



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

# DÖRT BACAĞI KEŞİF ROBOTUNUN PROTOTİP TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI

PROTOTYPE DESIGN AND MANUFACTURING OF A  
FOUR-LEGGED EXPLORATION ROBOT WITH A  
THREE-DIMENSIONAL (3D) PRINTER

Yazarlar (Authors): Alper Kadir TANYILDIZI 

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Tanyıldızı K. A., “Dört Bacaklı Keşif Robotunun Prototip Tasarımı ve Üç Boyutlu (3B) Yazıcı ile İmalatı” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(2): 233-242, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1277891

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# DÖRT BACAKLI KEŞİF ROBOTUNUN PROTOTİP TASARIMI VE ÜÇ BOYUTLU (3B) YAZICI İLE İMALATI

Alper Kadir TANYILDIZI <sup>a\*</sup> 

<sup>a</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [atanyildizi@firat.edu.tr](mailto:atanyildizi@firat.edu.tr)

(Received: 05.04.23; Revised: 19.07.23; Accepted: 12.08.23)

## ÖZ

Dört bacaklı robotlar, çeviklik, dengeli hareket ve farklı zorlu arazi şartlarına uyum sağlama yetenekleri nedeni ile keşif, arama kurtarma, tarım, inşaat ve askeri alanlarda büyük ilgi görmektedir. Ayaklı robotlara her alandan uzmanın ilgisi artarken, araştırmacılar uygun maliyetli ve yüksek manevra yetenekli robotlar geliştirmek adına çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu çalışma, dört bacaklı bir 12 serbestlik dereceli bir robotun tasarımı, 3 boyutlu yazıcıda üretilmesi ve ileri kinematik analizine ait detaylar sunulmuştur. Robotun üç boyutlu modeli SolidWorks programında modellenmiş ve sonrasında parça modelleri 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak PLA malzemeden imal edilmiştir. Robotun her bir bacağı üç serbestlik dereceli olup, aktuatör olarak DC servo motorlar kullanılmıştır. Robotun denge ve yörünge kontrol yazılımları Arduino Mega gömülü sistem kartı üzerinde geliştirilmiştir. Robot uzaktan kumanda edilmektedir ve üzerinde yer alan RGB kamera sayesinde çevresel algılama da yapabilmektedir. Bu çalışmanın, düşük bütçeli ve kolayca imal edilebilir dört ayaklı bir robota ihtiyaç duyan araştırmacılara yol göstermesi açısından akademik çalışmalara katkıda bulunması hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dört Bacaklı Robot, Robot Kinematığı, Üç Boyutlu (3B) Yazıcı, Keşif Robotu.

## PROTOTYPE DESIGN AND MANUFACTURING OF A FOUR-LEGGED EXPLORATION ROBOT WITH A THREE-DIMENSIONAL (3D) PRINTER

### ABSTRACT

Four-legged robots have gained significant interest in fields such as exploration, search and rescue, agriculture, construction, and the military due to their agility, balanced movement, and adaptability to various challenging terrains. As person from different domains show increasing interest in legged robots, researchers continue their efforts to develop cost-effective and highly maneuverable robotic systems. This study presents the details of the design, 3D printing, and advanced kinematic analysis of a twelve-degree-of-freedom quadruped robot. The three-dimensional model of the robot was created using the SolidWorks program, and its component parts were 3D printed using PLA material. Each leg of the robot has three degrees of freedom, utilizing DC servo motors as actuators. The robot's balance and trajectory control software were developed on an Arduino Mega embedded system board. The robot can be controlled remotely and is equipped with an RGB camera for environmental perception. The aim of this study is to contribute to academic research by providing guidance to researchers in need of a low-budget and easily manufacturable four-legged robot.

**Keywords:** Quadruped Robot, Robot Kinematics, 3D Printer, Exploration Robot.

### 1. GİRİŞ

Bacaklı robotlar engebeli arazide hareket etmek için en iyi seçenek olarak görülmektedir.

Bacaklı robotlar, zorlu arazi koşullarında tekerlekli veya paletli araçlara göre; yüksek hız, hareketlilik, zemin düzensizliklerinde uyum

gibi önemli avantaja sahiptirler. Özellikle de son yıllarda batarya ve küçük ebatlı yüksek torklu motor teknolojilerinin gelişmesi ile quadruped robotlardaki gelişim hızlanmıştır [1]. Kanz ve ark. [2] tasarladıkları dört ayaklı robot, küçük ve ucuz olmasına karşın oldukça güçlü ve sağlam bir robottur. Robotun boyu 0,3 m ve ağırlığı 9 kg'dır. Robot saniyede 2,45 metreye varan hızlarda süratli koşu, zıplama hareketlerini yapabilmektedir ve ters takla atabilmektedir.

Sombolestan ve ark. [3] 12 kg ağırlığında Unitree A1 isiminde dört ayaklı bir robot geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri robot için yeni bir uyarlanabilir kuvvet tabanlı kontrol yöntemi sunmuşlardır. Yöntemlerinin başarısını hem benzetim hem de donanım deneyleri ile göstermişlerdir. Robot ağırlığının yarısı kadar yükleri engelleyen arazide dahi taşıyabilmektedir. Ayrıca robot önerdikleri kontrolör yöntemi ile 5 cm'den daha az izleme hatasıyla, 11 kg'a kadar yükleri taşıyabilmektedir.

Cardenas [4] ve ark. düşük maliyetli bir dört ayaklı robotun tasarımını ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Bu robot, ROS (Robot Operating System) çerçevesi kullanan açık kaynaklı, düşük maliyetli, dört ayaklı bir tasarıma sahiptir. Simülasyon ve testlerle robotun doğal hareket görevlerini başarıyla yerine getirdiği gösterilmiştir.

Boney ve ark [5] araştırmacıların kolayca üretebilmeleri için düşük maliyetli açık kaynak bir ant robot geliştirmiştir. Robotun malzeme maliyeti yalnızca 410 USD ve bir saatten daha kısa sürede monte edilebilir. Robotun kontrolü ise takviyeli öğrenme yöntemi ile sağlanmaktadır.

Sun ve ark. [6] açık kaynaklı, küçük boyutlu, yeniden yapılandırılabilir olan Lilibot adlı dört ayaklı robotun tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Modüler yapısı sayesinde her yönde esnek hareket yapabilmektedir. Robotun kontrolü için uyarlanabilir sinir denetleyicisi tasarlamışlardır.

Kau ve ark. [7] dinamik hareket kabiliyetine sahip yarı doğrudan tahrikli Stanford Doggo isimli dört ayaklı bir robot geliştirmişlerdir. Robotun donanım ve yazılımı açık kaynaklıdır, üretim ve montaj için yalnızca el aletleri gerektirir ve maliyeti 3000 USD'dan düşüktür.

Grimminger ve ark. [8] düşük maliyetli, basit yapılı ve tork kontrollü ayaklı robot tasarımı önermişlerdir. Robot 2.2. kg olup, geniş bir hareket aralığına sahiptir. Robotta ayrıca sekiz özdeş aktüatör modülü ve ayak temas sensörleri mevcuttur. Robot, plastik 3D baskı ile üretilmiştir.

Kim ve ark.[9] on iki serbestlik dereceli, üzerinde derinlik sensörü ve GPU da yeni bir açık kaynaklı dinamik dört ayaklı robot PADWQ isimli platformu geliştirmişlerdir. PADWQ tamamen kullanıma hazır bileşenlerden ve standart 3D yazıcıdan imal edilmiş yapısal parçalardan üretilmiştir. Robotun uygun fiyatlı ve araştırmacıların çalışmalarına hızlı ve kolay bir şekilde adapte edilebilir olduğunu vurgulamışlardır.

Gu Yuping ve ark. [10] dört kol mekanizması ile çalışan dört bacaklı bir robot tasarlamışlardır. Her bir bacak iki serbestlik dereceli olup servo aktüatörler ile hareket ettirilmektedir. Robotun uzuvlar 3D baskı yoluyla üretilmiş ve bacak parametrelerini manipüle edilebilirlik ve kuvvet iletimini analiz ederek optimize etmişlerdir.

Wing Lu ve ark. [11] iki serbestlik dereceli hafif ve modüler paralel mekanizmalı dört ayaklı bir robot tasarlamışlardır. Robotun prototipinin 3D teknolojisi ile yapmışlardır. Robotun bacak ağırlığını azaltmak ve aktarım hassasiyetini artırmak için, tahrik mekanizmasını yatay yerleştirmişlerdir. Eklem aktüatörü olarak MG90 servo motorlar kullanmışlardır. Robot tırıs, ayakta durma, kalkış ve yürüme koşullarının hepsini sağlamaktadır. Robotta kontrol modülü olarak STM32 bulunmaktadır. Robotu wireless modülü ile uzaktan kontrol edebilmektedirler.

Tsvetkov ve ark. [12] kabuklu yengeçlerden ve gorillerin mafsallı yürüteç ön ayaklarından esinlenilerek ön iki bacağa monteli manipülatörle donatılmış küçük ölçekli dört ayaklı bir robot tasarlamışlardır. Robotun her bir bacak üç serbestlik derecelidir. Robot 3D teknolojisi ile imal edilmiş olup toplam ağırlığı 1408.8 gr dır.

Dhananjaya ve ark. [13] 3D teknoloji ile üretilmiş ve dokunsal algılama sensörleri ile donatılmış ayaklara sahip DogTouch isimli dört bacaklı robot geliştirmişlerdir. Robot üzerinde

yer alan sensörlerden alınan veriler ile geliştirilen evrişimli sinir ağı sayesinde farklı yüzey dokularının tanınması sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerdikleri modelin %74,37'lik bir doğrulukla yüzey tespiti yapabildiğini göstermektedir.

Weerakkodi ve ark. [14] HyperDog isminde tamamen 3D baskılı parçalardan ve karbon fiberden dört ayaklı bir robotik köpek tasarlamış ve üretmişlerdir. Robot 12 RC servo motor, bire adet NVIDIA Jetson nano ve STM32F4 geliştirme kartı içermekte olup açık kaynaklı bir platformdur. Robotun ROS ortamında dayalı olarak hareket kontrol yazılımları ve simülasyonunu da geliştirilmişlerdir.

Rahme ve ark. [15] hobi servoları ve yerleşik bir mikroişlemci ile donatılmış açık kaynaklı 3D baskılı teknolojisi ile OpenQuadruped isimli robotu üretilmiş ve farklı yüzey koşullarında yürüme analizine dair sonuçları sunmuşlardır.

Rahman ve ark. [16] eğitim ve güvenlik amacı ile düşük maliyetli Iron Dog Mini dört ayaklı robotunu tasarlamışlardır. Robotun maliyetini düşük ve bakımını basit tutmak için dört ayaklı robotlarını modüler formda tasarlamışlardır. Robotun bacaklarını altı kol mekanizması ile tasarlamışlardır. Bacağın hafif olması için aktuatorler gövde içine yerleştirilmiş ve bu mekanizma ile eklemlere güç aktarımı sağlanmıştır. Robotlarının kinematik analizini ve yürüme simülasyon sonuçlarını sunmuşlar ve prototip robotun sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Sun ve ark. [17] robotik bacakların verimli tasarımını elde etmek, bacağın yapısal rijitliği ile eğilme esnekliğini dengelemek için için topoloji optimizasyonuna dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Ayrıca, robotun 3D yazıcı teknolojisi ile prototipini üretmiş ve test sonuçlarını da sunmuşlardır. Robotun kararlı ve sürekli düz çizgi yürüme hareketlerini başarıyla gerçekleştirebildiğini göstermişlerdir.

Zhang ve ark. [18] son derece düşük maliyetli dört ayaklı bir robotun tasarımını yapmış ve prototipini üretmişlerdir. Tasarladıkları robot

için özel itici kuvvet aktarım mekanizması tasarımı yapmış, 3D baskı teknolojisi ile bu bileşenleri imal etmiş ve sonlu elemanlar analizi (FEA) ile de parçaların dayanım test sonuçlarını analiz etmişlerdir.

Bu çalışmada, standart 3B yazıcı ile PLA malzeme yapısındaki parçalardan oluşturulmuş açık kaynaklı, dinamik dört ayaklı bir robot platformuna ait detaylar sunulmuştur. Robotun kinematik denklemleri de sunularak her bir bacak ekleminin açısal hareket sınırları belirlenmiştir. Makalenin organizasyon planı ise Bölüm 2'de aktuatör ve malzeme seçimi, üç boyutlu tasarım kinematik modelleme ve imalata ait detaylar yer almaktadır. Bölüm 3'de robotun hareket analizine ait görseller ve veriler sunulmuştur. Son olarak, Bölüm 4'de tasarımın var olan açık kaynak robotlar ile özellik karşılaştırması ve gelecek çalışma planı tartışılmıştır.

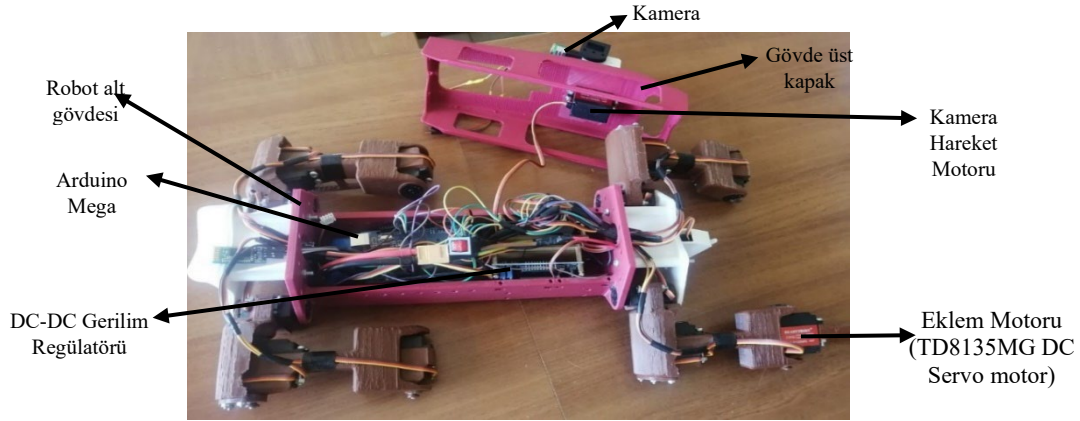
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında dört bacaklı keşif robotunun tasarımını yapabilmek için öncelikle robotun eklem hareketleri için uygun tahrik sisteminin, güç kaynağının ve uygun elektronik donanımların seçiminin yapılması gerekmektedir.

### 2.1. Malzeme Seçimi

Eklem bacaklı robotik sistemlerde eklem tahrik motorlarının ve elektronik donanımların seçimi yapılırken uygulanacak imalat yönteminin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada mekanik parçalarının imalatının üç boyutlu (3D) yazıcı ile PLA malzemeden imal edilmesi planlanmıştır. Çalışmada temel amaç hızlı ve yüke dayanıklı esnek bacak hareketlerine sahip, tasarım amacı olan keşif görevini yaparken kararlı dinamik hareketler gerçekleştirebilecek bir dört bacaklı robotun prototip uygulamasını gerçekleştirmektir.

Dört bacaklı robot çalışmaları incelendiğinde, belirli bir yürüme örüntüsünü gerçekleştirirken bacak eklem frekanslarının 1-2,9 Hz aralığında olduğu görülmüştür [19-20]. Sistemdeki tüm eklemlerin hızları bu frekans aralığına göre



Şekil 1. Robotun montaj esnasında görüntüleri

belirlenebilirse dört bacaklı robotun kararlı dinamik hareketi gerçekleştirilmesi sağlanmış olacaktır. Bu çalışmadaki dört bacaklı robot prototipinde eklem frekansının yaklaşık 2 Hz olması hedeflenmiştir.

Prototip tasarımına uygun fiziksel parametreleri, yüksek tork, seri ve esnek hareket kabiliyeti, dahili motor sürücü, konum geri bildirim gibi belirleyici avantajlarından dolayı eklemlerin hareketi için TD8135MG DC Servo Motor kullanılması uygun görülmüştür.

Çizelge 1. TD8135MG DC Servo Motor teknik özellikleri

Parametre	Değer
Ağırlık	56 gr
Dişli Tipi	Metal
Sınır Açısı	270°
Çalışma Gerilimi	4,8-7,2 V
Tutma Torku	32,7-35,2 kg.cm
Çalışma Akımı	2,6-3,4 A
Çalışma Hızı (180° açığı süpürme hızı)	0,5-2,5 ms
Boyut	40 x 20,5 x 40,5 mm

Çizelge 1’de TD8135MG DC servo motorun teknik özelliklerine bakıldığında motorun 180°’lik açığı tarama hızının max. 2,5 ms olduğu görülmektedir. Belirli bir yürüme örüntüsünde eklemlerin hareket periyodu, eklemin hedef açısal konuma gidiş ve dönüş hareketinin toplam süresi olarak hesaplanır. Bacak eklemlerindeki en büyük açısal hareket aralığı 135° olarak öngörülmüştür. Buna rağmen eklemlerin 180°’lik açısal hareketi yapabildiği varsayıldığında servo motor 1 cycle hızı yaklaşık 5 ms’ e kadar tüm hareketleri yapabilecektir. Bu çalışmadaki dört bacaklı keşif robotunun eklem hareketi yaklaşık 2 Hz

olduğu daha önce belirtilmiştir. Dolayısıyla robotun eklemlerinin 1 cycle hızı  $0,5 \text{ s} = 500 \text{ ms}$  olacaktır. Bu doğrultuda etiket değerlerindeki sayısal veriler analiz edildiğinde TD8135MG DC servo motorun dört bacaklı keşif robotuna kararlı, esnek ve hızlı hareket kabiliyeti kazandıracığı öngörülmüştür.

Kullanım kolaylığı, çok sayıda dijital ve analog giriş/çıkış pini, kolay programlanabilirliği gibi özelliklerinden dolayı gömülü elektronik sistem kartı olarak Arduino Mega 2560 kullanılmıştır. Dört bacaklı robotun keşif yapabilmesi için ihtiyacı olan çevresel algılama birimi olarak OV7670 kamera seçilmiştir.

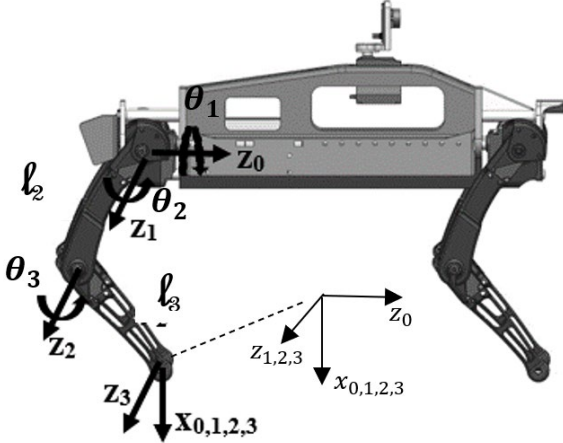
12 serbestlik dereceli dört bacaklı keşif robotunun güç kaynağı olarak Li-Po bataryalar tercih edilmiştir. Her bir eklem için motorların çekeceği ortalama akım değerleri dikkate alınarak sistemin çekeceği toplam akım değerine göre mevcut imkânlar doğrultusunda 11,1 V 5200 mAh kapasiteli Li-Po batarya kullanılması uygun görülmüştür. Çizelge 1’de eklem tahrik motorlarının çalışma akım değerleri göz önünde bulundurulduğunda tercih edilen Li-Po bataryanın 25C kapasitesinden dolayı enerji ihtiyacını karşılayacağı öngörülmüştür. Ancak tahrik motorlarının, gömülü sistem kartının, kamera ve diğer elektronik donanımların çalışma gerilimleri farklı olduğundan ön ve arka bacakların eklemleri için 2 adet ZK-12KX 12A akım kapasiteli DC-DC gerilim regülatörü kullanılmıştır.

## 2.2. Kinematik Analiz

Robotik sistemlerde kinematik analiz, ileri ve ters kinematik analiz olarak ele alınmaktadır. İleri kinematik, robotun uç işlevcisinin

pozisyon ve oryantasyonunun hesaplanması [21], ters kinematik ise robotun uç işlevcisinin yönelim ve pozisyonu bilindiğinde eklem açısall konumlarının belirlenmesidir [22-23].

Çalışmada sunulan dört bacaklı robotun tek bacağına kinematik analizi için gerekli olan eksen yerleşimi [24] Şekil 2’de verilmiştir. İleri kinematik analizde Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılmış ve D-H tablosu oluşturularak Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bacak eksen takımı yerleşimi

Çizelge 2. D-H Tablosu

Link No	$\theta$	$d$	$\alpha$	$a$
1	$\theta_1$	0	$90^\circ$	0
2	$\theta_2$	0	0	$l_2$
3	$\theta_3$	0	0	$l_3$

Çizelge 2’deki D-H tablosuna göre her bir bacak ekleminin dönüşüm matrisi ( $A_i$ ) hesaplanmış ve bu matrislerin çarpımıyla tek bir bacağın temel dönüşüm matrisi (2)’deki gibi elde edilmiştir.

$${}^3_0T = A_1A_2A_3 \quad (1)$$

$${}^3_0T = \begin{bmatrix} C_{23}C_1 & -S_{23}C_1 & S_1 & l_2C_1C_2 + l_3C_1C_{23} \\ C_{23}S_1 & -S_{23}S_1 & -C_1 & l_2S_1C_2 + l_3S_1C_{23} \\ S_{23} & C_{23} & 0 & l_2S_2 + l_3S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Denavit-Hartenberg metoduna göre  ${}^3_0T$  temel dönüşüm matrisinin son sütunundaki matematiksel ifadeler robot uç noktasının konumunu vermektedir. İleri kinematik analiz sonucu  $x,y,z$  eksenlerindeki konum ifadeler (3)’te verilmiştir.

$$\begin{aligned} p_x &= l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3), \\ p_y &= l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l_3 \sin \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3), \\ p_z &= l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (3)$$

İleri kinematik analiz ile elde edilen uç noktanın koordinatları kullanılarak ters kinematik analiz gerçekleştirilmiştir.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right), \theta_2 = \arctan\left(\frac{a_z}{a_x \cos \theta_1 + a_y \sin \theta_1}\right)$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \arctan\left(\frac{p_z \cos \theta_2 - p_x \cos \theta_1 \sin \theta_2 + p_y \sin \theta_1 \cos \theta_2}{-l_2 + p_z \sin \theta_2 + p_x \cos \theta_1 \cos \theta_2 + p_y \sin \theta_1 \cos \theta_2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada  $a_{x,y,z}$ , dönüşüm matrisinin vektörlerini ifade etmekte olup [25] ters kinematik analiz sonucunda eklemlerin açı değerlerinin hesaplandığı matematiksel ifadeler (4)’teki gibidir.

### 2.3. Mekanik Tasarım

Dört bacaklı keşif robotu SolidWorks programında tasarlanmıştır. Tüm donanımların yer aldığı ve montajı tamamlanmış dört bacaklı robot yapısı Şekil 3’de verilmiştir.

Tasarlanan robot yapısında her bir bacakta 3 adet döner eklem bulunmaktadır. Kamera sisteminin tek eksenindeki hareketi ile birlikte tüm sistem 13 serbestlik derecedir. Tasarım yapılırken sistem uzuvlarının mümkün oldukça hafif ve mukavemetli özellikle olması hedeflenmiştir. Ayrıca bacak eklem ve uzuv yapılarının esnek hareket kabiliyetine sahip olması, belirlenen yürüme örüntülerine göre hareketini gerçekleştirebilmesi ve mekanik kilitlenmelere yol açmaması göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır.

### 2.4. İmalat ve Montaj

Dört bacaklı robotun mekanik parçalarının imalatı 40 x 40 cm tabla ölçülerine sahip bir 3B yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Robot parçaları PLA malzemeden imal edilmiştir. Üretime ilişkin diğer parametreler Çizelge 3’de özetlenmiştir.

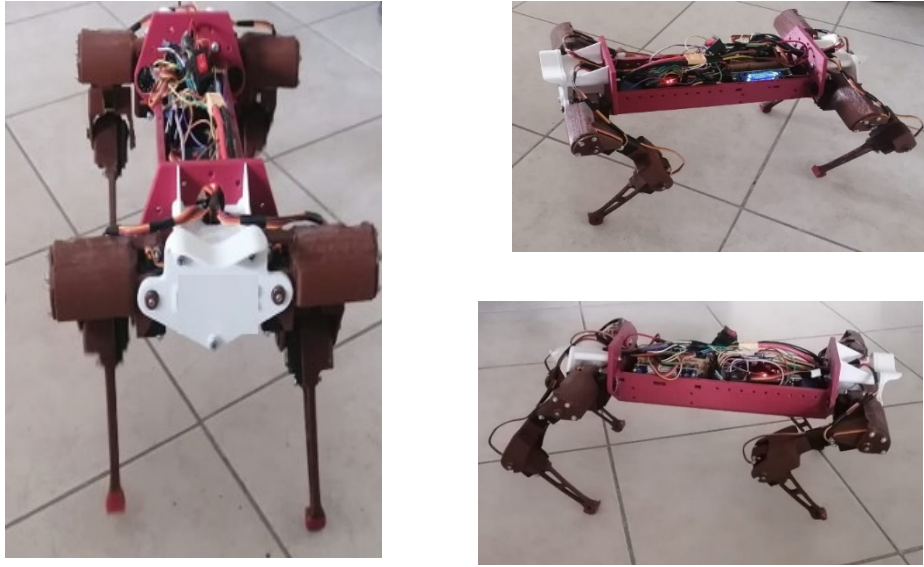
Çizelge 3. Robotun fiziksel boyutları

Nozzle Sıcaklığı	216 °C
Yatak Sıcaklığı	62 °C
Doluluk Oranı	%40
Baskı Hızı	100 mm/s
Desen Tipi	Izgara Tipi
Oryantasyon Açısı	90 derece



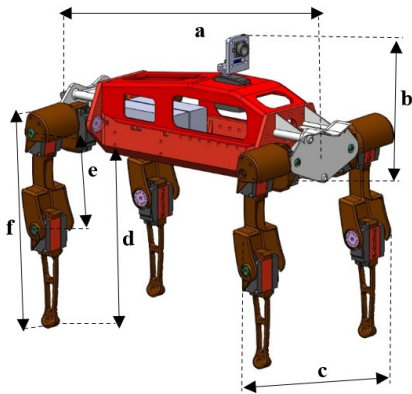


Şekil 3. Dört bacaklı keşif robotu tasarımı



Şekil 4. Dört bacaklı keşif robot montajı

. Şekil 4’de imalatı gerçekleştirilen dört bacaklı keşif robot yapısı görünmektedir. Üretilen tüm mekanik parçaların SolidWorks ortamında yapılan tasarıma uygun olarak gerçekleştirilen montajının ardından tüm donanımlarla birlikte sistemin toplam ağırlığı 2,64 kg olup fiziksel parametre değerleri Şekil 5 ve Çizelge 4’te verilmiştir



Şekil 5. Dört bacaklı keşif robotu fiziksel ölçüleri

Çizelge 4. Robotun fiziksel boyutları

a	380 mm
b	167 mm
c	258 mm
d	216 mm
e	121 mm
f	274 mm

3B yazıcı ile imalat aşamasında robot sistemindeki tüm parçaların ağırlığı ve üretim süreleri Çizelge 5’te görünmektedir.

Çizelge 5. 3B yazdırma sonuçlarının özeti

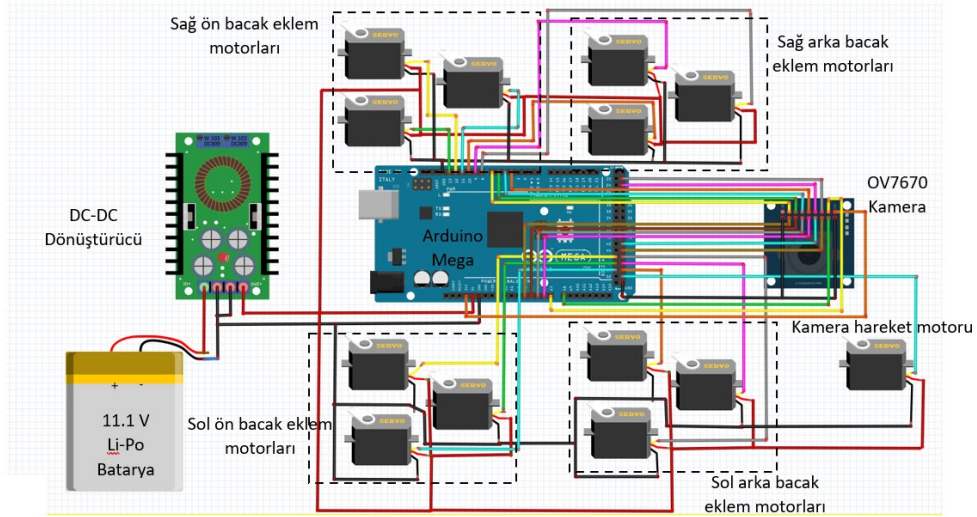
Parça Adı	Ad	Kullanılan Malzeme (g)	Yazdırma Süresi (hr)
Gövde Üst Kapak	1	238	19,6
Gövde Alt Kapak	1	363	28,8
Kamera Aparat	1	8	1,1
Tibia Uzun Sağ	2	24	3,5
Tibia Uzun Sol	2	26	3,6
Femur Uzun Sağ	2	44	7
Femur Uzun Sol	2	44	7

Hip Eklem Sağ	2	45	7,1
Hip Eklem Sol	2	45	7,1
Hip Aparat Sağ	2	3	0,5
Hip Aparat Sol	2	3	0,5
Gövde Ön Parça	1	36	5,2
Gövde Arka Parça	1	35	5,1

### 2.5. Elektronik Devre Şeması

Dört bacaklı robot yapısında kullanılan elektronik donanımların bağlantısı Şekil 9'da gösterilmektedir. Elektronik devre sisteminde

yüksek akım sağlama avantajından dolayı Li-Po batarya kullanılarak sistem donanımlarının bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Kamera hareket motoru ile birlikte toplamda 13 adet servo motorun, DC-DC konvertörün ve kameranın tüm bağlantıları Arduino gömülü sistem kartının uygun pinine bağlanarak elektronik devre şeması Şekil 6'daki gibi oluşturulmuştur.

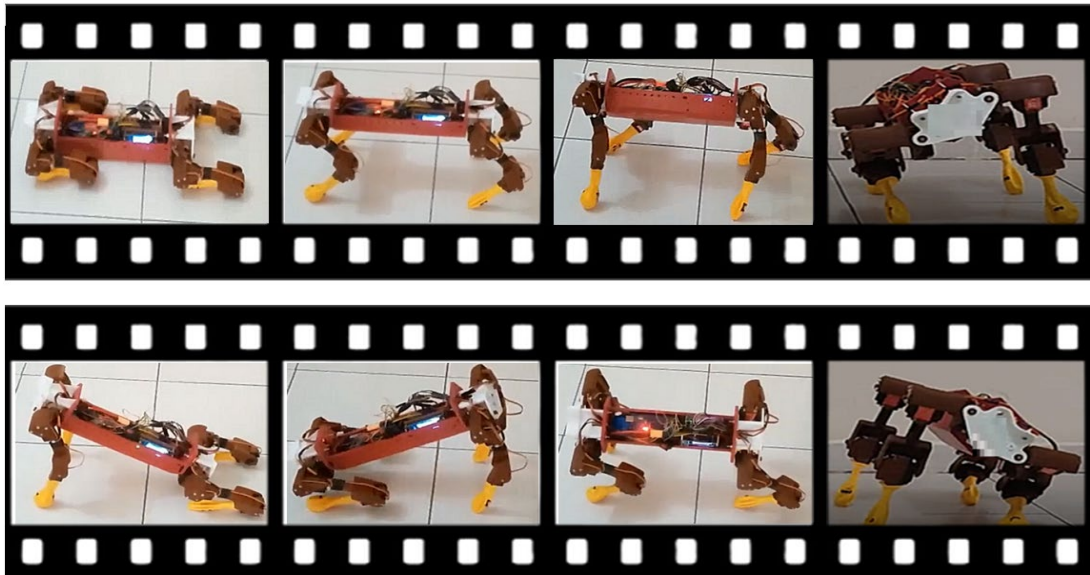


Şekil 6. Robotun elektronik devre şeması

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

İmalatı ve montajı yapılan dört bacaklı keşif robotunun hareket kabiliyetini göstermek amacı ile yatış, yakta duruş, sağa doğru eğilme, sola doğru eğilme, öne ve arkaya doğru eğilme hareketleri ve sabit hızla trot

yürüme hareket testleri yaptırılmıştır. Robotun bu hareketler esnasındaki görselleri Şekil 7'de sunulmuştur. Ayrıca robotun hareketine ilişkin çekilen test videosunun linki teşekkür başlığı içerisinde paylaşılmıştır.



Şekil 7. Dört bacaklı robotun hareketi esnasında çekilmiş videodan örnek görseller



**Çizelge 6. Robotun maliyet dökümü (Malzemelerin Mart 2023 tarihindeki piyasa fiyatları dikkate alınmıştır)**

Malzeme	Birim Fiyat (USD)	Adet	Toplam Fiyat (USD)	Toplam Maliyetteki Payı (%)
Servo Motor	34	13	442	70,50
Arduino Mega	45	1	45	7,18
RGB Kamera	8	1	8	1,27
3B Yazıcı Malzeme	16	1	16	2,55
DC-DC Konvertör	18	2	36	5,74
Li-Po Batarya	77	1	77	12,28
Sarf Malzeme (Cıvata, somun, rulman, Jumper kablo)	3	1 Tk.	3	0,48
<b>GENEL TOPLAM FİYAT (USD):</b>			<b>627</b>	

**Çizelge 7. Mevcut açık kaynak dört bacaklı robotların karşılaştırması**

Robot	Serbestlik Derecesi (DoF)	Gövde Uzunluğu (m)	Bacak Uzunluğu (m)	Toplam Kütle (kg)	Maliyet (USD)	İmalat Yöntemi
Mevcut Çalışmadaki Robot	12+1	0,38	0,274	2,64	627	3B Yazıcı
PADWQ [8]	12	0,42	0,44	12,7	7692	3B Yazıcı
Solo [7]	8	0,42	0,44	2,2	4720	3B Yazıcı
Doggo [6]	8	0,42	0,44	4,8	3000	Lazer Kesim-Karbon/Alüminyum
Iron Dog Mini [16]	12	0.30	0.29	2.572	332.18	3B Yazıcı

Çizelge 6'da robotun imalatında kullanılan malzemelerin Mart 2023 tarihi piyasa fiyatlarına dayalı olarak maliyeti hesaplanmış ve sunulmuştur. Robotun toplam imalat maliyeti 627 USD'dir. Maliyetin büyük bir kısmını motorlar, batarya ve gömülü sistem kartı oluşturmaktadır. 3D baskı sarf malzemeleri (PLA), toplam maliyetin yalnızca %2,55'ini oluşturmaktadır. Çizelge 7'de ise mevcut açık kaynaklı dört bacaklı robotların özellik karşılaştırması sunulmuştur. Bu çalışmada imal edilen robotun maliyeti diğer açık kaynaklı robotlardan (Iron Dog Mini [16] hariç) nispeten daha uygundur. Hareket kabiliyeti olarak da 12 serbestlik dereceli olduğundan Solo ve Doggo'dan çok daha yüksek hareket kabiliyetine sahiptir. Ayrıca en hafif ve ebatsal olarak en küçük robotlar arasında yer aldığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dört bacaklı 12 serbestlik dereceli açık kaynaklı robotun tasarım ve imalat süreci aktarılmıştır. Robotun temel bazı hareketler (yürüme, öne arkaya ve iki yana eğilme) için deneysel testleri yapılmış ve uzun süreli çalışma için dayanıklı ve güvenilir olduğu gösterilmiştir. Dört ayaklı robotumuzun

maliyeti yalnızca 627 USD'dir ve bu, açık kaynak olarak tasarlanmış pek çok dört ayaklı robot platformlarından önemli ölçüde daha düşüktür. Ayrıca mevcut robotlarla karşılaştırıldığında, önerilen robot hafif ve manevra yeteneği de oldukça iyidir. Bu yönü ile sunulan tasarımın araştırmacılara ilham olacağı düşünülmektedir.

Gelecekteki çalışmalar olarak şu anda uzaktan kumanda ile kontrol ettiğimiz robotun, görüntü temelli çevresel algılama yazılımları geliştirilerek otonom hareketinin sağlanması ve keşif görüntülerinin uzak haberleşme ile ana karar birimine aktarımının sağlanması hedeflenmektedir.

#### TEŞEKKÜR

**Finansman:** Bu araştırma için herhangi bir finansman kaynağı bulunmamaktadır. Çalışmanın videosuna <https://youtu.be/JtS-inlSaQY> linkinden ulaşabilirsiniz.

**Çıkar Çatışması:** Alper Kadir Tanyıldızı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**KAYNAKLAR**

1. Biswal, P., Mohanty, P.K., "Development of quadruped walking robots: A review", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 12, Issue 2, Pages 2017-2031, 2021.
2. Katz, B., Carlo, J.D., Kim, S., "Mini Cheetah: A Platform for Pushing the Limits of Dynamic Quadruped Control", In *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Pages 6295–6301, 2019.
3. Chen, Y., Nguyen, Q., "Adaptive Force-based Control for Legged Robots", *arXiv*, arXiv:cs.RO/2011.06236, 2021.
4. García-Cárdenas, F., Soberón, N., Ramos, O.E., Canahuire, R.C., "Low-cost Open-source Semi-Autonomous Quadruped Robot", In *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, Pages 281–286, 2020.
5. Boney, R., Sainio, J., Kaivola, M., Solin, A., Kannala, J., "RealAnt: An Open-Source Low-Cost Quadruped for Research in Real-World Reinforcement Learning", *arXiv*, arXiv:2011.03085, 2020.
6. Sun, T., Xiong, X., Dai, Z., Manoonpong, P., "Small-Sized Reconfigurable Quadruped Robot With Multiple Sensory Feedback for Studying Adaptive and Versatile Behaviors", *Front. Neurorobot*, Vol. 14, 2020.
7. Kau, N., Schultz, A., Ferrante, N., Slade, P., "Stanford Doggo: An Open-Source, Quasi-Direct-Drive Quadruped", In *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Pages 6309–6315, 2019.
8. Grimminger, F., Meduri, A., Khadiv, M., Viereck, J., Wüthrich, M., Naveau, M., Berenz, V., Heim, S., Widmaier, F., Flayols, T., et al., "An Open Torque-Controlled Modular Robot Architecture for Legged Locomotion Research", *IEEE Robot. Automat. Lett.*, Vol. 5, Pages 3650–3657, 2020.
9. Kim, J., Kang, T., Song, D., Yi, S.J., "Design and Control of a Open-Source, Low Cost, 3D Printed Dynamic Quadruped Robot", *Appl. Sci.*, Vol. 11, Pages 3762, 2021.
10. Gu, Y., Feng, S., Guo, Y., Wan, F., Dai, J.S., Pan, J., Song, C., "Overconstrained coaxial design of robotic legs with omni-directional locomotion", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 176, Issue 105018, 2022.
11. Lu, M., Jing, B., Duan, H., Gao, G., "Design of a Small Quadruped Robot with Parallel Legs", *Complexity*, Vol. 2022, Pages 1-11, 2022.
12. Tsvetkov, Y., Ramamoorthy, S., "A Novel Design and Evaluation of a Dactylus-Equipped Quadruped Robot for Mobile Manipulation", *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2022.
13. Mudalige, N.D.W., Nazarova, E., Babataev, I., Kopanev, P., Fedoseev, A., Cabrera, M.A., Tsetserukou, D., "Dogtouch: Cnn-based recognition of surface textures by quadruped robot with high density tactile sensors", In *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring)*, Pages 1-5, 2022.
14. Mudalige, N.D.W., Zhura, I., Babataev, I., Nazarova, E., Fedoseev, A., Tsetserukou, D., "Hyperdog: An open-source quadruped robot platform based on ros2 and micro-ros", In *2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Pages 436-441, 2022.
15. Rahme, M., Abraham, I., Elwin, M.L., Murphey, T.D., "Linear policies are sufficient to enable low-cost quadrupedal robots to traverse rough terrain", In *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Pages 8469-8476, 2021.
16. Rahman, M.H., Alam, S.B., Mou, T.D., Uddin, M.F., Hasan, M., "A Dynamic Approach to Low-Cost Design, Development, and Computational Simulation of a 12DoF Quadruped Robot", *Robotics*, Vol. 12, Issue 28, Pages 1-23, 2023.
17. Sun, Y., Zong, C., Pancheri, F., Chen, T., Lueth, T.C., "Design of topology optimized compliant legs for bio-inspired quadruped robots", *Scientific Reports*, Vol. 13, Issue 4875, Pages 1-11, 2023.
18. Zhang, Y.N., An, M.Q., "Structure and software architecture design of an extremely low-cost quadruped robot for education", In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1931, Issue 1, Pages 012007), 2021.
19. Yan, W., Pan, Y., Che, J., Yu, J., Han, Z., "Whole-body kinematic and dynamic modeling for quadruped robot under different gaits and mechanism topologies", *PeerJ Computer Science*, Vol. 7, Pages 1-21, 2021.
20. Wang, H., Chai, H., Chen, B., Xie, A., Song, R., Su, B., "Flying trot control method for quadruped robot based on trajectory planning", *Journal of Mechatronics*, Pages 1-35, 2022.

21. Zhang, D., Gao, Z., “Forward kinematics, performance analysis and multi-objective optimization of a bio-inspired parallel manipulator”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 28, Pages 484-492, 2012.
22. Nahangi, M., Yeung, J., Haas, C.T., Walbridge, S., West, J., “Automated assembly discrepancy feedback using 3D imaging and forward kinematics”, *Automation in Construction*, Vol. 56, Pages 36-46.
23. Ayyıldız, M., Çetinkaya, K., “Comparison of four different heuristic optimization algorithms for the inverse kinematics solution of a real 4-DOF serial robot manipulator”, *Neural Comput & Applic* Vol. 27, Pages 825–836, 2016.
24. Tatar, A.B., Taşar, B., Yakut, O., “A shooting control application of four-legged robots with a gun turret”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 45, Pages 5191-5206, 2020.
25. Liu, H., Zhou, W., Lai, X., Zhu, S., “An efficient inverse kinematic algorithm for a PUMA560-Structured robot manipulator”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, Pages 1-5, 2013.