyometrik Veri Kullanımı: Etik İlkeler ve Uygulama Sorumlulukları

Eğitim araştırmalarında biyometrik veri kullanımının yasal bir zemine oturtulmuş olması, etik açıdan gerekli tüm koşullar sağlandığı anlamına gelmemektedir (Vanclay, 2013; European Commission, 2021). Bu noktada araştırmacının, biyometrik veri kullanımının gerçekten zorunlu olup olmadığını dikkatle değerlendirmesi; biyometrik verinin, çalışmanın amaç ve ihtiyaçları doğrultusunda vazgeçilmez olduğuna kesin olarak kanaat getirdiğı durumlarda bu yönde bir karar vermesi gerekmektedir.

Eğitim ortamlarında eğitimci, araştırmayı yürüten akademisyen, kurum ile biyometrik veri toplanacak hedef kitle arasında doğal bir güç dengesizliği bulunmaktadır (Briggs, 2019; Mhuiri, 2025). Bu durum,

katılımcıların araştırmaya gerçekten özgür iradeleriyle mi katıldıkları, yoksa örtük bir baskı altında biyometrik verilerini mi paylaştıkları sorusunu gündeme getirmektedir. Bu kritik hususun, araştırma sürecine başlanmadan önce kapsamlı ve derinlemesine biçimde ele alınması gerekmektedir.

Veri toplanacak kitlenin biyometrik veri kavramı, biyometrik verilerin önemi ve bu verilerin paylaşılmasının doğurabileceği olası riskler konusunda yeterli farkındalık düzeyine sahip olması, çalışmanın etik niteliğini güçlendiren temel unsurlardan biridir (Acquisti vd., 2015). Hedef kitlenin bu yeterliliğe sahip olmadığı durumlarda ise araştırmaya başlanmadan ve katılımcı rızası alınmadan önce; biyometrik verinin hukuki boyutu, işlenme şartları, olası riskler ve tehditler hakkında açık, anlaşılır ve kapsamlı bir bilgilendirme yapılmalıdır. Ayrıca katılımcılara, veri toplama süreci ile verilerin saklanması ve işlenmesi aşamalarında “çift koruma” ilkesinin hem hukuki hem de etik düzeyde esas alınacağı açıkça belirtilmelidir.

Biyometrik verilerin çoğunlukla dijital ortamlarda saklanması, bilişim altyapısı ve bilişim güvenliği konularını ayrıca önemsenmesi gereken bir boyut haline getirmektedir. Bu bağlamda araştırmayı yürüten akademisyenlerin, olası yasal ve etik ihlallerin doğurabileceği sonuçları da dikkate alarak araştırma tasarımlarını bu çerçevede kurgulamaları gerekmektedir. Görüldüğü üzere, biyometrik verilerin eğitim araştırmalarında kullanımı çok yönlü bir değerlendirmeyi zorunlu kılmaktadır. Bu bölümün devam eden kısmında, eğitim araştırmalarında biyometrik veri kullanımı etik boyutlarıyla birlikte ele alınmaktadır.

2.1. Etik Temel İlkeler ve Biyometrik Veriye Özgü Duyarlılık

Eğitim araştırmalarında toplanan veriler, çoğu zaman düşük riskli veri kategorisi içerisinde değerlendirilmektedir. Öğrencilerin akademik başarıları, motivasyon düzeyleri, düşünceleri ve algıları gibi genelleştirmeye ve anonimleştirmeye elverişli veri türleri üzerinden çok sayıda araştırma yürütülmektedir. Ancak biyometrik veri kullanımının söz konusu olduğu durumlarda bu temel varsayım geçerliliğini yitirmekte ve toplanan veriler yüksek riskli veri kategorisi kapsamında değerlendirilmeye başlanmaktadır (Jain vd., 2005). Yüz görüntüsü, parmak izi ve ses gibi biyometrik veriler, özellikle yapay zeka araç ve

teknolojilerindeki hızlı gelişmelerle birlikte çok farklı amaçlar doğrultusunda kullanılabilir hale gelmekte ve bu durum ciddi güvenlik risklerini beraberinde getirmektedir. Biyometrik verilerin değiştirilemez nitelikte olması, araştırmaya katılan bireylerin potansiyel olarak yaşam boyu sürebilecek risklerle karşı karşıya kalmasına neden olabilmektedir. Ayrıca biyometrik verilerde anonimleştirmenin her zaman mümkün olmaması, bu veri türü açısından klasik gizlilik ve veri koruma önlemlerinin çoğu zaman yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Bu durum, biyometrik verilerin işlenmesinde daha ileri düzeyde hukuki, teknik ve etik koruma mekanizmalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Eğitim ortamlarında yürütülen araştırmalarda, çalışmaya katılan öğrenciler “hayır” deme konusunda güçlük yaşayabilmektedir. Katılım biçimsel olarak gönüllü görünse dahi, bu gönüllülük çoğu zaman algılanan ya da örtük bir zorunluluktan kaynaklanabilmektedir. Bu bağlamda, şeklen uygun görünen araştırmaya katılım rızası, etik açıdan gerçekten özgür ve bilinçli bir katılım rızası anlamına gelmeyebilir. Bu nedenle araştırmanın amacı, kapsamı ve uygulama biçimi katılımcılara açık, anlaşılır ve net bir şekilde ifade edilmelidir. Söz konusu değerlendirme; Şekil 1’de gösterilen yararlılık, zarar vermeme, adalet ve özerklik ilkeleri çerçevesinde ele alınmalı; biyometrik veri kullanımına ilişkin etik duyarlılık bu temel etik ilkeler doğrultusunda şekillendirilmelidir.



Şekil 1. Biyometrik Veri Kullanımında Etik İlkeler

Yararlılık ilkesi, biyometrik veri kullanımının araştırmaya gerçek ve anlamlı bir bilimsel katkı sağlayıp sağlamadığının sorgulanmasını gerektirir (National Commission for the Protection of Human Subjects of

Biomedical and Behavioral Research, 1979). Eğitim araştırmalarında biyometrik veriler, yalnızca elde edilecek bilginin araştırma amaçları açısından açık ve somut bir yarar sunacağı ve bu sonuçların başka veri toplama yöntemleriyle elde edilmesinin mümkün olmadığı durumlarda tercih edilmelidir. Sırf teknolojik olanakların mevcut olması ya da yöntemin yenilikçi görünmesi, biyometrik veri kullanımını etik açıdan meşru kılmaz. Bu nedenle araştırmacı, biyometrik veri kullanımının sağladığı bilimsel katkının, katılımcıların maruz kalabileceği riskleri gerçekten dengeleyip dengelemediğini dikkatle değerlendirmelidir.

Zarar vermeme ilkesi, biyometrik veri kullanımının katılımcılara fiziksel, psikolojik, dijital ya da geleceğe dönük herhangi bir zarar oluşturup oluşturmadığının değerlendirilmesidir. Eğitim araştırmalarında zarar, yalnızca araştırma sürecinde ortaya çıkan anlık etkilerle sınırlı değildir; biyometrik verilerin ileride farklı amaçlarla kullanılma riski, verilerin uygun biçimde saklanmaması veya zamanında yok edilmemesi gibi riskler de bu kapsamda ele alınmalıdır. Biyometrik verilerin değiştirilemez nitelikte olması, olası bir ihlalin ve hatanın etkilerini kalıcı hale getirebilmektedir. Bu nedenle araştırmacı, biyometrik veri kullanımının yaratabileceği tüm riskleri öngörmeli ve bu riskleri en aza indirecek önlemleri almadan araştırma sürecine başlamamalıdır (Floridi ve Taddeo, 2016).

Adalet ilkesi, biyometrik veri kullanımının araştırmaya katılan tüm gruplar açısından eşit ve hakkaniyetli sonuçlar doğurmasını gerektirir. Eğitim araştırmalarında belirli grupların; özellikle çocuklar, dezavantajlı bireyler, engelli bireyler veya korunmaya muhtaç katılımcı grupların biyometrik veri kullanımından orantısız biçimde olumsuz etkilenmesi etik açıdan önlenemez sorunlar oluşturabilir. Araştırmanın sağlayacağı yarar ile katılımcıların üstlendiği riskler adil bir biçimde dengelenmelidir. Bu bağlamda biyometrik veriler, belirli bir grubun kırılganlığını artıracak şekilde kullanılmamalıdır.

Özerklik ilkesi ise katılımcıların araştırmaya katılım ve biyometrik veri paylaşımı konusunda gerçekten zgr bir irade ile karar verebilmelerini esas alır. Eğitim ortamlarında mevcut olan g işkileri, öğrencilerin ya da katılımcıların “hayır” deme konusunda zorlanmalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle biçimsel olarak alınmış bir rıza, her zaman etik açıdan geçerli bir zgr rıza anlamına gelmeyeabilir. Araştırmacı, katılımcıların baskı altında kalmadan karar verebilecekleri bir ortam

oluşturmak ve bu özerkliği sürecin her aşamasında korumakla sorumludur (Beauchamp, 2003).

2.2. Etik Kurul Süreci, Açık Rıza ve Katılımcı Hakları

Etik kurullar, birçok araştırmacı tarafından bürokratik onay makamları olarak algılanmakta; etik kurulların etik riskleri görünür kılan ve sınırlayan bir mekanizma olduğu çoğu zaman fark edilmemektedir. Bu farkı kavrayamayan araştırmacılar için etik kurul süreçleri, zamanla yalnızca form doldurma rehberlerine dönüşmektedir. Oysa etik kurul süreçlerinin özünde, araştırmacıya sunulan bir etik farkındalık rehberi bulunmaktadır. Özellikle biyometrik verilerin kullanıldığı çalışmalarda araştırmacı, öncelikle “Etik kurul izni alınması yeterli midir?” sorusunu ayrıntılı biçimde ele almalıdır. Etik kurullar araştırmayı başlamadan önce değerlendirir ve sahadaki tüm etik riskleri öngöremeyebilir. Bu durumlarda etik sorumluluk, araştırmacıda çalışma tamamlanıp veriler uygun şekilde yok edilene ya da anonim hale getirilinceye kadar devam eder.

Araştırmacı, etik kurul onay başvurusunu bir “etik gerekçelendirme metni” olarak ele almalı; biyometrik veri kullanacağı çalışmalarda “biyometrik verinin neden zorunlu olduğunu”, “alternatif yöntemlerin neden yeterli olmadığını”, “mevcut risklerin neler olduğunu” ve bu riskleri nasıl azaltacağını açık biçimde ortaya koymalıdır. Özetle etik kurul başvuru sürecine yalnızca bürokratik bir işlem olarak bakılmamalı; biyometrik veriye olan ihtiyaç net bir şekilde gerekçelendirilmeli ve öngörülen tüm riskler tanımlanarak risk azaltma mekanizmaları sunulmalıdır.

Biyometrik verilerin kullanılacağı etik kurul başvurularında öne çıkan bir diğer önemli nokta ise “biçimsel rıza” ile “etik rıza” arasındaki ayrımdır. Her ne kadar yasal ve biçimsel olarak bir birey biyometrik verilerinin kullanımına izin vermiş olsa da, bu rıza biyometrik verinin önemi, taşıdığı riskler ve değiştirilemez niteliği konusunda yeterli farkındalık olmadan verilmiş olabilir. Benzer şekilde, verilerin nasıl kullanılacağı, saklanacağı, işleneceği ve yok edileceği konularında yeterli bilgilendirme yapılmadan alınan rızalar da etik açıdan sorunludur. Eğitim araştırmalarında not kaygısı, öğretmen/öğretmen etkisi ya da kurum baskısı gibi unsurlar da rıza sürecini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu noktada araştırmacının odaklanması gereken temel soru, biyometrik verisi

kullanılmak istenen katılımcının “hayır” demesi durumunda herhangi bir olumsuz sonuçla karşılaşp karşılaşmayacağıdır.



Şekil 2. Biçimsel Rıza İle Etik Rıza Arasındaki Fark

K-12 eğitim kurumları, eğitim araştırmalarında yoğun veri toplanan ve biyometrik veriye dayalı çalışmalarda çocuk kategorisinde yer alan katılımcıların bulunduğu ortamlardır. Çocuklarla biyometrik veriye dayalı bir araştırma yürütülecekse veli onayı zorunlu olmalıdır. Ancak veliden alınan onay, araştırmacının etik sorumluluğunu otomatik olarak tamamladığı anlamına gelmez. Araştırmacı, toplanacak biyometrik veri süreçlerini, temel kavramları ve olası riskleri çocukların anlayabileceği bir dilde açıklamalı; çocuklara araştırmaya katılmak isteyip istemedikleri açıkça sorularak ayrıca onay alınmalıdır. Bu noktada kritik olan, araştırmacının çocuğun araştırmaya katılmak istememesi durumunda, yasal izin bulunsa dahi biyometrik veri toplamamasıdır.

Biyometrik verilere dayalı eğitim araştırmalarında bir diğer önemli husus, katılımcı haklarının araştırma süreci içerisinde nasıl konumlandırıldığıdır. Araştırmacı, katılımcı haklarını yalnızca KVKK, etik kurul onay belgesi ya da yasal prosedürler çerçevesinde ele almamalı; sürece bir “hak bilinci” perspektifiyle yaklaşmalıdır. Bu bağlamda katılımcılar pasif birer veri kaynağı olarak değil, hak sahibi aktif aktörler olarak değerlendirilmelidir. Katılımcıların bilgi alma, veriye erişim, düzeltme, silme ve itiraz haklarının araştırma süreci sona erdikten sonra da devam ettiği özellikle vurgulanmalıdır.

2.3. Güvenli Veri Yönetimi: Teknik ve İdari Sorumluluklar

Biyometrik veriler yüksek riskli veri grubunda yer almaktadır. Bu nedenle bilimsel bir araştırmada biyometrik veri kullanılıyorsa, etik ilkelerin teknik ve idari karşılık bulması zorunludur. Yararlılık, adalet, özerklik, güvenlik ve zarar vermeme gibi etik ilkeler ancak güvenli veri yönetimi ile hayata geçirilebilir. Güvenliği sağlamak ve biyometrik verilerin kullanımını güvence altına almak, sürece destek olan kurumların ya da bilişim altyapısının değil, doğrudan araştırmacının bireysel sorumluluğudur. KVKK'nın 12. maddesinde yer alan veri sorumlusu/veri işleyen rolü, bu noktada araştırmacının üstlendiği bir rol haline gelmektedir. Araştırmacının yapacağı ihlaller, hem idari hem de hukuki açıdan ağır sonuçlar doğurabilmektedir. Araştırmacının teknik ve idari sorumlulukları Şekil 3'de görüldüğü üzere altı başlık altında ele alınabilir: veri minimizasyonu, şifreleme ve güvenli şablon kullanımı, erişim yetkilerinin kısıtlanması, saklama sürelerinin belirlenmesi, anonimleştirme/imha politikaları ve veri aktarımında güvenlik.



Şekil 3. Teknik ve İdari Sorumluluklar

Veri Minimizasyonu

Araştırmacı veri toplama sürecine yalnızca “gereksiz veri toplanmamalı” ekseninde yaklaşmamalı; biyometrik veri toplanmanın en başta bir risk oluşturduğunun farkında olmalıdır (Solove, 2006). Bu nedenle daha az veri, daha az etik risk anlamına gelmektedir. Araştırmacı, çalışma öncesinde veri toplama kurgusunu araştırmanın amaç ve çıktıları perspektifinde netleştirmeli; veri toplama sürecinde minimum düzeyde biyometrik veriye odaklanmalı ve kapsam dışı hiçbir biyometrik veriyi toplamamalıdır. “Gereksiz” ya da “ileride lazım olabilir” düşüncesiyle toplanan verilerin gerekçesi, etik açıdan hiçbir zaman kabul edilemez.

Şifreleme ve Güvenli Şablon Kullanımı

Biyometrik verilerin kullanıldığı araştırmalarda verilerin ham haliyle saklanması, etik açıdan kabul edilemez riskler doğurmaktadır. Şifreleme, teknik bir tercih değil, etik bir zorunluluktur. Biyometrik veriler her koşulda üst düzey şifreleme teknikleri kullanılarak kaydedilmeli, saklanmalı ve korunmalıdır (ISO/IEC, 2011).

Erişim Yetkilerinin Kısıtlanması

Eğitim araştırmalarında araştırma ekibinde birden fazla araştırmacı yer alabilmektedir. Ancak bu durum, her araştırmacıya biyometrik verilere erişim, görüntüleme ya da işleme hakkı tanımaz. Erişim yetkisi yalnızca dış tehditler açısından değil, araştırma ekibi içinde oluşabilecek iç riskler açısından da değerlendirilmelidir. Araştırma ekibinde yalnızca araştırmanın amaç ve çıktıları doğrultusunda biyometrik verileri görüntülemesi, işlemesi ve saklaması gereken araştırmacılara erişim yetkisi verilmelidir (Saltzer ve Schroeder, 1975).

Saklama Sürelerinin Belirlenmesi

Biyometrik verilerin kullanıldığı araştırmalarda, verilerin proje bitene kadar saklanması en sık yapılan hatalardan biridir. Araştırmacı, biyometrik verilerin saklanma süreleriyle ilgili olarak sürekli biçimde “Veri neden hala saklanıyor?” ve “Bu verilerin saklanmasına ilişkin bilimsel bir gerekçe var mı?” sorularını sormalıdır. Veriler işlendikten ve araştırma hedeflerine ulaşıldıktan sonra biyometrik veriler imha edilmelidir. Biyometrik verilerin süresiz biçimde saklanması örtük bir etik ihlal niteliği taşımaktadır (Jain vd., 2004).

Anonimleştirme ve İmha Politikaları

Biyometrik verilerin anonimleştirilmesi her zaman mümkün değildir. Anonimleştirilemeyen biyometrik verilerin imha edilmesi etik açıdan zorunlu hale gelmektedir. Verilerin imha edilmesi etik sorumluluğun tamamlanması olarak değerlendirilmelidir (Ohm, 2009).

Veri Aktarımında Güvenlik

Biyometrik verilerin aktarım süreci, etik risklerin en görünmez olduğu aşamalardan biridir. Veri aktarımı, veri güvenliği açısından en kırılgan noktayı oluşturmaktadır. Bu süreçte bulut sistemlerin, e-posta uygulamalarının ve dosya paylaşım platformlarının kullanımı riskleri önemli ölçüde artırmaktadır. Biyometrik veriler, erişilebilirliğin en minimumda tutulduğu ve yüksek güvenlik düzeyine sahip veri depolama alanlarında saklanmalıdır (McCallister, 2010).

KVKK'nın 12. maddesinde belirtilen veri sorumlusunun alması gereken teknik ve idari tedbirler, etik değerlerle birlikte ele alındığında, araştırmacıyı etik açıdan maksimum düzeyde koruyacak ve olası riskleri minimuma indirecektir.

Kaynaklar

- Acquisti, A., Brandimarte, L., ve Loewenstein, G. (2015). Privacy and human behavior. *Science*, 347(6221), 509–514. <https://doi.org/10.1126/science.aal1465>
- Beauchamp, T. L. (2003). Methods and principles in biomedical ethics. *Journal of Medical Ethics*, 29(5), 269–274.
- Briggs, S. (2019). Ethical research in the secondary school classroom. *Teachers and Curriculum*, 19(1), 63–77. <https://doi.org/10.15663/TANDC.V19I1.332>
- De Keyser, A., Bart, Y., Gu, X., Liu, S. Q., Robinson, S. G., ve Kannan, P. K. (2021). Opportunities and challenges of using biometrics for business: Developing a research agenda. *Journal of Business Research*, 136, 52–62.
- Epstein, C. (2008). Embodying risk: Using biometrics to protect the borders. In *Risk and the war on terror* (pp. 194–210). Routledge.
- Erdinç, G. H. (2020). Ölçülülük ilkesi ve açık rıza kapsamında biyometrik verilerin işlenmesi. *Kişisel Verileri Koruma Dergisi*. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1195495>
- European Commission. (2021). *Ethics and data protection: Guidance for the Horizon Europe Programme*. European Commission. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/guidance/ethics-and-data-protection_he_en.pdf
- Floridi, L., ve Taddeo, M. (2016). What is data ethics? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2083), 20160360.
- Jain, A. K., Ross, A., ve Prabhakar, S. (2004). An introduction to biometric recognition. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 14(1), 4–20.
- Jain, A. K., Ross, A., ve Uludag, U. (2005). Biometric template security: Challenges and solutions. In *Proceedings of the 13th European Signal Processing Conference* (pp. 1–4). IEEE.
- Kişisel Verileri Koruma Kurumu. (2018). *Biyometrik verilerin işlenmesinde dikkat edilmesi gereken hususlara ilişkin rehber*.

<https://www.kvkk.gov.tr/SharedFolderServer/CMSFiles/bd06f5f4-e8cc-487e-abe1-d32dc18e2d7e.pdf>

McCallister, E. (2010). *Guide to protecting the confidentiality of personally identifiable information*. Diane Publishing.

Mhuiri, S. N. (2025). Ethical considerations in teacher reflection and research. *Educational Ethics Journal*.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03323315.2025.2479437>

National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research. (1979). *The Belmont Report*.

National Committee on Research Ethics in the Social Sciences and Humanities. (2021). *Guidelines for ethical review in human sciences: Treatment and rights of research participants*. Finnish National Board on Research Integrity. <https://tenk.fi/en/advice-and-materials/guidelines-ethical-review-human-sciences>

Ohm, P. (2009). Broken promises of privacy: Responding to the surprising failure of anonymization. *UCLA Law Review*, 57, 1701–1777.

Saltzer, J. H., ve Schroeder, M. D. (1975). The protection of information in computer systems. *Proceedings of the IEEE*, 63(9), 1278–1308.

Secretary, I. (2011). *Information technology—Security techniques—Biometric information protection (ISO/IEC 24745:2011)*. International Organization for Standardization.
<https://www.iso.org/standard/52946.html>

Solove, D. J. (2006). A taxonomy of privacy. *University of Pennsylvania Law Review*, 154(3), 477–560.

URL-1. Türkiye Cumhuriyeti Anayasası. (1982).
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=2709&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>

URL-2. Kişisel Verilerin Korunması Kanunu. (2016). *Kanun No: 6698*.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6698&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>

URL-3. Nüfus Hizmetleri Kanunu. (2006). *Kanun No: 5490*.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5490&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>

- URL-4. Yabancılar ve Uluslararası Koruma Kanunu. (2013). *Kanun No: 6458*.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6458&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>
- URL-5. Türk Vatandaşlığı Kanunu. (2009). *Kanun No: 5901*.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5901&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>
- URL-6. Türkiye Cumhuriyeti Kimlik Kartı Yönetmeliği. (2019).
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/12/20191203-5.htm>
- URL-7. Pasaport Kanununun Uygulanmasına Dair Yönetmelik. (2014).
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/08/20140814-12.htm>
- URL-8. Pasaport Kanunu. (1950). *Kanun No: 5682*.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=5682&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=3>
- URL-9. Yabancılar ve Uluslararası Koruma Kanununun Uygulanmasına İlişkin Yönetmelik. (2016).
<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2016/03/20160317-11.htm>
- URL-10. Yabancılar ve Uluslararası Koruma Kanunu. (2013). *Kanun No: 6458*.
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=6458&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5>
- URL-11. Karayolları Trafik Yönetmeliği. (2018).
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=8182&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- URL-12. Karayolları Trafik Kanunu. (1983). *Kanun No: 2918*.
<http://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.2918.pdf>
- Vanclay, F. (2013). Principles for ethical research involving humans. *International Journal of Social Research Methodology*, 16(2), 79–87. <https://doi.org/10.1080/14615517.2013.850307>