



## Veteriner Hekimlikte Biyomedikal Yaklaşımlar ve Kullanım Alanları

Kürşad Arda BAYKAYA<sup>1\*</sup> 

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoteknoloji Bölümü

\*Correspondence: [baykayaarfa@gmail.com](mailto:baykayaarfa@gmail.com)

Received: 25.11.2025

Accepted: 10.12.2025

Published: 25.12.2025

**Atf Yapmak İçin:** Baykaya, K.A. (2025). Veteriner Hekimlikte Biyomedikal Yaklaşımlar ve Kullanım Alanları. *VZS, 1(2)*, 236–249. DOI: <https://doi.org/10.64614/vzs-31>

**How to Cite:** Baykaya, K.A. (2025). Biomedical Approaches and Applications in Veterinary Medicine. *VZS, 1(2)*, 236-249.

DOI: <https://doi.org/10.64614/vzs-31>

**Özet:** Tıp ve sağlık bilimlerinde yaşanan hızlı teknolojik ilerlemeler, biyomedikal mühendisliğinin hem beşeri hekimlikte hem de veteriner hekimlikte önemini giderek artırmaktadır. Biyomedikal mühendisliği; mühendislik prensiplerini biyolojik sistemlerle birleştirerek tanı, tedavi ve rehabilitasyon süreçlerinde kullanılan yenilikçi araçların ve yöntemlerin geliştirilmesini sağlayan multidisipliner bir alandır. Beşeri hekimlikte birçok ileri teknoloji cihazın geliştirilmesi aşamasında hayvan modelleri temel araştırma aracı olarak kullanılmakta, bu da iki alan arasında doğal bir etkileşim ve bilgi akışı oluşturmaktadır. Benzer şekilde, veteriner hekimlikte de karmaşık klinik olguların yönetiminde biyomedikal mühendislik uygulamaları önemli katkılar sunmaktadır. Yapay zekâ destekli tanı sistemleri, doku ve kemik defektlerine yönelik bireye özgü implant üretimi, kök hücre ve rejeneratif tıp yaklaşımları, alana özgü sensör ve takip cihazları, nanoteknoloji tabanlı tedavi seçenekleri ile 3D yazıcı teknolojilerinin klinik ve cerrahi uygulamalarda kullanımı bu katkıların başlıca örnekleridir. Ayrıca gelişmiş görüntüleme yöntemleri, robotik cerrahi ve biyomalzeme araştırmaları veteriner sağlık hizmetlerinin kalitesini artıran diğer önemli alanlardır. Bununla birlikte, biyomedikal teknolojilerin sahaya entegrasyonunda bazı genel sınırlılıklar ve materyal temelli zorluklar da bulunmaktadır. Biyomedikal mühendisliğinin giderek gelişmesi ve yaygınlaşması sayesinde hayvan sağlığına yönelik pek çok konuda günümüzde imkânsız görünen olguların çözümüne yönelik daha etkili, güvenilir ve bireye özgü tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesi mümkün hâle gelmektedir. Bu derlemenin amacı, biyomedikal mühendisliğinin veteriner hekimlikteki güncel kullanım olanaklarını, teknolojik gelişim sürecini ve karşılaşılan kısıtlamaları ortaya koyarak alanın geleceğine yönelik kapsamlı bir değerlendirme sunmaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyomedikal mühendisliği, klinik uygulamalar, rejeneratif tıp, veteriner hekimlik

## Biomedical Approaches and Applications in Veterinary Medicine

**Abstract:** Rapid technological advances in medicine and health sciences are increasingly emphasizing the importance of biomedical engineering in both human and veterinary medicine. Biomedical engineering combines engineering principles with biological systems to contribute to the development of innovative tools and methods used in diagnosis, treatment, and rehabilitation. Animal models are used as basic research tools in the development of many high-tech devices in human medicine, creating a natural interaction and flow of information between the two fields. Similarly, biomedical engineering applications make significant contributions to the management of complex clinical cases in veterinary medicine. Applications such as artificial intelligence-assisted diagnostic systems, personalized implant production for tissue and bone defects, stem cell and regenerative medicine approaches, field-specific sensors and tracking devices, nanotechnology-based treatment options, clinical research on 3D printing technologies, and

biomaterials studies are used in many areas of the veterinary field. The increasing development and widespread adoption of biomedical engineering makes it possible to develop more effective, reliable, and personalized treatment approaches to address seemingly impossible challenges in many areas of animal health. However, there are some general limitations and material-based challenges in integrating biomedical technologies into the field. The purpose of this review is to present a comprehensive assessment of the future of the field by presenting the current applications of biomedical engineering in veterinary medicine, the technological development process, and the limitations encountered.

**Keywords:** Biomedical engineering, clinical applications, regenerative medicine, veterinary medicine

## GİRİŞ

Biyomedikal mühendisliği mühendislik canlı biyolojisi ve tıp alanını kapsayan bir bilim dalıdır. Biyomedikal mühendisliğinin veteriner hekimlikte daha az kullanıldığı bilinmekle birlikte bu alandaki bilgi ve tecrübelerin veteriner sahada kullanımı için uygun bir zemin oluşturabileceği ifade edilmiştir (Fernández-Parra ve ark., 2024). Biyomedikal mühendisliğinin veteriner hekimlikteki temel uygulama alanları arasında biyomekanik analizler, rejeneratif tıp uygulamaları, yapay zeka destekli görüntüleme, biyomalzeme geliştirme, sensör tabanlı izleme sistemleri ve nanoteknolojiye dayalı teşhis yaklaşımları yer almaktadır (Dilbaghi ve ark., 2013; Neethirajan, 2020). Veteriner hekimlikte biyomedikal uygulamaların sistematik biçimde benimsenmesi, hayvan sağlığında bilimsel ilerlemesinin sürdürülebilirliğini güvence alması bakımından önemlidir (Akinsulie ve ark., 2024). Ayrıca biyomekanik testler, yapay zeka destekli görüntüleme, yenileyici tedaviler ve hasta takibi uygulamalarında, hayvan sağlığı alanında bir dönüşüm yaratmaktadır (Akinsulie ve ark., 2024).

### **Biyomedikal Mühendisliğinin Kullanım Olanakları**

#### ***Yapay Zeka Uygulamaları***

Yapay zeka (YZ), bir sistemin dış verileri doğru biçimde yorumlama, bu verilerden öğrenme ve elde ettiği bilgileri esnek biçimde uyarlayarak belirli hedef ve görevleri yerine getirme yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Kaplan ve Haenlein, 2019).

Yapay zeka ve makine öğrenmesi temelli yaklaşımlar, veteriner klinik uygulamalarda hızlı bir yükseliş göstermektedir (Burti ve ark., 2024; Akinsulie ve ark., 2024). Bu özel destekli sistemler sayesinde radyografi, ultrason, BT ve MR gibi tanısal görüntüleme yöntemlerinde hata oranları azaltılmakta ve dolayısıyla tanısal doğruluğu artırmaktadır (Burti ve ark., 2024). Yapay zeka algoritmaları, radyografik görüntülerin analizinde ve lezyonların zaman içindeki değişiminin takibinde kullanılmaktadır

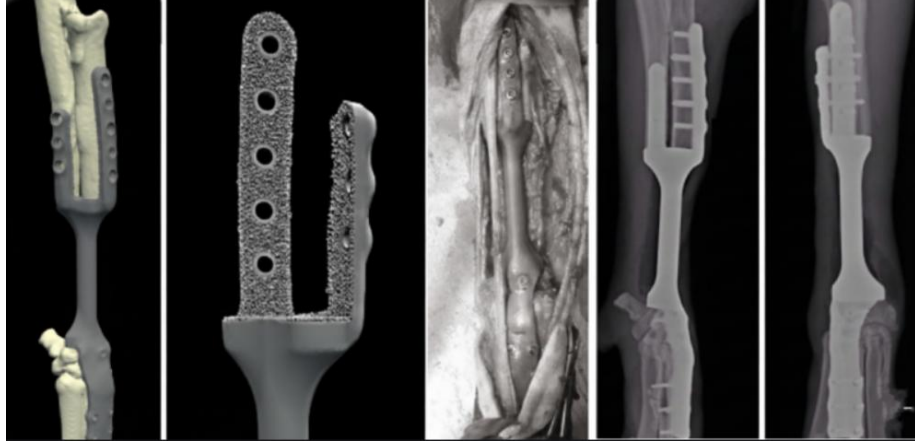
(Bouhali ve ark., 2022). Bu teknolojiler, insan gözünün kaçırabileceği ince detayları yakalayıp tanısal hataları azaltmayı hedeflemektedir (Hosny ve ark., 2018).

Yapay zeka, radyasyon onkolojisinde otomatik organ segmentasyonu ve tedavi planlamasının doğruluğunu artırarak hem klinik iş yükünü azaltma hem de zaman ve maliyet açısından önemli klinik kaynak kullanımını azaltmaktadır (Leary ve Basran, 2022). Ayrıca erken kanser teşhisi için sıvı biyopsiler ve yapay zeka destekli yeni nesil tanı araçları geliştirilmektedir (Alshammari ve ark., 2025). Genel olarak yapay zeka klinik uygulamalardan halk sağlığına kadar geniş bir yelpazede veteriner bilimlerine entegre olmaktadır (Akbarein ve ark., 2025).

Derin öğrenme ve çok modlu veri birleştirme tabanlı yapay zeka sistemleri, ortopedik cerrahide ameliyat öncesi planlama doğruluğunu artırmakta, kesi yönü ve implant yerleşimi gibi kritik kararların optimizasyonunu desteklemekte ve operasyon sonrası iyileşmenin kişiselleştirilmiş biçimde izlenmesine olanak tanımaktadır (Han ve ark., 2025). Bu teknolojilerin doğru biçimde uygulanması, hem veteriner kliniklerinin tanısal doğruluğunu artırmakta hem de araştırma verimliliğini güçlendirmektedir (Burti ve ark., 2024). Veteriner hekimlikte biyomedikal mühendisliği, modern cihaz tasarımı, protez ve implant üretimi, hücre bazlı tedaviler, nanoteknoloji, 3D yazıcı teknolojisi ve yapay zeka tabanlı analizleri bir araya getirerek hem klinik hem de araştırma süreçlerini dönüştürmektedir (Gonzalez ve ark., 2023). 3D yazıcı teknolojisiyle kişiye özel implant ve protez üretimi artık mümkün hale gelmiştir. Köpekler üzerinde yapılan ön uzuv protez çalışmaları, 3D modelleme ve yazılım simülasyonlarının hayvanın yük dağılımını desteklemede başarılı olduğunu göstermiştir (Gonzalez ve ark., 2023). Veteriner anatomisinde 3D görüntüleme ve yazıcı teknolojilerinin kullanımı hem eğitim hem de cerrahi planlamada büyük kolaylık sağlamaktadır (Kapoor, 2024). Bu teknoloji, anatomik modellerin doğru biçimde yeniden yapılandırılmasını ve karmaşık cerrahi operasyonların önceden simülasyonunu mümkün kılmasının yanında Veteriner sahada metal veya biyopolimer bazlı implantları hayvanın anatomisine özel olarak üretebilmektedir (Pawlik ve ark., 2025). Bu gelişmeler, veteriner ortopedi uygulamalarında insan tıbbındaki kalite standartlarının uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca üç boyutlu hücresel modeller, ilaç tarama çalışmalarında daha fizyolojik ve türlere özgü yanıtlar verebildiği için translasyonel araştırmalar açısından da değerlidir (Clevers, 2016).

### ***İmplant Teknolojisi***

Veteriner hekimlikte kemikte meydana gelen defektler ve parça kayıplı kemikler için çeşitli implant teknolojileri kullanılmaktadır (Şekil 1). Bu konuyla ilgili daha fazla çalışmanın yapılarak geliştirilmesi gelecek için umut vericidir (Popov ve ark., 2019).



**Şekil 1.** Veteriner klinik sahada kullanılan kemik implantı (Popov ve ark., 2019).

İnsan implant standartlarının yeni üretim teknolojileriyle birleştirilmesi, veteriner sahada hayvanlara yönelik ortopedik sorunların çözümüne önemli katkı sağlamaktadır (Pawlik ve ark., 2025). Ayrıca insan kaynaklı organoid teknolojilerinin gelişmesi, deneylerde kullanılan geleneksel hayvan modellerinin yerini alabilecek daha hassas ve insan biyolojisine özgü sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Organoidlerin genetik hastalıkların modellenmesi, enfeksiyonların incelenmesi ve ilaç testlerinin yapılması gibi alanlarda sunduğu avantajlar, bazı araştırma alanlarında hayvan kullanımını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir (Kim ve ark., 2020). Fakat hayvanlar üzerindeki yapılan çalışmaların bazı durumlarda insanlar için uygulanabilirliğiyle ilgili endişelerden dolayı elde edilen bulguların klinik uygulamalarda insanlara aktarılabilirliğini sınırlayabilmektedir. Çünkü hayvan deneyleri çok farklı birçok türü kapsamaktadır (Akhtar, 2015).

### ***Kök Hücre Çalışmaları***

Kök hücreler, hücre bölünmesi sayesinde yenileme, yaygın olarak çoğalma ve bir veya daha fazla hücre/doku tipine uyarlanabilme özelliği bulunan hücrelerdir (Amarpal ve ark., 2013). Kök hücre temelli tedaviler, veteriner rejeneratif tıbbın merkezinde yer alır. Mezenkimal stromal hücreler (MSC), köpek, at ve kedi gibi türlerde kas iskelet, kalp, deri ve nörolojik hastalıkların tedavisinde umut verici sonuçlar vermektedir. Ayrıca bu hücrelerin kendini yenileme ve farklılaşma kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir (El-

Husseiny ve ark., 2022). Mezenkimal kök hücreler (MSC), rejeneratif tıpta en umut verici alanlardan biridir. Özellikle köpeklerde osteoartrit (OA) tedavisinde Yağ Dokusu Kaynaklı Kök Hücrelerin (ADMSC) kullanımı üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekicidir (Vilar ve ark., 2014). şiddetli kalça OA'sı olan köpeklerde intraartiküler ADMSC uygulamasının, kuvvet platformu analizlerine göre ilk üç ayda uzuv fonksiyonlarını objektif olarak iyileştirdiğini, ancak etkinin zamanla azaldığını belirtmiştir. Benzer şekilde, allojenik kök hücrelerin plaseboya kıyasla köpeklerde ağrı ve klinik skorlarda anlamlı iyileşme sağladığını raporlamıştır (Harman ve ark., 2016). İntraartiküler allojenik yağ kök hücre tedavisi, osteoartritli köpeklerde plaseboya kıyasla hem hasta sonuç skorlarında hem de veteriner değerlendirme skorlarında anlamlı iyileşme sağlamıştır. Advers olay oranları açısından iki grup arasında fark görülmemiştir (Harman ve ark., 2016). Kalça osteoartriti olan köpeklerde AD-MSC tedavisi, özellikle tedaviden sonraki ilk 30 günde tepe dikey kuvvet ve dikey dürtüde belirgin artış sağlamış, etkinin 3 ay içinde kademeli olarak azaldığı gözlenmiştir (Vilar ve ark., 2014).

Sadece köpeklerde değil, atlarda da tendon rejenerasyonu için biyomühendislik yaklaşımları kullanılmakta olup, atlar insan tendinopatileri için uygun bir translasyonel model olarak kabul edilmektedir (Alves ve ark., 2025). Kedilerde ise kök hücrelerin sekretom profilleri incelenmiş ve eksozomların hücreler için potansiyel taşıdığı ortaya konmuştur (Villatoro ve ark., 2021). Ayrıca, Qinling dev pandalarında yapılan yenilikçi bir çalışmada, ADMSC kaynaklı hücre dışı veziküllerin yara iyileşmesini hızlandırdığı, kolajen birikimini artırdığı ve antiinflamatuvar etkiler gösterdiği tespit edilmiştir (Gong ve ark., 2025). Ancak, doğal yollarla oluşan hastalıklarda (indüklenmiş modellerin aksine) klinik çalışmaların sayısının hala sınırlı olduğunu ve düzenleyici eksikliklerin bulunduğunu vurgulamaktadır (Marx ve ark., 2015).

MSC'lerin kemik iliği, yağ dokusu veya diş dokusundan elde edilmesi, hayvanlarda kemik doku mühendisliğinde sıklıkla kullanılmaktadır (Nantavisai ve ark., 2019). Biyomalzemeler, doku mühendisliği ve rejeneratif tıpta tedavi edici çözümler sunarak hem beşeri hem de veteriner hekimliğinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Leonardi ve ark., 2024). Özellikle oftalmoloji alanında, doku bütünlüğünü koruyan kolajen ve hyaluronik asit bazlı yapıların yanı sıra, 3D baskı teknolojisi ile üretilen kişiye özel modellerin kullanımı yaygınlaşmaktadır (Leonardi ve ark., 2024). Bu çalışmalar, oftalmoloji ve ortopedik cerrahi dahil olmak üzere farklı alanlarda klinik başarı sağlamıştır. Bu malzemeler genel olarak yumuşak ve sert malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Başlıca plastik, metal ve polimer malzeme

kullanılmaktadır (Leonardi ve ark., 2024). Ayrıca veteriner doku yenilenmesi alanında hayvanlar üzerinde denenen hücre terapilerine bağlı sağaltım yöntemlerinin beşeri tıp alanında yapılan uygulamalar için önemli bir veri kaynağı sağladığı bilinmektedir. Dolayısıyla hücre biyolojisinin tam olarak anlaşılması ve üretim süreçlerinin standardize edilmesi, kök hücre terapilerinin etkinliğini artırmada kritik öneme sahiptir (Arzi ve ark., 2021).

### ***Nanoteknoloji Alanı***

Nanoteknoloji; fizik, kimya, biyoloji ve veteriner hekimliği kapsayan disiplinler arası bir bilimdir. Veterinerlikte nanomalzemeler, ilaç iletimi, hastalık teşhisi, doku mühendisliği ve hayvan kimlik doğrulaması gibi alanlarda kullanılmaktadır (Dilbaghi ve ark., 2013; Jafary ve ark., 2023). Metal nanopartiküller ve manyetik nanopartiküller, hedefe yönelik tedavilerde umut verici araçlar olarak öne çıkmıştır. Bununla birlikte, nanomalzemelerin uzun vadeli biyoyumluluk etkileri üzerine daha fazla çalışma gerekmektedir (Jafary ve ark., 2023). Nanomalzeme toksisitesinin değerlendirilmesinde kullanılan alternatif in vitro test yöntemleri, hayvan deneylerine duyulan ihtiyacı azaltmak amacıyla giderek daha fazla tercih edilmektedir; ancak bu yöntemlerin geçerliliği ve güvenilirliğinin dikkatli şekilde doğrulanması gerekmektedir (Griesinger ve ark., 2016). Nanoteknoloji, farklı hastalıkların tedavisinde önemli bir öneme sahip olan ve hızla gelişen bir teknoloji alanıdır. Nanoteknoloji, ilaçların hedef dokuya taşınmasını kolaylaştırarak çözünürlük, biyoyararlanım ve terapötik etkinliği artırmakta; aynı zamanda erken ilaç bozunmasını azaltarak daha kontrollü salım sağlamaktadır. Karbon nanotüpler, lipozomlar, polimerik nanopartiküller ve kuantum noktaları gibi nanosistemler, farklı kimyasal ve fiziksel özellikleri sayesinde ilaçların hücre içi geçirgenliğini artırmakta, dokuya daha etkin dağılım sağlamaktadır (Ashraf ve ark., 2025).

Nanopartiküller, biyolojik engelleri aşarak ilaçların tümör dokusuna seçici olarak ulaşmasını sağlamaktadır (Tran ve ark., 2017). Kanser tedavisinde kullanılan nanotabanlı yaklaşımlar giderek çeşitlenmekte olup, lipozomlar, polimerik nanopartiküller, dendrimerler, karbon nanotüpler ve altın nanopartiküller gibi farklı nanosistemler hem hedefe yönelik ilaç iletimi hem de biyolojik görüntüleme amacıyla geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Sell ve ark., 2023). Özellikle lipozomal, polimerik ve biyolojik nanosistemlerin (örneğin eksozomların) tümör mikroçevresini etkileyebilme kapasitesi terapötik etkinliği belirgin şekilde artırmıştır (Khan ve ark., 2025). Son dönemlerde bitki ve mikrop kaynaklı "yeşil nanoteknoloji" yaklaşımları öne çıkmaktadır (Karnwal ve ark.,

2024; Ammar ve ark., 2025). Bitki türevli nanopartiküller (PNP'ler), çevre dostu olmalarının yanı sıra doğal antimikrobiyal ve antioksidan özellikler sunmaktadır (Ammar ve ark., 2025). Ayrıca nanoteknoloji RNA gibi hassas moleküllerin hücre içine yüksek verimlilikle taşınmasında kritik bir rol oynamaktadır (Sher ve ark., 2024).

Hayvan sağlığı ve üretimiyle ilişkili birçok soruna yenilikçi çözümler sunabilmektedir. Özellikle nanopartikül tabanlı taşıyıcı sistemlerin antimikrobiyal ilaçlarla birlikte geliştirilmesi, hastalıkların tedavi etkinliği artırarak ve yan etkileri azaltarak mikrobiyal hastalıkların tedavisinde güçlü bir ilaç stratejisi olarak görülmektedir (Youssef ve ark., 2019). Ayrıca Nanoteknoloji, hayvan üretimi için hayvan yeminin lezzetini artırmak, büyüme performanslarını iyileştirmek ve yemden yararlanmayı optimize etmek gibi çoklu faydalar sağlamaktadır (Hill ve Li, 2017). Nanopartiküller, yüksek yüzey hacim oranları sayesinde benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Bu özellikler, nanoteknolojinin doğal biyolojik ürünlerin etkisine olanak tanımaktadır. Ayrıca nanoteknoloji, kümes hayvanı hastalıklarının tanı ve tedavisinde kullanılan biyomedikal mühendisliği uygulamalarına akıllı ve yenilikçi çözümler sunmaktadır. Bununla birlikte, nano ürünlerin kümes hayvanlarında kullanıma sunulmadan önce güvenliklerinin değerlendirilmesi amacıyla kapsamlı tehlike analizlerinin yapılması gerekmektedir. (Fesseha ve ark., 2020). Veteriner nanomedikal alanda çeşitli nanomalzemelerin geliştirilmesine rağmen, nanopartikül tabanlı tedavilerin etkinliği ve güvenliği konusunda daha fazla çalışma gerekmektedir (Jafary ve ark., 2023).

### ***Sensör Sistemleri***

Sensör tabanlı sistemler, hayvan davranışı, fizyolojik tepkiler ve çevresel değişkenlerin sürekli olarak izlenmesine olanak sağlar. Kalp atış hızı, solunum, vücut ısısı ve hareket ölçümleri gibi parametreler sensörlerle gerçek zamanlı izlenebilir (Neethirajan, 2020). Bu sistemler, üretim verimliliğini artırmakla birlikte, hayvan refahının korunmasına da katkı sağlar. Ayrıca, elde edilen sensör verilerinin veri analizleriyle birleştirilmesi, hastalık tahmini ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanır (Ouyang ve ark., 2019). Hayvan refahının değerlendirilmesinde davranışsal biyo-belirteçlerin izlenmesi yaygın olarak kullanılsa da, yüz ifadelerinin analizi gibi daha derin fizyolojik göstergeler hâlâ yeterince kullanılmamaktadır. Bu nedenle yüz ifadesi analizine dayalı objektif ölçümler, özellikle ağrı gibi duygusal durumların değerlendirilmesinde mevcut sensör tabanlı sistemleri tamamlayıcı değer taşımaktadır (Descovich ve ark., 2017).

### ***Görüntüleme Araçları***

Elektriksel empedans tomografisi (EIT), vücut yüzeyine uygulanan elektriksel uyarım ve ölçümler aracılığıyla iç dokuların elektriksel özelliklerini görüntüleyen noninvaziv bir yöntemdir (Adler ve Boyle, 2017). Elektriksel empedans tomografisi (EIT) gibi biyomedikal görüntüleme yöntemleri, veteriner hekimlikte non invaziv torasik görüntüleme için kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle veteriner hekimlik alanında toraksın anestezi sırasında görüntülenmesi sayesinde solunum değerleri hakkında anlık bilgi sahibi olunabilmektedir. (Brabant ve ark., 2022). CVS (Computer Vision Systems) uygulamaları hızla gelişen bir araştırma alanıdır ve bazı ticari ürünler mevcut olsa da, önemli veriler sunabilecek kendi kendine çözümlerin geliştirilebilmesi için çözülmesi gereken önemli araştırma boşlukları bulunmaktadır. Bu yapılan çalışmalar, hayvan ve veteriner bilimlerinde CVS'nin kullanımında gelişmeleri ortaya koymakta ve teknolojinin yetiştirme programları ile ticari çiftliklerde yaygın biçimde uygulanabilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır (Fernandes ve ark., 2020). Çiftlik hayvanlarının solunumu genellikle abdominal hareket ile uyumlu olduğundan abdomenin gözlenmesi solunumun takibi açısından değerlendirmede kullanılmaktadır. Bu bağlamda temassız teknolojiler (bilgisayarlı görme, termografi ve ses analizi) solunum hızını izlemek için invaziv olmayan bir yöntem sunmaktadır (Handa ve Peschel, 2022).

### ***Biyomedikal Uygulamalarda Karşılaşılan Olası Sorunlar***

Biyomedikal teknolojiler son yıllarda büyük ilerlemeler göstermiş olsa da, farklı malzeme türleri ve mühendislik yaklaşımları belirli sınırlamalar, toksisite riskleri ve uygulama zorlukları nedeniyle dikkatle değerlendirilmelidir. Özellikle nanomalzemeler, serbest ilaçlara kıyasla farmakokinetik avantaj sağlasa da; inorganik nanopartiküllerde görülen birikimin ve kuantum noktalarının ağır metal içeriğinden kaynaklanan toksisite riskleri, biyoyumumluluğunu tehdit etmektedir (Roszkowski ve Durczynska, 2025). Benzer şekilde aşı teknolojilerinde, düşük immünojenisite ve uzun dönem güvenlik verilerinin eksikliğinin, önemli kısıtlamalar arasında yer almaktadır (Dey ve Singh, 2023). Polisakkarit temelli biyomalzemeler düşük dayanıklılık ve çözünürlük problemleri nedeniyle bazı klinik uygulamalarda yeterli performans göstermeyebilir (Souza ve ark., 2021). Biyomedikal uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bazı polimerlerin doğal antimikrobiyal etkinlikten yoksun olması ise biyomedikal çalışmalarda kullanılan implant gibi cihazların bölgeye duyarlı mikrobiyal enfeksiyona sebep olabilir (Zare ve ark., 2021). Veteriner implantları için özgü düzenlemeler eksiktir. Patellar çıkıklık, küçük

hayvanlarda yaygın bir ortopedik sorundur. Ayrıca üretim kalitesi ve ekonomik uygulanabilirlik halen sınırlıdır (Pawlik ve ark., 2025). Nanokompozit hidrojeller iyi biyouyumluluklarına rağmen; zayıf anti-tümör etkinlik, sınırlı görüntüleme kapasitesi ve vücut içindeki difüzyon–metabolizma süreçlerinin tam açıklanamamış olması nedeniyle klinik uygulamalara geçişte önemli kısıtlamalar göstermektedir (Huang ve ark., 2022). Ayrıca hedef dışı ve uzun vadeli toksisite riskleri ile kompozit sistemlerin güvenlik profili, özellikle *in vivo* kullanımlarda ürün dönüşümünü zorlaştırmakta ve disiplinler arası daha kapsamlı iş birliği gerektirmektedir (Huang ve ark., 2022). Kemik doku mühendisliğinde standart olarak başvuru kimyasal sentezli hidroksiapatit (HAp), sergilediği düşük stabilite ve yetersiz mekanik dayanıklılık nedeniyle uzun dönemli klinik uygulamalarda kısıtlı bir performans sunmaktadır. Bu durumdan dolayı biyomedikal araştırmaları biyolojik atıklardan elde edilen doğal kaynaklı alternatiflere yönelmeye zorlamaktadır (Sathiyavimal ve ark., 2020). Veterinerlik tanısal görüntüleme veri kümelerinde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Tür ve ırk farklılıkları, yüksek hasta yükü ve nadir görülen hastalık örneklerinin eksikliği algoritma eğitimi için önemli sınırlamalar oluşturmaktadır (Akinsulie ve ark., 2024). Daha önce projeksiyon radyografisi, klinik durumların radyodiyagnozu için temel teknik olup üç boyutlu yapıların iki boyutlu görüntülerini sunarken dar bir pozlama aralığına sahipti. Modern ultrasonografi, BT, MR ve sintigrafi teknikleri bu sınırlılıkları önemli ölçüde azaltmış olsa da yüksek maliyet, uzman eksikliği ve cihaz bakımı gibi sorunlar nedeniyle veterinerlikte uygulama hala sınırlıdır (Gugjoo ve ark., 2014). Yağ dokusundan türetilmiş kök hücreler (ASC'ler), immunofenotip ve doku mühendisliği potansiyeli nedeniyle hem insan hem hayvan tedavilerinde kullanılmakta, ancak özellikle kedilerde klinik veri eksikliği ve kontrollü çalışmaların azlığı gerçek etkinliğin belirlenmesini zorlaştırmaktadır (Vilar ve ark., 2014).

## SONUÇ

Biyomedikal mühendisliği, veteriner hekimlikte tanı, tedavi ve araştırma süreçlerini yeniden şekillendiren çok yönlü bir disiplin haline gelmiştir. Yapay zeka destekli görüntüleme, nanoteknolojik ilaç taşıyıcıları, hücre temelli tedaviler, biyomalzeme uygulamaları ve sensör tabanlı izleme teknolojileri gibi yenilikçi yaklaşımlar, hem klinik uygulamalarda hem de translasyonel araştırmalarda önemli kazanımlar sağlamaktadır. EIT, 3D biyoyazdırma, mezenkimal kök hücre tedavileri ve hedefe yönelik nanosistemler gibi alanlarda kaydedilen ilerlemeler, veteriner tıpta daha

hızlı, güvenilir ve kişiselleştirilmiş çözümlerin ortaya çıkmasına katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte, bu teknolojilerin klinik entegrasyonunda karşılaşılan bazı sınırlılıklar devam etmektedir. Türler arası biyolojik değişkenlik, uzun dönem güvenlik verilerinin sınırlı oluşu, nanoteknolojik ürünlerde toksisite belirsizlikleri ve yapay zeka modellerinde doğrulama gereklilikleri, güncel literatürde vurgulanan başlıca sorunlar arasındadır. Ayrıca sensör tabanlı sistemlerin saha koşullarına adaptasyonu ve kök hücre uygulamalarında etik ile üretim gibi konular gelecekte daha fazla çalışma yapılması gerektirmektedir. Sonuç olarak, biyomedikal mühendisliği ile veteriner hekimliğin entegrasyonu hayvan sağlığı, refahı ve translasyonel tıp açısından büyük potansiyellere sahiptir. Gelecek çalışmaların; yapay zeka algoritmalarının validasyonu, nanoteknolojik yapıların güvenlik analizleri, doku mühendisliği ürünlerinin uzun dönemli klinik takibi ve EIT gibi fonksiyonel görüntüleme yöntemlerinin optimize edilmesi üzerine yoğunlaşması önemli katkılar sağlayacaktır.

#### KAYNAKLAR

Adler, A., & Boyle, A. (2017). Electrical impedance tomography: Tissue properties to image measures. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64(11), 2494-2504.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.2017.2728323>

Akbarein, H., Taaghi, M.H., Mohebbi, M., & Soufizadeh, P. (2025). Applications and Considerations of Artificial Intelligence in Veterinary Sciences: A Narrative Review. *Veterinary Medicine and Science*, 11(3), e70315.

Akhtar, A. (2015). The flaws and human harms of animal experimentation. *Cambridge Quarterly of Healthcare Ethics*, 24(4), 407-419. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0963180115000079>

Akinsulie O.C., Idris I., Aliyu V.A., Shahzad S., Banwo O.G., Ogunleye S.C., Olorunshola M., Okedoyin D.O., Ugwu C., Oladapo I.P., Gbadegoye J.O., Akande Q.A., Babawale P., Rostami S., & Soetan K.O. (2024). The potential application of artificial intelligence in veterinary clinical practice and biomedical research. *Frontiers in Veterinary Science*, 11,1347550.

DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1347550>

Alshammari, A.H., Oshiro, T., Ungkulpasvich, U., Yamaguchi, J., Morishita, M., Khair, S.A., Hatakeyama, H., Hirotsu, T., & di Luccio, E. (2025). Advancing veterinary oncology: next-generation diagnostics for early cancer detection and clinical implementation. *Animals*, 15(3), 389. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15030389>

Alves, A.L.G., Dudhia, J., Rosa, G.S., & Smith, R.K. (2025). The veterinarian perspective: Comparative anatomy, equine models and in vivo bioengineering of tendons. In *Tendon Regeneration* (359-380. p). Academic Press.

DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15916-9.00016-4>

Amarpal, A., Kuldeep Dhama, K.D., Sandip Chakraborty, S.C., Ruchi Tiwari, R.T., & Senthilkumar Natesan, S.N. (2013). Stem cells and their clinical/therapeutic applications in biomedical and veterinary science-the perspectives. *Research Opinions In Animal & Veterinary Sciences*, 3(9), 261-279.

Ammar, M.M., Ali, R., Abd Elaziz, N.A., Habib, H., Abbas, F.M., Yassin, M.T., Maniah, K., & Abdelaziz, R. (2025). Nanotechnology in oncology: advances in biosynthesis, drug delivery, and theranostics. *Discover Oncology*, 16(1), 1172.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s12672-025-02664-3>

Arzi B., Webb T.L., Koch T.G., Volk S.W., Betts D.H., Watts A., Godrich L., Kalos M.S., Kol A. (2021). Cell therapy in veterinary medicine as a proof-of-concept for human therapies: Perspectives from the north American veterinary regenerative medicine association. *Frontiers in Veterinary Science*, 8:779109. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.779109>

Ashraf, M., Zulfiqar, F., Rauf, U., Riaz, M., Arshad, S., Khan, M.J., & Sahin, T. (2025). Nanotechnology, nano-systems and applications of nanoparticles in novel drug delivery—a comprehensive review. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 38(2).

Bouhali, O., Bensmail, H., Sheharyar, A., David, F., & Johnson, J. P. (2022). A review of radiomics and artificial intelligence and their application in veterinary diagnostic imaging. *Veterinary Sciences*, 9(11), 620. DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci9110620>

Brabant, O.A., Byrne, D.P., Sacks, M., Moreno Martinez, F., Raisis, A.L., Araos, J.B., Waldmann, A.D., Schramel, J.P., Ambrosio, A., Hosgood, G., Braun, C., Auer, U., Bleul, U., Herteman, N., Secombe, C.J., Schoster, A., Soares, J., Beazley, S., Meira, C., Adler, A., & Mosing, M. (2022). Thoracic electrical impedance tomography—the 2022 veterinary consensus statement. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 946911.

DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.946911>

Burti S., Banzato T., Coghlan S., Wodzinski M., Bendazzoli M., & Zotti A. (2024). Artificial intelligence in veterinary diagnostic imaging: perspectives and limitations. *Research in Veterinary Science*, 175, 105317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2024.105317>

Clevers, H. (2016). Modeling development and disease with organoids. *Cell*, 165(7), 1586-1597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.05.082>

Descovich, K., Wathan, J.W., Leach, M.C., Buchanan-Smith, H.M., Flecknell, P., Farningham, D., & Vick, S.J. (2017). Facial expression: An under-utilized tool for the assessment of welfare in mammals. *Alternatives to Animal Experimentation*, 34(3), 409-429.

DOI: <https://doi.org/10.14573/altex.1607161>

Dey, S., & Singh, G.B. (2023). Green nanotechnology approaches in vaccinology: advantages and disadvantages in biomedical sciences. In *Nanovaccinology: Clinical application of nanostructured materials research to translational medicine*, 281-299p, Springer International Publishing. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35395-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35395-6_16)

Dilbaghi, N., Kaur, H., Kumar, R., Arora, P., & Kumar, S. (2013). Nanoscale device for veterinary technology: trends and future prospective. *Advanced Materials Letters*, 4(3), 175-184.

DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2012.7399>

El-Husseiny, H.M., Mady, E.A., Helal, M.A., & Tanaka, R. (2022). The pivotal role of stem cells in veterinary regenerative medicine and tissue engineering. *Veterinary Sciences*, 9(11), 648.

DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci9110648>

Fernandes, A.F.A., Dórea, J.R.R., & Rosa, G.J.D.M. (2020). Image analysis and computer vision applications in animal sciences: an overview. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 551269.

DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.551269>

- Fernández-Parra R., Di Giancamillo A., Peham C., & Malvè M. (2024). Animal biomechanics: application of the biomedical engineering to the veterinary sciences for the animal healthcare. *Frontiers in Veterinary Science*, 11,1390136.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2024.112380>
- Fesseha, H., Degu, T., & Getachew, Y. (2020). Nanotechnology and its application in animal production: A review. *Veterinary Medicine*, 5(2), 43-50.  
DOI: <https://doi.org/10.17140/VMOJ-5-148>
- Gong, S., Niu, H., Jia, Y., Liu, M., Ren, X., Zhang, D., Shen, J., Yang, C., Lei, Y., Zhao, P., & Lin, P. (2025). Repairing qinling giant panda skin wounds using adipose mesenchymal stem cell-derived extracellular vesicles. *Animals*, 15(9), 1270. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15091270>
- Gonzalez, A., Bermúdez, R., & Gamero-V, M.A. (2023). Biomedical engineering and veterinary: prototype of a prosthetic forelimb for canines. IEEE 41st Central America and Panama Convention. 08.11.2023-10.11.2023, Tegusigalpa, Honduras,1-6.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/CONCAPANXLI59599.2023.10517545>
- Griesinger, G., Verweij, P.J., Gates, D., Devroey, P., Gordon, K., Stegmann, B.J., & Tarlatzis, B.C. (2016). Prediction of ovarian hyperstimulation syndrome in patients treated with corifollitropin alfa or rFSH in a GnRH antagonist protocol. *PLoS One*, 11(3), e0149615.  
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149615>
- Gugjoo, M.B., Amarpal, A., Prakash Kinjavdekar, P.K., Aithal, H.P., Pawde, A.M., & Kuldeep Dhama, K.D. (2014). An update on diagnostic imaging techniques in veterinary practice. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 2, 64-77.  
DOI: <https://doi.org/10.14737/journal.aavs/2014/2.4s.64.77>
- Han, F., Huang, X., Wang, X., Chen, Y.F., Lu, C., Li, S., Lu, L., & Zhang, D.W. (2025). Artificial intelligence in orthopedic surgery: Current applications, challenges, and future directions. *MedComm*, 6(7), e70260. DOI: <https://doi.org/10.1002/mco2.70260>
- Handa, D., & Peschel, J.M. (2022). A review of monitoring techniques for livestock respiration and sounds. *Frontiers in Animal Science*, 3, 904834.  
DOI: <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.904834>
- Harman, R., Carlson, K., Gaynor, J., Gustafson, S., Dhupa, S., Clement, K., Hoelzler, M., McCharthy, T., Schwartz, P., & Adams, C. (2016). A prospective, randomized, masked, and placebo-controlled efficacy study of intraarticular allogeneic adipose stem cells for the treatment of osteoarthritis in dogs. *Frontiers in Veterinary Science*, 3, 81.  
DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2016.00081>
- Hill, E.K., & Li, J. (2017). Current and future prospects for nanotechnology in animal production. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8(1), 1-13.  
DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0157-5>
- Hosny, A., Parmar, C., Quackenbush, J., Schwartz, L.H., & Aerts, H.J. (2018). Artificial intelligence in radiology. *Nature Reviews Cancer*, 18(8), 500-510.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41568-018-0016-5>
- Huang, S., Hong, X., Zhao, M., Liu, N., Liu, H., Zhao, J., Shao, L., Xue, W., Zhang, H., Zhu, P., & Guo, R. (2022). Nanocomposite hydrogels for biomedical applications. *Bioengineering & Translational Medicine*, 7(3), e10315. DOI: <https://doi.org/10.1002/btm2.10315>

- Jafary, F., Motamedi, S., & Karimi, I. (2023). Veterinary nanomedicine: Pros and cons. *Veterinary Medicine and Science*, 9(1), 494-506.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/vms3.1050>
- Kaplan, A., & Haenlein, M. (2019). Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons*, 62(1), 15-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.08.004>
- Kapoor, K. (2024). 3D visualization and printing: An “Anatomical Engineering” trend revealing underlying morphology via innovation and reconstruction towards future of veterinary anatomy. *Anatomical Science International*, 99(2), 159-182.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12565-023-00755-1>
- Karnwal, A., Jassim, A.Y., Mohammed, A.A., Sharma, V., Al-Tawaha, A.R.M.S., & Sivanesan, I. (2024). Nanotechnology for healthcare: plant-derived nanoparticles in disease treatment and regenerative medicine. *Pharmaceuticals*, 17(12), 1711.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/ph17121711>
- Khan, M., Ferdaus, J., Akter, K., Ahmed, H., Parvin, M., Kashif, S., & Arbab, A.S. (2025). A comprehensive review of cancer drug nanoparticles synthesis, processing technology and its effect in drug delivery. *Biomedical Technology*, 10, 100085.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bmt.2025.100085>
- Kim, J., Koo, B.K., & Knoblich, J.A. (2020). Human organoids: model systems for human biology and medicine. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 21(10), 571-584.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41580-020-0259-3>
- Leary, D., & Basran, P. S. (2022). The role of artificial intelligence in veterinary radiation oncology. *Veterinary Radiology & Ultrasound*, 63, 903-912.  
DOI: <https://doi.org/10.1111/vru.13162>
- Leonardi, F., Simonazzi, B., Martini, F.M., D'Angelo, P., Foresti, R., & Botti, M. (2024). Synthetic and natural biomaterials in veterinary medicine and ophthalmology: a review of clinical cases and experimental studies. *Veterinary Sciences*, 11(8), 368.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci11080368>
- Marx, C., Silveira, M.D., & Beyer Nardi, N. (2015). Adipose-derived stem cells in veterinary medicine: characterization and therapeutic applications. *Stem Cells and Development*, 24(7), 803-813. DOI: <https://doi.org/10.1089/scd.2014.0407>
- Nantavisai, S., Egusa, H., Osathanon, T., & Sawangmake, C. (2019). Mesenchymal stem cell-based bone tissue engineering for veterinary practice. *Heliyon*, 5(11), 1-7.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02808>
- Neethirajan, S. (2020). Transforming the adaptation physiology of farm animals through sensors. *Animals*, 10(9), 1512.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10091512>
- Ouyang, Z., Sargeant, J., Thomas, A., Wycherley, K., Ma, R., Esmailbeigi, R., Versluis, A., Stacey, D., Stone, E., Poljak, Z., & Bernardo, T.M. (2019). A scoping review of ‘big data’, ‘informatics’, and ‘bioinformatics’ in the animal health and veterinary medical literature. *Animal Health Research Reviews*, 20(1), 1-18.  
DOI: <https://doi.org/10.1017/S1466252319000136>

- Pawlik, M., Trębacz, P., Barteczko, A., Kurkowska, A., Piątek, A., Paszenda, Z., & Basiaga, M. (2025). Evaluation of patellar groove prostheses in veterinary medicine: review of technological advances, technical aspects, and quality standards. *Materials*, 18(7), 1652. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18071652>
- Popov Jr, V.V., Muller-Kamskii, G., Katz-Demyanetz, A., Kovalevsky, A., Usov, S., Trofimcow, D., Dzhenzhera, G., & Koptyug, A. (2019). Additive manufacturing to veterinary practice: Recovery of bony defects after the osteosarcoma resection in canines. *Biomedical Engineering Letters*, 9(1), 97-108. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13534-018-00092-7>
- Roszkowski, S., & Durczynska, Z. (2025). Advantages and limitations of nanostructures for biomedical applications. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 34(3), 447-456. DOI: <https://doi.org/10.17219/acem/186846>
- Sathiyavimal, S., Vasantharaj, S., LewisOscar, F., Selvaraj, R., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2020). Natural organic and inorganic–hydroxyapatite biopolymer composite for biomedical applications. *Progress in Organic Coatings*, 147, 105858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105858>
- Sell, M., Lopes, A.R., Escudeiro, M., Esteves, B., Monteiro, A.R., Trindade, T., & Cruz-Lopes, L. (2023). Application of nanoparticles in cancer treatment: a concise review. *Nanomaterials*, 13(21), 2887. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13212887>
- Sher, E.K., Alebić, M., Boras, M.M., Boškailo, E., Farhat, E.K., Karahmet, A., Pavlović, B., Sher, F., & Lekić, L. (2024). Nanotechnology in medicine revolutionizing drug delivery for cancer and viral infection treatments. *International Journal of Pharmaceutics*, 660, 124345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124345>
- Souza, P.R., de Oliveira, A.C., Vilsinski, B.H., Kipper, M.J., & Martins, A.F. (2021). Polysaccharide-based materials created by physical processes: from preparation to biomedical applications. *Pharmaceutics*, 13(5), 621. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13050621>
- Tran, S., DeGiovanni, P.J., Piel, B., & Rai, P. (2017). Cancer nanomedicine: a review of recent success in drug delivery. *Clinical and Translational Medicine*, 6(1), 44. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40169-017-0175-0>
- Vilar, J.M., Batista, M., Morales, M., Santana, A., Cuervo, B., Rubio, M., Cugat, R., Sopena, J., & Carrillo, J.M. (2014). Assessment of the effect of intraarticular injection of autologous adipose-derived mesenchymal stem cells in osteoarthritic dogs using a double blinded force platform analysis. *BMC Veterinary Research*, 10(1), 143. DOI: <https://doi.org/10.1186/1746-6148-10-143>
- Villatoro, A.J., Martín-Astorga, M.D.C., Alcoholado, C., Sánchez-Martín, M.D.M., & Becerra, J. (2021). Proteomic analysis of the secretome and exosomes of feline adipose-derived mesenchymal stem cells. *Animals*, 11(2), 295. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11020295>
- Youssef, F.S., El-Banna, H.A., Elzorba, H.Y., & Galal, A.M. (2019). Application of some nanoparticles in the field of veterinary medicine. *International Journal of Veterinary Science and Medicine*, 7(1), 78-93. DOI: <https://doi.org/10.1080/23144599.2019.1691379>
- Zare, M., Bigham, A., Zare, M., Luo, H., Rezvani Ghomi, E., & Ramakrishna, S. (2021). pHEMA: An overview for biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(12), 6376. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22126376>