

TÜRKİYE VE DÜNYADA VETERİNER FİZYOLOJİSİ

Editör: Prof.Dr. Sevinç ATEŞ

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Veteriner Fizyolojisi

Editör

Prof.Dr. Sevinç ATEŞ

yaz
yayınları

2025

Türkiye ve Dünyada Veteriner Fizyolojisi

Editör: Prof.Dr. Sevinç ATEŞ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-90-1

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Dijital Fizyoloji	1
<i>Ebru YALÇIN</i>	
Veteriner Fizyolojide 3B Görüntüleme ve Davranış-Etoloji İlişkisi: Dalgalanan Asimetri ve Dijital Morfometri Perspektifi	22
<i>Ebru YALÇIN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

DİJİTAL FİZYOLOJİ

Ebru YALÇIN¹

1. GİRİŞ

Dijital fizyoloji, canlıların fizyolojik işlev ve süreçlerini sensörler, bilgisayar tabanlı analizler, yapay zeka ve büyük veri gibi dijital teknolojilerle inceleyen ve uygulayan bir yaklaşımdır. Bu sayede fizyolojik veriler dijital olarak toplanabilir, işlenebilir ve yorumlanabilir. Dijital dönüşüm veteriner hekimlikte de araştırma, klinik uygulama, eğitim ve saha çalışmalarını etkileyerek hayvan sağlığının uzaktan ve gerçek zamanlı izlenmesini ve karmaşık verilerin daha iyi anlaşılmasını mümkün kılmıştır (Zhao vd., 2025). Ayrıca davranışsal verilerin de dijital yöntemlerle toplanıp analiz edilebilmesi, etoloji ile fizyolojinin kesişiminde yeni çalışma alanları oluşturmuştur (Zhao vd., 2025). Bu bölümde dijital fizyolojinin tanımı ve gelişimi, veteriner fizyolojideki uygulamaları, eğitimdeki rolü, kullanılan araçlar, gelecekteki potansiyeli ve karşılaşılan zorluklar ele alınacaktır. Bunun yanında, dijital davranış izleme, yapay zeka ile davranış örüntülerinin analizi ve etolojik ölçütlerin nörofizyolojik verilerle birleştirilmesi gibi başlıklarla etoloji ile bağlantısı da değerlendirilecektir.

¹ Dr. Arş. Gör., Bursa Uludağ Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, KUTLAB Dijital Fizyoloji Lab., ORCID: 0000-0003-1756-1288.

2. DİJİTAL FİZYOLOJİNİN TANIMI VE TARİHSEL GELİŞİMİ

Dijital fizyoloji, fizyoloji biliminin dijital teknolojiyle birleşmesini ifade eder. En basit hâliyle, fizyolojik olayların dijital araçlarla ölçülmesi, modellenmesi ve analiz edilmesidir. Kalp atım hızı, kan basıncı veya beyin aktivitesi gibi yaşam belirtileri sensörlerle gerçek zamanlı kaydedilir, sayısal veriye dönüştürülür ve bilgisayar ortamında değerlendirilir (Demir, 2025). Dijital fizyolojinin gelişimi, dijital sağlık teknolojilerindeki ilerlemeyle paralel ilerlemiştir. 20. yüzyılın ortalarında analog ölçümler ağırlıktayken, bilgisayar teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla veri toplama ve analiz süreçleri giderek dijitalleşmiştir. 1960’larda giyilebilir kalp monitörleri ve telemetri sistemleri fizyolojik sinyallerin uzaktan izlenmesini mümkün kılmış, 1970’lerden itibaren bilgisayar destekli analizler fizyoloji araştırmalarında daha standardize kayıt ve istatistiksel değerlendirme sağlamıştır. 1990’larda öne çıkan “fiziyo” (physiome) girişimleri ise organizmaların kapsamlı dijital fizyolojik modellerini geliştirmeyi hedeflemiştir. Son 25 yılda yüksek çözünürlüklü görüntüleme, biyosensörler, hızlı veri işleme ve yapay zeka yaklaşımları fizyolojiye daha güçlü biçimde entegre olmuştur.

Bu dönüşümle birlikte dijital fizyoloji laboratuvarları da yaygınlaşmıştır. Türkiye’de Bursa Uludağ Üniversitesi Veteriner Fakültesi bünyesinde kurulan KUTLAB (Dijital Fizyoloji Laboratuvarı) bu yaklaşımı destekleyen bir örnektir. KUTLAB’da fizyolojik stresin morfolojik yansımaları sayısal olarak ölçülmekte, etolojik gözlemler morfometrik verilerle ilişkilendirilmekte ve yapısal analizler biyokimyasal ve moleküler verilerle birlikte yorumlanmaktadır (KUTLAB - Knowledge Under Transformation, t.y.). Bu örnek, dijital fizyolojinin yalnızca veriyi dijital ortama aktarmak değil, farklı

biyolojik düzeyleri bütüncül bir çerçevede birleştirmek anlamına geldiğini gösterir.

3. VETERİNER FİZYOLOJİ ALANINDA DİJİTALLEŞMENİN YERİ

Veteriner hekimlikte fizyoloji, hayvanların vücut işlevlerini anlamının temelidir ve dijitalleşme bu alana önemli yenilikler kazandırmaktadır. Hayvanların rahatsızlıklarını sözlü olarak ifade edememesi ve türler arası farklılıklar nedeniyle, fizyolojik göstergelerin dijital takibi hastalıkların erken fark edilmesi ve tedaviye yanıtın izlenmesi açısından büyük avantaj sağlar (Wang vd., 2020).

Günümüzde evcil hayvanlardan çiftlik hayvanlarına kadar birçok tür için dijital takip sistemleri geliştirilmiştir. Akıllı tasmalar ve deri altı sensörler; vücut sıcaklığı, kalp atım hızı ve aktivite düzeyi gibi parametreleri sürekli izleyerek sağlık durumundaki değişimleri erken dönemde yakalayabilir. Toplanan veriler yapay zeka destekli yazılımlarla analiz edildiğinde, hayvanın normal fizyoloji ve davranış örüntüsünden sapmalar otomatik olarak saptanabilir ve klinik belirti ortaya çıkmadan uyarı üretilebilir (Ding vd., 2025; Nessler, 2025a). Özellikle Precision Livestock Farming (Hassas Hayvancılık) kapsamında, çiftliklerde IoT tabanlı sensör ağlarıyla vücut ısısı, yem tüketimi, geviş getirme süresi ve adım sayısı gibi veriler toplanarak hem bireysel hayvan sağlığı hem de sürü refahı izlenebilmektedir (Neethirajan vd., 2021). Bu yaklaşım, hayvan refahını artırmaya ve hastalıkları önlemeye yönelik daha proaktif ve veri temelli bir veterinerlik pratiğini destekler (Mitek vd., 2022).

Dijitalleşmenin bir diğer boyutu, tanı ve tedavi cihazlarının klinik kullanıma entegrasyonudur. Veteriner kliniklerinde dijital stetoskoplar, taşınabilir ultrasonlar, dijital radyografi ve ileri görüntüleme sistemleri ile fizyolojiye ilişkin

yüksek çözünürlüklü veri elde edilebilmektedir. Ayrıca dijital teknolojiler, etolojik parametrelerin daha sistematik izlenmesini de mümkün kılar. Örneğin kızgınlık döneminin belirlenmesinde hareket sensörleri kullanılabilir; evcil hayvanlarda ise anormal davranış örüntüleri yapay zeka destekli kamera sistemleriyle analiz edilerek olası fizyolojik sorunlara işaret edip etmediği değerlendirilebilir. Sonuç olarak, veteriner fizyolojide dijitalleşme; daha erken tanı, daha iyi izlem ve daha bütüncül sağlık yönetimi için güçlü bir altyapı sunmaktadır.

4. ARAŞTIRMA UYGULAMALARI

Dijital fizyolojinin araştırma alanındaki uygulamaları, yeni nesil teknolojilerin veteriner ve karşılaştırmalı biyoloji araştırmalarına entegrasyonu ile hızla genişlemektedir. Bu bölümde özellikle fonksiyonel nörogörüntüleme (fMRI), yapay zeka destekli analizler, biyoistatistik ve meta-analiz yaklaşımlarına odaklanılmaktadır.

4.1. Fonksiyonel Nörogörüntüleme (fMRI)

Fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (fMRI), beyin aktivitelerini kan akımındaki değişiklikler üzerinden haritalayan güçlü bir görüntüleme teknolojisidir. İnsan tıbbında yaygın kullanıma ulaşan fMRI, veteriner ve hayvan davranışları araştırmalarında da son yıllarda önemli bir araç haline gelmiştir. Özellikle köpekler gibi evcil hayvanlarda uyanık fMRI çalışmaları yürütülerek, çeşitli uyaranlara karşı beyin tepkileri incelenmiştir. Bu alandaki çalışmalar henüz insan fMRI araştırmalarına kıyasla daha yavaş ilerlese de, köpek fMRI nörobiliminde kaydedilen ilerlemeler veterinerlik, karşılaştırmalı tıp ve translasyonel araştırmalar için büyük potansiyel taşımaktadır (Skierbiszevska vd., 2024). Örneğin, köpeklerin sahiplerinin seslerine veya emirlerine verdikleri beyin yanıtlarını inceleyen fMRI çalışmaları, insan-köpek etkileşimlerinin sinirsel

temelini aydınlatmaya başlamıştır. Bir sistematik derlemede, uyanık durumda taranan köpeklerde görsel, işitsel ve koku uyaranlarına spesifik beyin bölgelerinin aktive olduğu rapor edilmiştir (Skierbiszevska vd., 2024). Hatta bazı araştırmalarda fMRI ile köpeklerin belirli uyaranlara verdiği beyin tepkilerinin, örneğin eğitimle ilgili uygunluklarının öngörülmesinde kullanılabileceği öne sürülmüştür (Skierbiszevska vd., 2024). fMRI'nın veteriner fizyolojideki bir diğer kullanım alanı da ağrı ve nörolojik bozuklukların araştırılmasıdır. Laboratuvar hayvanlarında ağrı algısının veya analjezik etkilerin beyin düzeyindeki karşılıkları fMRI ile incelenerek yeni tedavi hedefleri belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, hayvanlarda fMRI araştırmaları pratik zorluklar barındırır; cihaz içinde hareketsiz durma gerekliliği, bazı türlerde anestezi ihtiyacı ve bunun bilişsel işlevleri baskılaması gibi engeller söz konusudur (Skierbiszevska vd., 2024). Ancak yeni eğitim protokolleriyle köpekler gibi bazı hayvanlar sedasyonsuz taranabilmekte ve bu sayede bilinçli beyin aktivitesi haritalandırılabilir (Skierbiszevska vd., 2024). Sonuç itibarıyla fMRI, dijital fizyoloji araştırmalarının vazgeçilmez bir parçası olma yolundadır ve ilerleyen dönemde farklı hayvan türlerinde davranışsal fizyoloji çalışmalarına daha çok entegre edileceği öngörülmektedir.

4.1.1. Örnek Vaka: Köpeklerde İşitsel Korteksin fMRI ile Fonksiyonel Karakterizasyonu

Eötvös Loránd Üniversitesi Etoloji Bölümü'nde yürütülen uyanık fMRI çalışmalarında, köpek beyninde işitsel korteksin konumu ve işlevsel özellikleri başarıyla ortaya konmuştur. Geleneksel olarak anestezi altında yapılan görüntülemelerin aksine, geliştirilmiş eğitim ve baş sabitleme protokolleri sayesinde köpeklerin uyanıkken taranabilmesi, beyin aktivitelerinin doğal koşullarda izlenmesini sağlamıştır (Yalçın & Sonat, 2024, 2024). Bu yaklaşım, anestezinin sinirsel aktivite

üzerindeki bozucu etkilerini elimine ederek daha güvenilir nörofizyolojik veriler elde edilmesine imkân tanır (Yalçın & Sonat 2024, 2024). Sınırlı örneklemli bireysel çalışmaların verilerini bir araya getiren meta-analiz yöntemi, istatistiksel gücü artırarak genelleştirilebilir sonuçlar sunar (Yalçın, 2023). Nitekim son on yıl içerisinde yapılan 11 farklı fMRI çalışmasından 43 köpeğe ait 174 test verisi birleştirilerek kapsamlı bir meta-analiz gerçekleştirilmiştir (Yalçın, 2023). Yüksek maliyetli cihaz gereksinimi ve az sayıda denekle sınırlı kalınması gibi zorluklar, bu tür meta-analizlerle aşılmış ve veteriner nörofizyolojisi araştırmalarında daha güçlü bulgular elde edilmesi mümkün kılınmıştır (Yalçın, 2023).

Çalışmalarda kullanılan işitsel uyaran türleri çeşitlilik göstermektedir (Yalçın, 2023)

İnsan konuşma sesleri: Anlamlı övgü kelimeleri ile anlamsız kelimeler (manasız heceler) farklı duygusal tonlamalarla (övgü veya nötr) köpeklere dinletilmiştir. Örneğin, “aferin” gibi ödül değeri taşıyan sözcükler ve anlamsız ses birleşimleri, hem coşkulu hem de nötr ses tonlarında sunularak kelime anlamı ve prozodinin etkileri ayrıştırılmıştır.

İnsan vokalizasyonları (dil-dışı sesler): Konuşma içermeyen insan sesleri (ör. gülme, ağlama gibi duygusal ünlemler) kullanılarak köpek beyninde söz-dışı işitsel işlem bölgeleri uyarılmıştır.

Köpek vokalizasyonları: Köpek sesleri (havlama, sızlanma vb.), köpeklerin kendi türlerine özgü sesleri işleme biçimini incelemek amacıyla uyaran olarak seçilmiştir

Çevresel sesler: Konuşma harici ortam sesleri de (ör. kapı zili, araba sesi) kontrol uyaranları olarak sunularak işitsel korteksin genel aktivasyon paternleri değerlendirilmiştir

Dilsel uyaranlar: Köpeklerin aşına olduğu bir dilde doğal konuşma ile tamamen yabancı bir dilde konuşma karşılaştırılmış; ayrıca her iki dildeki konuşmanın anlamsızlaştırılmış (bozulmuş) versiyonları da kullanılarak dil bilgisine özgü beyin tepkileri incelenmiştir. Bu sayede, köpek beyninin tanıdık dil ve yabancı dil arasında ayırım yapabilme kapasitesi değerlendirilmiştir.

fMRI meta-analizi bulguları: Birleştirilmiş veri setinin analiz sonuçları, köpeklerin primer işitsel korteksinin beklenenden farklı bir anatomik konumda olduğunu göstermiştir. Literatürde genellikle orta ektosylvian girus civarında tanımlanan işitsel korteks, meta-analiz ile kaudal Sylvian girus bölgesinde lokalize edilmiştir. Ayrıca en güçlü aktivasyon kümesi sağ hemisferde saptanmıştır. İstatistiksel analizler, sol hemisferdeki aktivasyonun anlamlılık düzeyinin daha yüksek olmasına karşın sağ hemisferde çok daha geniş bir aktivasyon alanı oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu hemisferik asimetri, köpeklerin işitsel işleme tarzında insanlara benzer bir uzmanlaşmaya işaret edebilir: Genel olarak sağ hemisfer duygusal vokalizasyonlar ve müzikal/tonal seslerin işleminde daha baskın iken, sol hemisfer konuşma benzeri uyaranların (anlamsal içerik taşıyan seslerin) işleminde daha etkindir. Nitekim, köpek fMRI bulgularındaki sağ-sol farkları da bu tür bir işlevsel ayırımın yansıması olabilir

Cinsiyete bağlı farklar: Çalışmada dişi ve erkek köpekler arasında işitsel korteks aktivasyon profilleri bakımından belirgin farklılıklar gözlenmiştir. Dişi köpekler, her iki hemisferde de medial ektosylvian girus bölgesinde güçlü aktivasyonlar gösterirken; erkek köpeklerde aktivasyon düzeyi daha düşük olup çoğunlukla sağ hemisferde, amigdala çevresi ile kaudal ektosylvian/sylvian girus bölgeleriyle sınırlı kalmıştır. Bu bulgu, dişi köpeklerin işitsel korteksinin daha simetrik ve yaygın bir aktivasyon sergilediğini, erkeklerde ise işitsel işlemenin bölgesel ve olasılıkla daha az yoğun olduğunu düşündürmektedir. Dolayısıyla köpeklerde işitsel algı süreçlerinin cinsiyete göre

farklılaşabildiği, bu meta-analiz ile istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Bu önemli sonuç, köpek beyinde cinsiyete özgü işitsel işleme stratejilerinin varlığına işaret ederek, ileride cinsiyet farkını gözeten nörofizyolojik değerlendirmelerin gerekliliğini vurgulamaktadır

Davranışsal bağlam ve nöroetolojik çıkarımlar:

Uyanık köpek fMRI çalışmalarında elde edilen veriler, hayvanların doğal davranışlarıyla ilişkilendirilerek nöroetoloji alanına önemli katkılar sağlamaktadır. Örneğin, beyin aktivitesi ile sosyal davranışları birleştiren bir deneyde, köpekler sahibinin sesine, tanımadıkları kişilerin sesine kıyasla belirgin ölçüde güçlü ödül-merkezli tepkiler vermiştir (Gábor vd., 2021). Daha da ilginç, sahibi ile daha bağlı (attached) olan köpekler, sahibinin nötr tonda konuşmasını bile yüksek dopaminerjik aktivasyonla “ödüllendirici” olarak işlemişlerdir (Gábor vd., 2021). Bu sonuç, köpek beyinde tanıdık insan sesinin yalnızca kelime anlamından değil, aynı zamanda sosyal bağdan ötürü özel bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Yani, tıpkı insan bebeklerde olduğu gibi, köpeklerde de bakımveren kişinin sesi (bırakın övgüyü, nötr içerikte olsa bile) işitsel ödül sistemini harekete geçirebilmektedir (Gábor vd., 2021). Bu bulgular, fMRI verilerinin davranışsal fizyoloji ile birleştirilmesi sayesinde elde edilmiş ve köpek-insan arasındaki iletişimin sinirsel temelini anlaşılmaya ışık tutmuştur.

Dijital fizyoloji ve nöroetoloji açısından önemi:

Köpeklerde uyanık fMRI ile işitsel korteksin karakterizasyonu, dijital fizyoloji ile nöroetoloji disiplinlerinin kesişiminde öncü bir örnek teşkil etmektedir. Gelişmiş dijital görüntüleme tekniklerinin canlı davranışlarıyla bütünleştirildiği bu çalışma sayesinde, ilk kez bir evcil hayvan türünde kompleks bir algısal fonksiyon (ses ve konuşma algısı) geniş ölçekli olarak haritalanmıştır. Elde edilen bulgular, köpeklerin işitsel dünyasını daha derinlemesine anlamamıza yardımcı olurken, aynı zamanda

insan ve köpek arasındaki iletişimin nörobilimsel temellerini de aydınlatmaktadır (Yalçın, 2023). Primer işitsel korteksin konumunun kaudal Sylvian girusta olduğunun saptanması ve hemisferler arası fonksiyonel asimetri gibi keşifler, köpek beyni atlaslarının güncellenmesine ve işitme ile ilgili veteriner klinik yaklaşımların gelişmesine zemin hazırlayacaktır (Yalçın, 2023). Sonuç olarak, bu vaka örneği, fonksiyonel nörogörüntüleme ile elde edilen nörofizyolojik verilerin, hayvan davranışlarının doğal bağlamda çözülmesine nasıl hizmet edebileceğini gözler önüne sermekte; böylece dijital teknolojilerin veteriner nörofizyolojide yenilikçi uygulamalarına ve nöroetolojik araştırmalara yeni ufuklar açmaktadır.

4.2. Yapay Zeka Destekli Analizler

Büyük veri çağında, yapay zeka (YZ) ve makine öğrenimi teknikleri, veteriner fizyoloji araştırmalarının odağına yerleşmiştir. Gerek kontrollü deneylerden gerekse saha gözlemlerinden toplanan yüklü miktarda fizyolojik ve davranışsal veri, ancak yapay zeka destekli algoritmalarla etkin biçimde analiz edilebilmektedir. Yapay zeka, hem kompleks örüntüleri ortaya çıkarmada hem de öngörüselleştirme modeller geliştirmede araştırmacılara eşsiz fırsatlar sunar. Örneğin, derin öğrenme algoritmaları kullanılarak büyükbaş hayvanların yüz ifadeleri ve duruşları üzerinden sağlık durumlarını değerlendiren presizyon sürü yönetimi uygulamaları geliştirilmiştir (Nessler, 2025b). Bir çalışmada derin sinir ağları, çiftlik ortamında video görüntülerinden sığırların yüz tanımını ve yüz ifadelerini analiz ederek ağrı veya rahatsızlık belirtilerini tespit etmede kullanılmıştır (Nessler, 2025b). Benzer şekilde, makine öğrenimi tabanlı sınıflandırıcılar klinik veteriner tanı süreçlerini desteklemeye başlamıştır. Örneğin, binlerce köpekten elde edilen klinik veriler üzerinde eğitilen Bayes ağları ve Rasgele Orman modelleri, köpeklerdeki yapısal epilepsi olasılığını yüksek doğrulukla öngörebilmiştir; bu sayede veteriner nörolojide tanı

kararlarını iyileştirecek risk faktörleri belirlenebilmiştir (Nessler, 2025b). Yapay zekanın bir diğer çarpıcı kullanımı da hayvan davranış bilimi (etoloji) alanındadır. Günümüzde “hesaplamalı etoloji” adıyla anılan yaklaşım sayesinde, deney videolarından veya takip sensörlerinden elde edilen davranış verileri otomatik olarak işlenerek hayvanların davranış repertuarı nicel olarak çıkarılabilmektedir. Örneğin, farelerin laboratuvar ortamındaki hareket kalıplarını ve pozisyonlarını derin öğrenme ile tanıyan yazılımlar, nörolojik veya psikiyatrik hayvan modellerinde davranış değişimlerini insan gözüyle mümkün olandan çok daha hassas biçimde tespit edebilmektedir. Evcil hayvan davranışlarının yapay zeka ile izlenmesi de pratik uygulama alanı bulmaktadır: Bir evdeki kamera verisini analiz eden algoritmalar, köpeğin olağandışı bir şekilde sürekli dönerek kendi etrafında koşması gibi bir stereotipik davranışı algılayıp, bunun altında yatan olası bir fizyolojik stres veya nörolojik soruna işaret edebilir. Literatürde, yüksek hacimli davranışsal verilerin otomatik analizinin hem fırsatları hem de zorlukları tartışılmış; araştırmacılar bu yöntemlerin tekrarlanabilirlik ve nesnellik açısından klasik insan gözlemine kıyasla büyük avantaj sunduğunu ancak algoritma eğitiminde etoloji uzmanlarının bilgisinin kritik olduğunu vurgulamışlardır (Nessler, 2025b). Yapay zeka destekli analizler, veteriner fizyolojide sadece araştırma amacıyla değil, aynı zamanda klinik karar destek sistemleri olarak da önümüzdeki dönemde yer alacaktır.

4.3. Biyoistatistik ve Meta-Analizler

Dijital fizyolojinin ayrılmaz bir parçası da gelişmiş biyoistatistik yöntemler ve çok merkezli verilerin birleştirilerek genellenebilir sonuçlara ulaşılmasını sağlayan meta-analiz çalışmalarıdır. Dijital ortamlarda verinin standardize biçimde toplanabilmesi ve paylaşılabilmesi, geleneksel olarak daha küçük örneklemelere dayanma eğilimindeki veteriner fizyoloji çalışmalarının gücünü artırmıştır. Artık farklı coğrafyalardaki

araştırmacılar, benzer protokollerle elde edilmiş fizyolojik verileri bir araya getirip meta-analiz yaparak geniş ölçekli eğilimleri ve etki büyüklüklerini güvenilir şekilde hesaplayabilmektedir. Örneğin, bir meta-analiz çalışmasında farklı bölgelerde yürütülen yak (Tibet öküzü) otlama davranışı araştırmaları bir araya getirilmiş; bu sayede iklim, mera kalitesi ve sürü özellikleri gibi değişkenlerin otlama süresi üzerindeki etkileri istatistiksel olarak güçlü biçimde ortaya konmuştur (Nessler, 2025b). Benzer şekilde, çeşitli türlerde yapılan fizyolojik stres göstergeleri deneylerinin meta-analizi, örneğin kortizol hormonu düzeyinin taşıma stresi altındaki atlarda ne ölçüde yükseldiğine dair genel bir kanıta dayalı değer sağlayabilmektedir. Dijital veri tabanlarının gelişmesiyle, geçmişte yapılmış çalışmaların verilerine ulaşmak ve bunları yeniden analiz etmek (veri madenciliği yoluyla) mümkün hale gelmiştir. Biyoistatistik alanındaki ilerlemeler de, karmaşık ve hiyerarşik verilerin değerlendirilebilmesini sağlamıştır. Örneğin karma etkili (mixed-effects) modeller, tekrarlı ölçümlü veteriner fizyoloji çalışmalarında bireysel farklılıkları ve çevresel etkileri aynı anda modele dahil etmeye imkan tanır. Monte Carlo benzetimleri veya Bayesçi istatistik yaklaşımları, veteriner fizyoloji verilerinin daha esnek varsayımlarla analizine olanak sağlayarak küçük örneklem sorununa kısmen çözüm sunmaktadır. Son olarak, uluslararası konsorsiyumlar tarafından yürütülen geniş katılımlı çalışmalar (ör. hayvan genetik kaynakları ya da epidemiolojik fizyoloji projeleri), dijital platformlar üzerinden veri topladığından, verilerin paylaşımı ve ortak analizinde standartlaşma gereğini doğurmuştur. Bu bağlamda araştırmacılar, FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) veri ilkelerini benimseyerek veteriner fizyoloji verilerini tüm dünya ile uyumlu biçimde paylaşmayı hedeflemektedir. Özetle, dijital çağın biyoistatistik ve meta-analiz araçları, veteriner fizyoloji araştırmalarının güvenilirliğini

ve etki alanını genişleterek, literatüre dayalı daha sağlam bilimsel sonuçlara ulaşmamızı sağlamaktadır.

5. KLİNİK UYGULAMALAR

Dijital fizyolojinin veterinerlikte en görünür olduğu alanlardan biri klinik uygulamalardır. Teşhis, tedavi ve izlem süreçlerinde dijital teknolojilerin kullanımı, veteriner hekimliğin kalitesini ve hızını artırırken, hayvanların da daha az stresle değerlendirilmesine imkan tanımaktadır. Bu bölümde tanı ve izlem, fizyolojik parametrelerin dijital takibi ve uzaktan veterinerlik (tele-veterinerlik) başlıkları altında klinik uygulamalar ele alınmaktadır.

5.1. Tanı ve İzlem

Veteriner klinik tanı yöntemleri, dijitalleşmeyle birlikte hem çeşitlenmiş hem de duyarlılık kazanmıştır. Örneğin dijital radyografi ve ultrasonografi cihazları, yüksek çözünürlüklü görüntüler sunarak kemik ve yumuşak doku fizyolojisini anormallikleriyle birlikte ortaya koymaktadır. Dijital stetoskoplar, kalp seslerini ve akciğer solunum seslerini analog muadillerine kıyasla çok daha net yakalayıp analiz edebilmekte; hatta bu veriler yapay zeka algoritmalarıyla değerlendirilerek erken üfürüm teşhisi gibi olanaklar doğmaktadır. Yine aynı şekilde, veteriner elektrokardiyografi (EKG) cihazları dijital ortamda kayıt yapıp anında sonuç verebilmekte, ritim bozuklukları gibi kardiyak fizyoloji sorunları gerçek zamanlı tespit edilebilmektedir. Klinik izlemde dijital fizyolojinin belki de en büyük katkılarından biri, kritik hastaların sürekli monitorizasyonu olmuştur. Yoğun bakım ünitelerinde hayvanların kalp atım hızı, kan basıncı, oksijen satürasyonu, solunum sayısı gibi yaşamsal bulguları dijital monitörler aracılığıyla 7/24 takip edilebilmektedir (Mitek vd., 2022). Bu sayede herhangi bir hayati parametrede anormal bir değişim

olduğunda anlık uyarı alınmakta ve derhal müdahale mümkün olmaktadır. Klinik termal kameralar da veteriner tanıda yenilikçi bir araç haline gelmiştir: Deri yüzey ısısını kızılötesi olarak haritalayan bu dijital kameralar ile örneğin ineklerde mastitis (meme yangısı) vakaları henüz klinik belirti yokken memedeki 1-2°C'lik ısı artışlarından saptanabilmektedir (Zhao vd., 2025). Aynı şekilde atlarda topallık (ortopedik sorunlar) erken evrede, etkilenen bacağın termografide daha sıcak görünmesiyle anlaşılabilir zira iltihaplı veya travmatik bölgeler çevre dokudan belirgin derecede yüksek ısı yayar (Zhao vd., 2025). Böylece dijital infrared (kızılötesi) termografi, non-invaziv bir tarama yöntemi olarak klinikte yerini almıştır. Son yıllarda gelişen bir diğer dijital tanı yöntemi de uzaktan fotoplethizmografi (rPPG) tekniğidir. rPPG, bir dijital kamera ile hayvanın deri rengindeki mikroskobik değişimleri analiz ederek kalp atım ve solunum hızını temassız biçimde ölçmeye yarar (Zhao vd., 2025). Gelişmiş görüntü işleme algoritmaları sayesinde, örneğin kafeste duran bir kedinin sadece video görüntüsünden nabız dalgalanması hesaplanabilmekte; yapılan çalışmalar bu yöntemle elde edilen kalp-solunum verilerinin geleneksel yöntemlerle %95 doğrulukla örtüştüğünü göstermektedir (Wang vd., 2020). Bütün bu dijital teşhis ve izlem araçları, veteriner hekimin karar sürecini objektif verilerle destekleyerek hem tanıda isabeti artırmakta hem de hasta güvenliğini sağlamaktadır.

5.2. Fizyolojik Parametrelerin Dijital Takibi

Veteriner klinikte hastaların muayene dışında kalan zamanlarda da izlenebilmesi, dijital takip cihazları sayesinde mümkün hale gelmiştir. Özellikle giyilebilir teknolojiler, hayvanların fizyolojik parametrelerini kesintisiz ölçerek verileri bulut tabanlı platformlara iletebilmekte, böylece hekim ve hayvan sahibi dilediği an bilgilere erişebilmektedir. Örneğin, bir köpek için tasarlanmış akıllı tasma kalp atım hızı, vücut sıcaklığı, aktivite düzeyi ve hatta uyku paternleri gibi verileri toplayıp anlık

olarak akıllı telefon uygulamasına gönderebilir. Bu sayede, evde post-operatif dönemde istirahat eden bir kedinin kalp atışları ve hareketliliği veteriner kliniğinden uzaktan izlenebilir; herhangi bir anormallik (ör. taşikardi veya aniden düşen aktivite) durumunda sistem alarm vererek hekime haber iletir (Mitek vd., 2022). Böyle bir proaktif takip, geleneksel reaktif yaklaşımdan farklı olarak sorun ortaya çıkmadan müdahale imkanı sağlar (Mitek vd., 2022). Dijital takip sadece ev hayvanları için değil, çiftlik ve sürü hayvanları için de devrededir. Büyükbaş hayvanlarda rumen içi pH sensörleri, geviş getirme aktivitesi algılayıcıları, adım sayar bileklikler gibi cihazlar yaygınlaşmıştır. Örneğin bir inek sürüsünde her bireye takılan pedometreler sayesinde günlük hareket ortalaması belirlenir; eğer bir inek normalden belirgin az hareket ediyorsa bu hastalığın habercisi olabilir. Keza süt ineklerinde yem tüketiminin düşmesi veya geviş süresinin kısalması dijital kulak sensörlerince tespit edilip erken uyarı oluşturulmaktadır – bu da olası bir sindirim problemi veya subklinik bir hastalığın ilk sinyali olabilir. Telemetrik vücut ısı ölçerleri de özellikle sürü hayvanlarında ateşin erken yakalanmasında devrim niteliğindedir; örneğin kuzu ve buzağılarda vücutlarına yapıştırılan deri altı çipler, vücut ısını düzenli aralıklarla ölçerek herhangi bir ateş durumunda çiftçiyi akıllı telefonuna gönderdiği bildirimle uyarmaktadır. Bu durum, bulaşıcı hastalık salgınlarını önlemede kritik rol oynar. Ayrıca GPS tabanlı takip cihazları, hem evcil hayvanların kaybolmasını engellemek hem de açık alanda dolaşan hayvanların (atı alan çiftlikler, sürü köpekleri vb.) aktivite haritalarını çıkarmak için kullanılır. GPS verisi, hayvanın normal hareket alanı ve süresini belgeleyeceğinden, sapmalar olursa (örneğin bir atın normalde koştuğu mesafenin çok altına düşmesi) bu bir rahatsızlık belirtisi sayılıp inceleme yapılabilir. Bütün bu dijital takip mekanizmaları, “Nesnelerin İnterneti” (IoT) konseptinin veterinerlikteki yansıması olan “Veterinerlik Nesneler İnterneti (IoVT)” kapsamında değerlendirilmektedir (Mitek vd., 2022). Yani

hayvan sağlığıyla ilgili nesneler (tasmalar, sensörler, kameralar vs.) internet aracılığıyla birbirine ve merkezi sunuculara bağlanarak entegre bir sağlık ağı oluşturur. Bu entegre dijital ağı içinde her bir hayvan adeta bir dijital profil ile temsil edilir; söz konusu profilin verileri sürekli güncellenerek hayvanın sağlık seyri dijital ortamda canlı tutulur. Bu durum, gelecekte “dijital ikiz” kavramının da önünü açmaktadır: Her hayvanın dijital ortamda bir ikizi (yani gerçek zamanlı verileriyle beslenen sanal bir temsili) oluşturularak, hastalık simulasyonları ve öngörü modelleri bu ikiz üzerinde çalıştırılabilecektir (Demir, 2025). Sonuç olarak, fizyolojik parametrelerin dijital takibi günümüzde veterinerlikte sağlık gözetiminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiş; sürekli, uzaktan ve non-invaziv izlem ile hayvanların daha sağlıklı ve güvenli bir yaşam sürmesi desteklenmiştir.

5.3. Uzaktan Veterinerlik (Tele-veterinerlik)

Özellikle COVID-19 pandemisi süreciyle ivme kazanan tele-tıp uygulamaları, veteriner hekimlikte de “tele-veterinerlik” kavramını yaygınlaştırmıştır. Tele-veterinerlik, dijital iletişim araçları kullanarak hekim ile hayvan sahibi (ve gerektiğinde hayvan) arasındaki mesafeyi ortadan kaldırır; danışma, muayene, takip ve hatta bazı tedavi adımlarının uzaktan gerçekleştirilmesini mümkün kılar. Pandemi öncesi yıllarda oldukça sınırlı kalan veteriner tele-tıp kullanımı, 2020 yılında patlayıcı bir artış yaşamıştır. Örneğin bir rapora göre, 2019’da toplam veteriner muayenelerinin çok küçük bir kısmı (%0,3) tele-veterinerlik ile yapılırken, 2020’nin pandemi döneminde bu oran %20’lerin üzerine çıkmıştır (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). İnsan hekimliğinde %700’ü aşan tele-tıp artışına paralel şekilde veteriner hekimler de kliniklerini sanal ortama taşımak durumunda kalmışlardır (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). Tele-veterinerliğin en büyük avantajlarından biri, coğrafi engelleri ve zaman kısıtlarını aşmasıdır. Örneğin uzak bir kırsal bölgede yaşayan ve acil sorunu olan bir hayvan sahibi, yakınında

açık klinik olmasa bile, akıllı telefon uygulaması üzerinden bir veteriner hekime ulaşabilir; video görüşmesiyle hayvanının durumunu gösterip danışabilir, hatta eğer olanak varsa hayvanın dijital cihazlarından gelen verileri (ör. akıllı tasma sıcaklık/aktivite bilgileri) hekimle paylaşabilir. Bu sayede vakit kaybetmeden ilk tanı ve yönlendirme yapılabilir (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). Nitekim tele-veterinerlik hizmeti sunan platformlar, evcil hayvan sahipleri için 7/24 müsait uzmanlarla anında görüşme ve gerekli durumlarda elektronik reçete sağlama gibi imkanlar sunmaya başlamıştır (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). Tele-veterinerliğin hayvan refahına katkıları da göz ardı edilemez: Özellikle kediler ve egzotik kuşlar gibi yolculuk ve klinik ortam stresine aşırı duyarlı türler için, kendi yaşam alanlarından ayrılmadan “muayene” edilebilmek büyük bir konfor sağlar. Örneğin hasta bir tavuğunuz varsa ve çevrenizde onu muayene edebilecek bir kümes hayvanları veterineri yoksa, tele-veterinerlik sayesinde bu alanda deneyimli bir uzmana internet üzerinden ulaşmanız mümkün olabilir (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). Bu, o hayvan için belki de hiç alamayacağı bir veterinerlik hizmetini erişilebilir kılarak yaşamını kurtarabilir. Tele-veterinerliğin sınırları elbette ki yerinde veterinerlik hizmetinin tümünü kapsayacak kadar geniş değildir; fiziksel muayene gerektiren, tahlil veya görüntüleme isteyen durumlarda hala hayvanın kliniğe getirilmesi şarttır. Ancak pek çok durumda ilk değerlendirme, takip, danışmanlık, davranış sorunlarının ele alınması, diyet önerileri, basit yara bakımının yönlendirilmesi gibi konular uzaktan halledilebilmektedir (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). Örneğin kronik bir deri hastalığı olan köpeğinizin kontrol muayeneleri, yaraların veya lezyonların fotoğraf ve videolarını göndermek suretiyle tele-veterinerlik randevusunda yapılabilir; hekim gerek görürse ilacını güncelleyip reçetesini dijital olarak iletebilir. Tele-veterinerliğin bir diğer boyutu da uzaktan uzman görüşü alınmasıdır. Bir saha veterineri, karşılaştığı zor bir vaka

için farklı bir şehirdeki uzman veterinerden telekonferans aracılığıyla konsültasyon alabilir; hastanın tetkik sonuçlarını ve görüntülerini dijital olarak paylaşarak ortak bir değerlendirme yapabilirler. Tüm bu örnekler, dijital fizyolojinin sunduğu tele-tıp imkanlarının veteriner uygulamalarda yerleşmeye başladığını ve gelecekte veteriner sağlık hizmetlerinin ayrılmaz bir parçası olacağını göstermektedir. Nitekim yakın dönem araştırmalar, pandemi sonrasında hayvan sahiplerinin önemli bir kısmının tele-veterinerlik hizmetinden memnun kaldığını ve klinikler yeniden tam kapasite açılrsa dahi bu hizmeti kullanmaya devam etmek istediklerini ortaya koymuştur (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). Tele-veterinerlik ayrıca, yeni nesil dijital çağ insanların beklentilerine de cevap vermektedir; genç kuşaklar yaşamın her alanında çevrimiçi çözümler aradığından veteriner bakımda da dijital opsiyonların talebi artmaktadır (Vet Telemedicine for Chickens, 2025). Sonuç olarak, tele-veterinerlik hayvan sağlığı hizmetlerini daha erişilebilir, hızlı ve hayvan dostu hale getirme potansiyeliyle dijital fizyolojinin en somut klinik yansımalarından birini temsil etmektedir.

6. SONUÇ

Dijital fizyoloji, veteriner hekimlik ve hayvan bilimlerinde bir paradigma değişimini temsil eder. Dijital teknolojilerin fizyolojiye entegrasyonu, daha derin içgörüler, daha hızlı tanı süreçleri ve daha etkili eğitim imkanı sağlamaktadır. Araştırma alanında fonksiyonel nörogörüntüleme, biyosensörler ve yapay zeka gibi araçlar; sinirsel, davranışsal ve sistemik süreçlerin daha ayrıntılı incelenmesini mümkün kılmıştır. Klinik uygulamalarda ise giyilebilir sensörler, uzaktan izlem ve tele-tıp çözümleri, hayvan sağlığında daha proaktif bir yaklaşımı desteklemektedir. Dijital takip ve uzaktan danışmanlık sayesinde sorunlar klinik belirtiler ortaya çıkmadan fark

edilebilir, bu da tedavi başarısını ve hayvan refahını artırabilir (Mitek vd., 2022; Zhao vd., 2025).

Dijital sistemlerle hayvan davranışları daha nicel ve sürekli biçimde izlenebilmekte; fizyolojik veriler ile davranış gözlemleri aynı çerçevede birlikte değerlendirilebilmektedir (KUTLAB - Knowledge Under Transformation, t.y.; Zhao vd., 2025). Bu bütünleşik yaklaşım, davranışsal fizyoloji çalışmalarını da güçlendirmektedir.

Önümüzdeki dönemde dijital fizyoloji uygulamaları yaygınlaştıkça, veteriner hekimlikte kanıta dayalı ve veri güdümlü bir yaklaşımın daha da güçlenmesi beklenmektedir. Büyük veri analitiği ile nadir hastalıkların daha erken fark edilmesi ya da “dijital ikiz” yaklaşımlarıyla hayvana özel koruyucu hekimlik programlarının geliştirilmesi gibi uygulamalar, zamanla daha rutin hale gelebilir.

Sonuç olarak dijital fizyoloji, veteriner fizyolojinin hem bilimsel hem uygulamalı yönünü zenginleştirerek hayvan sağlığı ve refahına önemli katkılar sunmaktadır. Bu katkı, insan ve çevre sağlığıyla birlikte Tek Sağlık perspektifinde daha bütüncül bir yaklaşımı da destekler. Mühendislik, bilgisayar bilimleri ve etoloji gibi alanlarla kurulacak iş birlikleri, bu dönüşümü hızlandıracaktır. Sürecin etik ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesi, hem akademik çıktılar hem de sahadaki veterinerlik hizmetleri açısından en yüksek faydayı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Demir, B. (2025, Kasım 3). *Mars Misyonu: Uzay araştırmaları insan vücudunun sınırlarını nasıl zorluyor? - Haberler*. CEİD. <https://www.ceidizleme.org/haberler/mars-misyonu-uzay-arastirmalari-insan-vucudunun-sinirlarini-nasil-zorluyor/>
- Ding, L., Zhang, C., Yue, Y., Yao, C., Li, Z., Hu, Y., Yang, B., Ma, W., Yu, L., Gao, R., Li, Q., Ding, L., Zhang, C., Yue, Y., Yao, C., Li, Z., Hu, Y., Yang, B., Ma, W., ... Li, Q. (2025). Wearable Sensors-Based Intelligent Sensing and Application of Animal Behaviors: A Comprehensive Review. *Sensors*, 25(14). <https://doi.org/10.3390/s25144515>
- Gábor, A., Andics, A., Miklósi, Á., Czeibert, K., Carreiro, C., & Gácsi, M. (2021). Social relationship-dependent neural response to speech in dogs. *NeuroImage*, 243, 118480. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118480>
- KUTLAB - Knowledge Under Transformation. (t.y.). Geliř tarihi 15 Aralık 2025, gönderen <https://avesis.uludag.edu.tr/arastirma-grubu/kut/hakkimizda>
- Mitek, A., Jones, D., Newell, A., & Vitale, S. (2022). Wearable Devices in Veterinary Health Care. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice*, 52(5), 1087-1098. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2022.05.001>
- Neethirajan, S., Kemp, B., Neethirajan, S., & Kemp, B. (2021). Digital Twins in Livestock Farming. *Animals*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/ani11041008>
- Nessler, J. N. (2025a). Editorial: Artificial intelligence in animal behaviour, veterinary behaviour and neurology. *Frontiers*

- in *Veterinary Science*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1607623>
- Nessler, J. N. (2025b). Editorial: Artificial intelligence in animal behaviour, veterinary behaviour and neurology. *Frontiers in Veterinary Science*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1607623>
- Skierbiszewska, K., Borowska, M., Bonecka, J., Turek, B., Jasiński, T., Domino, M., Skierbiszewska, K., Borowska, M., Bonecka, J., Turek, B., Jasiński, T., & Domino, M. (2024). Functional Magnetic Resonance Imaging in Research on Dog Cognition: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 14(24).
<https://doi.org/10.3390/app142412028>
- Vet Telemedicine for Chickens*. (2025, Eylül 26). Randy's Chicken Blog.
<https://www.randyschickenblog.com/home/2025/9/26/vet-telemedicine-for-chickens>
- Wang, P., Ma, J., Liang, X., Zhang, Y., Luo, Y.-F., Li, W., An, Q., & Lv, G. (2020). Non-Contact Vital Signs Monitoring of Dog and Cat Using a UWB Radar. *Animals*, 10, 205.
<https://doi.org/10.3390/ani10020205>
- Yalçın, E. (2023). *fMRI Tekniği ile Uyanık Köpeklerde İşitme Fonksiyonunun Meta-Analizi*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26804.36485>
- Yalçın, E., & Sonat, F. (2024). *Nörogörüntülemede Yeni Ufuklar* (ss. 206-229).
- Zhao, X., Tanaka, R., Mandour, A. S., Shimada, K., Hamabe, L., Zhao, X., Tanaka, R., Mandour, A. S., Shimada, K., & Hamabe, L. (2025). Remote Vital Sensing in Clinical Veterinary Medicine: A Comprehensive Review of Recent Advances, Accomplishments, Challenges, and

Future Perspectives. *Animals*, 15(7).
<https://doi.org/10.3390/ani15071033>

VETERİNER FİZYOLOJİDE 3B GÖRÜNTÜLEME VE DAVRANIŞ-ETOLOJİ İLİŞKİSİ: DALGALANAN ASİMETRİ VE DİJİTAL MORFOMETRİ PERSPEKTİFİ

Ebru YALÇIN¹

1. GİRİŞ

Bilimsel bilgi, kullanılan araçların hassasiyeti ve kapsayıcılığı arttıkça gelişir. Veteriner fizyoloji uzun yıllar boyunca canlıların işlevlerini ve hastalık süreçlerini makroskobik gözlemler, biyokimyasal analizler ve iki boyutlu (2B) görüntüleme yöntemleriyle açıklamaya çalışmıştır. Ancak biyolojik sistemlerin doğası gereği üç boyutlu (3B) olduğu ve zaman içinde sürekli değiştiği düşünüldüğünde, bu yöntemlerin bazı durumlarda yetersiz kaldığı görülmektedir. “Dijital fizyoloji” kavramı, biyolojik verilerin yalnızca kaydedilmesini değil; dijital ikizler (digital twins) ile modellenmesini, simüle edilmesini ve yapay zeka (YZ) yöntemleriyle daha derinlemesine analiz edilmesini mümkün kılan yeni bir yaklaşımı ifade eder. Bu çerçevede veteriner hekimlik ve hayvan bilimleri, morfoloji ile fizyoloji arasındaki ilişkiyi 3B görüntüleme teknolojileri ve hesaplamalı etoloji (computational ethology) ile daha güçlü biçimde kurmaya başlamıştır.

Bu kitap bölümü, veteriner fizyolojide 3B görüntüleme teknolojilerinin kullanımını, bu yöntemlerin davranış analizi ve etolojiyle bağlantılarını ve özellikle gelişimsel kararsızlığın (developmental instability) bir göstergesi olarak kabul edilen

¹ Dr. Arş. Gör., Bursa Uludağ Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, KUTLAB Dijital Fizyoloji Lab., ORCID: 0000-0003-1756-1288.

dalgalandan asimetriyi (fluctuating asymmetry, FA) ele almaktadır.

2. 3B GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİLERİ VE VETERİNER HEKİMLİKTEKİ YERİ

Veteriner hekimlikte tanısal görüntüleme, uzun yıllar boyunca radyografi ve ultrasonografi gibi 2B modalitelerle sınırlı kalmıştır. Bu yöntemler, iç organların ve iskelet yapısının görüntülenmesinde paha biçilmez olsa da, derinlik algısının kaybı, süperpozisyon (yapıların üst üste binmesi) ve hacimsel verinin eksikliği gibi dezavantajlara sahiptir. Fizyolojik yapıların karmaşık geometrisi ve davranışın dinamik doğası, hacimsel ve uzaysal veri sağlayan teknolojilere geçişi hızlandırmıştır. Günümüzde kullanılan 3B görüntüleme modaliteleri, invaziv olmayan yöntemlerle canlı dokunun dijital kopyasını oluşturabilme kapasitesine sahiptir ve bu veriler, fizyolojik analizler için ham madde niteliği taşır.

2.1. Bilgisayarlı Tomografi (BT) ve Manyetik Rezonans (MR): Kesitsel Analizden Hacimsel Modellemeye

Bilgisayarlı Tomografi (BT) ve Manyetik Rezonans Görüntüleme (MR), veteriner hekimlikte "altın standart" olarak kabul edilen kesitsel görüntüleme yöntemleridir. Bu teknolojiler, vücudun iç yapısını dilimler halinde görüntüler ve bu dilimlerin bilgisayar yazılımları ile birleştirilmesiyle 3B rekonstrüksiyonlar elde edilir. Bu süreç, sadece anatomik bir atlas oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda doku yoğunluğu, organ hacmi ve patolojik değişimlerin nicel analizine olanak tanır.

Özellikle kraniyometrik (kafatası ölçümü) çalışmalarda, BT taramaları devrim niteliğinde sonuçlar doğurmuştur. Geleneksel kumpas ölçümleri, yumuşak doku nedeniyle kemik

üzerindeki kesin noktalara (landmark) ulaşmada hata payı içerirken, BT tabanlı 3B modeller, kemik yüzeyini doğrudan ve hatasız bir şekilde sunar. Örneğin, brakiosefalik (kısa kafalı) köpek ırklarında yapılan çalışmalarda, solunum yollarının darlığı, yumuşak damak uzunluğu ve burun konkanlarının aberran yapısı, ancak 3B BT rekonstrüksiyonları ile hassas bir şekilde ölçülebilmekte ve cerrahi planlama bu modeller üzerinden yapılabilmektedir. Ichikawa ve arkadaşlarının (2024) yaptığı bir çalışmada, farklı köpek ırklarında optik kiyazma ve orbital yapıların konumu, 3B BT taramaları kullanılarak analiz edilmiş ve kafatası şeklindeki varyasyonun (dolikosefalik, mezosefalik, brakiosefalik) beyin yapılarının yerleşimini ve görme açısını nasıl etkilediği ortaya konmuştur (Ichikawa vd., 2024). Bu tür analizler, morfolojik varyasyonun fizyolojik fonksiyon (görme alanı, solunum kapasitesi) üzerindeki etkilerini anlamada kritiktir.

MR teknolojisi ise, özellikle yumuşak doku kontrastı ve nörofizyolojik çalışmalar açısından vazgeçilmezdir. Beyin parankiminin, ventriküler sistemin ve kas gruplarının 3B analizi, nörolojik hastalıkların tanısında ve beyin asimetriterinin belirlenmesinde kullanılır. Örneğin, şizofreni benzeri durumlar veya epilepsi hastası köpeklerde beyin yapısındaki ince asimetritler, 3B MR morfometrisi ile tespit edilebilir. Ayrıca, "Dijital Fizyoloji" kapsamında, fMRI (fonksiyonel MR) ile beyin aktivitesinin haritalanması, hayvanların bilişsel süreçlerini ve duygusal durumlarını anlamada yeni ufuklar açmaktadır.

2.2. Fotogrametri ve Yüzey Tarama: Işıktan Veriye Dönüşüm

Radyasyon içermeyen, daha düşük maliyetli ve saha kullanımına uygun olan fotogrametri ve optik yüzey tarama yöntemleri, veteriner fizyolojisinde giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu teknolojiler, nesnenin dış yüzey

geometrisini kaydetmeye odaklanır ve özellikle vücut kondisyonu, büyüme takibi ve dış morfolojik asimetrielerin analizi için idealdir.

Fotogrametri, nesnenin farklı açılardan çekilmiş çok sayıda yüksek çözünürlüklü 2B fotoğrafının, özel algoritmalar (Structure from Motion - SfM) kullanılarak 3B nokta bulutuna (point cloud) ve ardından katı modele (mesh) dönüştürülmesi prensibine dayanır. Süt sığırcılığında kullanılan "Morpho3D" gibi sistemler, hayvanın geçiş yoluna yerleştirilen kameralar aracılığıyla, ineğin sırt, kalça ve gövde yapısının 3B modelini saniyeler içinde oluşturur. Bu modeller üzerinden yapılan hacim ve yüzey alanı hesaplamaları, manuel vücut kondisyon skoru (BCS) değerlendirmesine göre çok daha objektif ve hassastır. Le Cozler ve arkadaşlarının (2019) çalışmasında, Morpho3D sistemi ile elde edilen verilerin, ineklerin canlı ağırlığını ve vücut kompozisyonunu tahmin etmede %99'a varan doğruluk ($R^2 = 0.99$) sağladığı gösterilmiştir. Bu teknoloji, hayvanın stres yaşamadan, doğal akışı içinde izlenmesini sağlar (Le Cozler vd., 2019, 2024).

El tipi 3B lazer tarayıcılar (örneğin Einscan Pro, Artec Eva), yapılandırılmış ışık (structured light) veya lazer çizgileri kullanarak yüzey topografisini mikron düzeyinde kaydeder. Bu cihazlar, kadavra çalışmalarında, et kalitesi analizlerinde (örneğin karkas üzerindeki kas dağılımı) ve müze örneklerinin dijitalleştirilmesinde kullanılır. Özellikle dalgalanan asimetri çalışmalarında, kumpasın temas edemediği eğrisel yüzeylerin (örneğin bir boynuzun spiral yapısı, bir toynağın kavisli yüzeyi veya bir kaplumbağa kabuğunun kubbe yapısı) sayısallaştırılmasında benzersiz bir avantaj sunar. Geleneksel yöntemlerin aksine, 3B tarama ile elde edilen veriler, sonradan tekrar tekrar ölçülebilir ve farklı analiz yöntemleriyle (hacimsel, yüzeysel, eğrilik analizi) yeniden değerlendirilebilir, bu da

"dijital biyobankalama" kavramını destekler (Hadžiomerović vd., 2025; Košinová vd., 2022; Oktay vd., 2025).

2.3. LiDAR ve Uzaktan Algılama: Doğal Habitatın Dijitalleşmesi

Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini (LiDAR - Light Detection and Ranging) teknolojisi, lazer darbeleri göndererek nesnelerin mesafesini ve 3B şeklini ölçer. Yaban hayatı etolojisinde ve ekolojisinde, hayvanların doğal ortamlarındaki davranışlarını ve habitat kullanımlarını 3B olarak haritalamak için kullanılır. Geleneksel gözlem yöntemlerinde araştırmacının varlığı hayvanın davranışını etkileyebilirken (gözlemci etkisi), LiDAR ve uzun menzilli 3B görüntüleme sistemleri, non-invaziv bir izleme imkanı sunar.

"WildPose" gibi sistemler, uzun mesafeden hayvanların 3B iskelet pozisyonunu ve hareketini kaydedebilir. Bu sistemler, RGB kameralar ile LiDAR sensörlerini birleştirerek, hayvanın sadece görüntüsünü değil, uzaydaki kesin konumunu ve postürünü de yakalar. Örneğin, bir zürafanın beslenirken boynunu nasıl eğdiği, bir aslanın avına yaklaşırkenki vücut duruşu veya bir primatın ağaçtaki hareketi, 3B nokta bulutları üzerinden kinematik olarak analiz edilebilir. Ayrıca, dronlara (İHA) entegre edilen LiDAR ve fotogrametri sistemleri, geniş alanlara yayılan sürülerin (örneğin zebra, geyik) bireysel 3B modellerini ve grup içi etkileşimlerini havadan analiz etme kapasitesine sahiptir. Bu veriler, hayvanların enerji harcaması, sosyal mesafeleri ve habitat tercihleri hakkında fizyolojik çıkarımlar yapılmasına olanak tanır (Muramatsu vd., 2025; Shukla vd., 2024; Zong, 2023).

2.4. Hareket Yakalama (Motion Capture) ve Kinematik Analiz: Davranışın Fiziki

Laboratuvar ortamında ve kliniklerde, hayvanların hareket fizyolojisini (biyomekanik) incelemek için hareket yakalama sistemleri kullanılır. Bu sistemler, "işaretleyicili"

(marker-based) ve "işaretleyicisiz" (markerless) olmak üzere iki ana gruba ayrılır. İşaretleyicili sistemlerde (örneğin Vicon, Qualisys), hayvanın eklem merkezlerine yerleştirilen retro-reflektif (ışığı yansıtan) küreler, yüksek hızlı kameralar tarafından takip edilir. Bu yöntem, son derece hassas veri sağlar ve atların topallık muayenesinde veya köpeklerin ortopedik analizlerinde standart olarak kullanılır (Cameron-Whytock vd., 2025).

Ancak işaretleyicilerin hayvana yapıştırılması süreci zaman alıcıdır ve hayvanın doğal davranışını etkileyebilir. Bu noktada, yapay zeka destekli "işaretleyicisiz" sistemler devreye girmektedir. Derin öğrenme algoritmaları (örneğin DeepLabCut, MouseVenue3D), video görüntülerinden hayvanın anatomik noktalarını (burun, kulak, patiler, kuyruk kökü vb.) otomatik olarak tanımlar ve 3B iskelet modelini çıkarır. "MouseVenue3D" sistemi, laboratuvar farelerinin 3B davranışlarını (tırmanma, eğilme, dönme, tımar etme) takip ederek, bu davranışları beyin aktivitesi (iki fotonlu kalsiyum görüntüleme) ile milisaniye hassasiyetinde eşleştirebilmektedir. Bu entegrasyon, davranışın sadece "nerede" olduğu bilgisini değil, "nasıl" gerçekleştiği bilgisini de (hız, ivme, postür, eklem açıları) sağlayarak, nörofizyolojik araştırmalarda neden-sonuç ilişkisinin kurulmasına yardımcı olur (Han vd., 2021b).

3. GEOMETRİK MORFOMETRİ: ŞEKLİN MATEMATİĞİ VE BİYOLOJİK ANLAMI

Veteriner fizyolojisinde morfolojik analiz, uzun yıllar boyunca kumpas ve mezura ile yapılan doğrusal ölçümlere (uzunluk, genişlik, çevre) dayanmıştır. Ancak bu "geleneksel morfometri", şeklin karmaşık geometrisini (eğrilikler, hacimsel ilişkiler, bükülmeler) göz ardı eder ve şekil bilgisini sadece boyut bilgisine indirger. Dijital devrimle birlikte yükselen "Geometrik

Morfometri" (GM), bu kısıtlamayı aşarak, şekli koordinat düzlemindeki referans noktaları (landmark) üzerinden analiz eden ve şekil varyasyonunu istatistiksel olarak görselleştiren güçlü bir disiplin haline gelmiştir (Hallgrimsson vd., 2015a; Klingenberg, 2015a).

3.1. Landmark Analizi ve Procrustes Süperpozisyonu: Verinin Standardizasyonu

Geometrik morfometri, biyolojik bir yapının şeklinin anatomik olarak karşılaştırılabilir (homolog) noktalar üzerinden tanımlanmasına dayanır. Bu noktalar landmark olarak adlandırılır ve genellikle üç grupta ele alınır: Anatomik olarak kesin tanımlanabilen doku birleşim veya kesişim noktaları (Tip I), bir yapının uç noktaları ya da maksimum eğrilik gösteren bölgeleri (Tip II) ve tek bir belirgin anatomik nokta ile tanımlanamayan ancak eğri veya yüzey boyunca şekli temsil etmek için belirli kurallarla yerleştirilen semilandmarklar (Tip III) (Coombs & Felice, 2021).

BT ya da yüzey tarama gibi 3B görüntüleme verileri kullanıldığında bu landmarklar (x, y, z) koordinatlarıyla tanımlanır; böylece 2B yaklaşımlarda kaybolan derinlik bilgisi de analize dahil edilir. Bununla birlikte ham koordinat verileri yalnızca şekli değil, aynı zamanda bireylerin boyut farklarını, uzaydaki konumlarını ve duruşlarını da içerir. Şekli saf biçimde karşılaştırabilmek için bu “şekil dışı” etkilerin elimine edilmesi gerekir. Bu amaçla kullanılan Genelleştirilmiş Procrustes Analizi (GPA), tüm örneklerin landmark konfigürasyonlarını ortak bir merkeze taşır, boyutlarını standardize eder ve en iyi çakışmayı sağlayacak şekilde döndürür. Bu işlem sonunda geriye, boyut ve pozisyonundan arındırılmış saf şekil bilgisi kalır. Procrustes süperpozisyonu, şekil farklarının görselleştirilmesi ve istatistiksel olarak test edilmesi için gerekli temeli sağlar (Hallgrimsson vd., 2015b; Klingenberg, 2015a).

3.2. Asimetrimin Ayrıştırılması ve İstatistiksel Güç

Biyolojik çalışmalarda asimetri çoğu zaman sağ ve sol taraf ölçümlerinin farkı (R-L) ile değerlendirilir. Ancak bu basit yaklaşım, ölçüm hatasını, popülasyonda sistematik olarak bir tarafa kaymayı ifade eden yönlü asimetriyi ve bireyler arasında rastgele küçük sapmalar olarak görülen dalgalanan asimetriyi (FA) birbirinden ayırmakta yetersiz kalabilir. Geometrik morfometri (GM) yöntemleri, bu farklı varyasyon kaynaklarını matematiksel olarak ayrıştırarak FA'yı daha güvenilir biçimde izole etmeyi sağlar. Bu ayrıştırma çoğunlukla Procrustes ANOVA ile yapılır (Benítez vd., 2020a; Castillo & González-Rivas, 2023; Yuto vd., 2016).

Procrustes ANOVA'da toplam şekil varyasyonu birkaç bileşene bölünür. “Birey” etkisi, popülasyondaki bireyler arasındaki genel şekil farklarını yansıtır ve genetik ile çevresel varyasyona bağlıdır. “Taraf” etkisi, sağ ve sol taraflar arasındaki ortalama farkı temsil eder; bu fark anlamlıysa popülasyonda yönlü asimetri (DA) olduğu kabul edilir. “Birey x taraf” etkileşimi ise her bireyin asimetrisinin popülasyon ortalamasından ne kadar saptığını gösterir ve dalgalanan asimetriyi (FA) temsil eden temel terimdir (Castillo & González-Rivas, 2023; Yuto vd., 2016). Buna ek olarak, aynı örneğin tekrarlı ölçümlerinden hesaplanan “ölçüm hatası” da modele dahil edilir.

FA çalışmalarında en kritik nokta, ölçüm hatasının FA sinyalinde daha küçük olduğunun gösterilmesidir. Çünkü FA genellikle çok küçük sapmalardan oluşur ve toplam varyasyonun çok küçük bir bölümünü oluşturabilir; ölçüm hatası yüksekse bu sinyal kolayca maskelenir. 3B dijital modeller üzerinden yapılan ölçümlerin tekrarlanabilirliği genellikle daha yüksek olduğu ve insan kaynaklı hatayı azalttığı için, 3B GM yaklaşımları FA analizlerinde güçlü bir avantaj sağlar. Ayrıca SAGE (Symmetry

and Asymmetry in Geometric Data) gibi yazılımlar, bu analizleri uygulayarak asimetrinin hangi anatomik bölgelerde yoğunlaştığını ısı haritaları ve vektörlerle görselleştirebilir (Košinová vd., 2022; Olsen vd., 2023; Yuto vd., 2016).

4. DALGALANAN ASİMETRİ (FLUCTUATING ASYMMETRY): TEORİK ÇERÇEVE VE FİZYOLOJİK TEMELLER

Veteriner fizyolojisinde 3B görüntülemenin en güçlü uygulama alanlarından biri, organizmanın "gelişimsel kararsızlığının" (developmental instability) bir ölçüsü olan dalgalanan asimetrinin (FA) analizidir.

4.1. Asimetri Türleri ve Biyolojik Anlamı

Doğada bilateral simetri (iki yanlı bakışım), çoğu hayvan grubu için (Bilateria) temel vücut planıdır. Genomik plan, sağ ve sol tarafın aynı şekilde gelişmesini kodlar. Ancak mükemmel simetri, biyolojik sistemlerde nadiren görülür. Asimetri temel olarak üç kategoride incelenir ve her birinin biyolojik anlamı farklıdır (Coda vd., 2017; Swaddle, 2003):

Yönlü Asimetri (Directional Asymmetry - DA): Bir tarafın diğerinden sistematik olarak ve öngörülebilir şekilde büyük veya farklı olması durumudur. Bu asimetri genetik olarak kodlanmıştır ve genellikle fonksiyonel bir adaptasyondur. Örnekler: Memeli kalbinin sol ventrikülünün daha büyük olması, baykuş kulaklarının dikey asimetrisi (sesin yönünü tayin etmek için), yassı balıkların (flounder) gözlerinin tek tarafa göç etmesi. DA, stres göstergesi değildir; evrimsel bir üründür (Klingenberg, 2015b; Swaddle, 2003).

Antisimetri (Antisymmetry): Popülasyonda asimetrinin var olduğu, ancak tarafın rastgele olduğu durumdur. Popülasyon grafiği çizildiğinde, sağ-sol farkları "bimodal" (iki tepeli) bir

dağılım gösterir (yani çoğu birey ya sağlak ya da solaktır, simetrik birey azdır). Örnek: Erkek Uca (fiddler crab) yengeçlerinin devasa kısıkcı sağda veya solda olabilir. Bu da genellikle genetik/epigenetik bir özelliktir ve doğrudan stres göstergesi değildir (Coda vd., 2017).

Dalgalanan Asimetri (Fluctuating Asymmetry - FA):

Mükemmel simetriden veya normal yönlü asimetriden kaynaklanan küçük, rastgele ve yönsüz sapmalardır. Sağ ve sol taraf arasındaki farkların popülasyon dağılımı, ortalaması sıfır olan bir "normal dağılım" (çan eğrisi) gösterir. FA, genetik olarak kodlanmamıştır; aksine, organizmanın genetik planını (genotip) fenotipe dönüştürürken karşılaştığı "gelişimsel gürültülere" (developmental noise) karşı koyamamasının, yani gelişimsel kararsızlığın (developmental instability - DI) bir sonucudur. Bir tarafın diğerinden tesadüfen biraz daha az veya çok büyümesi durumudur (Coda vd., 2017; Klingenberg, 2015b).

4.2. Stres ve Gelişimsel Kararsızlık İlişkisi: Enerji Ödünleşimi

Dalgalanan asimetri, organizmanın gelişim sürecinde (embriyogenez ve büyüme) maruz kaldığı çevresel ve genetik streslerin kümülatif bir kaydı olarak kabul edilir. Waddington'ın "epigenetik manzara" (epigenetic landscape) modeline göre, gelişim bir topun vadiden aşağı yuvarlanmasına benzer (kanalizasyon). Derin vadiler (güçlü genetik tamponlama), topun rotasından sapmasını engeller. Ancak stres faktörleri, topu rotasından saptırmaya çalışan rüzgarlar gibidir. Eğer organizmanın tamponlama kapasitesi (gelişimsel stabilite) zayıfsa veya stres çok güçlüyse, gelişim rotadan sapar ve sağ-sol eşitsizlikleri (FA) oluşur (Coda vd., 2017).

Stresörler iki ana grupta toplanır:

Çevresel Stresörler: Yüksek/düşük sıcaklık, besin yetersizliği, parazit enfeksiyonları, kimyasal kirlilik (pestisitler,

ağır metaller), yüksek popülasyon yoğunluğu, gürültü stresi (Benítez vd., 2020b, 2025; Castillo & González-Rivas, 2023).

Genetik Stresörler: Akrabalı yetiştirme (inbreeding) sonucu homozigotluğun artması, zararlı mutasyonlar, hibritleşme sonucu gen komplekslerinin bozulması (Coda vd., 2017).

Fizyolojik açıdan, bu durum "enerji ödünleşimi" (energy trade-off) hipotezi ile açıklanır. Organizma homeostazisi (iç denge) sağlamak, bağışıklık sistemini çalıştırmak ve detoksifikasyon yapmak için enerji harcar. Stres altındaki bir organizma, sınırlı metabolik enerjisini büyüme ve hassas simetrik gelişim kontrolünden ziyade, hayatta kalmaya yönelik acil fizyolojik süreçlere yönlendirmek zorunda kalır. Bu durum, gelişimsel hassasiyeti artırır ve fenotipte FA olarak tezahür eder.

Bu nedenle FA, veteriner hekimlikte, zooteknide ve koruma biyolojisinde, hayvanın genel "fitness" (uyum başarısı), sağlık durumu ve genetik kalitesi hakkında bilgi veren ucuz, non-invaziv ve erken uyarı sağlayan bir biyobelirteç olarak öne çıkmaktadır. Düşük FA (yüksek simetri), genellikle yüksek gelişimsel stabilite, iyi genetik kalite ("iyi genler" hipotezi) ve strese direnç ile ilişkilendirilir.

5. DİJİTAL ETOLOJİ VE HESAPLAMALI DAVRANIŞ ANALİZİ

Geleneksel etoloji, insan gözlemine, not defterlerine ve saatler süren video izlemelerine dayanırken, dijital etoloji (veya hesaplamalı etoloji), makine görüşü (computer vision), yapay zeka ve 3B sensör teknolojilerini kullanarak davranışı sürekli akan, nicel verilere dönüştürür. 3B görüntüleme, bu alanda davranışın uzaysal boyutunu ve karmaşıklığını yakalaması açısından vazgeçilmezdir.

5.1. Davranışın 3B Uzayda Temsili ve "Davranışsal Motifler"

Hayvan davranışları doğası gereği üç boyutludur ve dinamiktir. Bir kuşun uçuşu, bir farenin ayağa kalkarak çevreyi koklaması (rearing) veya bir köpeğin oyun sırasındaki hamleleri, 2B düzlemde (tek kamera açısıyla) tam olarak ifade edilemez ve veri kaybına uğrar (oklüzyon/örtüşme sorunu). Örneğin, kemirgenlerde yapılan anksiyete testlerinde, hayvanın sadece yatay düzlemdeki hareketi değil, dikey düzlemdeki hareketleri, sırt eğriligi ve başın pozisyonu da anksiyete seviyesi hakkında kritik bilgiler verir.

MouseVenue3D gibi 3B takip sistemleri, çoklu kamera kurulumları ile hayvanın postürünü 3B iskelet (skeleton) olarak modeller. Bu sistemler, insan gözünün kaçırabileceği mikro davranışları (örneğin, tımar etme sırasındaki patilerin ince hareketleri veya bıyık hareketleri) tespit edebilir. Yapay zeka algoritmaları, bu 3B iskelet verilerini analiz ederek, davranışları "motif" adı verilen alt birimlere ayırır. Örneğin, "koşma", "durma", "kaçınma" gibi makro davranışların yanı sıra, "sol arka ayağı 30 derece açıyla kaldırma" gibi mikro motifler de tanımlanabilir. Bu motiflerin zaman içindeki dizilimi, hayvanın davranışsal "sözdizimini" (syntax) oluşturur. Stres, hastalık veya genetik mutasyonlar, bu sözdizimini bozabilir (Han vd., 2021b).

5.2. Sürü Davranışı ve Sosyal Etkileşimler

Büyükbaş hayvan sürülerinde veya yaban hayatında, bireylerin birbirine göre konumu ve oryantasyonu sosyal hiyerarşi ve refah hakkında ipuçları verir. Dron tabanlı 3B fotogrametri ve LiDAR sistemleri, bir zebra sürüsündeki bireylerin birbirlerine olan mesafelerini, yönelimlerini ve vücut postürlerini (başın yere eğikliği vs.) analiz edebilir. Bir hayvanın sürünün merkezinde mi yoksa periferinde mi olduğu, başkalarıyla

ne kadar yakın temas kurduğu, sosyal refahın dijital göstergeleridir (Shukla vd., 2024).

Kapalı alanlarda ise, köpeklerin barınak ortamındaki hareketlerini izleyen 3B kamera sistemleri (örneğin B.A.R.K. sistemi), hayvanın ne kadar süre yattığını, volta attığını (pacing - stereotipik davranış) veya kapıya yöneldiğini otomatik olarak kaydederek, stres ve refah seviyesini puanlayabilir. Bu tür sistemler, davranışı sürekli ve kesintisiz izleyerek (7/24), insan gözlemcinin varlığında değişebilen davranışları (Hawthorne etkisi) elimine eder ve gece/gündüz döngüsündeki davranış değişimlerini ortaya koyar (Barnard vd., 2016).

6. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFİ: BÜTÜNCÜL BİR YAKLAŞIMA DOĞRU

Bu kitap bölümünde ele alınan literatür ve teknolojik gelişmeler, veteriner fizyolojisinin dijitalleşmeyle birlikte nasıl dönüştüğünü göstermektedir. 3B görüntüleme teknolojileri artık yalnızca anatomiye gösteren statik araçlar değildir; aynı zamanda hayvanın fizyolojik durumu, stres düzeyi ve refahı hakkında ölçülebilir ipuçları sunan veri kaynaklarına dönüşmüştür.

Bu çerçevede dalgalanan asimetri (FA), gelişimsel kararsızlığın bir göstergesi olarak çevresel ve genetik stresin organizma üzerindeki birikimli etkisini yansıtır. 3B geometrik morfometri, bu küçük asimetrisi 3B uzayda yüksek hassasiyetle saptayabildiği için FA analizini daha güvenilir bir düzeye taşımıştır. Benzer biçimde, 3B hareket analizi ve dijital etogramlar hayvan davranışını sayısallaştırarak fizyoloji ve etolojinin aynı veri zemini üzerinde birlikte değerlendirilmesini mümkün kılar. Örneğin yüz asimetrisi ile emosyonel durum arasındaki ilişkiler veya hareket asimetrisinin ağrı ile bağlantısı, bu bütüncül yaklaşımın somut örnekleridir. Ayrıca süt sığırlarında otomatik vücut kondisyon skoru takibi ya da

kanatlılarda yürüyüş analizi gibi uygulamalar, refah değerlendirmesini daha objektif ve veri temelli hale getirmekte, erken uyarı ve daha proaktif yönetimi desteklemektedir.

Gelecekte yapay zeka ve derin öğrenmenin 3B veri setlerine daha fazla entegre olmasıyla, duruş, yürüyüş veya yüz ifadesindeki küçük değişimlerin otomatik olarak saptanması ve hastalıkların klinik belirtiler ortaya çıkmadan önce öngörülmesi daha mümkün hale gelebilir. Buna ek olarak dijital ikiz yaklaşımlarıyla, her hayvan için sanal modeller oluşturularak tedavi seçeneklerinin simülasyon üzerinden değerlendirilmesi ve daha bireye özgü protokollerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Sonuç olarak veteriner hekimlik, ağırlıklı olarak hastalık ortaya çıktıktan sonra müdahale eden bir yapıdan, hastalığı erken fark eden ve önlemeye odaklanan veri güdümlü bir yapıya doğru ilerlemektedir. Bu dönüşümde 3B görüntüleme, FA analizi ve hesaplamalı etoloji gibi yaklaşımlar önemli araçlar sunmaktadır. Akademik ve klinik uygulayıcıların bu teknolojilere uyum sağlaması, hem bilimsel üretim hem de hayvan sağlığı ve refahı açısından belirleyici olacaktır.

KAYNAKÇA

- Barnard, S., Calderara, S., Pistocchi, S., Cucchiara, R., Podaliri-Vulpiani, M., Messori, S., & Ferri, N. (2016). Quick, Accurate, Smart: 3D Computer Vision Technology Helps Assessing Confined Animals' Behaviour. *PLOS ONE*, 11(7), e0158748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158748>
- Benítez, H. A., Lemic, D., Villalobos-Leiva, A., Bažok, R., Órdenes-Claveria, R., Živković, I. P., Mikac, K. M., Benítez, H. A., Lemic, D., Villalobos-Leiva, A., Bažok, R., Órdenes-Claveria, R., Živković, I. P., & Mikac, K. M. (2020a). Breaking Symmetry: Fluctuating Asymmetry and Geometric Morphometrics as Tools for Evaluating Developmental Instability under Diverse Agroecosystems. *Symmetry*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/sym12111789>
- Benítez, H. A., Lemic, D., Villalobos-Leiva, A., Bažok, R., Órdenes-Claveria, R., Živković, I. P., Mikac, K. M., Benítez, H. A., Lemic, D., Villalobos-Leiva, A., Bažok, R., Órdenes-Claveria, R., Živković, I. P., & Mikac, K. M. (2020b). Breaking Symmetry: Fluctuating Asymmetry and Geometric Morphometrics as Tools for Evaluating Developmental Instability under Diverse Agroecosystems. *Symmetry*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/sym12111789>
- Benítez, H. A., Oróstica-Pinochet, R., Suazo, M. J., Pérez, L. M., Hernández-Martelo, J., Valdes, C., Muñoz-Quezada, M. T., & Correa, M. (2025). Wing Shape Fluctuating Asymmetry in Flies: Insights into Environmental and Public Health Risk. *Animals : an Open Access Journal from MDPI*, 15(21), 3124. <https://doi.org/10.3390/ani15213124>

- Cameron-Whytock, H., Divall, H., Lewis, M., & Apps, C. (2025). Marker based and markerless motion capture for equestrian rider kinematic analysis: A comparative study. *Journal of Biomechanics*, 186, 112728. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112728>
- Castillo, G. N., & González-Rivas, C. J. (2023). Fluctuating asymmetry and environmental stress in a reptile under different levels of anthropogenic disturbance. *Journal of Vertebrate Biology*, 72(22073), 22073.1-9. <https://doi.org/10.25225/jvb.22073>
- Coda, J. A., Martínez, J. J., Steinmann, A. R., Priotto, J., & Gomez, M. D. (2017). Fluctuating Asymmetry as an Indicator of Environmental Stress in Small Mammals. *Mastozoología Neotropical*, 24(2), 313-321.
- Coombs, E. J., & Felice, R. N. (2021). *Quantifying asymmetry in non-symmetrical morphologies, with an example from Cetacea* (s. 2021.11.17.468940). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2021.11.17.468940>
- Hadžiomerović, N., Čaklovica, K., Dučić, N., Gjoni Gündemir, M., Vejzović, A., Fazlović, N., Avdić, R., Čaklovica, F., & Tandir, F. (2025). Anatomy of meat cuts: Integrating 3D scanning and virtual reality in veterinary education and training. *Frontiers in Veterinary Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1680785>
- Hallgrimsson, B., Percival, C. J., Green, R., Young, N. M., Mio, W., & Marcucio, R. (2015a). Morphometrics, 3D Imaging, and Craniofacial Development. *Current topics in developmental biology*, 115, 561-597. <https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2015.09.003>
- Hallgrimsson, B., Percival, C. J., Green, R., Young, N. M., Mio, W., & Marcucio, R. (2015b). Morphometrics, 3D

- Imaging, and Craniofacial Development. *Current topics in developmental biology*, 115, 561-597. <https://doi.org/10.1016/bs.ctdb.2015.09.003>
- Han, Y., Huang, K., Chen, K., Pan, H., Ju, F., Long, Y., Gao, G., Wu, R., Wang, A., Wang, L., & Wei, P. (2021). MouseVenue3D: A Markerless Three-Dimension Behavioral Tracking System for Matching Two-Photon Brain Imaging in Free-Moving Mice. *Neuroscience Bulletin*, 38(3), 303-317. <https://doi.org/10.1007/s12264-021-00778-6>
- Ichikawa, Y., Kanemaki, N., Kanai, K., Ichikawa, Y., Kanemaki, N., & Kanai, K. (2024). Breed-Specific Skull Morphology Reveals Insights into Canine Optic Chiasm Positioning and Orbital Structure through 3D CT Scan Analysis. *Animals*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/ani14020197>
- Klingenberg, C. P. (2015a). Analyzing Fluctuating Asymmetry with Geometric Morphometrics: Concepts, Methods, and Applications. *Symmetry*, 7(2), 843-934. <https://doi.org/10.3390/sym7020843>
- Klingenberg, C. P. (2015b). Analyzing Fluctuating Asymmetry with Geometric Morphometrics: Concepts, Methods, and Applications. *Symmetry*, 7(2), 843-934. <https://doi.org/10.3390/sym7020843>
- Košinová, K., Turek, J., Cukor, J., Linda, R., Häckel, M., Hart, V., Košinová, K., Turek, J., Cukor, J., Linda, R., Häckel, M., & Hart, V. (2022). The Application of 3D Imaging as an Appropriate Method of Wildlife Craniometry: Evaluation of Accuracy and Measurement Efficiency. *Animals*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/ani12233256>
- Le Cozler, Y., Allain, C., Caillot, A., Delouard, J. M., Delattre, L., Luginbuhl, T., & Faverdin, P. (2019). High-precision

- scanning system for complete 3D cow body shape imaging and analysis of morphological traits. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 447-453. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.019>
- Le Cozler, Y., Dumesny, M., Delouard, J.-M., Delattre, L., Luginbühl, T., & Faverdin, P. (2024). One-shot technology for three-dimensional imaging of large animals: Perspectives for ruminant management. *Translational Animal Science*, 8, txae018. <https://doi.org/10.1093/tas/txae018>
- Muramatsu, N., Shin, S., Deng, Q., Markham, A., & Patel, A. (2025). WildPose: A long-range 3D wildlife motion capture system. *Journal of Experimental Biology*, 228(5), JEB249987. <https://doi.org/10.1242/jeb.249987>
- Oktay, E., Doğan, İ. B., Duro, S., Pazvant, G., Yiğit, F., Szara, T., Oktay, E., Doğan, İ. B., Duro, S., Pazvant, G., Yiğit, F., & Szara, T. (2025). Geometric Morphometric Analysis of Adult and Juvenile Turtle Shells: Directional Asymmetry and Fluctuating Asymmetry. *Diversity*, 17(4). <https://doi.org/10.3390/d17040241>
- Olsen, T. B., García-Martínez, D., & Villa, C. (2023). Testing different 3D techniques using geometric morphometrics: Implications for cranial fluctuating asymmetry in humans. *American Journal of Biological Anthropology*, 180(1), 224-234. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24657>
- Shukla, V., Morelli, L., Remondino, F., Micheli, A., Tuia, D., & Risse, B. (2024). Towards Estimation of 3D Poses and Shapes of Animals from Oblique Drone Imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2-2024, 379-386. ISPRS TC II Mid-term Symposium “The Role of Photogrammetry for a Sustainable World” - 11–

14 June 2024, Las Vegas, Nevada, USA.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-379-2024>

Swaddle, J. P. (2003). *Fluctuating Asymmetry, Animal Behavior, and Evolution*. 32, 169-205.
[https://doi.org/10.1016/S0065-3454\(03\)01004-0](https://doi.org/10.1016/S0065-3454(03)01004-0)

Yuto, C. M. M., Lumogdang, L., & Tabugo, S. R. M. (2016). Fluctuating asymmetry as an Indicator of Ecological Stress in *Rhinocypha colorata* (Odonata: Chlorocyphidae) in Iligan City, Mindanao, Philippines. *Entomology and Applied Science Letters*, 3(1-2016), 13-20.
<https://doi.org/10.51847/NtmEevY>

Zong, X. (2023). *Advancing Animal Ecology through LiDAR-Based 3D Visibility Analysis*.
<https://doi.org/10.3990/1.9789036556613>

**TÜRKİYE VE DÜNYADA
VETERİNER FİZYOLOJİSİ**

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com