

Eklemleri İmalat ile Üretilen 12 Bacaklı Yürüyen Robotun Statik ve Dinamik Analizi

***Makale Bilgisi / Article Info**

Alındı/Received: 16.08.2025

Kabul/Accepted: 11.01.2026

Yayımlandı/Published: 03.06.2026

Static and Dynamic Analysis of a 12-Legged Walking Robot Manufactured Using Additive Manufacturing

Yusuf COŞKUN^{*}, **Zakir KOÇAK**, **Salih ÇALIŞIR**, **Eren AKGÜNGÖR***İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mekatronik Müh. Böl., İstanbul, Türkiye*

© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, Theo Jansen tipi mekanizmaya sahip 12 bacaklı bir yürüyen robot, eklemli imalat ile üretilmiş olup statik, dinamik ve modal analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak detaylı şekilde incelenmiştir. Statik analiz sonucunda maksimum Von-Mises gerilmesi 7.02 MPa, maksimum toplam deformasyon 0.025 mm ve minimum güvenlik katsayısı 12.28 olarak elde edilmiştir. Modal analizde birinci doğal frekans 71.57 Hz olarak bulunmuş, tahrik motorunun çalışma frekansı ile rezonans riski olmadığı görülmüştür. Zamana bağlı analizde bacak mekanizmasının tam adım döngüsü boyunca maksimum gerilme 9.50 MPa seviyesinde gerçekleşmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucunda ana taşıyıcı yapı üzerinde %25 malzeme azaltımı yapılarak maliyetin düşürülmesi sağlanmış olup minimum güvenlik katsayısı 9.07 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar robot tasarımının hem statik hem de dinamik yükler altında güvenli bir çalışma sergilediğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, tasarımın çalışma koşullarında güvenli ve kararlı bir yapısal performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Bacaklı Robotlar; Theo Jansen Mekanizması; Sonlu Elemanlar Analizi; Topoloji Optimizasyonu

Abstract

In this study, a 12-legged walking robot with a Theo Jansen-type mechanism, manufactured using additive manufacturing, was thoroughly analyzed using the Finite Element Method for static, dynamic, and modal analyses. The static analysis yielded a maximum Von-Mises stress of 7.02 MPa, a maximum total deformation of 0.025 mm, and a minimum safety factor of 12.28. The modal analysis found the first natural frequency to be 71.57 Hz, indicating no risk of resonance with the drive motor's operating frequency. In the time-dependent analysis, the maximum stress during the full step cycle of the leg mechanism was 9.50 MPa. Topology optimization resulted in a 25% reduction in material on the main supporting structure, thereby reducing costs, and the minimum safety factor was determined to be 9.07. The results obtained demonstrate that the robot design operates safely under both static and dynamic loads. The findings obtained demonstrate that the design has a safe and stable structural performance under working conditions.

Keywords: Legged Robots; Theo Jansen Mechanism; Finite Element Analysis; Topology Optimization

1. Giriş

Günümüzde robotik sistemler, otomasyon, keşif, taşıma ve afet müdahalesi gibi birçok alanda kritik roller üstlenmektedir. Robotların çevreyle etkileşim biçimleri, görev başarımlarını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu bağlamda, özellikle düzensiz ve karmaşık yüzeylerde hareket etme yeteneği gerektiren uygulamalarda, geleneksel tekerlekli ve paletli yapılar yetersiz kalabilmektedir. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla geliştirilen bacaklı robotlar, doğadaki canlılardan ilham alarak geliştirilmiş ve farklı zemin türlerine uyum sağlayabilme, engel aşabilme ve denge kurabilme gibi avantajlarıyla ön plana çıkmıştır.

Bacaklı robotların evrim sürecinde, mekanik sadeliği ve enerji verimliliği ile dikkat çeken tek ya da düşük serbestlik dereceli yürüme mekanizmaları, alternatif çözümler sunmuştur. Bu tür mekanizmalar arasında özellikle Theo Jansen tipi yürüyüş sistemleri, tek bir dönme hareketiyle

çoklu bacakları senkronize edebilme özellikleri sayesinde hem yapısal basitlik hem de işlevsel yeterlilik bakımından dikkat çekmiş; çeşitli keşif robotları ve araştırma platformlarında ilgi çekici bir çözüm olarak kendine yer bulmuştur.

Robotikte yürüme mekanizmaları, tekerlekli sistemlerin yetersiz kaldığı düzensiz ve karmaşık yüzeylerde etkin hareket kabiliyeti sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Bu mekanizmaların temelleri, ilk olarak mekanik oyuncaklarda kullanılan basit kranklı sistemlere dayansa da, zamanla çok bacaklı robotlar ve insansı robotlara evrilen kompleks yapılar halini almıştır (Todd, 1985). Yürüme mekanizmalarının evriminde, biyomekanik prensiplerin benimsenmesi ve esnek yapısal sistemlerin kullanımı büyük rol oynamış, böylece enerji verimliliği, denge ve çeviklik gibi performans kriterlerinde önemli iyileştirmeler sağlanmıştır (Korenovski ve Progrebnjak 1987, Selvi vd. 2025). Bacaklı robotların mekanik tasarımı,

yalnızca kinematik modelleme ile sınırlı kalmaz; üretilebilirlik, dayanım ve enerji verimliliği gibi mühendislik faktörleri tasarım başarısının temel belirleyicileridir (Silva & Machado, 2012).

Bu noktada eklemeli imalat teknolojileri, bacaklı ve hafif robotik sistemlerde karmaşık geometrilerin hızlı ve düşük maliyetli üretimi, ağırlık optimizasyonu ve fonksiyonel prototipleme imkânı sunarak tasarım sürecine önemli avantajlar sağlamaktadır (Zong vd., 2024; Semini vd., 2015). PLA, ABS ve naylon tabanlı polimerler, eklemeli imalatla üretilen robotik bileşenlerde hafiflik sağlayarak enerji tüketimini azaltmakta ve kütle-atılma (inertia) etkilerini düşürerek daha hassas hareket kontrolüne imkân tanımaktadır (Ong U Jing vd., 2018). Yeni araştırmalar, polimer esaslı malzemelerin hafiflik avantajlarına rağmen metal bileşenlere kıyasla yaklaşık 3 ila 10 kat daha düşük yorulma dayanımı sunduğunu göstermekte; bu durum, eklemeli imalatla üretilen yapısal bileşenlerin çalışma sırasında maruz kalacağı yorulma etkilerinin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Shanmugam vd., 2021; Han vd., 2025; Xue vd., 2023).

Eklemeli imalat ile üretilmiş yapılar, mikro yapı kusurları, yüzey pürüzlülüğü ve yönelime bağlı mekanik özellikler nedeniyle statik analizle tam olarak değerlendirilemez; bu nedenle yorulma, titreşim ve çok eksenli yük altındaki dayanım gibi dinamik analizlerin yapılması, tasarımın uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için zorunludur (Zhang & Xu, 2023; Renzo vd., 2022). Statik analizler, bir bileşenin belirli bir yük altındaki maksimum gerilme, deformasyon ve güvenlik katsayısı gibi temel mühendislik büyüklüklerini ortaya koyarken; dinamik analizler ise sistemin hareket hâlindeyken maruz kaldığı titreşim, ivme, darbeli yükler ve periyodik zorlamaların yapı üzerindeki etkilerini değerlendirerek gerçek çalışma koşullarındaki davranışın daha doğru biçimde öngörülmesini sağlar (Nespoli vd., 2025).

Modal analiz, eklemeli imalatla üretilmiş sistemlerin doğal frekanslarını belirleyerek olası rezonans koşullarının önceden tespit edilmesine ve titreşim kaynaklı hasarların azaltılmasına olanak tanıırken; son yıllarda yapılan çalışmalar, bu yöntemin hem tasarım optimizasyonu hem de uzun ömürlü çalışma koşullarının sağlanması açısından kritik bir araç olduğunu göstermektedir (Annessi vd., 2023; Raza vd., 2024; Boyadzhieva vd., 2024). Çok bacaklı yürüme robotlarında ritmik ve döngüsel hareketlerin oluşturduğu periyodik yükler, eklemlerdeki torkları ve gövde titreşimlerini statik hesaplamaların öngördüğünden çok daha yüksek değerlere taşıyabildiğinden, tasarım sürecinde yalnızca kinematik

uygunluk değil; aynı zamanda yapısal bütünlük, yorulma dayanımı ve dinamik denge de mutlaka dikkate alınmalıdır (Yan vd., 2021; Burkus vd., 2022). Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), eklemeli imalatla üretilmiş robotik bileşenlerde geometrik düzensizliklerin, malzeme anizotropisinin ve karmaşık yük dağılımlarının doğru biçimde modellenebilmesi için en güvenilir analitik yaklaşım olarak kullanılmakta olup; bu yöntem, tasarım doğrulama ve ömür tahmini süreçlerinde vazgeçilmez hale gelmiştir (Silvestru vd., 2023; Sindinger vd., 2021). Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile topoloji optimizasyonunun birlikte kullanılması, kritik gerilme bölgelerinin belirlenmesi, malzeme kullanımının azaltılması ve yapısal verimliliğin artırılması açısından güçlü bir tasarım çerçevesi sunmakta olup; bu bütünlük yaklaşım, eklemeli imalat destekli robotik sistemlerde hem hafiflik hem de dayanıklılığın eşzamanlı olarak sağlanmasında temel bir yöntem hâline gelmiştir (Sha vd., 2020; Batista vd., 2024).

Bu bağlamda, Theo Jansen tipi yürüyüş mekanizmalarının eklemeli imalatla üretilmesi ve yapısal analizlerinin detaylı biçimde incelenmesi, literatürde sınırlı sayıda ele alınmış bir araştırma konusudur. Jansen mekanizmaları, tek bir dönme hareketi ile çoklu bacakların senkronize şekilde hareket etmesini sağlayan özgün bir çubuklar sistemi olduğundan, yapısal yük dağılımı bakımından diğer çok bacaklı mekanizmalara göre farklı özellikler göstermektedir. Krank hareketi süresince bacakların zeminle temas durumları, bağlantı noktalarında değişen kuvvet bileşenleri ve gövdeye aktarılan yüklerin döngüsel karakteri, bu mekanizmanın statik ve dinamik analizlerinin yapılmasını gerekli kılmaktadır. Eklemeli imalatla üretilmiş bir Jansen robot mekanizmasının tüm bu analiz türleri ile değerlendirilmesi ise hem tasarım güvenliği hem de mekanizmanın performansı açısından önemli bir mühendislik çıktısı sunmaktadır.

Bu çalışma, eklemeli imalat ile üretilmiş 12 bacaklı bir Theo Jansen yürüyüş mekanizmasının statik, modal, zamana bağlı dinamik ve katı cisim dinamiği analizlerini içeren kapsamlı bir yapısal değerlendirme sunmaktadır. Ayrıca kritik taşıyıcı bölgeler üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanarak malzeme kullanımının azaltılması ve tasarımın hafifletilmesi hedeflenmiş; optimize edilen yapının yeniden analiz edilmesiyle tasarım iyileştirmelerinin sayısal olarak doğrulanması sağlanmıştır. Böylece çalışma, yürüyen robot mekanizmalarının eklemeli imalat ve sonlu elemanlar yöntemleriyle bütünlük bir bakış açısıyla değerlendirilmesine katkı sunmakta ve konuya ilişkin literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

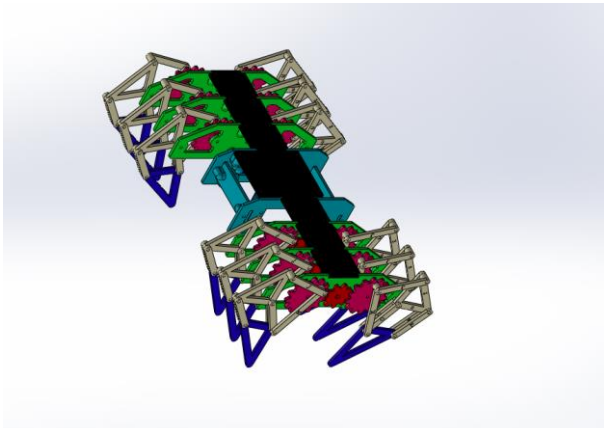
2. Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada geliştirilen 12 bacaklı yürüyen robot hem mekanik stabilize hem de yürüyüş dinamiğinde süreklilik sağlamak amacıyla optimize edilmiştir. Tasarımın doğrulanması sürecinde sırasıyla statik analiz, modal analiz ve zamana bağlı analiz uygulanmıştır.

Statik analiz ile sistem üzerindeki kuvvet etkileri altında meydana gelen gerilme ve deformasyonlar incelenmiş, böylece yapısal bütünlüğün sağlandığı doğrulanmıştır. Rijit dinamik analiz, hareketli parçalar arasındaki kuvvet etkileşimlerini ve mekanizmanın zamanla değişen rijit gövde davranışlarını ortaya koyarak sistemin denge ve yük aktarım karakteristiklerini belirlemeye olanak tanımıştır. Modal analiz, mekanizmanın doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirleyerek olası rezonans risklerinin değerlendirilmesini sağlamıştır. Son olarak zamana bağlı analiz ile sistemin zamana bağlı dinamik tepkisi gözlemlenmiş ve mekanizmanın gerçek çalışma koşullarındaki davranışı modellenmiştir.

Robotun toplam uzunluğu 308 mm, yüksekliği 115 mm ve üst tabla uzunluğu 280 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutlar, Theo Jansen (Strandbeest) mekanizmasının uzunluklarına bağlı kalarak, mekanizmanın kararlılığını sağlayacak uygun gövde-bacak oranını korumak, adım yüksekliği ve adım uzunluğu gereksinimlerini karşılamak amacıyla tasarım iterasyonları sonucunda belirlenmiştir. Bacaklar, her iki yanda üçerli setler halinde gruplanarak toplamda on iki bacaklı bir yürüyüş sistemi oluşturulmuştur. Bu bacaklar, senkronize şekilde çalışan dişli mekanizmaları aracılığıyla tahrik edilmekte ve adım sıralamasında süreklilik sağlamaktadır. Tüm mekanik bileşenler SolidWorks CAD ortamında modellenmiş ve üretim sürecine uygun olacak şekilde üç boyutlu yazıcı teknolojisine göre şekillendirilmiştir. Nihai tasarım ve montaj, Şekil 1’de sunulmaktadır.



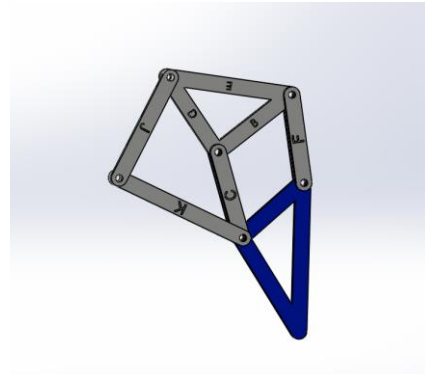
Şekil 1. SolidWorks ortamında tasarlanmış modelin görüntüsü

Mekanizmanın hareketli bağlantı elemanlarını oluşturan bacaklar, Strandbeest mekanizmasının strandartlarıyla ölçülendirilmiş ve ortak bağlantı noktalarında 3.2 mm çapında delikler kullanılmıştır. Bu bağlantı geometrisi, her bir bacak elemanının kinematik uyum içerisinde çalışmasını sağlamaktadır. Bacak elemanlarının temel boyutları Çizelge 1’de ki gibidir.

Çizelge 1. Mekanizmanın uzuv özellikleri

Bacak Elemanı	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
C	46,3	7	3
F	46,4	7	3
J	57	7	3
K	68,9	7	3
B	29,48	7	3
D	28,49	7	3
E	39,64	7	3

Robot mekanizmasına ait tekli bir bacağın montaj konfigürasyonu Şekil 2’de gösterilmektedir. Bacak, birbirine mafsallı bağlantılarla bağlanmış J, K, F, C ve E bağlantı elemanlarından oluşmakta olup, gövdeye sabitlenen üçgen yapı (BDE) ile desteklenmektedir. Tüm bağlantı noktaları 3.2 mm çapında deliklerle birleştirilmiştir. Bu konfigürasyon, klasik Theo Jansen yürüyüş mekanizmasına özgü olarak, dönüş hareketini ileri-geri adım hareketine dönüştürecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2. Bacak uzuvlarının montajlanmış görüntüsü

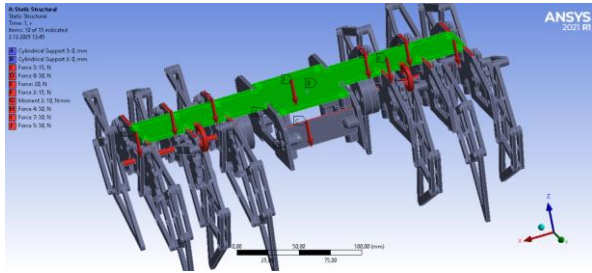
Sonuç olarak, Theo Jansen mekanizmasına dayalı olarak geliştirilen bu yürüyen robot tasarımı, optimize edilmiş boyutsal oranları, çok bacaklı senkron yapısı ve karşılıklı 180° faz farkıyla çalışan kinematik düzeni sayesinde yapısal dengeyi ve hareket kabiliyetini başarıyla sağlamaktadır.

2.2 Metot

2.2.1 Sonlu elemanlar modellenmesi

Analiz kapsamında, sınır şartları mekanizmanın sabitlendiği yüzeylere ve yük uygulanan bölgelere gerçekçi çalışma koşullarını yansıtacak biçimde tanımlanmıştır. Sayısal çözümlerinde doğruluk ve hesaplama süresi arasındaki denge gözetilerek, model

295.937 düğüm ve 132.071 elemandan oluşacak şekilde ağ (mesh) yapılandırmasına tabi tutulmuş olup, bu mesh yoğunluğu yapılan ön çalışmalar sonucu çözüm sonuçlarının ağ bağımsızlığına ulaştığı doğrulandıktan sonra tercih edilmiştir. Uygulanan mesh işlemi, %70 oranında mesh kalitesi sağlayarak hem geometrik detayların yeterli şekilde temsil edilmesini hem de analiz sonuçlarının güvenilirliğini destekleyecek düzeyde bir çözünürlük sunmuştur. Uygulanan sınır şartları, analizde dikkate alınan sabitleme yüzeyleri ve yükleme noktalarının konumlarıyla birlikte Şekil 3'te ayrıntılı biçimde sunulmuş olup, modelin gerçek çalışma koşullarına uygunluğunu göstermek amacıyla görsel olarak desteklenmiştir.



Şekil 3. Robot modeline uygulanan sınır koşulları

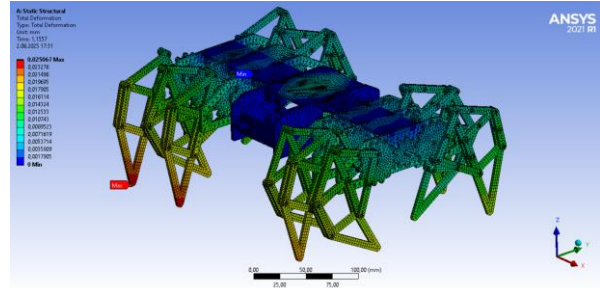
Statik analiz sırasında modelde kullanılan malzeme olarak, yaygın olarak 3B baskı uygulamalarında tercih edilen Polilaktik Asit (PLA) seçilmiştir. Malzemenin mekanik davranışı, analiz sonuçlarının doğruluğunu doğrudan etkilediğinden, PLA'ya ait temel mekanik özellikler Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2. PLA malzemesinin özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Elastik Modül (Young)	3.5	GPa
Poisson Oranı	0.36	-
Akma Dayanımı	60	MPa
Yoğunluk	1.24	g/cm ³
Uzama (Kopmada)	6	%

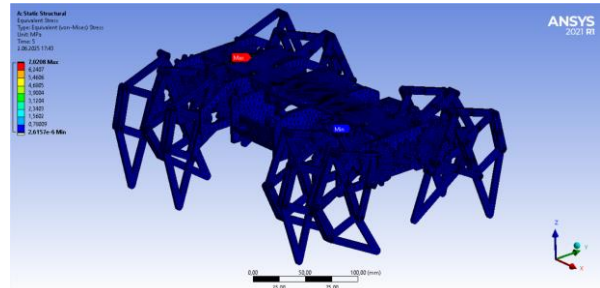
Malzeme özelliklerinin tanımlanmasının ardından gerçekleştirilen statik analiz sonucunda, mekanizmanın çeşitli bölümlerinde oluşan yapısal tepkiler detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, toplam deformasyon dağılımı, gerilme ve birim şekil değiştirme (gerinim) değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, yapının güvenliğini değerlendirmek amacıyla güvenlik katsayısı hesaplanmıştır. Statik analiz sonucunda elde edilen toplam deformasyon değeri 0,025067 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, yapının uygulanan yükler altında maruz kaldığı maksimum yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Analiz sonucuna göre deformasyonun en yüksek olduğu bölgeler, genellikle bacak uçları gibi dış kuvvetlere doğrudan maruz kalan ve rijitliği düşük olan bölgelerde gözlemlenmiştir. Bu değer, yapının genel rijitliğini ve yük altındaki esnekliğini değerlendirmek

açısından önemlidir. Elde edilen deformasyon miktarı, kullanılan PLA malzemesinin elastik sınırları içerisinde kalmakta olup, mekanizmanın fonksiyonelliğini olumsuz etkilemeyecek düzeydedir. Dolayısıyla, tasarımın yapısal bütünlüğü korunmuş ve mekanizma çalışma koşullarında güvenli biçimde işlevini sürdürebilecek düzeydedir. Toplam deformasyon miktarı Şekil 4'te sunulmuştur.



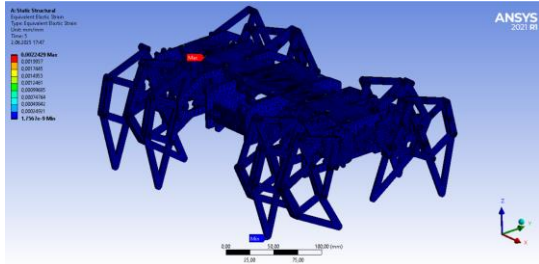
Şekil 4. Statik analiz sonucunda ulaşılan toplam deformasyon

Statik analiz kapsamında değerlendirilen Von-Mises eşdeğer gerilme sonuçlarına göre, modelde meydana gelen maksimum gerilme değeri 7,0208 MPa olarak hesaplanmıştır. Gerilmenin en yüksek olduğu bölgeler, tahrik kuvvetlerinin uygulandığı bağlantı noktaları ve hareketli parçaların birleşim bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Bu durum, robotun mekanik açıdan işlevsel ve dayanıklı bir şekilde tasarlandığını desteklemektedir. Eşdeğer gerilme dağılımı ve kritik bölgeler Şekil 5'te detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 5. Statik analiz sonucunda ulaşılan gerilme miktarı

Yapılan statik analiz kapsamında değerlendirilen eşdeğer elastik gerinim sonuçları, yapının yük altındaki şekil değişimini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, modelde meydana gelen maksimum gerinim değeri 0,0022429 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, malzemenin elastik bölgesinde meydana gelen oransal deformasyonu ifade etmekte olup, mekanizmanın rijitliği ve elastik tepkisi hakkında bilgi vermektedir. Gerinimin en yüksek olduğu noktalar, sistemin kuvvetin yoğunlaştığı bağlantı bölgelerinde ve özellikle hareketli elemanların birleşim noktalarında gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kullanılan PLA malzemesinin elastik sınırları içerisinde kaldığını ve herhangi bir kalıcı deformasyon riski taşımadığını ortaya koymaktadır. Şekil 6'da gerinim sonucu gösterilmiştir.



Şekil 6. Statik analiz sonucunda ulaşılan gerinim miktarı

Güvenlik katsayısı analizi, uygulanan yükler altında malzemenin akma sınırına ne kadar uzak olduğunu belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yapının minimum güvenlik katsayısı 12,278 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, robotun mevcut yükler altında malzeme sınır değerlerinin oldukça altında çalıştığını ve yapının yüksek düzeyde bir güvenliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Maksimum güvenlik katsayısı ise 15 olarak elde edilmiştir. Bu durum, yapının farklı bölgelerinde oldukça düşük gerilmeler oluştuğunu ve genel anlamda yüksek mukavemetle çalıştığını göstermektedir. Analiz sonucunda elde edilen tüm değerler Çizelge 3'te verilmektedir.

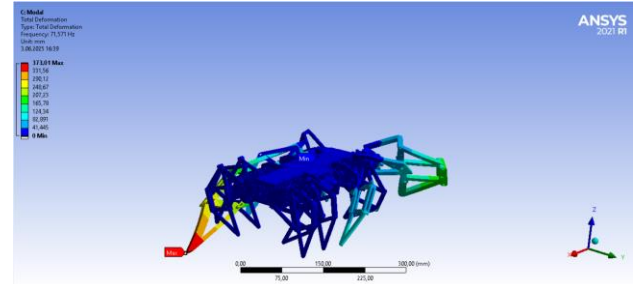
Çizelge 3. Statik analiz sonucunda elde edilen maksimum değerler

Analiz Türü	Değer	Birim
Toplam Deformasyon	0,025067	mm
Von-Mises Gerilme	7,0208	MPa
Eşdeğer Gerinim	0,0022429	mm/mm
Güvenlik Katsayısı	Min: 12,278 – Max: 15	—

Modal analiz, mekanik sistemlerin doğal frekanslarını ve bu frekanslara karşılık gelen titreşim modlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Statik analizde uygulanan civata sabitlemeleri, modal analizde de aynen korunarak sistemin gerçek montaj koşulları altında titreşim karakteristikleri değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, robotun çalışma sırasında karşılaşılabileceği doğal frekanslar belirlenmiş ve toplamda altı adet farklı mod şekli elde edilmiştir. Modal analizde incelenen mod sayısı, motor kaynaklı uyarım frekanslarının en az 2–3 katını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Bu yaklaşım, olası rezonans risklerinin değerlendirilmesi ve sistemin titreşim karakteristiğinin güvenilir biçimde belirlenmesi için yeterli kabul edilmektedir. Modal analiz sonucunda elde edilen ilk doğal frekans değeri Şekil 7'de verildiği gibi 71,571 Hz olarak hesaplanmıştır. Bu moda ait toplam deformasyon dağılımı incelendiğinde, en yüksek yer değiştirme değerinin 373,01 mm ile uçta yer alan bacak segmentinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Minimum deformasyon ise gövde merkezine yakın ve sabitlenen bölgelerde tespit edilmiştir.

Eğer tahrik motorunun çalışma frekansı, yapının herhangi bir doğal frekansına yakın bir değerde bulunursa, sistem

rezonansa girerek istenmeyen titreşim genliklerine ulaşabilir ve bu durum yapısal bozulmalara veya fonksiyonel kararsızlıklara yol açabilir. 1 Hz = 60 RPM olarak düşünüldüğünde bu mod değerinin yapıya zarar verme olasılığı çok düşüktür. Modal analiz kapsamında yapılan analiz için bulunan rezonans değerleri ve deformasyon değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.



Şekil 7. Modal analizin ilk mod değeri

Çizelge 4. Modal analiz sonucunda elde edilen mod değerleri

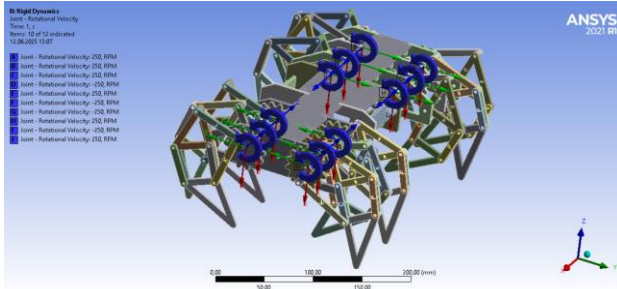
Mod	Frekans [Hz]
1	71,571
2	71,74
3	72,657
4	73,034
5	75,924
6	76,372

Bu bölümde, robotun zamanla değişen yüklemelere ve hareket durumlarına verdiği tepkilerin incelenmesi amacıyla zamana bağlı dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı analiz, robot bileşenlerinin zamana bağlı kuvvet etkileri altındaki mekanik davranışlarını belirlemeye yönelik olup, özellikle ani yük değişimleri veya hareketli bileşenlerin etkisi altında oluşabilecek dinamik deformasyon ve gerilmeleri değerlendirmek için kullanılmıştır.

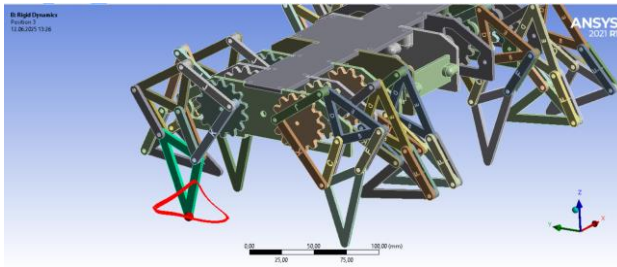
Analiz kapsamında, robotun motor girişi hareketi dönel bir hareket olarak tanımlanmıştır. Mekanizma üzerindeki hareket iletimi, 9 dişli bir küçük çarkın, 14 dişli bir büyük çarkı tahrik etmesiyle sağlanmaktadır. Dişli oranı dikkate alındığında, robot bacağının tam bir adım hareketini gerçekleştirebilmesi için büyük çarkın 360° dönmesi gerekmektedir. Bu dönüşün elde edilebilmesi için, küçük çarkın yaklaşık 360° + 220° döndürülmesi gerekmektedir. Bu oran, motor tarafından uygulanan açısal hareketin, bacak mekanizmasına iletilen hareket miktarını belirlemekte ve analizlerde bu ilişki doğrultusunda hareket tanımlaması yapılmaktadır. Analizin yapılabilmesi için verilen bağlantı noktaları Şekil 8'de gösterilmiştir.

Çarkların dönmesiyle birlikte bacaklardaki hareketin biyel eğrisi elde edilmiştir. Biyel eğrisi bacak elemanlarının boyutuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 9'da hareket sonucunda ki biyel eğrisi gösterilmektedir.

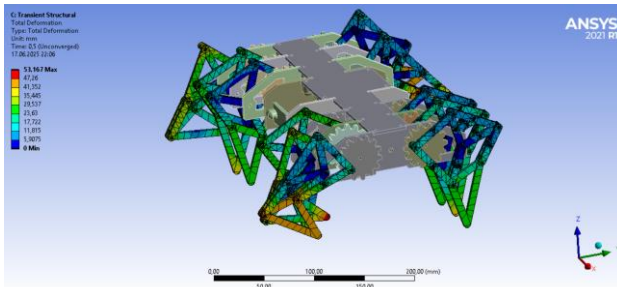
Statik ve modal analizden elde edilen sınır koşulları ve malzeme özellikleri temel alınarak, robotun başlangıç ve çalışma aşamalarında oluşabilecek dinamik deformasyon ve gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Bu sayede, tasarımın yalnızca durağan yükler altında değil, aynı zamanda gerçek çalışma senaryolarında oluşabilecek geçici yüklemelere karşı da yeterli mukavemet ve stabiliteye sahip olduğu doğrulanmıştır. Montajlı modelin tüm bacakları hareket halinde iken oluşturduğu deformasyon Şekil 10'da verilmiştir.



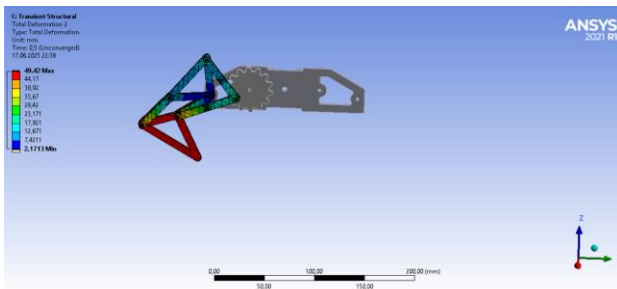
Şekil 8. Robotun hareketi için verilen rotasyon hızları



Şekil 9. Hareket sonucu bacağın son konumunda oluşan biyel eğrisi



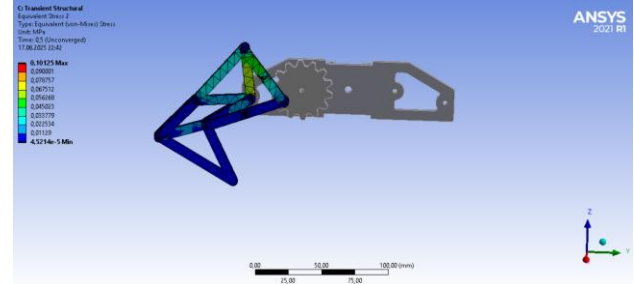
Şekil 10. Bacak elemanlarının hareket halinde iken deformasyonlarının görünümü



Şekil 11. Çarkın dönmesiyle tek bacağın hareketinde ki deformasyon

Tek bacak elemanının, tahrik çarkının 360°'lik tam bir dönüşü sırasında meydana gelen toplam deformasyon miktarı hesaplanmış olup, elde edilen veriler Şekil 11'de gösterilmektedir.

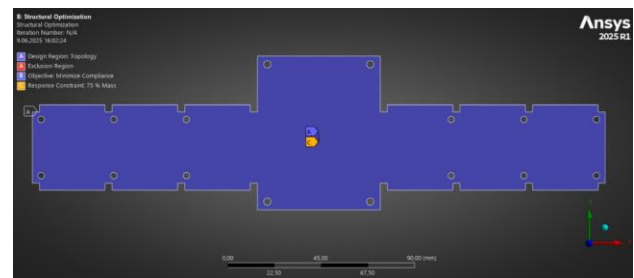
Tek bacak elemanının, tahrik çarkının 360°'lik tam bir dönüş hareketi boyunca maruz kaldığı gerilme dağılımı analiz edilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 12'de sunulmaktadır.



Şekil 12. Çarkın dönmesiyle tek bacağın hareketinde ki gerilme

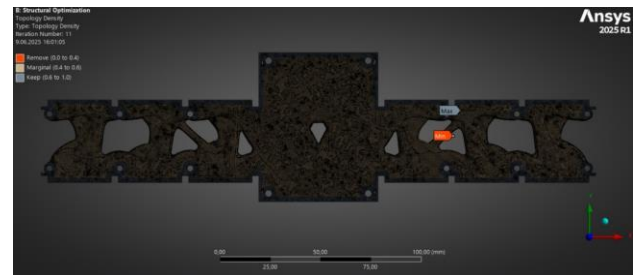
2.2.2 Topoloji optimizasyonu

Bu bölümde, yapısal verimliliği artırmak ve gereksiz malzeme kullanımını azaltmak amacıyla robotun belirli parçaları üzerinde topoloji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon süreci hem ana taşıyıcı tabla hem de bacakların monte edildiği alt tablaya uygulanmış olup, bu sayede yapısal bütünlük korunarak kütle azaltımı hedeflenmiştir. Şekil 13'te ana tablaya optimizasyon için sınır koşulları uygulanmıştır. Bu sınır koşulları; bacakların, motorların ve vidaların oturacağı yerlere dokunmadan geri kalan alanda kütle ve hacim optimizasyonuna olanak sağlamaktadır.

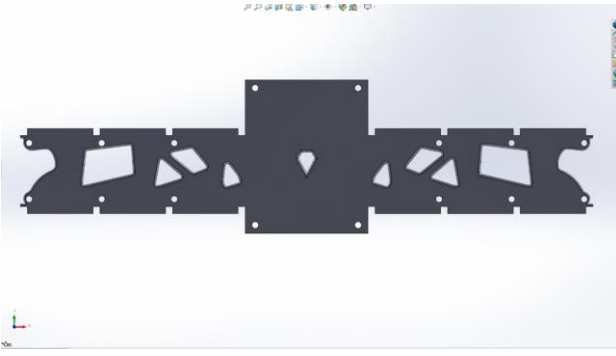


Şekil 13. Ana tablanın sınır koşullarının belirlenmiş hali

Şekil 14'te optimize edilmiş hali ve Şekil 15'te yeniden tasarlanmış hali görüntülenmektedir.



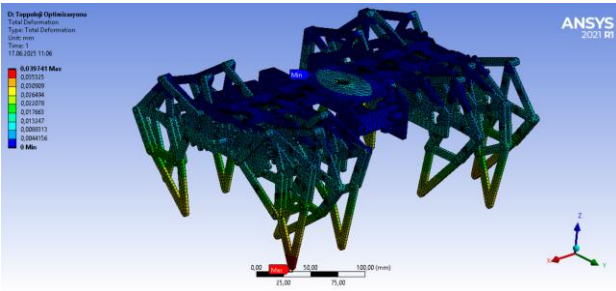
Şekil 14. Optimizasyon sonucu oluşan model



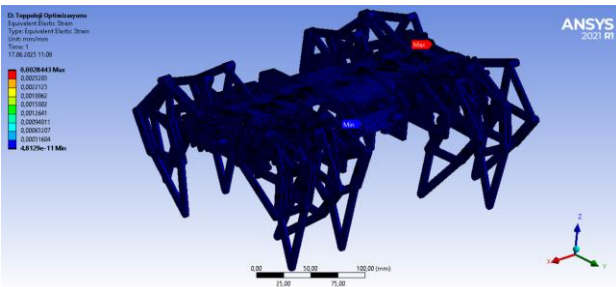
Şekil 15. Optimizasyon sonrası oluşan modelin yeniden tasarlanmış hali

Ana taşıyıcı tabla üzerinde yapılan optimizasyon sonucunda, yaklaşık %25 oranında malzeme azaltımı sağlanmış ve bu sayede aynı dayanım özelliklerini koruyan, daha hafif bir yeni parça tasarımı elde edilmiştir. Aynı şekilde bacakların bağlı bulunduğu tabla üzerinde de optimizasyon yapılmış ve %20 oranında malzeme azaltımı sağlanmıştır.

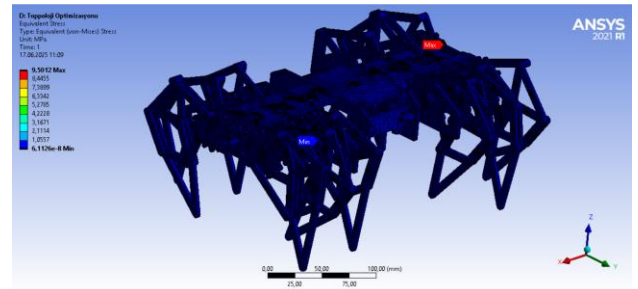
Topoloji optimizasyonu sonrasında, elde edilen yeni parça geometrileri kullanılarak montaj işlemi yeniden gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası yapısal davranışın karşılaştırılabilmesi amacıyla, statik analiz için daha önce tanımlanan sınır şartları aynı şekilde yeni tasarıma uygulanmıştır. Bu doğrultuda, optimize edilmiş tasarımın toplam deformasyon, gerilme ve gerinim değerleri yeniden hesaplanarak, tasarım değişikliğinin yapısal performans üzerindeki etkisi nicel olarak değerlendirilmiştir. Optimizasyon sonrası deformasyon gerinim ve gerilim sonuçları sırasıyla Şekil 16, Şekil 17 ve Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 16. Optimizasyon sonrasında oluşan toplam deformasyon

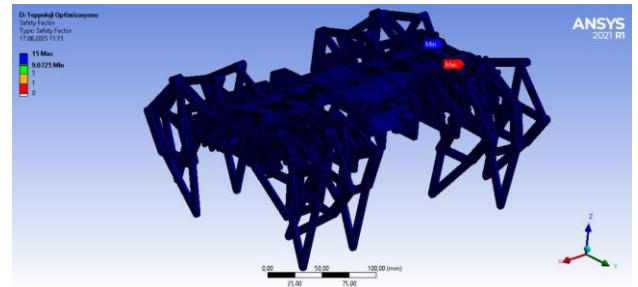


Şekil 17. Optimizasyon sonrasında oluşan gerinim sonucu



Şekil 18. Optimizasyon sonrasında oluşan gerilme sonucu

Topoloji optimizasyonu uygulanmadan önce minimum güvenlik katsayısı 12,278 olarak hesaplanmışken, optimizasyon sonrasında bu değer 9,07 seviyesine gerilemiştir. Bu azalma, parçanın %75 oranında malzeme azaltımıyla daha hafif hale getirilmesine rağmen, mekanizmanın yapısal bütünlüğünün emniyet sınırları içinde kaldığını ve güvenli çalışma koşullarını sağladığını göstermektedir. Topoloji optimizasyonunda hedef, kütlenin minimize edilmesi olup; maksimum gerilme, toplam deformasyon ve minimum güvenlik katsayısı tasarım kısıtları olarak tanımlanmıştır. Optimizasyon sonrası minimum güvenlik katsayısı 12,278’den 9,07’ye düşmüş olsa da bu değer güvenli çalışma sınırları içerisinde kalmış, buna karşılık toplam kütlede yaklaşık %25 oranında azalma elde edilmiştir. Dolayısıyla, optimizasyon sonrasında tasarım daha verimli bir malzeme kullanımı sunarken yeterli güvenlik katsayısını koruyarak mühendislik gereksinimlerini başarıyla karşılamaktadır. Güvenlik katsayısı sonucu Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Optimizasyon sonrasında montajlı modelin güvenlik katsayısı sonucu

Topoloji optimizasyonu sonrası gerçekleştirilen yapısal analiz kapsamında elde edilen veriler, tasarımın hafifletilmiş formunun yük taşıma kapasitesini koruduğunu göstermektedir. Buna göre, optimize edilmiş parçalar için maksimum toplam deformasyon değeri 0,039741 mm olarak hesaplanmış ve bu değer, sistemin rijitliğinin yeterli düzeyde korunduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen maksimum Von-Mises gerilme değeri 9,5013 MPa olup, kullanılan PLA malzemenin akma dayanımının oldukça altında kalarak yapının güvenli çalışma sınırları içinde olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca, eşdeğer gerinim değeri 0,0028443 mm/mm seviyesinde

bulunmuş ve malzeme deformasyon davranışının elastik bölge sınırları içerisinde gerçekleştiği görülmüştür. Son olarak, minimum güvenlik katsayısı 9,0725 olarak belirlenmiş olup, optimizasyon öncesi değere kıyasla düşüş göstermesine rağmen kritik yükleme durumlarında dahi güvenli çalışma performansının sağlandığını teyit etmektedir. Topoloji optimizasyonu sonucunda alınan sonuçlar Çizelge 5'te sunulmuştur.

Çizelge 5. Optimizasyon sonrasında elde edilen maksimum statik analiz sonuçları

Analiz Türü	Değer	Birim
Toplam Deformasyon	0,039741	mm
Von-Mises Gerilme	9,5013	MPa
Eşdeğer Gerinim	0,0028443	mm/mm
Güvenlik Katsayısı	Min: 9,0725 – Max: 15	–

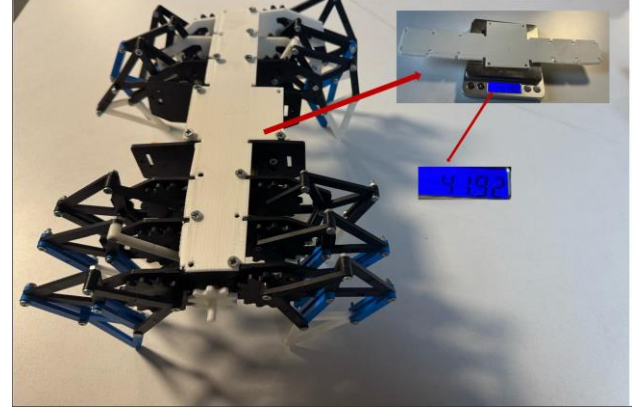
2.2.3 Prototip üretimi ve fiziksel gerçekleştirme

Geliştirilen yürüyen robotun fiziksel prototipi, tasarım aşamasında belirlenen ölçü ve toleranslara sadık kalınarak eklemeli imalat (Additive Manufacturing) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretim sürecinde, ergitilmiş filament biriktirme (FDM – Fused Deposition Modeling) esasına dayalı üç boyutlu yazıcı teknolojisi tercih edilmiştir. Bu yöntem, polimer esaslı malzemelerle karmaşık geometrilerin hızlı, düşük maliyetli ve tekrarlanabilir şekilde üretilmesine olanak sağlaması nedeniyle prototip geliştirme sürecine uygun bulunmuştur. Malzeme olarak PLA (Polilaktik Asit) kullanılmış olup, bu malzemenin mekanik özellikleri ANSYS ortamında tanımlanan malzeme parametreleri ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Üretim parametreleri, katmanlar arası bağlanmayı artırmak, geometrik doğruluğu sağlamak ve yapısal bütünlüğü korumak amacıyla literatürde önerilen değerler ve ön deneme baskıları dikkate alınarak belirlenmiştir. Tüm mekanik bileşenler, tek parça veya modüler şekilde üretilmiş; böylece montaj sırasında yüksek uyum sağlanmış ve ek işleme ihtiyacı en aza indirilmiştir. Baskı parametreleri ve yöntemi Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 6. Prototip üretiminde kullanılan eklemeli imalat yöntemi ve baskı parametreleri

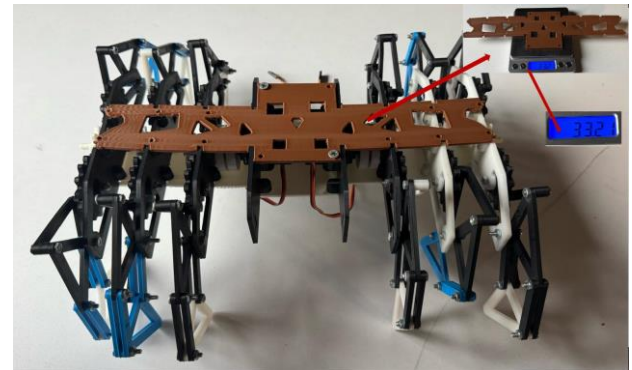
Parametre	Değer
Üretim yöntemi	FDM
Yazıcı tipi	Masaüstü 3B yazıcı
Malzeme	PLA (Polilaktik Asit)
Nozul çapı	0,4 mm
Katman yüksekliği	0,2 mm
Doluluk oranı	%30
Doluluk deseni	Grid
Baskı yönü	XY düzlemi
Nozul sıcaklığı	220 °C
Baskı hızı	300 mm/s
Tabla sıcaklığı	60 °C

Sistem bileşenlerinin hareket kabiliyetini sağlamak amacıyla, sadece iki adet MG995 model servo motor hazır donanım olarak eklenmiş; diğer tüm parçalar ise tamamen eklemeli imalat yöntemiyle elde edilmiştir. Bu yaklaşım, tasarımın prototip aşamasında hızlı üretim, düşük maliyet ve tasarımın kolayca revize edilebilmesi gibi avantajlar sunmuştur. Prototibin görseli Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 20. 3D yazıcıdan çıkarılan robotun optimizasyonsuz modeli

Tüm parçalar, 0.2 mm nozzle çapı, %30 doluluk oranı ve 0.2 mm katman yüksekliği ile PLA filament kullanılarak üretilmiştir. Üretilen parçalar, modüler montaj yaklaşımı ile M3 vidalar ve somunlar kullanılarak birleştirilmiş, hareketli bağlantılar için mafsal pimleri tercih edilmiştir. Tam montajlı prototipin toplam ağırlığı yaklaşık 1,2 kg olup, parçalar ± 0.2 mm tolerans aralığında üretilmiştir. Bağlantıları gösterilen prototip için topoloji optimizasyonu sonrasında, tablada oluşan optimizasyonun görseli Şekil 21'de gösterilmiştir. Hassas terazide ölçülen ana tablanın ağırlığı 41,92 g olarak ölçülürken, optimizasyon sonrası bu değer %20,77 oranında azalarak 33,21 g seviyesine düşmüştür.



Şekil 21. 3D yazıcıdan çıkarılan robotun optimizasyon sonrasında ki birleşim modeli

3. Bulgular

Bu çalışmada geliştirilen 12 bacaklı Theo Jansen tipi yürüyen robotun yapısal davranışı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak statik, modal, zamana bağlı dinamik

ve topoloji optimizasyonu analizleri kapsamında nicel olarak değerlendirilmiştir.

Statik analiz sonuçlarına göre, uygulanan yükler altında yapıda meydana gelen maksimum toplam deformasyon 0,025067 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, özellikle bacak uçları gibi dış yüklerin yoğunlaştığı bölgelerde ortaya çıkmış olup, yapının genel rijitliğini olumsuz etkilemeyecek düzeydedir. Aynı analiz kapsamında elde edilen maksimum Von-Mises eşdeğer gerilme değeri 7,0208 MPa olarak belirlenmiş ve bu değer, kullanılan PLA malzemenin akma dayanımının oldukça altında kalmıştır. Eşdeğer elastik gerinim değeri ise 0,0022429 mm/mm olarak hesaplanmış ve malzemenin elastik bölge sınırları içerisinde çalıştığı görülmüştür. Yapının minimum güvenlik katsayısı 12,278 olarak bulunmuş, bu sonuç tasarımın statik yükler altında yüksek güvenlik payı ile çalıştığını göstermiştir.

Modal analiz kapsamında toplam altı adet mod şekli incelenmiştir. Birinci doğal frekans 71,571 Hz olarak hesaplanmış olup, bu değer tahrik motorunun çalışma frekansının oldukça üzerinde olduğu belirlenmiştir. İncelenen frekans aralığında herhangi bir rezonans riski tespit edilmemiştir. Mod şekilleri incelendiğinde, maksimum yer değiştirmelerin bacak uçlarında yoğunlaştığı, gövde ve sabitlenen bölgelerde ise minimum deformasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Zamana bağlı dinamik analizlerde, robotun tam adım döngüsü boyunca maruz kaldığı gerilme ve deformasyon değerleri değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda, tek bacak elemanında meydana gelen maksimum Von-Mises gerilme değeri 9,5013 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, dinamik yükler altında dahi yapının malzeme dayanım sınırları içerisinde kaldığını göstermektedir. Montajlı modelin tüm bacakları hareket hâlindeyken elde edilen deformasyon dağılımları, mekanizmanın çalışma süresince yapısal bütünlüğünü koruduğunu ortaya koymuştur.

Topoloji optimizasyonu sonucunda, ana taşıyıcı tabla üzerinde yaklaşık %25 oranında malzeme azaltımı sağlanmıştır. Optimizasyon sonrası gerçekleştirilen statik analizlerde, maksimum toplam deformasyon 0,039741 mm, maksimum Von-Mises gerilme 9,5013 MPa ve eşdeğer gerinim 0,0028443 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Minimum güvenlik katsayısı ise 9,0725 olarak belirlenmiş olup, optimizasyon öncesine kıyasla azalma göstermesine rağmen güvenli çalışma sınırları içerisinde kalmıştır.

Prototip üretimi sonucunda, optimizasyon öncesi ana tablanın ağırlığı 41,92 g olarak ölçülürken, optimizasyon

sonrası bu değer %20,77 oranında azalarak 33,21 g seviyesine düşmüştür. Üretilen prototip parçalar, analizlerde öngörülen geometrik ve yapısal özelliklerle uyumlu bir şekilde elde edilmiştir. Uygulanan eklemeli imalat yöntemi ve seçilen üretim parametreleri sayesinde, prototip parçaların geometrik doğruluğu ve montaj uyumu başarılı şekilde sağlanmıştır. Üretilen parçalar, statik ve dinamik analizlerde öngörülen yükleme koşulları altında şekilsel bozulma göstermemiş ve sistemin yürüyüş hareketi sırasında yapısal bütünlüğünü koruduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sayısal analiz sonuçları ile fiziksel prototip davranışı arasında tutarlılık olduğunu göstermekte ve seçilen üretim yönteminin prototip geliştirme süreci için uygunluğunu doğrulamaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Elde edilen sonuçlar, gerilme veya gerinim büyüklükleri açısından birebir sayısal kıyaslama yapılmısa da, genel eğilim ve performans yönünden literatürde bildirilen bulgularla benzerlik göstermektedir.

ANSYS ortamında gerçekleştirilen (Koçak & Bayraklılar, 2023) tarafından yürütülen çalışmada, statik yapısal analiz ve topoloji optimizasyonu sonucunda, model ağırlığında yaklaşık %57,81 oranında azalma elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca maksimum gerilme ve şekil değiştirme değerlerinde iyileşmeler gözlemlenmiş ve bu sonuçların mühendislik uygulamalarında hafiflik ve dayanım açısından önemli avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Bu durum, mevcut çalışmadaki optimizasyon sonrası ağırlık azalması ve yapısal bütünlüğün korunması eğilimiyle uyumludur. Benzer şekilde (Fenni vd., 2024) çalışmasında PLA malzeme kullanılarak optimize edilen 3B baskı braketlerde yaklaşık %70 oranında malzeme azaltımı sağlanmış, deneysel sonuçlarla güçlü bir uyum elde edilmiştir. (Asif vd., 2024) tarafından yürütülen çalışmada ise, PLA tabanlı bir quadcopter gövdesinde topoloji optimizasyonu sonucunda %91 oranında kütle azaltımı elde edilmiş ve optimizasyon sonrası yapı rijitliğini korumuştur. (Rayed vd., 2021) tarafından yürütülen benzer bir çalışmada da PLA malzeme kullanılarak UAV gövdesi üzerinde optimizasyon uygulanmış ve sonuçların genel olarak deformasyon ve rijitlik yönünden iyileştiği rapor edilmiştir. Başka bir çalışmada (Coşkun vd., 2025) iki tekerlekli denge robotunun strüktürel davranışı ANSYS kullanılarak statik, modal ve rijit cisim dinamiği analizleri ile incelenmiş, ardından topoloji optimizasyonu uygulanarak dış kaplamada yaklaşık %14 oranında kütle azaltımı sağlanmıştır; bu süreçte yapısal bütünlüğün korunduğu ve prototipin deneysel olarak 3B yazıcı ile üretildiği rapor edilmiştir.

Tasarım açısından, prototipte kullanılan PLA malzeme, hızlı prototipleme ve düşük maliyet açısından avantajlı olsa da uzun süreli kullanım ve yüksek dinamik yüklerde mukavemet sınırlamaları mevcuttur. Bu nedenle, üretimde karbon fiber takviyeli kompozitler, alüminyum alaşımlar veya gelişmiş polimer malzemeler kullanılarak daha hafif ve dayanıklı bir yapı elde edilebilir. Ayrıca, bacak bağlantı noktalarında rulmanlı mafsallı sistemlerinin tercih edilmesi, sürtünme kayıplarını azaltarak mekanizmanın verimini artıracaktır.

Son olarak, robotun modülerlik düzeyi artırılarak farklı bacak sayıları veya farklı adım uzunlukları ile deneyler yapılabilir; bu sayede çeşitli arazi tiplerine göre optimum yürüyüş performansı sağlayacak alternatif tasarım varyantları geliştirilebilir. Tüm bu öneriler, gelecekte daha yetenekli, çevik ve enerji verimli bacaklı robot tasarımlarının gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Kavramsallaştırma, Çalışma, Doğrulama, Analiz ve yorumlama, Araştırma, Kaynak sağlama, Veril iyileştirme

Yazar-2: Kavramsallaştırma, Çalışma, Doğrulama, Analiz ve yorumlama, Araştırma, Kaynak sağlama, Veril iyileştirme

Yazar-3: Kavramsallaştırma, Çalışma, Doğrulama, Analiz ve yorumlama, Araştırma

Yazar-4: Kavramsallaştırma, Çalışma, Doğrulama, Analiz ve yorumlama, Araştırma, Kaynak sağlama, Veril iyileştirme, Yazma, inceleme ve düzenleme, Görselleştirme, Denetleme,

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

5. References

- Annessi, A., Quattrocchi, A., Pasinetti, S., Martarelli, M., Chiariotti, P., Castellini, P., ... & Montanini, R., 2023. Time stability of the dynamic behaviour of a 3D-printed airless wheel by stereolithography. *Acta IMEKO*, 12(4), 1–8.
https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v12i4.1406
- Asif, S. H., Hasan, K., & Dhar, N. R., 2024. Topology optimization and 3D printing of a unibody quadcopter airframe. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1305(1), 012021. IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1305/1/012021>
- Batista, R. C., Agarwal, A., Gurung, A., Kumar, A., Altarazi, F., Dogra, N., ... & Agrawal, A., 2024. Topological and lattice-based AM optimization for improving the

structural efficiency of robotic arms. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, 1422539.
<https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1422539>

- Boyadzhieva, S. M., Gutmann, F., & Fischer, S. C., 2024. Simulation-based approach to estimate influencing factors on acoustic resonance spectra of additively manufactured mechanical metamaterials. *Journal of Sound and Vibration*, 585, 118436.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118436>
- Burkus, E., Odry, Á., Awrejcewicz, J., Kecskés, I., & Odry, P., 2022. Mechanical design and a novel structural optimization approach for hexapod walking robots. *Machines*, 10(6), 466.
<https://doi.org/10.3390/machines10060466>
- Coşkun, Y., Aydın, D. C., Aktoz, H., & Özyılmaz, L., 2025. Finite element analysis and production of a balance robot designed to be used in the field of advertising. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 9(1), 114–121.
<https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1575667>
- Fenni, B. Ö., Eken, E., & Kaygısız, H., 2024. Application of topology optimization on a 3D-printed shelf bracket. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8(1), 32–45.
<https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1331696>
- Han, H., Xia, Y., & Ha, S. K., 2025. Characterization of fatigue properties of fiber-reinforced polymer composites based on a multiscale approach. *Polymers*, 17(2), 157.
<https://doi.org/10.3390/polym17020157>
- Koçak, M. T., & Bayraklılar, M. S., 2023. Mechanical shaft optimization: A study on static structural analysis and topological optimization in ANSYS. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(3), 541–549.
<https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1366605>
- Korenovski, V. V., & Progrebnjak, A. J., 1987. Features of mechanisms synthesis of walking robot propelling agents. In *RoManSy 6: Proceedings of the Sixth CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators* (pp. 444–454). Springer US.
https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6915-8_45
- Nespoli, A., Riva, A., Bettini, P., Biasutti, T., & Grande, A. M., 2025. Static and dynamic response of SS316L thin-wall Origami and Auxetic structures fabricated through laser powder bed fusion. *Progress in Additive Manufacturing*, 1–14.
<https://doi.org/10.1007/s40964-024-00591-3>
- Ong U Jing, D., Devine, D. M., & Lyons, J., 2018. 3D printed end of arm tooling (EOAT) for robotic automation. *Robotics*, 7(3), 49.
<https://doi.org/10.3390/robotics7030049>

- Raza, A., Mieloszyk, M., Rimašauskienė, R., & Jūrėnas, V., 2024. Dynamic analysis and vibration control of additively manufactured thin-walled polylactic acid polymer (PLAP) and PLAP composite beam structures: numerical investigation and experimental validation. *Materials*, 17(22), 5478. <https://doi.org/10.3390/ma17225478>
- Renzo, D. A., Maletta, C., Sgambitterra, E., Furgiuele, F., & Berto, F., 2022. Surface roughness effect on multiaxial fatigue behavior of additively manufactured Ti6Al4V alloy. *International Journal of Fatigue*, 163, 107022. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107022>
- Selvi, O., Cindioglu, C., Ider, S. K., & Ceccarelli, M., 2025. Kinematic design and analysis of a novel overconstraint walking mechanism. *Robotica*, 1–21. <https://doi.org/10.1017/S0263574725000177>
- Sha, L., Lin, A., Zhao, X., & Kuang, S., 2020. A topology optimization method of robot lightweight design based on the finite element model of assembly and its applications. *Science Progress*, 103(3), 0036850420936482. <https://doi.org/10.1177/0036850420936482>
- Shanmugam, V., Das, O., Babu, K., Marimuthu, U., Veerasimman, A., Johnson, D. J., ... & Berto, F., 2021. Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials. *International Journal of Fatigue*, 143, 106007. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106007>
- Silva, M. F., & Machado, J. T., 2012. A literature review on the optimization of legged robots. *Journal of Vibration and Control*, 18(12), 1753–1767. <https://doi.org/10.1177/1077546311428969>
- Silvestru, V. A., Ariza, I., & Taras, A., 2023. Structural behaviour of point-by-point wire arc additively manufactured steel bars under compressive loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, 107982. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107982>
- Sindinger, S. L., Marschall, D., Kralovec, C., & Schagerl, M., 2021. Structural response prediction of thin-walled additively manufactured parts considering orthotropy, thickness dependency and scatter. *Materials*, 14(9), 2463. <https://doi.org/10.3390/ma14092463>
- Todd, D. J., 1985. A brief history of walking machines. In *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots* (pp. 11–33). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6858-8_2
- Xue, B., Bashir, Z., Guo, Y., Yu, W., Sun, W., Li, Y., ... & Cao, Y., 2023. Strong, tough, rapid-recovery, and fatigue-resistant hydrogels made of picot peptide fibres. *Nature Communications*, 14(1), 2583. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38280-4>
- Yan, W., Pan, Y., Che, J., Yu, J., & Han, Z., 2021. Whole-body kinematic and dynamic modeling for quadruped robot under different gaits and mechanism topologies. *PeerJ Computer Science*, 7, e821. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.821>
- Zhang, Z., & Xu, Z., 2023. Fatigue database of additively manufactured alloys. *Scientific Data*, 10(1), 249. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02242-4>
- Zong, H., Zhang, J., Jiang, L., Zhang, K., Shen, J., Lu, Z., ... & Xu, B., 2024. Bionic lightweight design of limb leg units for hydraulic quadruped robots by additive manufacturing and topology optimization. *Bio-Design and Manufacturing*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s42242-023-00375-2>