



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**TUTUCU KOLA SAHİP DÖRT AYAKLI BİR
ROBOTUN OPTİMUM EMPEDANS
KONTROLÜ**

Abdullah ERDEMİR

DOKTORA TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdullah Erdemir tarafından hazırlanan “Tutucu Kola Sahip Dört Ayaklı Bir Robotun Optimum Empedans Kontrolü” adlı tez çalışması 20/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ziya ŞAKA

.....

Danışman

Prof. Dr. Mete KALYONCU

.....

Üye

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Abdullah ERDEMİR

Tarih: 20/06/2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TUTUCU KOLA SAHİP DÖRT AYAKLI BİR ROBOTUN OPTİMUM EMPEDANS KONTROLÜ

Abdullah ERDEMİR

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2023, 233 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mete KALYONCU

Prof. Dr. Ziya ŞAKA

Doç. Dr. Mustafa TINKIR

Dr. Öğr. Üyesi Koray KAVLAK

Dr. Öğr. Üyesi Ümit ÖNEN

Bu çalışmada, tutucu kola sahip dört ayaklı bir robotun (TUKSDAR) matematiksel modellenmesi, optimum empedans kontrolü ve yürüyüş optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Empedans kontrol, robot teknolojisinde kritik bir öneme sahiptir. Robotun etkileşimde bulunduğu ortamla uyumlu bir şekilde hareket etmesini ve görevlerini güvenli bir şekilde yerine getirmesini sağlamaktadır. Empedans kontrolü, TUKSDAR'ın nesne manipülasyonu, yürüyüş ve diğer temel görevlerde kullanılabilirliğini artırmak için özgün senaryo algoritmalarının tasarlanmasını gerektirmiştir. Bu senaryoların uygulanması ve hareketlerin analizi, empedans kontrol parametrelerinin optimize edilmesini sağlamıştır. Bu şekilde, robotun etkili bir şekilde etkileşimde bulunduğu nesnelerle ve çevreyle uyumlu hareket etmesi sağlanmıştır. TUKSDAR'ın empedans kontrol tekniği, ayaklarda ve tutucu kolda PID tabanlı kartezyen empedans kontrolünü içermektedir. Bu kontrol tekniği, robotun nesnelerle hassas bir şekilde etkileşime girmesini, kuvvet uygulamasını ve nesneleri kavramasını mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda, robotun dengesini koruması için dinamik önlemler de empedans kontrolcüsü tasarımıyla birlikte gerçekleştirilmiştir. TUKSDAR'ın dengeleme sistemi, ayak uç noktalarının etkileşim konumlarını değiştirmek için ana gövdenin eğim açılarından yararlanan yenilikçi bir yaklaşımla tasarlanmıştır. Bu çalışma, dört ayaklı robotların zorlu arazi koşullarında tekerlekli robotlara göre avantajlı olduğunu vurgulayarak, özellikle deprem, nükleer felaketler ve kimyasal tehlikeler gibi insan için zararlı durumlarda dört ayaklı robotların kurtarma görevlerinde kullanılabilirliğini artırmayı hedeflemektedir. Empedans kontrolü, bu tür tehlikeli ortamlarda robotun güvenli ve etkin bir şekilde hareket etmesini sağlayarak, insan hayatını koruma ve kurtarma operasyonlarına yardımcı olma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, tutucu kola sahip dört ayaklı bir robotun (TUKSDAR) empedans kontrolü tekniklerine çeşitli algoritmalar eklenerek istenen ortam ve kurgulanan çeşitli senaryolara karşılık görevini güvenli ve etkili bir şekilde yerine getirebildiği gösterilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tutucu kola sahip dört ayaklı robot, empedans kontrolü, yürüyüş optimizasyonu, matematiksel modelleme, nesne manipülasyonu, dengede kalma sistemi, optimizasyon, Arı Algoritması.

ABSTRACT

PhD THESIS

OPTIMAL IMPEDANCE CONTROL OF A QUADRUPEL ROBOT WITH A GRIPPER ARM

Abdullah ERDEMİR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mete KALYONCU

2023, 233 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mete KALYONCU
Prof. Dr. Ziya ŞAKA
Assoc. Prof. Dr. Mustafa TINKIR
Asst. Prof. Dr. Koray KAVLAK
Asst. Prof. Dr. Ümit ÖNEN**

In this study, the mathematical modeling of a quadrupel robot with a gripper arm (TUKSDAR), optimal impedance control, and gait optimization have been performed. Impedance control plays a critical role in robot technology as it enables the robot to move in a compliant manner and perform tasks safely in interaction with the environment. For TUKSDAR to be effectively utilized in object manipulation, walking, and other fundamental tasks, the design of novel scenario algorithms was necessary, incorporating impedance control. The implementation of these scenarios and the analysis of movements facilitated the optimization of impedance control parameters. This approach ensured that the robot interacts efficiently with objects and its surroundings, exhibiting compatible motion patterns. TUKSDAR's impedance control technique includes PID – based cartesian impedance control in its legs and gripper arm, allowing for precise interaction with objects, force application, and grasping capabilities. Additionally, dynamic measures were integrated into the impedance control design to maintain the robot's balance. TUKSDAR's balance system was innovatively designed, utilizing the tilt angles of the main body to modify the interaction positions of its foot endpoints. This study aims to emphasize the advantage of quadrupel robots over wheeled robots, particularly in challenging terrain conditions and their potential usability in rescue missions involving hazardous situations for humans such as earthquakes, nuclear disasters, and chemical hazards. Impedance control, together with its ability to enable safe and effective movement in such hazardous environments, holds great potential for protecting human lives and supporting rescue operations. The results obtained from the conducted studies have been presented numerically and graphically, demonstrating that a quadrupel robot with a gripper arm (TUKSDAR), incorporating various algorithms for impedance control techniques, can successfully and safely perform its tasks in different environments and predefined scenarios.

Keywords: Quadrupel robot with gripper arm, impedance control, gait optimization, mathematical modeling, object manipulation, balance system, optimization, The Bees Algorithm.

ÖNSÖZ

Günümüzde robotların insanlarla etkileşimlerinin artması, robotların insanlara zarar vermeden etkin bir şekilde çalışabilmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple, empedans kontrol tekniği, robotların insanlarla etkileşimini yönetmek ve uyumlu bir şekilde hareket etmek için öne çıkan bir yaklaşım olarak değer kazanmaktadır. Bu çalışma, empedans kontrol tekniğinin avantajlarını dikkate alarak gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, yenilikçi ve güncel bir konuda araştırma yapmamı sağlayan, tez ve yayın çalışmalarımı yönlendiren, bilgi ve tecrübesiyle bana sürekli destek olan danışmanım Prof. Dr. Mete KALYONCU'ya en derin teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Danışmanımın rehberliği sayesinde, bu zorlu süreçte ilerlemeye devam edebildim. Akademik deneyimleriyle bize ışık tutmaya devam etmesini temenni ediyorum.

Tez izleme sürecinde, değerli görüşleri ve önerileriyle çalışmalarımın ilerlemesine önemli katkılar sunan Prof. Dr. Ziya ŞAKA'ya ve Doç. Dr. Mustafa TINKIR'a en içten teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Tez çalışmamda, birçok konuda fikir ve uygulama aşamasında desteklerini esirgemeyen Dr. Abdullah ÇAKAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Arif ŞEN'e teşekkürlerimi iletmek istiyorum.

Bu çalışmada desteklerini esirgemeyen MPG A.Ş. Genel Müdürü Veysel ALVER'e ve tüm mesai arkadaşlarıma da en içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Son olarak, maddi ve manevi olarak daima yanımda olan kıymetli babama, anneme ve ağabeylerime, bu süreçteki sabırları ve destekleri için en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca sevgili eşime, oğluma ve kızıma da en kalbi şükranlarımı iletiyorum.

Bu tezin tamamlanmasında katkı sağlayan herkese bir kez daha en derin teşekkürlerimi sunarım.

Abdullah ERDEMİR
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER TABLOSU	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Motivasyonu.....	3
1.3. Tez Çalışmasının Bilime Katkısı	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. TUTUCU KOLA SAHİP DÖRT AYAKLI ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ.....	30
3.1. TUKSDAR Modelinin Oluşturulması.....	31
3.2. Denavit – Hartenberg Parametre Tablosunun Oluşturulması	33
3.3. Ayakların Matematiksel Modeli	35
3.3.1. Ayakların D – H Parametre Tablosu.....	36
3.3.2. Ayaklar Mafsallarına Ait Tork Denklemi.....	37
3.4. Tutucu Kolun Matematiksel Modeli	41
3.4.1. Tutucu Kolun D – H Parametre Tablosu	41
3.4.2. Tutucu Kol Mafsallarına Ait Tork Denklemleri	43
4. OPTİMUM EMPEDANS KONTROLÜ	48
4.1.1. Ayakların Empedans Kontrolünün Modellenmesi	48
4.1.2. Tutucu Kolun Empedans Kontrolünün Modellenmesi	51
4.2. Yürüyüş Senaryoları.....	52
4.2.1. Dengede Kalma Sisteminin Modellenmesi.....	52
4.2.2. Yerinde Sayma Senaryosu	54
4.2.3. Yürüme Senaryosu.....	56
4.2.4. Kendi Etrafında Dönüş Senaryosu.....	59
4.2.5. Yan Yürüme Senaryosu	60
4.3. Nesne Manipülasyonunun Empedans Kontrolü ile Modellenmesi.....	61

4.3.1.	Nesne Tutma ve Taşıma Senaryosu.....	61
4.3.2.	Kapı Kolu Tutma ve Açma Senaryosu	63
4.4.	TUKSDAR'ın Yürüyüş Optimizasyonu	66
5.	SAYISAL UYGULAMA VE DEĞERLENDİRME	71
5.1.1.	Yerinde Say Senaryosu.....	71
5.1.2.	Yürüme Senaryosu.....	78
5.1.3.	Kendi Etrafında Dönüş Senaryosu.....	88
5.1.4.	TUKSDAR'ın Viraj Dönüşü	97
5.1.5.	Yan Yürüme Senaryosu	105
5.1.6.	TUKSDAR'ın Hedefe Yürümesi.....	112
5.1.7.	Nesne Tutma ve Taşıma Senaryosu.....	122
5.1.8.	Kapı Kolu Tutma ve Açma Senaryosu	130
5.2.	Sayısal Uygulamaların Değerlendirilmesi	143
5.3.	Motor Tork – Açısal Hız Kontrollerinin Yapılması.....	146
5.3.1.	Yürüme, Nesne Tutma ve Taşıma Sırasındaki Tork ve Hız Kontrolü....	150
5.3.2.	Kapı Kolu Tutma ve Açma Sırasındaki Tork ve Hız Kontrolü	155
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	160
6.1.	Sonuçlar.....	160
6.2.	Öneriler	162
	KAYNAKLAR	164
	EKLER	172
	EK-1 Ayak mafsallarına ait U_{ij} hız matrisi [m/s]	172
	EK-2 Ayak mafsallarına ait U_{ij} hız matrisi [m/s]	174
	EK-3 Tutucu kola ait τ_{act} eyleyici tork denklemleri [Nm].....	190
	EK-4 Tutucu kola ait P uç nokta konum denklemleri [m]	198
	EK-5 Tutucu kolun P uç noktasına ait J_f Jakobiyen matrisi denklemleri	200
	EK-6 Tutucu kola ait τ_e empedans tork denklemleri [Nm]	206
	EK-7 Kullanılan Motorların Teknik Özellikleri.....	211

ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 2.1. Dört ayaklı robotun tekerlekli robotlara kıyasla üstünlükleri	6
Şekil 2.2. Dört ayaklı robotların arazideki yürüyüşleri a) BigDog, b) HyQ	7
Şekil 2.3. Dört ayaklı robotların arazideki yürüyüşleri a) ALoF, b) LittleDog.....	7
Şekil 2.4. Dört ayaklı robotlar a) Scalf-1, b) Jinpoong.....	8
Şekil 2.5. Hombot mobil robotunun kapıyı açması	9
Şekil 2.6. PR2 robotu içeriye açılan kapıyı açması	9
Şekil 2.7. PSR1 mobil robotunun kapıdan geçmesi	10
Şekil 2.8. HRP2 insansı robotunun ve kapının modeli (solda) ve HRP2 robotunun kapıyı açma dizisi (sağda).....	11
Şekil 2.9. HUBO+ insansı robotunun kısmi olarak kapıyı açma senaryosu.....	11
Şekil 2.10. Atlas insansı robotunun kapı açma stratejisi	12
Şekil 2.11. Atlas insansı robotunun kapıyı açma ve geçme senaryosu üstten görünüş..	12
Şekil 2.12. Altı ayaklı robotun genel görünüşü (solda), robotun kapı kolunu tespit etmesi (sağda)	13
Şekil 2.13. Altı ayaklı robotun kapı kolunu çevirmesi (solda), daha sonra kapıyı ileri doğru itmesi (ortada), kapıdan geçerek ilerlemesi (sağda)	13
Şekil 2.14. CoMan insansı robotunda uygulanan empedans kontrol döngüsü.....	14
Şekil 2.15. CoMan insansı robotunun kapıyı açma görüntüsü	14
Şekil 2.16. 7 eksenli robot (solda), kapı açma algoritması (sağda)	15
Şekil 2.17. Temel empedans kontrolü	16
Şekil 2.18. Dâhili açık tork döngüsü (ICT) ile empedans kontrolü.....	17
Şekil 2.19. Dâhili hız döngüsü (ICV) ile empedans kontrolü	17
Şekil 2.20. Konuma dayalı (ICP) empedans kontrolü	17
Şekil 2.21. ANYmal dört ayaklı robotunun engebeli arazideki empedans kontrolü çalışması.....	18
Şekil 2.22. MIT Cheetah dört ayaklı robotunun empedans kontrolünün etkileşim konumu	19
Şekil 2.23. Bir tutucu robotun bulanık mantık tabanlı empedans kontrolü şeması	19
Şekil 2.24. Bir tutucu robotun bulanık mantık tabanlı empedans kontrolü ile bir nesneyi tutması.....	20
Şekil 2.25. Empedans kontrol algoritmasının ters kinematik amacıyla bir endüstriyel robotta kullanılması	20
Şekil 2.26. KUKA-LWR 4+ robotu (solda). Her bir mafsaldaki sanal yaylar ve damperler ile hedef konum konfigürasyonunun gösterildiği kartezyen empedans kontrolü (sağda)	21
Şekil 2.27. a) Hidrolik eyleyicili eksozkeleton b) empedans kontrollü ve elektrik motorlu eksozkeleton	22
Şekil 2.28. Hyarm hidrolik eyleyicili tutucu kol çalışması	23
Şekil 2.29. Empedans kontrolü kullanılarak a) insanın robota nesne tutmayı öğretmesi (b – c) robotun öğrendiği konumlara göre kendisine uzatılan bardağı tutması	23
Şekil 2.30. Kartezyen empedans kontrolü çalışmasında yer çekimi denkleştirmesinin kullanılması.....	24
Şekil 2.31. DLR tutucu kolu ile empedans kontrolü uygulamaları	25
Şekil 2.32. Unitree Aliengo dört ayaklı robotu ve ViperX 300 robot kolu	25
Şekil 2.33. ViperX 300 tutucu koluna sahip Unitree Aliengo dört ayaklı robotunun kapıyı görevi	26

Şekil 2.34. ANYmal dört ayaklı robotunda kartezyen empedans kontrolü ile buzlu zeminde yürüyüşü	26
Şekil 2.35. ANYmal dört ayaklı robotunda kartezyen empedans kontrolü ile 30° eğimde yürüyüşü.....	27
Şekil 2.36. Tutucu kola sahip dört ayaklı robot simülasyonlarda optimizasyon tabanlı kontrolü	27
Şekil 2.37. Tutucu kola sahip dört ayaklı robot SpotMini a) nesne manipülasyonu b) kapıdan geçme	28
Şekil 3.1. TUKSDAR'ın alt sistemleri	30
Şekil 3.2. TUKSDAR'ın üstten görünüş geometrik özellikleri.....	31
Şekil 3.3. TUKSDAR'ın yandan görünüş geometrik özellikleri.....	32
Şekil 3.4. TUKSDAR'ın referans koordinat sistemleri.....	32
Şekil 3.5. TUKSDAR'ın döner mafsalları.....	33
Şekil 3.6. TUKSDAR'a ait ayak mafsalları	36
Şekil 3.7. Tutucu kola ait mafsalların yandan görünüşü	42
Şekil 4.1. Empedans kontrol şeması	48
Şekil 4.2. α ve β eğimleri ve ayak numaraları (v)	50
Şekil 4.3. Ön ayak uç noktası xda ve zda etkileşim konumlarının yandan görünüşü....	56
Şekil 4.4. Kütle merkezinin yere iz düşümü ve çapraz ayak çiftlerinin oluşturduğu kesişim noktaları	57
Şekil 4.5. Ön ayak uç noktası yda ve zda etkileşim konumlarının üstten görünüşü.....	60
Şekil 4.6. Δr , TUKSDAR'ın tutucu kol uç noktasının kapı koluna yatayda ilk yaklaşma mesafesi.....	64
Şekil 4.7. Kapı çerçevesine 0.3 m yaklaştıktan sonraki TUKSDAR'ın yeni yönelme hedefi Ph konumu	66
Şekil 4.8. Arı Algoritmasına ait akış diyagramı	67
Şekil 4.9. Yerinde say senaryosu optimizasyonu yakınsama grafiği	69
Şekil 5.1. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu izometrik görünüşü	71
Şekil 5.2. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu yandan görünüşü.....	72
Şekil 5.3. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği	72
Şekil 5.4. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği.....	73
Şekil 5.5. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu α ve β ana gövde eğim açıları.....	73
Şekil 5.6. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki önden görünüşü	74
Şekil 5.7. TUKSDAR yerinde say senaryosu sırasındaki üstten görünüşü	74
Şekil 5.8. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	75
Şekil 5.9. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri	75
Şekil 5.10. Yerinde say senaryosu sırasında gerçekleşen ayakların yere temas fazları .	75
Şekil 5.11. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları.....	76
Şekil 5.12. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği.....	76
Şekil 5.13. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal açısal hız grafiği	76
Şekil 5.14. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal güç grafiği.....	76

Şekil 5.15. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	77
Şekil 5.16. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği	77
Şekil 5.17. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği.....	77
Şekil 5.18. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	78
Şekil 5.19. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği	78
Şekil 5.20. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği.....	78
Şekil 5.21. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki yandan görünüşü.....	79
Şekil 5.22. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği	79
Şekil 5.23. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği.....	80
Şekil 5.24. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları	80
Şekil 5.25. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki üstten görünüşü.....	81
Şekil 5.26. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki önden görünüşü	81
Şekil 5.27. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü ve sağ ayak uç noktasının izi.....	82
Şekil 5.28. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	82
Şekil 5.29. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri	83
Şekil 5.30. Yürüme senaryosu sırasında gerçekleşen ayakların yere temas fazları	83
Şekil 5.31. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları.....	84
Şekil 5.32. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği	84
Şekil 5.33. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal açısal hız grafiği	85
Şekil 5.34. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği.....	85
Şekil 5.35. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	86
Şekil 5.36. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği	86
Şekil 5.37. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği.....	86
Şekil 5.38. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	87
Şekil 5.39. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği	87
Şekil 5.40. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği.....	88
Şekil 5.41. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü.....	89

Şekil 5.42. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki üstten görünüşü	89
Şekil 5.43. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği.....	90
Şekil 5.44. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği	90
Şekil 5.45. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları	91
Şekil 5.46. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	91
Şekil 5.47. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri	92
Şekil 5.48. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları grafiği.....	92
Şekil 5.49. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği	93
Şekil 5.50. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal açısal hız grafiği.....	93
Şekil 5.51. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği.....	94
Şekil 5.52. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	94
Şekil 5.53. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği.....	95
Şekil 5.54. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği.....	95
Şekil 5.55. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	96
Şekil 5.56. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği.....	96
Şekil 5.57. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği.....	96
Şekil 5.58. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki izometrik görünüşü	97
Şekil 5.59. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki üstten görünüşü	98
Şekil 5.60. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği.....	98
Şekil 5.61. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği ..	99
Şekil 5.62. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları.....	99
Şekil 5.63. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	100
Şekil 5.64. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri ...	100
Şekil 5.65. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları grafiği.....	101
Şekil 5.66. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği	101
Şekil 5.67. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal açısal hız grafiği.....	102
Şekil 5.68. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği.....	102
Şekil 5.69. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	103

Şekil 5.70. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği.....	103
Şekil 5.71. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği.....	103
Şekil 5.72. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	104
Şekil 5.73. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği.....	104
Şekil 5.74. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği.....	105
Şekil 5.75. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü	106
Şekil 5.76. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki üstten görünüşü	106
Şekil 5.77. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki önden görünüşü.....	107
Şekil 5.78. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği	107
Şekil 5.79. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği.....	108
Şekil 5.80. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları.....	108
Şekil 5.81. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	108
Şekil 5.82. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri	109
Şekil 5.83. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları grafiği.....	109
Şekil 5.84. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği	109
Şekil 5.85. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal açısal hız grafiği.....	110
Şekil 5.86. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği.....	110
Şekil 5.87. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	110
Şekil 5.88. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği.....	110
Şekil 5.89. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği.....	111
Şekil 5.90. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	111
Şekil 5.91. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği.....	111
Şekil 5.92. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği.....	111
Şekil 5.93. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki üstten görünüşü	112
Şekil 5.94. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki izometrik görünüşü.....	113
Şekil 5.95. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki önden görünüşü	113
Şekil 5.96. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği	114
Şekil 5.97. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği	114

Şekil 5.98. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları	115
Şekil 5.99. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	116
Şekil 5.100. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri	116
Şekil 5.101. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları grafiği	117
Şekil 5.102. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği	117
Şekil 5.103. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal açısal hız grafiği	118
Şekil 5.104. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği	118
Şekil 5.105. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	119
Şekil 5.106. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği	119
Şekil 5.107. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği	120
Şekil 5.108. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	120
Şekil 5.109. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği	121
Şekil 5.110. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği	121
Şekil 5.111. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü	122
Şekil 5.112. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki üstten görünüşü	123
Şekil 5.113. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki ana gövdenin, bardağın ve tutucu kolun uç noktasının yerden yüksekliği	123
Şekil 5.114. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları	124
Şekil 5.115. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	124
Şekil 5.116. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri	125
Şekil 5.117. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları grafiği	125
Şekil 5.118. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki tutucu kolun uç noktasına etki eden dış kuvvet grafiği	126
Şekil 5.119. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği	126
Şekil 5.120. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	127
Şekil 5.121. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	127
Şekil 5.122. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1 – 3 mafsallarına ait tork grafiği	128

Şekil 5.123. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1 – 3 mafsallarına ait açısıl güç grafiği	128
Şekil 5.124. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1 – 3 mafsallarına ait açısıl güç grafiği	128
Şekil 5.125. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1,2 ve 3 mafsallarına ait tork grafiği.....	129
Şekil 5.126. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1,2 ve 3 mafsallarına ait açısıl hız grafiği	129
Şekil 5.127. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1,2 ve 3 mafsallarına ait açısıl güç grafiği	129
Şekil 5.128. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki üstten görünüşü.....	130
Şekil 5.129. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü.....	131
Şekil 5.130. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği.....	132
Şekil 5.131. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği	132
Şekil 5.132. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları	134
Şekil 5.133. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri	135
Şekil 5.134. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri	135
Şekil 5.135. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki tutucu kolun uç noktasına etki eden dış kuvvet grafiği.....	136
Şekil 5.136. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki exkm ve eykm konumlama hataları grafiği.....	137
Şekil 5.137. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği	138
Şekil 5.138. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal açısıl hız grafiği.....	138
Şekil 5.139. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği.....	139
Şekil 5.140. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği	140
Şekil 5.141. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısıl hız grafiği.....	140
Şekil 5.142. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği.....	141
Şekil 5.143. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği	142
Şekil 5.144. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısıl hız grafiği.....	142
Şekil 5.145. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği.....	143
Şekil 5.146. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasında olması gereken ayak sürme oranları	145
Şekil 5.147. TUKSDAR'ın a) motorlarının yerleşimi, b) mafsalların yerleşimi	146
Şekil 5.148. RMD X8 Pro hız – tork grafiği	147

Şekil 5.149. R100 KV90 R hız – tork grafiği	148
Şekil 5.150. Maxon EC-i 30 tork – hız grafiği	148
Şekil 5.151. RMD-L-5005-35T hız – tork grafiği	149
Şekil 5.152. TUKSDAR’ın ayaklarının L_1 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	150
Şekil 5.153. TUKSDAR’ın ayaklarının L_2 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	151
Şekil 5.154. TUKSDAR’ın ayaklarının L_3 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	152
Şekil 5.155. TUKSDAR’ın tutucu kolunun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	153
Şekil 5.156. TUKSDAR’ın ayaklarının L_1 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	155
Şekil 5.157. TUKSDAR’ın ayaklarının L_2 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	156
Şekil 5.158. TUKSDAR’ın ayaklarının L_3 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	157
Şekil 5.159. TUKSDAR’ın tutucu kolunun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri	158

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Ayak gövdeleri arası homojen dönüşüm matrisi.
A_{ti}	: i. Tutucu kol gövdesini hareket ettiren mafsal.
A_{faz}	: Adım fazı.
α	: Ana gövdenin x eksenini etrafındaki eğim açısı.
b	: Tutucu kol uç noktası empedans kontrolcü PID türev kazancı.
b_a	: Ayak uç noktası empedans kontrolcü PID türev kazancı.
$b_{Eğim}$	: PID eğim dengeleyici türev kazancı.
β	: Ana gövdenin y eksenini etrafındaki eğim açısı.
b_{km}	: PID kütle merkezi dengeleyici türev kazancı.
$b_{yön}$	: Kendi etrafında dönüş PID kontrolcü türev kazancı.
C	: Tutucu kol grubuna ait koriolis ve merkezkaç matrisi.
C_a	: Ayak grubuna ait koriolis ve merkezkaç matrisi.
d_x	: i. ayak konumuna ek dx.
d_y	: Ayak konumuna ek dy.
d_z	: Ayak konumuna ek dz.
Δr	: Tutucu kolun kapı koluna yataydaki yaklaşma mesafesi
e	: Arı Algoritmasının elit sonuca sahip araştırma bölgeleri.
e_p	: Tutucu kol uç noktası konum hatası.
e_{xkm}	: TUKSDAR'ın kütle merkezinin P_{kes} 'e izdüşüm x uzaklığı.
$\dot{e}_{xkm}$	: TUKSDAR'ın kütle merkezinin P_{kes} 'e izdüşüm x hızı.
e_{ykm}	: TUKSDAR'ın kütle merkezinin P_{kes} 'e izdüşüm y uzaklığı.
$\dot{e}_{ykm}$	: TUKSDAR'ın kütle merkezinin P_{kes} 'e izdüşüm y hızı.
f	: Sol ve sağ ayağa bağlı değişken.
f_a	: Optimizasyon amaç fonksiyonu.
f_{ileri}	: Ötelenmiş ilerleme hızı.
f_y	: Yürüme fazı frekansı.
$f_{yön}$	: TUKSDAR yönelim kontrolcü çıkışı.
F_{int}	: Tutucu kol uç noktası etkileşim kuvveti.
F_{inta}	: Ayak uç noktası etkileşim kuvveti.
g	: TUKSDAR koordinat sistemine göre yerçekimi vektörü.
g_a	: Ayak referans koordinat sistemine göre yerçekimi vektörü.
G	: Tutucu kol grubuna ait yerçekimi matrisi.
G_a	: Ayak grubuna ait yerçekimi matrisi.
G_p	: Optimizasyonun amaç fonksiyonundaki i. cezalandırma fonksiyonu.
h_x	: Ayakların uç noktaları arasındaki en dip x konumundan ayağın uç noktasının yüksekliği.
I	: Tutucu kol gövdesinin kütle atalet momenti matrisi.
I_a	: Ayak gövdesinin kütle atalet momenti matrisi.
i	: Tutucu kol uç noktası empedans kontrolcü PID integral kazancı.
i_a	: Ayak uç noktası empedans kontrolcü PID integral kazancı.
$i_{Eğim}$	: PID eğim dengeleyici integral kazancı.
$i_{yön}$	: Kendi etrafında dönüş PID kontrolcü integral kazancı.

J_f	: Tutucu kol uç noktası Jakobiyen matrisi.
J_{fa}	: Ayak uç noktası Jakobiyen matrisi.
J_i	: Genelleştirilmiş ve i. tutucu kol gövdesi için atalet tensörü.
J_{ia}	: i. ayak gövdesi için atalet tensörü.
k	: Tutucu kolun uç noktası empedans kontrolcü PID oransal kazancı.
k_a	: Ayak uç noktası empedans kontrolcü PID oransal kazancı.
k_{ary}	: Arka ayakların yukarı yükselme katsayısı.
$k_{Eğim}$	: PID eğim dengeleyici oransal kazancı.
k_{km}	: PID kütle merkezi dengeleyici oransal kazancı.
$k_{öny}$	: Ön ayakların yukarı yükselme katsayısı.
k_{side}	: Ayak konumu ek yan mesafe oransal kazancı.
k_{T6}	: Tutucu kol altıncı mafsallık empedans kontrolcü PID oransal kazancı.
k_{Turn}	: Kendi etrafında dönüş/yana paralel yürüyüş katsayısı.
$k_{yön}$	: Kendi etrafında dönüş PID kontrolcü oransal kazancı.
L_i	: i. Ayak gövdesini hareket ettiren mafsallık.
m	: Tutucu kol gövdelerinin kütleleri.
m_a	: Ayak gövdelerinin kütleleri.
m_{AA}	: Arı algoritması en iyi sonuca sahip araştırma bölgesi için kâşif arı sayısı.
M	: Tutucu kol grubuna ait ivme vektörü ile çarpılacak atalet matrisi.
M_a	: Ayak grubuna ait ivme vektörü ile çarpılacak atalet matrisi.
n	: Kâşif arı sayısı.
n_{ep}	: Elit araştırma bölgelerine gönderilecek arı sayısı.
n_{sp}	: En iyi araştırma sonucuna gönderilecek arı sayısı.
P	: Tutucu kol uç nokta konumu.
P_{0a}	: Ayak mafsalları 0° uç nokta konumu.
P_a	: Ayak koordinat sistemine göre ayak uç nokta konumu.
P_b	: Nesne konumu.
P_c	: Çöp kutusu konumu.
P_d	: Tutucu kol uç nokta etkileşim konumu.
P_h	: TUKSDAR'ın yönelme hedefi.
P_{kap}	: Kapı çerçevesi konumu.
P_{kes}	: Diyagonal ayak çiftlerinin yere iz düşümlerinin kesişim noktası.
P_{kol}	: Kapı kolunun konumu.
P_{max}	: Optimizasyon parametrelerinin maksimum değer vektörü.
P_{min}	: Optimizasyon parametrelerinin minimum değer vektörü.
$\bar{P}$	: TUKSDAR sisteminin kütle merkezi.
$\bar{P}'$	: TUKSDAR sisteminin kütle merkezinin yere iz düşümü.
q	: Genelleştirilmiş hareket denklemi için açılal konum vektörü.
Q	: Döner mafsallar için türev alma matrisi.
ϕ_1	: Ayak adımlama faz açısı 1.
ϕ_2	: Ayak adımlama faz açısı 2.
R_F	: Ön ve arka ayakların uç noktalarının derinlik etkileşim mesafesi
R_L	: Sağ ve sol ayakların uç noktalarının derinlik etkileşim mesafesi.
r_f	: Adım profili genliği.
$i\bar{r}_i$	: i. tutucu kol gövdesinin i. tutucu kol gövdesi koordinat sistemine kütle merkezi konum vektörü.

${}^i\bar{r}_{ia}$	: i. ayak gövdesinin i. ayak gövdesi koordinat sistemine kütle merkezi konum vektörü.
R_x	: X ekseninde döndürme matrisi.
R_z	: Z ekseninde döndürme matrisi.
T	: Tutucu kol gövdeleri arası homojen dönüşüm matrisi.
T_a	: TUKSDAR koordinat sistemine göre ayak uç noktasının konumu.
Tr	: Diyagonal terimler toplamı (Trace) operatörü.
T_x	: X eksenindeki öteleme matrisi.
T_{xyz}	: Genelleştirilmiş öteleme matrisi.
T_z	: Z eksenindeki öteleme matrisi.
τ_{act}	: Tutucu kol grubuna ait mafsallar için eyleyici torku.
τ_{acta}	: Ayak grubuna ait mafsallar için eyleyici torku.
τ_e	: Tutucu kol grubuna ait mafsallar için empedans torku.
τ_{ea}	: Ayak grubuna ait mafsallar için empedans torku.
U	: Hız matrisi.
$\theta_{yön}$	: TUKSDAR'ın yönelme açısı hatası.
$\dot{\theta}_{yön}$	: TUKSDAR'ın yönelme açısal hızı.
V_{ileri}	: TUKSDAR ilerleme hızı.
v	: Ayak numarası
x_d, y_d, z_d	: Tutucu kol uç noktası hedeflenen konumu.
x_{da}, y_{da}, z_{da}	: Ayak uç noktası hedeflenen konumu.
x_{max}	: Ayak koordinat sistemine göre bütün ayakların uç noktasının x konumlarının en büyüğü.

Kısaltmalar

CAD	: Bilgisayar destekli tasarım.
PD	: Oransal – Türevsel Kontrolcü
PID	: Oransal – Türevsel – İntegral Kontrolcü
TUKSDAR	: Tutucu kola sahip dört ayaklı robot.

1. GİRİŞ

Robot teknolojisi son yıllarda hızla gelişmiş ve birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Robotik sistemler, insan iş gücünün yerini alabilecek ve zorlu ortamlarda çalışabilecek özelliklere sahiptir. Dört ayaklı robotlar, özellikle keşif ve kurtarma alanlarında kullanılmaktadır, çünkü insanların hareket etmekte zorlandığı yerlerde hareket edebilme yeteneğine sahiptirler. Ancak, bu tür robotların kontrolü ve hareketi oldukça karmaşık olabilmektedir. Bu tezde, tutucu kola sahip bir dört ayaklı robot ele alınmıştır.

Robot ile çevre arasındaki temas etkileşimleri doğrusal olmadığı için bunu kontrol etmek robotikte önemli problemlerden biridir. Özellikle dört ayaklı robotlarda yer ile robotun etkileşimi hiper statik olduğundan dolayı dört ayaklı robotlarda bu daha zorlayıcı bir problem haline gelmektedir. Ancak empedans kontrolü gibi kuvvet girişli kontrol teknikleri ile hiperstatik problemleri kontrol etmek daha kolaydır. Empedans kontrolü, etkileşim alanındaki gürültülü girişlere karşı oldukça başarılı sonuçlar verir. Bu tezde, empedans kontrolü ele alınarak hiperstatik problemlere karşı etkili bir kontrol tekniği kullanılmıştır.

Robotlarla ilgili bir diğer önemli sorun da, serbestlik derecesinin artmasıyla birlikte ters kinematik analizinin zorlaşmasıdır. Ters kinematik çözüm sayısı, robotun serbestlik derecesinin çokluğuna, mafsallı bağlantı tiplerine ve her bir mafsaldaki döndürme ekseninin diğer mafsallardakilere olan oryantasyonlarına bağlı olarak zorlaşmaktadır. Özellikle kinematik olarak gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip robotlarda çözüm sayısı sonsuz olabilmektedir. Ancak empedans kontrol tekniği, ters kinematik çözüme ihtiyaç duymadan robotun uç noktasını istenen konuma yönlendirebilmektedir. Bu tezde, ters kinematik analizine gerek duyulmadan robotun uç noktası istenen konumlara ulaştırılarak, robotikte ufuk açıcı bir teknik olan empedans kontrol tekniği kullanılmıştır.

Dengenin korunması, özellikle dört ayaklı robotlar için son derece önemlidir. Eğimli bir zeminde stabiliteyi artırmak için kullanılan bir teknik olan arazi tahmini, arazi eğimini kullanarak önceden adım atma çalışmalarında kullanılmaktadır (Gehring ve ark 2016, Yu ve ark 2018). Arazinin topografyasını tahmin ederek önceden hazırlıklı olarak adım atma çalışmalarında sensör füzyon çalışmalarındaki zorluklar kendini göstermektedir. Sensör füzyon çalışmalarında, arazinin topografyasını tahmin etmek ve buna göre hareket etmek zorluklar ortaya çıkarır. Ancak, empedans kontrolü

kullanılarak, ana gövdeyi yer düzlemine neredeyse paralel tutmak mümkün olmakta ve bu zorlukların üstesinden gelmek için bir yol sunmaktadır.

Bu çalışmada, ana gövdenin eğim açısının hatası empedans kontrolüne girdi olarak kullanılarak bir kontrolcü yapısı tasarlanmıştır. Önerilen empedans kontrol tekniğinde, dört ayaklı robotun ayaklarının uç noktasının etkileşim mesafeleri değiştirilerek ana gövdenin hedeflenen eğim açısına ulaşılması hedeflenmektedir. Tutucu kola sahip dört ayaklı robot üzerinde, optimize edilmiş empedans kontrolcü parametreleri kullanılmış ve ayrıntılı bir şekilde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada, tutucu kola sahip dört ayaklı bir robotun, yürüyüş sırasında ortama, nesne manipülasyonu sırasında nesneye, robotun kendisine ve kurtarma görevlerinde insana zarar vermeden, belirli bir görevi başarıyla tamamlaması için empedans kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda, tutucu kola sahip dört ayaklı robotun matematiksel modellenmesi oluşturularak, optimum empedans kontrolü uygulanmış ve yürüyüş optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, tutucu kolun ve ayakların ayrı ayrı:

- Denavit – Hartenberg parametre tablosunun hazırlanması,
- Hareketini içeren matematiksel modelin oluşturulması,
- Empedans kontrolünün modellenmesi,

amaçlanmaktadır. Bunlara ek olarak;

- Nesne manipülasyonunun empedans kontrolü ile modellenmesi,
- Tutucu kola sahip dört ayaklı robotun yürüyüş senaryolarının modellenmesi,

hedeflenmiştir.

1.2. Tezin Motivasyonu

Bu çalışma, tutucu kola sahip dört ayaklı robotun matematiksel modellemesi, optimum empedans kontrolü ve yürüyüş optimizasyonları gibi konular üzerinde çalışarak robot teknolojisine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Özellikle empedans kontrolü konusunda ülkemizde sınırlı sayıda literatür bulunmaktadır. Bu sebeple, empedans kontrolü tekniğinin Türkçe literatüre kazandırılması ve ülkemizde yaygınlaşmasına katkıda bulunmak bizi motive etmektedir.

Ayrıca, tez çalışmasının yürüyüş ve nesne manipülasyonundaki önerilen yöntemlerin bilime katkısı, dört ayaklı robotların hareketleri hakkında daha detaylı bilgi sağlamak, tutucu kola sahip dört ayaklı robot kontrolünde matematiksel modelleme, empedans kontrolü ve optimizasyon tekniklerinin kullanılabilirliğini göstermek de bizi motive etmektedir.

Robotun ortam ve insanlarla temas ettiği durumlarda, temas kuvvetinin kontrol altında tutulması önemlidir. Tutucu kola sahip dört ayaklı robotun yürüyüş sırasında ortama ve nesne manipülasyonu sırasında nesneye, robotun kendisine ve kurtarma görevlerinde insana zarar vermemesi gerekmektedir.

Geleneksel tekniklerde, temas kuvvetinin doğrudan kontrolü sırasında bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Örneğin, sadece kuvvet kontrolü yapıldığında istenen konuma ulaşılamaması veya sadece konum kontrolü yapıldığında istenen kuvvetin sağlanamaması gibi durumlar ortaya çıkabilmektedir. Robotun ortama, manipülasyon yapılan nesneye, robotun kendisine ve kurtarma görevindeki insanlara zarar vermemesi için istenen kuvvet ve konumdan bir miktar sapmaya izin verilmesi gerekmektedir. Empedans kontrol tekniği, hem kuvvetin hem de konumun gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Ayaklı robotlar, tekerlekli robotlara kıyasla zorlu arazi koşullarında daha avantajlıdır. Özellikle deprem, nükleer ve kimyasal felaketler gibi insanların zarar görebileceği görevlerde, ayaklı robotlar kurtarma operasyonları sırasındaki arazi koşulları kötüleşir. Bu tür görevlerde dört ayaklı robotlar önemli bir avantaj sağlayabilir. Ancak, bu görevlerin bazı kritik noktalarında dört ayaklı robotun tutucu kolunun nesneye uyguladığı kuvvetin zarar verici boyutlara ulaşmadan gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, nesne manipülasyonu ve yürüme gibi temasla ilgili robot kontrolü alanında empedans kontrolü büyük önem taşımaktadır.

1.3. Tez Çalışmasının Bilime Katkısı

Bu tez çalışması, tutucu kola sahip dört ayaklı bir robot olan TUKSDAR'ın matematiksel modellemesini, optimum empedans kontrolünü ve yürüyüş optimizasyonlarını ele alarak, robot teknolojisine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Bu tezde aşağıdaki konular ele alınmıştır:

- TUKSDAR'ın matematiksel modelleme tekniği,
- TUKSDAR'ın kapı açma ve nesne manipülasyonu gibi görevlerde tutucu kol ve dört ayaklı robotun tutulan nesneye zarar vermeden empedans kontrolünün modellenmesi için özgün senaryo dizilerinin tasarlanması,
- Uygulanan senaryolar sırasındaki hareketlerin analizi,
- Tasarlanan empedans kontrol parametrelerinin optimizasyonu,
- Robotun hareket esnasında dengesini koruması için dinamik olarak gerekli önlemlerin alınması için empedans kontrolcünün tasarımı.

TUKSDAR'da kullanılan empedans kontrol tekniği, ayaklarda ve tutucu kolda PID tabanlı kartezyen empedans kontrolü uygulanmış olup, sadece tutucu kolun 6. mafsalındaki konumlamada P tabanlı empedans kontrolü kullanılmıştır. TUKSDAR'ın dengeleme sistemi, ayak uç noktalarının etkileşim konumlarını değiştirmek için ana gövdenin eğim açılarını kullanarak literatürdeki mevcut tekniklerden farklı bir yaklaşım ile gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımda, ön ve arka ayaklarda ayak uç noktası etkileşim noktası derinliği farklı bir teknikle uygulanmıştır. Ayrıca, ayak uç noktalarındaki etkileşim noktası ana gövdenin ileri ve yan eğim açılarına bağlı olarak ayrı ayrı kazanç parametreleri kullanılabilecek alt yapıda tasarlanmıştır. Ana gövdenin yerden yüksekliği, ayarlanabilir bir öteleme değişkenine bağlı olarak tasarlanmıştır. TUKSDAR'ın tutucu kolunun asimetric geometrisi nedeniyle ayak yürüme faz açıları 90°'den farklı olarak tasarlanmıştır.

Ayrıca, TUKSDAR'ın sağa sola dönüş sırasında ayakların yana doğru açılma hareketi, yönelme açısına bağlı olarak PI tabanlı kartezyen empedans kontrolü ile sınırlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Robotik araştırmalar geleneksel olarak endüstriyel uygulamalara odaklanmıştır. Ancak teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, robotik araştırmalardaki ilerlemeler, sadece insanların tekrarlayan görevlerine yardımcı olmakla kalmayıp, aynı zamanda günlük yaşamlarında da kullanılabilecek uygulama alanlarına doğru genişlemiştir. Bu süreçte, insan tarafından giyilebilen destekleyici eksoskeletonlar gibi uygulamalar da geliştirilmiştir ve bunlar insanların yeteneklerini artırma potansiyeline sahiptir. Özellikle insan kurtarma operasyonlarında, zorlu arazi koşulları sıklıkla karşılaşılan bir durumdur, bu nedenle zorlu arazilerde görev yapabilen robotların önemi artmaktadır (Chen ve ark 2017). Bu tip zorlu arazilerde dört ayaklı robotlar önem kazanmaktadır.

Literatürde, dört ayaklı robotların yürüme hareketlerini inceleyen araştırmalar bulunmaktadır (Harris 2017, Bakırcıoğlu ve Kalyoncu 2020, Şen 2020). Bu araştırmalar, robotun yürüme hareketlerinin matematiksel modellemesini, kontrolünü ve optimizasyonunu ele almaktadır.

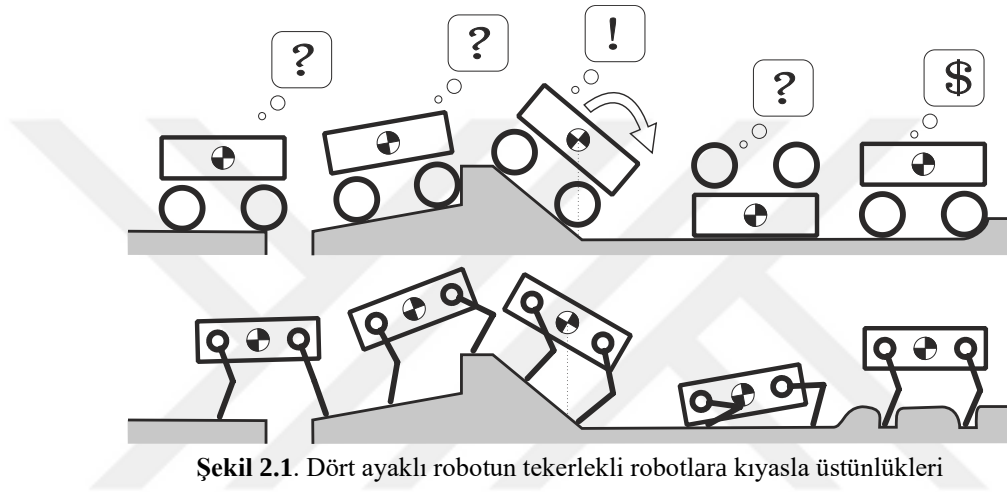
Doğal yaşamdan esinlenerek tasarlanmış hareketli dört ayaklı robotlar, uzun yıllardır araştırılan bir konudur. Bu robotlar özellikle zorlu arazi koşullarında, engebeli yüzeylerde ve acil durumlarda arama – kurtarma çalışmalarında kullanıma potansiyeline sahiptir (Hiller ve ark 2004, Raibert ve ark 2008, Şen ve Kalyoncu 2021).

Dört ayaklı robotlarda, çevre koşullarında kullanılan kontrol tekniği büyük bir öneme sahiptir. Literatürde, ayakların altında basınç sensörlerini kullanarak kontrolcü için geri besleme oluşturulması çalışmaları yapılmıştır (Tokuda ve ark 2003, Takahashi ve ark 2005), Şahin ve ark (2014a), (Krestovnikov ve ark 2020). Bu basınç sensörleri, reaksiyon kuvvetlerinin merkezini hesaplamak için sıfır moment noktasının hesaplanmasında kullanılır. Servo motorun konum kontrolü sırasında ayak basıncında ani değişiklikler meydana gelebilir. Bu durum, doğrusal olmayan durum kontrolünün zorlaşmasına neden olmaktadır. Ancak, bu olumsuz etki doğrusal olmayan kuvvet kontrol yöntemlerinde daha az belirgindir.

Robot ve çevre arasındaki etkileşim, doğrusal olmayan temas etkileşimleri içerdiği için oldukça zorlu bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Boaventura ve ark 2013). Dört ayaklı robotlarda, yer ile robot arasındaki etkileşim hiperstatik olduğundan, konum girişli kontrol teknikleriyle büyük zorluklarla karşılaşılmaktadır (Bruzzone ve Quaglia 2012). Ancak, kuvvet girişli kontrol teknikleri sayesinde hiperstatik problemlerin etkin bir şekilde kontrol edilmesi mümkün hale gelmektedir. Empedans

kontrolü, bu tür kontrol tekniklerinden biridir ve etkileşim alanındaki gürültülü girişlere karşı oldukça başarılı sonuçlar sunmaktadır (Erdemir ve Kalyoncu 2023d, e).

Robotik alanında, zor arazi koşullarında yük taşıma ve yürüme yeteneklerine sahip robotlar da önemli bir uygulama alanı bulmaktadır. Tekerlekli araçlar, zorlu arazi şartlarına giriş yapma veya araziye zarar verme konusunda sınırlılıklar yaşamaktadır (Bakırcıoğlu 2019). Bu nedenle, dört ayaklı robotlar daha büyük bir öneme sahiptir. Remy'nin (2011) çalışması, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, dört ayaklı robotların tekerlekli robotlara kıyasla avantajlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.1. Dört ayaklı robotun tekerlekli robotlara kıyasla üstünlükleri

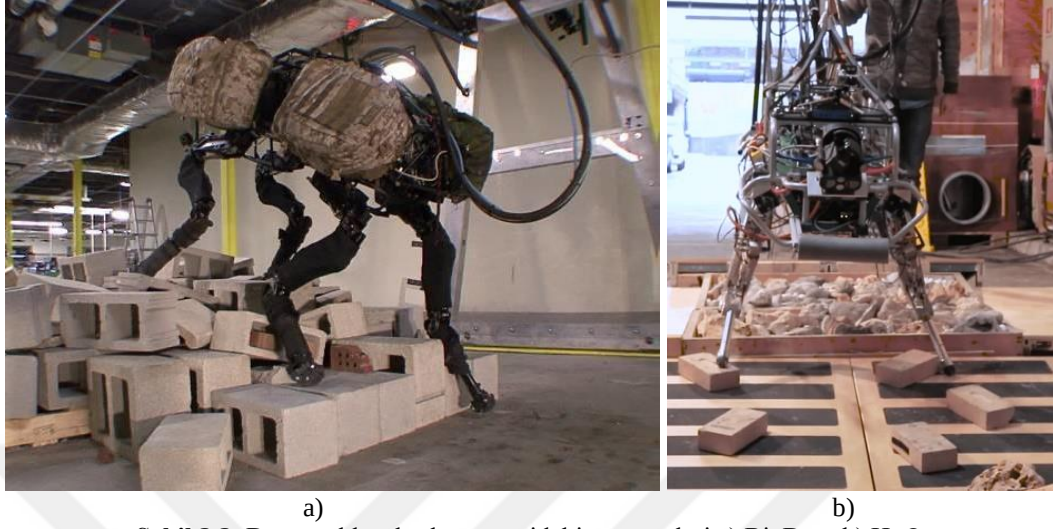
Dört ayaklı robotların tekerlekli robotlara kıyasla avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Engelleri aşabilme yeteneği
- Aktif süspansiyon sistemine sahip olması
- Engeli arazide hareket edebilme yeteneği
- Araziye daha az zarar vermesi
- Zorlu arazi koşullarında daha yüksek ortalama hıza sahip olması

Raibert ve ark (2008), Boston Dynamics tarafından 2005 yılında geliştirilmeye başlanan hidrolik tahrikli dört ayaklı BigDog robotunun zorlu arazi koşullarındaki yürüyüş testlerini gerçekleştirmişlerdir (Dynamics 2009). Şekil 2.2.a'da, BigDog robotunun arazideki yürüyüşü gösterilmiştir.

Focchi ve ark (2020), arazi koşullarında 85 kg kütleli hidrolik tahrikli HyQ isimli dört ayaklı robotu kullanarak, ayak uç nokta konumlarına bağlı olarak zemin

tahmini, yürüme ve denge kontrolü çalışmaları yapmışlardır. Şekil 2.2.b’de, HyQ robotunun arazideki yürüyüşü görülmektedir.



Şekil 2.2. Dört ayaklı robotların arazideki yürüyüşleri a) BigDog, b) HyQ

Remy ve ark (2011), Avrupa Uzay Ajansı tarafından desteklenen ALoF dört ayaklı robot projesi kapsamında, çok gevşek topraklı dik bir arazide zemini algılayabilen ve bu zeminde yürüyebilen bir robot geliştirmişlerdir. Şekil 2.3.a’da, ALoF robotunun arazideki yürüyüşü gösterilmektedir.

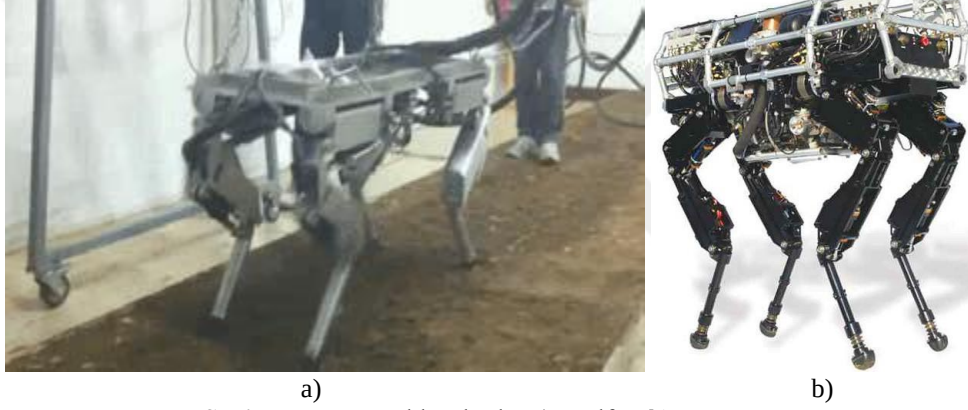
Kalakrishnan ve ark (2011), LittleDog dört ayaklı robot çalışmalarında, çeşitli arazi koşullarında ve beklenmedik engelleri aşmak için template learning algoritmasını kullanarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyonun amaç fonksiyonu, zemin kaymasını azaltma, ortamla çarpışmayı engelleme, ilerleme hızını artırma ve maksimum stabilite için poligon alanını genişletme gibi hedef fonksiyonları içermektedir. Şekil 2.3.b’de LittleDog robotunun arazideki yürüyüşü gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Dört ayaklı robotların arazideki yürüyüşleri a) ALoF, b) LittleDog

Rong ve ark (2012), hidrolik servo silindirli Scalf-1 adlı dört ayaklı robot çalışmalarında, kübik ve düz çizgilerden oluşan yörünge planlaması kullanarak, ana gövdenin ileri geri hızında ve ivmesinde ani değişimleri önlemeyi hedefleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.4.a'da, Scalf-1 robotunun arazideki yürüyüşü gösterilmektedir.

Kim ve ark (2013), Jinpoong adlı dört ayaklı robot çalışmalarında, ayak ile zemin arasındaki tepki kuvvetlerinin ani değişikliklerinin ana gövdenin dengesini olumsuz etkilemesini engellemek amacıyla ayaklara şok sönümleyici yay ve damper sistemleri tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.4.b'de, Jinpoong robotunun arazideki yürüyüşü gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Dört ayaklı robotlar a) Scalf-1, b) Jinpoong

Kapalı ortamlardaki kurtarma operasyonlarında, robotların kapı açma yetenekleri temel ihtiyaçlar arasında yer almaktadır. Kapı açılırken, kapıya zarar vermemek ve robotun da kendisine zarar vermemesini sağlamak önemlidir. Kapılar, bazıları geriye doğru açılan ve bazıları ileriye doğru açılan olmak üzere farklı tiplere sahiptir. Geriye doğru açılan kapılar özellikle zordur, çünkü kapı kolunu tuttuktan sonra geriye doğru çekme hareketi gerektirir. Bazı kapılarda ise dört çubuk mekanizmasıyla sürekli kapanma torku uygulayan yaylar bulunmaktadır. Yaylı kapılar bu durumu daha da zorlaştırmaktadır. Yaylı kapılarla başa çıkmak için robotun kapıyı sürekli olarak tutması gerekliliği de başka bir zorluk oluşturmaktadır.

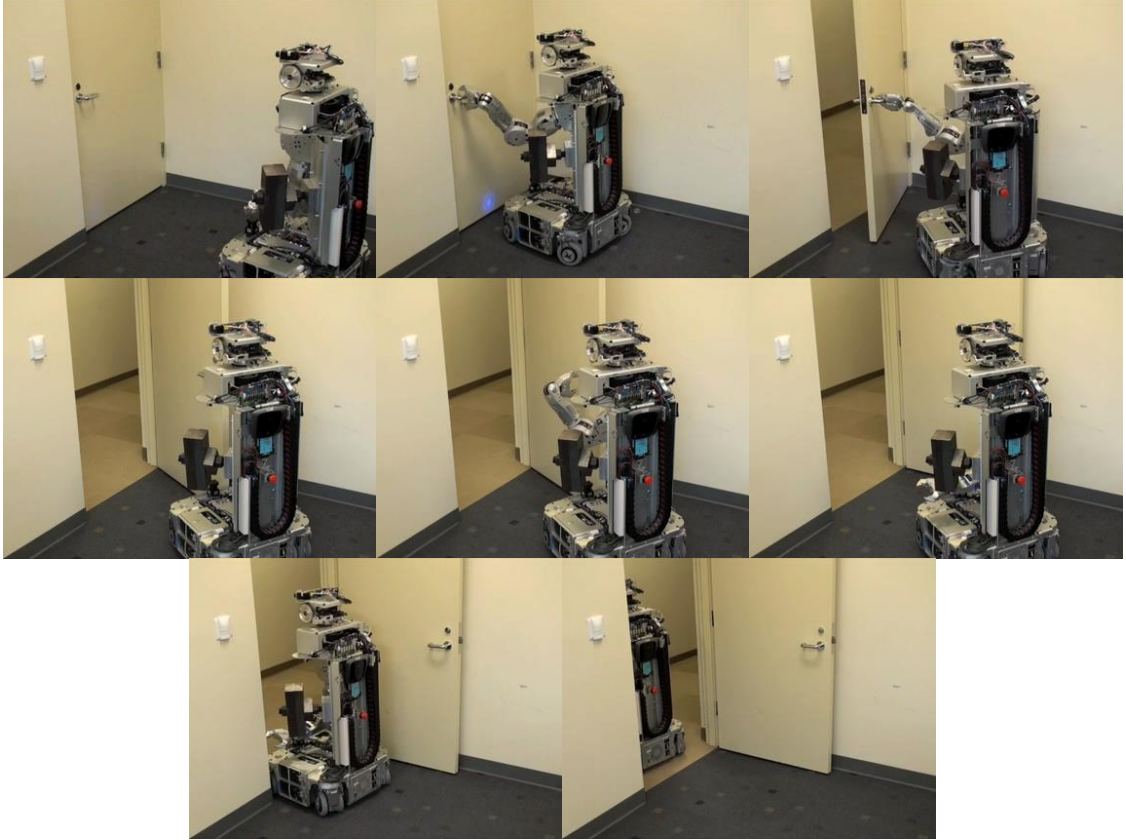
Kang ve ark (2003), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Hombot adlı tekerlekli mobil ev servis robotu kullanılarak kapı açma senaryosu uygulanmıştır. Şekil 2.5'te gösterilen kapı açma senaryosunda, kamera öncelikle kapı tokmağını tespit

etmektedir. Tutucu kol, kapı tokmağını tutmak için kullanılmakta ve kapı kilidini açmak için döndürülmektedir. Sonrasında robot, kapıyı kendine doğru çekmektedir. Bu senaryoda kapıdan geçme eylemi gerçekleştirilmemiş ve kapıda bir yay bulunmamaktadır.



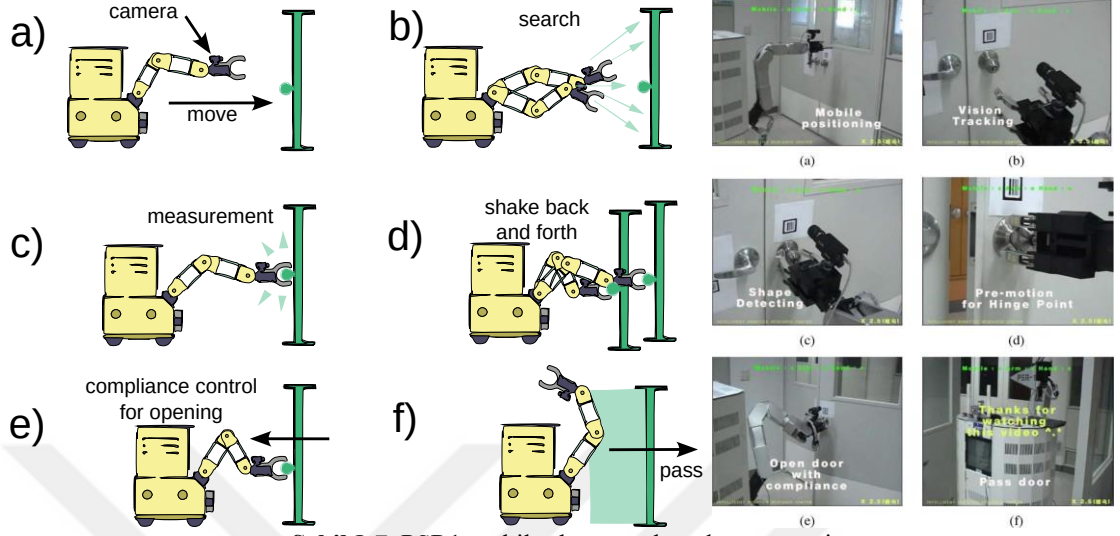
Şekil 2.5. Hombot mobil robotunun kapıyı açması

Chitta ve ark (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şekil 2.6’da görülen PR2 mobil robotunun içeriye doğru açılan bir kapıyı açması ve kapıdan geçmesi gösterilmiştir. Bu uygulamada, kapıda herhangi bir yay bulunmamaktadır.



Şekil 2.6. PR2 robotu içeriye açılan kapıyı açması

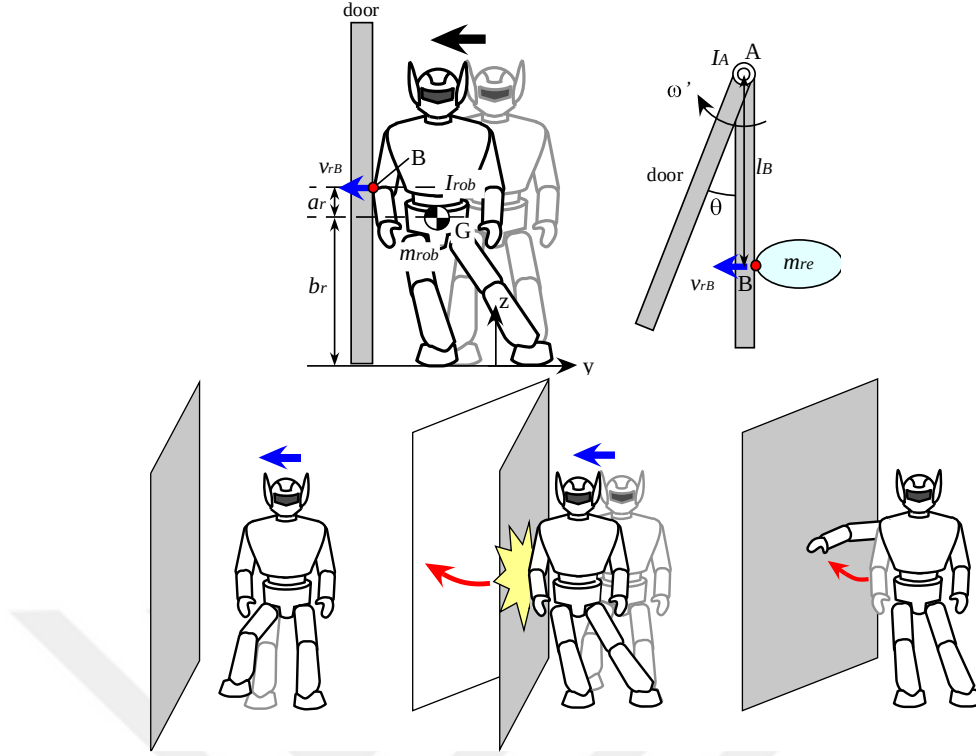
Chung ve ark (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Şekil 2.7’de gösterilen PSR1 mobil robotunun kapıdan geçme senaryosu gösterilmiştir.



Şekil 2.7. PSR1 mobil robotunun kapıdan geçmesi

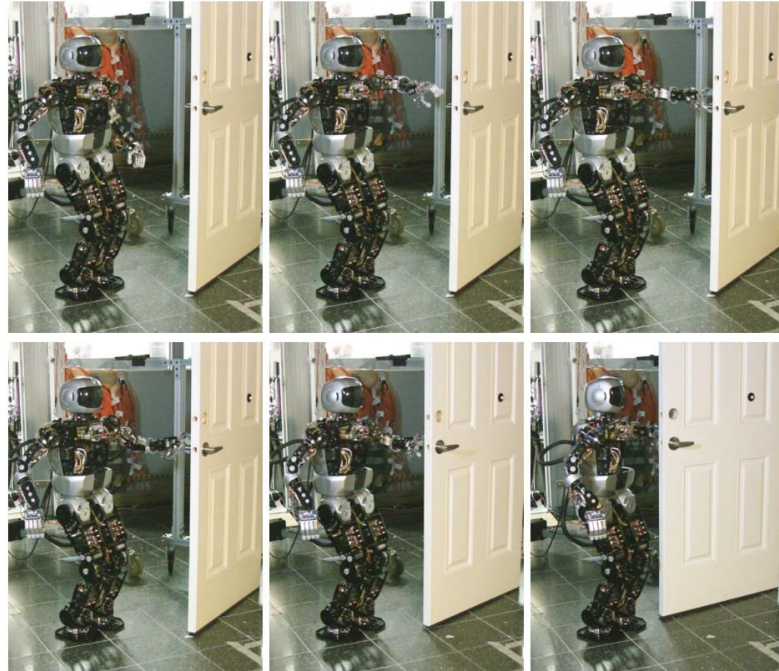
Bu uygulamada, robot 200 mm’lik bir konumlandırma hatasıyla kapıya yaklaşmaktadır. CCD kamera, kapı tokmağını 20 mm’lik bir hata payıyla tespit etmektedir. Tutucu kol, kapı kolu tutma eylemini gerçekleştirerek deneyler yapmakta ve doğrulamaktadır. Robot, kapıyı kendisine doğru radyal bir yörüngede çekmekte ve son olarak kapıdan geçmektedir. Bu uygulamada kapıda herhangi bir yay bulunmamaktadır.

Arisumi ve ark (2009), HRP2 insansı robotunda, dışarıya doğru açılan bir kapıyı açabilme senaryosunu gerçekleştirmek için belirli adımlar içeren bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Şekil 2.8’de gösterilen robot, öncelikle kapıya doğru adım atar, ardından tüm vücuduyla kapıya vurur ve oluşan momentum ile kapının son açıda açılmasına yardımcı olur. Bu senaryo, kapı açma işlemini gerçekleştirmek için kullanılan bir dizi adımı içermektedir.



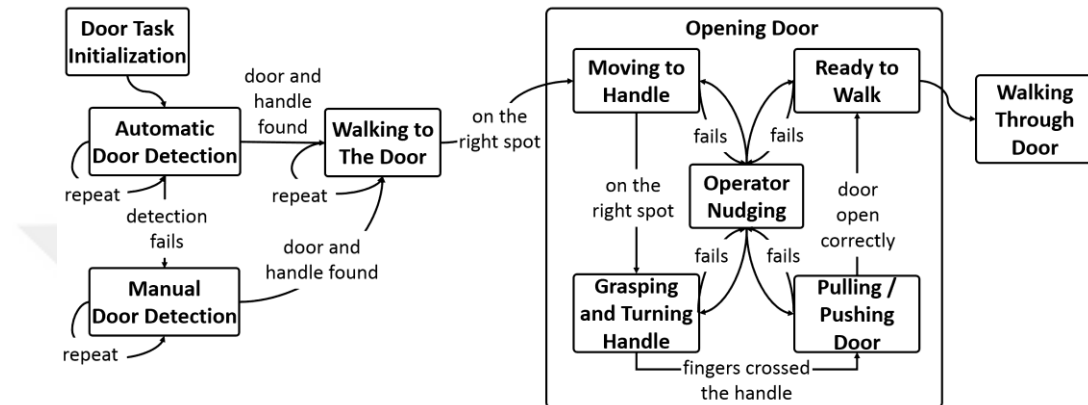
Şekil 2.8. HRP2 insansı robotunun ve kapının modeli (solda) ve HRP2 robotunun kapıyı açma dizisi (sağda)

Zucker ve ark (2013), içeriye doğru açılan bir kapıyı açma senaryosunu modellemek için Şekil 2.9’da görülen HUBO+ insansı robotunu kullanmışlardır. Bu çalışmalarında, robotun kapıyı bir miktar açmasını modellemişlerdir ancak kapıdan geçme işlemini gerçekleştirmemişlerdir.



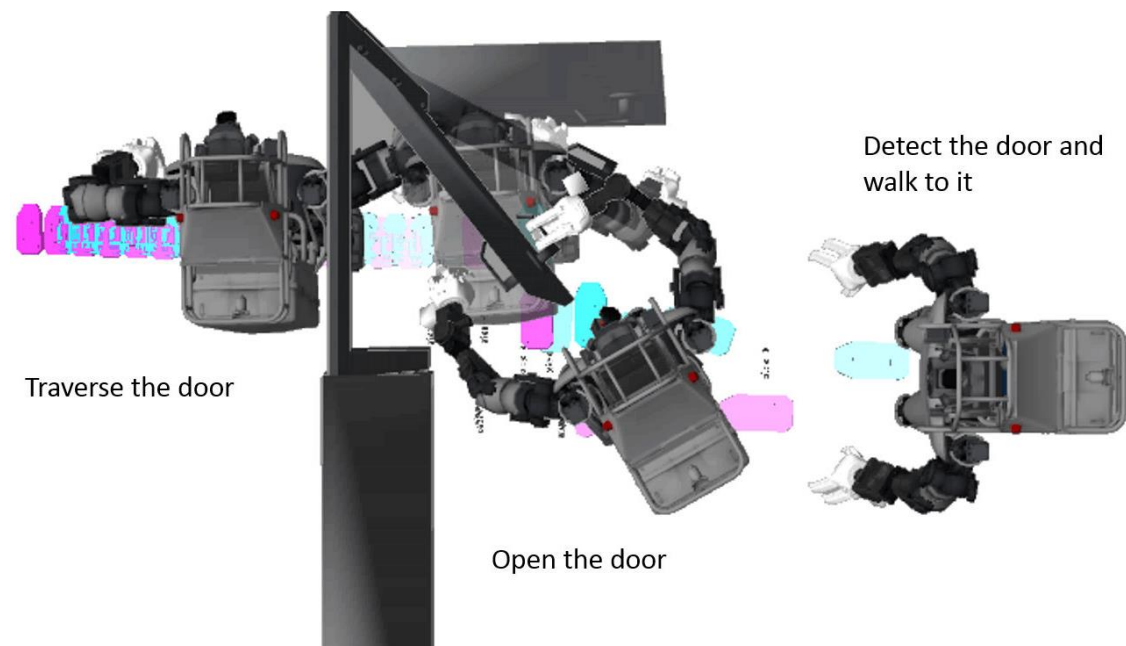
Şekil 2.9. HUBO+ insansı robotunun kısmi olarak kapıyı açma senaryosu

Banerjee ve ark (2015), Atlas insansı robotunda kapı açma ve kapıdan geçme görevini başarıyla gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.10’da gösterilen stratejiyi kullanarak, kapı tespiti, kapıya doğru yürüme hareketi, kapı koluna yönelme hareketi, kapı kolunu tutma hareketi, kapının itilmesi veya çekilmesi hareketi ve son olarak yürüme hareketi gibi adımlar tasarlanmıştır.



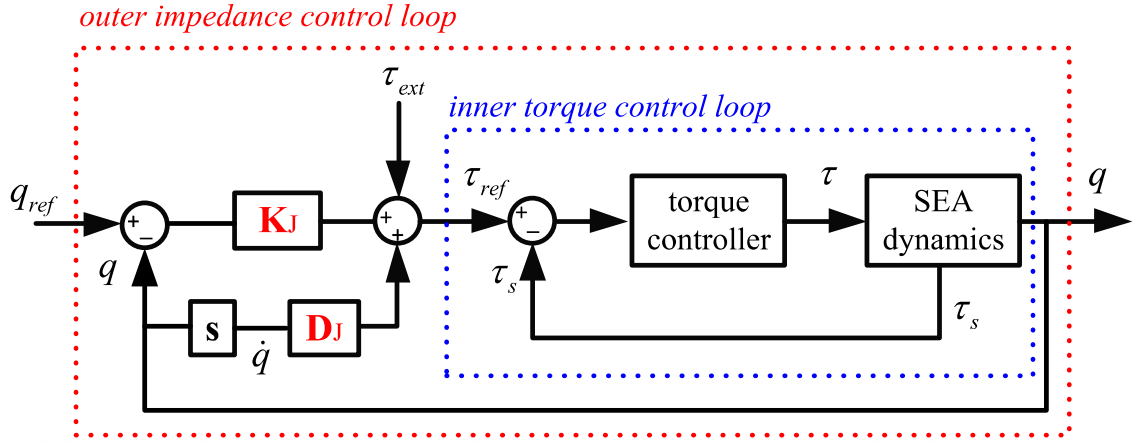
Şekil 2.10. Atlas insansı robotunun kapı açma stratejisi

Bu hareketlerin üstten görünüşü Şekil 2.11’de görsel olarak gösterilmiştir. Bu senaryoda yayı olmayan bir kapı kullanılmıştır. Robot, kapıya doğrudan yaklaşırken ve kapıdan geçerken yan geçme durumu da gözlenmiştir. Bu durum, kapıdan geçme senaryosunun hala güncel bir araştırma konusu olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.11. Atlas insansı robotunun kapıyı açma ve geçme senaryosu üstten görünüş

doğal bir şekilde el-kapı kolu etkileşimiyle kuvvet uygulaması denemiştir. Şekil 2.14'te bu empedans kontrol döngüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.14. CoMan insansı robotunda uygulanan empedans kontrol döngüsü

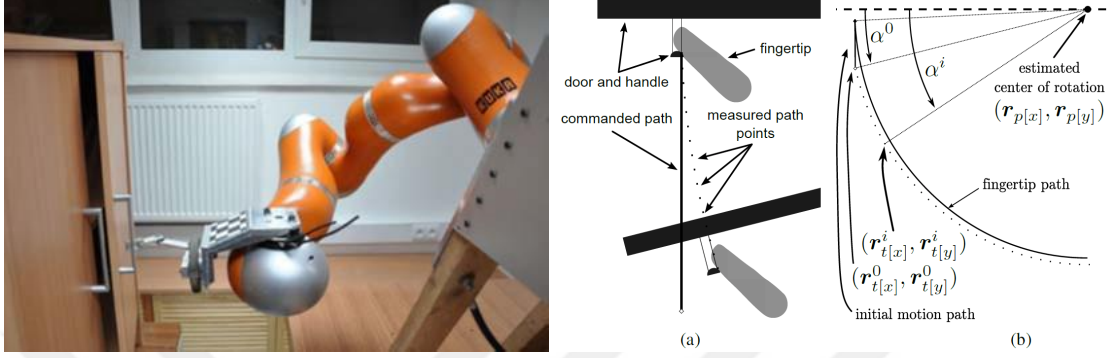
CoMan robotunda kapı açma senaryosu gerçekleştirilmiş olup, robot kapıdan geçmemiştir ve kapıda yay mekanizması bulunmamaktadır. Şekil 2.15'te, CoMan robotunun sağ eliyle kapıyı tutarak destek verdiği görülmektedir.



Şekil 2.15. CoMan insansı robotunun kapıyı açma görüntüsü

6 eksenli robot kollarındaki tekillik sorunları ve ortamdaki engellere temas etmeden etraftan dolaşma gereksinimi, redundant (gereğinden fazla serbestlik

derecesine sahip) robotlara olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, Winiarski ve Banachowicz (2013) tarafından yapılan çalışmada, Şekil 2.16’da gösterilen 7 serbestlik derecesine sahip bir redundant robot kullanılarak kapı açma probleminin empedans kontrolü ile çözümü gerçekleştirilmiştir.

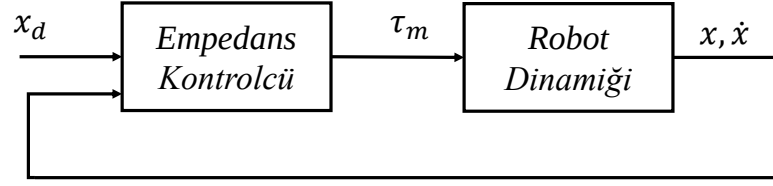


Şekil 2.16. 7 eksenli robot (solda), kapı açma algoritması (sağda)

Dört ayaklı robotların kontrolünde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında, açık çevrim kontrolü, kapalı çevrim kontrolü ve bulanık mantık kontrolü bulunmaktadır. Açık çevrim kontrolü, robotun hareketlerinin doğrudan kontrol edildiği bir yöntemdir. Kapalı çevrim kontrolü ise, robotun hareketleri geri bildirim mekanizmalarıyla kontrol edilir. Bulanık mantık kontrolü ise, belirsizlik ve gürültü gibi faktörlerin olduğu koşullarda etkili bir kontrol yöntemidir.

Gerçek dünya uygulamalarında, robotların önceden planlanmamış ortamlarda çalışabilmesi gerekmektedir. Bu tür senaryolar beklenmedik çevresel temasları veya istenmeyen etkileşimleri tetikleyebilir, bu da insanlara zarar verebilir veya robotun performansını olumsuz etkileyebilir. Empedans kontrol teknikleri kullanılarak sistemin davranışını ayarlamak, bu sorunlara etkili bir çözüm sunmaktadır (Erdemir ve Kalyoncu 2023a, b, c, f). Genellikle robot kullanıcıları, kontrolcü kazançlarını manuel olarak deneme-yanılma yöntemleriyle ayarlarlar. Bu yaklaşım genellikle yavaş ve pratiklik gerektirir. Dahası, karmaşık görevler farklı fazlarda farklı empedans gerektirebilir.

Hogan (1984a, 1984b), empedans kontrolü alanına önemli katkılarda bulunan tanınmış bir robot uzmanı ve kontrol sistemleri mühendisidir. Hogan, empedans kontrolü üzerinde 30 yılı aşkın bir süredir çalışmakta olup, bu alanda birçok makale, bildiri ve kitap yayınlamıştır. Temel empedans kontrol şeması, (Ott 2008) tarafından Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Konum, hız ve hedeflenen konumlar, empedans kontrolcü tarafından değerlendirilerek tork çıkışı hesaplanır ve robota iletilir.



Şekil 2.17. Temel empedans kontrolü

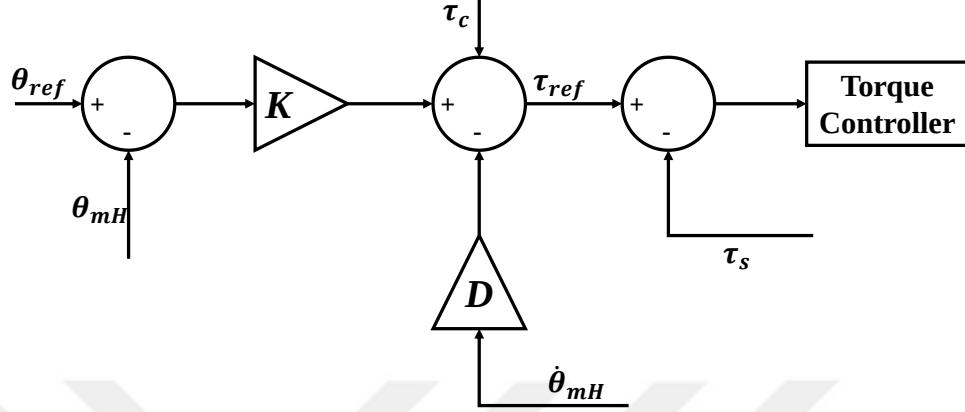
Hogan'ın empedans kontrolü alanındaki en önemli katkılarından biri, robotik sistemlerin empedans kontrolü üzerine yaptığı çalışmalardır (Lee ve ark 2014b). Hogan, robotik sistemlerin hareketlerini ve etkileşimlerini kontrol etmek için çeşitli empedans kontrol stratejileri ve algoritmaları geliştirmiştir (Won ve ark 1997). Aynı zamanda, insan motor kontrol sistemini anlamak ve empedans kontrol ilkelerini robotik sistemlerin performansını iyileştirmek için nasıl uygulayabileceğimizi araştırmıştır.

Robotlarla ilgili bir diğer sorun, robotikte önemli bir yer tutan ters kinematiğin bazen oldukça zorlayıcı olmasıdır (Şen ve ark 2017). Ters kinematik çözüm sayısı, robotun serbestlik derecesine, mafsallı bağlantı tiplerine ve her bir mafsaldaki döndürme eksenini oryantasyonlarının diğer mafsallara bağlı olarak değişmesine bağlı olarak zorlaşır. Özellikle kinematik olarak gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip robotlarda çözüm sayısı sonsuzdur. Ancak empedans kontrol tekniği, ters kinematik sorununu tamamen ortadan kaldırmıştır (Hogan 1984b). Empedans kontrolünde, etkileşim kuvvetleri uç noktanın konumsal hatasına bağlı olarak hesaplanır. Bu etkileşim kuvvetleri, Jacobian matrisinin transpozu ile çarpılarak mafsallarda torklara dönüştürülür. Dönüştürülen torklar motorlara uygulanarak, robotun uç noktası hedeflenen konuma hareket eder. Bu şekilde empedans kontrolü, ters kinematik gereksinimini de karşılar. Sadece ters kinematik çözüm özelliğini kullanmak için dahi empedans kontrolünün kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Winkler ve Suchý 2006).

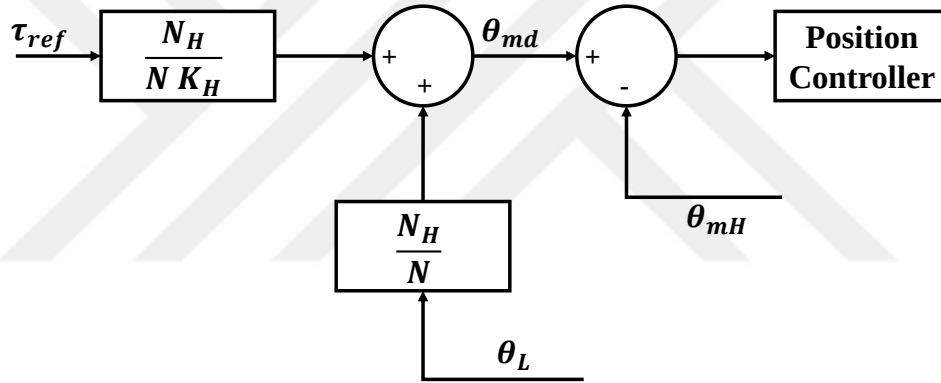
Mussa-Ivaldi ve Hogan (1991), kinematik olarak gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip yapıların kontrolü üzerine de çalışmalar yapmışlardır. Empedans kontrol tekniği, ters kinematik analizi gerektirmediği için kinematik olarak gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip yapılar için çok etkili bir kontrol sistemidir. Dinamik empedans kontrolü, değişken empedans kontrolü ve uyarlanabilir empedans kontrolü gibi çeşitli yeni yaklaşımlar da empedans kontrolüne yönelik olarak önerilmiştir. Bu yaklaşımlar, robotik kollar, dış iskeletler ve protez cihazlar gibi çeşitli robotik sistemlere uygulanmıştır.

Mosadeghzad ve ark (2012), empedans kontrol modelleme tekniklerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, dâhili açık tork döngüsü (ICT)

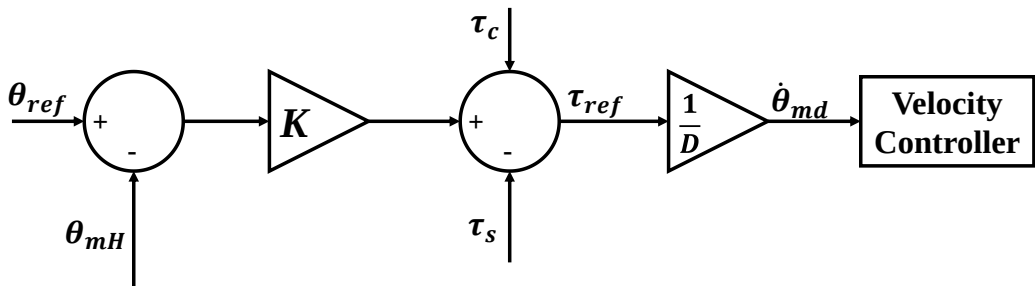
tekniki Şekil 2.18’de, dâhili hız döngüsü (ICV) tekniği Şekil 2.19’da ve konuma dayalı empedans kontrolü tekniği Şekil 2.20’de gösterilen üç farklı teknik arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 2.18. Dâhili açık tork döngüsü (ICT) ile empedans kontrolü



Şekil 2.19. Dâhili hız döngüsü (ICV) ile empedans kontrolü



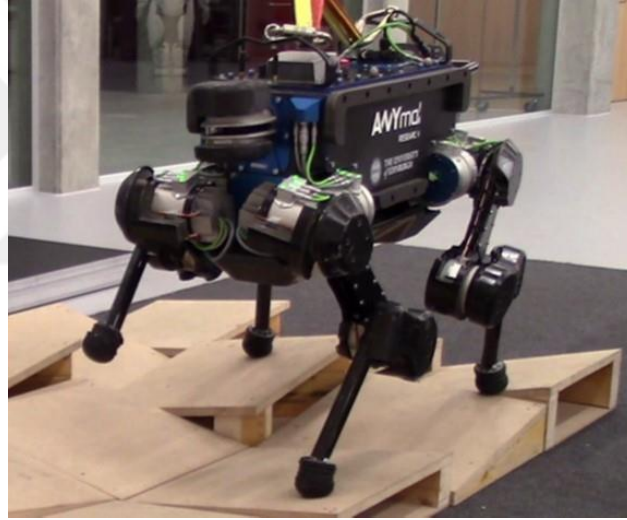
Şekil 2.20. Konuma dayalı (ICP) empedans kontrolü

Empedans kontrol mimarisinin seçimi, uygulamanın gereksinimlerine ve istenen empedans değişim hızının performansına bağlıdır. Uygun empedans kontrol şemasının mimarisi seçilirken, gerekli empedans aralığı, çalışma frekansı, stabilite, pasiflik, bant genişliği ve robotun mekanik ve elektriksel özellikleri gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Ayrıca, mevcut sensörler, akım veya voltaj kontrolü gibi etkenler de göz önünde

bulundurulmalıdır. Bu tez çalışmasında, konumsal hata girişli ve tork çıkışlı PID tabanlı kartezyen empedans kontrolü kullanılmaktadır. Bu tür kontrol şemaları arasında en uygun olanı, dâhili açık tork döngüsü ile empedans kontrolü olarak değerlendirilmektedir.

Dört ayaklı robotların nesne manipülasyonu konusu literatürde ele alınmıştır. Bu alanda, robotların tutucu kollarının empedans kontrolü, nesne algılama ve manipülasyonu üzerine araştırmalar yapılmıştır.

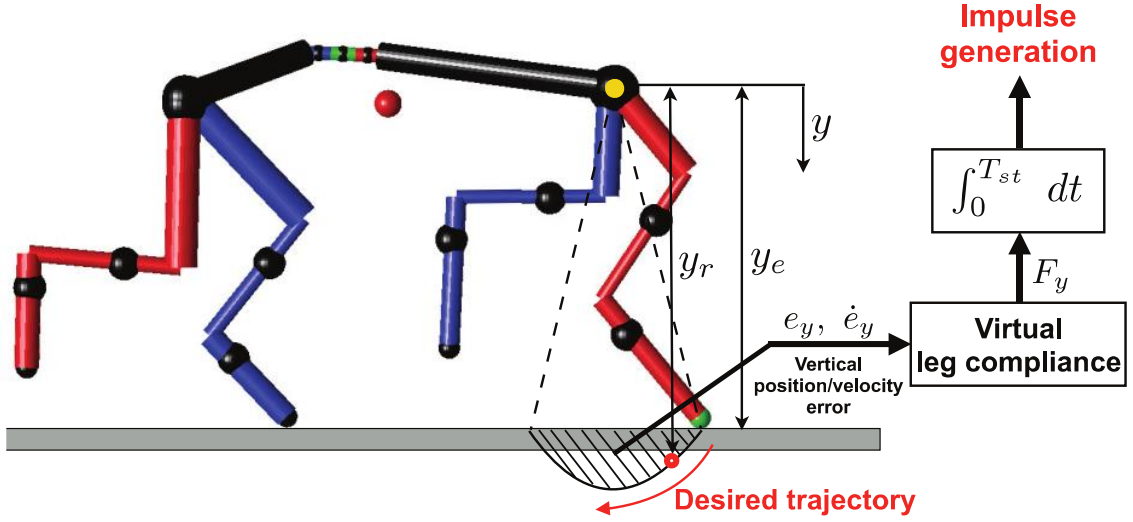
Angelini ve ark (2019), görev değişikliklerine, robot yapılandırmasına, beklenmedik bozucu girişlere, harici çevrelere ve istenen performansa uyum sağlamak için doğrudan kuvvet ölçümleri kullanmadan kartezyen robot empedansının çevrimiçi planlaması için bir optimizasyon algoritması sunmuşlardır. Önerilen yöntem, dört ayaklı robot ANYmal üzerinde uygulanmış ve Şekil 2.21’de bu uygulama gösterilmiştir.



Şekil 2.21. ANYmal dört ayaklı robotunun engebeli arazideki empedans kontrolü çalışması

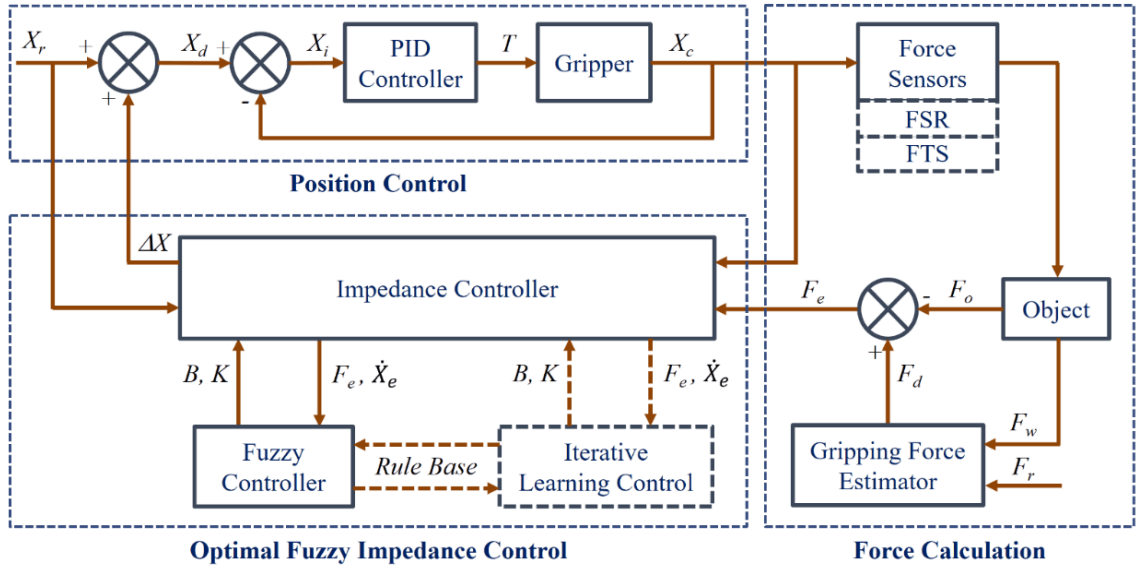
Yapılan çalışmalar, önerilen değişken empedans yönteminin robotun engebeli arazide yürümesi ve engellerle çarpışması gibi zorlu senaryolarla başa çıkmasına yardımcı olduğunu göstermektedir.

Hyun ve ark (2014), MIT Cheetah dört ayaklı robotu için empedans kontrol tekniğiyle programlanabilir bir sanal ayak uyumu modellemiştir. Geliştirilen kontrolcü modeli kullanılarak robotun hızının 6 m/s'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Geliştirilen yöntemde, ayak uç noktasının etkileşim konumunun daha derin bir şekilde yerin içine hedeflendiği Şekil 2.22’de görülmektedir.



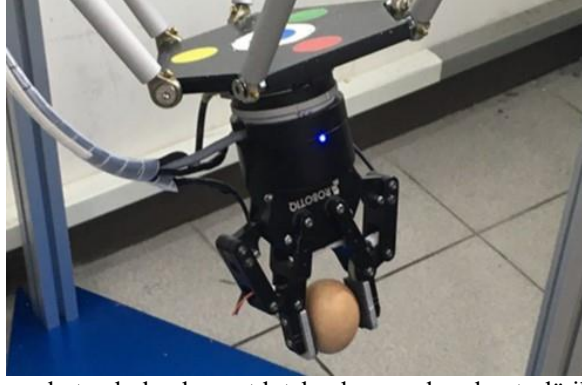
Şekil 2.22. MIT Cheetah dört ayaklı robotunun empedans kontrolünün etkileşim konumu

Huynh ve Kuo (2020), bir tutucu robot için bulanık mantık tabanlı empedans kontrolü ve iteratif öğrenme iterasyonlarını tek bir şemada birleştiren bir kontrol tekniği önermektedir. Şekil 2.23'te önerilen yöntemin şeması sunulmuştur.



Şekil 2.23. Bir tutucu robotun bulanık mantık tabanlı empedans kontrolü şeması

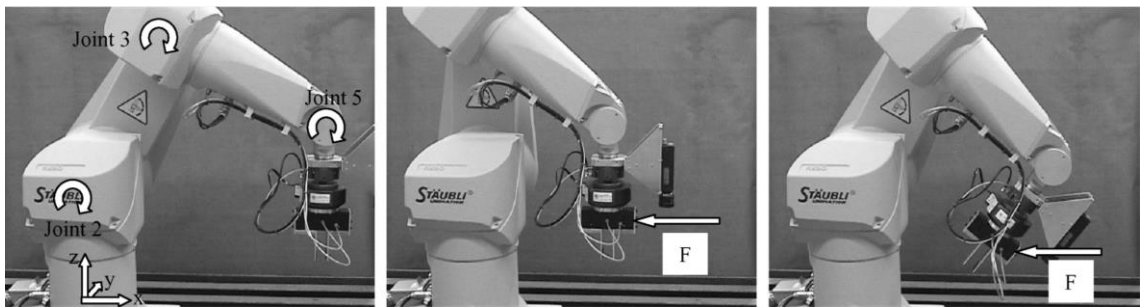
Öğrenebilen bulanık mantık tabanlı empedans kontrolü ile bilinmeyen bir cismin tutulabilmesi için önerilen yöntemde, çok sert ve çok yumuşak cisimlerin tutma işlemleri uygulanmıştır. Tutma işlemi için gereken sürtünme kuvveti, tutucu robot tarafından cismin ağırlığıyla birlikte ölçülmektedir. Bu ağırlığa karşılık gelen tutma kuvveti, bulanık mantık tabanlı empedans kontrolüyle uygulanmaktadır. Şekil 2.24'te uygulamanın görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Bir tutucu robotun bulanık mantık tabanlı empedans kontrolü ile bir nesneyi tutması

Balatti ve ark (2018), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, KUKA LBR IIWA 14 robotunda görev temelli etkileşim yörüngesinin planlamasında empedans kontrolcü parametrelerini otomatik olarak ayarlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Yerel sensör verileri kullanılarak, seçilen kartezyen eksenler üzerinde empedans kontrol parametrelerinin düzenlenebildiği gözlemlenmiştir.

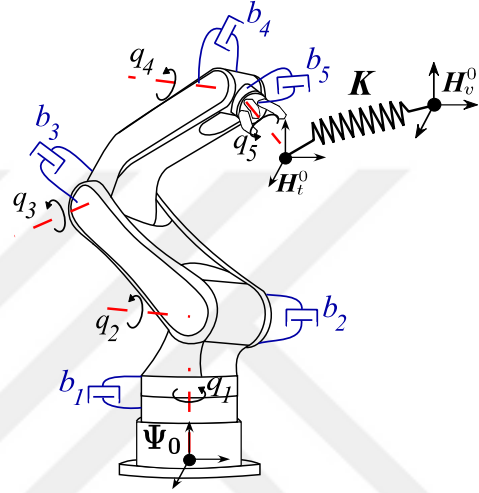
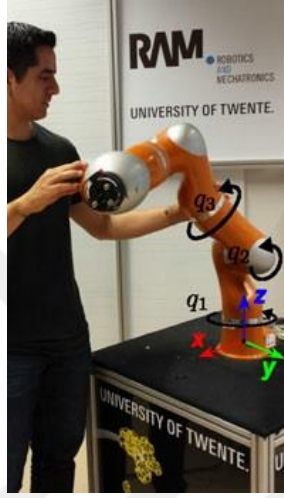
Winkler ve Suchý (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, işbirlikçi olmayan bir 6 serbestlik dereceli endüstriyel robotun ucuna yerleştirilmiş olan bir kuvvet/tork sensöründen elde edilen verileri kullanarak empedans kontrol algoritmasıyla insan eliyle robotun yönlendirilmesi araştırılmıştır. Kuvvet ve tork değerlerinin Jakobiyen matrisinin transpozuyla çarpılması, Jakobiyen transpoz tabanlı ters kinematik yöntemine benzerlik göstermektedir. Şekil 2.25'te uygulama sırasında elde edilen robot konumları gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Empedans kontrol algoritmasının ters kinematik amacıyla bir endüstriyel robotta kullanılması

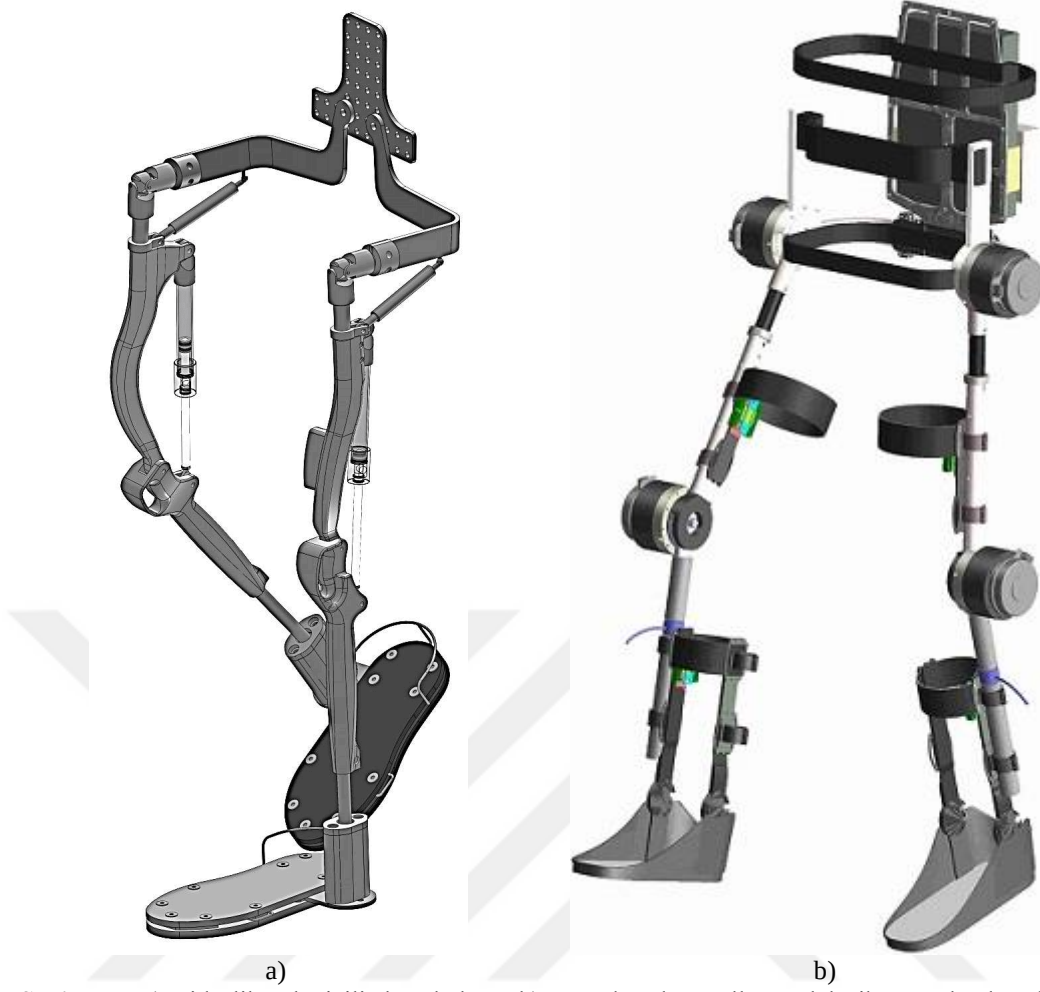
Wang ve Li (2010), bir 3 serbestlik derecesine sahip robot kolunda hem kuvvetin hem de konumun kontrolünü sağlamak amacıyla geliştirilen bir yöntemle hibrit bir empedans kontrol modellemesi gerçekleştirmiştir. Geliştirilen yöntemde düşük bir konum hatasıyla birlikte kuvvet kontrolü de başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Raiola ve ark (2018), işbirlikçi robotlar için empedans kontrol tekniğini uygulamışlardır. Bu amaçla, KUKA LWR 4+ robotunda gerçekleştirdikleri çalışmada enerji ve güç sınırlarıyla insan – robot etkileşimini simüle etmişlerdir. Ayrıca, gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip yapıların empedans kontrolündeki stabilitesini artırmak için her bir mafsalların açısıl konumlarının kontrolü için sanal yay ve damper katsayıları kullanmışlardır. Uygulamanın gösterimi Şekil 2.26’da yer almaktadır.



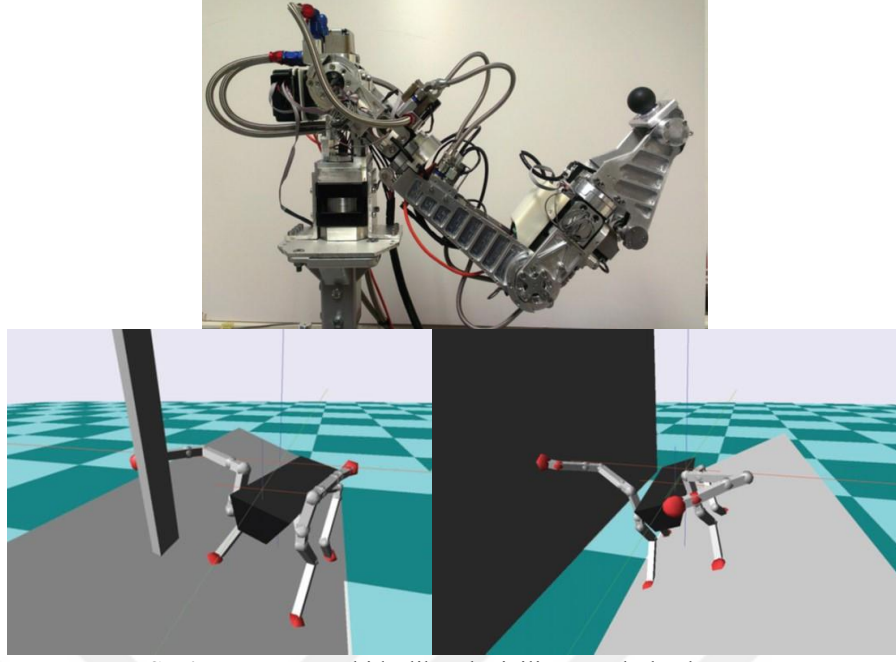
Şekil 2.26. KUKA-LWR 4+ robotu (solda). Her bir mafsaldaki sanal yaylar ve damperler ile hedef konum konfigürasyonunun gösterildiği kartezyen empedans kontrolü (sağda)

İnsan vücuduyla entegre olan giyilebilir robotlar, yani ekzoskeleto nlar, 50 yıldan uzun bir süredir araştırma konusu olmuştur (Önen ve ark 2013, Şahin ve ark 2014a, Şahin ve ark 2014b, Önen ve ark 2017). Rehabilitasyon, askeri ve benzeri alanlarda kullanılan ekzoskeleto nlarda da empedans kontrol tekniği kullanılmaktadır. Tran ve ark (2016), bulanık mantık tabanlı bir empedans kontrolcüsü kullanarak bir ekzoskeleto nu kontrol etmişlerdir. Bu teknik, ekzoskeleto n kullanan insanların konforunu artırmayı hedeflemektedir. Şekil 2.27’de Hidrolik eyleyicili ekzoskeleto n ve bulanık mantık tabanlı empedans kontrollü elektrik motorlu ekzoskeleto n gösterilmiştir.



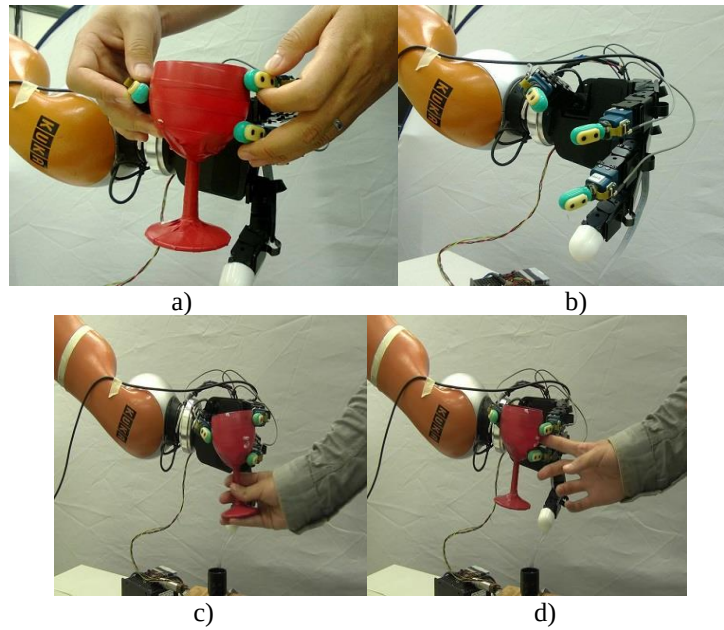
Şekil 2.27. a) Hidrolik eyleyicili eksozkeleton b) empedans kontrollü ve elektrik motorlu eksozkeleton

Dört ayaklı robotların sadece yük taşıma değil aynı zamanda nesne manipülasyonu da yapması artık bir ihtiyaç haline gelmiştir. Özellikle dört ayaklı robotlardaki tutucu kol ihtiyacının karşılanması üzerine yapılan araştırmalar hala önemini korumaktadır. Ur Rehman ve ark (2016), 80 kg kütleyle sahip dört ayaklı robotlar için 12.5 kg kütleyle sahip ve 743 mm uzunluğa kadar hareket edebilen 6 serbestlik derecesine sahip hidrolik eyleyicili bir tutucu kol olan Hyarm tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.28’de Hyarm gösterilmiştir.



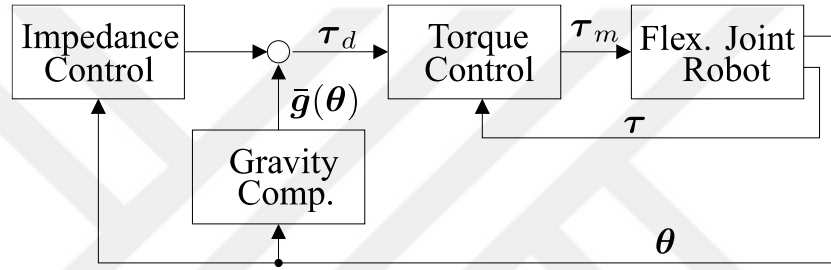
Şekil 2.28. Hyarm hidrolik eyleyicili tutucu kol çalışması

Empedans kontrolü, nesne odaklı görevlerde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle robotlarda hareketleri öğretme işlemlerinde empedans kontrolü tercih edilmektedir (Erdemir ve Kalyoncu 2023g). Li ve ark (2014), kararlı bir tutma ve nesne manipülasyonu için empedans kontrol tekniğinden yararlanmışlardır. Çalışmada, robotun uç noktası bir insan eli tarafından yönlendirilerek örnek bir tutma hareketi gerçekleştirilmiş ve daha sonra robot, öğrendiği şekli hatırlayarak empedans kontrolüyle nesneyi tutmuştur. Bu süreç, Şekil 2.29’da gösterilmektedir.



Şekil 2.29. Empedans kontrolü kullanılarak a) insanın robota nesne tutmayı öğretmesi (b – c) robotun öğrendiği konumlara göre kendisine uzatılan bardağı tutması

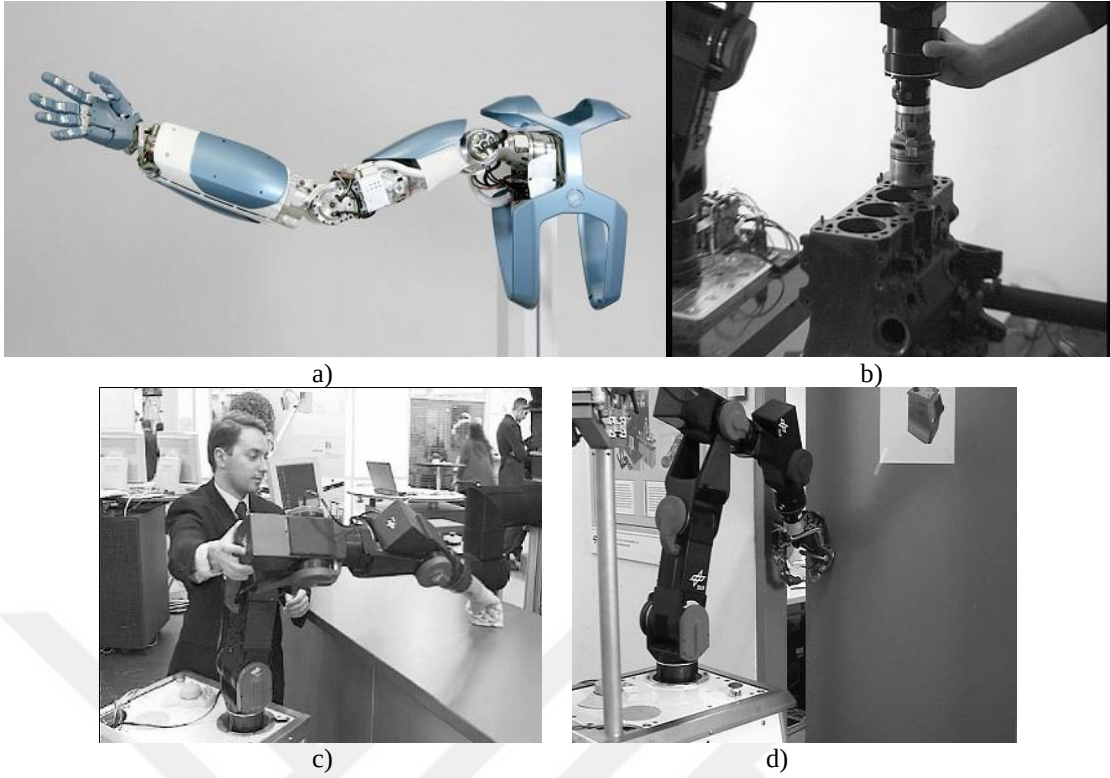
Ott ve ark (2005), DLR tutucu kolunun kontrolünde kartezyen empedans kontrolü kullanmışlardır. Ayrıca, yer çekimi denkleştirici modellenerek yer çekimi etkisini dengelemek için empedans torku ve yer çekimi etkisiyle oluşan torklar toplanarak robota iletilmiştir. Şekil 2.30'da gösterilen bu yöntem sayesinde, yer çekimi etkisi mafsallara uygulanarak tutucu koldaki yer çekiminin etkisiz hale getirilmesi sağlanmıştır. Yer çekimi denkleştirici, literatürde birçok empedans kontrol çalışmasında da kullanılmıştır (Volpe ve Khosla 1993, 1995, Zeng ve Hemami 1997, Ott ve ark 2004, Ott ve ark 2005, Albu-Schäffer ve ark 2007, Ott 2008, Mosadeghzad ve ark 2012, Tran ve ark 2016, Raiola ve ark 2018, Focchi ve ark 2020).



Şekil 2.30. Kartezyen empedans kontrolü çalışmasında yer çekimi denkleştirmesinin kullanılması

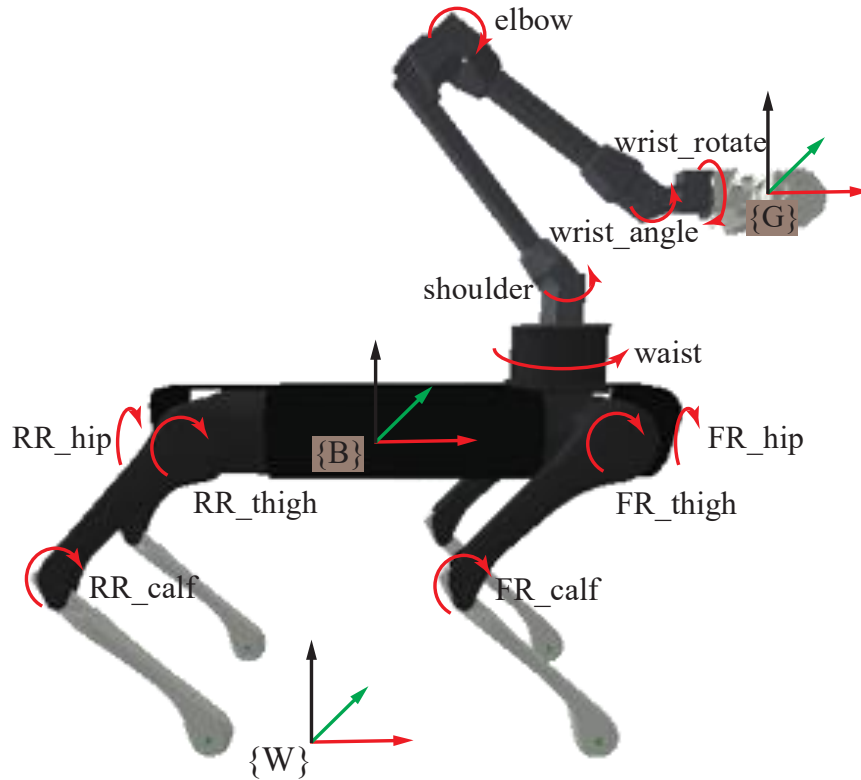
Petit ve Albu-Schäffer (2011), mafsalların rijitlik aralığını daha da artırmak için pasif mafsallarla birlikte aktif bir empedans kontrol sisteminin kullanımını analiz etmişlerdir. Pasif ve aktif kartezyen rijitliğini optimize etmek amacıyla bir algoritma önerilmiştir. Bu sistemde, değişken rijitlik eyleyciliği (VSA) olan DLR tutucu kol sistemi üzerinde kartezyen empedans kontrolünü uygulayarak test etmişlerdir. Kartezyen empedans kontrolü uygulanan DLR tutucu kol Şekil 2.31.a'da gösterilmiştir.

Albu-Schäffer ve ark (2007), DLR adlı tutucu kol sisteminde kartezyen empedans kontrol tekniğini uygulamışlardır. Empedans kontrolcüsünün yay katsayısı sıfır olduğunda, robot boş – uzay (null – space) hareketini gerçekleştirir. Bu durumda, robot dış etkilere tepki vermeden mafsallarının açısal konum değişimine izin verir. Yapılan araştırmada, Şekil 2.31.b'de boş – uzay hareketiyle piston montajının öğretimi, Şekil 2.31.c'de masa silme işleminin öğretimi ve Şekil 2.31.d'de kapının açılması gösterilmiştir.



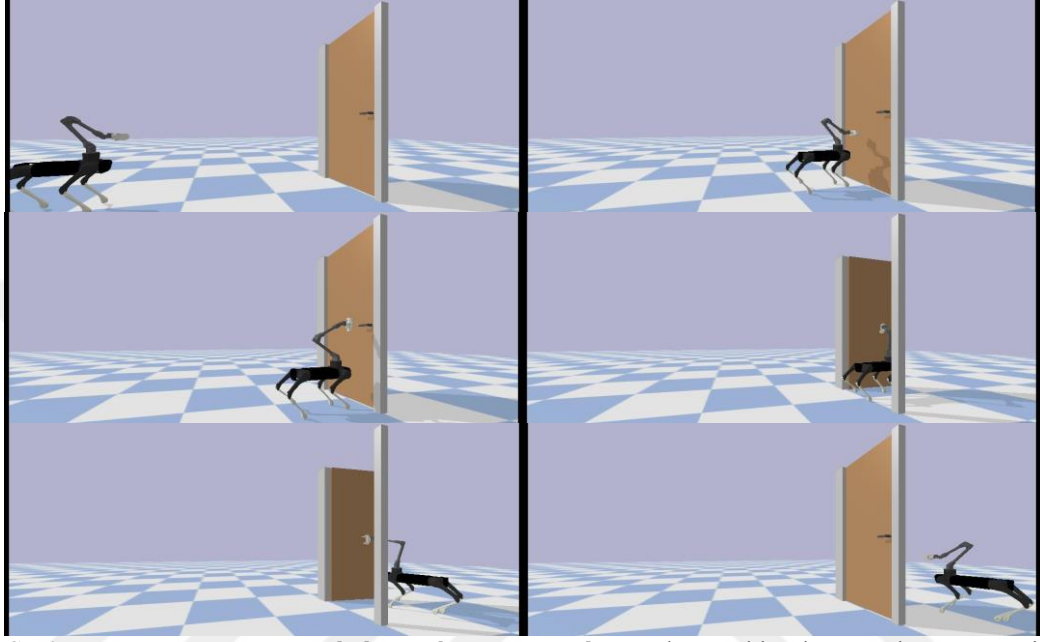
Şekil 2.31. DLR tutucu kolu ile empedans kontrolü uygulamaları

Li ve ark (2022), Unitree Aliengo dört ayaklı robotun üzerinde taşıdığı 5 serbestlik dereceli ViperX 300 robot kolunun görseli Şekil 2.32’de gösterilmektedir.



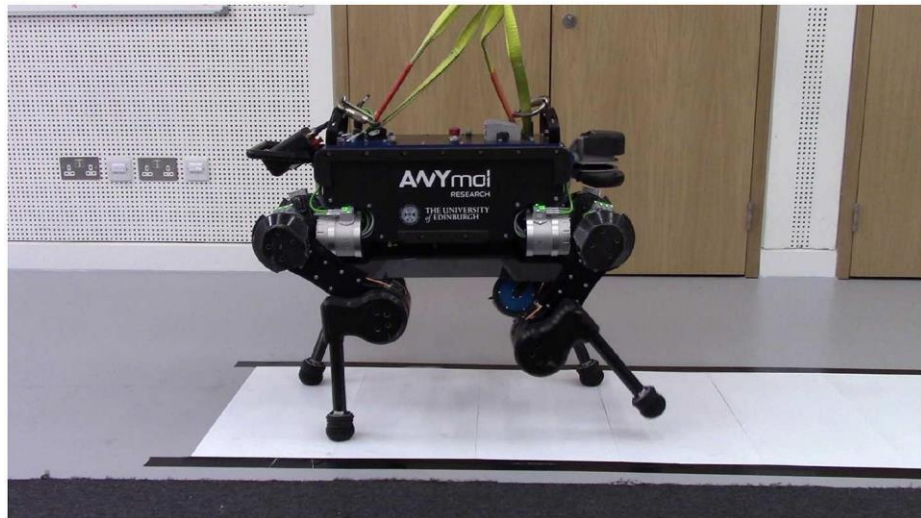
Şekil 2.32. Unitree Aliengo dört ayaklı robotu ve ViperX 300 robot kolu

Unitree Aliengo dört ayaklı robot, ViperX 300 tutucu kol ile donatılmıştır ve bu robot üzerinde kapı açma senaryosu uygulanmıştır. Bu senaryoda, robotun görevi, dışarıya doğru açılan yaylı bir kapıyı açmaktır. Şekil 2.33'te robotun bu görevi gerçekleştirirken simülasyon görüntüsü gösterilmiştir.



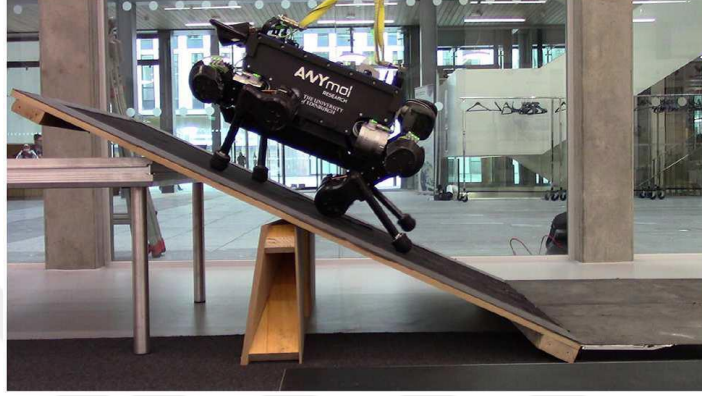
Şekil 2.33. ViperX 300 tutucu koluna sahip Unitree Aliengo dört ayaklı robotunun kapıyı görevi

Xin ve ark (2020), ANYmal dört ayaklı robotunda yarı analitik kartezyen empedans kontrol modellemesi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, modellemeyi Şekil 2.34'te gösterilen ANYmal robotu üzerinde gerçekleştirmişlerdir.



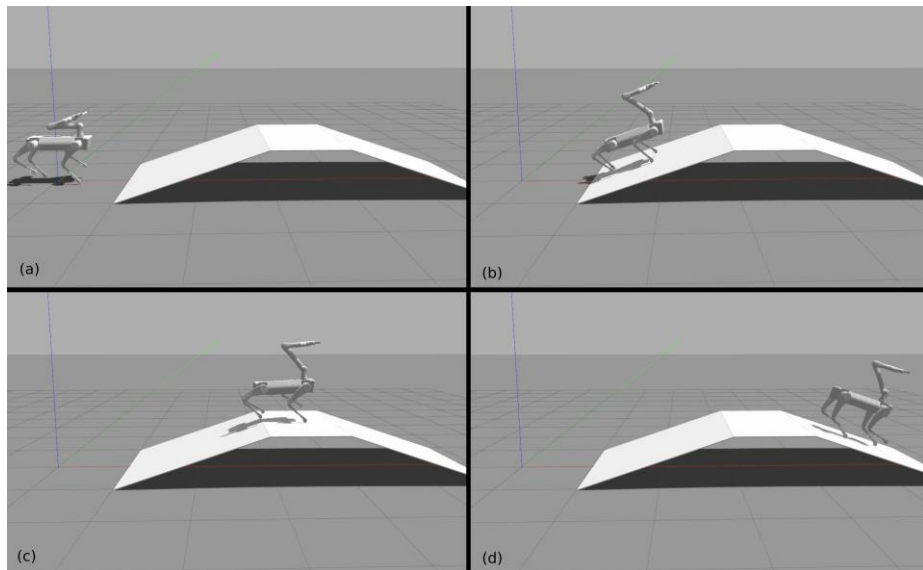
Şekil 2.34. ANYmal dört ayaklı robotunda kartezyen empedans kontrolü ile buzlu zeminde yürüyüşü

Bu çalışmada, tüm gövde kontrolcülerinin hesaplanması yerine sadece quadratik programlama kullanarak daha az kontrolcünün hesaplanmasının yeterli olabileceği araştırılmıştır. Bu teknik, sentetik buzlu düz zemin ve kuru 30° eğimli zemin gibi koşullarda yürüme performansını artırdığı gözlenmiştir. Eğimli zemindeki çalışma Şekil 2.35'te gösterilmiştir.



Şekil 2.35. ANYmal dört ayaklı robotunda kartezyen empedans kontrolü ile 30° eğimde yürüyüşü

Xin ve ark (2022), tutucu kola sahip dört ayaklı bir robotun simülasyon ortamında yapılan çalışmalarında, tutucu kolun sabit durduğu durumda ayak mafsallarının optimizasyon tabanlı tüm gövde kontrolcülerinin çözümü ile kontrol edilmesini araştırmışlardır. Ayrıca ayaklar sabit dururken tutucu kolun da aynı şekilde optimizasyon tabanlı kontrolünü incelemişlerdir. Önerilen yöntemin gereğinden fazla serbestlik derecesine sahip sistemlerin kontrolünde kullanılabileceği belirtilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan simülasyon modeli Şekil 2.36'da gösterilmiştir.



Şekil 2.36. Tutucu kola sahip dört ayaklı robot simülasyonlarda optimizasyon tabanlı kontrolü

Boston Dynamics tarafından geliştirilen ve ev ve ofis ortamlarına yönelik olarak tasarlanan SpotMini, ticari pazara sunulan ilk robotlardan biridir. Boston Dynamics, 1992 yılından bu yana dört ayaklı ve iki ayaklı robotlar üzerinde araştırmalarını sürdürmektedir. 2018 yılında, tutucu kola sahip olan SpotMini, ticari bir ürün olarak piyasaya sunulmuştur. Bu yeni nesil, elektrikle çalışan, küçük, çevik ve kompakt robot, stereo kameralar ve navigasyon gibi birçok gelişmiş teknolojiye sahiptir (Dynamics 2017). SpotMini, engelleri aşabilme, tırmanabilme, çevreyi algılayabilme ve haritalayabilme gibi çok yönlü yeteneklere sahiptir. Ayrıca, dinamik denge ve konum kontrol sistemlerine sahiptir (Dynamics 2018). Robot uzaktan kumandayla kontrol edilebilmesinin yanında, otonom olarak bazı zorlu görevleri gerçekleştirme yeteneğine de sahiptir (Niquille 2019). Şekil 2.37’de SpotMini’nin nesne manipülasyonu ve yay destekli kapıyı açma gibi görevleri icra ettiği görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.37. Tutucu kola sahip dört ayaklı robot SpotMini a) nesne manipülasyonu b) kapıdan geçme

Dört ayaklı robotların matematiksel modellemesi, robotik mühendislik ve kontrol sistemleri alanında büyük öneme sahip bir konudur. Bu bölümde, dört ayaklı

robotların matematiksel modelleri ve bu modellerin tasarım ve kontrolünde kullanılan yöntemler detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Dört ayaklı robotların kinematik ve dinamik modelleri, Denavit – Hartenberg parametreleri kullanılarak oluşturulur. Bu modeller, robotun hareketlerinin matematiksel olarak açıklanmasına yardımcı olur. Kinematik modeller, robotun pozisyon, hız ve ivme gibi hareket değişkenlerini hesaplamak için kullanılır. Dinamik modeller ise robotun hareketleri sırasında oluşan kuvvet ve torkları hesaplamak için kullanılır.

Kontrolcü parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili literatürde çalışmalar bulunmaktadır (Bakırcıoğlu ve ark 2015, Bakırcıoğlu ve ark 2016b, Bakırcıoğlu ve ark 2016a, Şen ve Kalyoncu 2018, 2019, Şen ve ark 2020). Bu çalışmada, empedans kontrolü parametrelerinin optimizasyonu için Arı Algoritması kullanılmıştır. Arı Algoritması, Pham ve ark (2006) tarafından önerilmiştir. Arı Algoritması, nüfus tabanlı bir global optimizasyon algoritması olup rastgele arama tabanlıdır belli kurallar çerçevesinde çalışır. Bu algoritmanın birçok farklı disiplinde kullanım potansiyeli bulunmaktadır (Erdemir ve Kalyoncu 2015, 2019, Erdemir ve ark 2022).

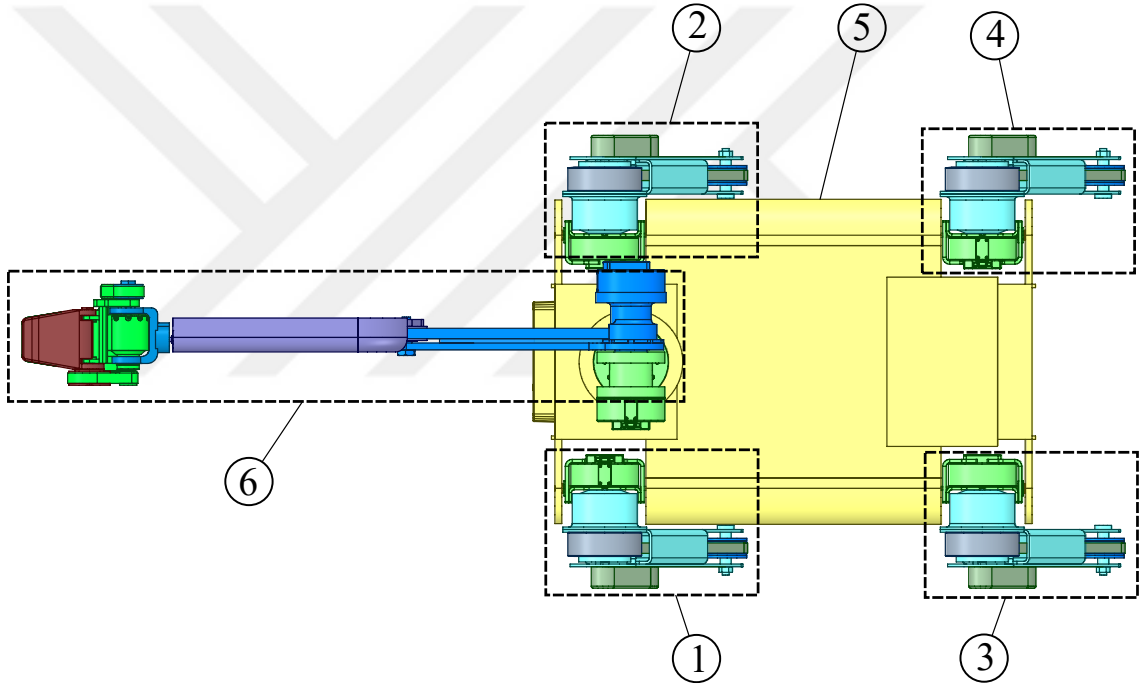
Pham ve Kalyoncu (2009), Arı Algoritması'nı tek uzuvlu esnek robot kolunun kontrolünde kullanılan bulanık mantık kontrolcü parametrelerinin optimizasyonunda kullanmışlardır. Bu çalışmada, amaç fonksiyonu olarak adım girişine karşılık gelen yükselme zamanı, tepe zamanı, bekleme zamanı, en yüksek hedef aşımı, yer değiştirme ve kalıcı hata sonuçlarını bir amaç fonksiyonunda ağırlık katsayıları ile çarparak elde etmişler ve bu amaç fonksiyonunun minimize edilerek iyileştirilmesi için Arı Algoritmasından yararlanmışlardır.

Pham ve Castellani (2009), Parçacık Sürü Optimizasyonu, Arı Algoritması, Yapay Arı Koloni algoritması ve Evrimsel Algoritmanın karşılaştırılmasında, çoğu durumda en iyi sonucun Arı Algoritması tarafından elde edildiğini ve bunu Yapay Arı Koloni algoritmasının takip ettiğini bulmuşlardır.

Sonuç olarak, bu kaynak araştırması, tutucu kola sahip dört ayaklı robotların matematiksel modellemesi, kontrolü ve optimizasyonu konularında önceki çalışmaların gerçekleştirildiğini ve bu alanın hala güncel bir konu olduğunu göstermektedir. Bu durum, tez çalışmasının bu alanda özgün bir katkı sağlayacağını göstermektedir.

3. TUTUCU KOLA SAHİP DÖRT AYAKLI ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Tutucu kola sahip dört ayaklı robot (TUKSDAR), iki robotun birleşiminden oluşmaktadır. Bunlar dört ayaklı robot ve tutucu koldur. Tutucu kol 6 serbestlik derecelidir. Tutucu koldaki tüm mafsallar döner mafsaldır. Dört ayaklı robot ise her bir ayağında 3 serbestlik derecesi olan mafsallardan oluşmakta olup toplamda 12 serbestlik derecelidir. Dört ayaklı robotun ayaklardaki tüm mafsalları döner mafsaldır. TUKSDAR toplamda 18 serbestlik derecesine sahiptir. Toplam kütlesi 42 kg'dır. Şekil 3.1'de TUKSDAR'ın bölümleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. TUKSDAR'ın alt sistemleri

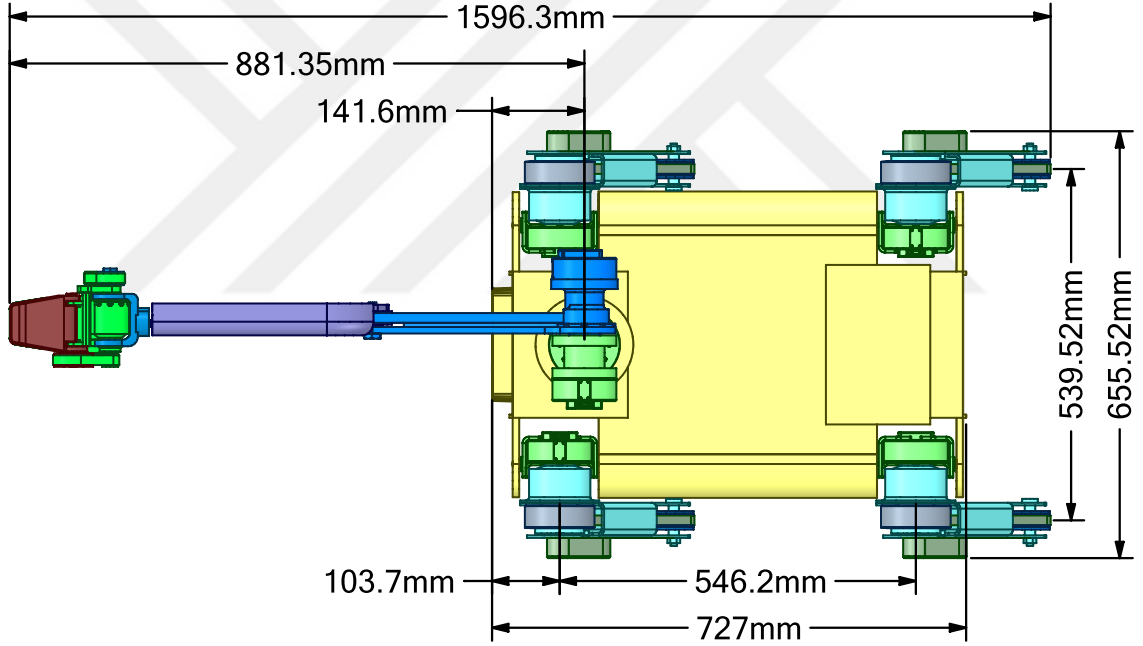
Çizelge 3.1'de TUKSDAR'ın Şekil 3.1'de görülen montaj numara açıklamaları verilmiştir.

Çizelge 3.1. TUKSDAR ana montaj tablosu

Montaj No	Gövde İsmi	Kütle [kg]
1	Sol ön ayak grubu	2.7
2	Sağ ön ayak grubu	2.7
3	Sol arka ayak grubu	2.7
4	Sağ arka ayak grubu	2.7
5	Ana gövde	24
6	Tutucu kol	7.2
	Toplam	42

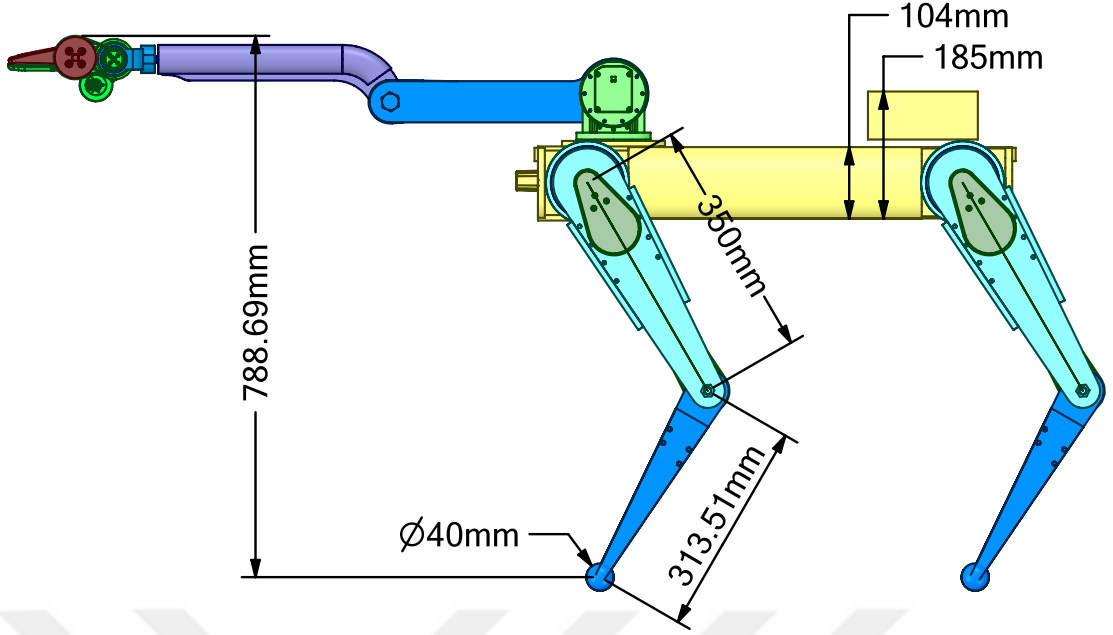
3.1. TUKSDAR Modelinin Oluşturulması

TUKSDAR'ın CAD modeli Spaceclaim yazılımında tasarlanmıştır. Şekil 3.2'de TUKSDAR'ın üstten görünüşü gösterilmiştir.



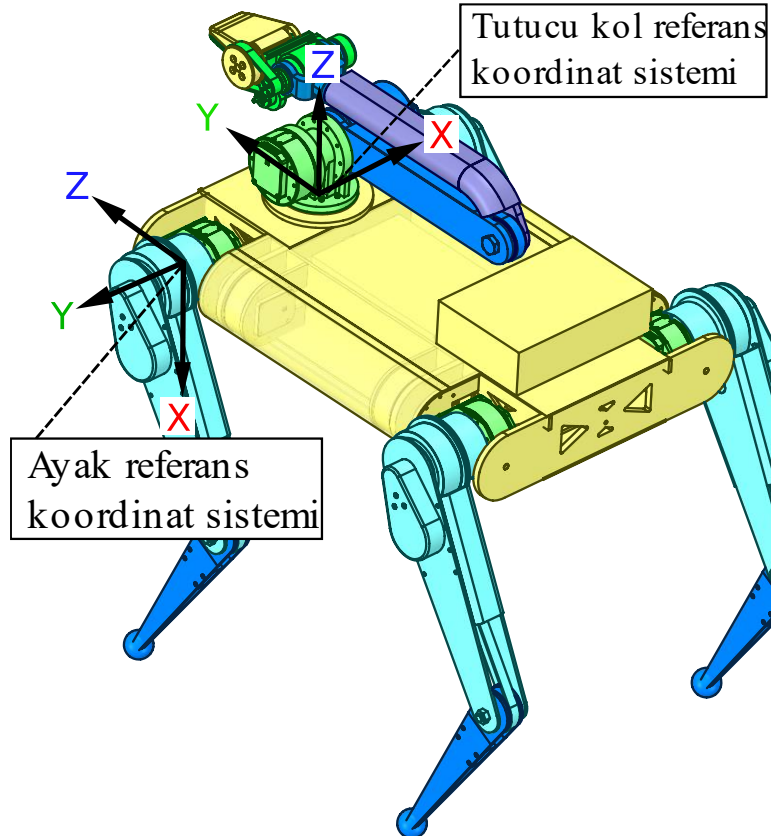
Şekil 3.2. TUKSDAR'ın üstten görünüş geometrik özellikleri

Tutucu kolun kule dönüşü merkezinden itibaren en açık mesafesi 881.35 mm'dir. TUKSDAR'ın genişliği 655.52 mm ve ana gövde uzunluğu 727 mm'dir. Şekil 3.3'te TUKSDAR'ın yandan görünüşü görülmektedir.



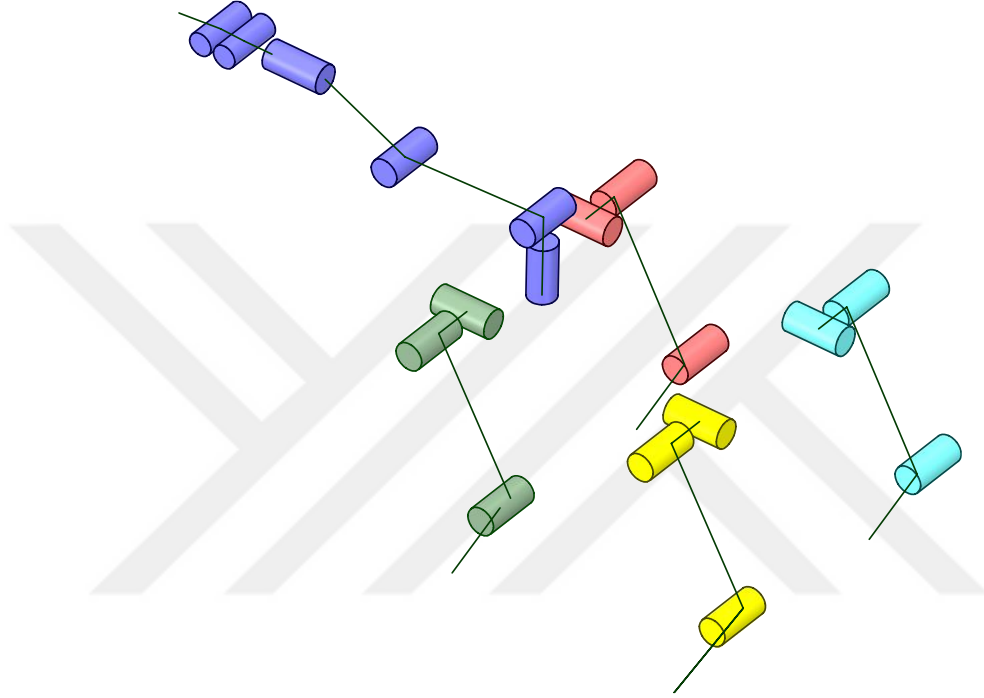
Şekil 3.3. TUKSDAR'ın yandan görünüş geometrik özellikleri

TUKSDAR'ın ana gövde yüksekliği 104 mm'dir. Tutucu kolun üst noktasının yerden yüksekliği 788.69 mm'dir. Dört ayağın her birinin ucu 40 mm çapında küresel bir geometriye sahiptir. Şekil 3.4'te TUKSDAR'ın tutucu kol ve ayakları için referans koordinat sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. TUKSDAR'ın referans koordinat sistemleri

TUKSDAR'ın geliştirilmiş koordinat sistemi ile tutucu kol referans koordinat sistemi çakışıktır. Fakat TUKSDAR'ın dört ayaklı robot bölümünün Denavit – Hartenberg parametrelerinin daha kolay oluşturulabilmesi için ayak referans koordinat sistemi Şekil 3.4'te görülen oryantasyonda her bir ayak için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Şekil 3.5'te TUKSDAR'ın döner mafsalları gösterilmiştir.



Şekil 3.5. TUKSDAR'ın döner mafsalları

TUKSDAR'ın bağımsız referans koordinat sistemlerine sahip açık uçlu gövde grupları ayrı ayrı renklerde Şekil 3.5'te gösterilmiştir. TUKSDAR toplamda 18 döner mafsala sahiptir.

3.2. Denavit – Hartenberg Parametre Tablosunun Oluşturulması

Bir robotun uç noktasının konumunu bir referans koordinat sistemine göre, düz kinematik kullanılarak mafsala açılarına bağlı olarak hesaplanabilir. Robotun matematiksel modellenmesini sistematikleştirmek için Denavit ve Hartenberg (1955) bir yöntem geliştirmiştir (Denavit ve Hartenberg 1956). İki adet Denavit – Hartenberg (D – H) dönüşüm metodu vardır (Reddy 2014).

1. Klasik Denavit – Hartenberg Metodu: Denavit ve Hartenberg'in 1956'da geliştirdiği yöntemdir. Bu yöntemde bir koordinat sisteminden bir sonraki

koordinat sistemine geçiş sırasında önce z ekseninde öteleme ve dönme hareketi, daha sonra da x ekseninde öteleme ve dönme hareketi uygulanır.

2. Değiştirilmiş Denavit – Hartenberg Metodu: Bu yöntemde klasik metodun aksine önce x eksenini etrafında öteleme ve dönme hareketi, daha sonra da z eksenini etrafında öteleme ve dönme hareketi uygulanır.

Bu tezde Klasik Denavit Hartenberg yöntemi kullanılmıştır. Klasik Denavit Hartenberg Metoduna göre her bir mafsala ait koordinat sistemi şu şekilde belirlenmektedir.

1. z_{i-1} eksenini, i. mafsala hareket ekseninde uzanacak şekilde seçilir.
2. x_i eksenini, z_{i-1} eksenine dik ve önceki mafsaldan uzağa işaret edecek şekilde seçilir.
3. y_i eksenini ise sağ el kuralına uygun bir şekilde koordinat sistemini tamamlayacak şekilde seçilir.

Bu kurala göre oluşturulan koordinat sistemleri ile artık D – H parametre tablosu şu şekilde doldurulur.

1. θ_i , x_{i-1} ekseninden x_i eksenine z_{i-1} eksenini etrafındaki sağ el kuralına göre mafsala açısıdır.
2. d_i , (i-1). koordinat sisteminin başlangıç noktasından z_{i-1} eksenini boyunca x_i eksenini ile kesiştiği mesafedir.
3. a_i , z_{i-1} ekseninin x_i eksenini ile kesişme noktasından x_i eksenini boyunca i. çerçevenin orijinine olan ötelenme mesafesidir (veya z_{i-1} ve z_i eksenleri arasındaki en kısa mesafedir).
4. α_i , z_{i-1} ekseninden z_i eksenine x_i eksenini etrafında sağ el kuralı kullanılarak döndürme açısıdır.

Denklem 3.1’de D – H dönüşüm matrisinin elde edilmesi için yukarıdaki sıra ile matrislerin çarpımı gösterilmiştir.

$${}^{i-1}A_i = T_z(d_i)R_z(\theta_i)T_x(a_i)R_x(\alpha_i) \quad (3.1)$$

Buradaki T_z , z eksenindeki öteleme matrisi ve T_x ise x eksenindeki öteleme matrisidir. Genelleştirilmiş T_{xyz} öteleme matrisi Denklem 3.2’de gösterilmiştir.

$$T_{xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta_x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta_y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Genelleştirilmiş T_{xyz} öteleme matrisinde Δ_x , Δ_y ve Δ_z sırasıyla x, y ve z eksenindeki ötelemeyi ifade etmektedir. R_z , z eksenine etrafındaki θ açısı ile döndürme matrisidir ve Denklem 3.3'te gösterilmiştir.

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

R_x ise x eksenine etrafındaki θ açısı ile döndürme matrisidir ve Denklem 3.4'te gösterilmiştir.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Denklem 3.1'deki çarpımın sonucunda elde edilen A homojen dönüşüm matrisi Denklem 3.5'te verilmiştir.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

TUKSDAR'ın matematiksel modeli iki ana bölümden oluşmaktadır:

1. Her bir ayağın matematiksel modeli 3.3 başlığında oluşturulmuştur.
2. Tutucu kola ait matematiksel model 3.4 başlığında oluşturulmuştur.

3.3. Ayakların Matematiksel Modeli

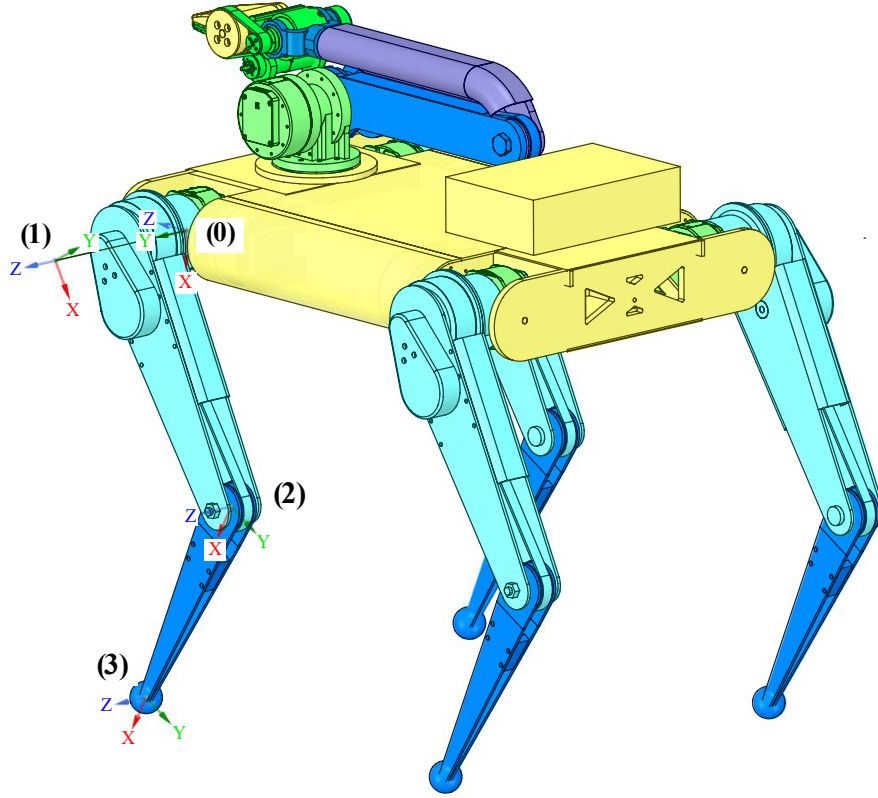
TUKSDAR'ın her iki sol ayağı birbiri ile aynı yapıdadır. Aynı şekilde her iki sağ ayağı da birbiri ile aynı yapıdadır. TUKSDAR'ın sol ve sağ ayakları arasındaki fark Denklem 3.6'da gösterilen f parametresi ile gösterilmiştir.

$$f = \begin{cases} 1, & \text{sol ayak} \\ -1, & \text{sağ ayak} \end{cases} \quad (3.6)$$

f parametresi D – H parametre tablosuna, kütle merkezi vektörlerine ve kütle atalet momenti matrislerine etki etmektedir.

3.3.1. Ayakların D – H Parametre Tablosu

Şekil 3.6’da TUKSDAR’ın ayaklarına ait koordinat sistemlerinin yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 3.6. TUKSDAR’a ait ayak mafsalları

Çizelge 3.2’de TUKSDAR’ın ayaklarına ait D – H parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ayak mafsallarının D – H parametre tablosu

Mafsal No	d [mm]	θ_0 [°]	a [mm]	α [°]
1	0	0	0	-90
2	$86.51 \cdot f$	0	350	0
3	0	0	313.375	0

TUKSDAR'ın ayaklarının homojen dönüşüm matrisleri ${}^{i-1}A_i$ ile ifade edilerek Denklem 3.7 – 3.9'da verilmiştir.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{1a} & 0 & -\sin \theta_{1a} & 0 \\ \sin \theta_{1a} & 0 & \cos \theta_{1a} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{2a} & -\sin \theta_{2a} & 0 & 0.35 \cos \theta_{2a} \\ \sin \theta_{2a} & \cos \theta_{2a} & 0 & 0.35 \sin \theta_{2a} \\ 0 & 0 & 1 & 0.08651 \cdot f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_{3a} & -\sin \theta_{3a} & 0 & 0.313375 \cos \theta_{3a} \\ \sin \theta_{3a} & \cos \theta_{3a} & 0 & 0.313375 \sin \theta_{3a} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.3.2. Ayaklar Mafsallarına Ait Tork Denklemi

TUKSDAR'ın ayak gövdelerinin kütleleri Denklem 3.10'da gösterilmiştir.

$$m_a = [0.691 \quad 2.755 \quad 0.486] [kg] \quad (3.10)$$

Ayak gövdelerinin matematiksel modeli oluşturulurken yerçekiminin bütün bileşenleri dahil edilmiştir. Bu durum TUKSDAR'ın ana gövdesinin yere tam paralel olmadığı anlarda da mafsallara uygulanması gereken torkun doğru hesaplanması için önem arz etmektedir. İvmeölçer sensörü ile ölçülen yerçekimi ivmesi vektörü Denklem 3.11'de gösterilmiştir.

$$g_a = [g_{xa} \quad g_{ya} \quad g_{za} \quad 0] [m/s^2] \quad (3.11)$$

İvme vektörünün 4. bileşeni matrisyel çarpımlarda boyutu uygun hale getirmek için kullanılmaktadır (Fu ve ark 1987). Her cismin kendi koordinat sistemine göre kütle merkezi Denklem 3.12'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} {}^1\bar{r}_{1a} &= \langle 0.00145 \quad -0.00034 \quad -0.01551 \cdot f \quad 1 \rangle [m] \\ {}^2\bar{r}_{2a} &= \langle -0.28334 \quad 0 \quad -0.00575 \cdot f \quad 1 \rangle [m] \\ {}^3\bar{r}_{3a} &= \langle -0.21813 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \rangle [m] \end{aligned} \quad (3.12)$$

g_a , Şekil 3.4'te gösterilen ayak referans koordinat sistemine göre etki eden yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. İvme sensörünün çıktısı olarak TUKSDAR'a etki eden ivmenin tüm bileşenleri alınmaktadır. Bütün denklemler g_x , g_y ve g_z bileşenlerini ihtiva edecek şekilde tanımlanmıştır. g_a ivme vektörünün tutucu kol koordinat sistemine göre tanımlanan g vektörüne göre dönüşümü Denklem 3.13'te gösterilmiştir.

$$[g_{xa} \ g_{ya} \ g_{za} \ 0] = [-g_z \ -g_x \ g_y \ 0] \quad (3.13)$$

Her bir ayak gövdesinin kendi koordinat sistemine göre I_a kütle atalet momenti matrisleri Denklem 3.14 – 3.16'da verilmiştir.

$$I_{1a} = \begin{bmatrix} 0.600 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.343 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.687 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.14)$$

$$I_{2a} = \begin{bmatrix} 2.593 & 0.000 & 1.755 \cdot f \\ 0.000 & 22.883 & 0.000 \\ 1.755 \cdot f & 0.000 & 22.851 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.15)$$

$$I_{3a} = \begin{bmatrix} 0.146 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 8.01 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 8.07 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.16)$$

TUKSDAR'ın ayaklarının genelleştirilmiş hareket denklemi Denklem 3.17'de verilmiştir (Ott 2008, Balatti ve ark 2018, Sun ve ark 2023).

$$M_a(q)\ddot{q} + C_a(q, \dot{q}) + G_a(q) = \tau_{act, a} + \tau_{ea} \quad (3.17)$$

M_a atalet matrisi, C_a koriolis ve merkezkaç matrisi ve G_a yerçekimi matrisini göstermektedir. i. mafsala ait tork denklemi (Fu ve ark 1987) Denklem 3.18'de verilmiştir.

$$\tau_{act, ia} = \sum_{k=1}^n M_{ika} \ddot{\theta}_{ka} + C_{ia} + G_{ia} \quad (3.18)$$

İvme ile ilgili simetrik matris (Fu ve ark 1987, Kurtuhuz ve Dumitru 2021), M_{ika} formülü Denklem 3.19'da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
M_{11a} &= Tr(U_{11a} J_{1a} U_{11a}^T) + Tr(U_{21a} J_{2a} U_{21a}^T) + Tr(U_{31a} J_{3a} U_{31a}^T) \\
M_{21a} &= Tr(U_{21a} J_{2a} U_{22a}^T) + Tr(U_{31a} J_{3a} U_{32a}^T) \\
M_{31a} &= Tr(U_{31a} J_{3a} U_{33a}^T) \\
M_{12a} &= Tr(U_{22a} J_{2a} U_{21a}^T) + Tr(U_{32a} J_{3a} U_{31a}^T) \\
M_{22a} &= Tr(U_{22a} J_{2a} U_{22a}^T) + Tr(U_{32a} J_{3a} U_{32a}^T) \\
M_{32a} &= Tr(U_{32a} J_{3a} U_{33a}^T) \\
M_{13a} &= Tr(U_{33a} J_{3a} U_{31a}^T) \\
M_{23a} &= Tr(U_{33a} J_{3a} U_{32a}^T) \\
M_{33a} &= Tr(U_{33a} J_{3a} U_{33a}^T)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Hız matrisi U_{ija} , Denklem 3.20’de gösterilen A_{jia} matrisinin j. mafsalsal açısı θ_{ja} ’ya göre türevidir. Hesaplanan 3x3 U_{ija} hız matrisleri EK-1’de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
U_{ija} &= \begin{cases} {}^0A_{j-1} Q^{j-1} A_i & , j \leq i \\ 0 & , j > i \end{cases} \\
U_{11a} &= Q^0 A_1 \\
U_{21a} &= Q^0 A_2 \\
U_{31a} &= Q^0 A_3 \\
U_{22a} &= {}^0A_1 Q^1 A_2 \\
U_{32a} &= {}^0A_1 Q^1 A_3 \\
U_{33a} &= {}^0A_2 Q^2 A_3
\end{aligned} \tag{3.20}$$

A matrisleri homojen dönüşüm matrisleri olduğundan, türevini elde etmek için Q matrisi ile soldan çarpmak yeterlidir. Döner mafsallar için Q matrisi Denklem 3.21’de verilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Genelleştirilmiş atalet tensörü J_i Denklem 3.22’de ve i. koordinat sistemine göre ayaklara ait i. gövdelerin atalet tensörü J_{ia} Denklem 3.23 – 3.25’te verilmiştir.

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{ixx} + I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{ixy} & I_{ixz} & m_i \bar{x}_i \\ I_{ixy} & \frac{I_{ixx} - I_{iyy} + I_{izz}}{2} & I_{iyz} & m_i \bar{y}_i \\ I_{ixz} & I_{iyz} & \frac{I_{ixx} + I_{iyy} - I_{izz}}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$J_{1a} = \begin{bmatrix} 2.15 \cdot 10^{-4} & -8 \cdot 10^{-8} & 6.58 \cdot 10^{-6} & 1 \cdot 10^{-3} \\ -8 \cdot 10^{-8} & 4.72 \cdot 10^{-4} & 1.47 \cdot 10^{-6} & -2.35 \cdot 10^{-4} \\ 6.58 \cdot 10^{-6} & 1.47 \cdot 10^{-6} & 1.28 \cdot 10^{-4} & -1.07 \cdot 10^{-2} f \\ 1 \cdot 10^{-3} & -2.35 \cdot 10^{-4} & -1.07 \cdot 10^{-2} f & 0.691 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$J_{2a} = \begin{bmatrix} 2.16 \cdot 10^{-2} & 4 \cdot 10^{-8} & -1.76 \cdot 10^{-3} & -7.81 \cdot 10^{-1} \\ 4 \cdot 10^{-8} & 1.28 \cdot 10^{-3} & 1 \cdot 10^{-8} & 0 \\ -1.76 \cdot 10^{-3} & 1 \cdot 10^{-8} & 1.31 \cdot 10^{-3} & -1.58 \cdot 10^{-2} f \\ -7.81 \cdot 10^{-1} & 0 & -1.58 \cdot 10^{-2} f & 2.755 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$J_{3a} = \begin{bmatrix} 7.97 \cdot 10^{-3} & 1.83 \cdot 10^{-6} & 1.2 \cdot 10^{-6} & -1.06 \cdot 10^{-1} \\ 1.83 \cdot 10^{-6} & 1.03 \cdot 10^{-4} & -2.7 \cdot 10^{-7} & 0 \\ 1.2 \cdot 10^{-6} & -2.7 \cdot 10^{-7} & 4.28 \cdot 10^{-5} & 0 \\ -1.06 \cdot 10^{-1} & 0 & 0 & 0.486 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Denklem 3.19’da gösterilen Tr , trace operatörüdür (Fu ve ark 1987, Weisstein 2002). Trace operatörü diyagonal terimlerin toplamıdır ve Denklem 3.26’da verilmiştir.

$$Tr(a) = \sum_{i=1}^n a_{ii} \quad (3.26)$$

i. cismin Denklem 3.18’deki koriolis ve merkezkaç terimleri C_{ia} , Denklem 3.27 – 3.28’de verilmiştir.

$$C_{ia} = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n C_{ikma} \dot{\theta}_{ka} \dot{\theta}_{ma} \quad (3.27)$$

$$C_{ikma} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n Tr(U_{jkma} J_{ja} U_{jia}^T) \quad (3.28)$$

U_{ikm} ’nin koriolis ve merkezkaç terimi, U_{ik} ’nin θ_m ’ye göre türevidir. Matris formunda U_{ijka} , Denklem 3.29’da verilmiştir.

$$U_{ijka} = \begin{cases} {}^0A_{j-1} Q^{j-1} A_{k-1} Q^{k-1} A_i & , i \geq k \geq j \\ {}^0A_{k-1} Q^{k-1} A_{j-1} Q^{j-1} A_i & , i \geq j \geq k \\ 0 & , i < j \vee i < k \end{cases} \quad (3.29)$$

Yer çekimi terimi G_{ia} 'nin açılımı Denklem 3.30'da verilmiştir.

$$G_{ia} = \sum_{j=i}^n -m_{ja} g_a U_{jia} {}^j\bar{r}_{ja} \quad (3.30)$$

TUKSDAR'ın ayak mafsalları için $\tau_{act\ ia}$ eyleyici tork ifadeleri Denklem 3.31 – 3.33'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \tau_{act\ 1a} = & (-1 \cdot 10^{-3} g_{ya} - 3.54 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_{2a}) g_{ya} + 0.254 f g_x) \cos(\theta_{1a}) \\ & + (-4.63 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_{1a}) g_{ya} + 4.63 \cdot 10^{-2} g_{xa} \sin(\theta_{1a})) \cos(\theta_{2a} \\ & + \theta_{3a}) + (0.001 g_{xa} + 0.254 f g_{ya} + 0.354 \cos(\theta_{2a}) g_{xa}) \sin(\theta_{1a}) \end{aligned} \quad (3.31)$$

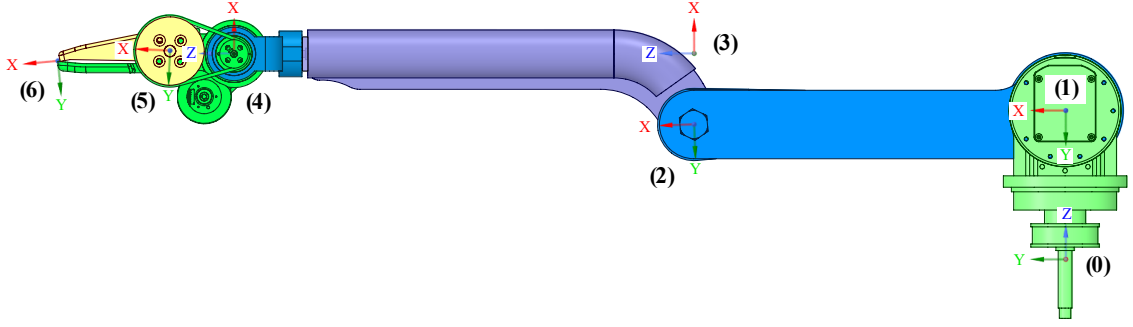
$$\begin{aligned} \tau_{act\ 2a} = & -1.77 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}) g_{ya} - 1.77 \cdot 10^{-1} g_{xa} \sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) \\ & - 2.31 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) g_{ya} - 2.31 \cdot 10^{-2} g_{xa} \sin(-\theta_{2a} \\ & - \theta_{3a} + \theta_{1a}) + 0.177 \cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) g_{ya} + 0.177 g_{xa} \sin(\theta_{1a} + \theta_{2a}) \\ & + 0.354 \cos(\theta_{2a}) g_{za} + 2.31 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a}) g_{ya} + 2.31 \\ & \cdot 10^{-2} g_{xa} \sin(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) + 4.63 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) g_{za} \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} \tau_{act\ 3a} = & -2.31 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) g_{ya} - 2.31 \cdot 10^{-2} g_{xa} \sin(-\theta_{2a} \\ & - \theta_{3a} + \theta_{1a}) + 2.31 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a}) g_{ya} + 2.31 \\ & \cdot 10^{-2} g_{xa} \sin(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) + 4.63 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) g_{za} \end{aligned} \quad (3.33)$$

3.4. Tutucu Kolun Matematiksel Modeli

3.4.1. Tutucu Kolun D – H Parametre Tablosu

TUKSDAR'ın tutucu kolu 6 döner mafsaldan oluşmaktadır. Tutucu kol Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bütün döner mafsallar z ekseninde dönme hareketi yapmaktadır.



Şekil 3.7. Tutucu kola ait mafsalların yandan görünüşü

Çizelge 3.3'te TUKSDAR'ın tutucu koluna ait Denavit – Hartenberg parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ayak mafsallarının D – H parametreleri

Mafsal No	d [mm]	θ_0 [°]	a [mm]	α [°]
1	130	90	0	-90
2	-29.275	2.115	325.226	0
3	0	-92.115	61.916	-90
4	399.199	0	0	90
5	0	87.444	56.051	0
6	0	9.051	96.519	0

TUKSDAR'ın tutucu koluna ait homojen dönüşüm matrisleri T harfi ile gösterilmiştir ve Denklem 3.34 – 3.39'da verilmiştir.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.13 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0.325 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0.325 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & -2.93 \cdot 10^{-2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & 6.19 \cdot 10^{-2} \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 6.19 \cdot 10^{-2} \sin \theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.399 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 5.61 \cdot 10^{-2} \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 5.61 \cdot 10^{-2} \sin \theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 9.65 \cdot 10^{-2} \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 9.65 \cdot 10^{-2} \sin \theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.4.2. Tutucu Kol Mafsallarına Ait Tork Denklemleri

Tutucu kola ait gövdelerin kütleleri m Denklem 3.40'ta verilmiştir.

$$m = [2.00 \quad 1.76 \quad 1.02 \quad 0.30 \quad 0.99 \quad 0.43] [kg] \quad (3.40)$$

Yerçekimi ivmesi vektörü g Denklem 3.41'de verilmiştir.

$$g = [g_x \quad g_y \quad g_z \quad 0] [m/s^2] \quad (3.41)$$

Her cismin kendi koordinat sistemine göre kütle merkezi ${}^i\bar{r}_i$ ifadeleri Denklem 3.42'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} {}^1\bar{r}_1 &= \langle 0 \quad 0.036 \quad 0.015 \quad 1 \rangle [m] \\ {}^2\bar{r}_2 &= \langle -0.254 \quad 0.002 \quad -0.020 \quad 1 \rangle [m] \\ {}^3\bar{r}_3 &= \langle -0.014 \quad 0.014 \quad 0.159 \quad 1 \rangle [m] \\ {}^4\bar{r}_4 &= \langle 0 \quad -0.019 \quad -0.026 \quad 1 \rangle [m] \\ {}^5\bar{r}_5 &= \langle -0.026 \quad 0.011 \quad -0.010 \quad 1 \rangle [m] \\ {}^6\bar{r}_6 &= \langle -0.073 \quad -0.005 \quad 0.020 \quad 1 \rangle [m] \end{aligned} \quad (3.42)$$

Tutucu kola ait her bir gövdenin kendi koordinat sistemine göre kütle atalet momenti I matrisleri Denklem 3.43 – 3.48'te verilmiştir.

$$I_1 = \begin{bmatrix} 5.475 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 2.662 & 1.053 \\ 0.000 & 1.053 & 4.903 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.43)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 2.950 & -0.157 & -3.347 \\ -0.157 & 24.530 & -0.078 \\ -3.347 & -0.078 & 137.388 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.44)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 14.533 & 0.002 & -1.929 \\ 0.002 & 15.082 & 0.212 \\ -1.929 & 0.212 & 0.900 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.45)$$

$$I_4 = \begin{bmatrix} 0.546 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.416 & 0.129 \\ 0.000 & 0.129 & 0.200 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.46)$$

$$I_5 = \begin{bmatrix} 1.368 & -0.156 & -0.080 \\ -0.156 & 2.475 & 0.153 \\ -0.080 & 0.153 & 1.847 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.47)$$

$$I_6 = \begin{bmatrix} 0.523 & 0.031 & 0.215 \\ 0.031 & 0.874 & -0.044 \\ 0.215 & -0.044 & 0.451 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} [kgm^2] \quad (3.48)$$

TUKSDAR'ın tutucu kolunun genelleştirilmiş hareket denklemi Denklem 3.49'da verilmiştir.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau_{act} + \tau_e \quad (3.49)$$

Atalet matrisi olarak bilinen ivme ile ilgili simetrik matris M_{ik} , cismin hareketine bağlı olarak değişen ivme terimleriyle ilgilidir ve Denklem 3.50 – 3.55'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} M_{11} &= Tr(U_{11} J_1 U_{11}^T) + Tr(U_{21} J_2 U_{21}^T) + Tr(U_{31} J_3 U_{31}^T) + Tr(U_{41} J_4 U_{41}^T) \\ &\quad + Tr(U_{51} J_5 U_{51}^T) + Tr(U_{61} J_6 U_{61}^T) \\ M_{21} &= Tr(U_{21} J_2 U_{22}^T) + Tr(U_{31} J_3 U_{32}^T) + Tr(U_{41} J_4 U_{42}^T) + Tr(U_{51} J_5 U_{52}^T) \\ &\quad + Tr(U_{61} J_6 U_{62}^T) \\ M_{31} &= Tr(U_{31} J_3 U_{33}^T) + Tr(U_{41} J_4 U_{43}^T) + Tr(U_{51} J_5 U_{53}^T) + Tr(U_{61} J_6 U_{63}^T) \end{aligned} \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} M_{41} &= Tr(U_{41} J_4 U_{44}^T) + Tr(U_{51} J_5 U_{54}^T) + Tr(U_{61} J_6 U_{64}^T) \\ M_{41} &= Tr(U_{41} J_4 U_{44}^T) + Tr(U_{51} J_5 U_{54}^T) + Tr(U_{61} J_6 U_{64}^T) \\ M_{51} &= Tr(U_{51} J_5 U_{55}^T) + Tr(U_{61} J_6 U_{65}^T) \\ M_{61} &= Tr(U_{61} J_6 U_{66}^T) \\ M_{12} &= Tr(U_{22} J_2 U_{21}^T) + Tr(U_{32} J_3 U_{31}^T) + Tr(U_{42} J_4 U_{41}^T) + Tr(U_{52} J_5 U_{51}^T) \\ &\quad + Tr(U_{62} J_6 U_{61}^T) \\ M_{22} &= Tr(U_{22} J_2 U_{22}^T) + Tr(U_{32} J_3 U_{32}^T) + Tr(U_{42} J_4 U_{42}^T) + Tr(U_{52} J_5 U_{52}^T) \\ &\quad + Tr(U_{62} J_6 U_{62}^T) \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} M_{32} &= Tr(U_{32} J_3 U_{33}^T) + Tr(U_{42} J_4 U_{43}^T) + Tr(U_{52} J_5 U_{53}^T) + Tr(U_{62} J_6 U_{63}^T) \\ M_{42} &= Tr(U_{42} J_4 U_{44}^T) + Tr(U_{52} J_5 U_{54}^T) + Tr(U_{62} J_6 U_{64}^T) \\ M_{52} &= Tr(U_{52} J_5 U_{55}^T) + Tr(U_{62} J_6 U_{65}^T) \\ M_{62} &= Tr(U_{62} J_6 U_{66}^T) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{13} &= Tr(U_{33} J_3 U_{31}^T) + Tr(U_{43} J_4 U_{41}^T) + Tr(U_{53} J_5 U_{51}^T) + Tr(U_{63} J_6 U_{61}^T) \\
M_{23} &= Tr(U_{33} J_3 U_{32}^T) + Tr(U_{43} J_4 U_{42}^T) + Tr(U_{53} J_5 U_{52}^T) + Tr(U_{63} J_6 U_{62}^T) \\
M_{33} &= Tr(U_{33} J_3 U_{33}^T) + Tr(U_{43} J_4 U_{43}^T) + Tr(U_{53} J_5 U_{53}^T) + Tr(U_{63} J_6 U_{63}^T) \\
M_{43} &= Tr(U_{43} J_4 U_{44}^T) + Tr(U_{53} J_5 U_{54}^T) + Tr(U_{63} J_6 U_{64}^T) \\
M_{53} &= Tr(U_{53} J_5 U_{55}^T) + Tr(U_{63} J_6 U_{65}^T) \\
M_{63} &= Tr(U_{63} J_6 U_{66}^T)
\end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}
M_{14} &= Tr(U_{44} J_4 U_{41}^T) + Tr(U_{54} J_5 U_{51}^T) + Tr(U_{64} J_6 U_{61}^T) \\
M_{24} &= Tr(U_{44} J_4 U_{42}^T) + Tr(U_{54} J_5 U_{52}^T) + Tr(U_{64} J_6 U_{62}^T) \\
M_{34} &= Tr(U_{44} J_4 U_{43}^T) + Tr(U_{54} J_5 U_{53}^T) + Tr(U_{64} J_6 U_{63}^T) \\
M_{44} &= Tr(U_{44} J_4 U_{44}^T) + Tr(U_{54} J_5 U_{54}^T) + Tr(U_{64} J_6 U_{64}^T) \\
M_{54} &= Tr(U_{54} J_5 U_{55}^T) + Tr(U_{64} J_6 U_{65}^T) \\
M_{64} &= Tr(U_{64} J_6 U_{66}^T)
\end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned}
M_{15} &= Tr(U_{55} J_5 U_{51}^T) + Tr(U_{65} J_6 U_{61}^T) \\
M_{25} &= Tr(U_{55} J_5 U_{52}^T) + Tr(U_{65} J_6 U_{62}^T) \\
M_{35} &= Tr(U_{55} J_5 U_{53}^T) + Tr(U_{65} J_6 U_{63}^T) \\
M_{45} &= Tr(U_{55} J_5 U_{54}^T) + Tr(U_{65} J_6 U_{64}^T) \\
M_{55} &= Tr(U_{55} J_5 U_{55}^T) + Tr(U_{65} J_6 U_{65}^T) \\
M_{65} &= Tr(U_{65} J_6 U_{66}^T)
\end{aligned} \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
M_{16} &= Tr(U_{66} J_6 U_{61}^T) \\
M_{26} &= Tr(U_{66} J_6 U_{62}^T) \\
M_{36} &= Tr(U_{66} J_6 U_{63}^T) \\
M_{46} &= Tr(U_{66} J_6 U_{64}^T) \\
M_{56} &= Tr(U_{66} J_6 U_{65}^T) \\
M_{66} &= Tr(U_{66} J_6 U_{66}^T)
\end{aligned} \tag{3.55}$$

Hız matrisi U_{ij} , Denklem 3.56 – 3.62’de gösterilen j. mafsalsal açısı θ_j ve U_{ij} ’ye göre i. cismin hızıdır ve tutucu kolun homojen dönüşüm matrisleri T ’ye bağlı ifadesinin açılımı EK-2’de verilmiştir.

$$U_{ij} = \begin{cases} {}^0T_{j-1} Q & j \leq i \\ 0 & j > i \end{cases} \tag{3.56}$$

$$\begin{aligned}
U_{11} &= Q {}^0T_1 \\
U_{21} &= Q {}^0T_2 \\
U_{31} &= Q {}^0T_3 \\
U_{41} &= Q {}^0T_4
\end{aligned} \tag{3.57}$$

$$U_{51} = Q {}^0T_5$$

$$U_{61} = Q {}^0T_6$$

$$U_{22} = {}^0T_1 Q {}^1T_2$$

$$U_{32} = {}^0T_1 Q {}^1T_3$$

$$U_{42} = {}^0T_1 Q {}^1T_4$$

$$U_{52} = {}^0T_1 Q {}^1T_5$$

$$U_{62} = {}^0T_1 Q {}^1T_6$$

$$U_{33} = {}^0T_2 Q {}^2T_3$$

$$U_{43} = {}^0T_2 Q {}^2T_4$$

$$U_{53} = {}^0T_2 Q {}^2T_5$$

$$U_{63} = {}^0T_2 Q {}^2T_6$$

$$U_{44} = {}^0T_3 Q {}^3T_4$$

$$U_{54} = {}^0T_3 Q {}^3T_5$$

$$U_{64} = {}^0T_3 Q {}^3T_6$$

$$U_{55} = {}^0T_4 Q {}^4T_5$$

$$U_{65} = {}^0T_4 Q {}^4T_6$$

$$U_{66} = {}^0T_5 Q {}^5T_6$$

$$\begin{aligned}
U_{22} &= {}^0T_1 Q {}^1T_2 \\
U_{32} &= {}^0T_1 Q {}^1T_3 \\
U_{42} &= {}^0T_1 Q {}^1T_4 \\
U_{52} &= {}^0T_1 Q {}^1T_5 \\
U_{62} &= {}^0T_1 Q {}^1T_6 \\
U_{33} &= {}^0T_2 Q {}^2T_3 \\
U_{43} &= {}^0T_2 Q {}^2T_4 \\
U_{53} &= {}^0T_2 Q {}^2T_5 \\
U_{63} &= {}^0T_2 Q {}^2T_6 \\
U_{44} &= {}^0T_3 Q {}^3T_4 \\
U_{54} &= {}^0T_3 Q {}^3T_5 \\
U_{64} &= {}^0T_3 Q {}^3T_6 \\
U_{55} &= {}^0T_4 Q {}^4T_5 \\
U_{65} &= {}^0T_4 Q {}^4T_6 \\
U_{66} &= {}^0T_5 Q {}^5T_6
\end{aligned} \tag{3.58}$$

$$\begin{aligned}
U_{33} &= {}^0T_2 Q {}^2T_3 \\
U_{43} &= {}^0T_2 Q {}^2T_4 \\
U_{53} &= {}^0T_2 Q {}^2T_5 \\
U_{63} &= {}^0T_2 Q {}^2T_6
\end{aligned} \tag{3.59}$$

$$\begin{aligned}
U_{44} &= {}^0T_3 Q {}^3T_4 \\
U_{54} &= {}^0T_3 Q {}^3T_5 \\
U_{64} &= {}^0T_3 Q {}^3T_6
\end{aligned} \tag{3.60}$$

$$\begin{aligned}
U_{55} &= {}^0T_4 Q {}^4T_5 \\
U_{65} &= {}^0T_4 Q {}^4T_6
\end{aligned} \tag{3.61}$$

$$U_{66} = {}^0T_5 Q {}^5T_6 \tag{3.62}$$

i. koordinat sistemine göre tutucu kola ait i. gövdelerin atalet tensörü J_i Denklem 3.63 – 3.68’de verilmiştir.

$$J_1 = \begin{bmatrix} 1.05 \cdot 10^{-3} & -1.1 \cdot 10^{-7} & 8 \cdot 10^{-8} & -2.5 \cdot 10^{-6} \\ -1.1 \cdot 10^{-7} & 3.86 \cdot 10^{-3} & 1.05 \cdot 10^{-3} & 7.16 \cdot 10^{-2} \\ 8 \cdot 10^{-8} & 1.05 \cdot 10^{-3} & 1.62 \cdot 10^{-3} & 3.09 \cdot 10^{-2} \\ -2.5 \cdot 10^{-6} & 7.16 \cdot 10^{-2} & 3.09 \cdot 10^{-2} & 2 \end{bmatrix} \tag{3.63}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 7.95 \cdot 10^{-2} & -1.57 \cdot 10^{-4} & -3.35 \cdot 10^{-3} & -0.449 \\ -1.57 \cdot 10^{-4} & 5.79 \cdot 10^{-2} & -7.84 \cdot 10^{-5} & 2.66 \cdot 10^{-3} \\ -3.35 \cdot 10^{-3} & -7.84 \cdot 10^{-5} & -0.055 & -3.46 \cdot 10^{-2} \\ -0.449 & 2.66 \cdot 10^{-3} & -3.46 \cdot 10^{-2} & 1.76 \end{bmatrix} \tag{3.64}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} 7.25 \cdot 10^{-4} & 2.13 \cdot 10^{-6} & -1.93 \cdot 10^{-3} & -1.43 \cdot 10^{-2} \\ 2.13 \cdot 10^{-6} & 1.76 \cdot 10^{-4} & 2.12 \cdot 10^{-4} & 1.45 \cdot 10^{-2} \\ -1.93 \cdot 10^{-3} & 2.12 \cdot 10^{-4} & 1.44 \cdot 10^{-2} & 0.163 \\ -1.43 \cdot 10^{-2} & 1.45 \cdot 10^{-2} & 0.163 & 1.02 \end{bmatrix} \tag{3.65}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} 3.49 \cdot 10^{-5} & 1.4 \cdot 10^{-7} & -1.2 \cdot 10^{-7} & 4.19 \cdot 10^{-6} \\ 1.4 \cdot 10^{-7} & 1.65 \cdot 10^{-4} & 1.29 \cdot 10^{-4} & -5.66 \cdot 10^{-3} \\ -1.2 \cdot 10^{-7} & 1.29 \cdot 10^{-4} & 3.81 \cdot 10^{-4} & -7.79 \cdot 10^{-3} \\ 4.19 \cdot 10^{-6} & -5.66 \cdot 10^{-3} & -7.79 \cdot 10^{-3} & 0.304 \end{bmatrix} \tag{3.66}$$

$$J_5 = \begin{bmatrix} 1.48 \cdot 10^{-3} & -1.56 \cdot 10^{-4} & -8.01 \cdot 10^{-5} & -2.53 \cdot 10^{-2} \\ -1.56 \cdot 10^{-4} & 3.7 \cdot 10^{-4} & 1.53 \cdot 10^{-4} & 1.12 \cdot 10^{-2} \\ -8.01 \cdot 10^{-5} & 1.53 \cdot 10^{-4} & 9.98 \cdot 10^{-4} & -9.54 \cdot 10^{-3} \\ -2.53 \cdot 10^{-2} & 1.12 \cdot 10^{-2} & -9.54 \cdot 10^{-3} & 0.987 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$J_6 = \begin{bmatrix} 4.01 \cdot 10^{-4} & 3.07 \cdot 10^{-5} & 2.15 \cdot 10^{-4} & -3.14 \cdot 10^{-2} \\ 3.07 \cdot 10^{-5} & 5.01 \cdot 10^{-5} & -4.42 \cdot 10^{-5} & -1.99 \cdot 10^{-3} \\ 2.15 \cdot 10^{-4} & -4.42 \cdot 10^{-5} & 4.73 \cdot 10^{-4} & 8.45 \cdot 10^{-3} \\ -3.14 \cdot 10^{-2} & -1.99 \cdot 10^{-3} & 8.45 \cdot 10^{-3} & 0.428 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

i. cismin Denklem 3.49'daki koriolis ve merkezkaç terimleri C Denklem 3.69'da verilmiştir.

$$C_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n C_{ikm} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_m \quad (3.69)$$

$$C_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n Tr(U_{jkm} J_j U_{ji}^T)$$

U_{ikm} 'nin koriolis ve merkezkaç terimi, U_{ik} 'nin θ_m 'ye göre türevidir. Matris formunda U_{ijk} , Denklem 3.70'te verilmiştir.

$$U_{ijk} = \begin{cases} {}^0T_{j-1} Q {}^{j-1}T_{k-1} Q {}^{k-1}T_i & , i \geq k \geq j \\ {}^0T_{k-1} Q {}^{k-1}T_{j-1} Q {}^{j-1}T_i & , i \geq j \geq k \\ 0 & , i < j \vee i < k \end{cases} \quad (3.70)$$

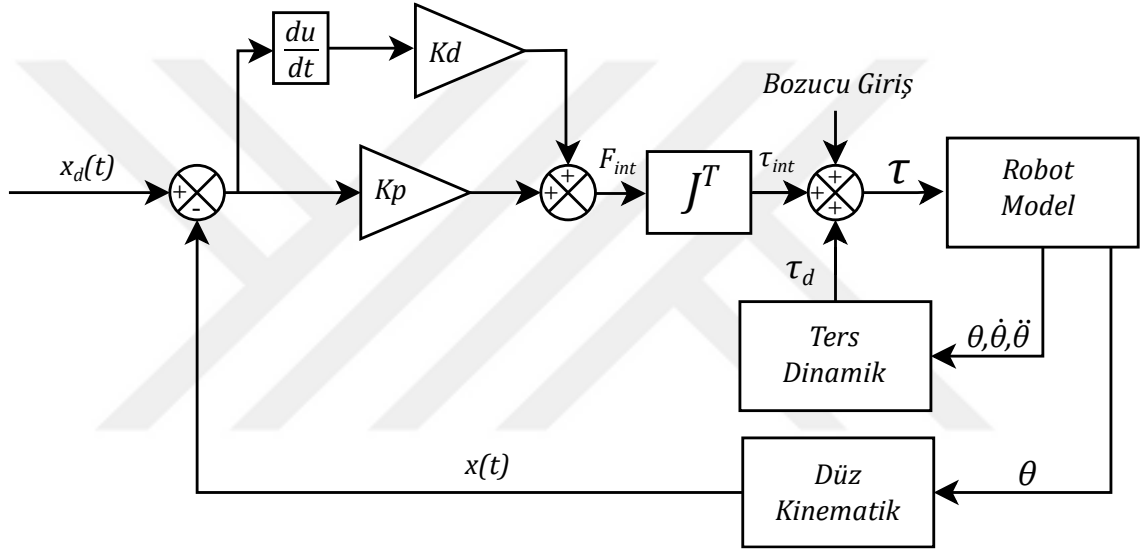
Yer çekimi terimi G_i 'nin açılımı Denklem 3.71'de verilmiştir.

$$G_i = \sum_{j=i}^n -m_j g U_{ji} {}^j\bar{r}_j \quad (3.71)$$

TUKSDAR'ın tutucu kol mafsalları için τ_{act} eyleyici tork denklemlerinin açılımı EK-3'te verilmiştir.

4. OPTİMUM EMPEDANS KONTROLÜ

Empedans kontrol şeması Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Eyleyici torkları τ_{act} , mafsal açısai konumları, hızlar ve ivmeler kullanılarak hesaplanır. TUKSDAR’ın hem ayaklarının hem de tutucu kolunun uç noktasının konumu, düz kinematik kullanılarak hesaplanır. Robotun istenilen hedef noktası ve robotun uç noktasının anlık konumu kullanılarak etkileşim mesafeleri hesaplanır ve etkileşim kuvvetlerine dönüştürülür. Etkileşim kuvvetleri, Jakobiyen matrisinin transpozu ile çarpılarak empedans torklarına dönüştürülür.



Şekil 4.1. Empedans kontrol şeması

4.1.1. Ayakların Empedans Kontrolünün Modellenmesi

TUKSDAR’ın ayaklarına ait 0A_3 matrisinin konum vektörü, ayak referans koordinat sistemine göre TUKSDAR’ın ayağının uç noktasının konumunu temsil eder. Ayağın uç noktasını, empedans kontrolü tekniği kullanarak istenilen konuma getirmek için Hogan (1984b) tarafından önerilen bir yöntem kullanılır. Bu yöntem konum hatasına bağlı olarak etkileşim kuvvetinin hesaplanmasını içerir. Bunun için PID tabanlı yöntem tercih edilmiştir. Etkileşim kuvveti tanımı Denklem 4.1’de verilmiştir.

$$F_{inta} = k_a \begin{bmatrix} x_{da} - P_{a_x} \\ y_{da} - P_{a_y} \\ z_{da} - P_{a_z} \end{bmatrix} + b_a \left(d \begin{bmatrix} x_{da} - P_{a_x} \\ y_{da} - P_{a_y} \\ z_{da} - P_{a_z} \end{bmatrix} / dt \right) + i_a \int \begin{bmatrix} x_{da} - P_{a_x} \\ y_{da} - P_{a_y} \\ z_{da} - P_{a_z} \end{bmatrix} dt \quad (4.1)$$

Ayaklar mafsallarının empedans kontrolcüsünün oransal kazanç katsayısı k_a , türev kazancı katsayısı b_a ve integral kazancı katsayısı i_a olarak verilmiştir. x_{da} , y_{da} ve z_{da} hedeflenen etkileşim konumlarıdır. Denklem 4.2’de P_a ayak uç noktası konum vektörü ${}^0A_3[1..3,4]$ konum vektöründen elde edilerek verilmiştir.

$$\begin{aligned} P_{ax} &= -8.65 \cdot 10^{-2} f \sin(\theta_{1a}) + 0.313 \cos(\theta_{1a}) \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \\ &\quad + 0.35 \cos(\theta_{1a}) \cos(\theta_{2a}) \\ P_{ay} &= 8.65 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_{1a}) f + 0.313 \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \sin(\theta_{1a}) \\ &\quad + 0.35 \cos(\theta_{2a}) \sin(\theta_{1a}) \\ P_{az} &= -3.13 \cdot 10^{-1} \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) - 0.35 \sin(\theta_{2a}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

P_a ayak uç noktası konumuna ait Jakobiyen matrisi J_{fa} , Denklem 4.3’te verilmiştir.

$$\begin{aligned} J_{fa} &= \begin{bmatrix} dP_{ax}/d\theta_{1a} & dP_{ax}/d\theta_{2a} & dP_{ax}/d\theta_{3a} \\ dP_{ay}/d\theta_{1a} & dP_{ay}/d\theta_{2a} & dP_{ay}/d\theta_{3a} \\ dP_{az}/d\theta_{1a} & dP_{az}/d\theta_{2a} & dP_{az}/d\theta_{3a} \end{bmatrix} \\ J_{fa11} &= -8.65 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_{1a}) f - 3.13 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \sin(\theta_{1a}) \\ &\quad - 0.35 \cos(\theta_{2a}) \sin(\theta_{1a}) \\ J_{fa12} &= (-3.13 \cdot 10^{-1} \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) - 0.35 \sin(\theta_{2a})) \cos(\theta_{1a}) \\ J_{fa13} &= -3.13 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_{1a}) \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \\ J_{fa21} &= -8.65 \cdot 10^{-2} f \sin(\theta_{1a}) + 0.313 \cos(\theta_{1a}) \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \\ &\quad + 0.35 \cos(\theta_{1a}) \cos(\theta_{2a}) \\ J_{fa22} &= (-3.13 \cdot 10^{-1} \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) - 0.35 \sin(\theta_{2a})) \sin(\theta_{1a}) \\ J_{fa23} &= -3.13 \cdot 10^{-1} \sin(\theta_{1a}) \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \\ J_{fa31} &= 0 \\ J_{fa32} &= -3.13 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) - 0.35 \cos(\theta_{2a}) \\ J_{fa33} &= -3.13 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

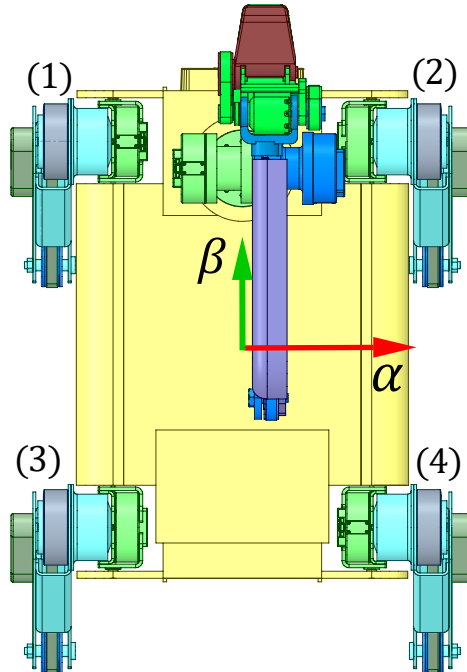
Ayak gövdelerinin J_{fa} Jakobiyen matrisi ile F_{intax} , F_{intay} ve F_{intaz} etkileşim kuvvetleri ile çarpımı ile elde edilen empedans torkları τ_{ea} Denklem 4.4’te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\tau_{ea} &= J_{fa}^T F_{inta} \\
\tau_{ea1} &= -8.65 \cdot 10^{-2} F_{xa} \cos(\theta_{1a}) f - 8.65 \cdot 10^{-2} F_{intay} f \sin(\theta_{1a}) - 3.13 \\
&\quad \cdot 10^{-1} F_{intax} \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) \sin(\theta_{1a}) - 0.35 F_{intax} \cos(\theta_{2a}) \sin(\theta_{1a}) \\
&\quad + 0.313 F_{intay} \cos(\theta_{1a}) \cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) + 0.35 F_{intay} \cos(\theta_{1a}) \cos(\theta_{2a}) \\
\tau_{ea2} &= ((-3.13 \cdot 10^{-1} F_{intax} \cos(\theta_{3a}) - 0.35 F_{intax}) \cos(\theta_{1a}) - 3.13 \\
&\quad \cdot 10^{-1} F_{intay} \cos(\theta_{3a}) \sin(\theta_{1a}) - 0.35 F_{intay} \sin(\theta_{1a}) \\
&\quad + 0.313 F_{intaz} \sin(\theta_{3a})) \sin(\theta_{2a}) + (-3.13 \\
&\quad \cdot 10^{-1} F_{intax} \cos(\theta_{1a}) \sin(\theta_{3a}) - 3.13 \cdot 10^{-1} F_{intay} \sin(\theta_{1a}) \sin(\theta_{3a}) \\
&\quad - 3.13 \cdot 10^{-1} F_{intaz} \cos(\theta_{3a}) - 0.35 F_{intaz}) \cos(\theta_{2a}) \\
\tau_{ea3} &= -3.13 \cdot 10^{-1} F_{intax} \cos(\theta_{1a}) \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) - 3.13 \\
&\quad \cdot 10^{-1} F_{intay} \sin(\theta_{1a}) \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) - 3.13 \cdot 10^{-1} F_{intaz} \cos(\theta_{2a} \\
&\quad + \theta_{3a})
\end{aligned} \tag{4.4}$$

i. mafsala etki eden toplam tork, Denklem 3.18’de eyleyici tork τ_{acta} ile Denklem 4.4’teki empedans torku τ_{ea} ’nın toplamıdır. Denklem 4.5’teki ayak grubunun hareket denklemi artık tam tanımlıdır.

$$M_a(\theta_{ia})\ddot{\theta}_{ia} + C_a(\theta_{ia}, \dot{\theta}_{ia}) + G_a(\theta_{ia}) = \tau_{act,ia} + \tau_{eia} \tag{4.5}$$

TUKSDAR’ın ana gövdesinin yatay düzlemdeki eğimini dengelemek için bazı ayakların etkileşim mesafelerinin ana gövdenin eğimine uygun bir şekilde değiştirilmesi gerekmektedir. Şekil 4.2’de ana gövdenin eğim açıları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. α ve β eğimleri ve ayak numaraları (v)

Sol ön ayak için 1, sağ ön ayak için 2, sol arka ayak için 3 ve sağ arka ayak için 4 olmak üzere ayaklar numaralandırılmış olup grafiklerde v sembolü ile gösterilmiştir.. Tasarlanan kontrolcü α ve β eğimleri aracılığıyla hedeflenen noktaların x konumuna etki etmektedir. Bu etki 4.2.1 Dengele Kalma Sisteminin Modellenmesi başlığında tanımlanmıştır. Ana gövdenin eğimini dengelemek için bazı ayakların etkileşim mesafeleri, ana gövdenin eğimine göre artırılıp ve azaltılmaktadır. Bu sayede ana gövde, uygun empedans kontrol parametreleri ile dengelenebilmektedir.

4.1.2. Tutucu Kolun Empedans Kontrolünün Modellenmesi

TUKSDAR'ın tutucu koluna ait 0T_6 matrisinin konum vektörü, tutucu kolun uç noktasının konumunu temsil etmektedir. Tutucu kolun uç noktasını empedans kontrolü ile istenilen konuma getirmek için etkileşim kuvveti hesaplanmalıdır (Hogan 1984b). PID kontrolü kullanılarak üretilen etkileşim kuvveti, matematiksel olarak Denklem 4.6'da verilmiştir.

$$F_{int} = k \begin{bmatrix} x_d - P_x \\ y_d - P_y \\ z_d - P_z \end{bmatrix} + b \left(d \begin{bmatrix} x_d - P_x \\ y_d - P_y \\ z_d - P_z \end{bmatrix} / dt \right) + i \int \begin{bmatrix} x_d - P_x \\ y_d - P_y \\ z_d - P_z \end{bmatrix} dt \quad (4.6)$$

Empedans kontrolcüsünün yay katsayısı k , sönümleme katsayısı b ve integral kazancı i olarak verilmiştir. Robotun uç noktasının etkileşim konumu, x_d , y_d ve z_d olarak tanımlanmıştır. P konum vektörü ${}^0T_6[1..3,4]$ konum vektöründen elde edilmiştir. Robotun uç noktasının konumu EK-4'te verilmiştir. P konumuna ait Jakobiyen matrisi J_f , Denklem 4.7'de ve açılımı EK-5'te verilmiştir.

$$J_f = \begin{bmatrix} \frac{dP_x}{d\theta_1} & \frac{dP_x}{d\theta_2} & \frac{dP_x}{d\theta_3} & \frac{dP_x}{d\theta_4} & \frac{dP_x}{d\theta_5} & \frac{dP_x}{d\theta_6} \\ \frac{dP_y}{d\theta_1} & \frac{dP_y}{d\theta_2} & \frac{dP_y}{d\theta_3} & \frac{dP_y}{d\theta_4} & \frac{dP_y}{d\theta_5} & \frac{dP_y}{d\theta_6} \\ \frac{dP_z}{d\theta_1} & \frac{dP_z}{d\theta_2} & \frac{dP_z}{d\theta_3} & \frac{dP_z}{d\theta_4} & \frac{dP_z}{d\theta_5} & \frac{dP_z}{d\theta_6} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Gövdelere etki eden empedans torkları J_f Denklem 4.8’de ve açılımları EK-6’da verilmiştir.

$$\tau_e = J_f^T F_{int} \quad (4.8)$$

i. mafsala etki eden toplam tork, Denklem 3.49’daki eyleyici tork τ_{act} ile Denklem 4.8’deki empedans torku τ_e ’nin toplamıdır. Toplam tork ifadesi Denklem 4.9’da verilmiştir.

$$\tau_i = \tau_{act,i} + \tau_{ei} \quad (4.9)$$

4.2. Yürüyüş Senaryoları

TUKSDAR’ın beş adet yürüyüş senaryosu vardır. Bunlar dengede kalma sistemi, yerinde sayma senaryosu, yürüme senaryosu, kendi etrafında dönüş senaryosu ve yan yürüme senaryosudur.

4.2.1. Dengede Kalma Sisteminin Modellenmesi

TUKSDAR’ın gövdesinin eğimini 0° ’de dengede tutabilmek için tüm ayak mafsallarının empedans kontrolü, ana gövde üzerindeki bir eğim sensöründen giriş almaktadır. Ayak mafsallarını kontrol eden empedans kontrolünün TUKSDAR’ın ayaklarının ayak koordinat sistemine göre etkileşim mesafeleri üzerindeki etkisi Denklem 4.10 – 4.13’te gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} x_{da1} &= P_{0a1x} + d_{x1} - A_{faz1} \left(1 + (A_{faz1} > 0) k_{öny} \right) \\ y_{da1} &= P_{0a1y} + d_y + (A_{faz1} > 0) k_{side} h_{x1} + A_{faz2} f_{yön} \\ z_{da1} &= P_{0a1z} + d_z + A_{faz2} f_{ileri} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} x_{da2} &= P_{0a2x} + d_{x2} + A_{faz1} \left(1 + (A_{faz1} < 0) k_{öny} \right) \\ y_{da2} &= P_{0a2y} + d_y - (A_{faz1} < 0) k_{side} h_{x2} - A_{faz2} f_{yön} \\ z_{da2} &= P_{0a2z} + d_z - A_{faz2} f_{ileri} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned}
x_{da3} &= P_{0a_{3x}} + d_{x_3} + A_{faz_1} \left(1 + (A_{faz_1} < 0) k_{ary} \right) \\
y_{da3} &= P_{0a_{3y}} + d_y + (A_{faz_1} < 0) k_{side} h_{x_3} + A_{faz_2} f_{yön} k_{Turn} \\
z_{da3} &= P_{0a_{3z}} + d_z - A_{faz_2} f_{ileri}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
x_{da4} &= P_{0a_{4x}} + d_{x_4} - A_{faz_1} \left(1 + (A_{faz_1} > 0) k_{ary} \right) \\
y_{da4} &= P_{0a_{4y}} + d_y - (A_{faz_1} > 0) k_{side} h_{x_4} - A_{faz_2} f_{yön} k_{Turn} \\
z_{da4} &= P_{0a_{4z}} + d_z + A_{faz_2} f_{ileri}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

P_{0a} ayaklara ait uç noktanın mafsalsal açıları 0° iken elde edilen konumudur. Bu konum ayak uç noktasının dikey olarak gidebileceği en alt konumu göstermektedir. d_x TUKSDAR'ın ana gövdesinin yürüyüş modları sırasındaki gövde eğimini kullanarak empedans kontrolünün ürettiği çıkışları giriş olarak kullanarak robotun dengede kalmasında en önemli yeri tutar. d_x her ayak için farklı tanımlanmıştır ve Denklem 4.14 – 4.17'de gösterilmiştir.

$$d_{x_1} = d_{x_0} - R_L - R_F \tag{4.14}$$

$$d_{x_2} = d_{x_0} + R_L - R_F \tag{4.15}$$

$$d_{x_3} = d_{x_0} - R_L + R_F \tag{4.16}$$

$$d_{x_4} = d_{x_0} + R_L + R_F \tag{4.17}$$

Tüm ayaklarda ortak olan d_{x_0} terimi, TUKSDAR'ın ana gövdesinin yerden yüksekliğini ayarlamak için kullanılmaktadır. Bu değerin artırılması ana gövdenin yükselmesine ve bu değerin azaltılması ise ana gövdenin alçalmasına neden olur. Normal bir yürüyüş için bu değer 0.1 m'dir.

R_L değeri gövde eğimine göre empedans kontrolünün β gövde eğimi ile ürettiği bir değer olup, ayak koordinat sistemine göre bu değer sağ ayakların (2 ve 4 numaralı) d_x değerini artırmakta ve sol ayakların (1 ve 3 numaralı) d_x değerini azaltmaktadır. Şekil 4.2'deki β gövde eğiminin artması ana gövdenin 2 ve 4 numaralı ayaklar tarafının yere yaklaşması veya 1 ve 3 numaralı ayak tarafının yerden yükselmesini ifade ettiği için 2 ve 4 numaralı ayakların x konumu artırılması gerekir iken 1 ve 3 numaralı ayakların x konumunun azaltılması gerekmektedir. Bu sayede β gövde eğimi 0° hedefinde kontrolü sağlanmış olur. R_L ifadesi Denklem 4.18'de verilmiştir.

$$R_L = k_{Eğim} \beta + b_{Eğim} \dot{\beta} + i_{Eğim} \int \beta dt \tag{4.18}$$

R_F değeri gövde eğimine göre empedans kontrolünün α gövde eğimi ile ürettiği bir değer olup, ayak koordinat sistemine göre bu değer arka ayakların (3 ve 4 numaralı) d_x değerini artırmakta ve ön ayakların (1 ve 2 nolu) d_x değerini azaltmaktadır. Şekil 4.2'deki α gövde eğiminin artması ana gövdenin 3 ve 4 numaralı ayaklar tarafının yere yaklaşması veya 1 ve 2 numaralı ayak tarafının yerden yükselmesini ifade ettiği için 3 ve 4 numaralı ayakların x konumu artırılması gerekir iken 1 ve 2 numaralı ayakların x konumunun azaltılması gerekmektedir. Bu sayede α gövde eğimi 0° hedefinde kontrolü sağlanmaktadır. R_F ifadesi 4.19'da verilmiştir.

$$R_F = k_{Eğim}\alpha + b_{Eğim}\dot{\alpha} + i_{Eğim} \int \alpha dt \quad (4.19)$$

4.2.2. Yerinde Sayma Senaryosu

Robotun yerinde sayması ileriye veya geriye yürümenin ilk gereksinimidir. Dört ayaklı yürüyüş çeşitleri olarak tırıs yürüyüş çeşidi seçilmiştir. Tırıs yürüyüş, diyagonal ver ters diyagonal ayakların aynı anda hareket ettiği bir yürüyüş çeşididir (Harris 2017). Diyagonal ayaklar 1 – 4 numaralı ayak çifti ve ters diyagonal ayaklar 2 – 3 numaralı ayak çifti senkronize çalışmaktadır. Buna göre bir ayak çifti destek aşamasında iken diğer ayak çifti uçuş aşamasındadır. TUKSDAR'ın yürüyüşü için uygun zamanlarda ayak çiftinin yerden ayrılması ve tekrar yere inmesi için sinüzoidal bir şekilde ayakların x konumunun değiştirilmesi sağlanmıştır. Bunun için Denklem 4.10 – 4.13'te verilen ayakların uç noktasının x, y ve z konumlarının sadece α ve β 'ya göre değil aynı zamanda kendini tekrar eden bir yürüyüş senaryosunun da uygulanması gerekir. Bunun için ayak uç noktası sinüzoidal bir fonksiyon bağlı olarak değişmektedir. Denklem 4.20'de adım fazı A_{faz} vektörü tanımlanmıştır.

$$A_{faz} = \langle r_f \sin(2\pi f_y t + \phi_1) \mid r_f \sin(2\pi f_y t + \phi_2) \rangle \quad (4.20)$$

A_{faz} , iki bileşenden oluşan bir vektördür. A_{faz} 'ın birinci bileşeninin işareti ve büyüklüğü ayakların uç noktasının x etkileşim mesafesine etki etmektedir. Fakat A_{faz} 'ın birinci bileşeninin işareti sadece y etkileşim mesafesine etki etmektedir. Tırıs yürüyüş moduna göre uçuş aşamasındaki ayak çiftini yukarı doğru kaldırabilmek için

ayak koordinat sistemine göre x etkileşim konumunun değiştirilmesi gerekir. Buna göre $(A_{faz_1} > 0) k_{öny}$ işleminde A_{faz_1} 'in 0'dan büyük olması durumunda 1 – 4 ayak çifti uçuş aşamasında olacaktır. Benzer şekilde $(A_{faz_1} < 0) k_{öny}$ işleminde de A_{faz_1} 'in 0'dan küçük olması durumunda 2 – 3 ayak çifti uçuş aşamasında olacaktır. A_{faz_1} 'in 0'dan küçük iken 0'dan büyük hale geçtiği anda geçişin sert olmaması için bütün bu ifade A_{faz_1} ile tekrar çarpılmaktadır.

TUKSDAR'ın kütle merkezi tutucu kol nedeniyle tam olarak ortada olmadığından, ön ve arka ayakların farklı katsayılar ile bu sinüzoidal hareketi gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu nedenle, ön ayaklar için $k_{öny}$ kullanılırken, arka ayaklar için de k_{ary} katsayısı kullanılmaktadır.

A_{faz} 'ın sinüzoidal değişimi sonucunda ayak çiftleri destek ve uçuş aşamaları arasında geçiş yaparak yerinde sayma işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Adım fazının genliği r_f ile gösterilmiş olup yürüme sırasındaki değeri Denklem 4.21'de verilmiştir.

$$r_f = 0.15 \quad (4.21)$$

TUKSDAR'ın ayakların birbirlerine göre ayak koordinat sistemi referasındaki x eksenindeki bağıl konumları arasındaki farka göre y ekseninde de ayağı yana doğru iletme modellenmiştir. Denklem 4.2'deki y ekseninde yana doğru etkileşim mesafesi y_{da1} ifadesi üzerinden yapılan bu işlem şu şekilde çalışmaktadır. Bir ayağın yerden en yüksekteki ayağa göre x eksenindeki konum farkı ve adım profil fazına bağlı olarak y_{da1} ifadesine $(A_{faz_1} > 0) k_{side} h_{x_1}$ ifadesi eklenmiştir. A_{faz_1} değerinin 0'dan büyük olması durumunda $k_{side} h_{x_1}$ kadar artırma işlemi yapılmaktadır. h_{x_i} ifadesi Denklem 4.22'de verilmiştir.

$$h_x = x_{max} - [P_{a1x} \quad P_{a2x} \quad P_{a3x} \quad P_{a4x}]^T \quad (4.22)$$

x_{max} ifadesi ayak koordinat sistemine göre x eksenindeki bütün ayakların uç noktalarının konumlarından en fazla olanı ifade etmektedir. x_{max} ifadesi 4.23'te verilmiştir. k_{side} ifadesi h_x ifadesi ile çarpılarak P kontrolcü çıkışı y_{da} konumuna ilave edilmiştir. Bu sayede yerden yere doğru çok fazla inmiş olan ayağın aynı zamanda yana doğru açılması da sağlanmıştır.

$$x_{max} = \max[P_{a_{1x}} \quad P_{a_{2x}} \quad P_{a_{3x}} \quad P_{a_{4x}}]^T \quad (4.23)$$

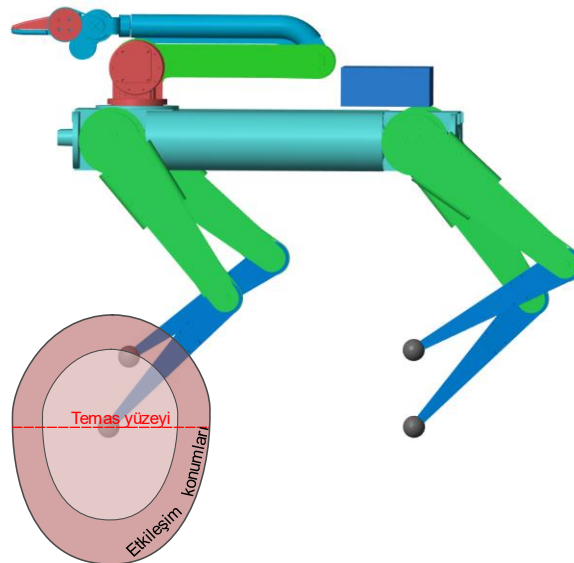
4.2.3. Yürüme Senaryosu

TUKSDAR'ın düz yürüyebilmesi için ayak koordinat sistemine göre z etkileşim konumunun Denklem 4.20'deki A_{faz} 'ın bir fonksiyonu olarak tanıtılması gerekir. Bunun için Denklem 4.10 – 4.13'teki z_{da} etkileşim konumlarına $A_{faz_2} f_{ileri}$ eklenmiştir. Ayağı yerden kaldırma aşaması faz açısı 0° ve ayağı ileri sürme faz açısı 90° yapılarak ayağın yerden kaldırılması aşamasında ilerleme yönünün değişmesi önlenmiştir.

TUKSDAR'ın tam olarak yerinde sayması, yani hızının 0 olduğu durum, f_{ileri} değişkeninin -0.10 değerinde olduğunda gözlemlenmiştir. f_{ileri} değişkeninin -0.10'dan büyük olduğunda TUKSDAR geriye doğru hareket ederken, -0.10'dan küçük olduğunda ise ileri doğru hareket etmektedir. Bu nedenle ilerleme hızına bu öteleme miktarını ekleyerek ve işaretini değiştirerek V_{ileri} değişkeni elde edilmiştir. TUKSDAR'ın ilerleme yönünde f_{ileri} ifadesinin gerçek ilerleme hızı V_{ileri} cinsinden ifadesi Denklem 4.24'te verilmiştir.

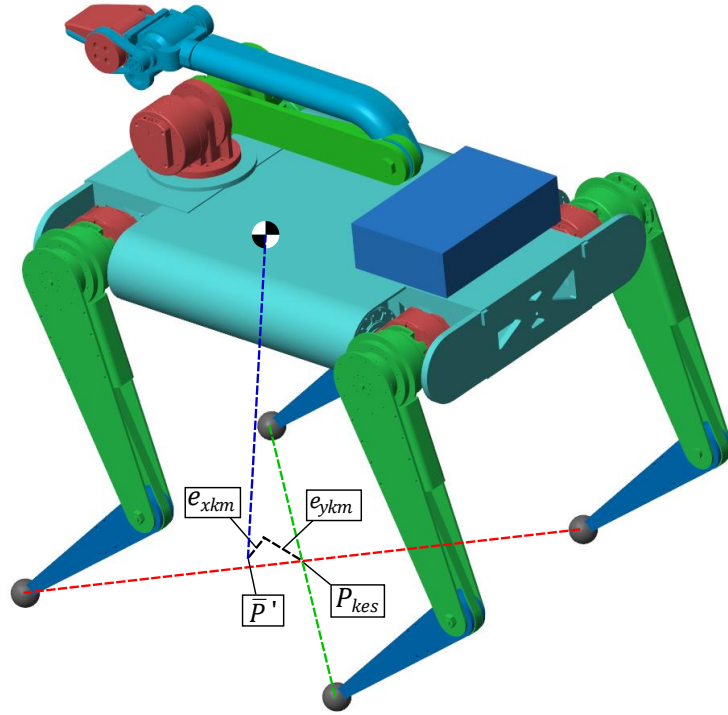
$$f_{ileri} = -(V_{ileri} - 0.10) \quad (4.24)$$

Şekil 4.3'te yürüme sırasındaki x_{da} ve z_{da} etkileşim konumlarının gösterimi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Ön ayak uç noktası x_{da} ve z_{da} etkileşim konumlarının yandan görünüşü

x_{da} ve z_{da} etkileşim konumları; ana gövde α ve β eğim açılarına, f_{ileri} , A_{faz_2} ve e_{ykm} değişkenlerine bağlı olduğu için x_{da} ve z_{da} etkileşim konumları aralık olarak gösterilmiştir. TUKSDAR ayak uç noktası uçuş fazında iken etkileşim mesafesi uç noktanın olması gereken konumuna ayarlanmaktadır. Fakat ayak uç noktası destek fazında iken etkileşim mesafesi yere doğru daha derin bir mesafeye ayarlanmakta ve bunun sonucu olarak da ayak mafsalları TUKSDAR'ı taşıyacak yeterli tork girişlerini alabilmektedir. Yürüme ve tutucu kol operasyonları sırasındaki bütün sistemin kütle merkezi $\bar{P}$ noktasının yere iz düşümü olan $\bar{P}'$ noktasının, çapraz ayak çiftlerinin oluşturduğu kesişim P_{kes} noktasında bulunması gerekmektedir. Şekil 4.4'te P_{kes} noktası gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kütle merkezinin yere iz düşümü ve çapraz ayak çiftlerinin oluşturduğu kesişim noktaları

$\bar{P}'$ noktasını P_{kes} noktasına konumlandırabilmek için d_y ve d_z mesafesi bütün ayaklarda yer almaktadır. Bu değişken TUKSDAR'ın toplam kütle merkezinin bu kesişim noktasında bulunması için önce TUKSDAR'ın kütle merkezinin hesaplanması gerekmektedir. TUKSDAR'ın kütle merkezi $\bar{P}$ ifadesi Denklem 4.25'te verilmiştir.

$$\bar{P} = \left(\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^3 m_{ai,j} T_{xyz}(\Delta_{xaj}, \Delta_{yaj}, 0)^0 \bar{r}_{ia,j} + \sum_{i=1}^6 m_i {}^0 \bar{r}_i \right) / \sum m \quad (4.25)$$

Ayak uç noktalarının ayak referans koordinat sisteminden TUKSDAR koordinat sistemine dönüşümü için Denklem 3.2'deki T_{xyz} fonksiyonu kullanılır. Çizelge 4.1'de bu fonksiyonun giriş parametrelerinin ayak numarasına bağlı olarak sabit değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ayak referans koordinat sistemlerinin TUKSDAR koordinat sistemine uzaklıkları

Mafsal No (j)	Δ_{xa} [m]	Δ_{ya} [m]
1	-0.183	0.038
2	0.183	0.038
3	-0.183	-0.508
4	0.183	-0.508

Bu fonksiyon ile P_a konumları soldan çarpılarak TUKSDAR koordinat sistemine göre T_a konumları ayak numaralarına göre Denklem 4.26 – 4.29'da verilmiştir.

$$T_{a_1} = T_{xyz}(\Delta_{xa1}, \Delta_{ya1}, 0) P_{a_1} \quad (4.26)$$

$$T_{a_2} = T_{xyz}(\Delta_{xa2}, \Delta_{ya2}, 0) P_{a_2} \quad (4.27)$$

$$T_{a_3} = T_{xyz}(\Delta_{xa3}, \Delta_{ya3}, 0) P_{a_3} \quad (4.28)$$

$$T_{a_4} = T_{xyz}(\Delta_{xa4}, \Delta_{ya4}, 0) P_{a_4} \quad (4.29)$$

$T_{a_1} - T_{a_4}$ yere iz düşüm çizgisi ile $T_{a_2} - T_{a_3}$ yere iz düşüm çizgisinin kesişimi P_{kes} Denklem 4.30'da verilmiştir.

$$P_{kes} = \frac{\begin{pmatrix} (T_{ay1}T_{ax4} - T_{ax1}T_{ay4})(T_{ay2} - T_{ay3}) \\ - (T_{ay1} - T_{ay4})(T_{ay2}T_{ax3} - T_{ax2}T_{ay3}) \end{pmatrix}}{(T_{ay1} - T_{ay4})(T_{ax2} - T_{ax3}) - (T_{ax1} - T_{ax4})(T_{ay2} - T_{ay3})} \quad (4.30)$$

Diyagonal ayak çiftlerinin oluşturduğu çizgilerin yere iz düşümünün kesişim konumu P_{kes} ile tüm TUKSDAR'ın kütle merkezinin yere iz düşümü kıyaslanarak kütle merkezinin kesişim noktasına olan x eksenindeki uzaklığı e_{xkm} ifadesi Denklem 4.31'de ve y eksenindeki uzaklığı e_{ykm} ifadesi Denklem 4.32'de hesaplanmaktadır.

$$e_{xkm} = \bar{P}_x - P_{kes_x} \quad (4.31)$$

$$e_{ykm} = \bar{P}_y - P_{kes_y} \quad (4.32)$$

Denklem 4.10 – 4.13'te kullanılan d_y öteleme miktarı Denklem 4.31'de verilen kütle merkezi konum hatasının x bileşenini kullanarak hesaplanan bir PD tabanlı kontrolcünün çıktısıdır. d_y öteleme miktarı Denklem 4.33'te verilmiştir.

$$d_y = -(k_{km}e_{xkm} + b_{km}\dot{e}_{xkm}) \quad (4.33)$$

Aynı şekilde, Denklem 4.10 – 4.13'te kullanılan d_z öteleme miktarı Denklem 4.32'de verilen kütle merkezi konum hatasının y bileşenini kullanarak bir PD tabanlı kontrolcünün çıktısıdır. d_z öteleme miktarı Denklem 4.34'te verilmiştir.

$$d_z = k_{km}e_{ykm} + b_{km}\dot{e}_{ykm} \quad (4.34)$$

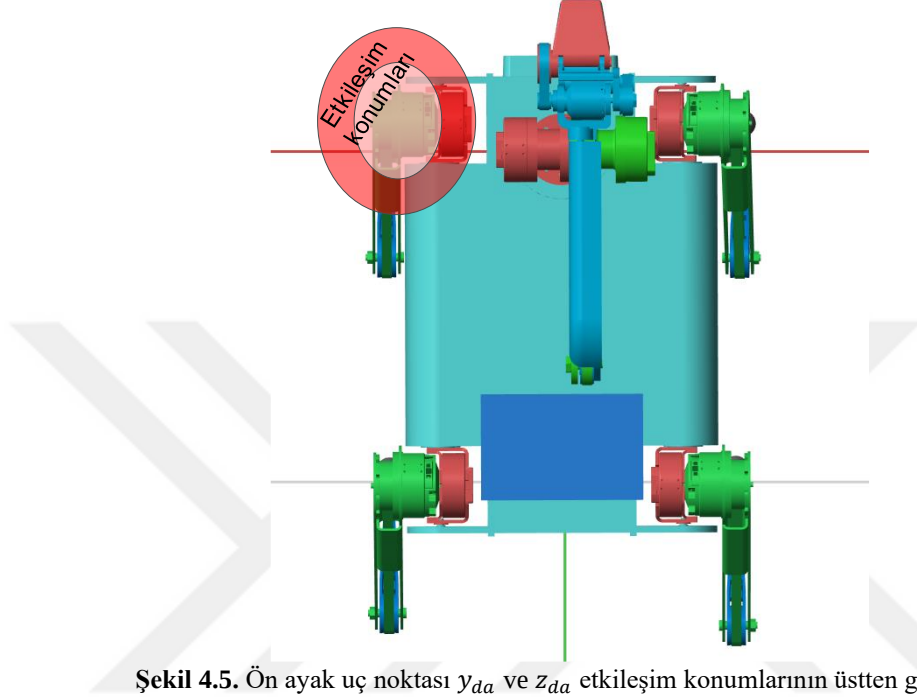
4.2.4. Kendi Etrafında Dönüş Senaryosu

TUKSDAR'ın kendi etrafında dönebilmesi için uçuş aşamasındaki ayakların arzu edilen yöne doğru ve destek aşamasındaki ayakların da arzu edilen yönün tersi yönde ayak koordinat sistemine göre y ekseninde hareket etmeleri gerekir. Bunun için Denklem 4.10 – 4.13'te verilen y_{da} konumlarına yönelme açısına bağlı olarak ekleme yapılmalıdır. Bu ekleme yürüme senaryosunda olduğu gibi 0° fazı üzerinden yapılmalıdır. Bu yüzden ayak koordinat sistemine göre 1 ve 3 numaralı ayakların y konumuna $+A_{faz_2}f_{yön}$, 2 ve 4 nolu ayakların y konumuna ise $-A_{faz_2}f_{yön}$ eklenerek TUKSDAR'ın kendi eksen etrafında dönmesi sağlanmıştır. $f_{yön}$ değişkeni $\theta_{yön}$ yönelme açısı hatasına bağlı olarak bir PID kontrolcüsünün çıkışına bağlı olarak Denklem 4.35'te verilmiştir.

$$f_{yön} = \max\left(-0.25, \min\left(k_{yön}\theta_{yön} + b_{yön}\dot{\theta}_{yön} + i_{yön} \int \theta_{yön} dt, 0.25\right)\right) \quad (4.35)$$

TUKSDAR'ın yönelme açısındaki hataları telafi etmek için, y_{da} etkileşim mesafesine etki ederek PID tabanlı bir empedans kontrolü tasarlanmıştır ve bu

kontrolcünün çıktısı $f_{yön}$ değişkenini oluşturmaktadır. Bu kontrolcü, TUKSDAR'ın yönelme açısı aşırı yüksek olması durumunda ani hareketleri önlemek için $f_{yön}$ değişkenini -0.25 ile 0.25 m aralığında sınırlandırmaktadır. Şekil 4.5'te kendi etrafında dönüş sırasındaki y_{da} ve z_{da} etkileşim konumlarının gösterimi gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Ön ayak uç noktası y_{da} ve z_{da} etkileşim konumlarının üstten görünüşü

y_{da} ve z_{da} etkileşim konumları; ana gövde α ve β eğim açlarına, f_{ileri} , A_{faz_2} ve e_{xkm} değişkenlerine bağlı olduğu için y_{da} ve z_{da} etkileşim konumları aralık olarak gösterilmiştir.

4.2.5. Yan Yürüme Senaryosu

TUKSDAR'ın yan yürüyebilmesi için kendi etrafında dönüş senaryosunda küçük bir değişikliğe ihtiyaç vardır. Kendi etrafında dönüş sırasındaki 3 ve 4 numaralı ayakların ayak koordinat sistemine göre y konumlarına eklenmiş olan $A_{faz_2}f_{yön}$ bileşeninin -1 ile çarpılması gerekir. Bunun için $A_{faz_2}f_{yön}$ bileşeni k_{Turn} adlı bir değişken tanımlanmış ve Denklem 4.36'da gösterilmiştir.

$$k_{Turn} = \begin{cases} +1 & , \text{kendi etrafında dönüş için} \\ -1 & , \text{yan yürüyüş için} \end{cases} \quad (4.36)$$

4.3. Nesne Manipülasyonunun Empedans Kontrolü ile Modellenmesi

Nesne manipülasyonu iki başlıkta incelenmiştir. Tamamen yerden ayrılabilen bir nesnenin (bir bardağın) tutulması ve taşınması senaryosu modellenmiştir. İkinci olarak da tamamen yerden ayrılmayan bir nesnenin (kapı ve kapı kolu) tutulması ve yönlendirilmesi senaryosu modellenmiştir.

4.3.1. Nesne Tutma ve Taşıma Senaryosu

TUKSDAR'ın bir masanın üstündeki bir bardağın tutulması senaryosu sırasında şu aşamalar takip edilmektedir.

1. Bardağa yukarıdan yaklaşma aşaması başlatılır.
2. θ_{6d} tutucu kol altıncı mafsallık etkileşim açısını -45° 'ye değiştirilir. Bu sayede tutucu kolun altıncı mafsallık -45° 'ye doğru açılmaya başlar. Bunu sağlamak için altıncı mafsala uygulanması gereken tork denklemi Denklem 4.37'de verilmiştir. Altıncı eyleyici torku ile θ_6 açısal hatasının k_{T6} ile çarpılması ile P kontrolcü tabanlı bir empedans kontrolü tanımlanmıştır. k_{T6} kazancı 0.11 olarak alınmıştır.

$$\tau_6 = \tau_{act6} + (\theta_{6d} - \theta_6)k_{T6} \quad (4.37)$$

3. h_1 değişkeni (nesneden yukarı yöndeki uzaklığı) 300 mm olarak başlatılır.
4. TUKSDAR'ın tutucu kol uç noktasının etkileşim noktası P_d 'nin nesne konumuna bağlı olarak ifadesi 4.38'de verilmiştir.

$$P_d = P_b + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_1 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

5. Tutucu kolun etkileşim mesafe hatası Denklem 4.39'da verilmiştir.

$$e_{P_d} = P_d - P \quad (4.39)$$

6. Tutucu kolun etkileşim mesafe hatasının bileşke değeri 0.010 m'den küçük olduğunda h_1 değişkenini Denklem 4.40'ta göre güncellenir. Bu ifadeye göre h_1 değişkeni 0.070 m'den küçük olmayacak şekilde 0.001 m azaltılır.

$$h_1 = \max(0.070, h_1 - 0.001) \quad (4.40)$$

7. Eğer Denklem 4.41'deki şart sağlanırsa, ikinci adıma geri dön.

$$|h_1 - 0.070| \geq 0.001 \quad (4.41)$$

8. Bardağın tutulması işlemi için bekleme aşamasına geçilir.
9. θ_{6d} etkileşim açısını -10° 'ye değiştir. Bu sayede tutucu kolun uç mafsalları arasındaki nesne sıkıştırılmak üzere kapanmaya başlar.
10. -10° etkileşim açısı, θ_6 açısı anlık değeri sabit kalana kadar uygulanır. Bu sayede nesne tutulmuş olur.
11. Bardağın yukarı kaldırılması için tutucu kol etkileşim konumunun o anki konumundan z yönünde 0.070 m yukarıya ayarlanır. Bu durum Denklem 4.42'de ifade edilmiştir.

$$P_d = P_b + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.070 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

12. Bardağın yukarı kaldırılması sırasındaki konum hatası e_p , Denklem 4.43'te verilmiştir. Konum hatası e_p , 0.025'ten küçük olana kadar tutucu kolun etkileşim konumu sabit tutulur ve bu şekilde nesne tutucu kol tarafından yükselmeye devam eder.

$$e_p = \sqrt{(P_d - P_x)^2 + (P_d - P_y)^2 + (P_d - P_z)^2} \quad (4.43)$$

13. Tutucu kolun, bardağı çöp kutusuna hizalanmak için uygulayacağı etkileşim konumu, çöp kutusunun z konumu dışında x ve y konumları olarak uygulanır. Bu durum Denklem 4.44'te gösterilmiştir.

$$P_d \leftarrow \begin{bmatrix} P_{c_x} \\ P_{c_y} \\ P_{d_z} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

14. Bardağın çöp kutusuna hizalaması sırasında, tutucu kolun uç noktasının konum hatası sadece x ve y eksenlerine göz önünde bulundurularak hesaplanır ve Denklem 4.45'te gösterilir. Tutucu kolun etkileşim konumu, konum hatası 0.020 m'den küçük olana kadar sabit tutulur.

$$e_p = \sqrt{(P_d - P_x)^2 + (P_d - P_y)^2} \quad (4.45)$$

15. Bardağın çöp kutusuna bırakılması için tutucu kolun etkileşim açısı θ_{6d} , -45° 'ye ayarlanır. Böylece tutulan nesne serbest düşüşe bırakılmış olur.

Bu senaryo uygulandığında önce bardağa yaklaşılr, ardından nesne kavranır, daha sonra yukarı kaldırılır ve çöp kutusuna hizalanır. Son olarak da nesne çöp kutusuna bırakılır.

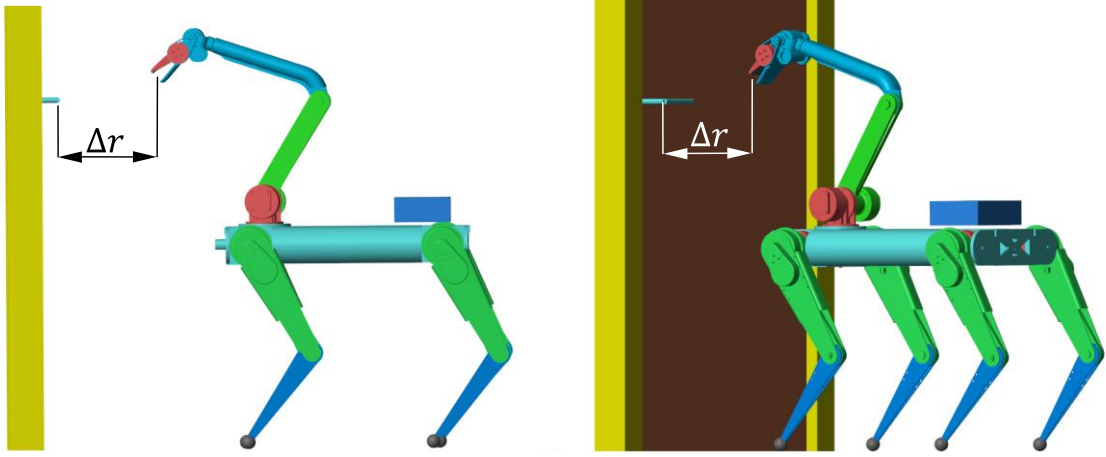
4.3.2. Kapı Kolu Tutma ve Açma Senaryosu

TUKSDAR'ın bir kapının kolunu tutması, açması ve kapıdan geçmesi senaryosu sırasında aşağıdaki adımlar edilmektedir.

1. TUKSDAR'ın yönelme hedefi P_h konum vektörü, kapı kolu konumu P_{kol} olarak atanır.
2. Adım fazı vektörü A_{faz} genliğine etki eden r_f değeri 0.15 olarak atanır. İlerleme hızı V_{ileri} değeri de 0.26 olarak atanır. Bu sayede robot ileri yönde yürümeye başlar.
3. P_h konum vektörünün büyüklüğü 0.6 m'den küçük olana kadar V_{ileri} değişkeni sabit tutulur. Bu şart Denklem 4.46'da verilmiştir.

$$|P_h| \leq 0.6 \quad (4.46)$$

4. Kapı koluna 0.6 m'den daha az bir mesafeye geldikten sonra adım fazı vektörü A_{faz} genliğine etki eden r_f değeri 0 olarak atanır. Bu sayede ref \ h TUKSDAR'ın yürüyüşü tamamen durur. Δr değişkeni 0.2 m olarak atanır.
5. Δr değişkeni TUKSDAR'ın tutucu kol uç noktasının kapı koluna yatayda yani TUKSDAR koordinat sistemine göre y ekseninde kaç m uzaktan yaklaşacağını temsil etmektedir. Δr mesafesi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Tutucu kol etkileşim konumu P_d kapı kolunun konumuna bağlı olarak Denklem 4.47'de verilmiştir. Tutucu kolun uç noktasının ağız açıklığının ortalanması için geometrik olarak z ekseninde 0.02 m öteleme uygulanmıştır.



Şekil 4.6. Δr , TUKSDAR'ın tutucu kol uç noktasının kapı koluna yatayda ilk yaklaşma mesafesi

$$P_d = P_{kol} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\Delta r \\ 0.02 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

6. Tutucu kolun ağız açıklığını artırmak için θ_{6d} tutucu kol altıncı mafsall etkileşim açısı -45° 'ye değiştirilir. Bu sayede tutucu kolun altıncı mafsall -45° 'ye doğru açılmaya başlar.
7. Etkileşim mesafesi 0.03 m'nin altına düşene kadar tutucu kol uç noktası P_d konumuna ilerler.
8. Etkileşim mesafesi 0.03 m'nin altına düştüğünde Δr değişkeni 0 m'nin altına inmeyecek şekilde 0.001 m azaltılır. Bu durum Denklem 4.48'de verilmiştir.

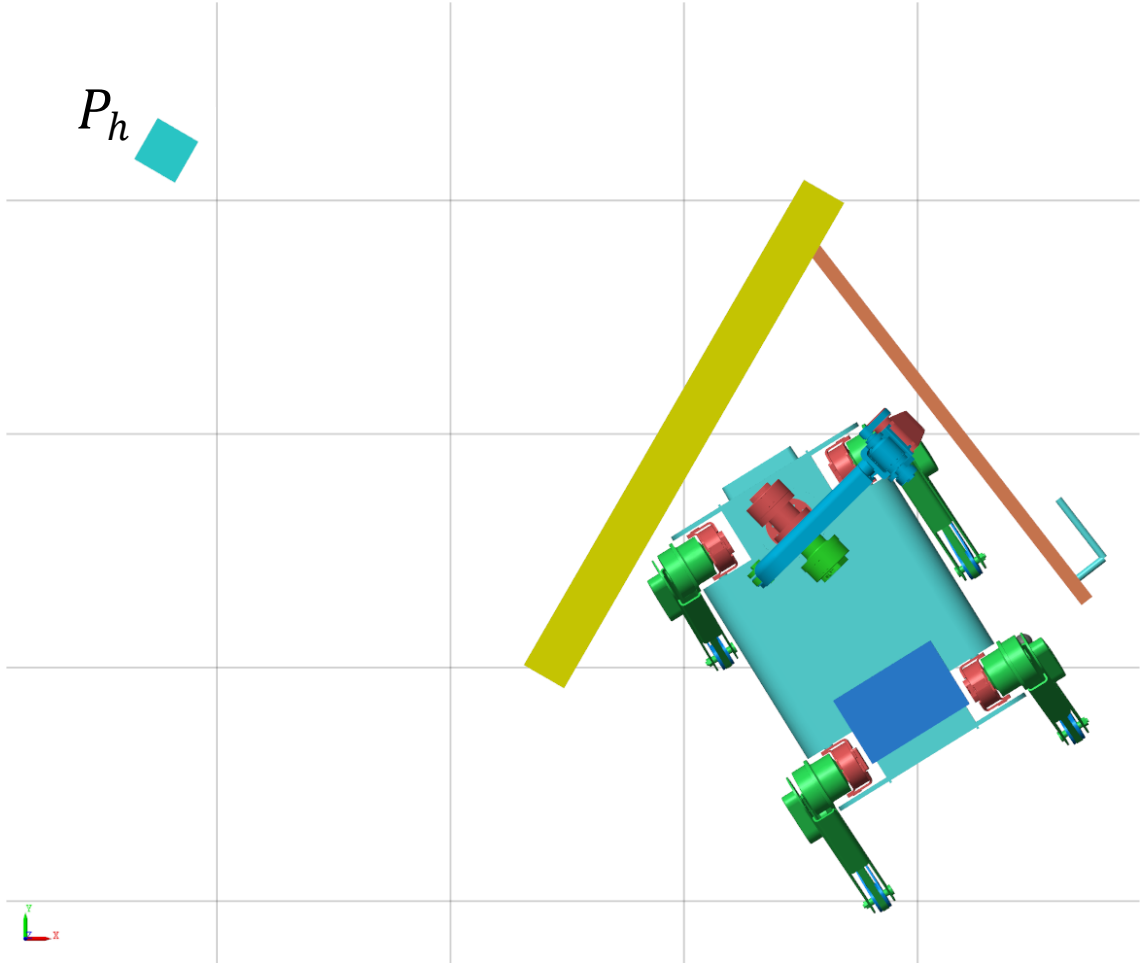
$$\Delta r \leftarrow \max(0, \Delta r - 0.001) \quad (4.48)$$

9. Δr mesafesi 0 m'ye ulaşınca onuncu adımdan devam edilir; aksi takdirde altıncı adımdan devam edilir.
10. Kapı kolunu tutma aşamasında θ_{6d} tutucu kol altıncı mafsallık etkileşim açısı 0° 'ye değiştirilir. Bu sayede tutucu kolun altıncı mafsallık 0° 'ye doğru kapanmaya başlar.
11. 0° etkileşim açısı, θ_6 açısı anlık değeri sabit kalana kadar uygulanır. Bu sayede kapı kolu tutulmuş olur.
12. Kapı kolunu tutarak geri yürüme aşamasında adım fazı vektörü A_{faz} genliğine etki eden r_f değeri 0.15 ve V_{ileri} hızı -0.15 olarak atanır. Bu sayede TUKSDAR geri geri yürümeye başlar.
13. Kapı çerçevesi P_{kap} vektörünün büyüklüğü yani kapı çerçevesine olan uzaklık 2.1 m'den büyük olduğunda geri geri yürüme işlemi durdurulur. Yürüme işlemini durdurmak için adım fazı vektörü A_{faz} genliğine etki eden r_f değeri 0 olarak atanır.
14. Kapı kolunun tutularak sağa savurma aşamasında tutucu kol uç noktası hedefi kapı koluna bağlı olarak değişimi Denklem 4.49'da verilmiştir. Bu denklemdeki eklenen sabit öteleme kapı kolunu TUKSDAR'a göre sağ ve geriye doğru çekmekte ve bu sayede kapı kolu radyal yörüngesinde çekilmektedir.

$$P_d = P_{kol} + \begin{bmatrix} 0.3 \\ -0.25 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

15. TUKSDAR'ın yönelme hedefi P_h konum vektörü, kapı çerçevesi konumu olarak atanır.
16. Kapı çerçevesine doğru yürüme aşamasında adım fazı vektörü A_{faz} genliğine etki eden r_f değeri 0.15 olarak atanır. İlerleme hızı V_{ileri} değeri de 0.26 olarak atanır. Bu sayede TUKSDAR kapı çerçevesine doğru ileri yönde yürümeye başlar.
17. Kapının geri kapanmasını engellemek için tutucu kol etkileşim konumu P_d kapı konumu olarak atanır. Bu sayede kapının geri kapanması tutucu kol ile engellenmiş olur.

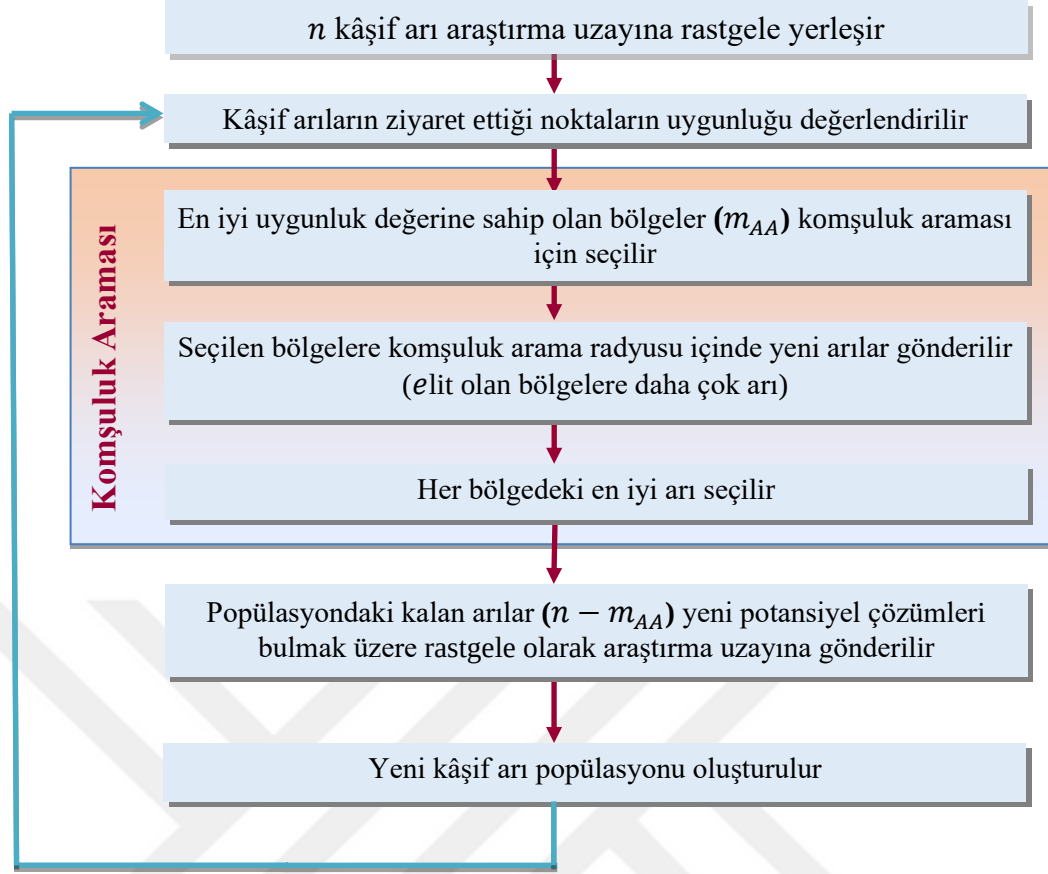
18. Kapı çerçevesine olan mesafe 0.3 m'nin altına indiğinde TUKSDAR'ın yönelme hedefi P_h konum vektörü kapıdan geçilen oda içindeki kapı hizasında bir hedef konumuna atanır. Yeni yönelme hedefi P_h konum vektörü Şekil 4.7'de gösterilmiştir.
19. TUKSDAR P_h konumuna ilerlemeye devam eder ve P_h konumuna ulaştığında kapıdan geçme işlemi tamamlanmış olmaktadır.



Şekil 4.7. Kapı çerçevesine 0.3 m yaklaştıktan sonraki TUKSDAR'ın yeni yönelme hedefi P_h konumu

4.4. TUKSDAR'ın Yürüyüş Optimizasyonu

Toplamda 13 değişken bu senaryo için Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Arı Algoritması, bir global arama algoritması olup çok değişkenlidir. Arı Algoritmasının akış diyagramı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Arı Algoritmasına ait akış diyagramı

Arı Algoritması n adet kâşif arıyı arama uzayına rastgele yerleştirerek başlar. Bu arıların her biri için amaç fonksiyonu hesaplanır. Bu arıların amaç fonksiyonu sonuç dizisinde küçükten büyüğe doğru sıralama yapılır. En iyi arı sonuçlarından m_{AA} tanesi, komşuluk araştırması için seçilir. En iyi sonucu veren arılar etrafında komşuluk radyusu içinde yeni arı dizileri üretilir ve daha sonra da amaç fonksiyonları hesaplanır. Fakat m_{AA} adet arı arasından e adet en iyi olanları kıdemli sonuçlar olarak kabul edilir. Bu sonuçların da etrafına daha fazla arı gönderilir. Bu m_{AA} adet arıdan her birinin etrafına gönderilen araştırmacı arılar da aynı şekilde kendi aralarında tekrar küçükten büyüğe doğru sıralanır. En küçük amaç fonksiyonu değerine sahip olan arı en iyi arının yerini alır. Kalan $(n - m_{AA})$ arının yerine, değişkenlerin sınır şartları içerisindeki uzaya rastgele yayılmış yeni arılar üretilir. Ve bütün arıların amaç fonksiyonu tekrar en küçükten başlayarak en büyüğe doğru sıralanır ve bu döngü durma kriteri ile karşılaşılan kadar veya kullanıcı durdurana kadar devam eder. Arı Algoritmasının en basit hali ile ifadesi aşağıda verilmiştir:

1. Kısıt şartları bağlı kalarak araştırma uzayında rastgele üretilmiş bir arı nüfusu oluştur.
2. Nüfusun her birinin amaç fonksiyonunu hesapla ve en küçükten başlayarak en büyüğe doğru sırala.
3. Durdurma kriteri gerçekleşmediği sürece döngüye devam et.
4. En iyi nüfusa ait bölgeleri komşuluk araştırması için seç.
5. En iyi nüfus bölgelerinin komşuluklarına yeni arıları gönder (kıdemli e adet bölgeye daha fazla arı gönder) ve her bir arının amaç fonksiyonunu hesapla.
6. Her bir komşuluk grubunun amaç fonksiyonunu en küçükten en büyüğe doğru sırala.
7. Kalan arıları kısıt şartları içinde araştırma uzayına tekrar rastgele yerleştir ve amaç fonksiyonlarını hesapla.
8. Döngüye tekrar başlamak için 3. maddeye git.

TUKSDAR'ın yerinde sayması ve yürümesi sırasındaki şu parametrelerin doğrudan etkisi vardır.

1. Yürüme fazı frekansı f_y .
2. Ayak adımlama faz açısı 1 ϕ_1 .
3. Ayak adımlama faz açısı 2 ϕ_2 .
4. Ayak uç noktası PID – tabanlı empedans kontrolcü katsayıları k_a , b_a ve i_a .
5. TUKSDAR'ın ana gövde eğim dengeleyici PID kontrolcü katsayıları $k_{Eğim}$, $b_{Eğim}$ ve $i_{Eğim}$.
6. Ön ayakların yukarı yükselme katsayısı $k_{öny}$.
7. Arka ayakların yukarı yükselme katsayısı k_{ary} .
8. Ayak konumu ek yan mesafe oransal kazancı k_{side} .
9. Adım profili genliği r_f .

Çizelge 4.2'de bu optimizasyona ait Arı Algoritmasının ayarları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Yerinde say senaryosu optimizasyonu Arı Algoritması parametreleri

n	m_{AA}	e	n_{ep}	n_{sp}
10	7	4	5	3

Çizelge 4.3'te parametrelerin en az ve en fazla alabileceği sınırlar verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yerinde say senaryosu optimizasyonu değişken sınırları

	f_y	ϕ_1	ϕ_2	k_a	b_a	i_a	k_{Egim}	b_{Egim}	i_{Egim}	k_{side}	$k_{öny}$	k_{ary}	r_f
Maksimum	2	0.3	1.8	550	1	15	0.1	0.1	0.05	0.1	3	3	0.2
Minimum	1	-0.3	1.3	450	0	0	0.01	0	0	-0.1	0.5	0.5	0.1

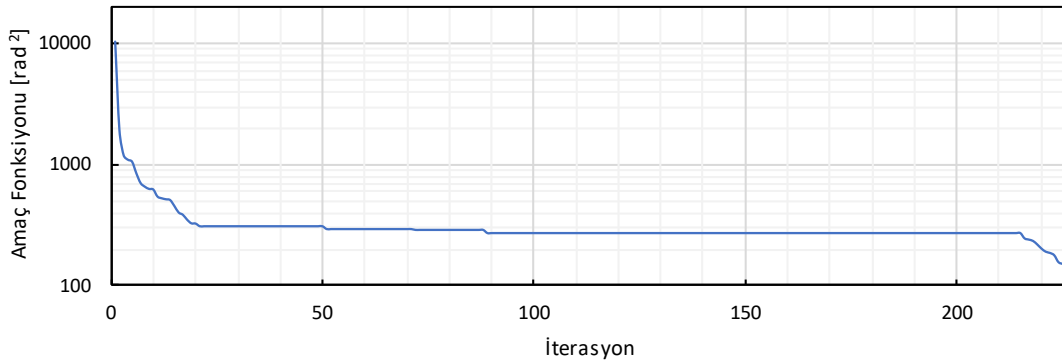
Yerinde say senaryosu optimizasyonunun amaç fonksiyonu Denklem 4.50'de verilmiştir.

$$f_a = \left(\int_{t=0}^{15} \alpha dt \right)^2 + \left(\int_{t=0}^{15} \beta dt \right)^2 + G_{p_1} \quad (4.50)$$

f_a amaç fonksiyonu, TUKSDAR'ın ana gövde eğiminin bileşenlerinden α eğim açılarının kareleri ile β eğim açılarının karelerinin toplamıdır. Buna ilave olarak da bir cezalandırma fonksiyonu G_{p_1} olarak 4.51'de verilmiştir.

$$G_{p_1} = (\max(\alpha, \beta) > 90^\circ) \cdot 10000 \quad (4.51)$$

G_{p_1} cezalandırma fonksiyonunda, simülasyon sırasındaki α veya β açılarından herhangi birisi 90° dereceyi aşması durumunda f_a amaç fonksiyonuna 10000 ekleyerek uygulanır. Bu sayede, TUKSDAR'ın devrilmesine neden olan bir parametre seti uygulandığında araştırma uzayının ilgili noktası cezalandırılarak araştırma uzayının bu noktasına yakınlığı azaltılır. Şekil 4.9'da optimizasyon yakınsama grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Yerinde say senaryosu optimizasyonu yakınsama grafiği

Çizelge 4.4'te optimizasyon sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yerinde say senaryosu optimizasyonu değişken değişimleri

Değişkenler	Başlangıç Değerleri	Arı Algoritması Sonucu	Değişim
f_a [rad^2]	10234.8580	149.8829	-98.5%
f_y [Hz]	1.5	1.198	-20.1%
ϕ_1 [rad]	0.2319	0.091	-60.8%
ϕ_2 [rad]	1.3212	1.76	33.2%
k_a [m]	547.2975	500	-8.6%
b_a [m/s]	0.8314	0	-100.0%
i_a [m]	0.2323	10	4204.7%
$k_{Eğim}$ [m]	0.0147	0.05	239.2%
$b_{Eğim}$ [m/s]	0.0666	0	-100.0%
$i_{Eğim}$ [m]	0.0441	0	-100.0%
k_{side} [m/m]	-0.0618	0	-100.0%
$k_{öny}$ [m/m]	2.0427	2	-2.1%
k_{ary} [m/m]	2.5444	2	-21.4%
r_f	0.1599	0.15	-6.2%
İterasyon		225	

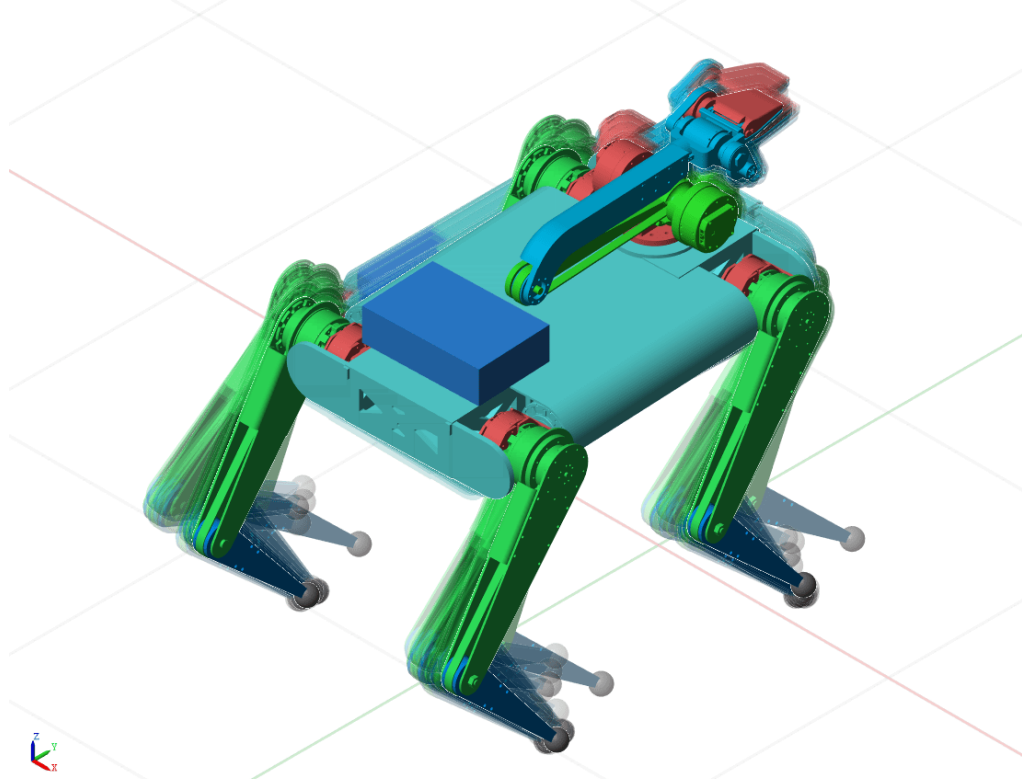
Çizelge 4.4'te verilen başlangıç değerleri rastgele olarak seçilmiştir. Arı Algoritması kullanılarak yapılan optimizasyonda, amaç fonksiyonu %98.5 azaltılarak 225 iterasyonda tamamlanmıştır.

5. SAYISAL UYGULAMA VE DEĞERLENDİRME

Sayısal uygulamalar TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu, yürüme senaryosu, kendi etrafında dönüş senaryosu, bir viraj etrafında dönüş, yan yürüme senaryosu, bir masaya yürüyüş, nesne tutma ve taşıma senaryosu ve bir kapıyı açma senaryolarında uygulanmıştır. Senaryoların simülasyon görüntüleri ve çevre ile etkileşimleri hakkında grafiklere yer verilmiştir.

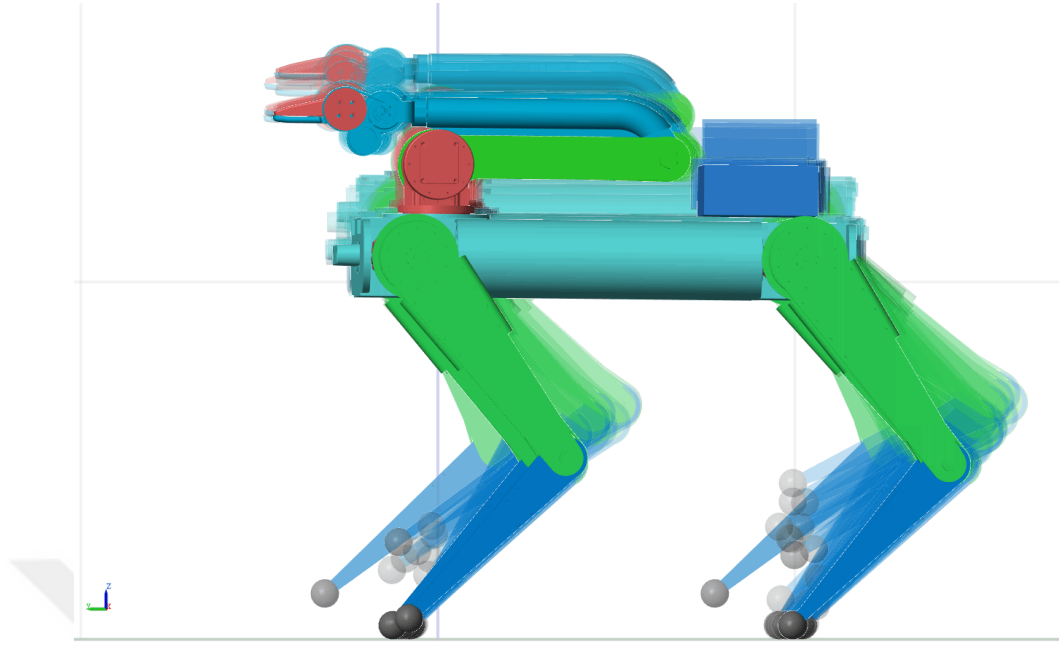
5.1.1. Yerinde Say Senaryosu

TUKSDAR'ın yerinde sayması için 4.2.2 başlığındaki yerinde sayma senaryosu kullanılarak 15 saniye boyunca uygulanmıştır. Şekil 5.1'de bu simülasyon sonucunda elde edilen TUKSDAR'ın izometrik görüntüsü görülmektedir.



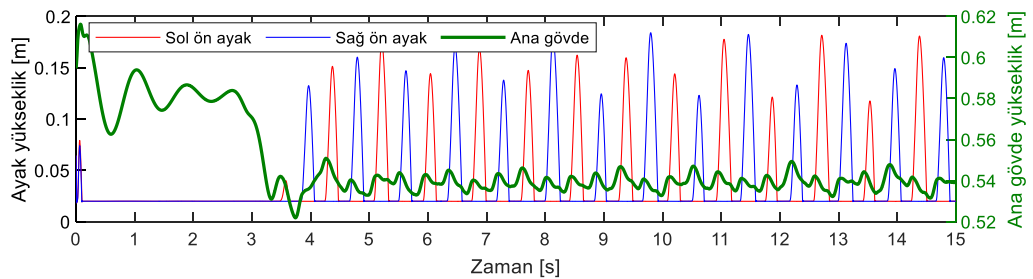
Şekil 5.1. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu izometrik görünüşü

Bütün simülasyonlarda TUKSDAR yerden 46 mm yükseklikten bırakılarak başlatılmıştır. Başlangıç şartlarında zemin ile TUKSDAR arasındaki girişimi önlemek için bu yöntem kullanılmaktadır. Şekil 5.2'de TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu uygulanırken yandan görünüşü görülmektedir.



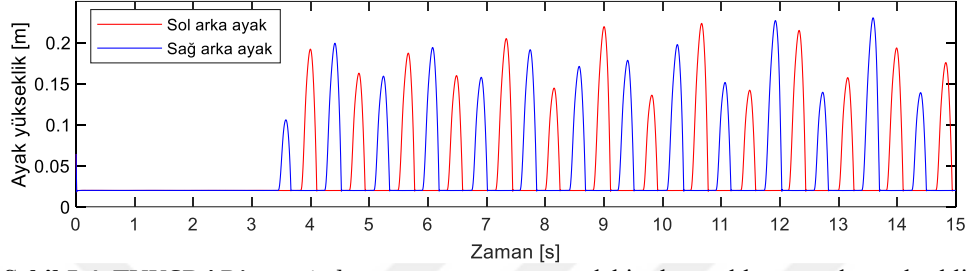
Şekil 5.2. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu yandan görünüşü

Şekil 5.2'de gösterilen TUKSDAR'ın yerinde say senaryosunun yandan görünüşüne göre TUKSDAR serbest düşüşe bırakıldığında ayaklarının uç noktası gövdeye göre düşük ataletinden dolayı hızla geriye doğru denge konumuna ulaşmıştır. Fakat ana gövdenin daha yüksek atalete sahip olmasından dolayı ana gövde ileri – geri doğrultuda neredeyse yok denecek kadar az hareket ettiği görülmektedir. Ek olarak yürüyüş sırasında da ana gövdenin ileri – geri doğrultudaki konumunun büyük oranda durağan olduğu görülmektedir. Bu durum yerinde say senaryosu başarıyla uygulandığını göstermektedir. Şekil 5.3'te TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği grafiği gösterilmiştir.



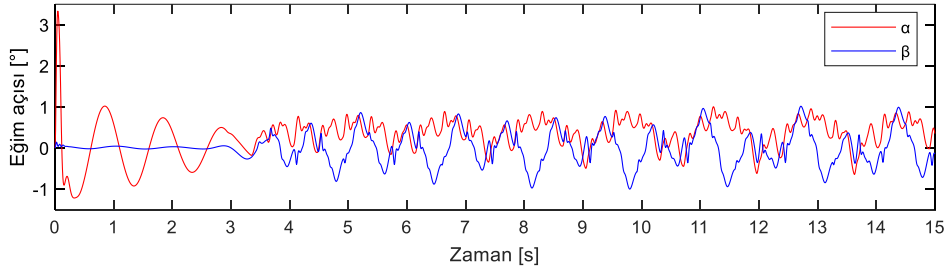
Şekil 5.3. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği

Yerinde say senaryosunun uygulanması sırasındaki ana gövdenin yerden yüksekliği 0.54 m’de dengede olduğu görülmüştür. Adım yüksekliğinin ön ayaklarda yaklaşık olarak 0.16 m olarak gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 5.4’te TUKSDAR’ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak arka ayakların yerden yüksekliği grafiği gösterilmiştir.



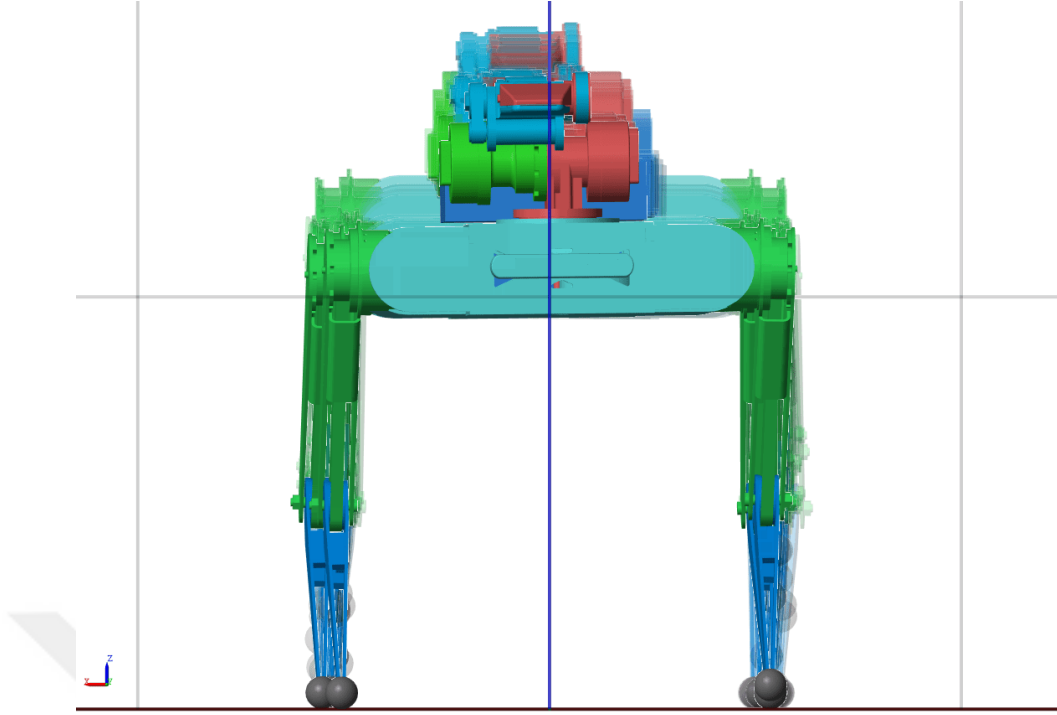
Şekil 5.4. TUKSDAR’ın yerinde say senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği

Arka ayakların yerden yükselmesi yaklaşık olarak 0.18 m olarak görülmüştür. Şekil 5.5’te yerinde say senaryosu sırasındaki TUKSDAR’ın ana gövde eğim açıları α ve β ’nın zamana bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

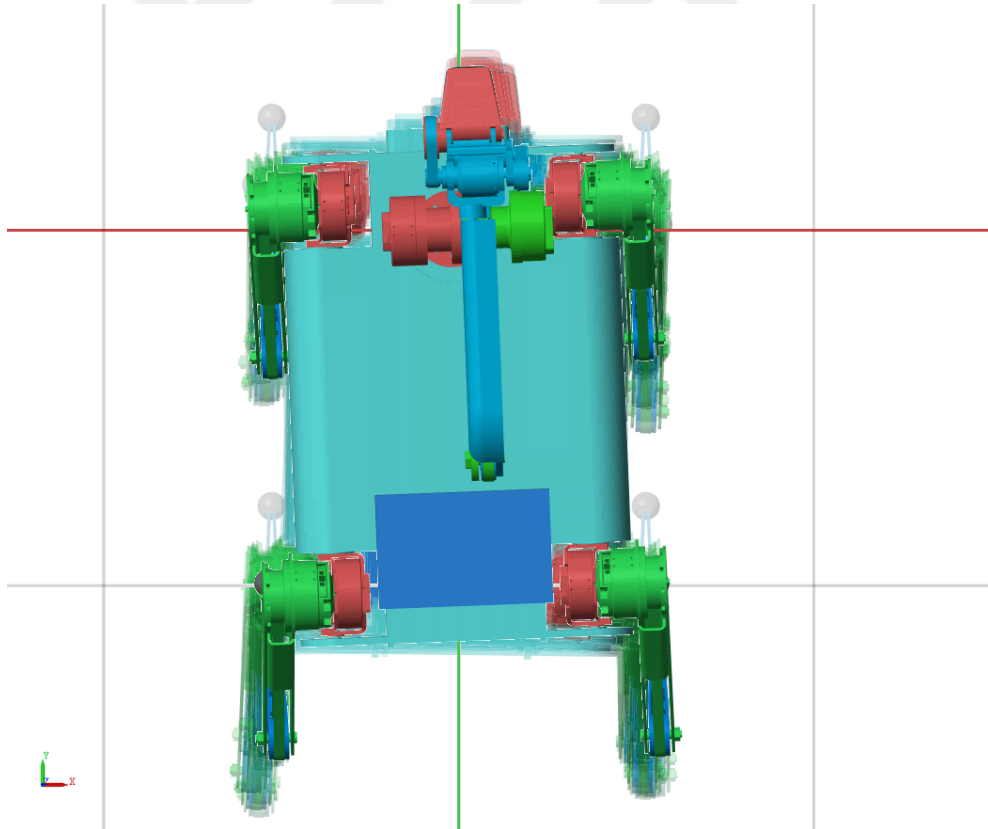


Şekil 5.5. TUKSDAR’ın yerinde say senaryosu α ve β ana gövde eğim açıları

TUKSDAR’ın yerinde say senaryosu sırasındaki ana gövde α eğimi -0.7° ile 1° aralığında dengelendiği görülmüştür. Ana gövde β eğimi ise $\pm 1^\circ$ ’de dengelendiği görülmüştür. TUKSDAR’ın yerinde say senaryosu uygulanması sırasındaki önden görüşü Şekil 5.6’da ve üstten görünüşü Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

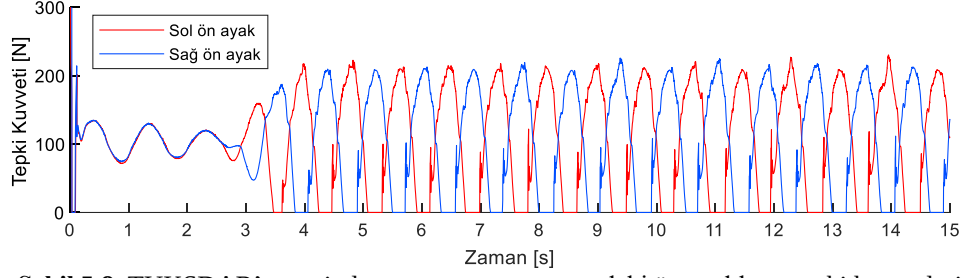


Şekil 5.6. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki önden görünüşü



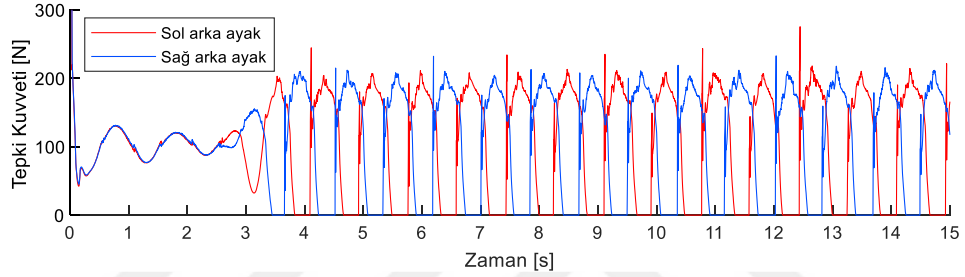
Şekil 5.7. TUKSDAR yerinde say senaryosu sırasındaki üstten görünüşü

Şekil 5.8'de yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri gösterilmiştir.



Şekil 5.8. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri

Ön ayaklardaki tepki kuvvetleri 225 N olduğu görülmüştür. Yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından arka ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



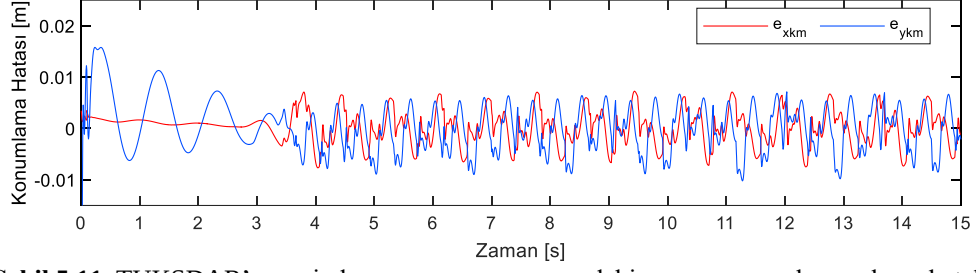
Şekil 5.9. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri

Yerinde say senaryosu sırasındaki arka ayaklardaki tepki kuvvetleri de 225 N olduğu görülmüştür. Yerinde say senaryosu sırasındaki ayakların yere temas fazları Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



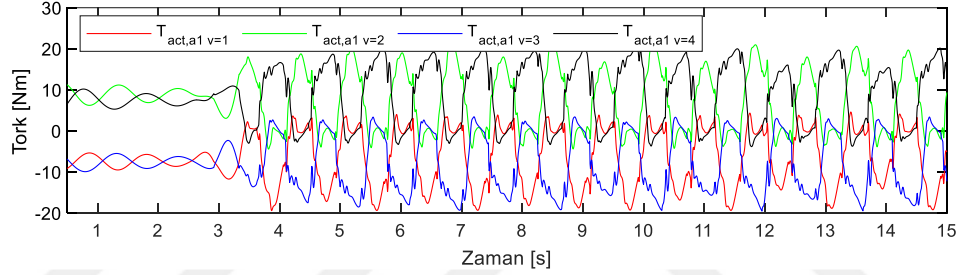
Şekil 5.10. Yerinde say senaryosu sırasında gerçekleşen ayakların yere temas fazları

Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32'de ifade edilen TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.11'de görülmektedir.

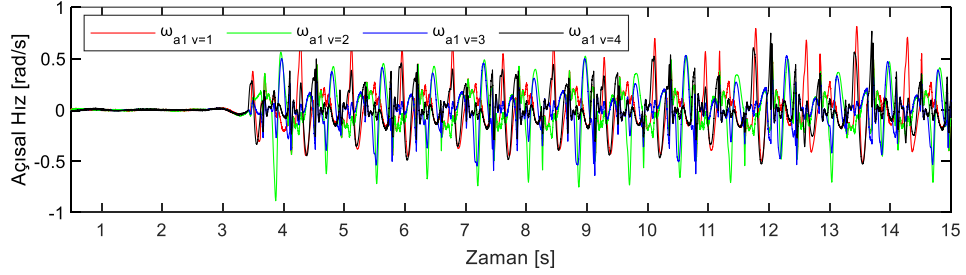


Şekil 5.11. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları

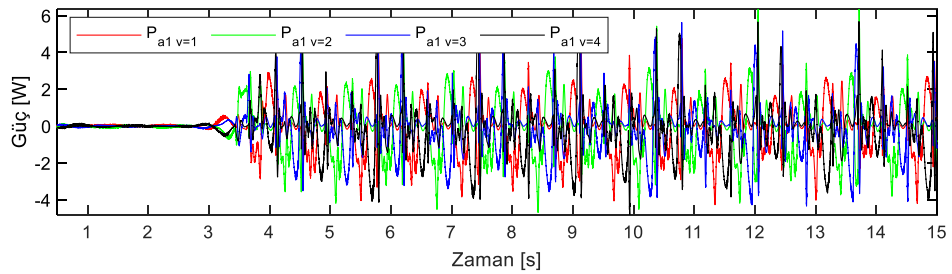
TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ifadesi ± 0.007 m hata ve e_{ykm} ifadesi ± 0.010 m hata ile dengelendiği görülmüştür. Yerinde say senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 1. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.12 – Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.12. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği

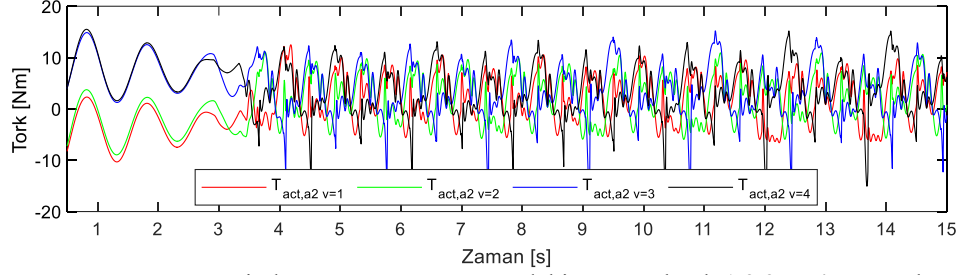


Şekil 5.13. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal açısal hız grafiği

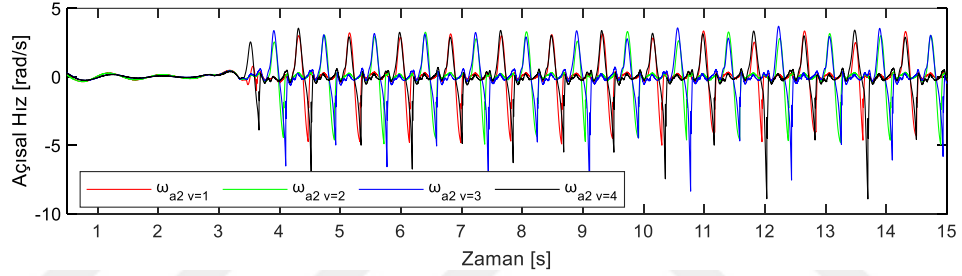


Şekil 5.14. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal güç grafiği

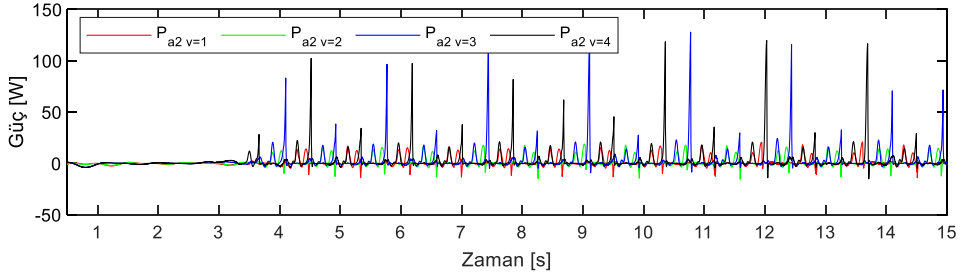
Yerinde say senaryosu sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork ± 20 Nm aralığında, açısal hız ± 1 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 6 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yerinde say senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.15 – Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal tork grafiği

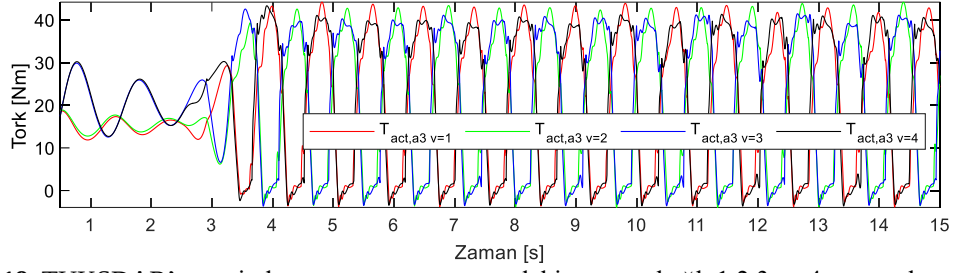


Şekil 5.16. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal açısal hız grafiği

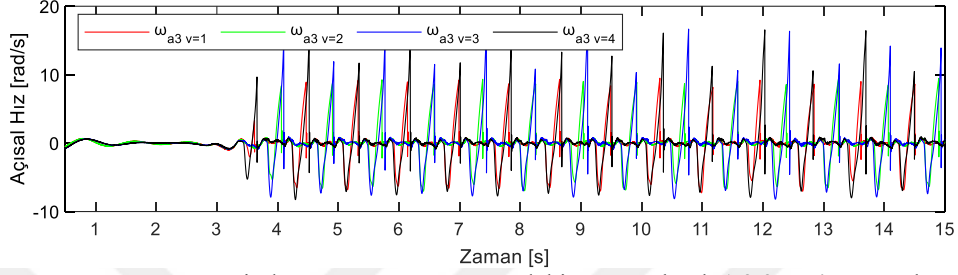


Şekil 5.17. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal güç grafiği

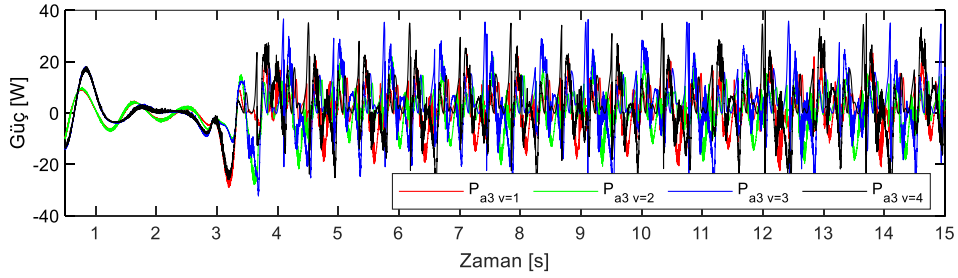
Yerinde say senaryosu sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork ± 20 Nm aralığında, açısal hız -10 rad/s ile 5 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 150 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yerinde say senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.18 – Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal tork grafiği



Şekil 5.19. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal açısal hız grafiği

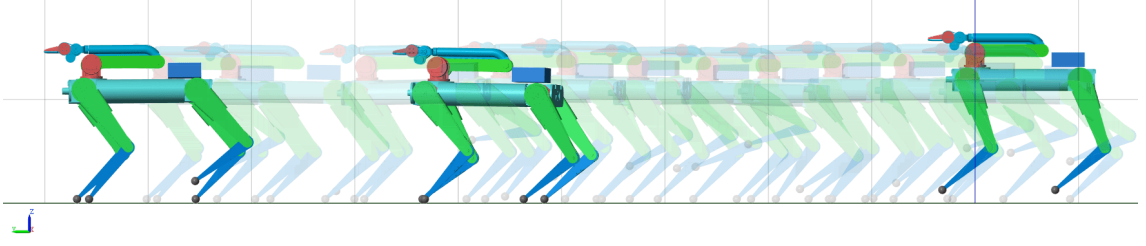


Şekil 5.20. TUKSDAR'ın yerinde say senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal güç grafiği

Yerinde say senaryosu sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork -5 Nm ile 45 Nm aralığında, açısal hız -10 rad/s ile 20 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 40 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yerinde say senaryosu sırasındaki toplam enerji sarfiyatının 517.01 J olarak gerçekleştiği görülmüştür.

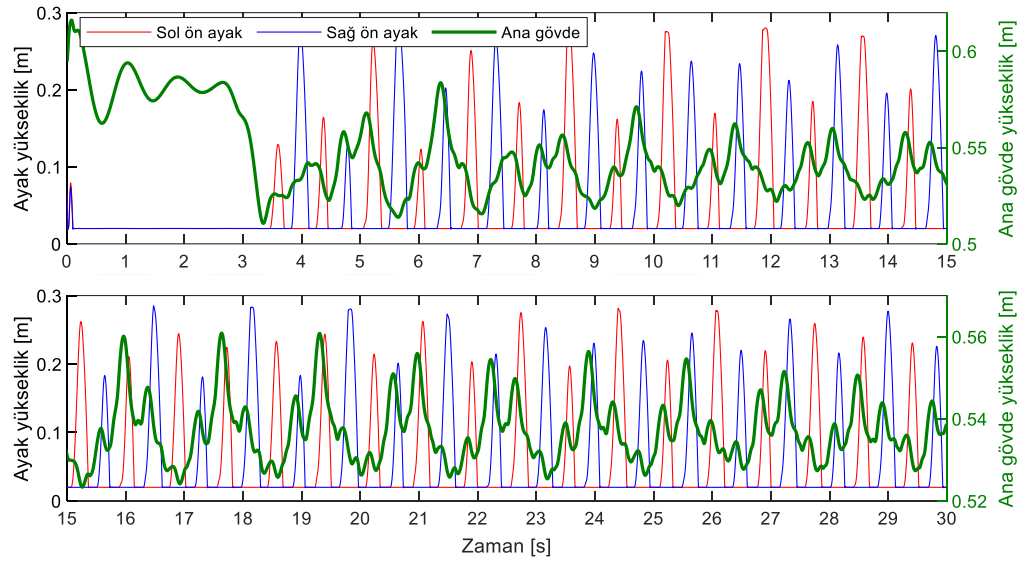
5.1.2. Yürüme Senaryosu

TUKSDAR'ın yürümesi için 4.2.3 başlığındaki yürüme senaryosu kullanılarak 30 saniye boyunca uygulanmıştır. Bu simülasyon sonucunda elde edilen TUKSDAR'ın yandan görünüşü Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Yürüme senaryosu sırasında tutucu kol motorları tamamen durmaktadır.



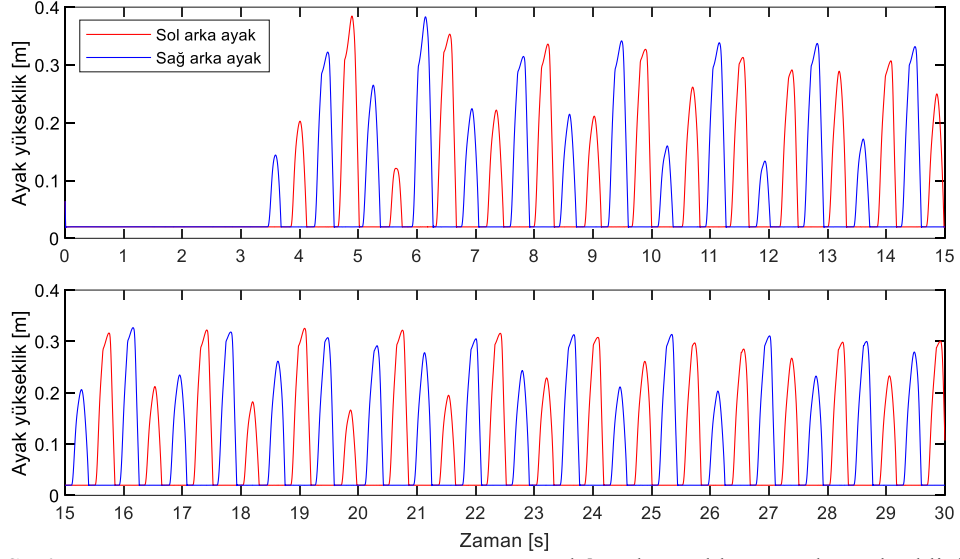
Şekil 5.21. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki yandan görünüşü

Yürüme sırasındaki zamana bağlı olarak TUKSDAR'ın ön ayaklarının ve ana gövdenin yerden yüksekliğinin değişimi Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



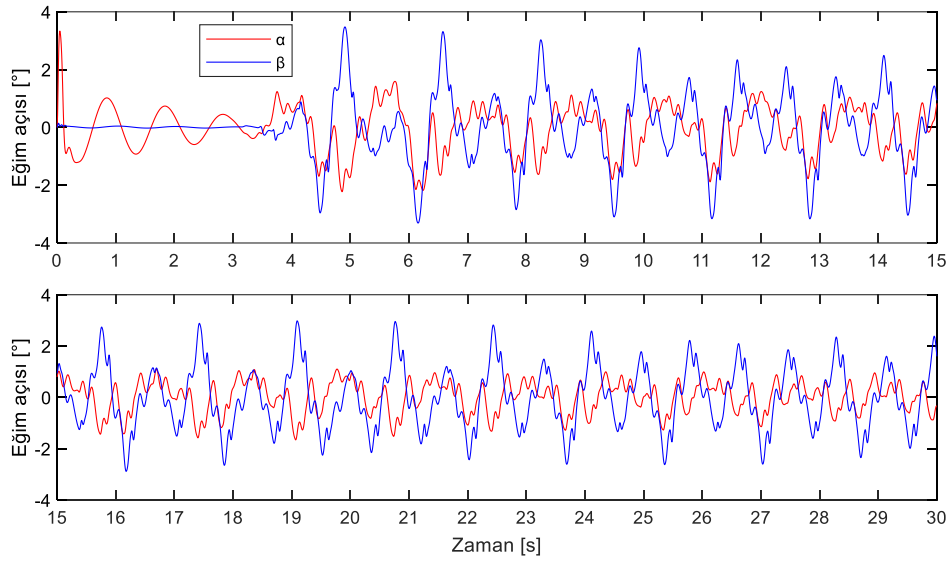
Şekil 5.22. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasında ön ayakların 0.28 m yüksekliğe ulaştığı görülmüştür. Ana gövdenin ise yine aynı şekilde 0.54 m'de dengelendiği görülmektedir. Yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak TUKSDAR'ın arka ayaklarının yere göre yükseklik değişimi Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



Şekil 5.23. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği

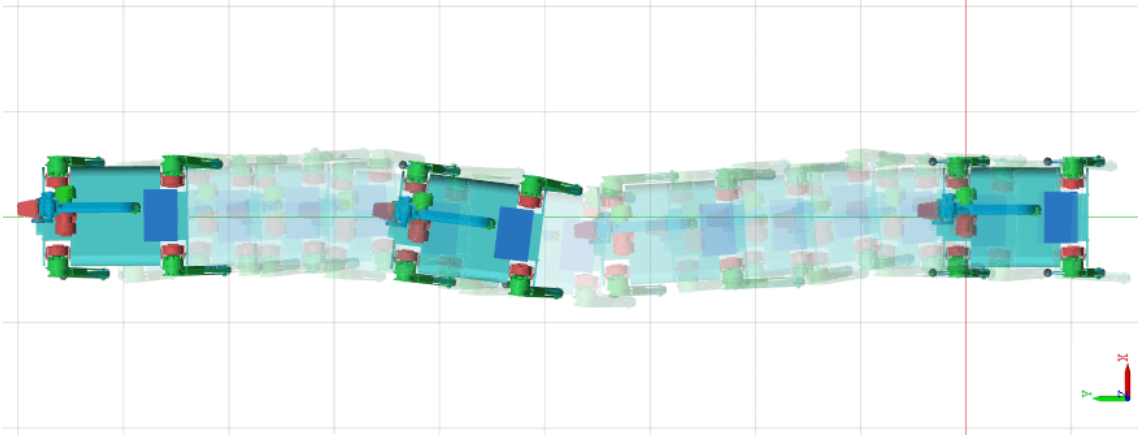
TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki arka ayak adım yüksekliği 0.33 m'ye ulaştığı görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ana gövde eğim açıları α ve β 'nin zamana göre değişimi Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları

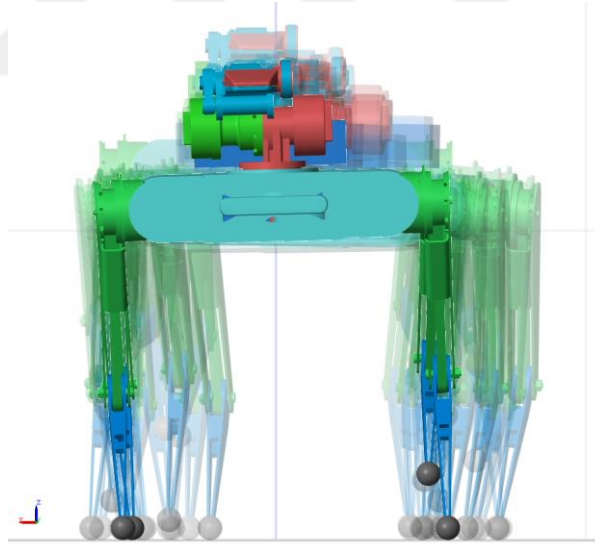
TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki ana gövde α eğiminin $\pm 2^\circ$ aralığında dengelendiği ve ana gövde β eğiminin $\pm 3^\circ$ 'de dengelendiği görülmektedir. Yürüme senaryosu sırasındaki ana gövde eğiminin dengelenmesi işleminin yerinde say senaryosuna göre daha zorlaştığı görülmektedir. Bunu telafi edebilmek için Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'teki yürüme sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının yerden yüksekliklerinin yerinde say senaryosu sırasındaki ayakların yerden yüksekliklerine

göre artmasına sebep olmuştur. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki üstten görünüşü Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



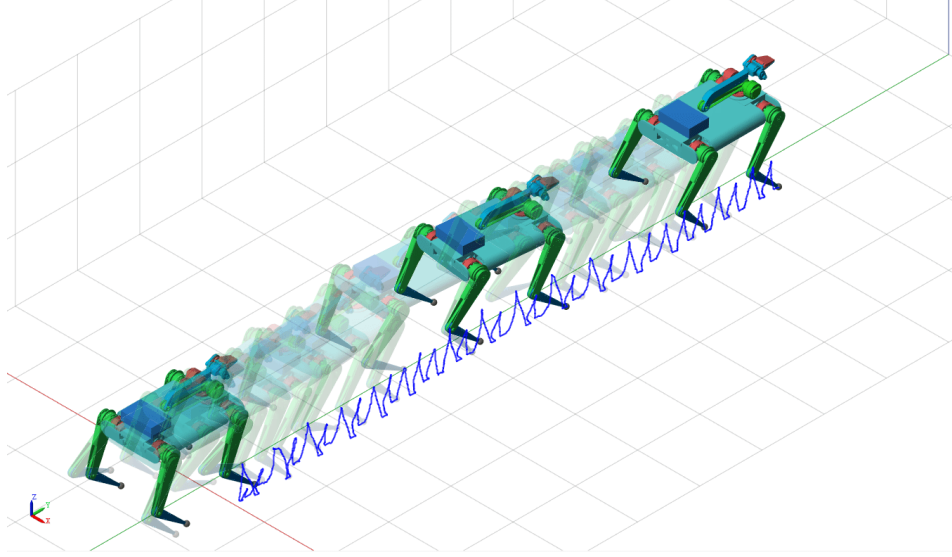
Şekil 5.25. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki üstten görünüşü

TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki yönelme açısındaki hatayı düzeltme kontrolcüsü de etkin olduğu için ilerleme sırasındaki yönelme hataları da düzeltilmektedir. Bu durum 5.1.6 başlığında incelenmiştir. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki önden görünüşü Şekil 5.26'da gösterilmiştir.



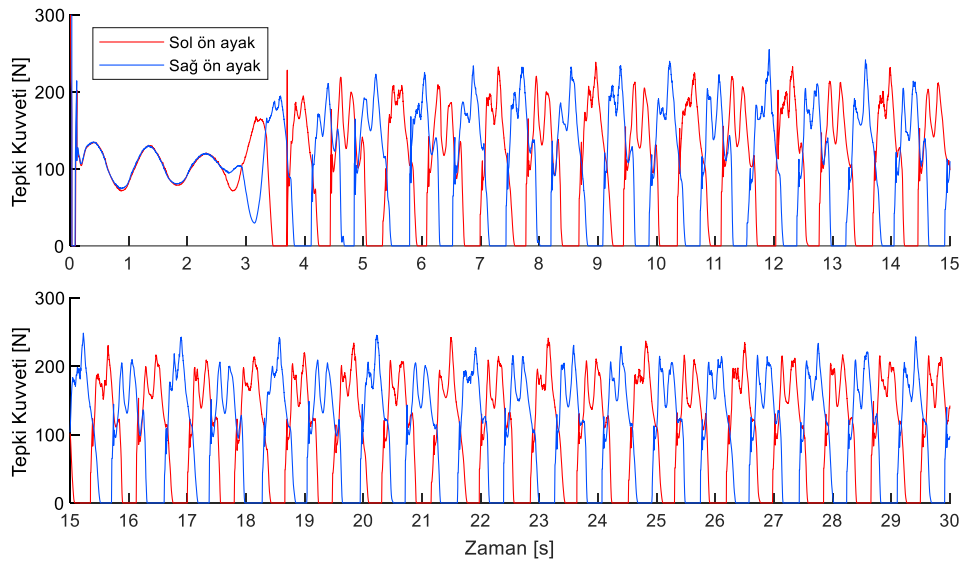
Şekil 5.26. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki önden görünüşü

TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü Şekil 5.27'de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 5.22'deki zamana bağlı sağ ön ayak uç noktasının yerden yükselmesi grafiğinin izometrik görüntüdeki gösterimi de Şekil 5.27'de gösterilmiştir.



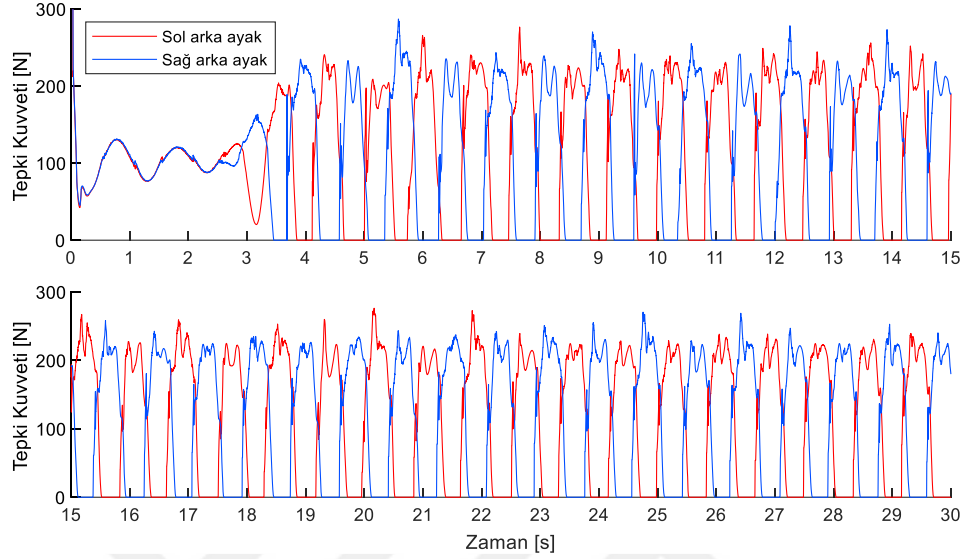
Şekil 5.27. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü ve sağ ayak uç noktasının izi

Başlangıçta her 1 m'de 5 defa sağ ön ayağın yerden yükseldiği görülmektedir. Bu durumda başlangıçta her bir adım ortalama 0.20 m'dir. Yürüme senaryosunun son zamanlarında ise her 1 m'de 4 defa sağ ön ayağın yerden yükseldiği görülmektedir. Bu anlardaki adım uzunluğu ortalama 0.25 m olmaktadır. TUKSDAR'ın durağan halden yürüyüş senaryosunun stabil hale gelmesi ile adımlama mesafesinin 0.25 m'de dengeye ulaştığı görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.28'de gösterilmiştir.



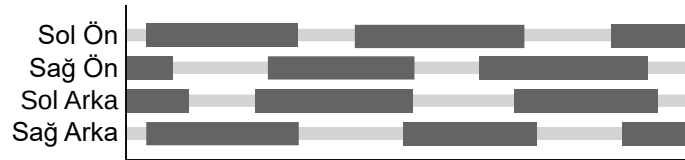
Şekil 5.28. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri

Ön ayaklardaki tepki kuvvetlerinin 250 N olduğu görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından arka ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.29’da gösterilmiştir.



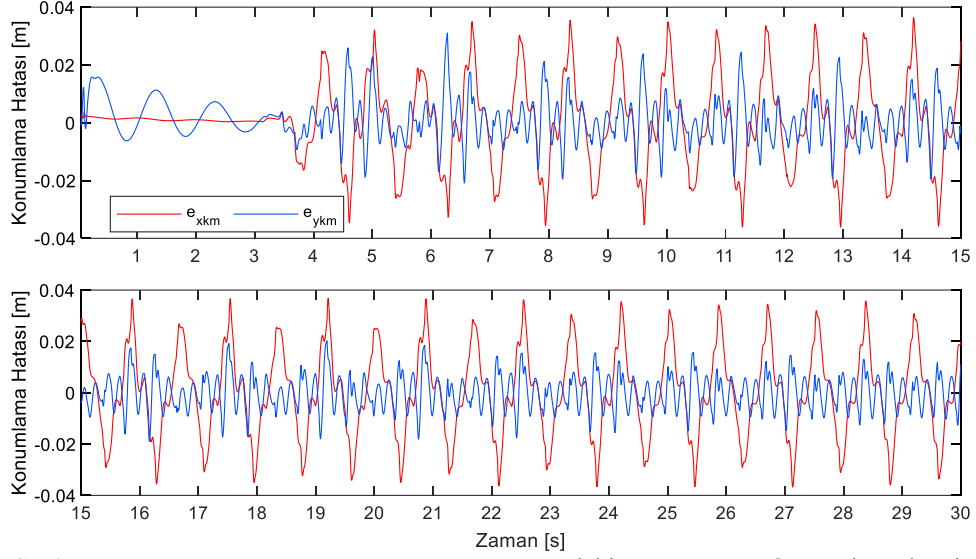
Şekil 5.29. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri

Yürüme senaryosu sırasındaki arka ayaklardaki tepki kuvvetlerinin de 275 N olduğu görülmüştür. Yürüme say senaryosu sırasındaki ayakların yere temas fazları Şekil 5.30’da gösterilmiştir.



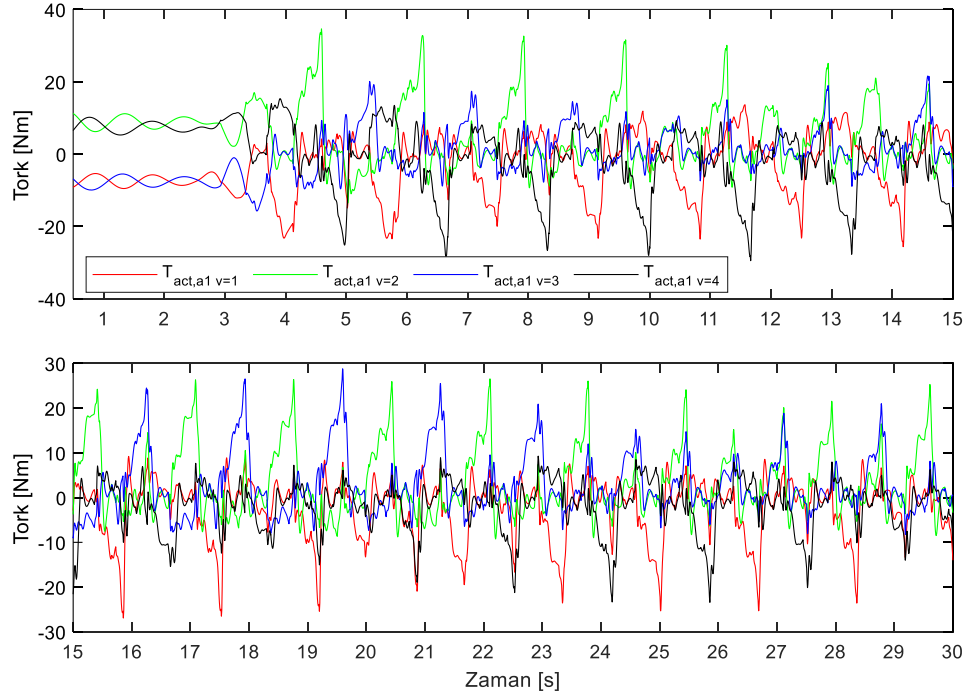
Şekil 5.30. Yürüme senaryosu sırasında gerçekleşen ayakların yere temas fazları

Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32’de ifade edilen TUKSDAR’ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.31’de gösterilmiştir.

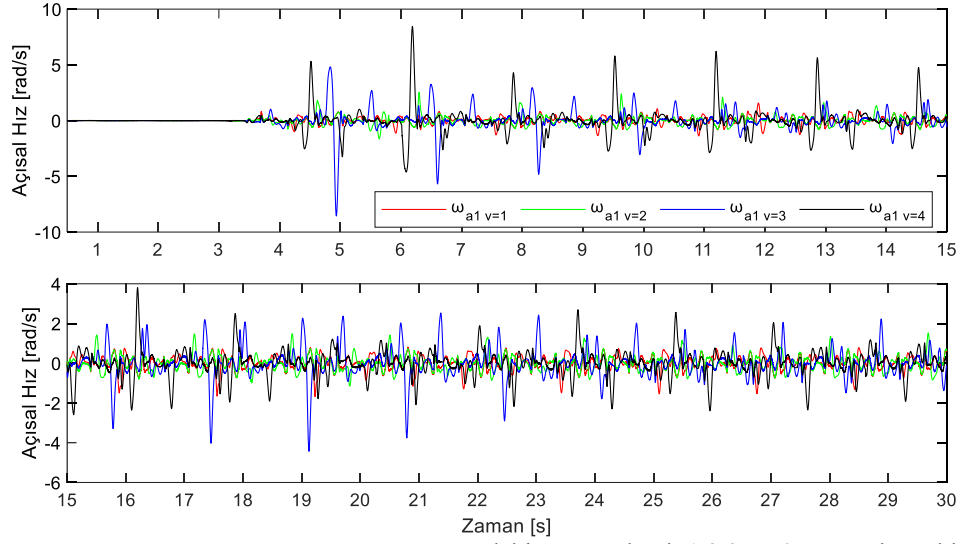


Şekil 5.31. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları

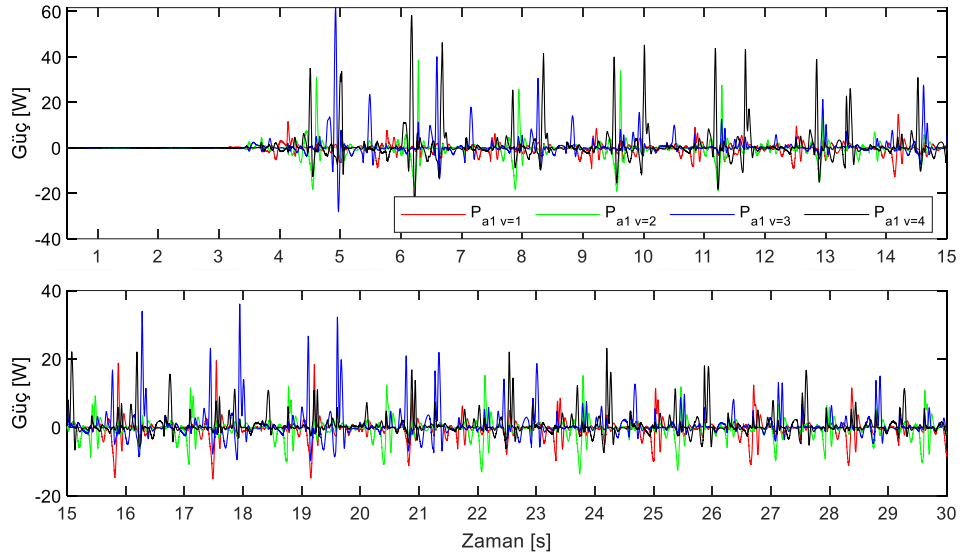
TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ifadesi ± 0.04 m hata ve e_{ykm} ifadesi ± 0.002 m hata ile dengelendiği görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 1. mafsala ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.32 – Şekil 5.34'te gösterilmiştir.



Şekil 5.32. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği

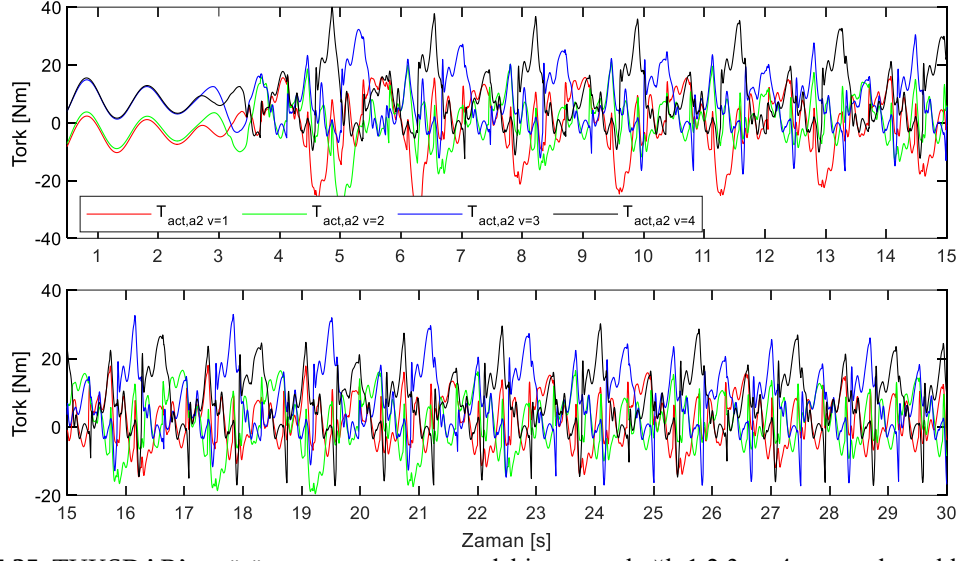


Şekil 5.33. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal açısal hız grafiği

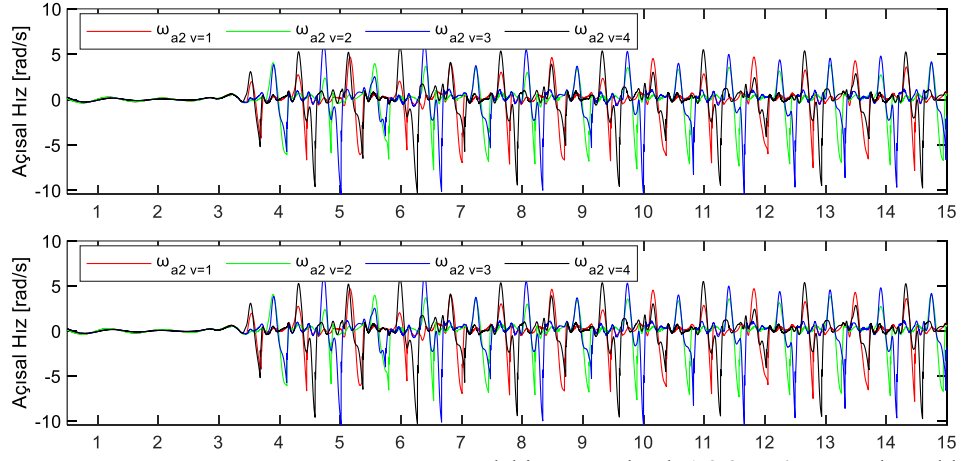


Şekil 5.34. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal güç grafiği

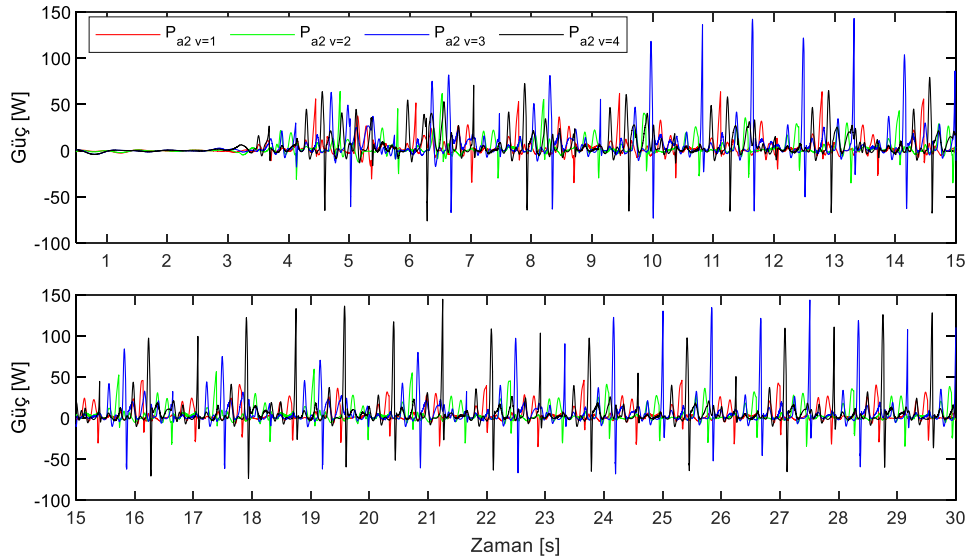
Yürüme senaryosu sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork ± 40 Nm aralığında, açısal hız ± 8 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 62 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.35 – Şekil 5.37'de gösterilmiştir.



Şekil 5.35. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsıl tork grafiği

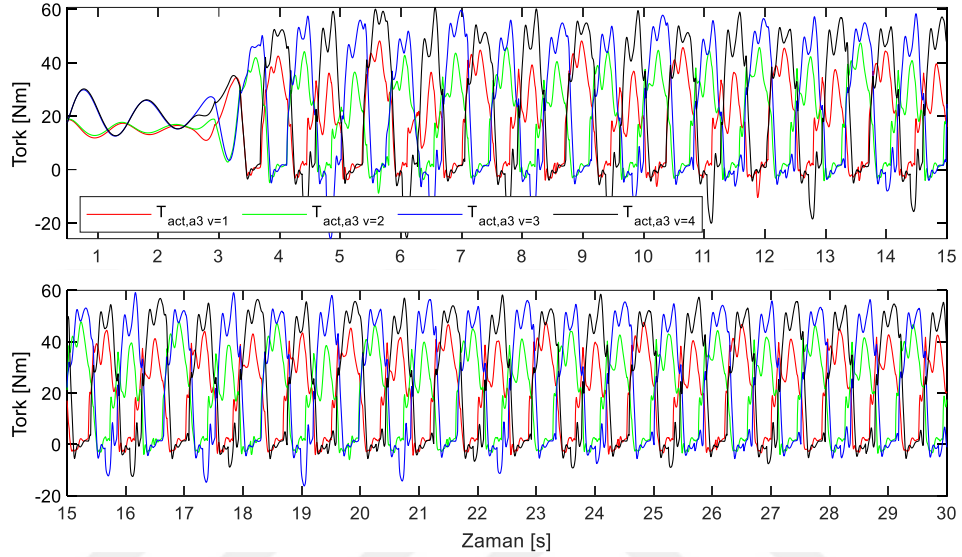


Şekil 5.36. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsıl açısal hız grafiği

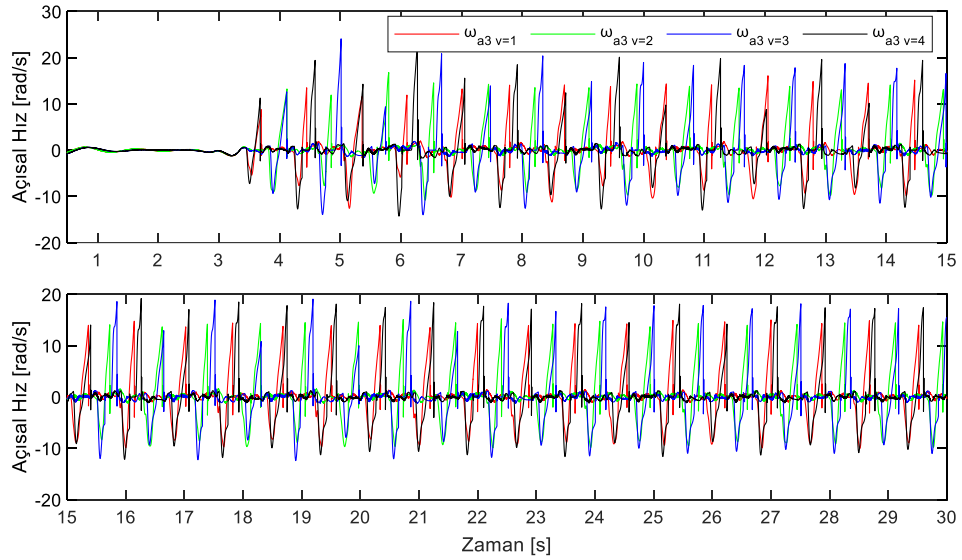


Şekil 5.37. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsıl güç grafiği

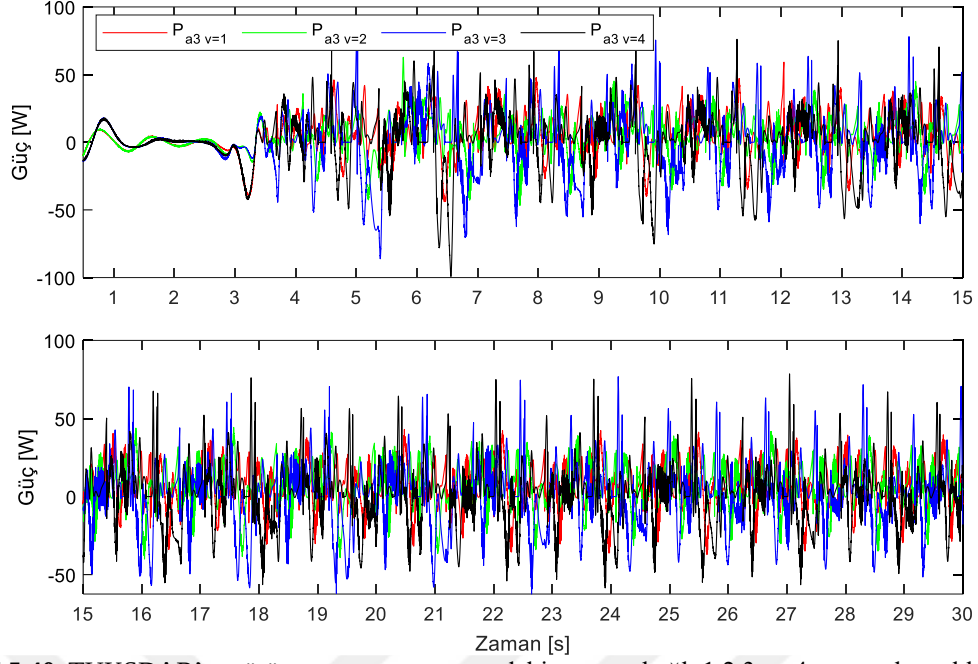
Yürüme senaryosu sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork ± 40 Nm aralığında, açısal hız -10 rad/s ile 6 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 100 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.38 – Şekil 5.40'ta gösterilmiştir.



Şekil 5.38. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal tork grafiği



Şekil 5.39. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal açısal hız grafiği

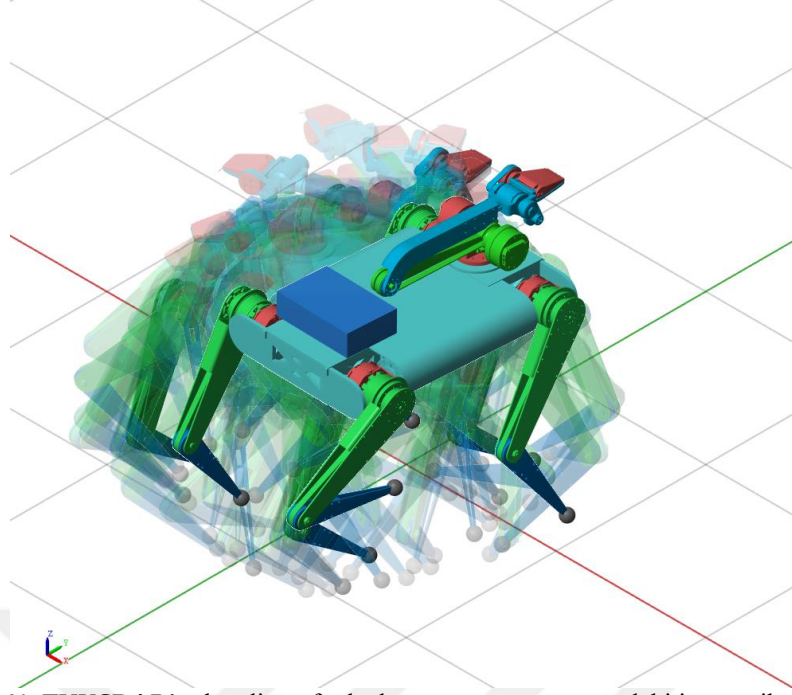


Şekil 5.40. TUKSDAR'ın yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği

Yürüme senaryosu sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork -26 Nm ile 60 Nm aralığında, açısal hız -13 rad/s ile 25 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 100 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki toplam enerji sarfıyatının 1866.69 J olarak gerçekleştiği görülmüştür.

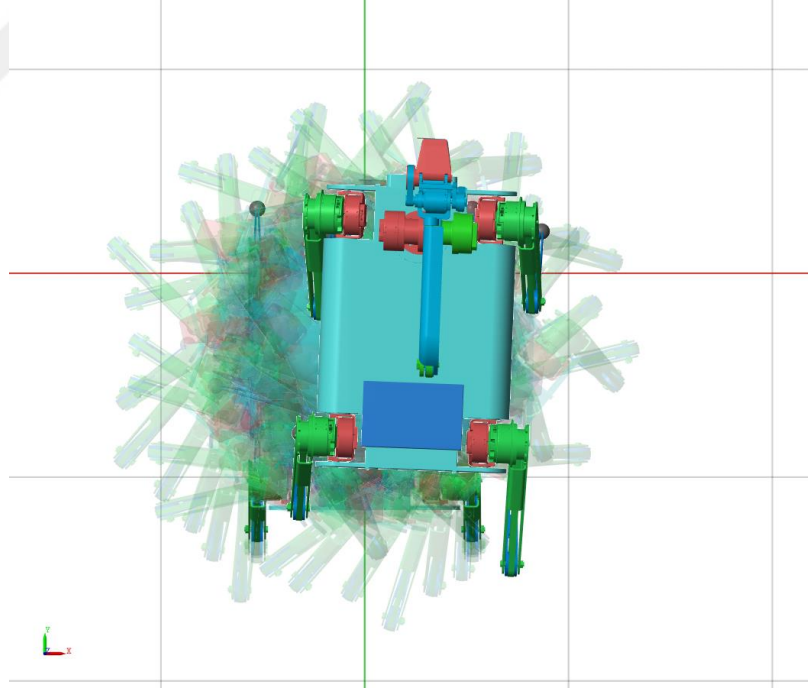
5.1.3. Kendi Etrafında Dönüş Senaryosu

TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş yapması için 4.2.4 başlığındaki kendi etrafında dönüş senaryosu kullanılarak 27 saniye boyunca uygulanmıştır. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş yapabilmesi için yönelme açısı hatası $\theta_{yön}$ değişkeni 16° 'ye atanmıştır. Buna ek olarak TUKSDAR'ın ilerleme hızı V_{ileri} değişkeni 0 olarak atanmıştır. Bu simülasyon sonucunda elde edilen TUKSDAR'ın izometrik görünüşü Şekil 5.41'de gösterilmiştir.



Şekil 5.41. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü

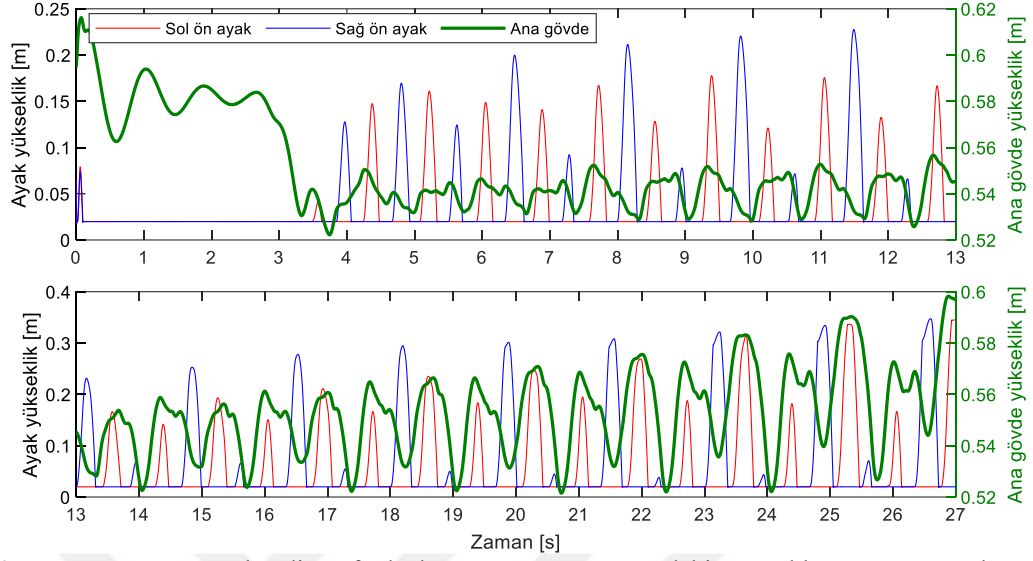
TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki üstten görünüşü Şekil 5.42'de gösterilmiştir.



Şekil 5.42. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki üstten görünüşü

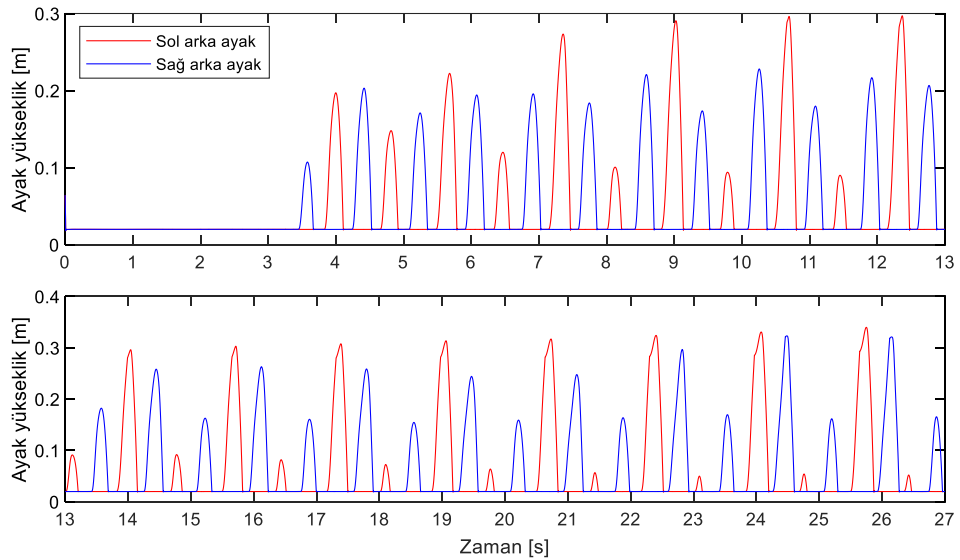
Bu senaryoda $\theta_{yön}$ 0° 'den büyük seçildiği için TUKSDAR -Z yönünde dönüş yapmaktadır. Bütün simülasyonlarda olduğu üzere, TUKSDAR 46 mm yükseklikten bırakılarak ilk 4 saniye boyunca bekledikten sonra kendi etrafındaki tam bir turunu 27 s'de tamamlamaktadır. Bu dönüş süresi 0.23 rad/s açısal hıza tekabül etmektedir.

TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş sırasındaki zamana bağlı olarak ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği grafiği Şekil 5.43'te gösterilmiştir.



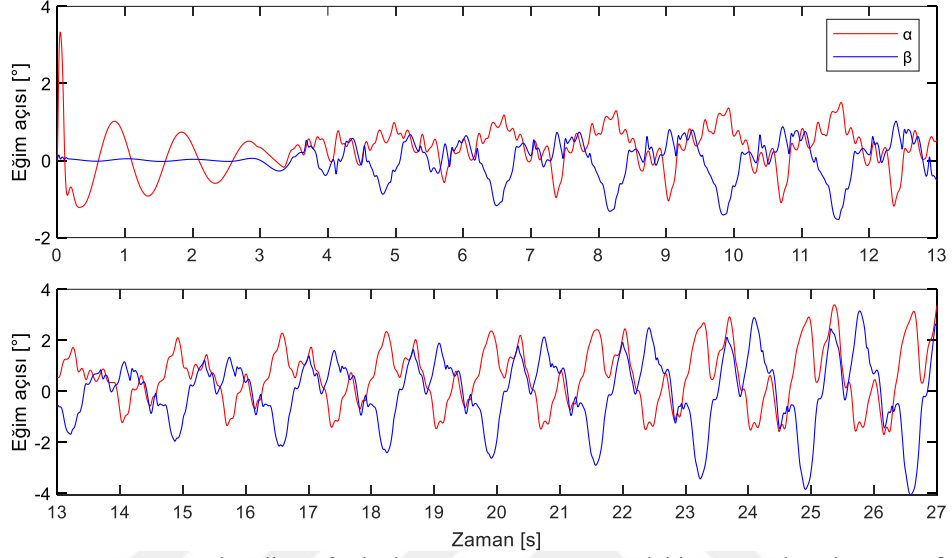
Şekil 5.43. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ön ayakların yerden yükseklikleri başlangıçta 0.2 m iken sona doğru 0.35 m'ye çıktığı görülmüştür. Ayrıca ana gövdenin yerden yüksekliğinin 0.54 m'den sonra doğru ortalama 0.57 m olduğu görülmüştür. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş sırasındaki zamana bağlı olarak arka ayakların yerden yüksekliği grafiği Şekil 5.44'te gösterilmiştir.



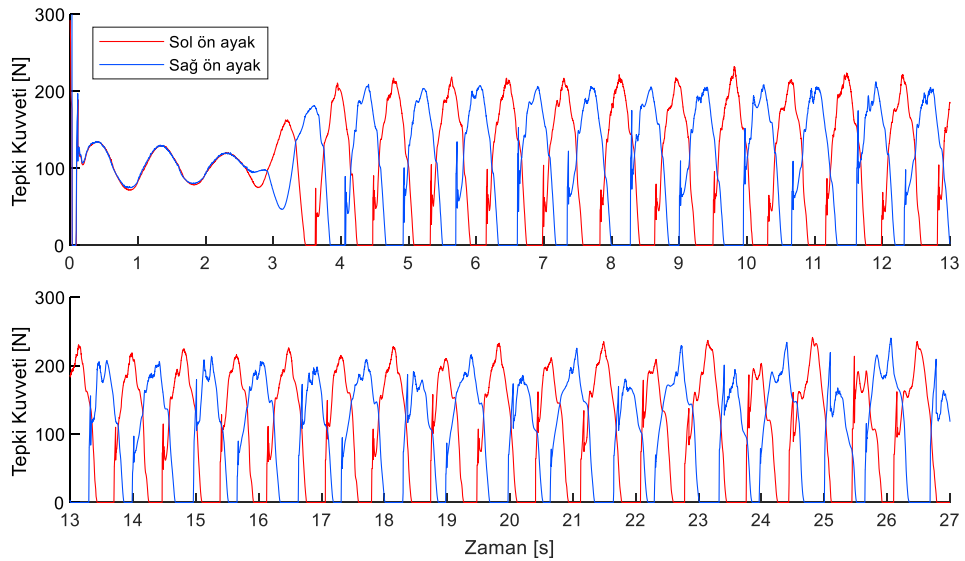
Şekil 5.44. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yükseklikleri başlangıçta 0.2 m iken sona doğru 0.35 m'ye çıktığı görülmüştür. Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ana gövde eğim açıları α ve β 'nin zamana göre değişimi Şekil 5.45'te gösterilmiştir.



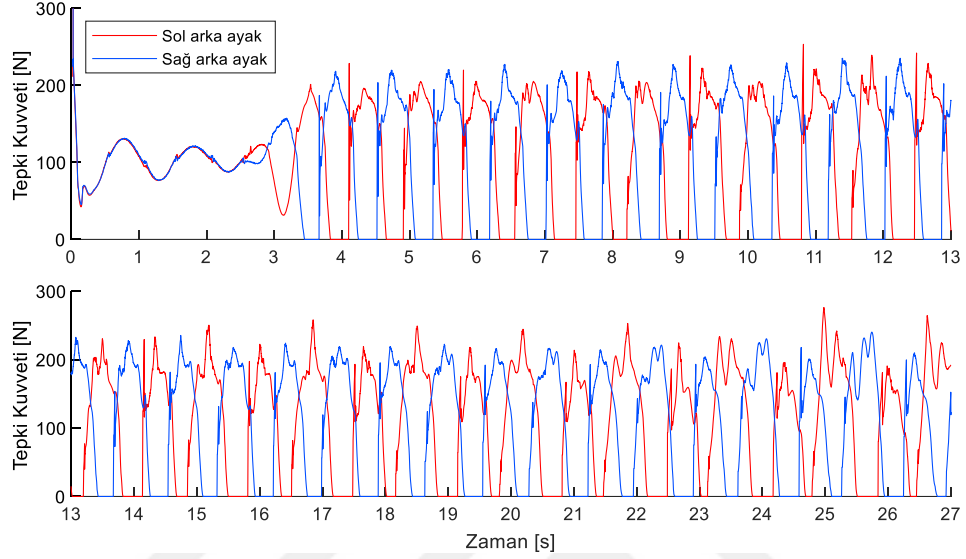
Şekil 5.45. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları

TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ana gövde α ve β eğim açılarının başlangıçta $\pm 1^\circ$ iken sonlara doğru α açısı -1.5° ile 3° aralığında değişmektedir. β açısı ise sonlara doğru -4° ile 3° aralığında değişmektedir. Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.46'da gösterilmiştir.



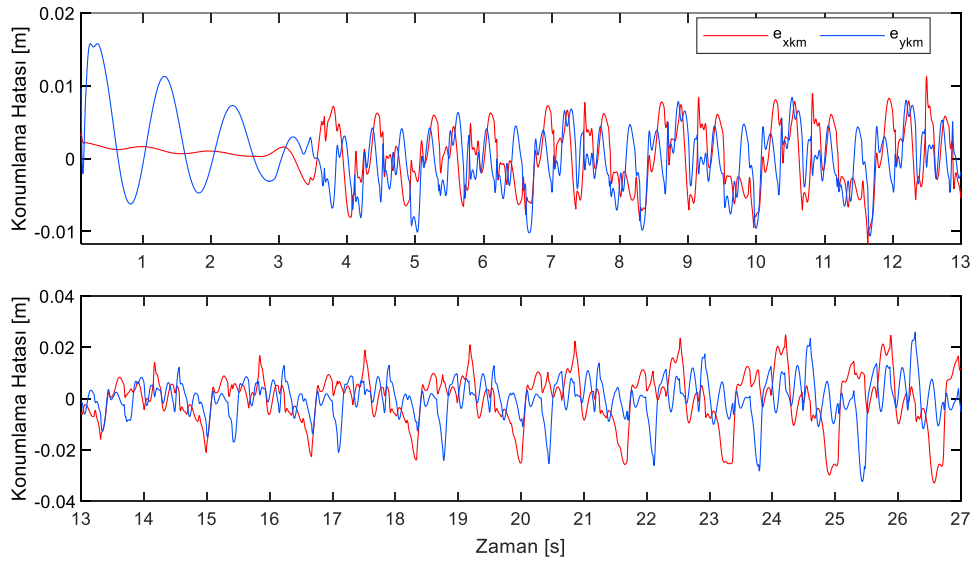
Şekil 5.46. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri

Ön ayaklardaki tepki kuvvetlerinin 225 N olduğu görülmüştür. Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından arka ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.47’de gösterilmiştir.



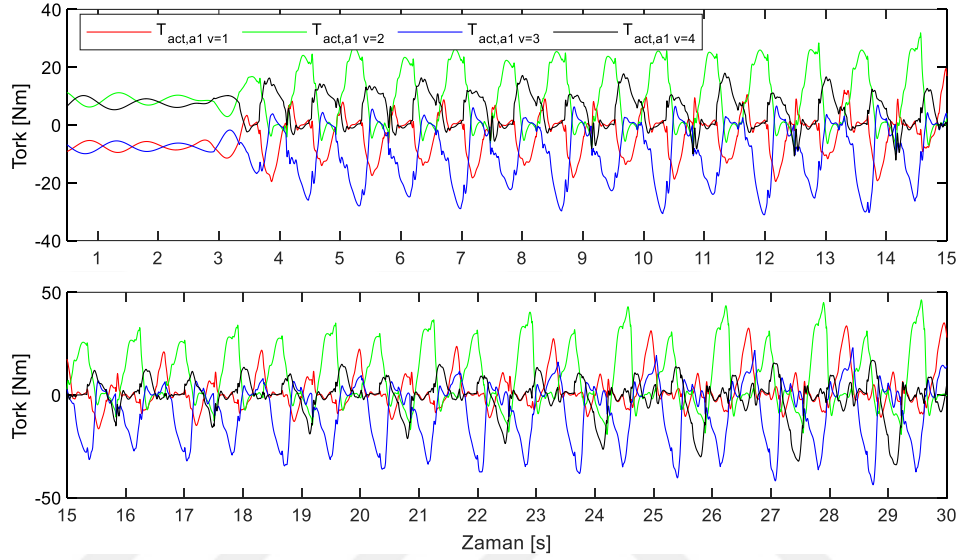
Şekil 5.47. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri

Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki arka ayaklardaki tepki kuvvetlerinin de 250 N olduğu görülmüştür. Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32’de ifade edilen TUKSDAR’ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.48’de gösterilmiştir.

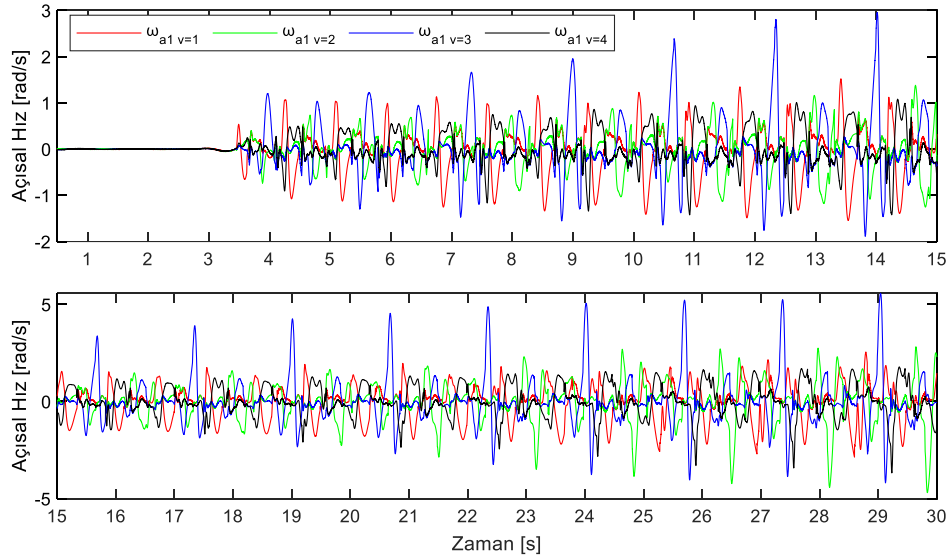


Şekil 5.48. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları grafiği

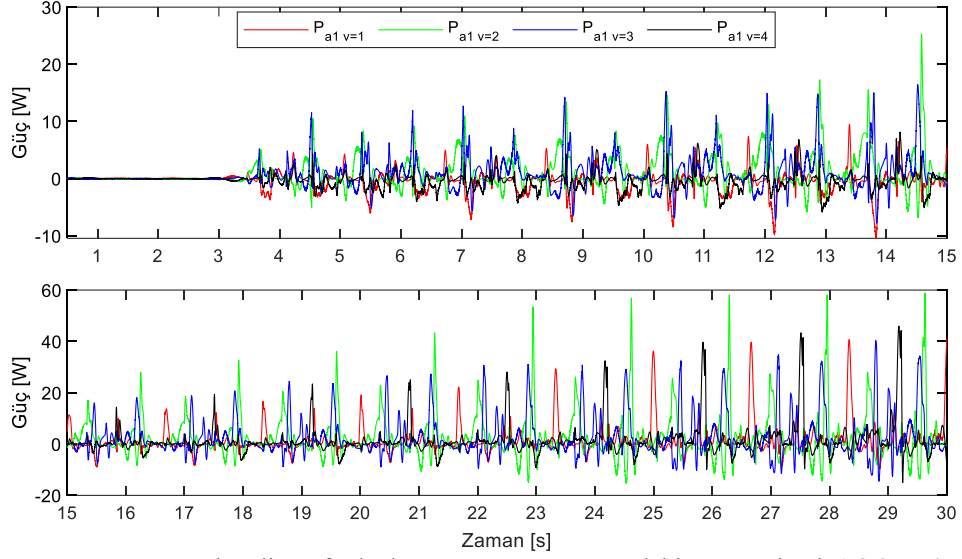
TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin ± 0.04 m'ye ulaştığı görülmüştür. Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 1. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.49 – Şekil 5.51'de gösterilmiştir.



Şekil 5.49. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği

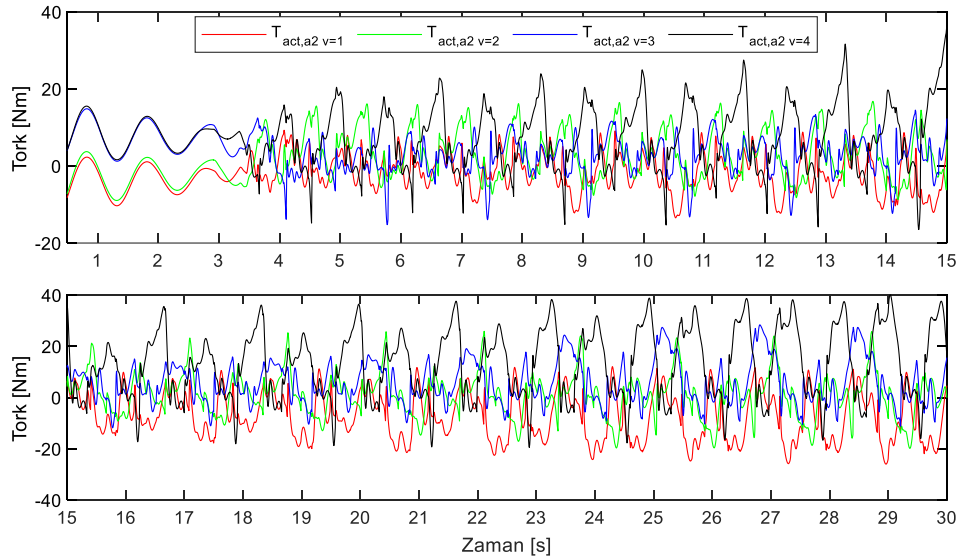


Şekil 5.50. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal açısal hız grafiği

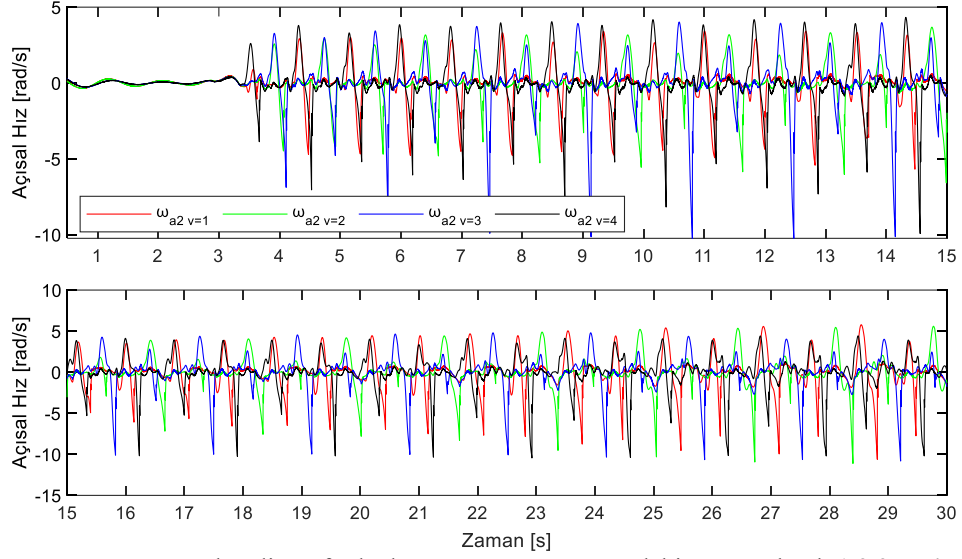


Şekil 5.51. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği

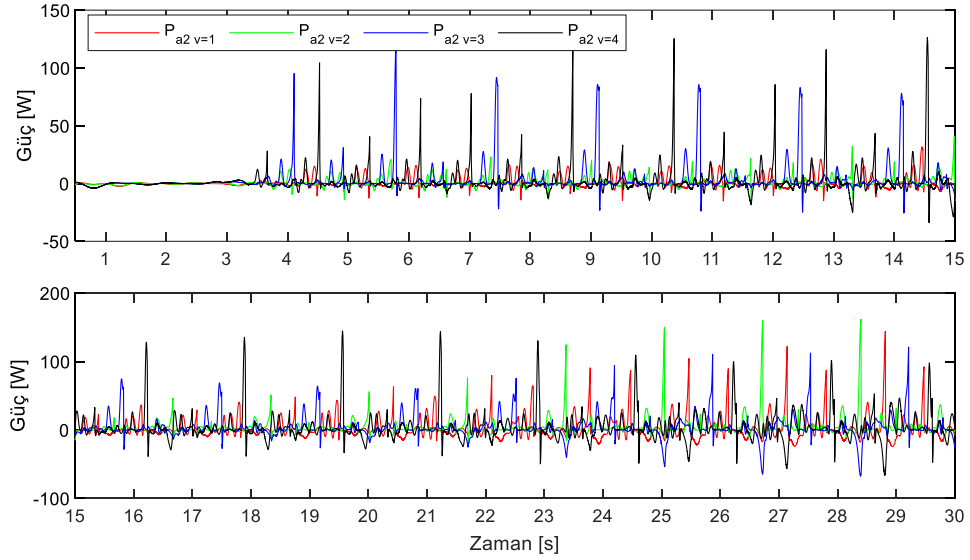
Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork -44 Nm ile 47 Nm aralığında, açısal hız ± 5 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 60 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.52 – Şekil 5.54'te gösterilmiştir.



Şekil 5.52. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği

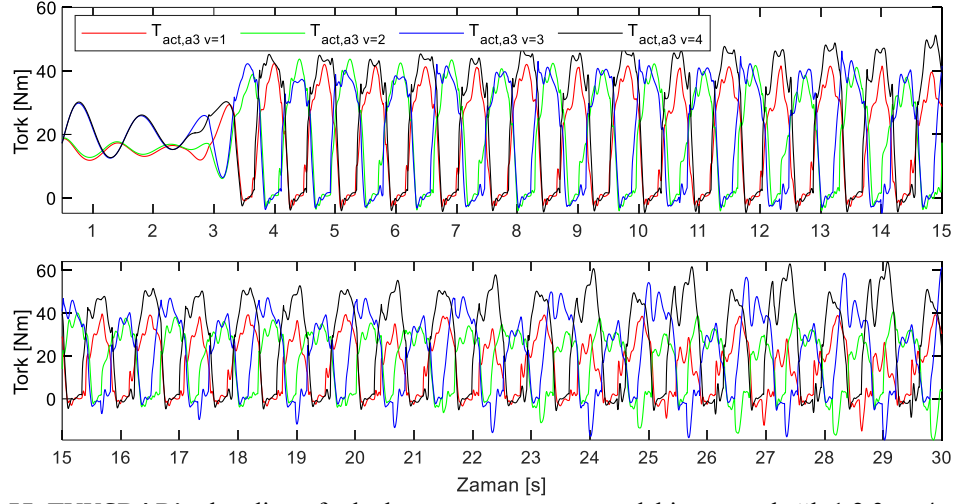


Şekil 5.53. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal açısal hız grafiği

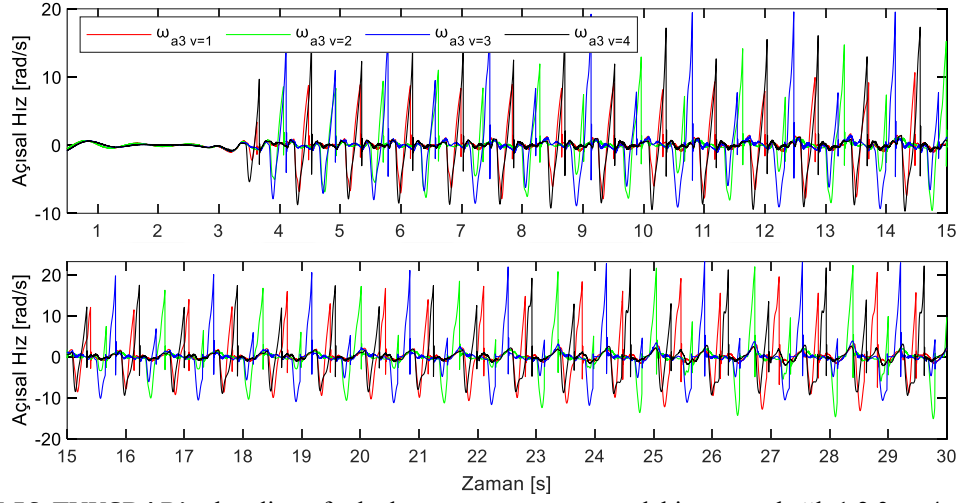


Şekil 5.54. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal güç grafiği

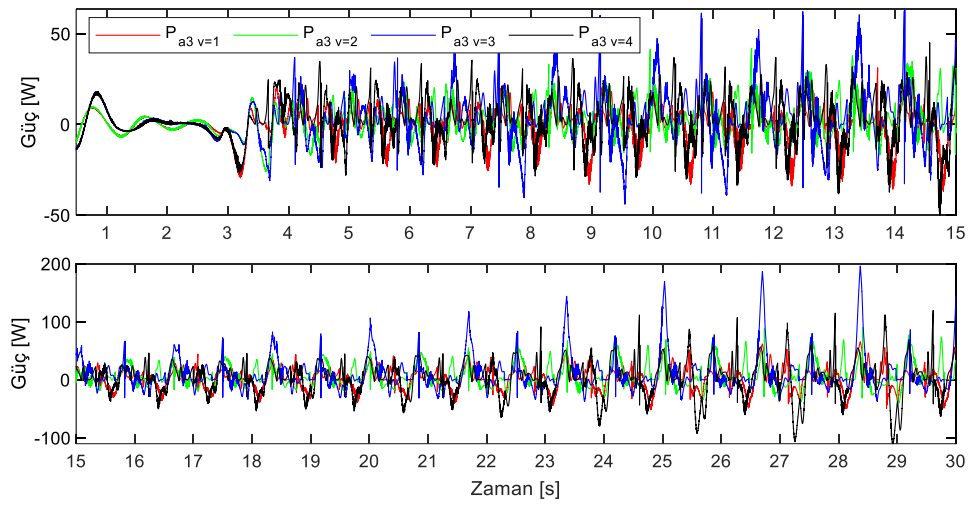
Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork -30 Nm ile 40 Nm aralığında, açısal hız -11 rad/s ile 6 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 190 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.55 – Şekil 5.57'de gösterilmiştir.



Şekil 5.55. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği



Şekil 5.56. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği

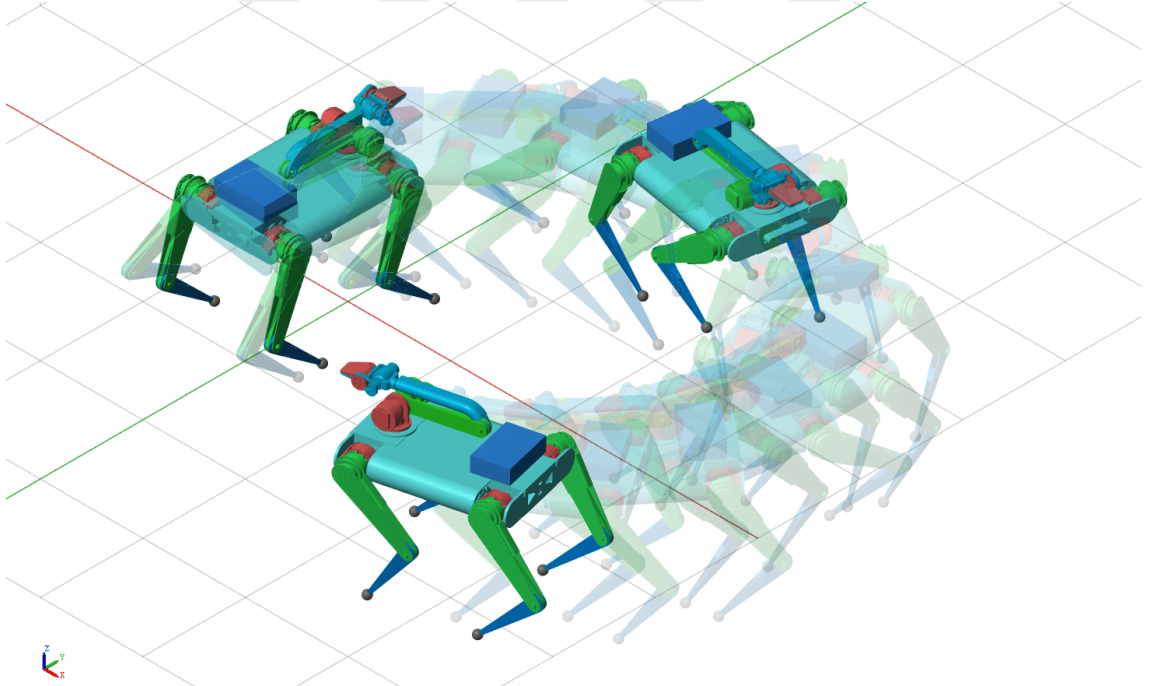


Şekil 5.57. TUKSDAR'ın kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği

Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork -20 Nm ile 64 Nm aralığında, açısal hız -15 rad/s ile 24 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 200 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Kendi etrafında dönüş senaryosu sırasındaki toplam enerji sarfıyatının 1826.17 J olarak gerçekleştiği görülmüştür.

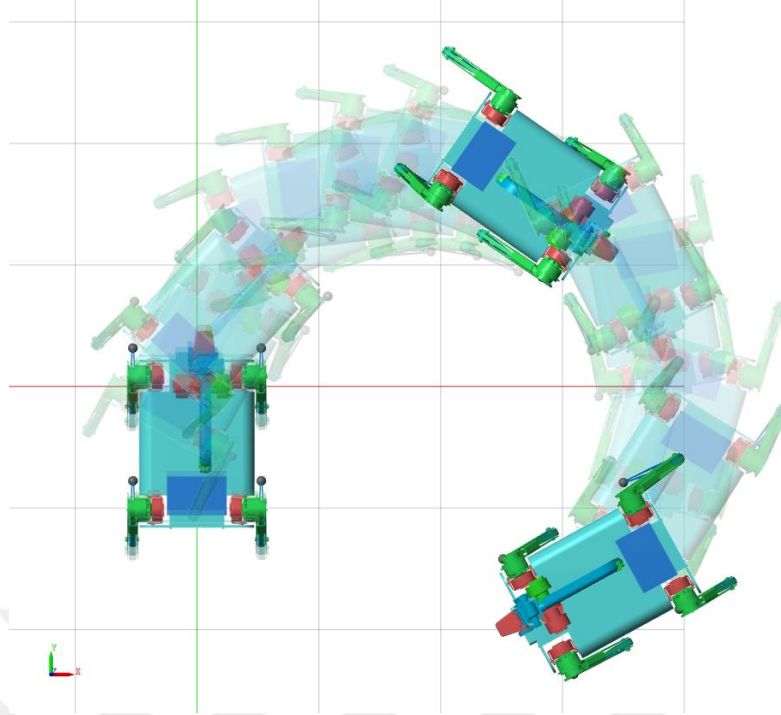
5.1.4. TUKSDAR'ın Viraj Dönüşü

TUKSDAR'ın viraj dönüşü yapması için 4.2.3 başlığındaki yürüme senaryosu ve 4.2.4 başlığındaki kendi etrafında dönüş senaryosu birlikte kullanılarak 30 saniye boyunca uygulanmıştır. Bu simülasyonda yönelme açısı $\theta_{yön}$ değişkeni 90° 'ye atanmıştır. Buna ek olarak TUKSDAR'ın ilerleme hızı V_{ileri} değişkeni 0.25 m adım uzunluğu olarak atanmıştır. Bunun sonucunda TUKSDAR'ın sağ tarafından 2 m radius merkezli bir viraj dönüşü gerçekleştirmiştir. Viraj dönüşü sırasındaki TUKSDAR'ın izometrik görünüşü Şekil 5.58'de gösterilmiştir.



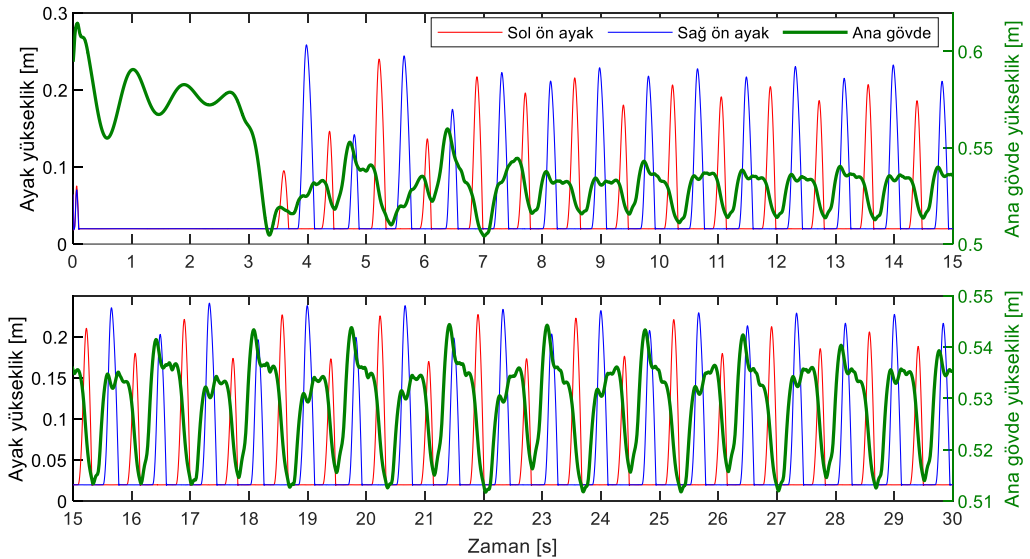
Şekil 5.58. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki izometrik görünüşü

TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki üstten görünüşü Şekil 5.59'da gösterilmiştir.



Şekil 5.59. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki üstten görünüşü

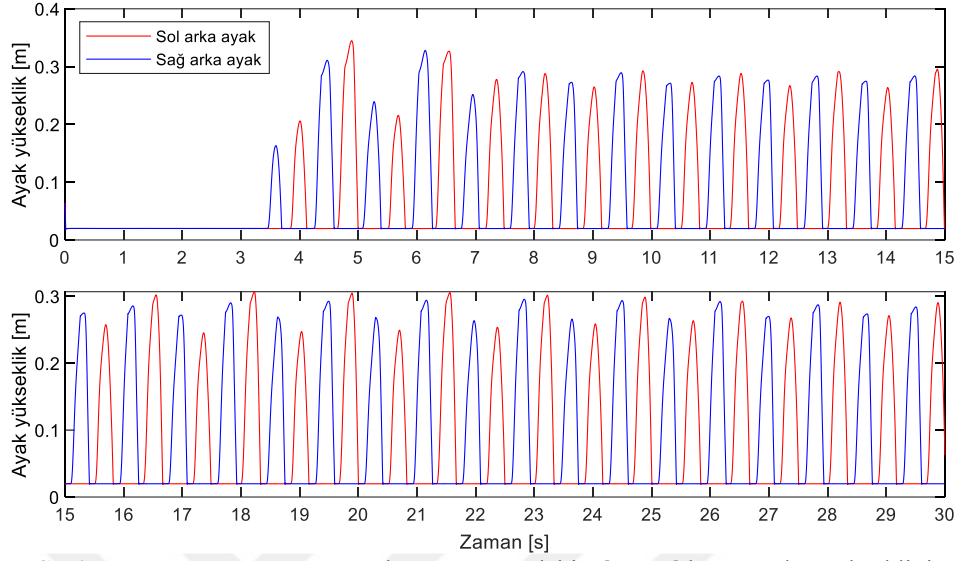
Bütün simülasyonlarda olduğu üzere, TUKSDAR 46 mm yükseklikten bırakılarak ilk 4 saniye boyunca bekledikten sonra viraj dönüşü 0.143 rad/s hızında bir yürüyüş gerçekleştirmiştir. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı olarak ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği grafiği Şekil 5.60'ta gösterilmiştir.



Şekil 5.60. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği

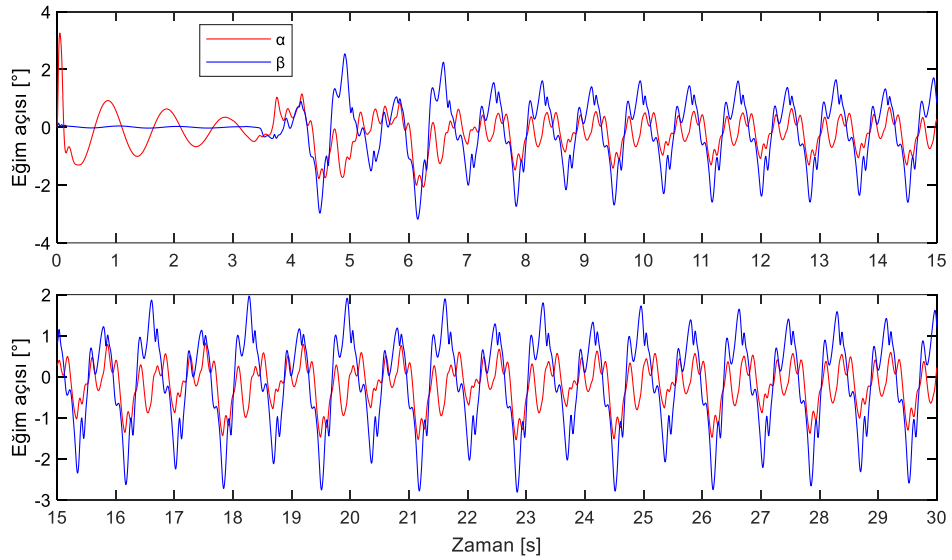
TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ön ayakların yerden yüksekliklerinin 0.25 m'ye ulaştığı görülmüştür. Ayrıca ana gövdenin yerden yüksekliğinin 0.53 m

olduğu görülmüştür. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı olarak arka ayakların yerden yüksekliği grafiği Şekil 5.61'de gösterilmiştir.



Şekil 5.61. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği

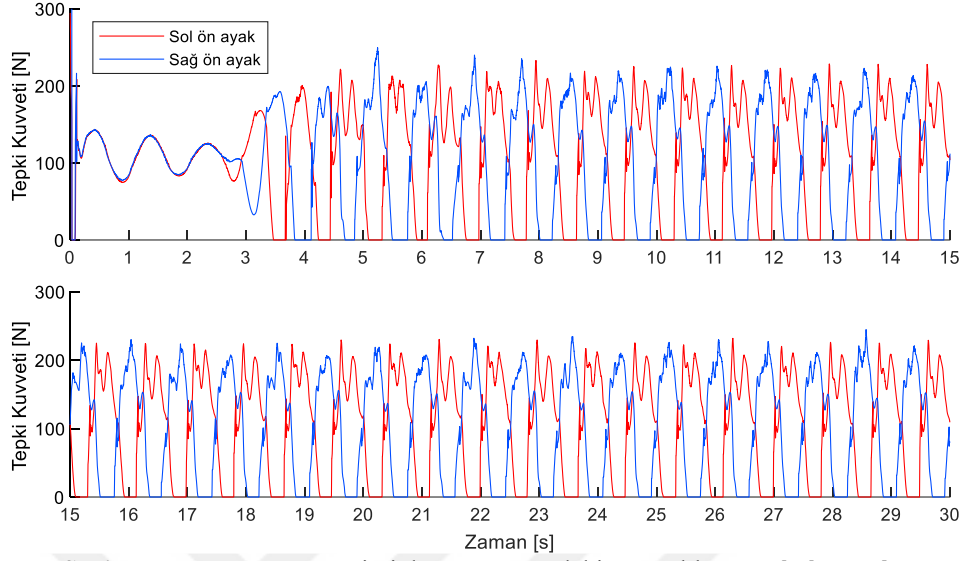
TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki arka ayakların yerden yükseklikleri yaklaşık 0.3 m olarak gerçekleştiği görülmüştür. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki TUKSDAR'ın ana gövde eğim açıları α ve β 'nin zamana göre değişimi Şekil 5.62'de gösterilmiştir.



Şekil 5.62. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları

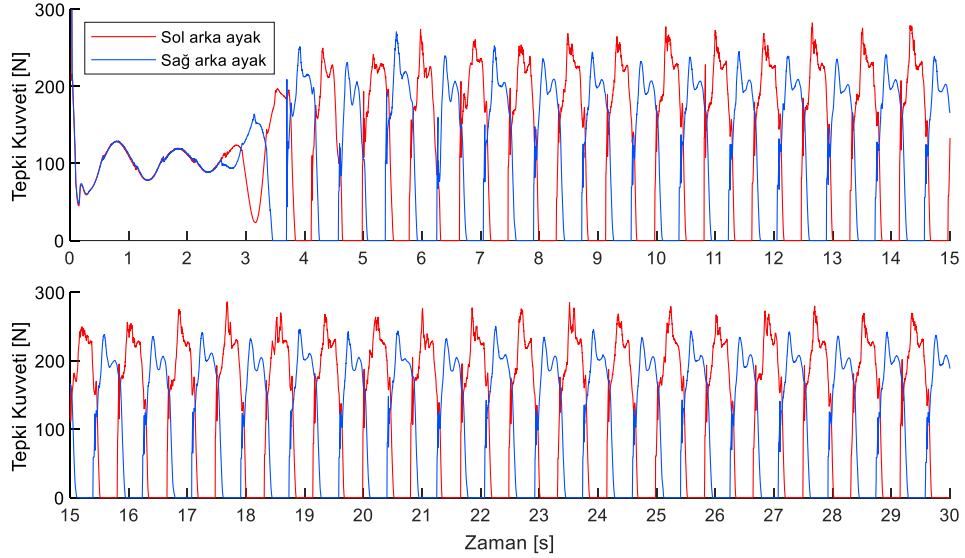
TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ana gövde α eğim açısının -1.5° ile 1° aralığında dengelendiği görülmüştür. Ana gövde β eğim açısı ise -3° ile 2.5° aralığında

dengelendiği görülmüştür. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.63'te gösterilmiştir.



Şekil 5.63. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri

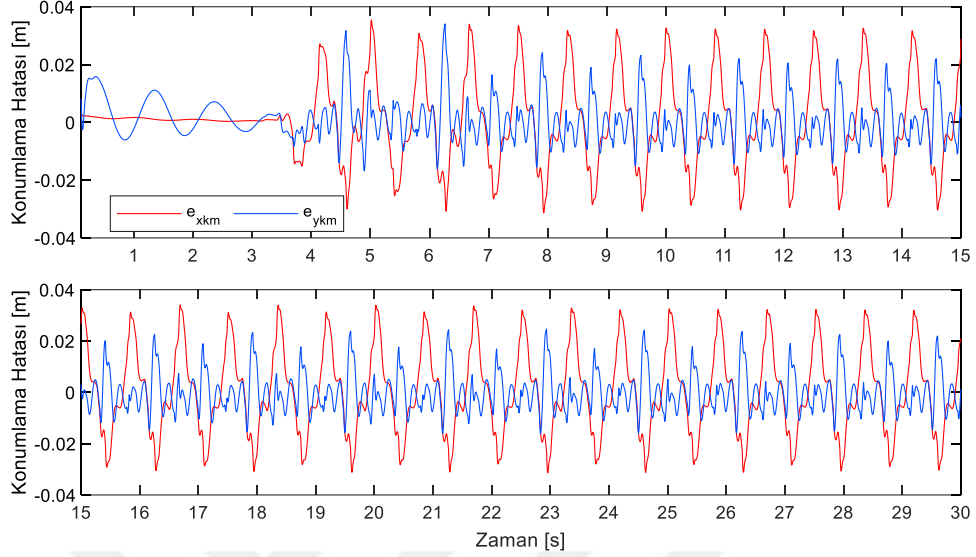
Ön ayaklardaki tepki kuvvetlerinin 225 N olduğu görülmüştür. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından arka ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.64'te gösterilmiştir.



Şekil 5.64. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri

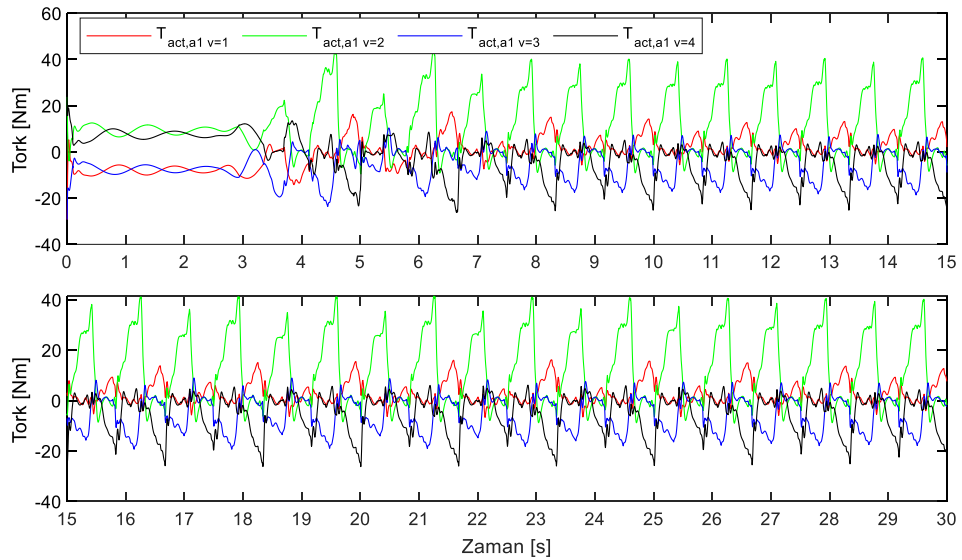
TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki arka ayaklardaki tepki kuvvetlerinin de 250 N olduğu görülmüştür. Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32'de ifade edilen

TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.65'te gösterilmiştir.

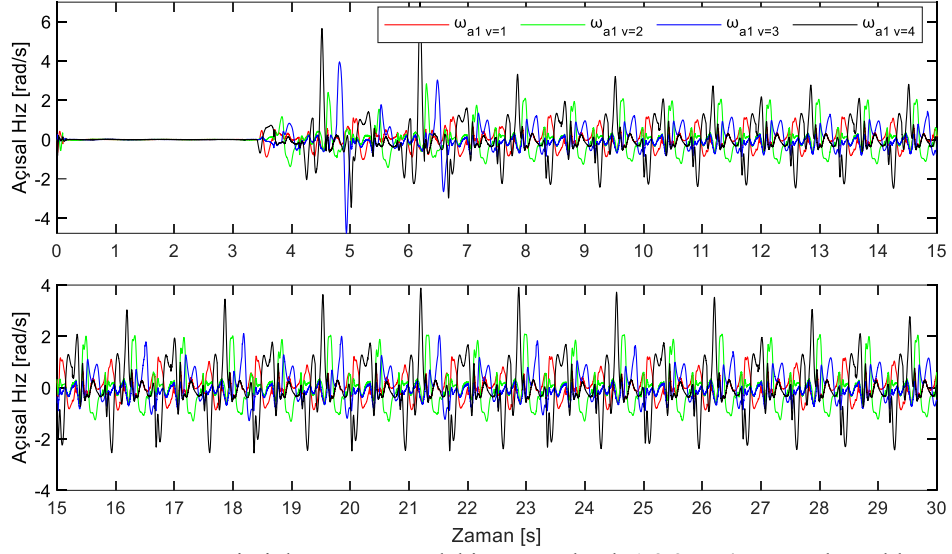


Şekil 5.65. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları grafiği

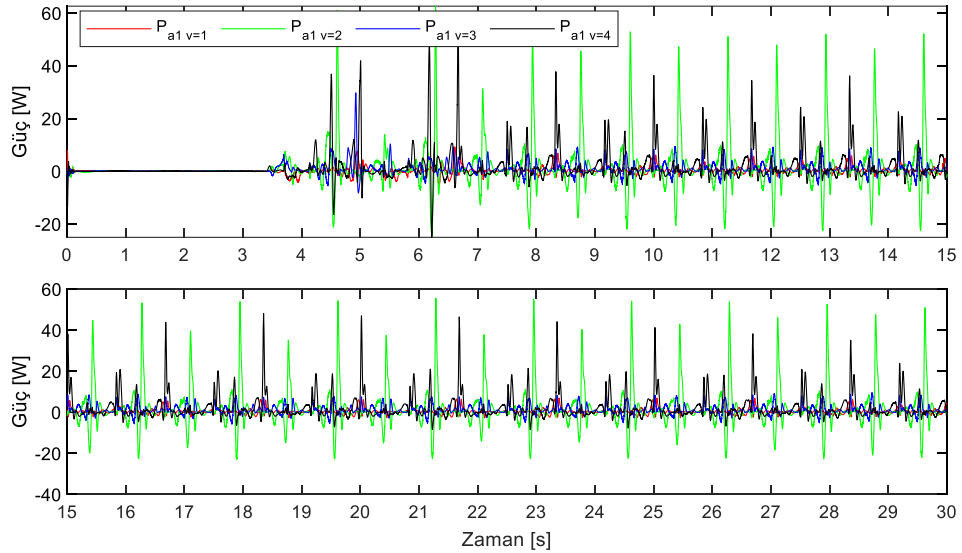
TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin ± 0.03 m'ye ulaştığı görülmüştür. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 1. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.66 – Şekil 5.68'de gösterilmiştir.



Şekil 5.66. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal tork grafiği

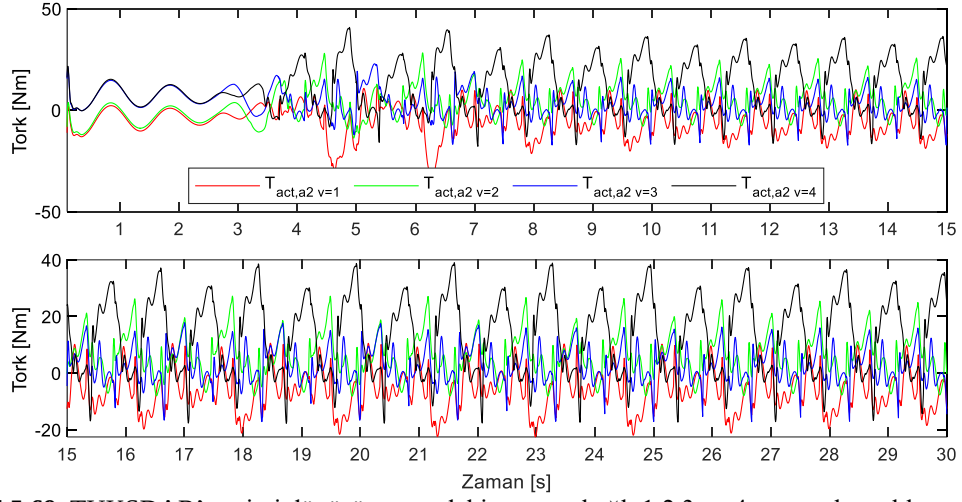


Şekil 5.67. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal açısal hız grafiği

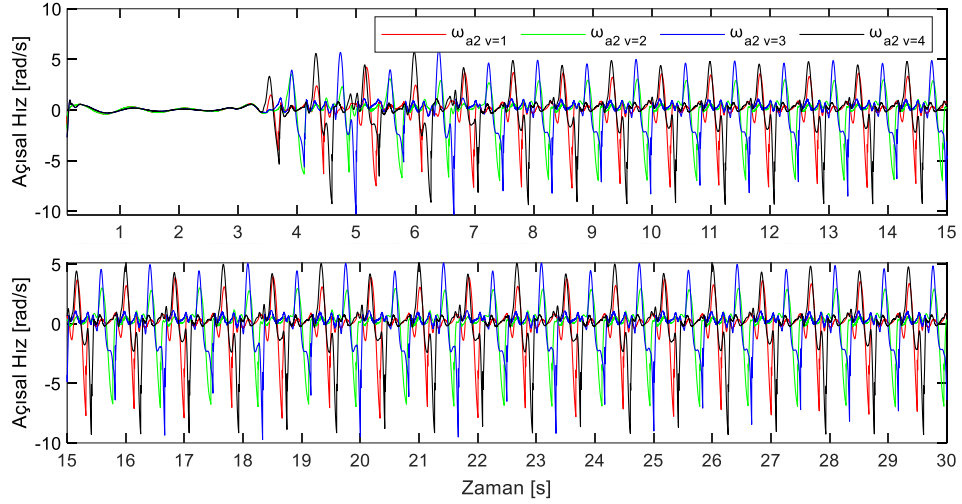


Şekil 5.68. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal güç grafiği

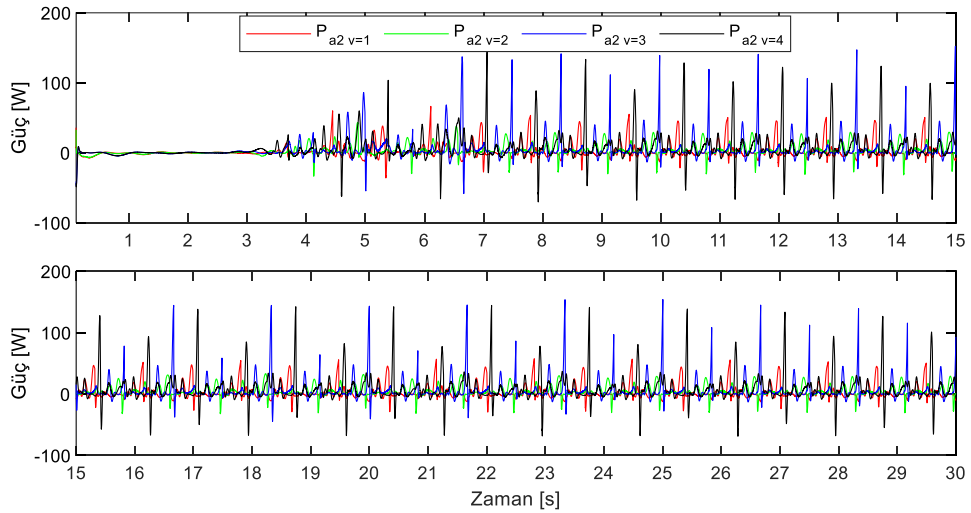
TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork -24 Nm ile 44 Nm aralığında, açısal hız -4 rad/s ile 6 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 60 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Sağa doğru yapılan viraj dönüşünde 1. mafsal sol ön ayağa 15 Nm sağ ön ayağa ise 45 Nm ve 1. mafsal sol arka ayağa -15 Nm sağ arka ayağa ise -20 Nm tork uygulandığı görülmüştür. Virajın iç kısımlarındaki 1. mafsalların daha fazla torklara maruz kaldığı görülmüştür. Güç tüketiminde de benzer şekilde virajın iç kısmındaki ayakların daha fazla güç tükettiği görülmüştür. Viraj dönüşü sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsala ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.69– Şekil 5.71'de gösterilmiştir.



Şekil 5.69. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği

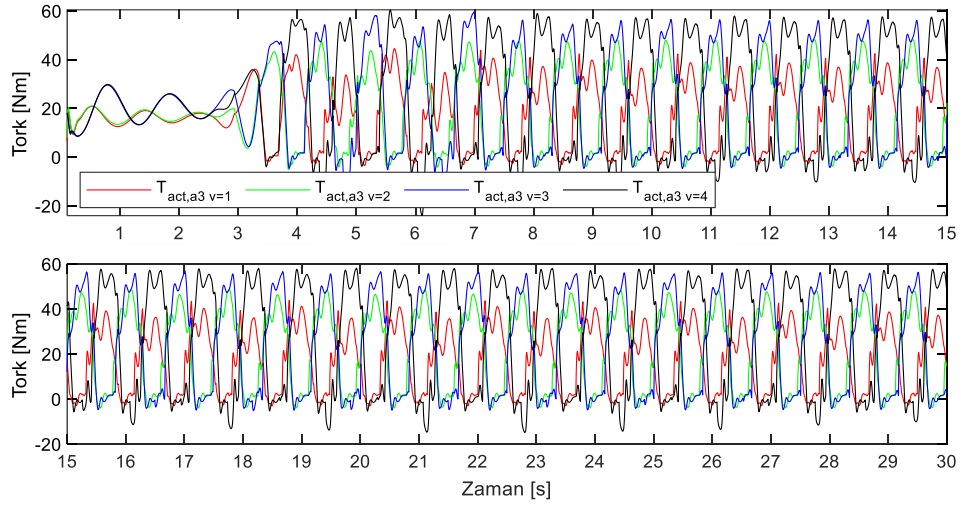


Şekil 5.70. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği

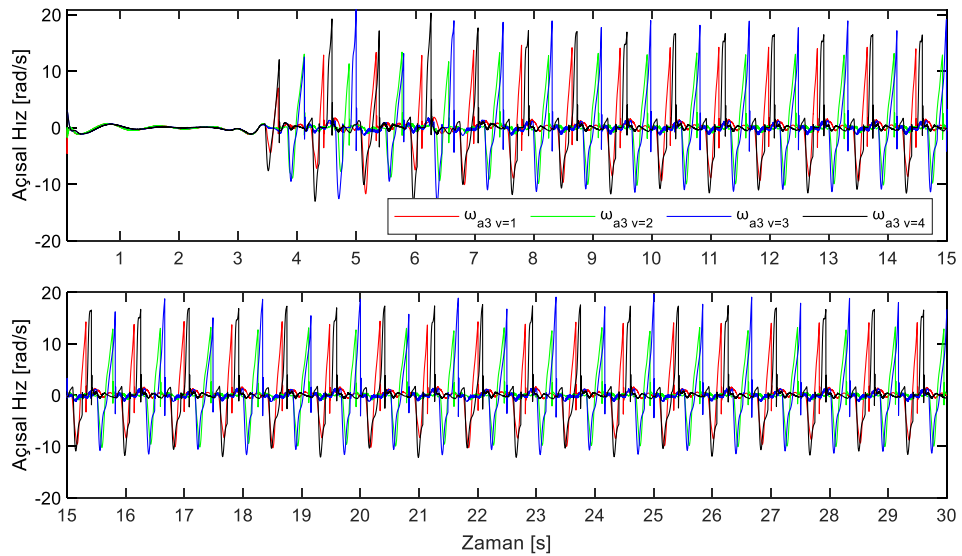


Şekil 5.71. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği

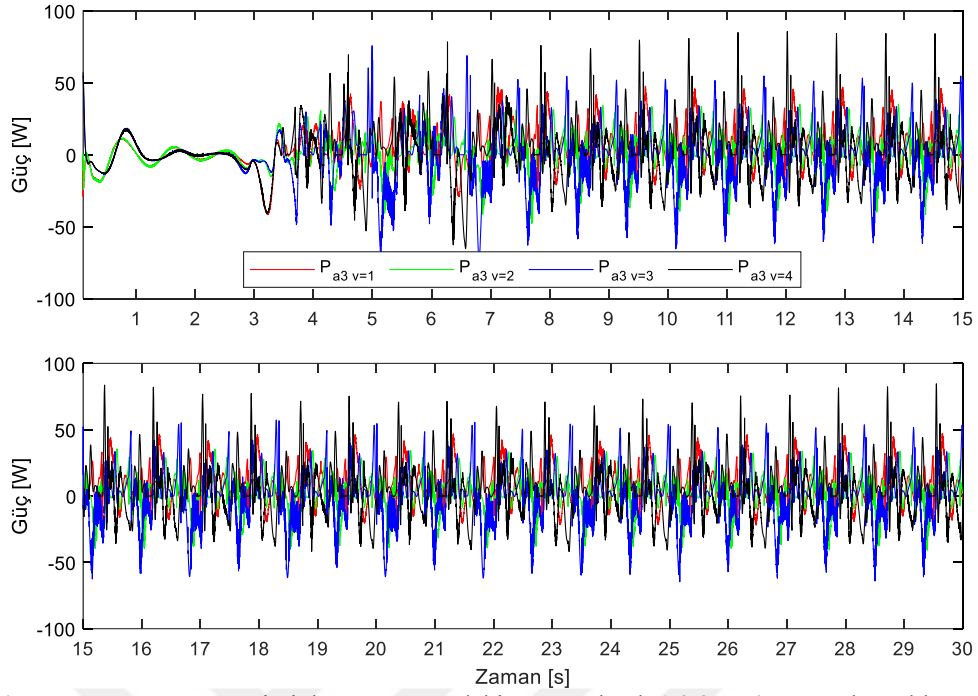
TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork -30 Nm ile 40 Nm aralığında, açısal hız -10 rad/s ile 6 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 150 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. 1. mafsaldakine benzer şekilde 2. mafsalda da tork kullanımı dıştaki ayakta 20 Nm iken içteki ayakta 40 Nm olarak gerçekleşerek torkun virajın iç kısmındaki ayaklarda arttığı görülmüştür. Ayrıca 2. mafsala ön ayaklarının yaklaşık 50 W ve arka ayakların yaklaşık 150 W ile gerçekleşerek arka ayakların güç tüketiminin ön ayaklara göre 3 katı olduğu görülmüştür. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsala ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.72 – Şekil 5.74'te gösterilmiştir.



Şekil 5.72. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsala ait tork grafiği



Şekil 5.73. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsala ait açısal hız grafiği

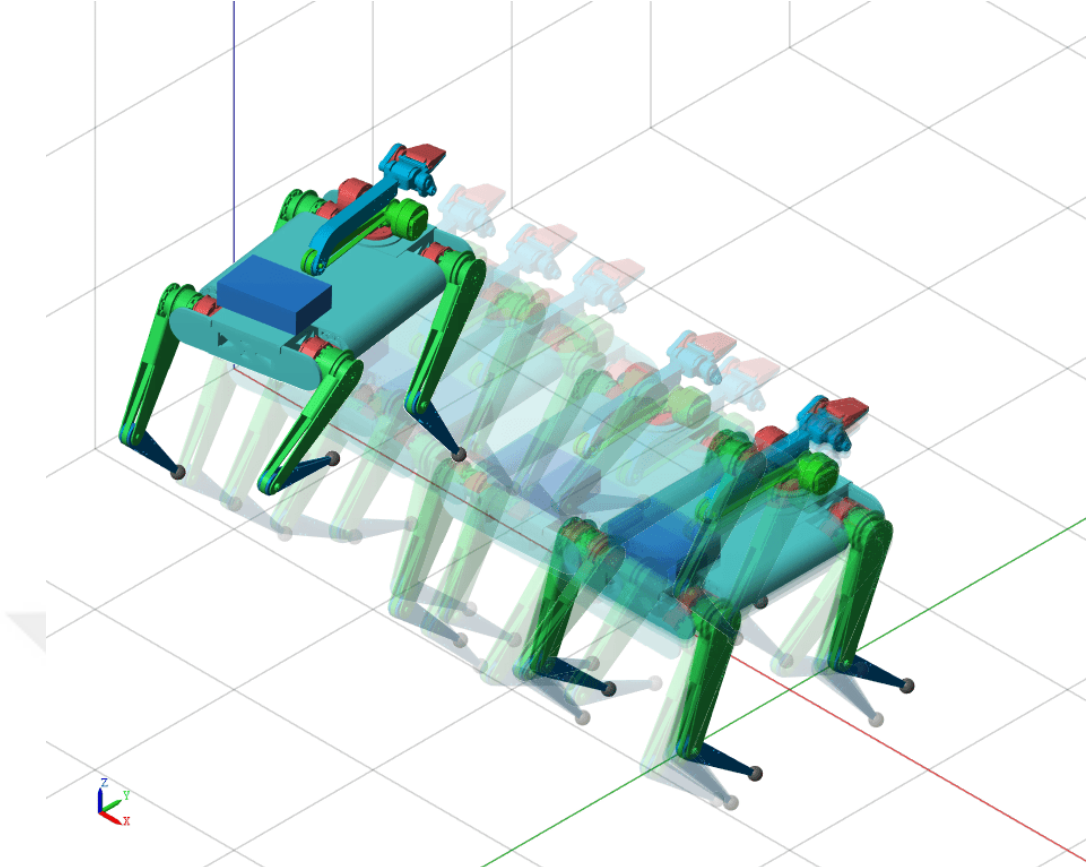


Şekil 5.74. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği

TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork -21 Nm ile 60 Nm aralığında, açısal hız -14 rad/s ile 20 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 100 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Arka ayaklardaki güç tüketimi 60 W ve ön ayakların güç tüketimi 50 W gerçekleşmiştir. 1. ve 2. mafsallardaki ayakların birbirine göre tork ve güç sarfiyatındaki farklılığın 3. mafsalda daha az gerçekleşerek, 3. mafsalsal için arka ayakların ön ayaklara göre %20 daha fazla olduğu görülmüştür. Viraj dönüşü sırasındaki toplam enerji sarfiyatının 1827.18 J olarak gerçekleştiği görülmüştür.

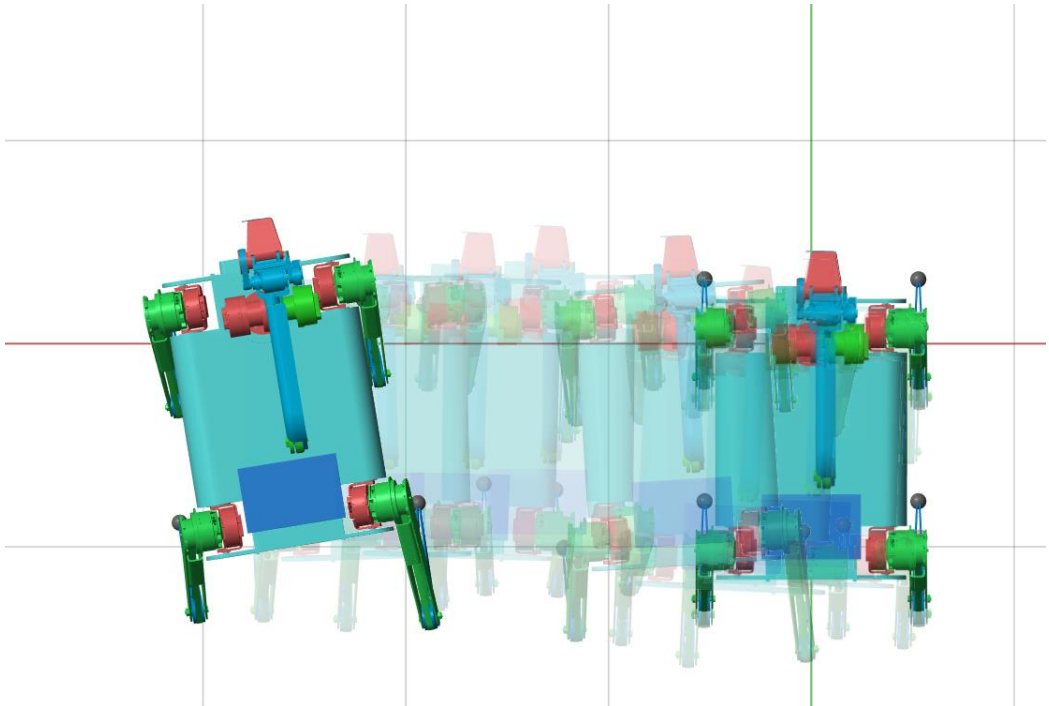
5.1.5. Yan Yürüme Senaryosu

TUKSDAR'ın yan yürümesi için 4.2.5 başlığındaki yan yürüme senaryosu kullanılarak 19 saniye boyunca uygulanmıştır. TUKSDAR'ın yan yürüyebilmesi için yönelme açı hatası $\theta_{yön}$ değişkeni 0.5° 'ye atanmıştır. Buna ek olarak TUKSDAR'ın ilerleme hızı V_{ileri} değişkeni 0 olarak atanmıştır. Bunun sonucunda TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu uygulanmıştır. Yan yürüme senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın izometrik görünüşü Şekil 5.75'te gösterilmiştir.



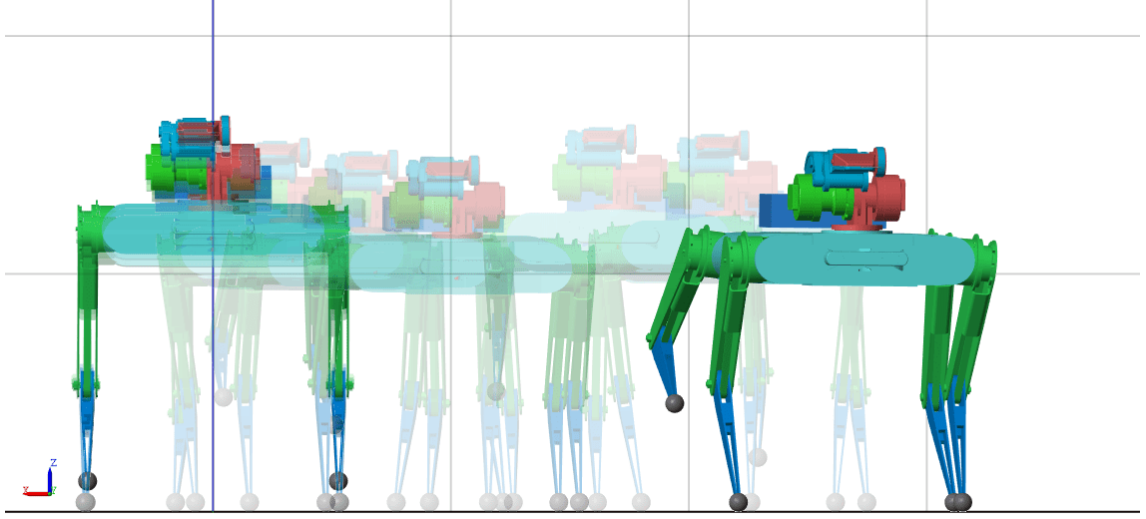
Şekil 5.75. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü

TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki üstten görünüşü Şekil 5.76'da gösterilmiştir.



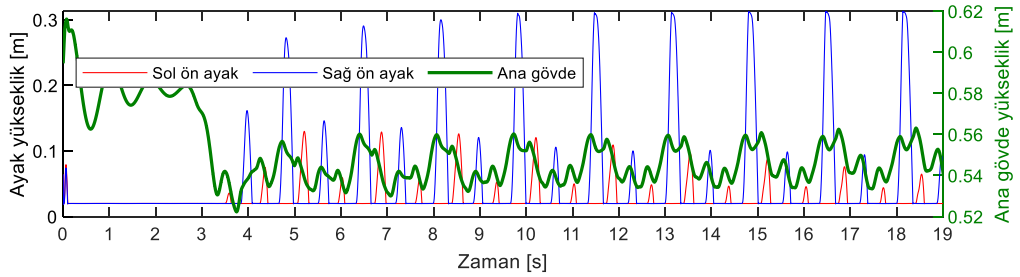
Şekil 5.76. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki üstten görünüşü

TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki önden görünüşü Şekil 5.77'de gösterilmiştir.



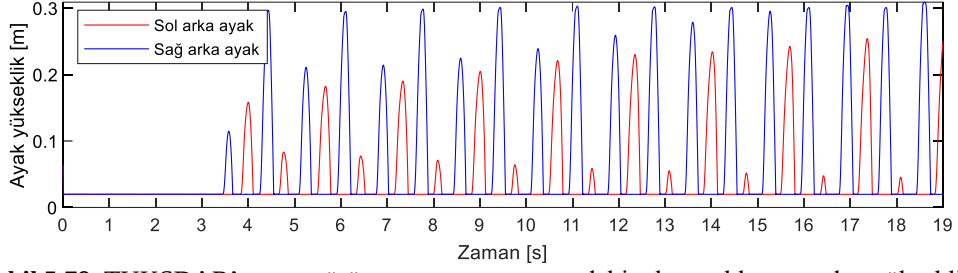
Şekil 5.77. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki önden görünüşü

Bütün simülasyonlarda olduğu üzere, TUKSDAR 46 mm yükseklikten bırakılarak ilk 4 saniye boyunca bekledikten sonra yan yürüme senaryosu 19 saniye uygulanmıştır. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği grafiği Şekil 5.78'de gösterilmiştir.



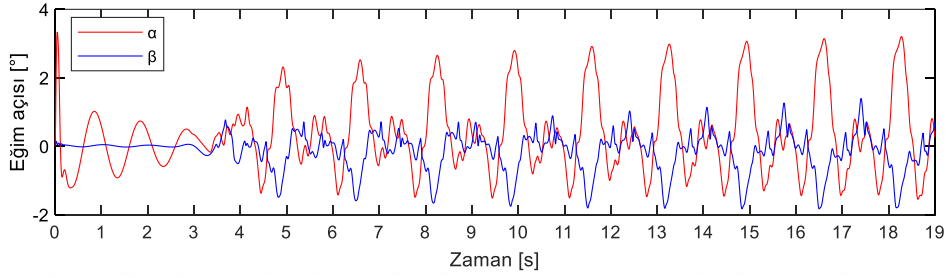
Şekil 5.78. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki sol ön ayağın yerden yüksekliğinin 0.13 m'ye ulaştığı ve sağ ön ayağın yerden yüksekliğinin 0.3 m'ye ulaştığı görülmüştür. Ayrıca ana gövdenin yerden yüksekliğinin 0.55 m olduğu görülmüştür. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak arka ayakların yerden yüksekliği grafiği Şekil 5.79'da gösterilmiştir.



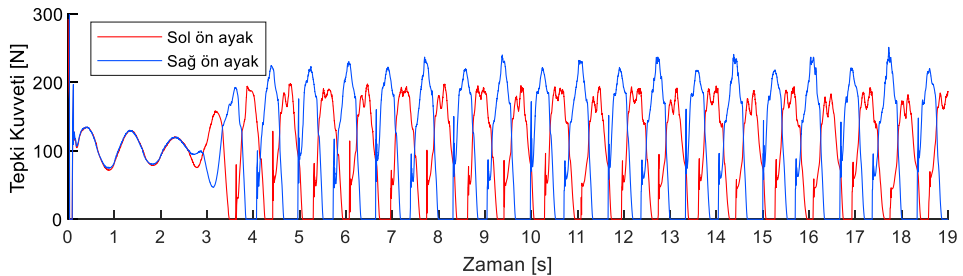
Şekil 5.79. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasında arka ayakların yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasında sol arka ayağın yerden yüksekliği başlangıçta 0.15 m iken sona doğru 0.25 m'ye ulaştığı ve sağ arka ayağın yerden yüksekliğinin 0.3 m'ye ulaştığı görülmüştür. Yan yürüme senaryosu sırasında TUKSDAR'ın ana gövde eğim açıları α ve β 'nin zamana göre değişimi Şekil 5.80'de gösterilmiştir.



Şekil 5.80. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasında ana gövde eğimi α ve β açıları

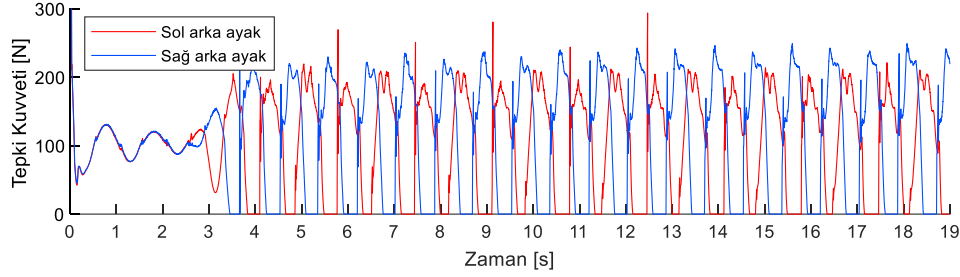
TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasında ana gövde α eğim açısının -1.5° ile 3° aralığında ve β eğim açısının başlangıçta -2° ile 1.5° aralığında değiştiği görülmüştür. Yan yürüme senaryosu sırasında zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.81'de gösterilmiştir.



Şekil 5.81. TUKSDAR'ın yan yürüme senaryosu sırasında ön ayakların tepki kuvvetleri

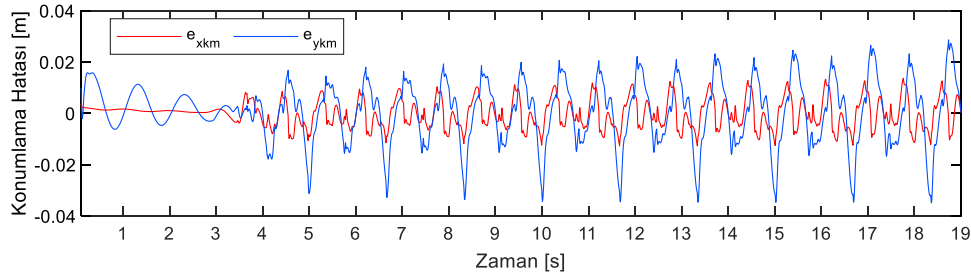
Sol ön ayaktaki tepki kuvvetinin 200 N olduğu ve sağ ön ayaktaki tepki kuvvetinin 250 N olduğu görülmüştür. Yan yürüme senaryosu sırasında zamana bağlı

olarak yer tarafından arka ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.82’de gösterilmiştir.



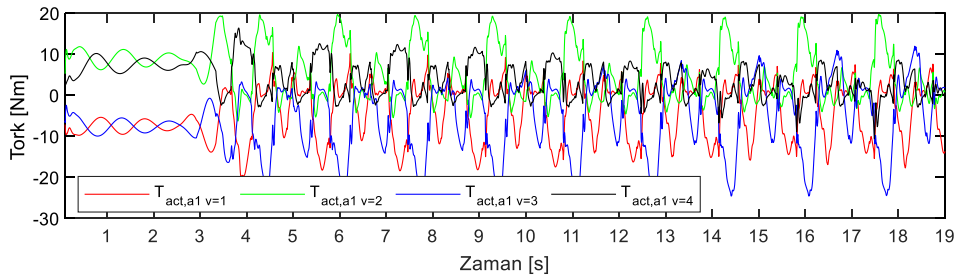
Şekil 5.82. TUKSDAR’ın yan yürüme senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri

Yan yürüme senaryosu sırasındaki arka ayaklardaki tepki kuvvetlerinin de 250 N olduğu görülmüştür. Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32’de ifade edilen TUKSDAR’ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.83’te gösterilmiştir.

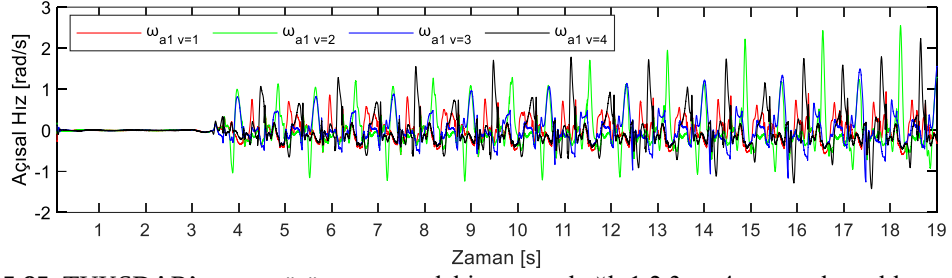


Şekil 5.83. TUKSDAR’ın yan yürüme sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları grafiği

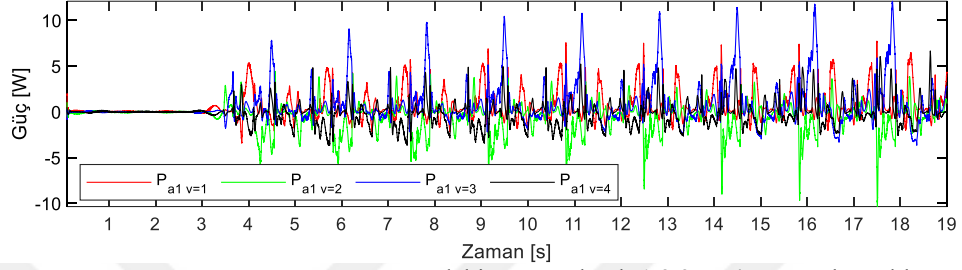
TUKSDAR’ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ifadesinin ± 0.015 m ve e_{ykm} ifadelerinin ± 0.03 m’ye ulaştığı görülmüştür. TUKSDAR’ın yan yürüme sırasındaki TUKSDAR’ın ayaklarının 1. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.84 – Şekil 5.86’da gösterilmiştir.



Şekil 5.84. TUKSDAR’ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği

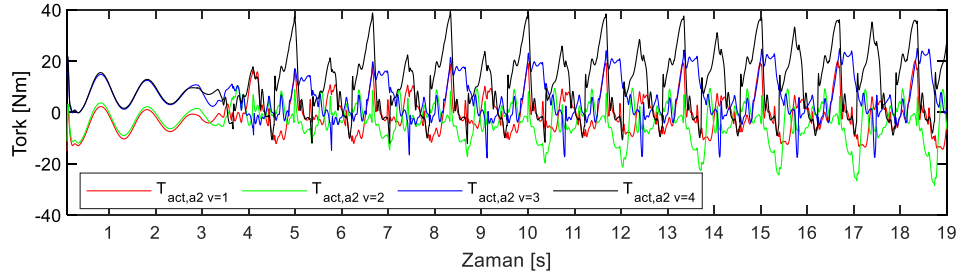


Şekil 5.85. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal açısal hız grafiği

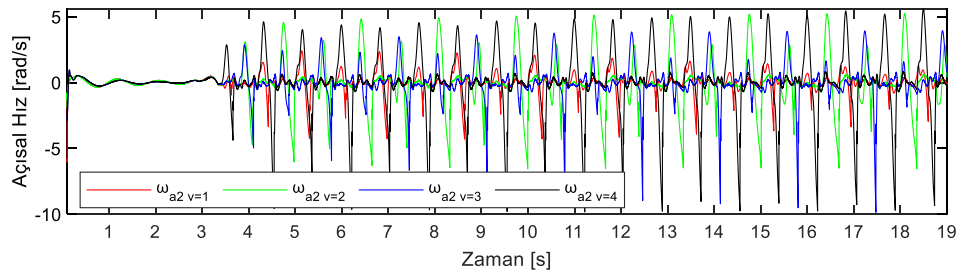


Şekil 5.86. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği

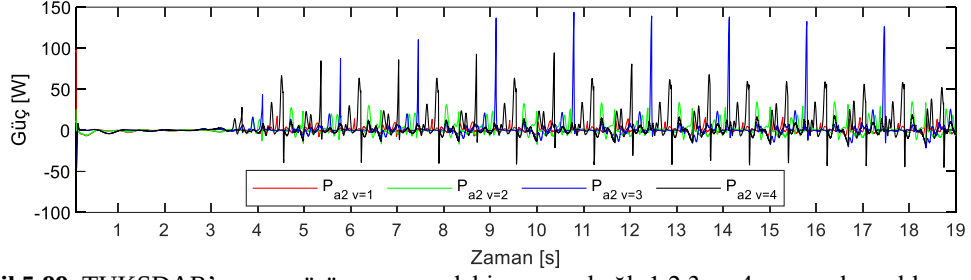
TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork -24 Nm ile 20 Nm aralığında, açısal hız -1.5 rad/s ile 2.5 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 15 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yan yürüme sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsalsına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.87 – Şekil 5.89'da gösterilmiştir.



Şekil 5.87. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği

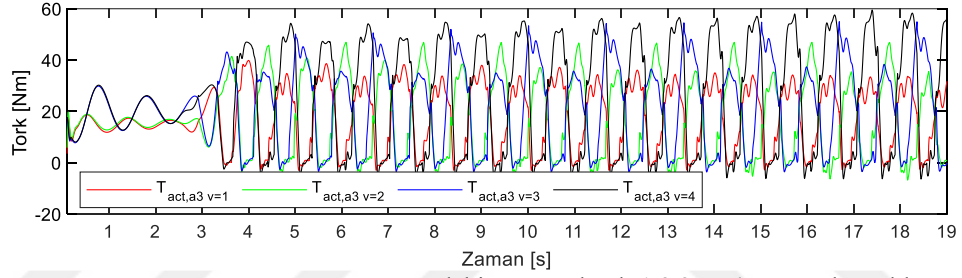


Şekil 5.88. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği

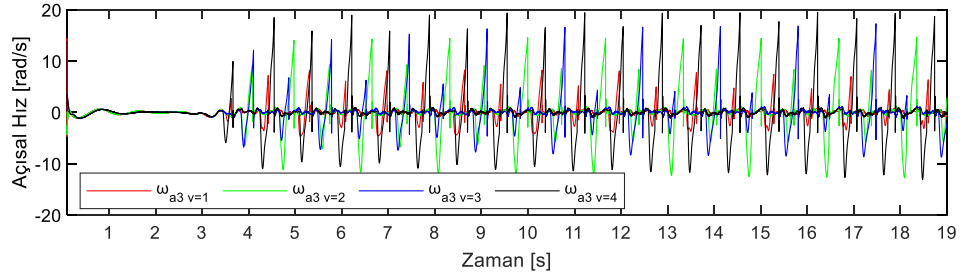


Şekil 5.89. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal güç grafiği

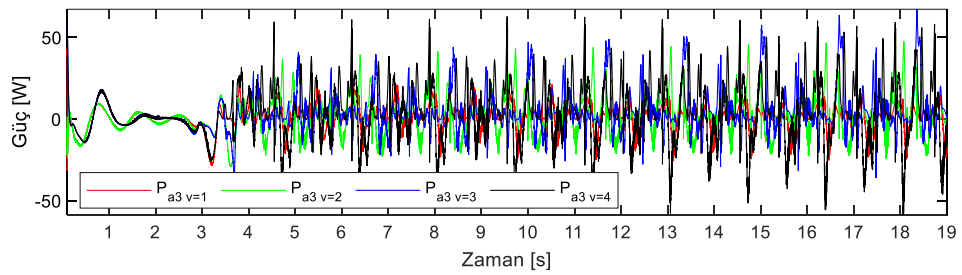
TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork ± 40 Nm aralığında, açısal hız -10 rad/s ile 6 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 145 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yan yürüme sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsalsına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.90 – Şekil 5.92'de gösterilmiştir.



Şekil 5.90. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği



Şekil 5.91. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği

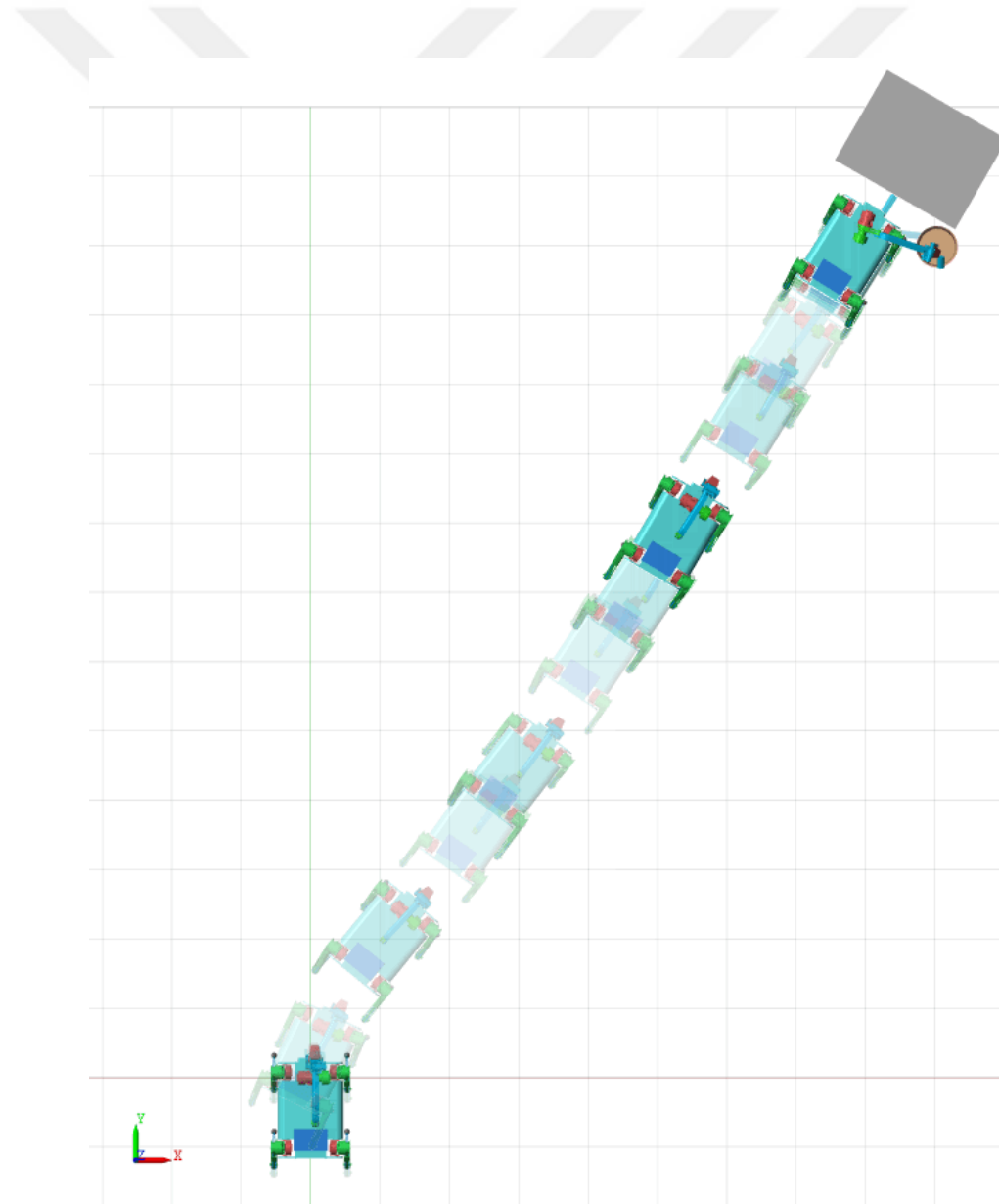


Şekil 5.92. TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği

TUKSDAR'ın yan yürüme sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork -11 Nm ile 60 Nm aralığında, açısal hız -14 rad/s ile 20 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 65 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Yan yürüme sırasındaki toplam enerji sarfiyatının 1023.3 J olarak gerçekleştiği görülmüştür.

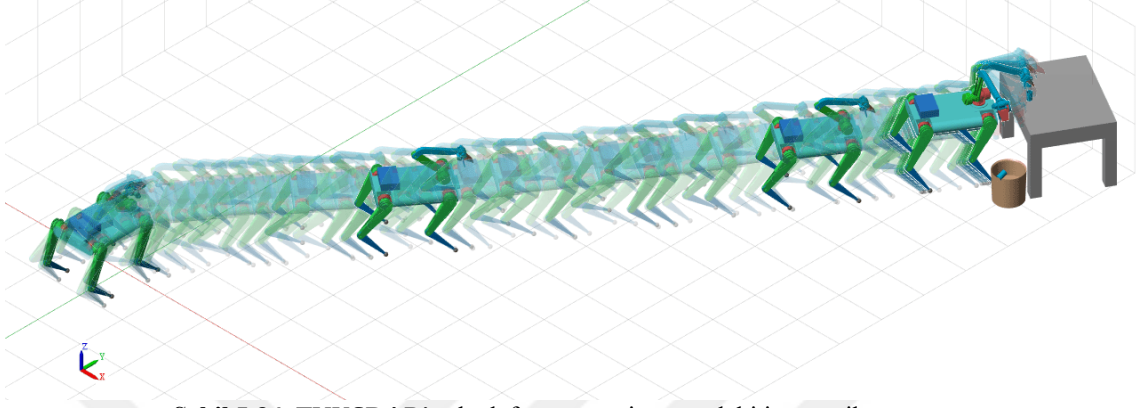
5.1.6. TUKSDAR'ın Hedefe Yürümesi

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi için 4.2.3 başlığındaki yürüme senaryosu ve 4.2.4 başlığındaki kendi etrafında dönüş senaryosu birlikte kullanılarak 46 saniye boyunca uygulanmıştır. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki üstten görünüşü Şekil 5.93'te gösterilmiştir.



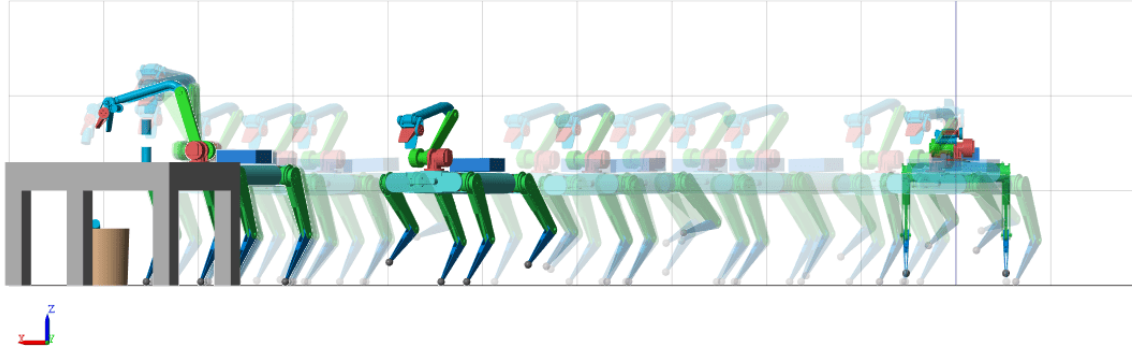
Şekil 5.93. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki üstten görünüşü

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasında 14.4 m yol kat etmiştir. TUKSDAR'ın hedef yürümesi sırasındaki başlangıç açısını yaklaşık 33° değiştirmiştir. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki izometrik görünüşü Şekil 5.94'te gösterilmiştir.



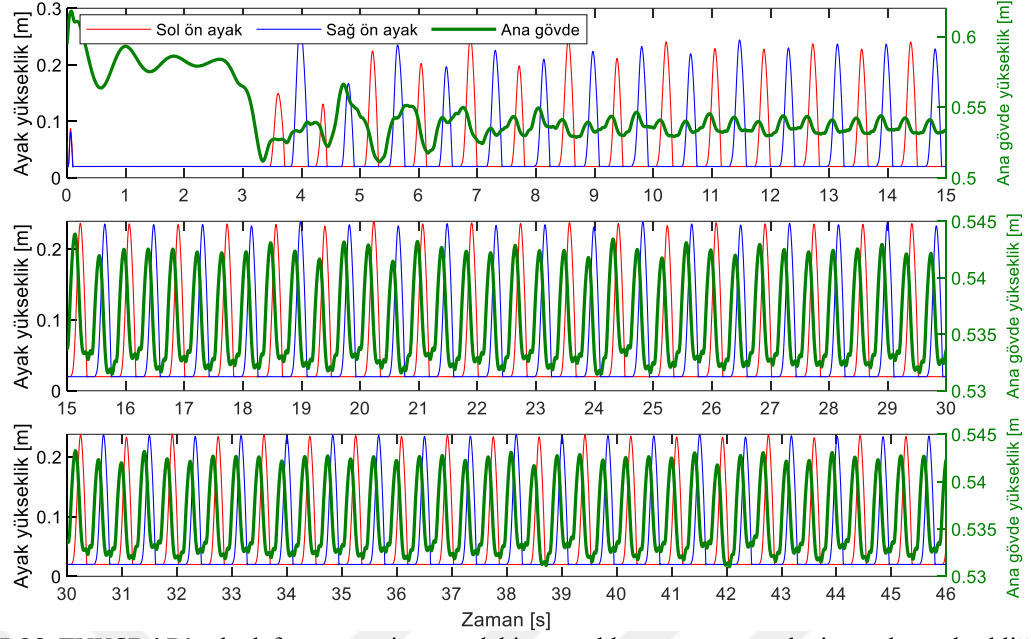
Şekil 5.94. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki izometrik görünüşü

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki önden görünüşü Şekil 5.95'te gösterilmiştir. Bütün simülasyonlarda olduğu üzere, TUKSDAR 46 mm yükseklikten bırakılarak ilk 4 saniye boyunca bekledikten sonra hedefe yürümesi işlemi 46 saniye uygulamıştır.



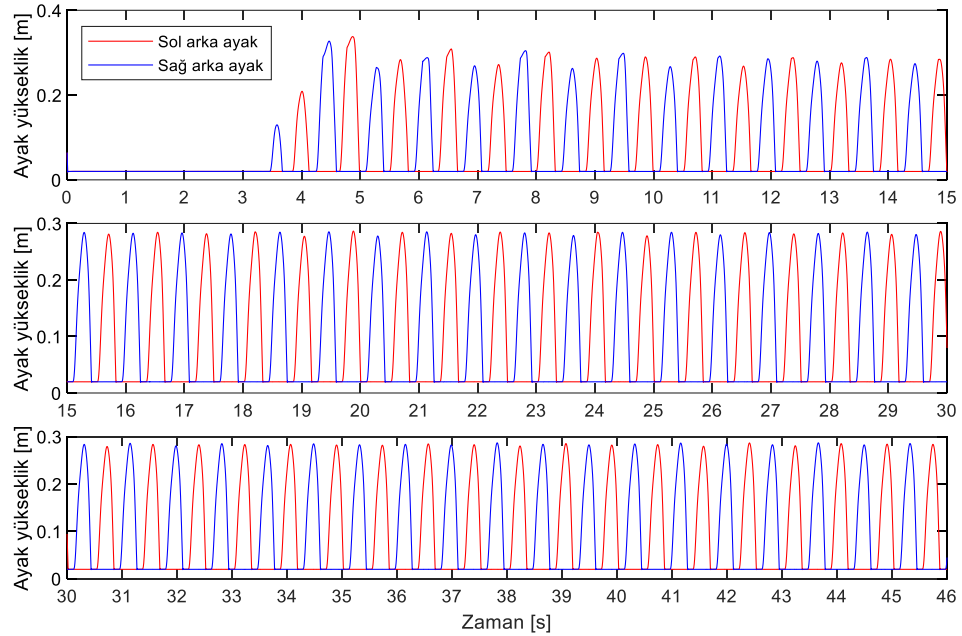
Şekil 5.95. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki önden görünüşü

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı olarak ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği grafiği Şekil 5.96'da gösterilmiştir.



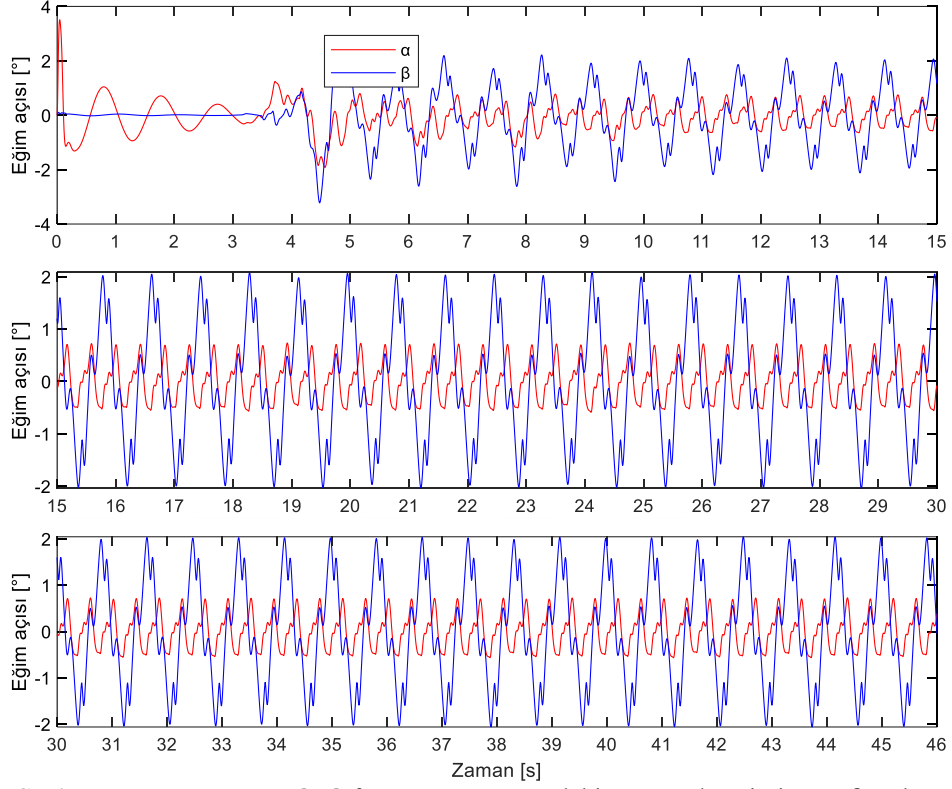
Şekil 5.96. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ön ayakların adım yüksekliklerinin 0.25 m'ye ulaştığı görülmüştür. Ana gövdenin yerden yüksekliğinin ise 0.54 m'de dengelendiği görülmüştür. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı olarak arka ayaklarının yere göre yükseklik değişimi Şekil 5.97'de gösterilmiştir.



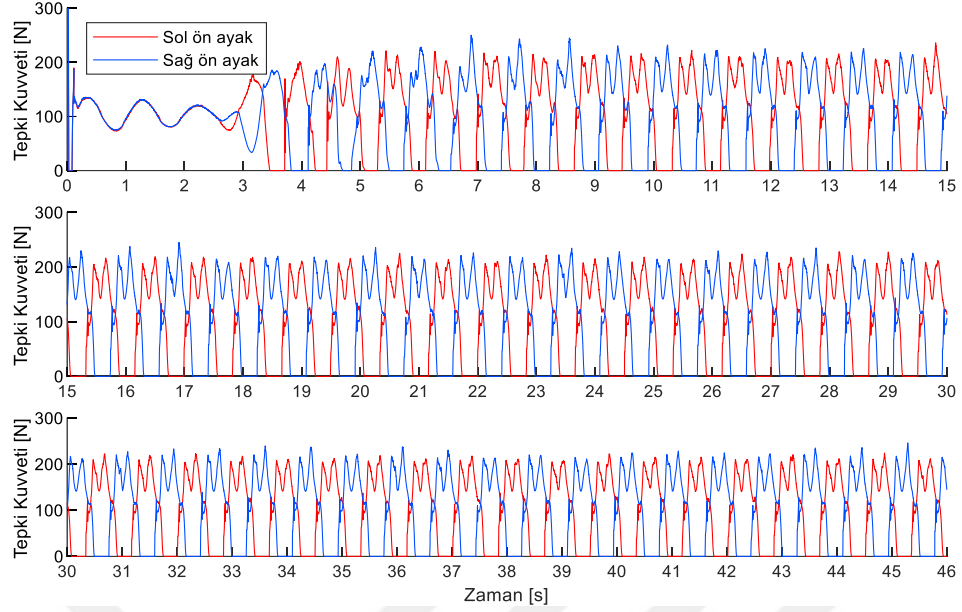
Şekil 5.97. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki arka ayakların adım yüksekliklerinin 0.3 m'de dengelendiği görülmüştür. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ana gövde eğim açıları α ve β 'nin zamana göre değişimi Şekil 5.98'de gösterilmiştir.



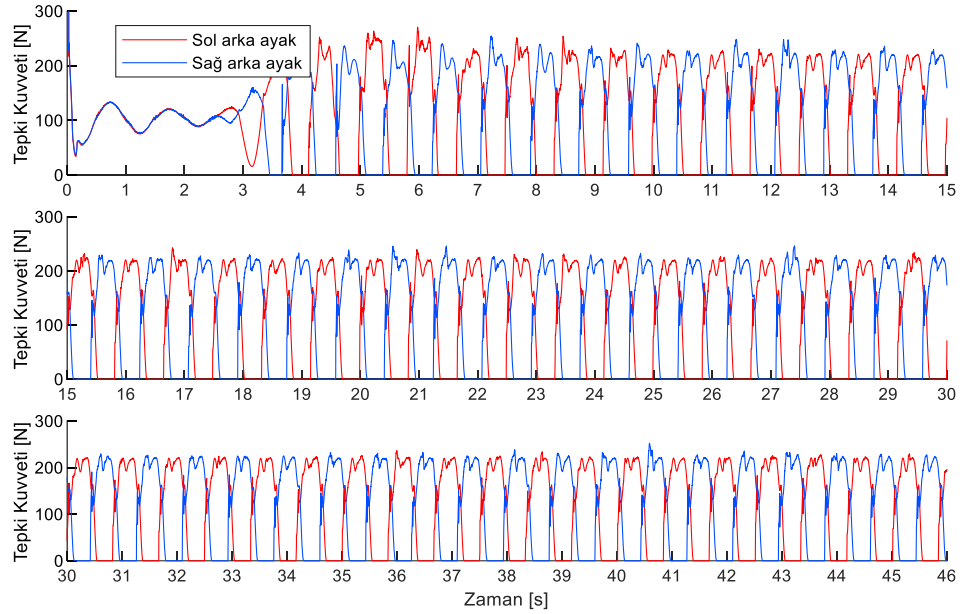
Şekil 5.98. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ana gövde α eğiminin $\pm 0.8^\circ$ aralığında dengelendiği görülmüştür. Yürüme senaryosu sırasındaki β açıları $\pm 3^\circ$ aralığında iken TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ana gövde β eğiminin $\pm 2^\circ$ aralığında gerçekleşerek 1° düştüğü görülmüştür. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki tutucu kol motorları aktif olduğu için ana gövde eğim hatalarını kısmen sönümlediği görülmüştür. Bu durum insanların yürürken istem dışı bir şekilde ellerini hareket ettirmesine benzemektedir. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ana gövde eğiminin dengelenmesi işleminin yürüme senaryosuna göre daha kolaylaştığı görülmektedir. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.99'da gösterilmiştir.



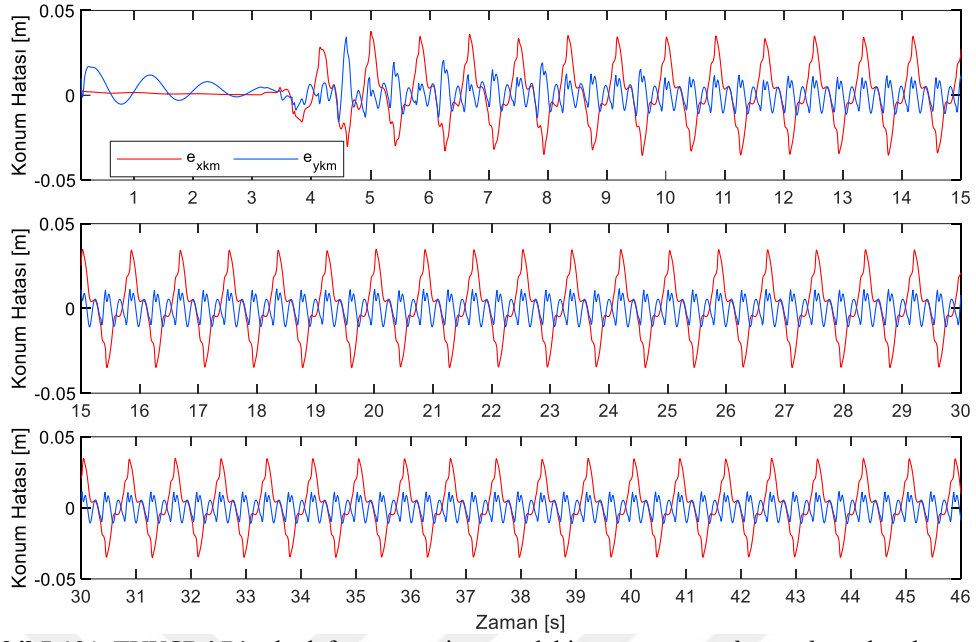
Şekil 5.99. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri

Ön ayaklardaki tepki kuvvetlerinin 225 N olduğu görülmüştür. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından arka ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.100'de gösterilmiştir.



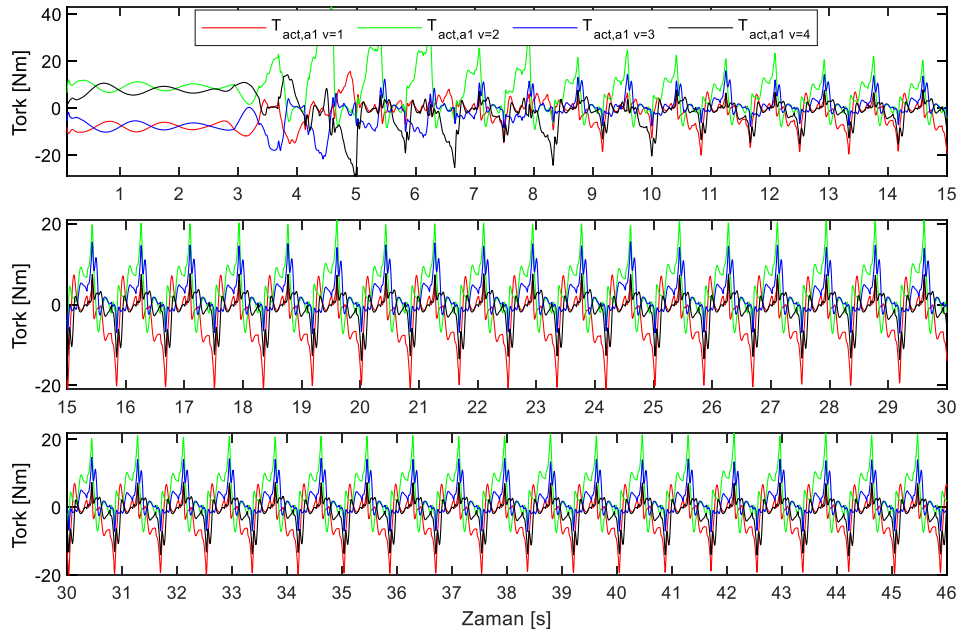
Şekil 5.100. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki arka ayaklardaki tepki kuvvetlerinin 225 N olduğu görülmüştür. Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32'de ifade edilen TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.101'de gösterilmiştir.

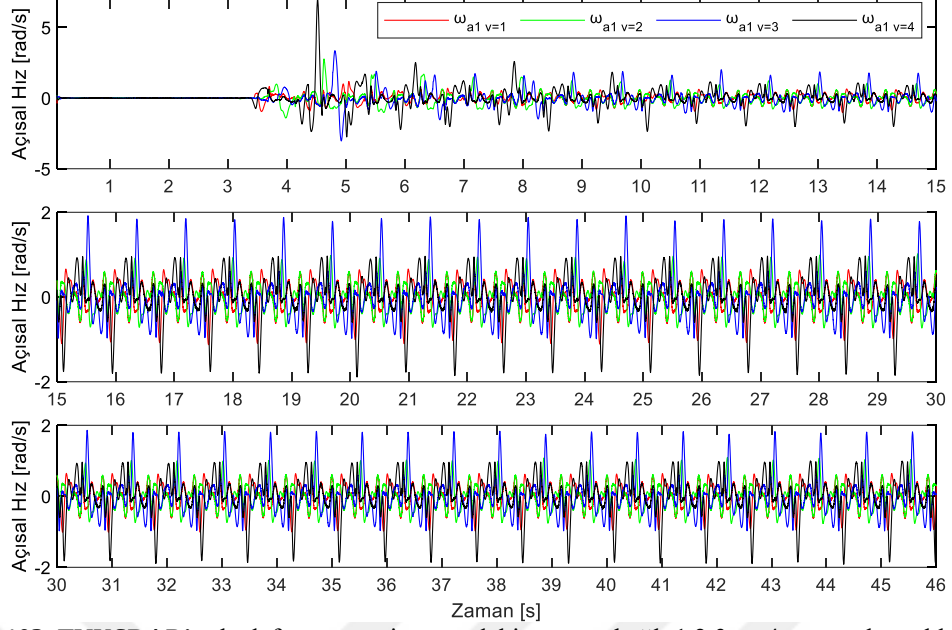


Şekil 5.101. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları grafiği

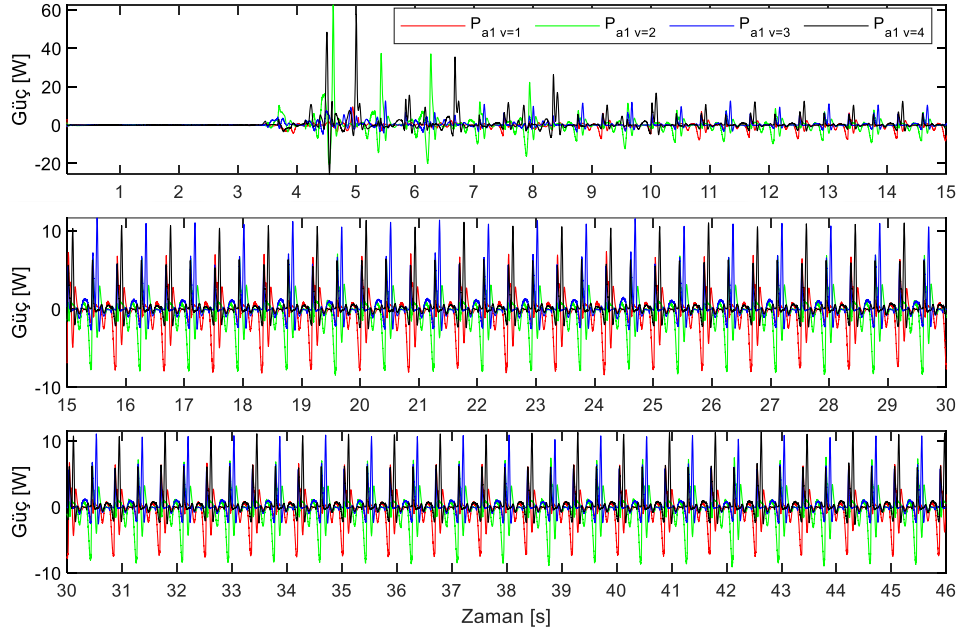
TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ifadesinin ± 0.01 m ve e_{ykm} ifadelerinin ± 0.035 m'ye ulaştığı görülmüştür. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi hedefe yürümesi sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 1. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.102 – Şekil 5.104'te gösterilmiştir.



Şekil 5.102. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği

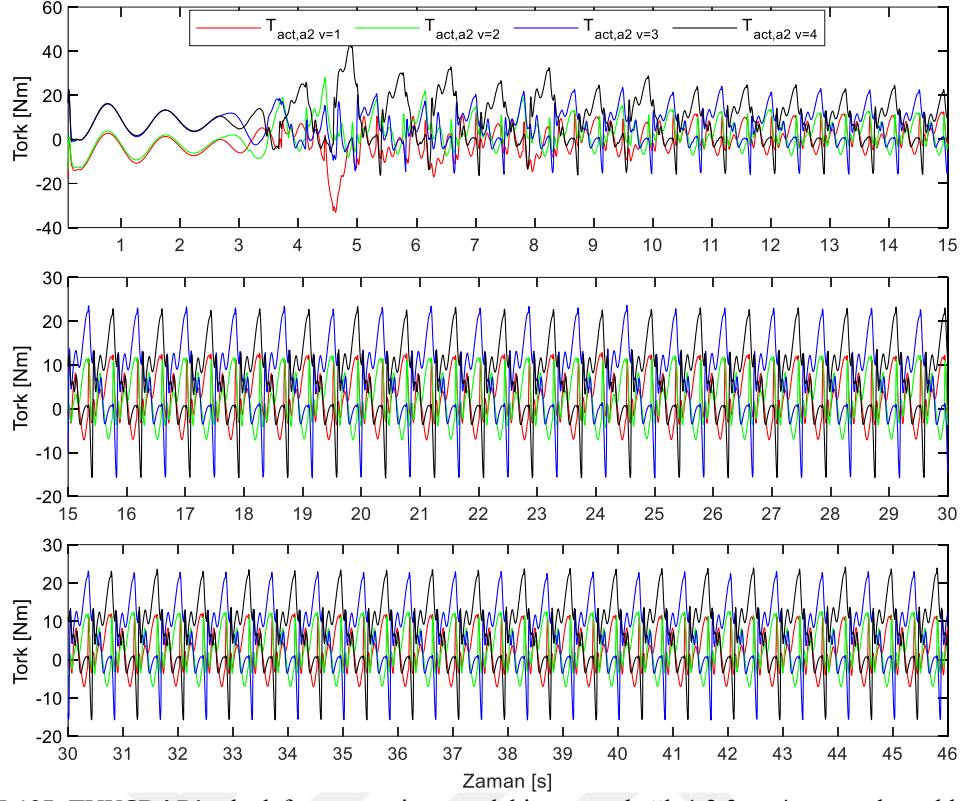


Şekil 5.103. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal açısal hız grafiği

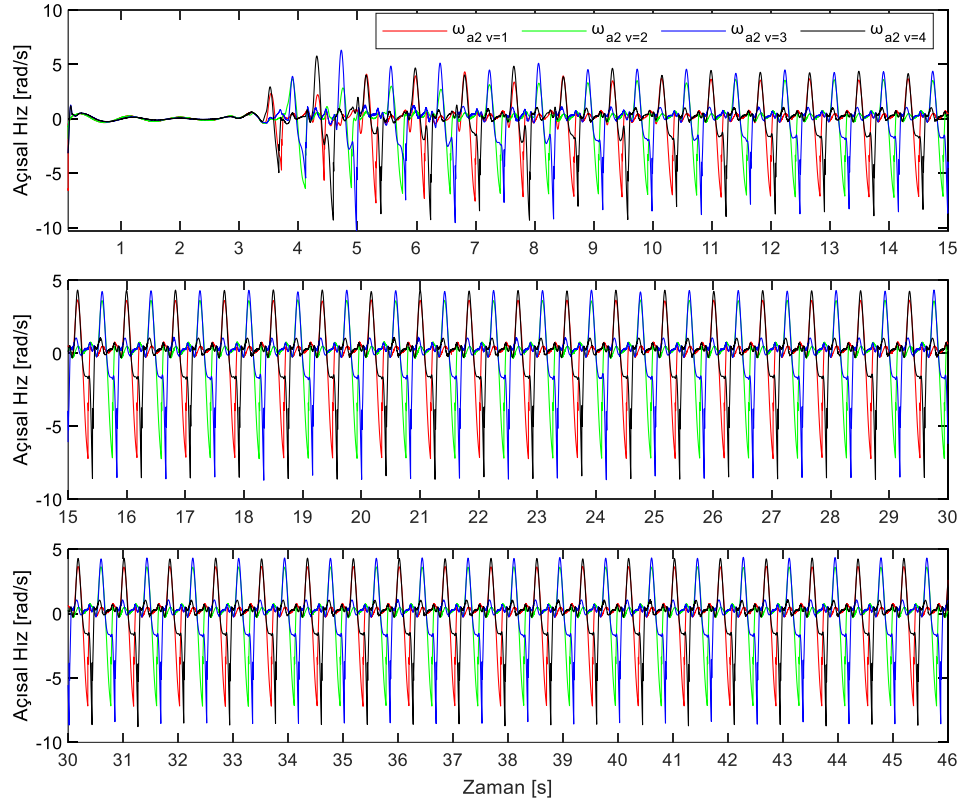


Şekil 5.104. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal güç grafiği

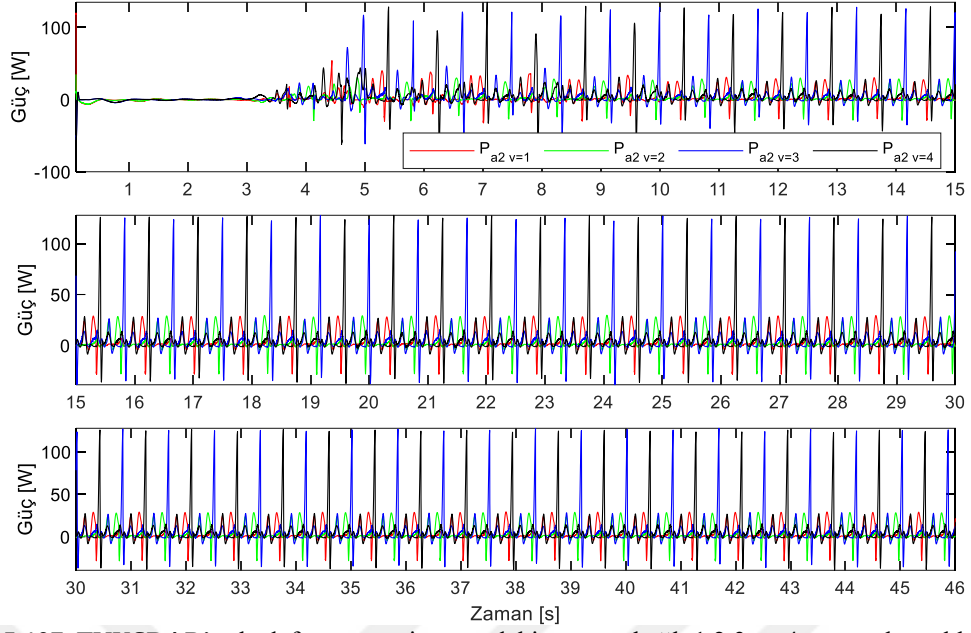
TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork -28 Nm ile 42 Nm aralığında, açısal hız -3 rad/s ile 7 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 60 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Hedefe yürümesi sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.105 – Şekil 5.107'de gösterilmiştir.



Şekil 5.105. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsıl tork grafiği

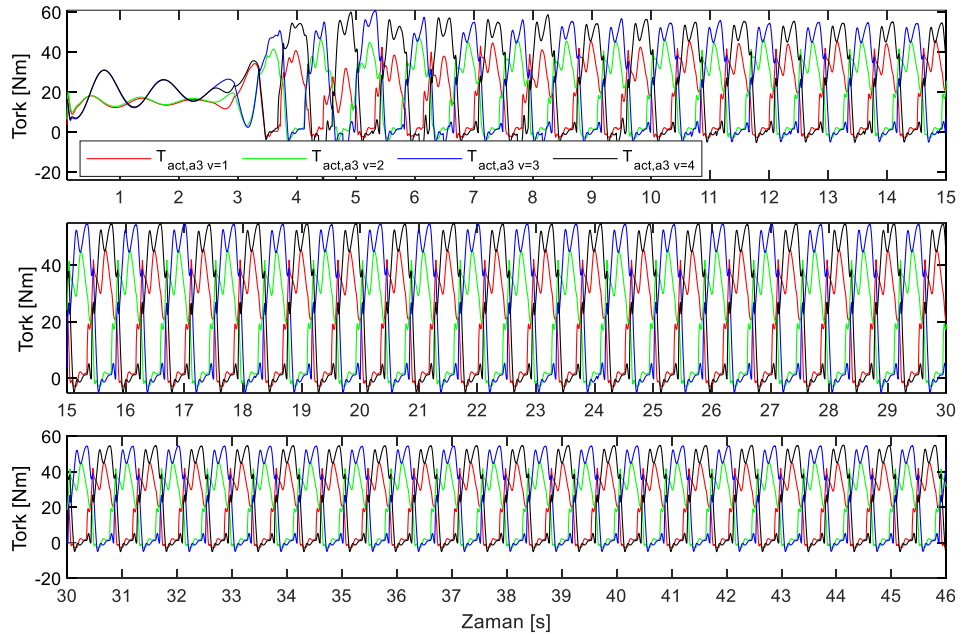


Şekil 5.106. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsıl açısal hız grafiği

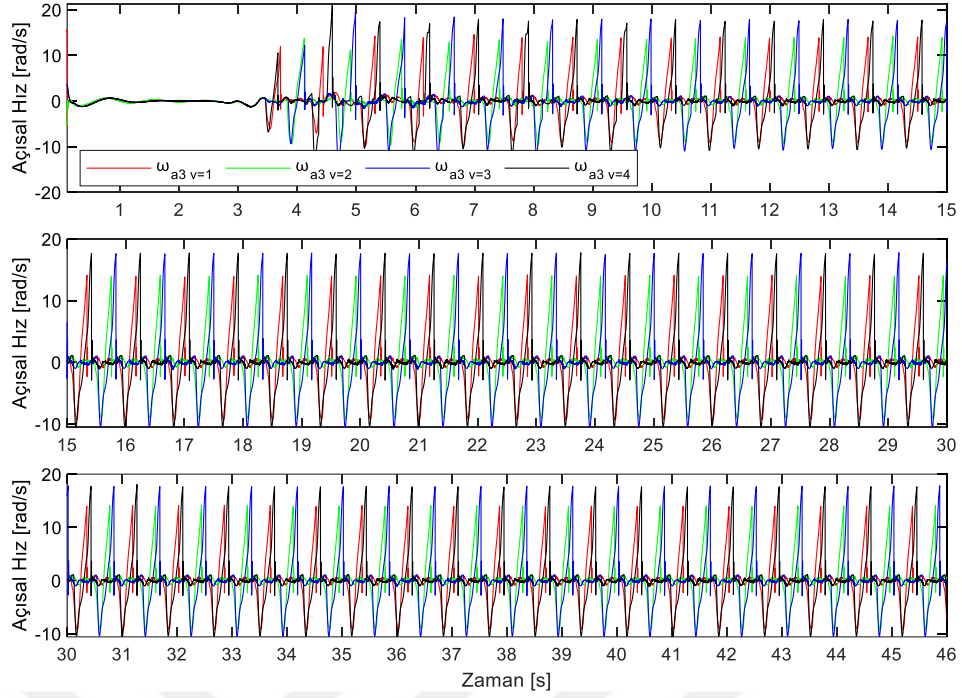


Şekil 5.107. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal güç grafiği

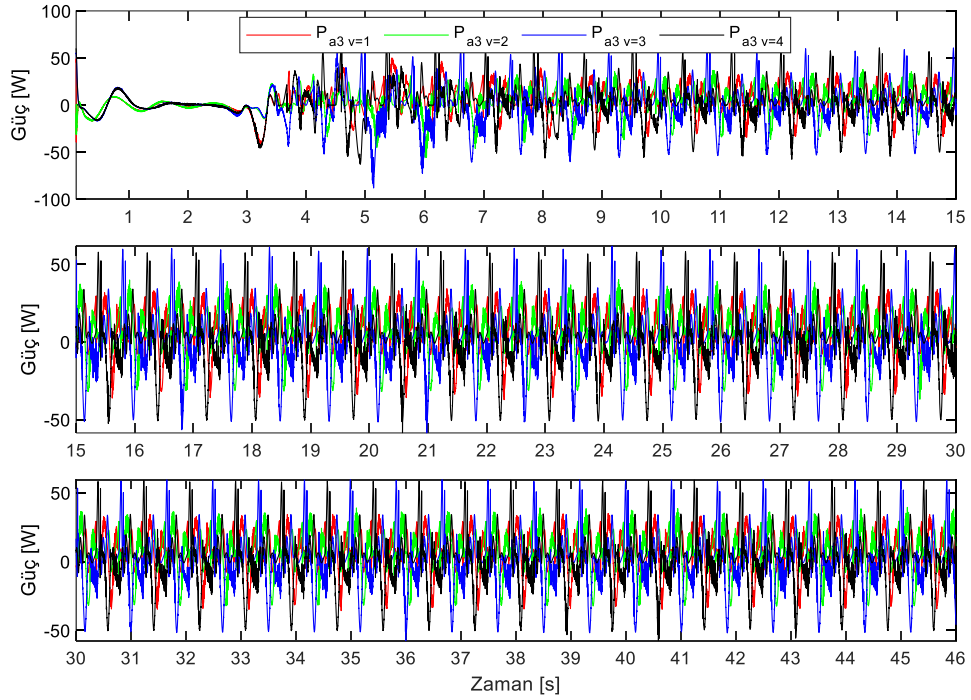
TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork -30 Nm ile 42 Nm aralığında, açısal hız -10 rad/s ile 8 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 125 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.108 – Şekil 5.110'da gösterilmiştir.



Şekil 5.108. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal tork grafiği



Şekil 5.109. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği

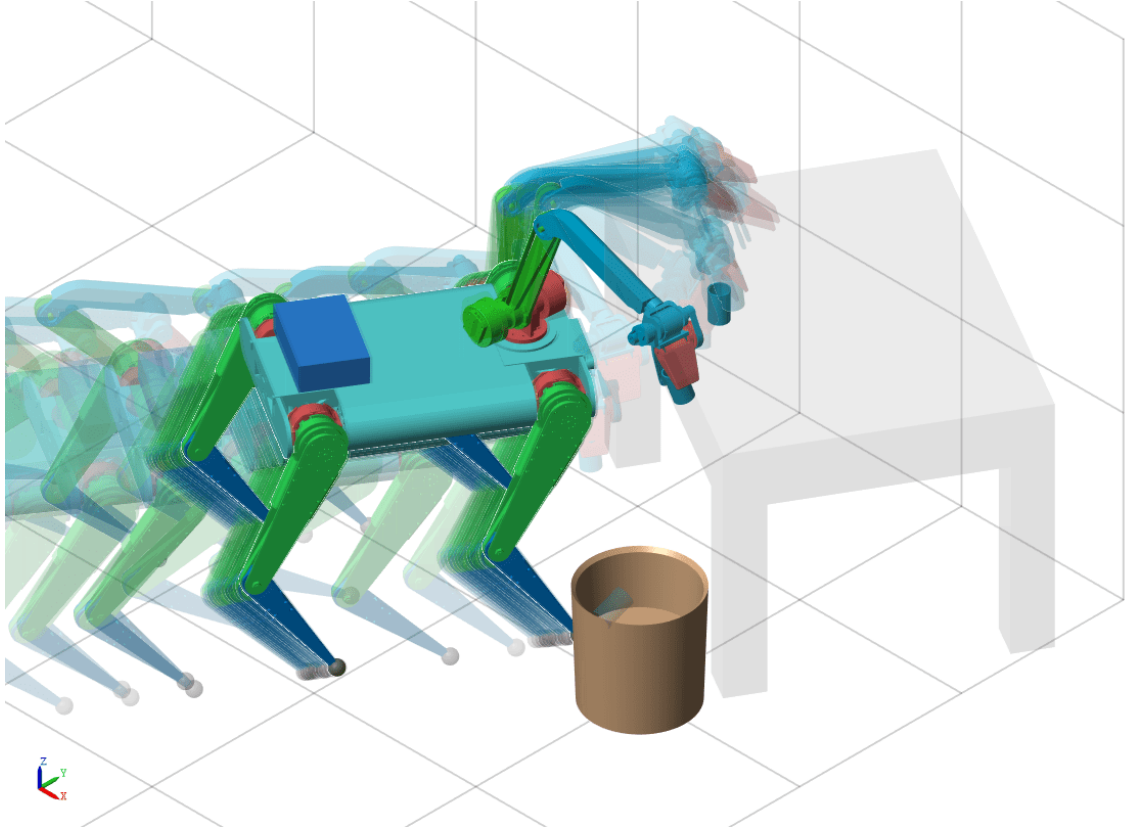


Şekil 5.110. TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal güç grafiği

TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork -20 Nm ile 60 Nm aralığında, açısal hız -14 rad/s ile 20 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 100 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Hedefe yürüme, nesne tutma ve taşıma senaryolarının toplam enerji sarfiyatının 3058.62 J olarak gerçekleştiği görülmüştür.

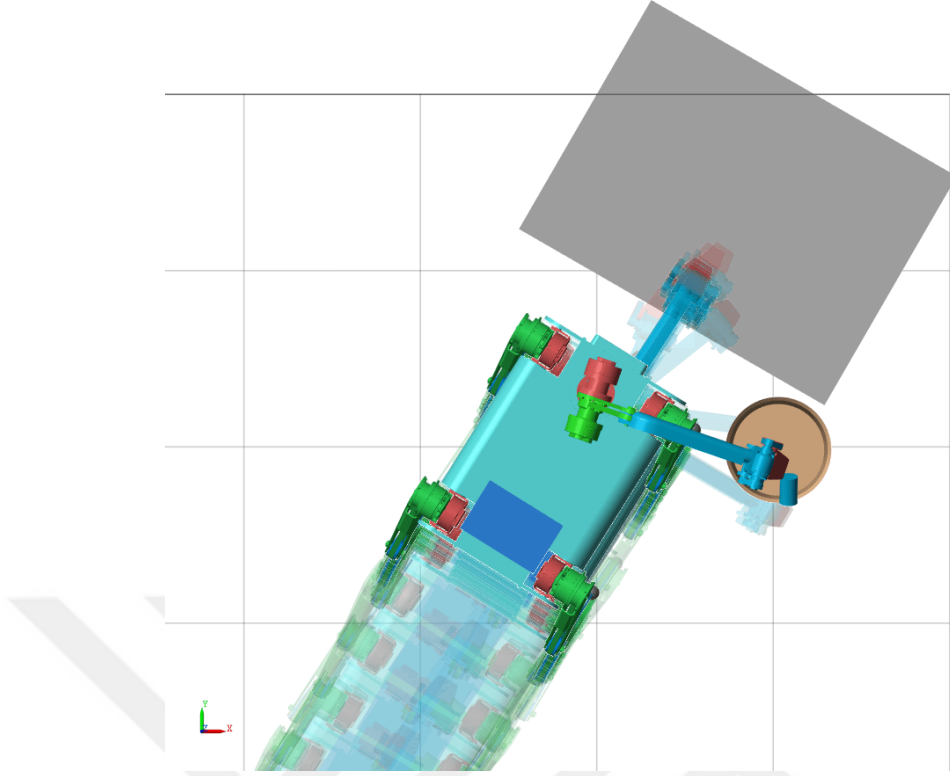
5.1.7. Nesne Tutma ve Taşıma Senaryosu

TUKSDAR'ın nesne tutması ve taşınması için 4.3.1 başlığındaki nesne tutma ve taşıma senaryosu kullanılarak 21.7 saniye boyunca uygulanmıştır. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü Şekil 5.111'de gösterilmiştir.



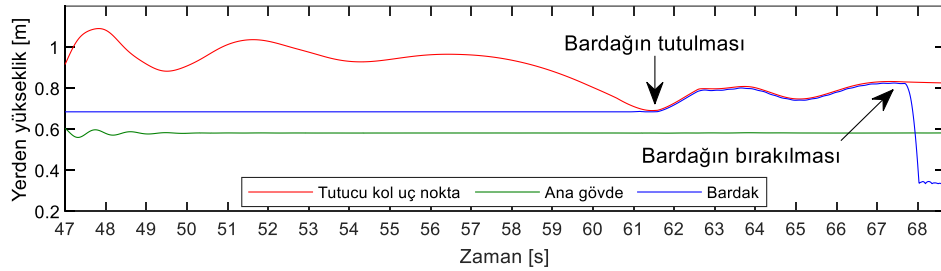
Şekil 5.111. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü

5.1.6 başlığındaki TUKSDAR'ın hedefe yürümesi simülasyonunun devamındaki 47 – 68.7 saniye aralığında 4.3.1 başlığındaki nesne tutma ve taşıma senaryosu kullanılarak masanın üstündeki bardağın tutucu kol ile tutulması ve çöp kutusuna hizalanarak bırakılması simülasyonu gerçekleştirilmiştir. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki üstten görünüşü Şekil 5.112'de gösterilmiştir.



Şekil 5.112. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki üstten görünüşü

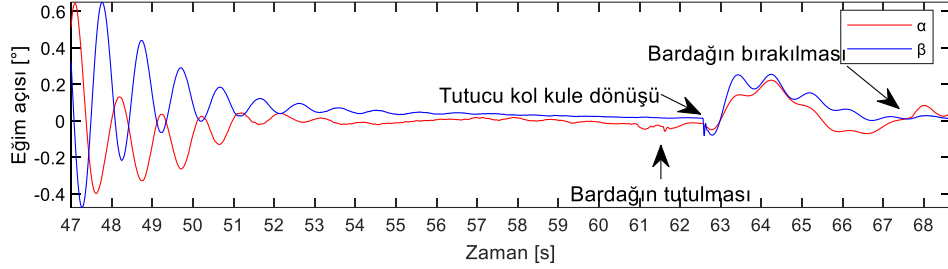
TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak ana gövdenin, bardağın ve tutucu kolun uç noktasının yerden yüksekliklerinin grafiği Şekil 5.113'te gösterilmiştir.



Şekil 5.113. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki ana gövdenin, bardağın ve tutucu kolun uç noktasının yerden yüksekliği

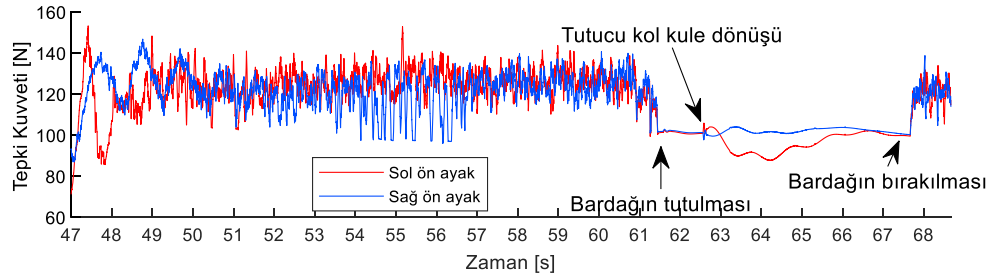
Şekil 5.113'te ana gövde 0.58 m yerden yükseklikte dengede durmaktadır. Tutucu kolun yere göre 0.68 m yükseklikteki bardağı simülasyonun 61.5 saniyesinde tutarak 0.80 m yüksekliğe çıkararak çöp kutusuna dikeyde hizalamak üzere taşımaktadır. Çöp kutusuna hizalama işlemi sırasında hizalama hatası 0.020 m'nin altına indiği 67.6 saniyesinde tutucu kol bardağı bırakarak serbest düşüşe bırakmış ve 68.03 saniyesinde nesne çöp kutusuna düşmüştür. Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ana gövde eğim açıları α ve β 'nin zamana göre değişimi

Şekil 5.114'te gösterilmiştir. Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki ana gövde α eğimi yürüyüş hareketinden durağan harekete geçtiği için $\pm 0.03^\circ$ aralığında dengelendiği ve β eğiminin ise -0.06° ile -0.01° aralığında dengelendiği görülmüştür.



Şekil 5.114. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları

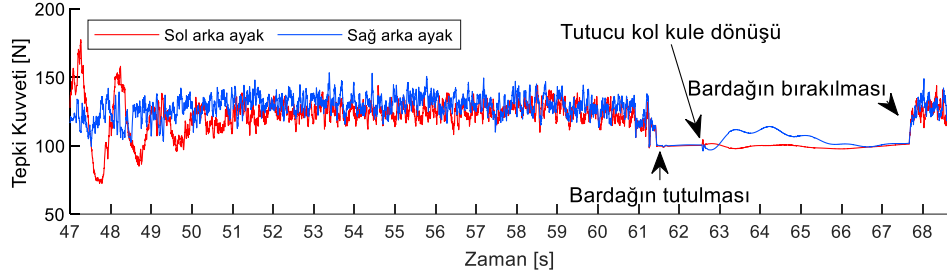
TUKSDAR'ın tutucu kolunun bardağı tuttuğu simülasyonun 61.5 saniyesi sırasındaki ana gövde α eğiminin 0.02° 'de 0.10 saniye boyunca salınıma uğradığı görülmüştür. Bardağın yükseltilmesi işleminin ardından tutucu kolun kule dönüşü 62.6 saniyesi sırasında ana gövde α ve β eğimlerinde ani bir artış görülmüştür. Ana gövde α ve β eğim açılarında 0.25° 'ye kadar arttığı görülmüştür. Tutucu kolun bardağı bıraktığı 67.6 saniyesine kadar ana gövde α eğim açısının 0.08° 'ye ve β eğim açısının 0.02° 'ye düştüğü görülmüştür. Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.115'te gösterilmiştir.



Şekil 5.115. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki ön ayakların tepki kuvvetleri

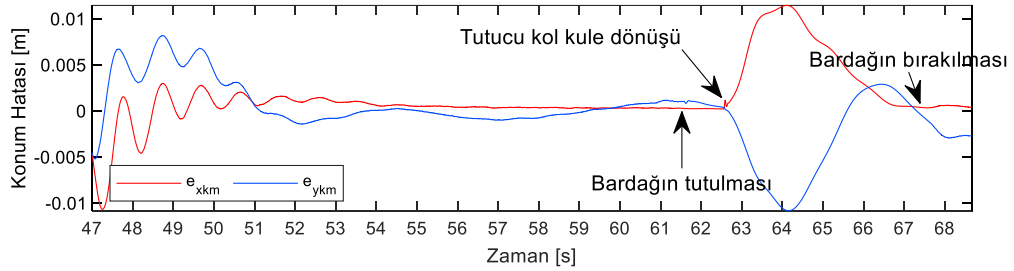
Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın tutucu kolunun bardağı tuttuğu simülasyonun 61.5 saniyesi sırasındaki ön ayaklara gelen tepki kuvvetinin 102 N olduğu görülmüştür. TUKSDAR'ın tutucu kolunun kule dönüşünün başladığı 62.6 saniyesinden sonra sağ ön ayaktaki kuvvetin 104 N'a kadar arttığı ve sol ön ayaktaki kuvvetin ise 87 N'a kadar düştüğü görülmüştür. Nesne tutma ve taşıma

senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından arka ayakların üzerinde oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.116’da gösterilmiştir.



Şekil 5.116. TUKSDAR’ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki arka ayakların tepki kuvvetleri

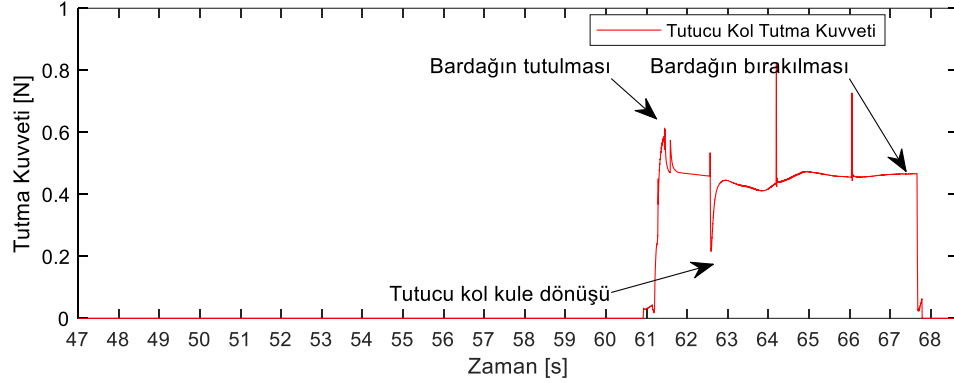
Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR’ın tutucu kolunun bardağı tuttuğu simülasyonun 61.5 saniyesi sırasındaki arka ayaklara gelen tepki kuvvetinin 100 N olduğu görülmüştür. TUKSDAR’ın tutucu kolunun kule dönüşünün başladığı 62.6 saniyesinden sonra sağ arka ayaktaki kuvvetin 113 N’a kadar arttığı ve sol arka ayaktaki kuvvetin ise 97 N’a kadar düştüğü görülmüştür. Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32’de ifade edilen TUKSDAR’ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.117’de gösterilmiştir.



Şekil 5.117. TUKSDAR’ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları grafiği

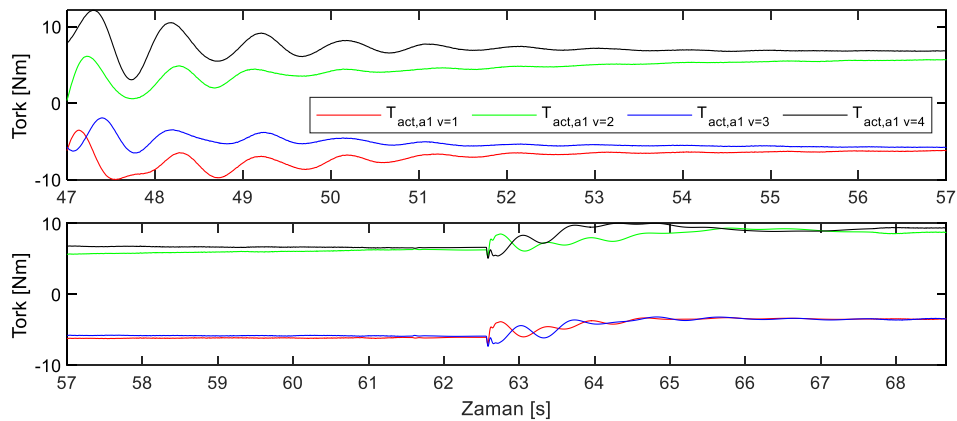
Tutucu kolun kule dönüşü sırasında TUKSDAR’ın kütle merkezi değiştiği için TUKSDAR’ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ifadesi artarak 0.012 m’ye arttığı ve e_{ykm} ifadesi -0.01 m’ye düştüğü görülmüştür. Simülasyonun 66.7 saniyesinde e_{xkm} ifadesinin $5 \cdot 10^{-5}$ m’ye ve e_{ykm} ifadesi -0.0025 m’ye ulaştığı görülmüştür. e_{xkm} ve e_{ykm} ifadesinin değişken olmasından dolayı Denklem 4.33 ve 4.34’te belirttiği üzere ayak uç noktasının hedeflenen konumu değişmektedir. Bu durum ön ve arka ayakların tepki kuvvetlerine

de etki etmektedir. Tutucu kolun uç noktasına etki eden dış kuvvetin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 5.118’de gösterilmiştir.



Şekil 5.118. TUKSDAR’ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki tutucu kolun uç noktasına etki eden dış kuvvet grafiği

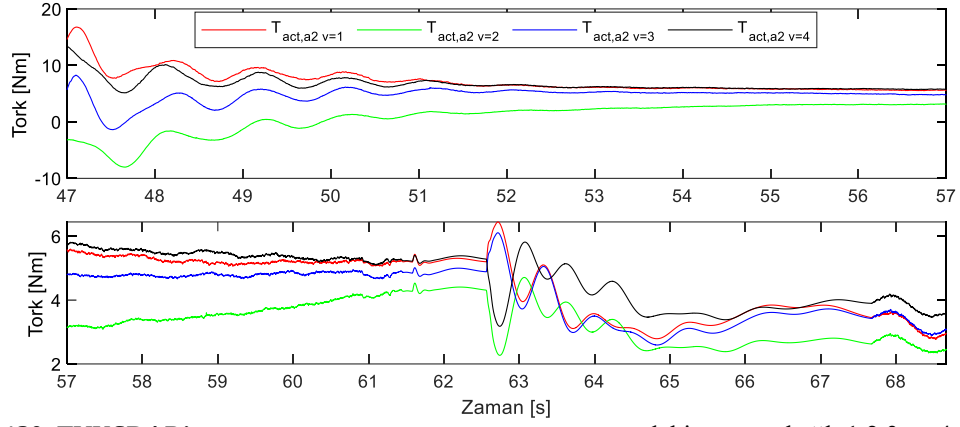
Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR’ın tutucu kolunun bardağı tuttuğu simülasyonun 61.5 saniyesi sırasındaki tutucu kola etki eden dış kuvvet hızla 0.6 N’a kadar bir pik olarak yükseldiği görülmüştür. TUKSDAR’ın tutucu kolunun kule dönüşünün başladığı 62.6 saniyesinde iken tutucu kola etki eden dış kuvvet 0.22 N’a kadar aşağı yönlü bir pik ve 0.8 N yukarı yönlü pik olarak gerçekleştiği ve ardından 0.5 N’da dengelendiği görülmüştür. Simülasyonun 67.6 saniyesinde nesne çöp kutusuna hizalanarak serbest bırakılmıştır. Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR’ın ayaklarının 1. mafsala ait tork grafikleri Şekil 5.119’da gösterilmiştir.



Şekil 5.119. TUKSDAR’ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği

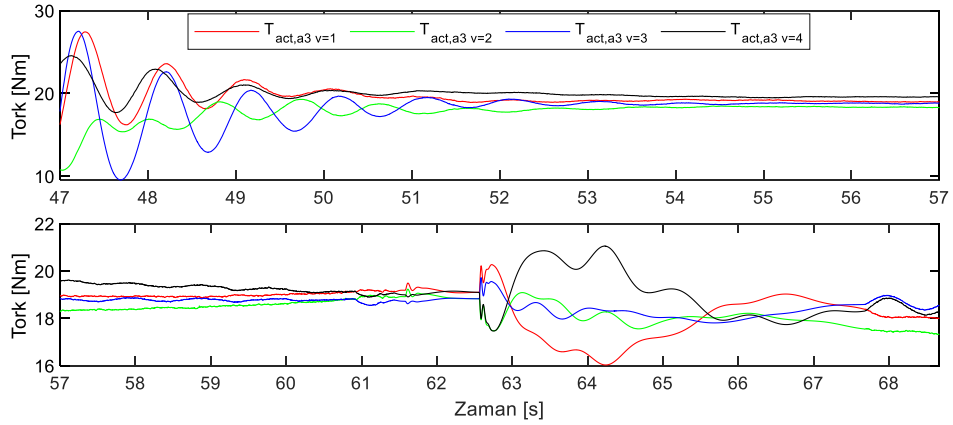
TUKSDAR’ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork -10 Nm ile 12 Nm aralığında gerçekleştiği görülmüştür. Nesne tutma

ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsalına ait tork grafikleri Şekil 5.120'de gösterilmiştir.



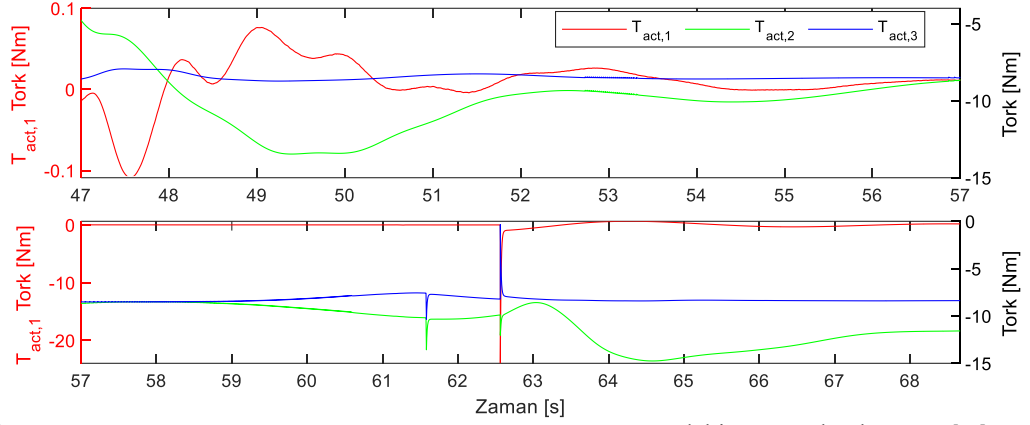
Şekil 5.120. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal tork grafiği

TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork -10 Nm ile 20 Nm aralığında gerçekleştiği görülmüştür. Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsalına ait tork grafikleri Şekil 5.121'de gösterilmiştir.

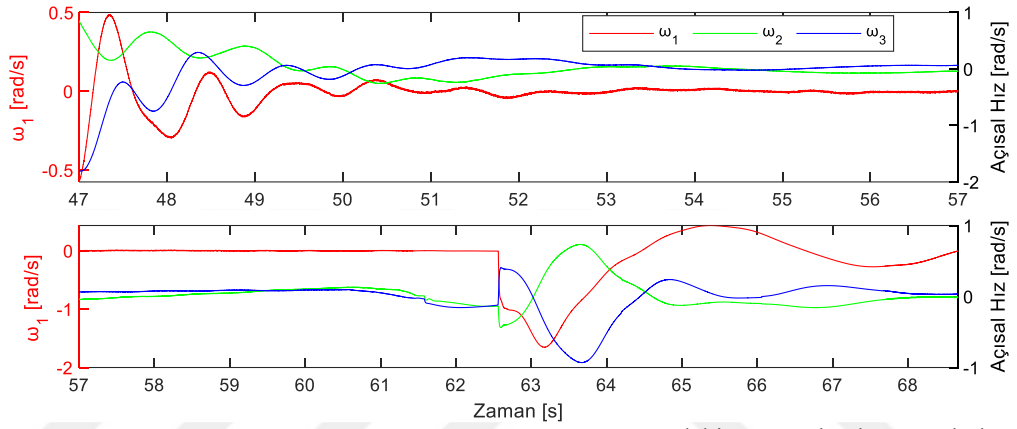


Şekil 5.121. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal tork grafiği

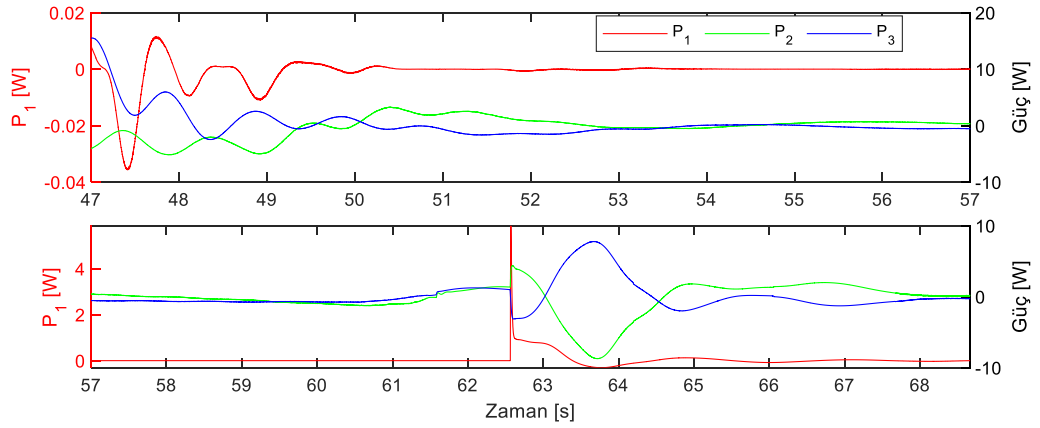
TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork -10 Nm ile 28 Nm aralığında gerçekleştiği görülmüştür. Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın tutucu kolunun 1 – 3 mafsallarına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.122 – Şekil 5.124'te gösterilmiştir.



Şekil 5.122. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasında zamana bağlı tutucu kol 1 – 3 mafsallarına ait tork grafiği

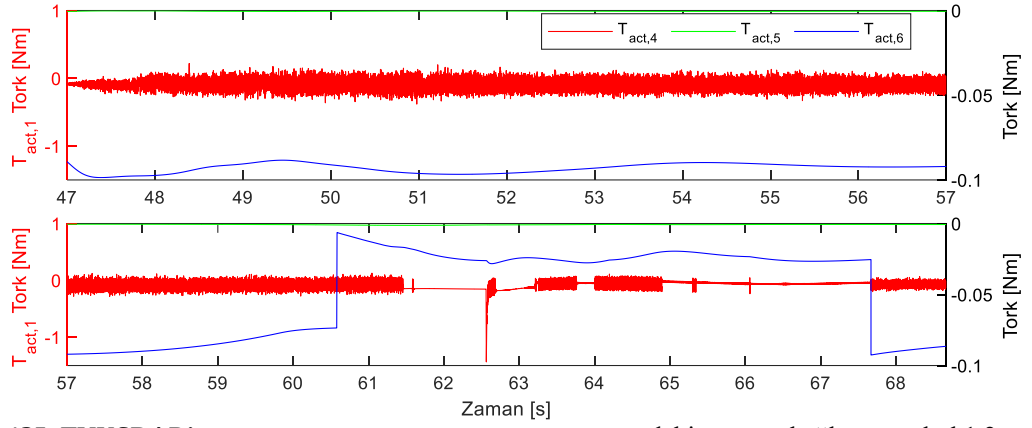


Şekil 5.123. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasında zamana bağlı tutucu kol 1 – 3 mafsallarına ait açısal hız grafiği

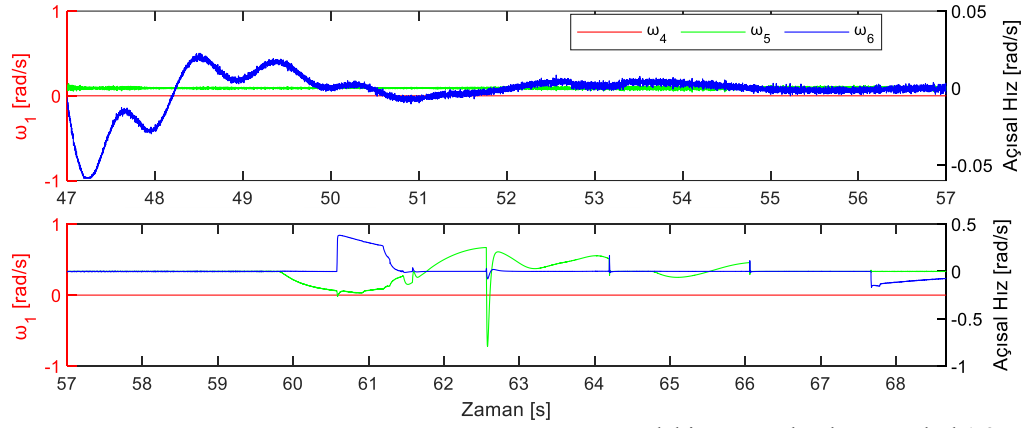


Şekil 5.124. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasında zamana bağlı tutucu kol 1 – 3 mafsallarına ait açısal güç grafiği

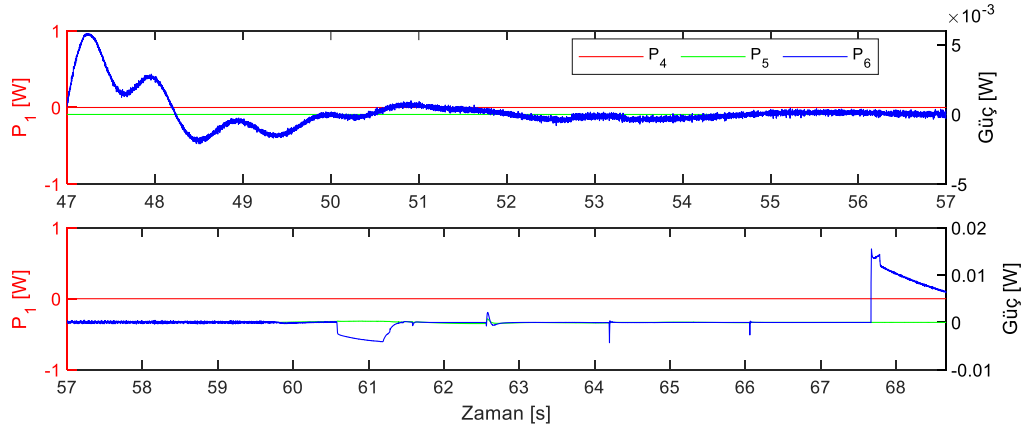
TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasında tutucu kolun 1 – 3 mafsallarında gerçekleşen tork -25 Nm ile 0.1 Nm aralığında, açısal hız -2 rad/s ile 1 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 16 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasında TUKSDAR'ın tutucu kolunun 4 – 6 mafsallarına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.125 – Şekil 5.127'de gösterilmiştir.



Şekil 5.125. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1,2 ve 3 mafsallarına ait tork grafiği



Şekil 5.126. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1,2 ve 3 mafsallarına ait açısal hız grafiği



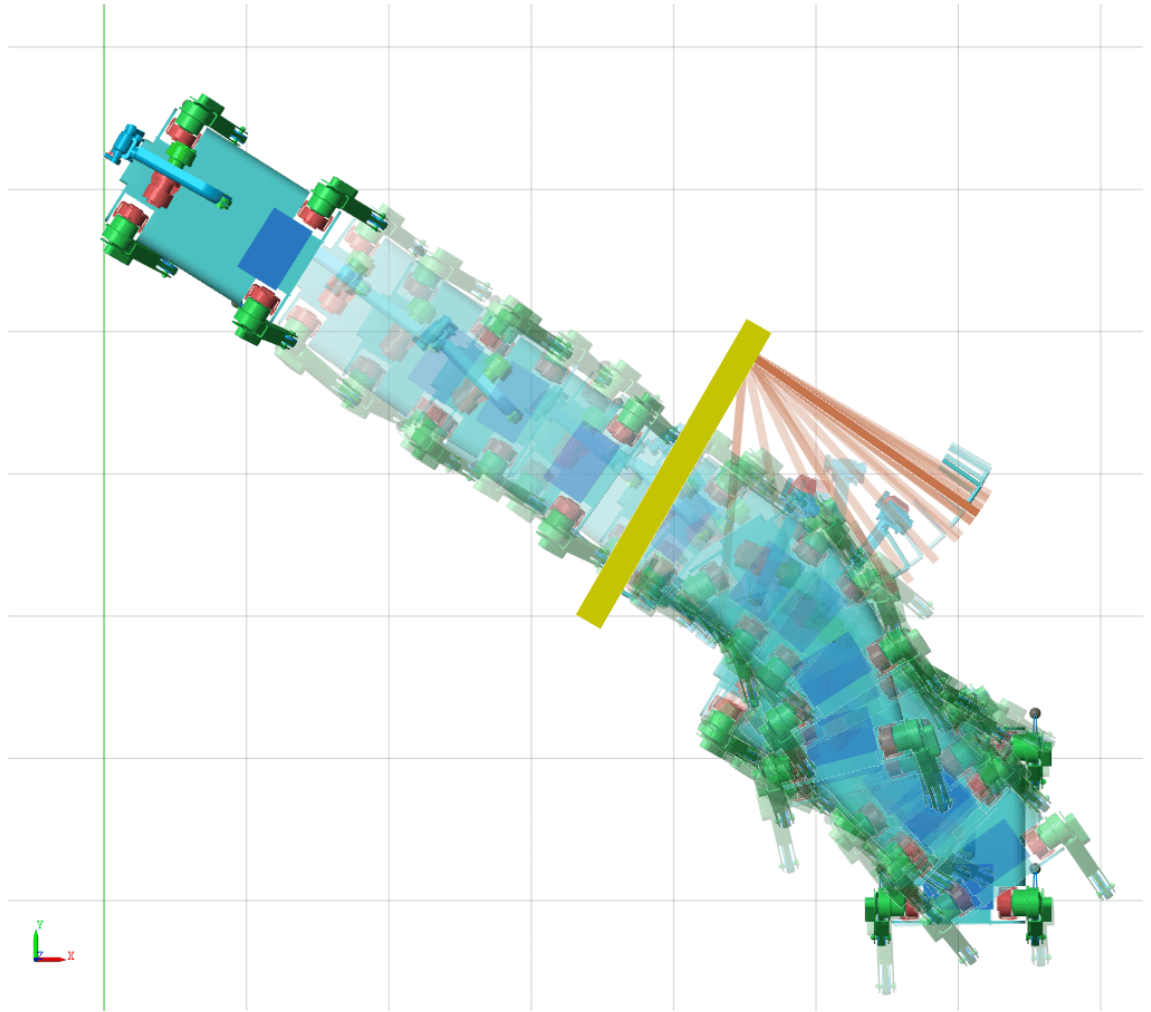
Şekil 5.127. TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki zamana bağlı tutucu kol 1,2 ve 3 mafsallarına ait açısal güç grafiği

TUKSDAR'ın nesne tutma ve taşıma senaryosu sırasındaki tutucu kolunu 1 – 3 mafsallarında gerçekleşen güç -0.1 Nm ile 0 Nm aralığında, açısal hız -1 rad/s ile 0.5 rad/s aralığındadır. Güç sarfiyatı ise tutucu kolun 4. mafsalı hareket ettirilmediği için

açısal hızı hep 0 ve dolayısıyla güç tüketimi 0 olmaktadır. 5 ve 6. Mafsalların güç tüketimi 1 W olarak gerçekleştirildiği görülmüştür.

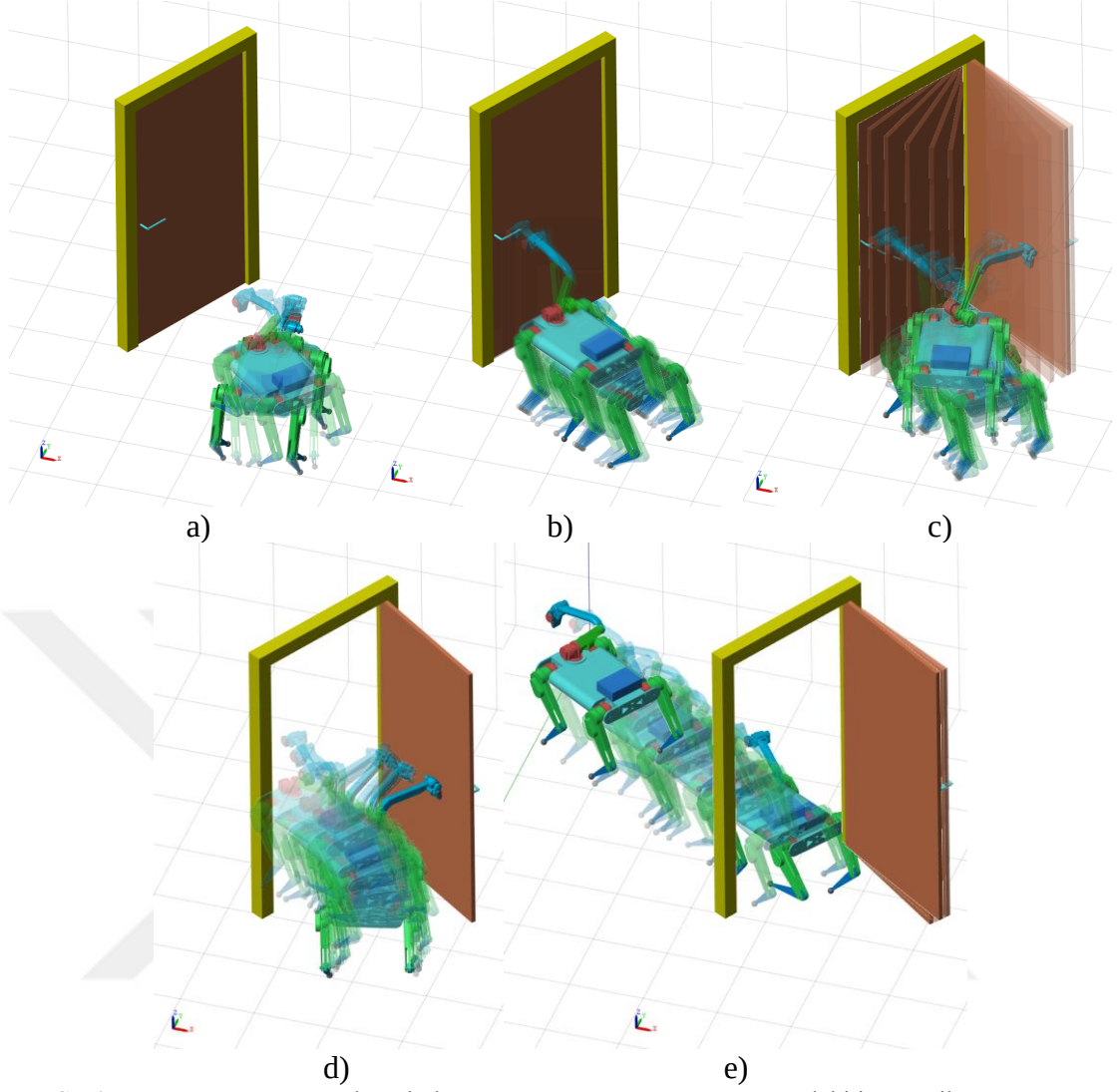
5.1.8. Kapı Kolu Tutma ve Açma Senaryosu

TUKSDAR'ın kapı kolu tutması ve kapıyı açması için 4.3.2 başlığındaki kapı kolu tutma ve açma senaryosu kullanılarak 66 saniye boyunca uygulanmıştır. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki üstten görünüşü Şekil 5.128'de gösterilmiştir. (Erdemir ve Kalyoncu 2023h)



Şekil 5.128. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki üstten görünüşü

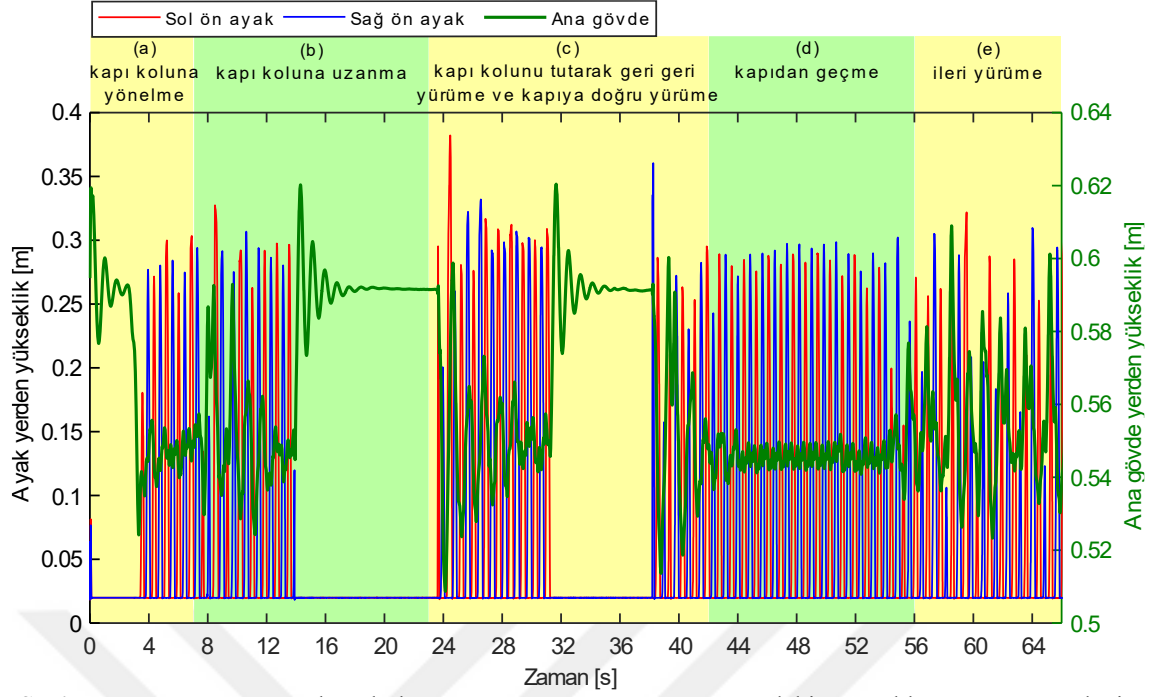
TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü Şekil 5.129'da gösterilmiştir. Bu senaryo 5 kısım halinde incelenmiştir.



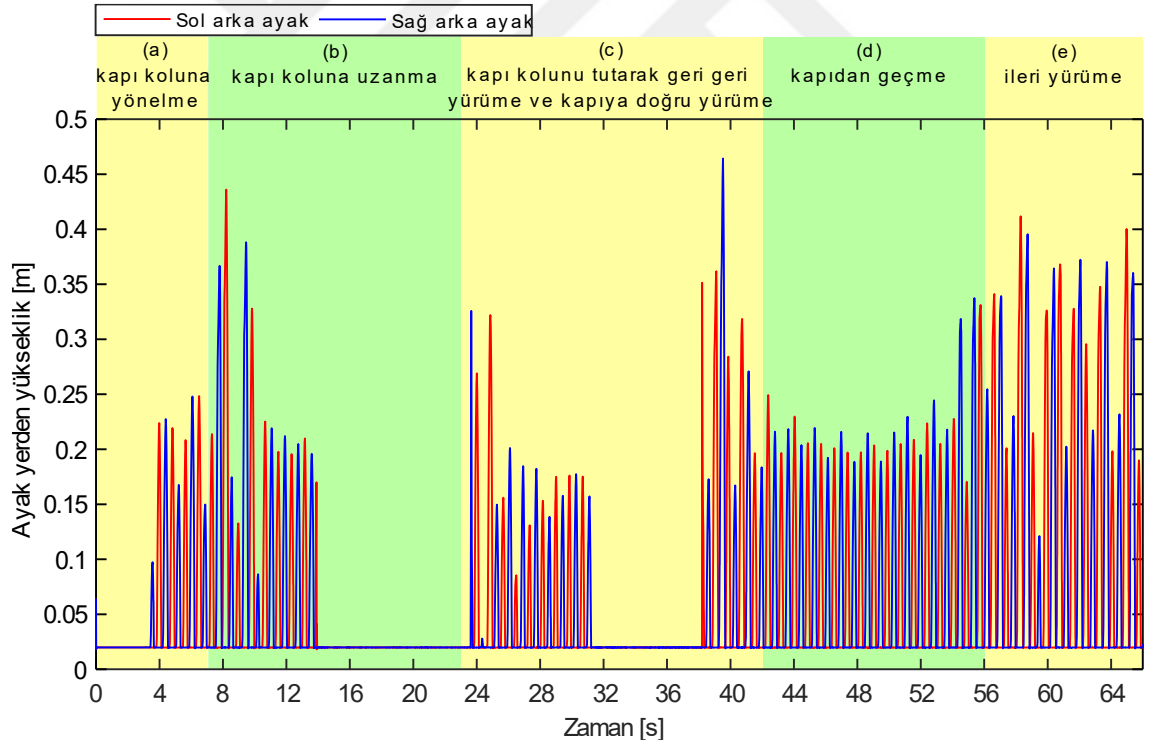
Şekil 5.129. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki izometrik görünüşü

Şekil 5.129'da görülen a) kısmında TUKSDAR, kapı koluna doğru yönelmek için 0 ile 7 saniye aralığında kendi etrafında dönüş yapmaktadır. b) kısmında 7 ile 23 saniye aralığında TUKSDAR, tutucu kolu ile kapı koluna uzanma hareketi yapmaktadır. c) kısmında 23 ile 42 saniye aralığında TUKSDAR, tutucu kolu ile kapı kolunu tutarak geri geri yürüme, tutucu kolu ile açılan kapıyı geri kapanmaması için destekleme ve kapıya doğru yürüme hareketi yapmaktadır. d) kısmında TUKSDAR tutucu kolu ile kapıyı desteklerken kapı çerçevesini ortalayıp geçmektedir. e) kısmında TUKSDAR kapıdan geçme işlemine devam ederek kapıdan uzaklaşma hareketi yapmaktadır.

Kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak TUKSDAR'ın ön ayaklarının ve ana gövdenin yerden yüksekliğinin değişimi Şekil 5.130'da ve arka ayakların yerden yüksekliğinin değişimi Şekil 5.131'de gösterilmiştir.



Şekil 5.130. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliği



Şekil 5.131. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki arka ayakların yerden yüksekliği

TUKSDAR'ın kapı kolunu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ön ayakların ve ana gövdenin yerden yüksekliğinin değişimleri 5 kısımda incelenmiştir.

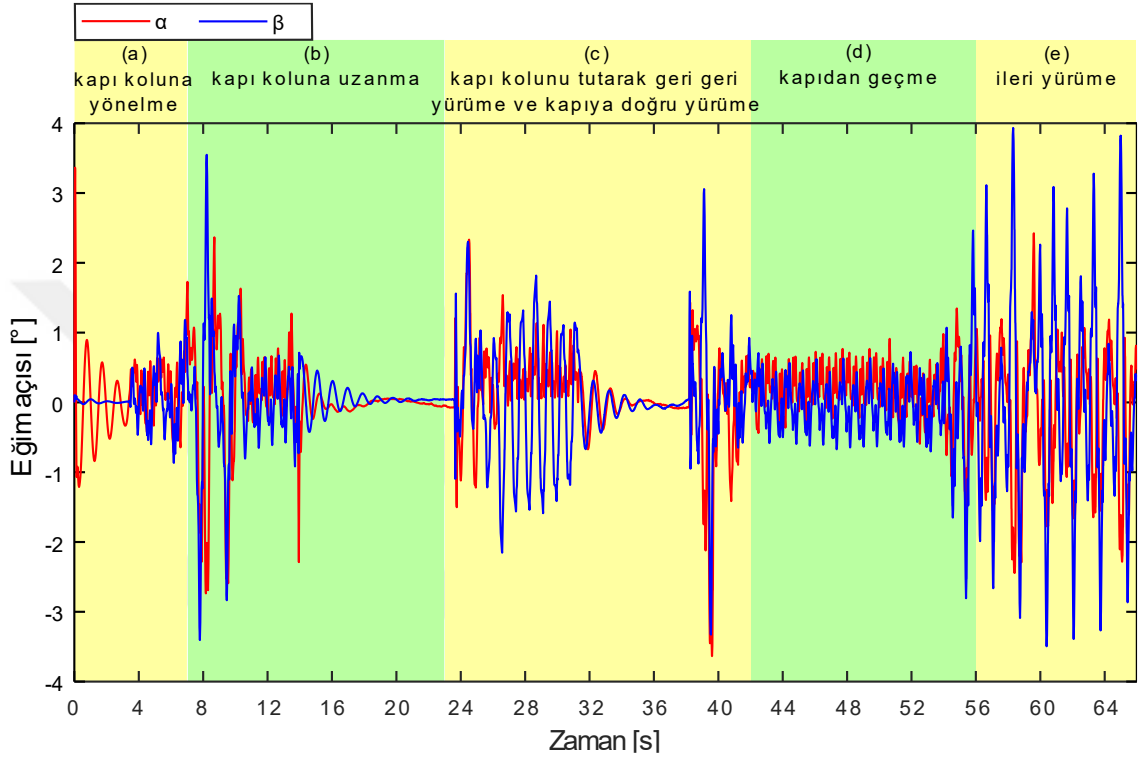
- a) 0 – 7 saniye aralığında kapı koluna yönelme: Bütün simülasyonlarda olduğu üzere, TUKSDAR 46 mm yükseklikten bırakılarak ilk 4 saniye boyunca

bekletilmektedir. 4.3.2 başlığındaki kapı kolu tutma ve açma senaryosunun 1. adımı uygulanmıştır. Bu sıradaki ana gövdenin yerden yüksekliği 0.62 m'den azalarak 0.55 m'de dengelenmiştir. Ön ayakların 0.3 m yüksekliğe ve arka ayakların 0.25 m yüksekliğe ulaştığı görülmüştür.

- b) 7 – 23 saniye aralığında kapı koluna uzanma: 4.3.2 başlığındaki kapı kolu tutma ve açma senaryosunun 2 – 11 adımları uygulanmıştır. TUKSDAR kapı koluna doğru yürürken ana gövdenin yerden yüksekliğinin 0.55 m olduğu görülmüştür. Bu sırada ön ayakların yerden yüksekliğinin 0.3 m ve arka ayakların yerden yüksekliğinin 0.4 m'den başlayıp 0.225 m'de dengelendiği görülmüştür.
- c) 23 – 42 saniye aralığında kapı kolunu tutarak geri geri yürüme ve kapıya doğru yürüme: 4.3.2 başlığındaki kapı kolu tutma ve açma senaryosunun 12 – 17 adımları uygulanmıştır. TUKSDAR tutucu kolu ile kapı kolunu tuttuktan sonra geri geri yürümektedir. TUKSDAR'ın kapı çerçevesine olan uzaklığı 1.95 m'ye ulaştığında geri geri yürüyüşünü durdurmaktadır. Bu sırada ana gövde yüksekliği 0.59 m'ye yükselmektedir. Tutucu kol kullanılarak kapı kolu radyal yörüngesinde sürüklenerek serbest bırakılmaktadır. Kapı ataleti ile açılmaya devam etmektedir. Kapı çerçevesi tam görününce TUKSDAR kapı çerçevesine doğru yürümeye başlamaktadır. Kapı çerçevesine yürürken ana gövdenin yerden yüksekliği 0.55 m olarak gerçekleşmiştir. Ön ayakların yerden yüksekliği ise 0.275 m olarak gerçekleşmiştir. Arka ayakların yerden yüksekliği ise 0.2 m ve geri geri yürüme sırasında ise 0.35 m'ye yükseldiği görülmüştür.
- d) 42 – 56 saniye aralığında kapıdan geçme: 4.3.2 başlığındaki kapı kolu tutma ve açma senaryosunun 18. adımı uygulanmıştır. Kapı çerçevesine olan mesafe 0.3 m'nin altına düşene kadar yürüme işlemi devam etmiştir. Bu sıradaki ana gövdenin yerden yüksekliği 0.55 m olarak gerçekleşmiştir. Ön ayakların yerden yüksekliği 0.3 m ve arka ayakların yerden yüksekliği 0.2 m olarak gerçekleşmiştir.
- e) 56 – 66 saniye aralığında kapıdan geçme: 4.3.2 başlığındaki kapı kolu tutma ve açma senaryosunun 19. adımı uygulanmıştır. Kapıdan uzaklaşmak için odanın içindeki yeni bir hedefe doğru yürüme hareketi uygulanmıştır. Bu sırada ana gövdenin yerden yüksekliği 0.55 m olarak gerçekleşmiştir. Ön

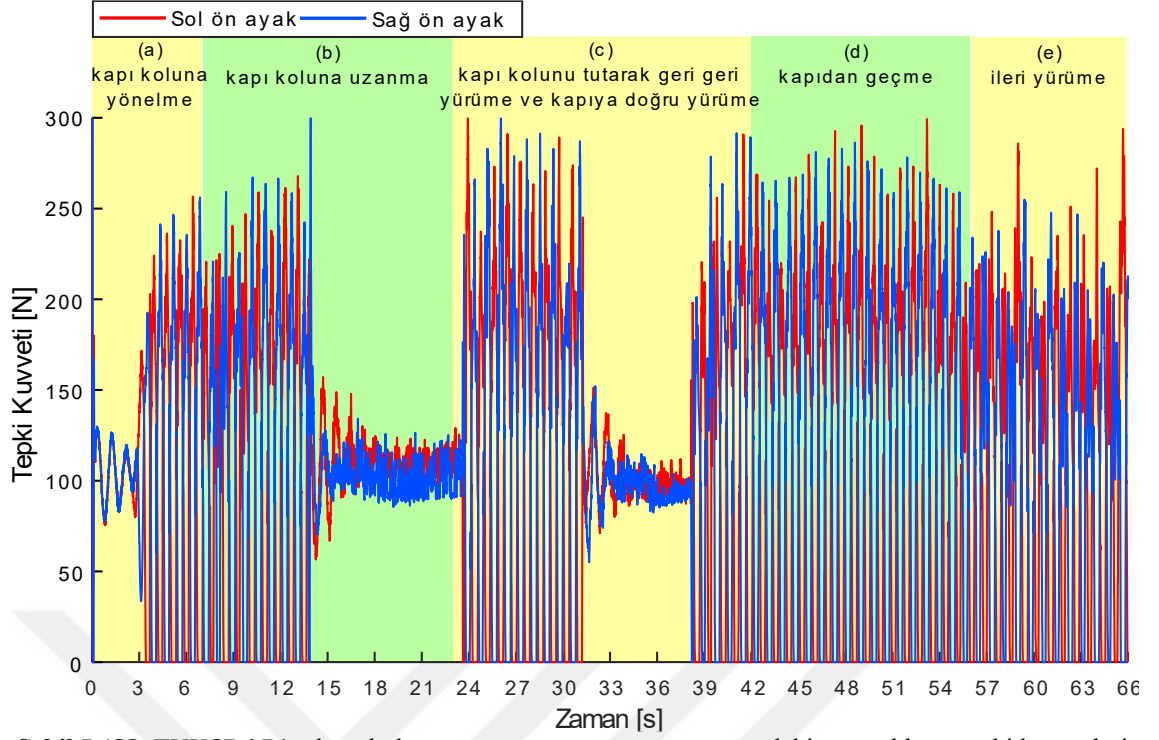
ayakların yerden yüksekliği 0.3 m ve arka ayakların yerden yüksekliği 0.35 m olarak gerçekleştirilmiştir.

Kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ana gövde eğim açıları α ve β 'nin zamana göre değişimi Şekil 5.132'de gösterilmiştir.

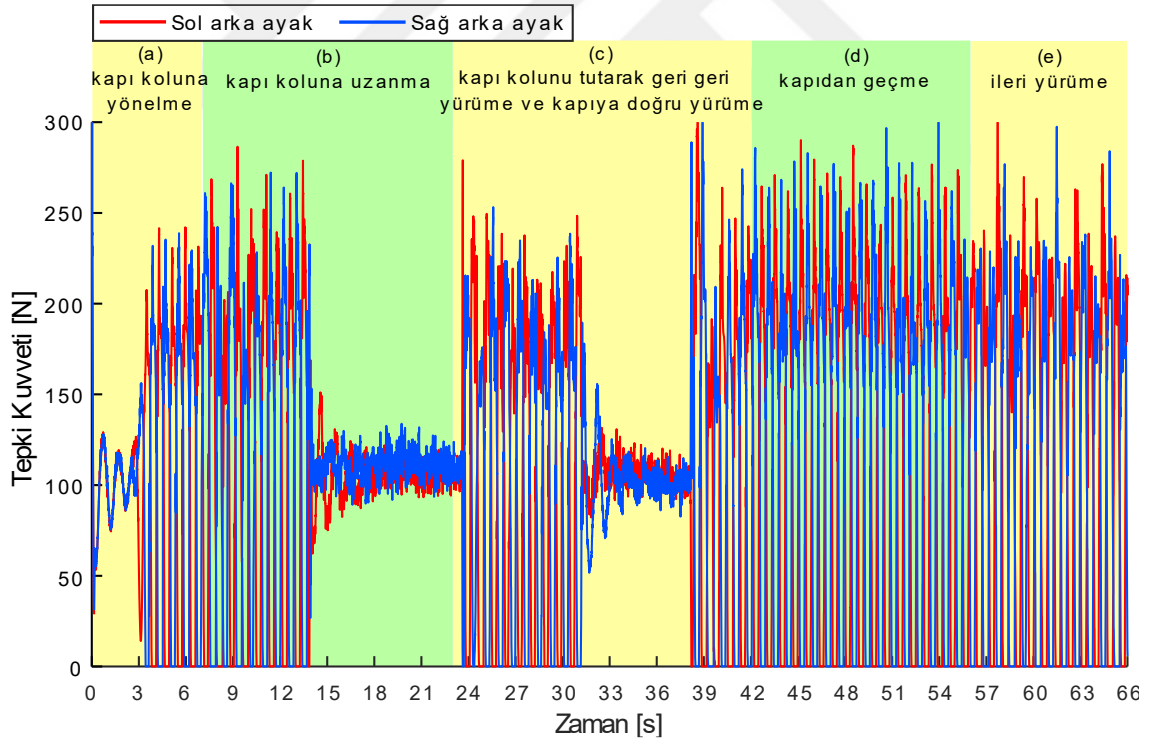


Şekil 5.132. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları

TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ana gövde eğimi α ve β açıları en fazla $\pm 4^\circ$ aralığında gerçekleşmektedir. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı olarak yer tarafından ön ayaklarda oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.133'te ve arka ayaklarda oluşan tepki kuvvetleri Şekil 5.134'te gösterilmiştir.

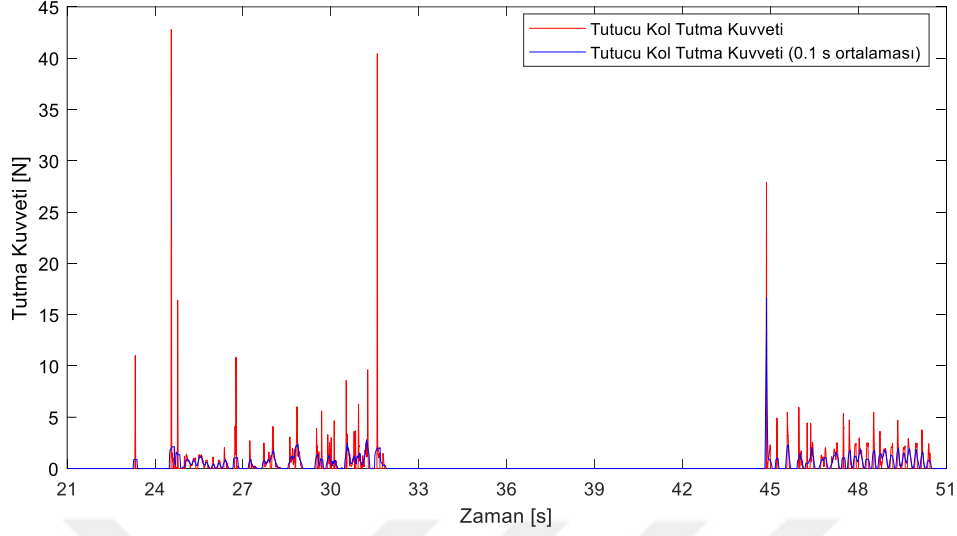


Şekil 5.133. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasında ön ayakların tepki kuvvetleri



Şekil 5.134. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasında arka ayakların tepki kuvvetleri

TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasında ayaklardaki tepki kuvvetleri yürüme sırasında 250 N olduğu ve duruyorken 125 N olduğu görülmüştür. Tutucu kolun uç noktasına etki eden dış kuvvetin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 5.135'te gösterilmiştir.

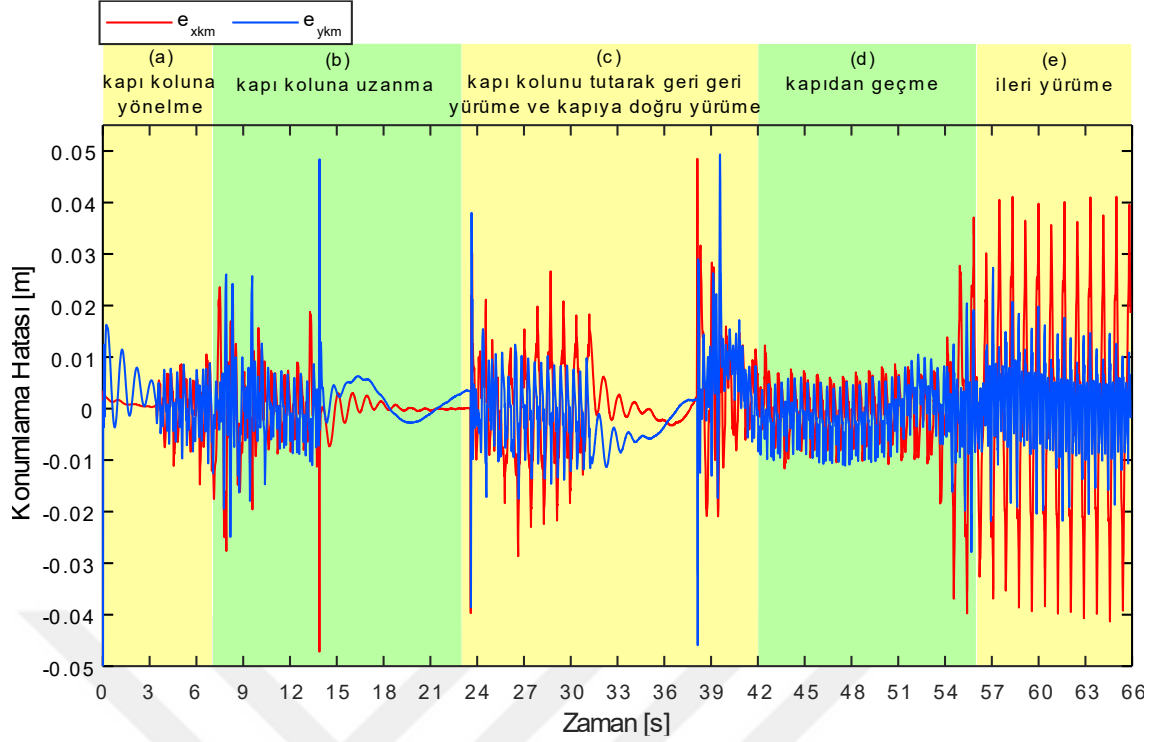


Şekil 5.135. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki tutucu kolun uç noktasına etki eden dış kuvvet grafiği

TUKSDAR'ın tutucu kolu simülasyonun 23.3 saniyesinde kapı koluna ilk temasını gerçekleştirmektedir. İlk temastaki kuvvet 10 N'a kadar bir pik olarak gerçekleşmiştir. Simülasyonun 31.8 saniyesine kadar TUKSDAR geri geri yürüme işlemini gerçekleştirirken tutucu kol ile kapı kolu arasındaki kuvvet 40 N'a kadar pik oluşturmuştur. 0.1 saniye ortalama filtresi ile tutucu kola uygulanan dış kuvvetin 3 N olarak gerçekleştiği görülmüştür.

TUKSDAR kapı çerçevesine doğru yürürken simülasyonun 44.8 saniyesinde tutucu kol ile kapı gövdesi arasındaki ilk temas gerçekleşmiştir. İlk temasta tutucu kol ile kapı arasındaki kuvvet 30 N'a varan bir pik olarak gerçekleşmiştir. 0.1 saniye ortalama filtresi ile tutucu kola uygulanan dış kuvvetin ilk temasta 17 N ve sonrasında 3 N olarak gerçekleştiği görülmüştür.

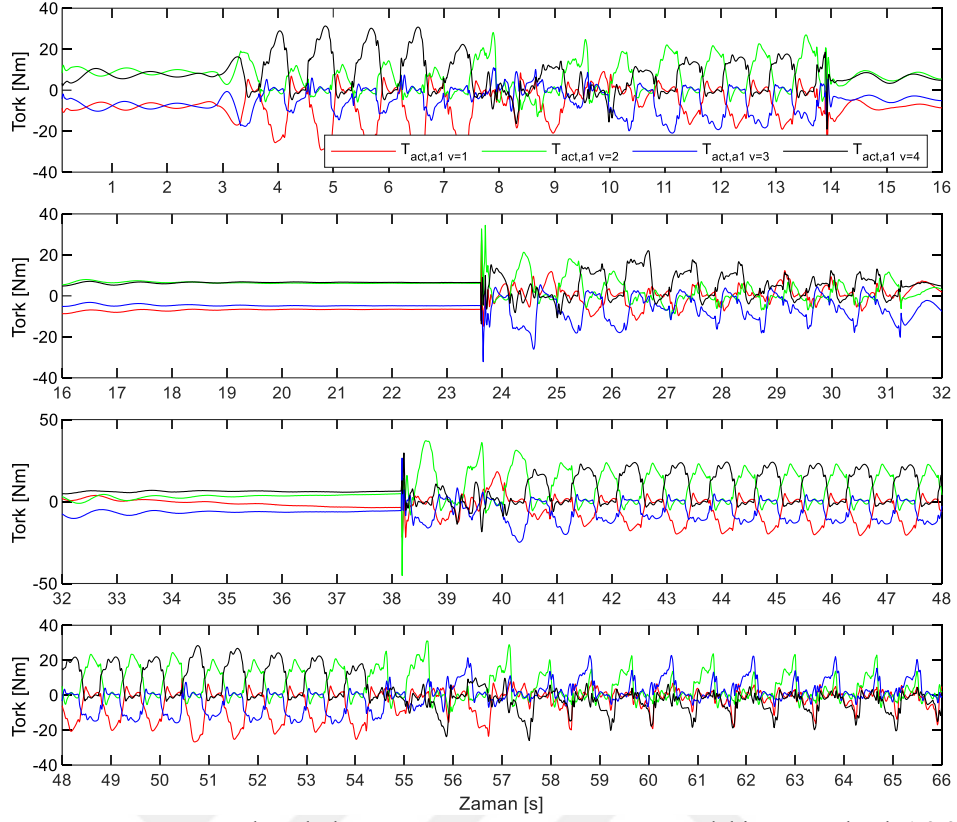
Şekil 4.4 ve Denklem 4.31 ve 4.32'de ifade edilen TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.136'da gösterilmiştir.



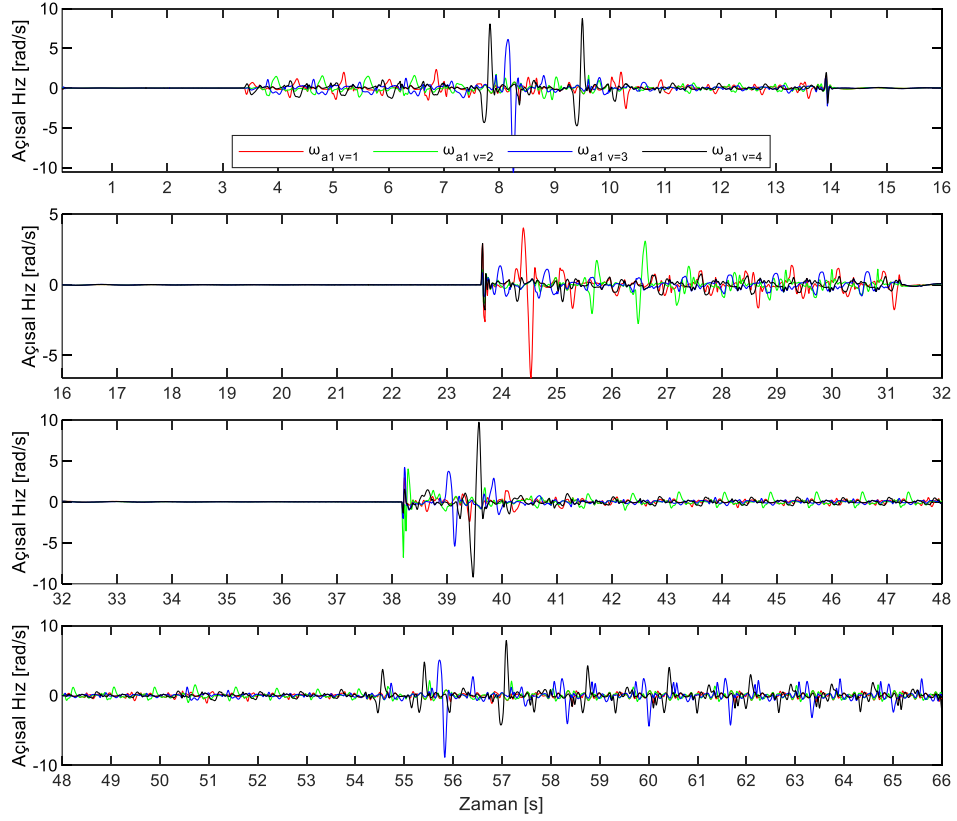
Şekil 5.136. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki e_{xkm} ve e_{ykm} konumlama hataları grafiği

TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki TUKSDAR duruyorken TUKSDAR'ın kütle merkezinin diyagonal ayak çiftlerinin kesişimi P_{kes} noktasına uzaklığı e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin ± 0.003 m aralığında olduğu görülmüştür. TUKSDAR yürüyorken e_{xkm} ve e_{ykm} ifadelerinin en fazla ± 0.04 m genliğe ulaştığı görülmüştür.

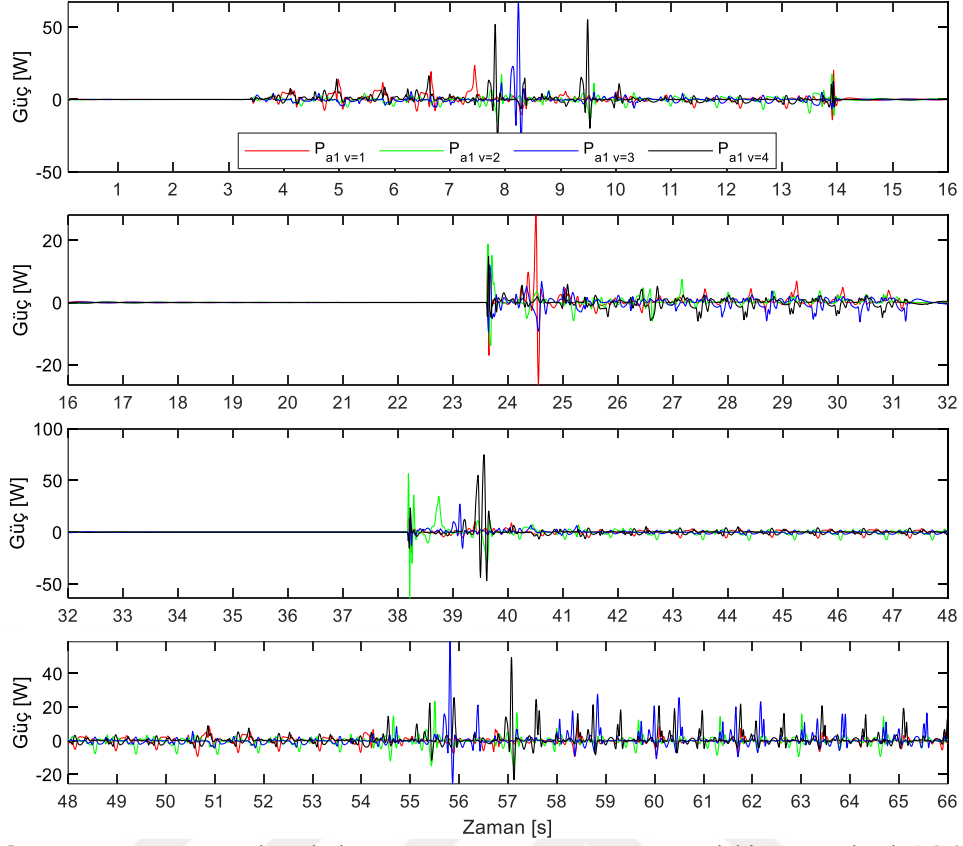
TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 1. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.137 – Şekil 5.139'da gösterilmiştir.



Şekil 5.137. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal tork grafiği

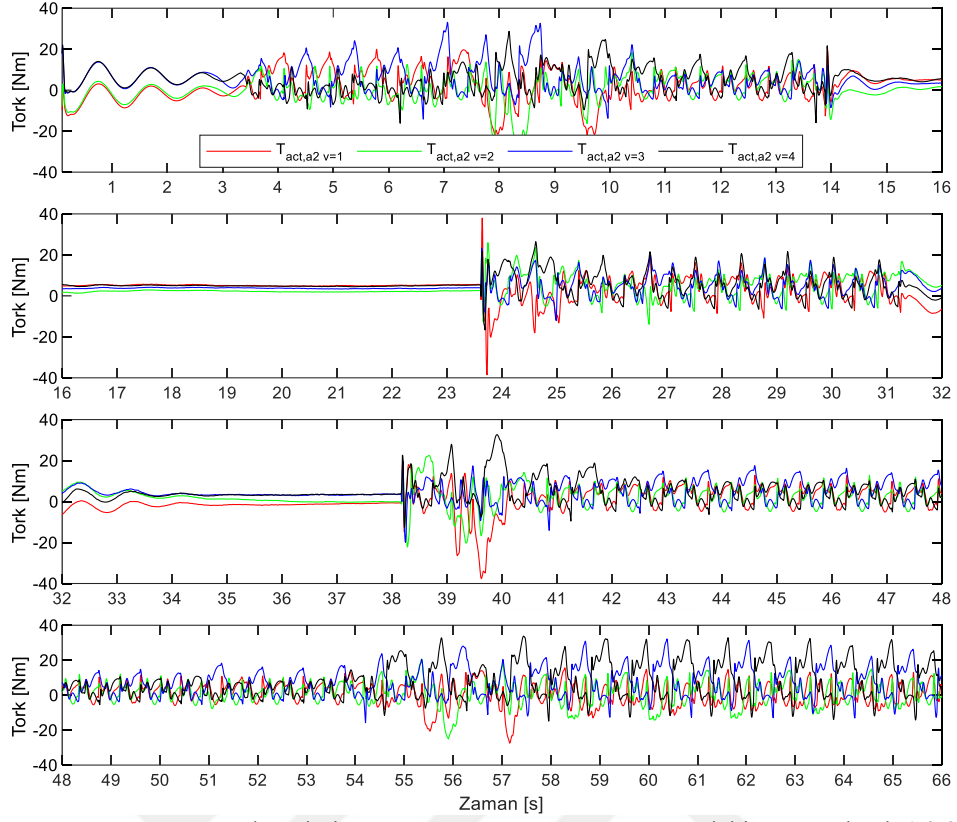


Şekil 5.138. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsal açısal hız grafiği

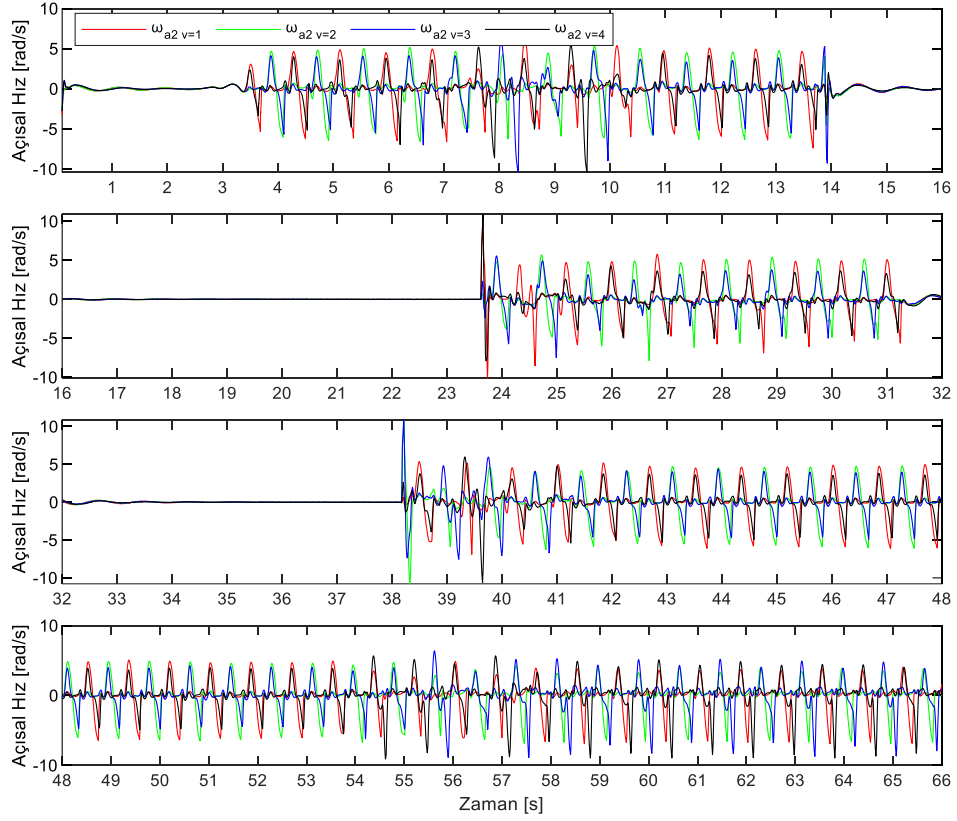


Şekil 5.139. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 1. mafsalsal güç grafiği

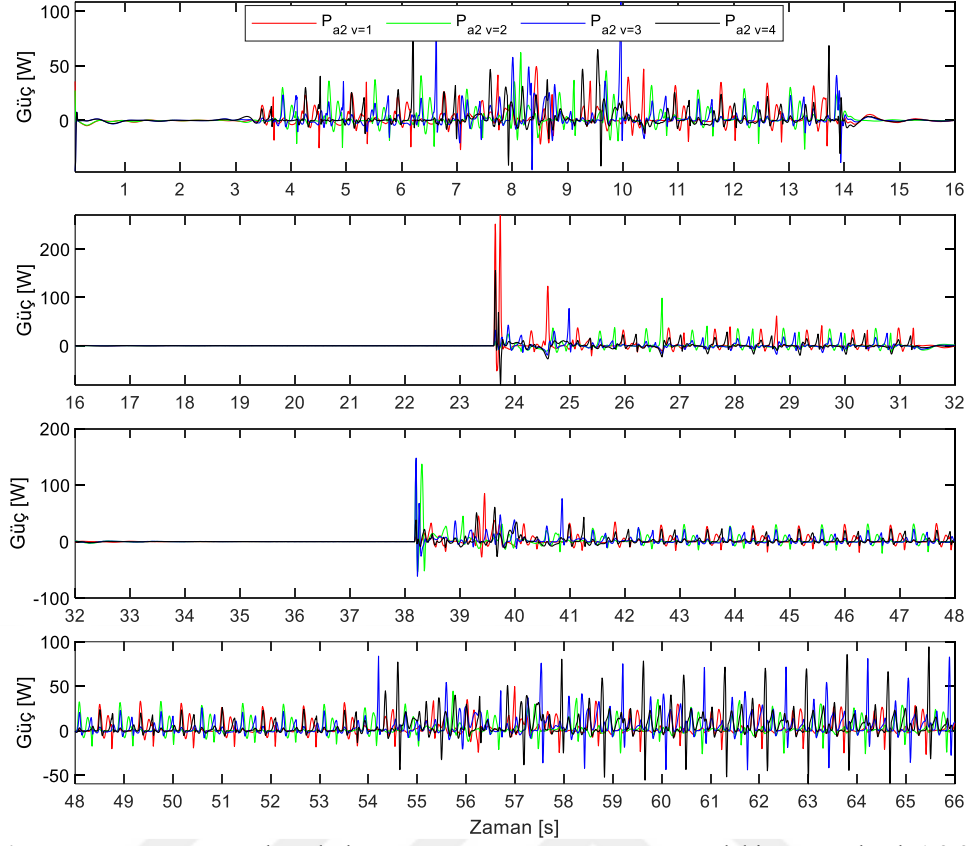
TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki 1. mafsalda gerçekleşen tork -50 Nm ile 45 Nm aralığında, açısal hız ± 10 rad/s aralığında ve güç sarfıyatı ise 85 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 2. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.140 – Şekil 5.142'de gösterilmiştir.



Şekil 5.140. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal tork grafiği

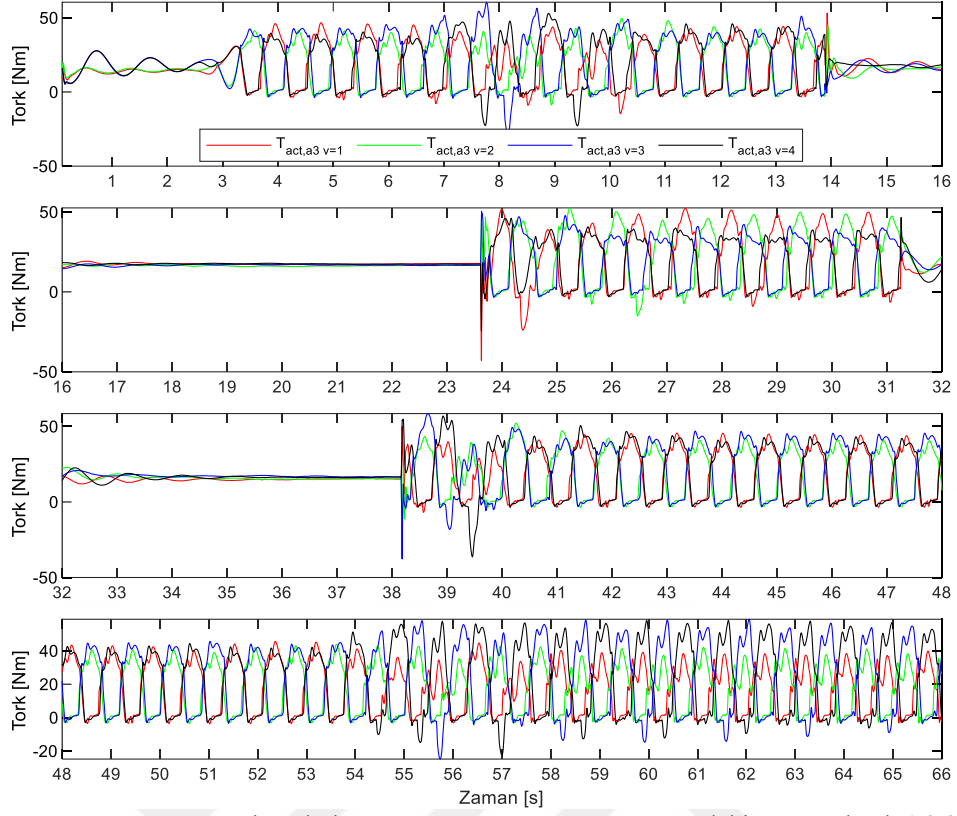


Şekil 5.141. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsalsal açısal hız grafiği

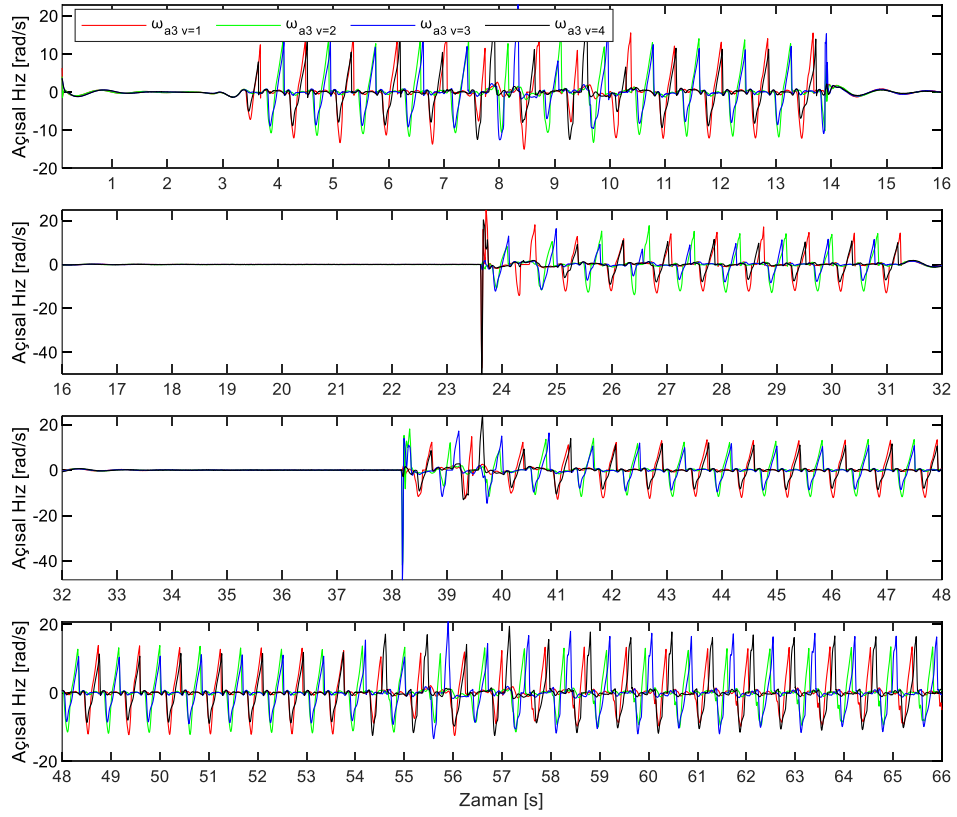


Şekil 5.142. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 2. mafsal güç grafiği

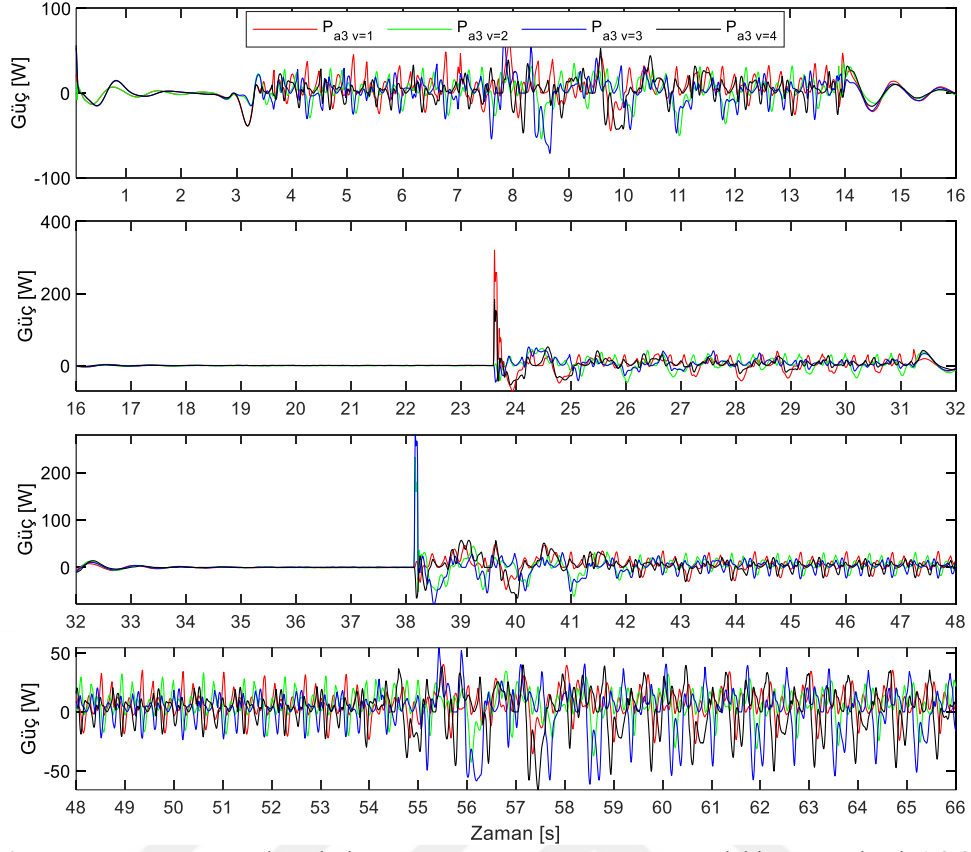
TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki 2. mafsalda gerçekleşen tork ± 40 Nm aralığında, açısal hız ± 10 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 250 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki TUKSDAR'ın ayaklarının 3. mafsalına ait tork, açısal hız ve güç grafikleri Şekil 5.143 – Şekil 5.145'te gösterilmiştir.



Şekil 5.143. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal tork grafiği



Şekil 5.144. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsalsal açısal hız grafiği



Şekil 5.145. TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki zamana bağlı 1,2,3 ve 4 numaralı ayaklarına ait 3. mafsal güç grafiği

TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki 3. mafsalda gerçekleşen tork ± 50 Nm aralığında, açısal hız -45 rad/s ile 22 rad/s aralığında ve güç sarfiyatı ise 300 W olarak gerçekleştiği görülmüştür. Kapı kolu tutma ve açma senaryosundaki toplam enerji sarfiyatının 3310.58 J olarak gerçekleştiği görülmüştür.

5.2. Sayısal Uygulamaların Değerlendirilmesi

TUKSDAR'ın toplamda 8 farklı simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyonlardan; yerinde say senaryosu, yürüme senaryosu, kendi etrafında dönüş senaryosu, TUKSDAR'ın viraj dönüşü, yan yürüme senaryosu, TUKSDAR'ın hedefe yürümesi olmak üzere 6 adedi sadece dört ayaklı robot kısmının yürümesi ile ilgilidir. Simülasyonlardan nesne tutma ve taşıma senaryosu olmak üzere 1 adedi sadece tutucu kolun nesne manipülasyonu ile ilgilidir. Simülasyonlardan kapı kolu tutma ve açma senaryosu olmak üzere 1 adedi ise TUKSDAR'ın hem yürümesi hem de nesne manipülasyonu ile ilgilidir. Çizelge 5.1'de simülasyonlar sırasındaki ayak yerden yükseklikleri ve ana gövde α ve β eğimleri verilmiştir.

Çizelge 5.1. TUKSDAR ayak yerden yükseklikleri ve $\alpha - \beta$ eğim açıları

Sayısal Uygulama	Ön ayakların yerden yüksekliği [m]	Arka ayakların yerden yüksekliği [m]	α [°] Min.	α [°] Maks.	β [°] Min.	β [°] Maks.
Yerinde Say Senaryosu	0.16	0.18	-0.7°	1°	-1°	1°
Yürüme Senaryosu	0.28	0.33	-2°	2°	-3°	3°
Kendi Etrafında Dönüş Senaryosu	0.35	0.35	-1.5°	3°	-4°	3°
TUKSDAR'ın Viraj Dönüşü	0.25	0.30	-1.5°	1°	-3°	2.5°
Yan Yürüme Senaryosu	0.30	0.30	-1.5°	3°	-2°	1.5°
TUKSDAR'ın Hedefe Yürümesi	0.25	0.30	-0.8°	3°	-2°	1°
Nesne Tutma ve Taşıma Senaryosu	0	0	-0.03°	0.03°	-0.06°	-0.01°
Kapı Kolu Tutma ve Açma Senaryosu	0.30	0.30	-4°	4°	-4°	4°

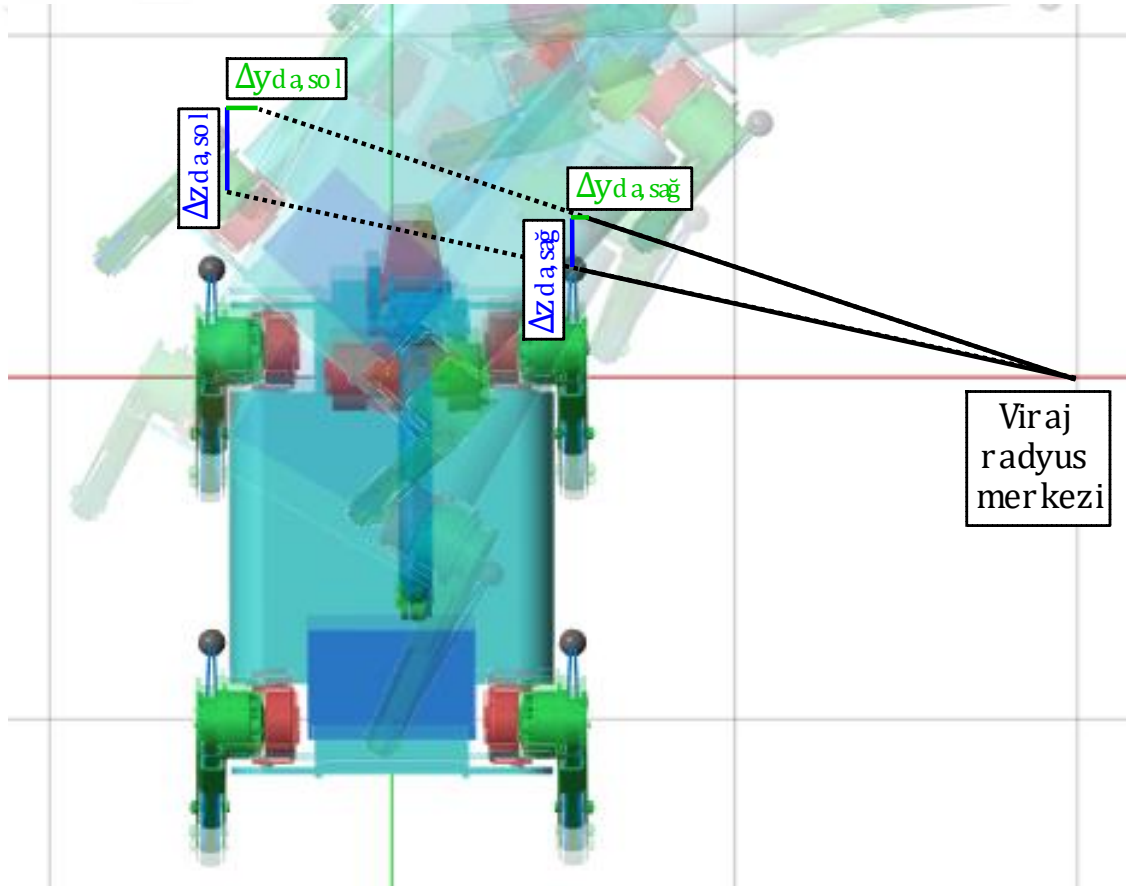
Yürüme senaryolarında TUKSDAR'ın ayaklarının yerden yüksekliğinin ortalamada 0.30 m'ye ulaştığı görülmüştür. TUKSDAR'ın ana gövde eğimlerinin incelediğimizde ise yürüme senaryosunda tutucu kol motorları tamamen kapalı olduğu için α eğim açısı $\pm 2^\circ$ ve β eğim açısı $\pm 3^\circ$ olarak gerçekleşmiştir. Fakat TUKSDAR'ın hedefe yürümesi sırasında tutucu kol motorları aktif ve empedans kontrolü uygulanmaktadır. Bu sayede yürüyüş sırasında ana gövdenin eğimlerinden dolayı tutucu kol salınımına uğramakta ve bunun sonucu olarak da α eğim açısı -0.8° a -3° aralığında ve β eğim açısı $-2^\circ - 1^\circ$ aralığında gerçekleşerek α ve β eğimlerinin düşük seviyede olmasına katkı sağladığı görülmüştür. Tutucu kolun yürüyüş sırasındaki salınımının etkisi, insanların yürürken ellerinin salınımına benzer şekilde ana gövde oryantasyonunun korunmasına katkı sağlamaktadır.

TUKSDAR'ın ana gövde eğiminin genliğinin en fazla olduğu senaryonun $\pm 4^\circ$ aralığında kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasında ve ikinci olarak da $-4^\circ - 3^\circ$ aralığında kendi etrafında dönüş senaryosu sırasında gerçekleştiği görülmüştür.

TUKSDAR'ın durduğu anlarda ayak tepki kuvvetleri her bir ayakta 100 – 125 N aralığında gerçekleşirken yürüdüğü anlarda bu kuvvetin 200 – 250 N aralığına yükseldiği görülmüştür.

TUKSDAR'ın ayaklarının 1. mafsalları her bir ayağın yana gitmesini sağlayan tek mafsaldır. Bu yüzden bu mafsaldaki tork ihtiyacı yerinde say senaryosu ve düz

yürüme senaryolarında 20 Nm'ye ulaşırken, kendi etrafında dönüş senaryosunda 45 Nm'ye ve TUKSDAR'ın viraj dönüşünde 40 Nm'ye ulaştığı görülmüştür. Ayrıca TUKSDAR'ın sağa doğru yaptığı viraj dönüşü sırasında sağ ayakların sol ayaklara göre daha fazla tork uyguladığı görülmüştür. Bu durumu, otomobillerdeki örneğe uyarladığımızda, bir otomobilin viraj dönüş merkezine uzaklığına orantılı olarak viraj tarafındaki tekerleri, virajın dışındaki tekerlere göre daha az tur döner. TUKSDAR'da da her bir ayağın yana açılma ve ileriye sürülme mesafesinin viraj dönüş merkezine olan uzaklığına orantılı olacak şekilde değiştirilmesi gerektiği görülmüştür. Yani bu sağa viraj dönüşü sırasında sol ayakların sağ ayaklara göre daha fazla yana açılması ve ileriye sürülmesi gerekmektedir. Bu durum Şekil 5.146'da gösterilmiştir.



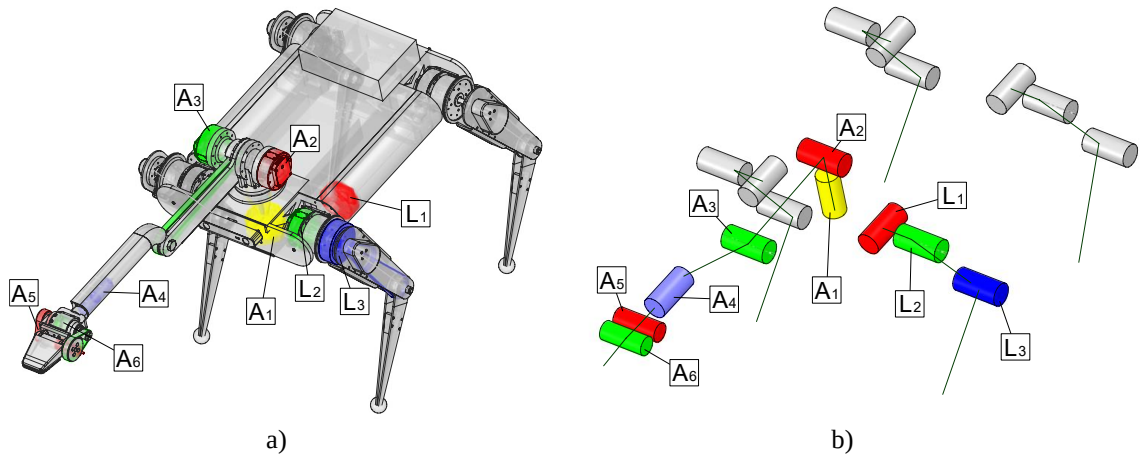
Şekil 5.146. TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasında olması gereken ayak sürme oranları

Ayak referans koordinat sistemine göre Denklem 4.10 – 4.13 aralığında verilen y_{da} ifadesi, TUKSDAR ayaklarının uç noktasının hedeflenen y konumu ayakların yana açılmasını sağlamakta ve z_{da} ifadesi, ayakların uç noktasının hedeflenen z konumu ayakların ileriye sürülmesini sağlamaktadır. Her bir ayağın yana ve ileriye sürülme

mesafesinin viraj dönüş merkezine olan uzaklıkla orantılı bir şekilde bir katsayı ile çarpılmasının gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

5.3. Motor Tork – Açısal Hız Kontrollerinin Yapılması

TUKSDAR'ın hareketlerini gerçekleştirebilmesi için motorların tork ve hız ihtiyaçlarını sağlayabilmesi gerekmektedir. 5.1.6 TUKSDAR'ın Hedefe Yürümesi başlığı, 5.1.7 Nesne Tutma ve Taşıma Senaryosu başlığı ve 5.1.8 Kapı Kolu Tutma ve Açma Senaryosu başlığındaki hareketler TUKSDAR'ın tüm hareket kabiliyetlerini kapsamaktadır. Bu hareketler sırasında gerçekleşen tork ve hız ihtiyaçları incelenmiştir. TUKSDAR'ın mafsal konumları ve bu mafsalları tahrik eden motorların konumları Şekil 5.147'de gösterilmiştir.



Şekil 5.147. TUKSDAR'ın a) motorlarının yerleşimi, b) mafsalların yerleşimi

Çizelge 5.2'de TUKSDAR'da kullanılan motorlar ve redüktör çevrim oranları verilmiştir.

Çizelge 5.2. TUKSDAR’a ait motor ve redüktör tablosu

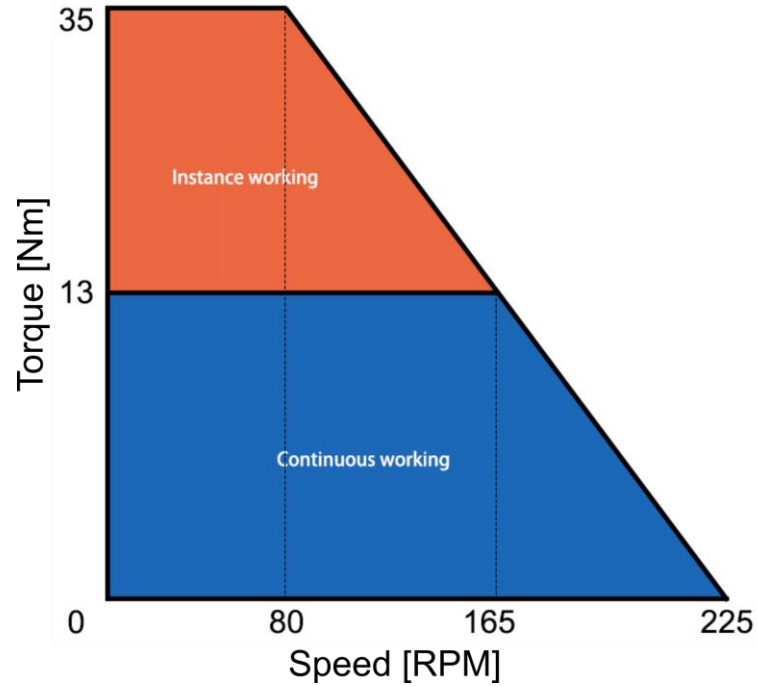
No	Tahrik Edilen Gövde	Motor	Redüktör Çevrim Oranı
L ₁	Ayak 1. Gövde	RMD X8 Pro	1.85
L ₂	Ayak 2. Gövde	RMD X8 Pro	1
L ₃	Ayak 3. Gövde	R100 KV90 R	6.144
A _{t1}	Tutucu Kol 1. Gövde	RMD X8 Pro	0.8
A _{t2}	Tutucu Kol 2. Gövde	RMD X8 Pro	1
A _{t3}	Tutucu Kol 3. Gövde	RMD X8 Pro	0.888
A _{t4}	Tutucu Kol 4. Gövde	Maxon EC-i 30	51
A _{t5}	Tutucu Kol 5. Gövde	Maxon EC-i 30	1
A _{t6}	Tutucu Kol 6. Gövde	RMD-L-5005-35T	1

Çizelge 5.3’te motorların teknik detayları EK-7’de verilmiştir. TUKSDAR’daki motorların çeşidine göre kullanıldıkları sayıları verilmiştir.

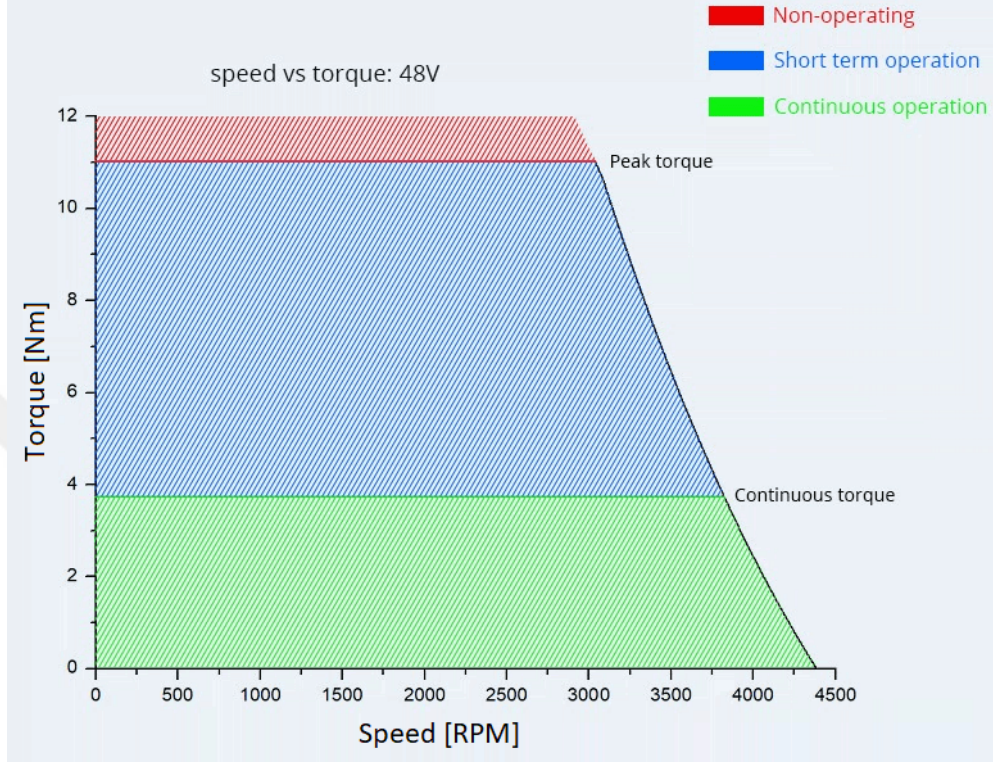
Çizelge 5.3. TUKSDAR’a motor miktar tablosu

Motor	Miktar
RMD X8 Pro	11
R100 KV90 R	4
Maxon EC-i 30	2
RMD-L-5005-35T	1

L₁, L₂, A_{t1}, A_{t2} ve A_{t3} mafsallarında kullanılan RMD X8 Pro motorunun sağlayabildiği hız – tork grafiği Şekil 5.148’de gösterilmiştir.

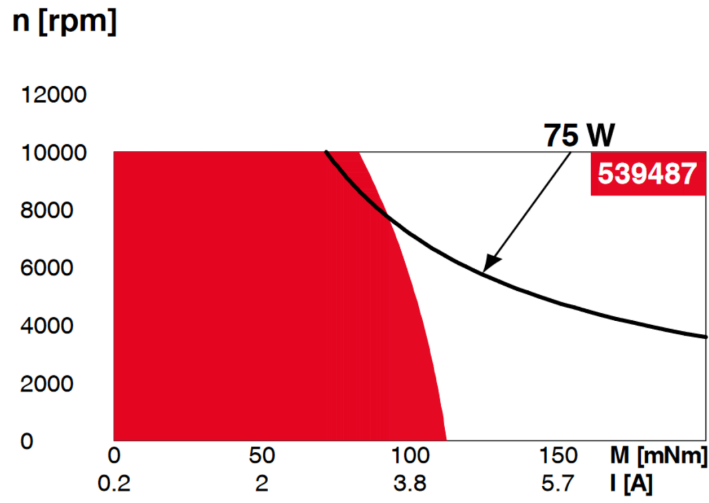
**Şekil 5.148.** RMD X8 Pro hız – tork grafiği

L₃ mafsalında kullanılan R100 KV90 R motorunun sağlayabildiği hız – tork grafiği Şekil 5.149’da gösterilmiştir.



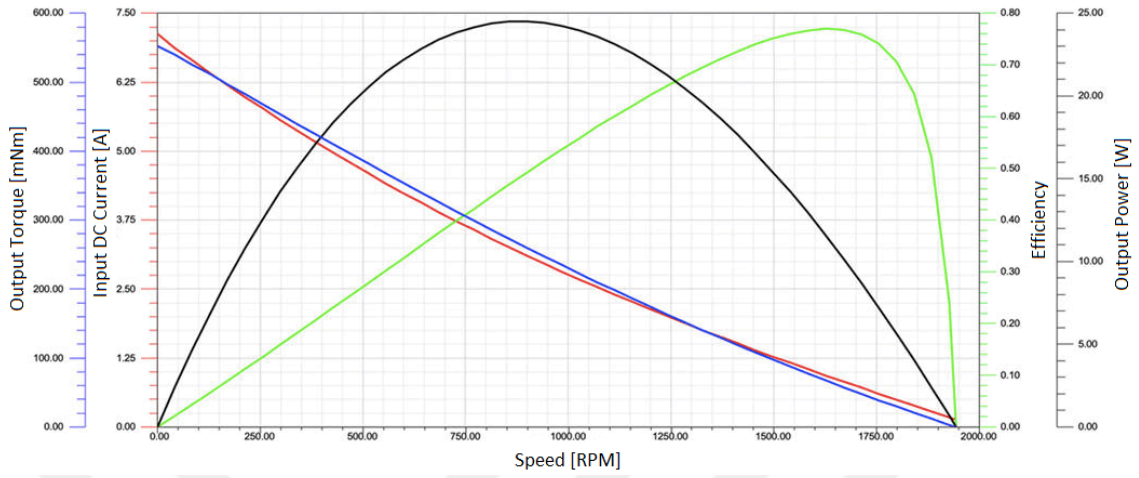
Şekil 5.149. R100 KV90 R hız – tork grafiği

A_{t4} ve A_{t5} mafsallarında kullanılan Maxon EC-i 30 motorunun sağlayabildiği tork – hız grafiği Şekil 5.150’de gösterilmiştir.



Şekil 5.150. Maxon EC-i 30 tork – hız grafiği

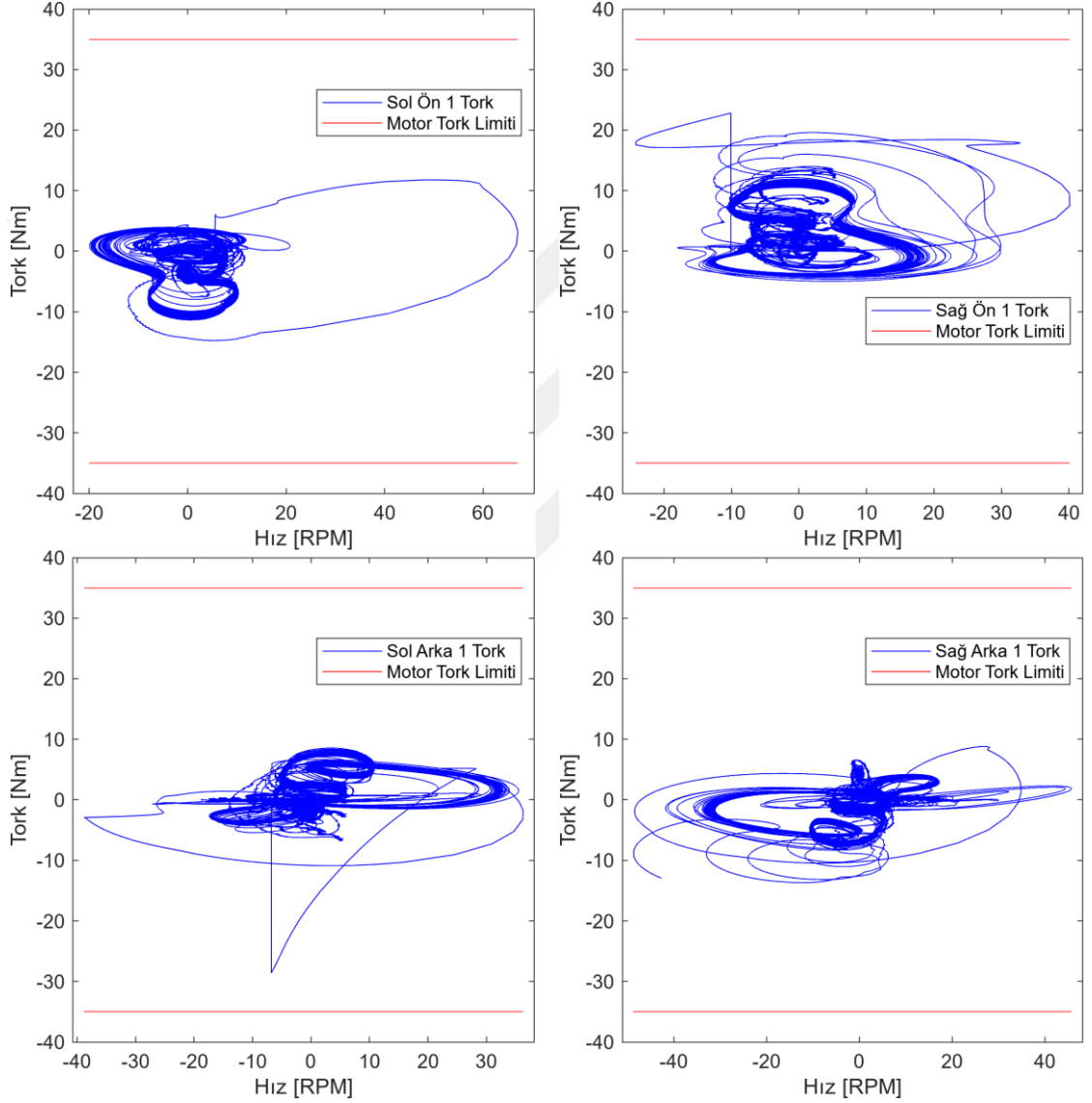
A_{t6} mafsalında kullanılan RMD-L-5005-35T motorunun sağlayabildiği hız – tork grafiği Şekil 5.151’de gösterilmiştir.



Şekil 5.151. RMD-L-5005-35T hız – tork grafiği

5.3.1. Yürüme, Nesne Tutma ve Taşıma Sırasındaki Tork ve Hız Kontrolü

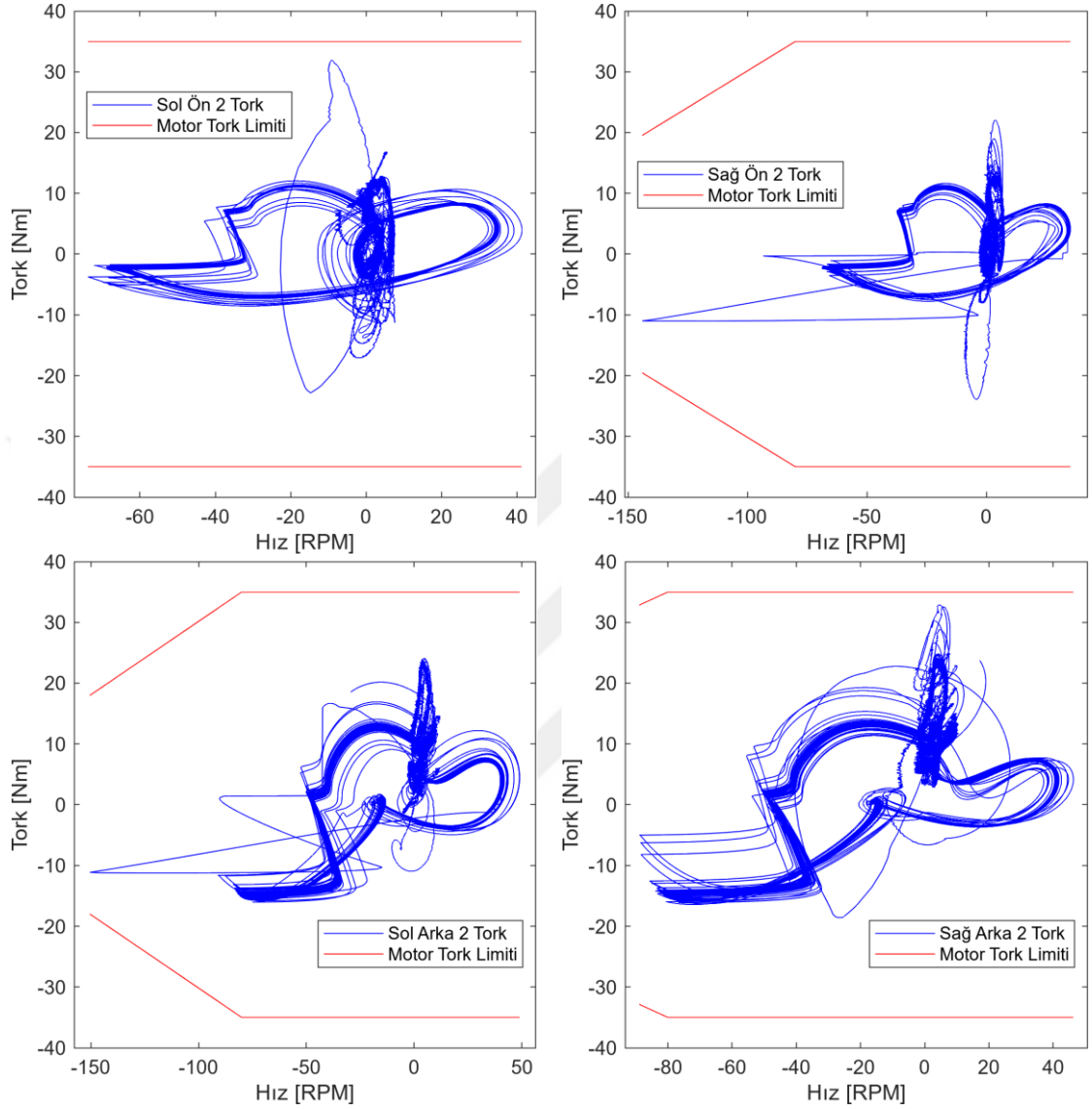
5.1.6 TUKSDAR'ın Hedefe Yürümesi başlığı ve 5.1.7 Nesne Tutma ve Taşıma Senaryosu başlığındaki hareketlerin sonucunda gerçekleşen bütün ayak gruplarındaki L_1 mafsalını tahrik eden 1. gövde motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.152'de gösterilmiştir.



Şekil 5.152. TUKSDAR'ın ayaklarının L_1 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

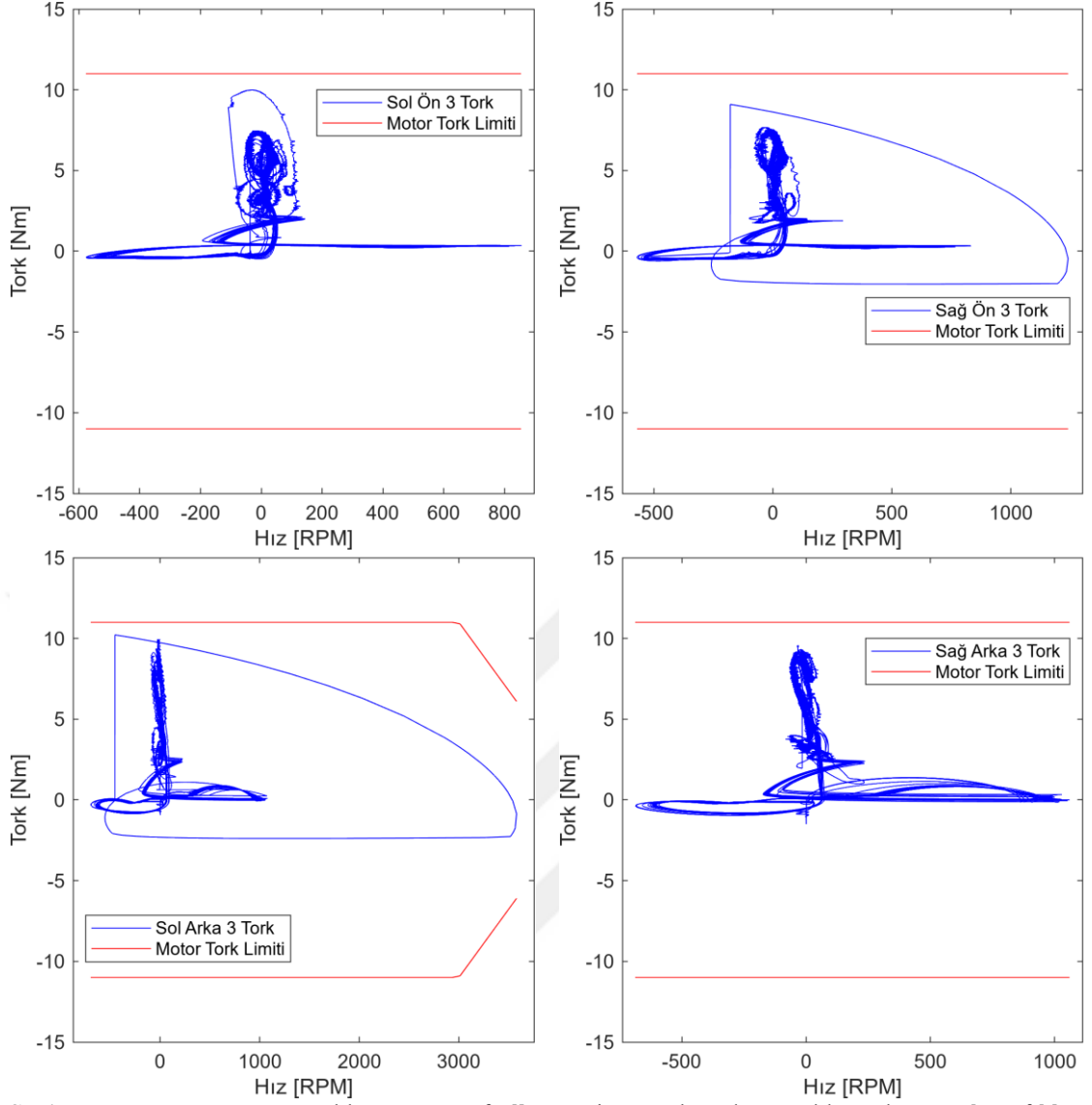
TUKSDAR'ın yürüme, nesne tutma ve taşıma senaryoları sırasındaki ön ve arka ayaklarının L_1 mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir. Özellikle yürüme senaryosundan dolayı ayaklardaki tekrar eden hareketlerden kaynaklı olarak bazı hız – tork çizgilerinin birbirine çok yakın geçtiği

görülmektedir. Bütün ayak gruplarındaki L_2 mafsallarını tahrik eden 2. gövde motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.153'te gösterilmiştir.



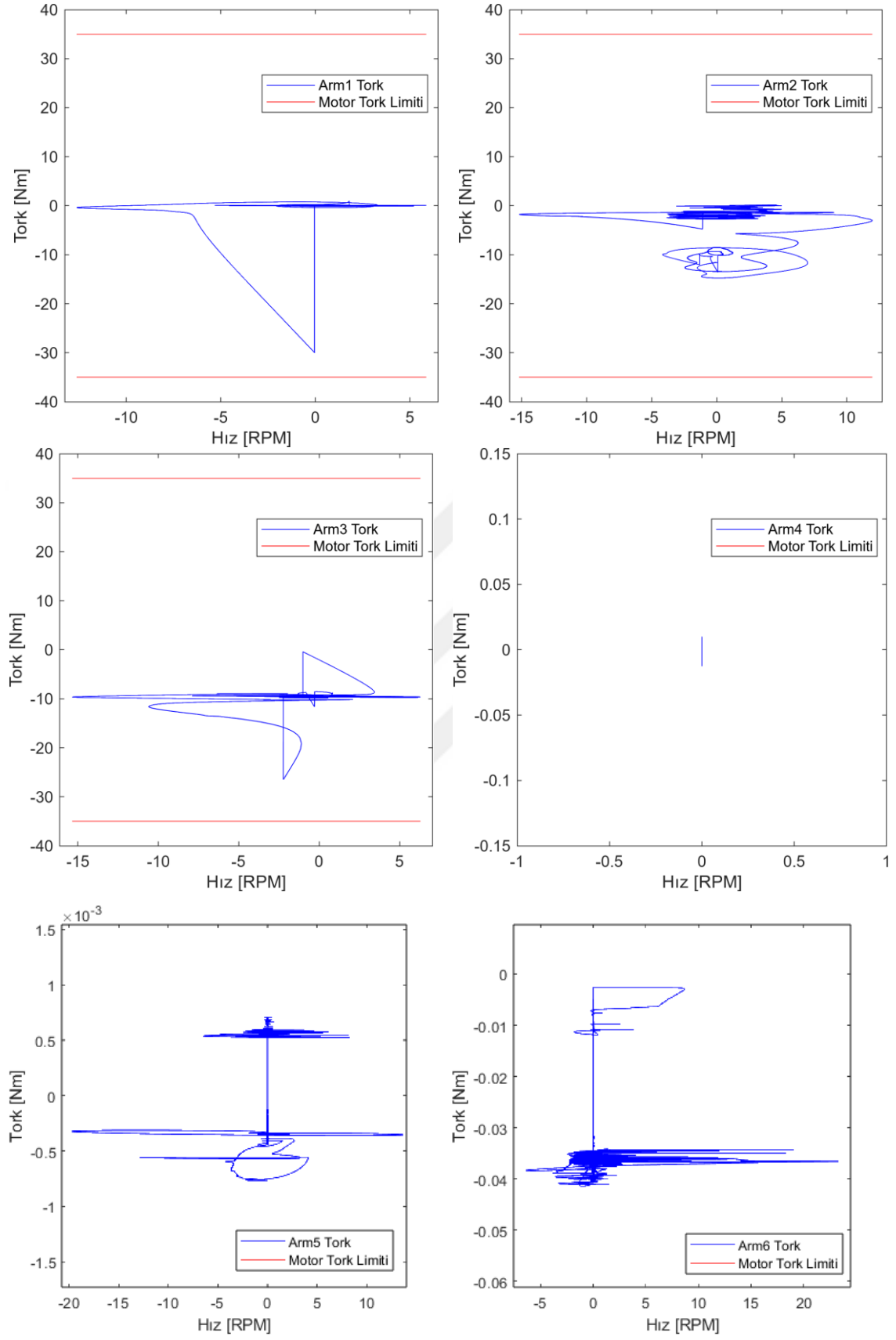
Şekil 5.153. TUKSDAR'ın ayaklarının L_2 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

TUKSDAR'ın yürüme, nesne tutma ve taşıma senaryoları sırasındaki ön ve arka ayaklarının L_2 mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir. L_1 mafsallarındakine benzer şekilde yürüme senaryosundan dolayı ayaklardaki tekrar eden hareketlerden kaynaklı olarak hız – tork çizgilerinin birbirine çok yakın geçtiği görülmektedir. Bütün ayak gruplarındaki L_3 mafsallarını tahrik eden 3. gövde motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.154'te gösterilmiştir.



Şekil 5.154. TUKSDAR'ın ayaklarının L_3 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

TUKSDAR'ın yürüme, nesne tutma ve taşıma senaryoları sırasındaki ön ve arka ayaklarının L_3 mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir. L_1 ve L_2 mafsallarındakine benzer şekilde yürüme senaryosundan dolayı ayaklardaki tekrar eden hareketlerden kaynaklı olarak hız – tork çizgilerinin birbirine çok yakın geçtiği görülmektedir. Tutucu kolun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarını tahrik eden motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.155'te gösterilmiştir.



Şekil 5.155. TUKSDAR'ın tutucu kolunun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

TUKSDAR'ın yürüme, nesne tutma ve taşıma senaryoları sırasındaki tutucu kolunun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir.

A_{t1} mafsalı kule dönüşü hareketlerini yaptığı için ana gövde α ve β eğim açıları da 0° hedeflenerek kontrol edildiği için bu mafsal yerçekiminden çok az etkilenmektedir. A_{t1} mafsalındaki çevrim oranı 0.8'dir. A_{t1} mafsalının tork ihtiyacı da -30 Nm aşağı pik olarak ve ortalamada ± 1 Nm aralığında ve -13 RPM ile 6 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD X8 Pro motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t2} mafsalı, tutucu kolun yukarı aşağı hareketlerinde en fazla momente maruz kalan mafsalıdır. A_{t2} mafsalındaki çevrim oranı 1'dir. A_{t2} mafsalına ait motor, ortalamada -15 Nm ile 1 Nm aralığında ve -15.2 RPM ile 12 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD X8 Pro motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t3} mafsalı, tutucu kolun yukarı aşağı hareketlerinde A_{t2} mafsalından sonra ikinci en fazla momente maruz kalan mafsalıdır. A_{t3} mafsalındaki çevrim oranı 0.888'dir. A_{t3} mafsalına ait motor -26 Nm ile 1 Nm aralığında ve -16 RPM ile 7 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD X8 Pro motorunun limitleri içerisindedir.

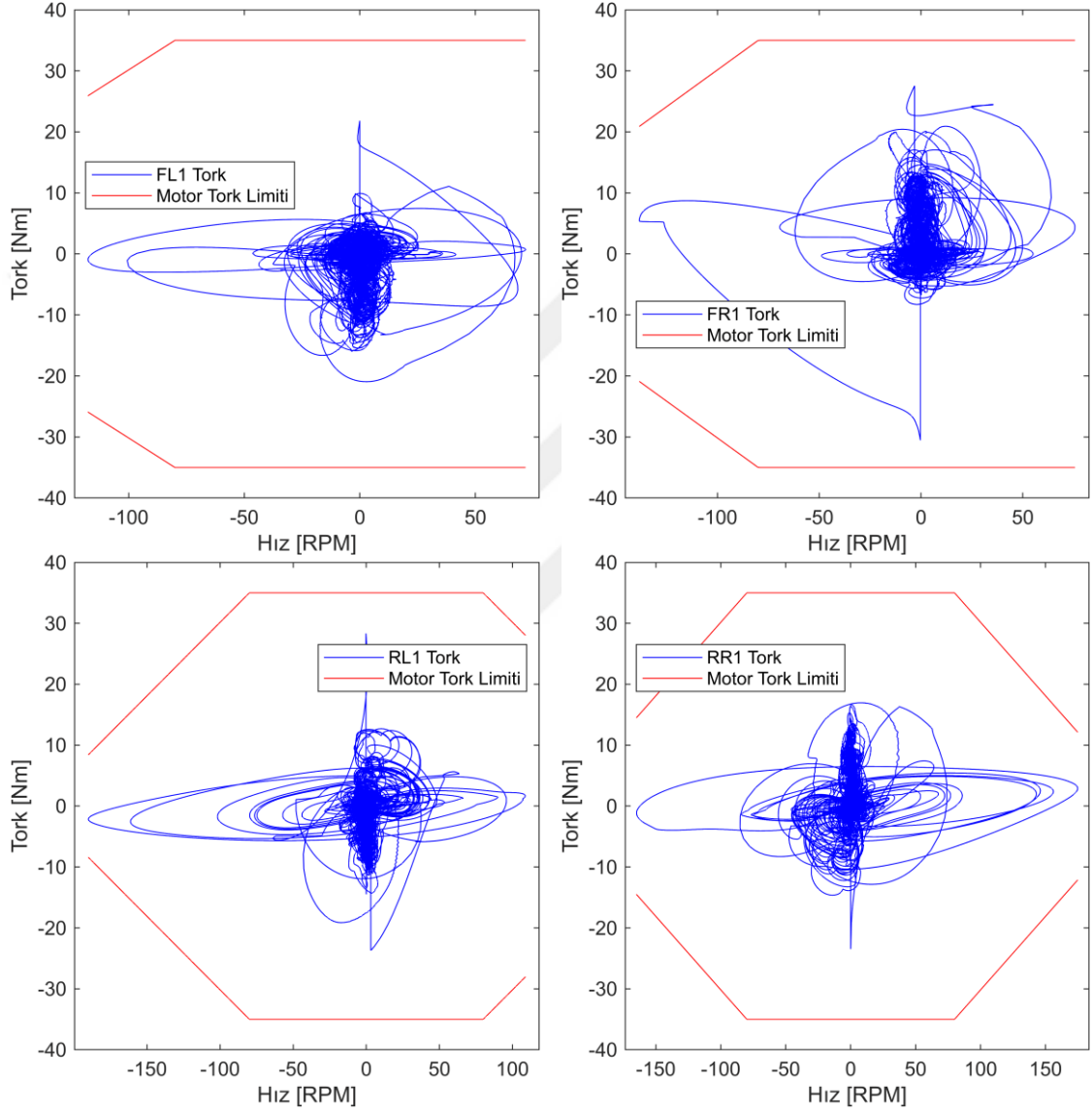
A_{t4} mafsalı, tutucu kolun uç noktasının roll hareketini gerçekleştirmek için tasarlanmış mafsalıdır. A_{t4} mafsalındaki çevrim oranı 51'dir. A_{t4} mafsalı test senaryolarda konumu 0° 'de sabit tutulmuştur. A_{t4} mafsalına ait motor -0.06 Nm ile 0.05 Nm momente maruz kalmaktadır. Bu sınırlar Maxon EC-i 30 motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t5} mafsalı, tutucu kolun uç noktasının yaw hareketini gerçekleştiren mafsalıdır. A_{t5} mafsalındaki çevrim oranı 1'dir. A_{t5} mafsalına ait motor ± 0.001 Nm aralığında ve -20 RPM ile 14 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar Maxon EC-i 30 motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t6} mafsalı, tutucu kolun uç noktasının tutma hareketini gerçekleştiren mafsalıdır. A_{t6} mafsalındaki çevrim oranı 1'dir. A_{t6} mafsalına ait motor -0.05 Nm ile -0.001 Nm aralığında ve -7 RPM ile 24 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD-L-5005-35T motorunun limitleri içerisindedir.

5.3.2. Kapı Kolu Tutma ve Açma Sırasındaki Tork ve Hız Kontrolü

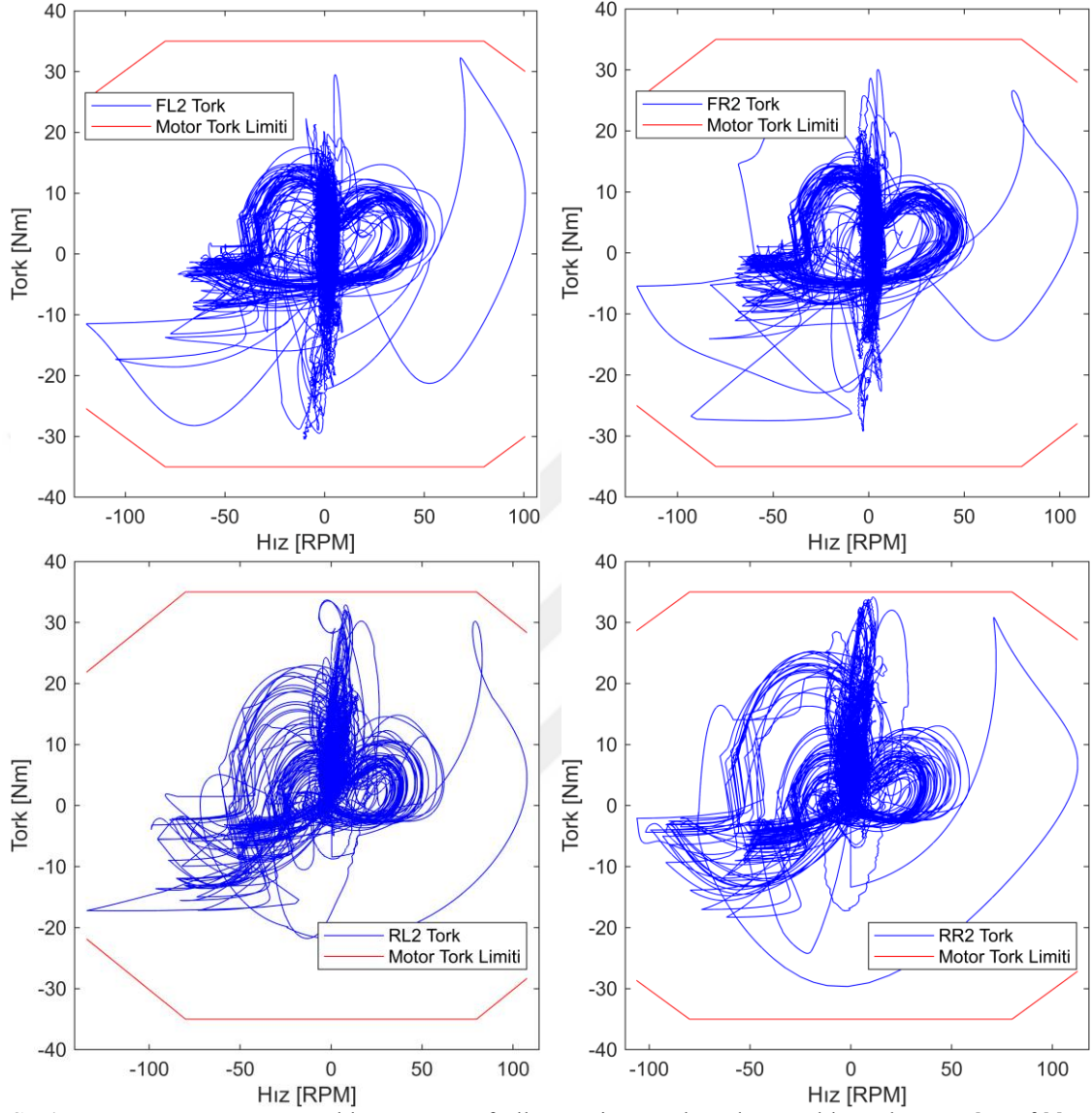
5.1.8 Kapı Kolu Tutma ve Açma Senaryosu başlığındaki hareketlerin sonucunda gerçekleşen bütün ayak gruplarındaki L_1 mafsalını tahrik eden 1. gövde motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.156’da gösterilmiştir.



Şekil 5.156. TUKSDAR’ın ayaklarının L_1 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

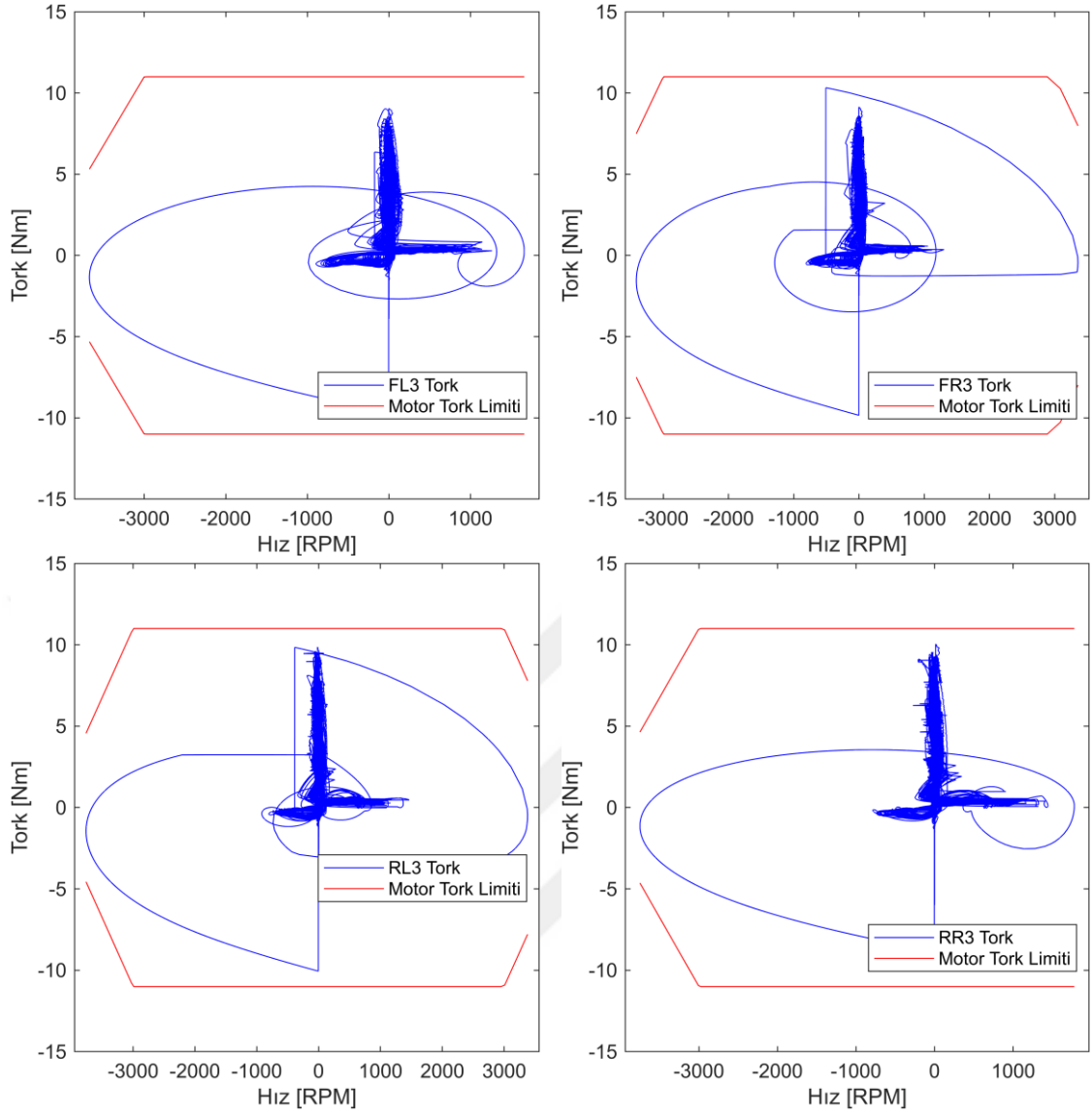
TUKSDAR’ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ön ve arka ayaklarının L_1 mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir. Bu senaryo yürüme senaryosunu kapsadığı için ayaklardaki tekrar eden hareketlerden dolayı bazı hız – tork çizgilerinin birbirine çok yakın geçtiği

görülmektedir. Bütün ayak gruplarındaki L_2 mafsallarını tahrik eden 2. gövde motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.157’de gösterilmiştir.



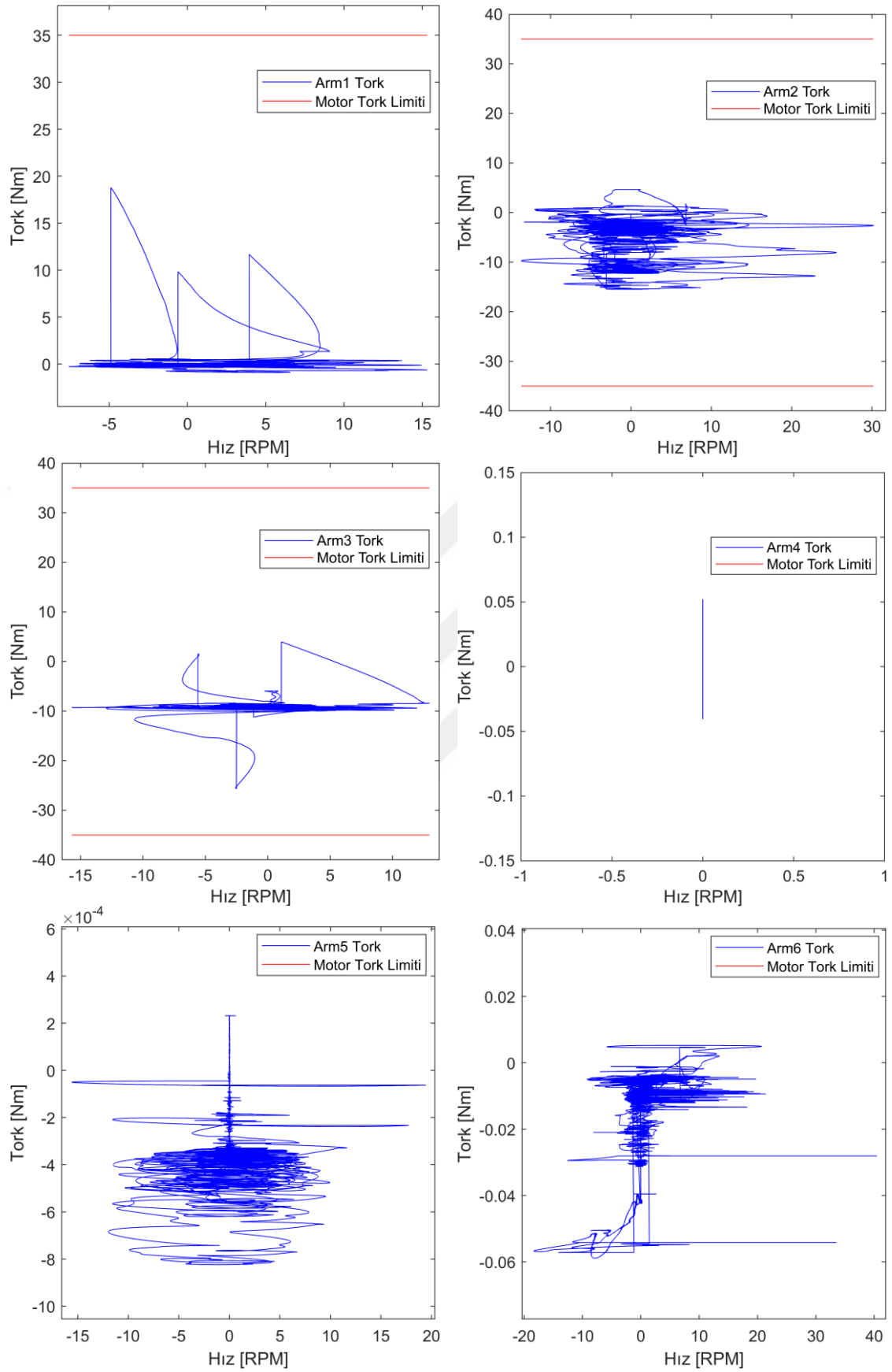
Şekil 5.157. TUKSDAR’ın ayaklarının L_2 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

TUKSDAR’ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ön ve arka ayaklarının L_2 mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir. L_1 mafsallarındakine benzer şekilde bu senaryonun yürüme senaryosunu kapsamamasından dolayı ayaklardaki tekrar eden hareketlerden kaynaklı olarak hız – tork çizgilerinin birbirine çok yakın geçtiği görülmektedir. Bütün ayak gruplarındaki L_3 mafsallarını tahrik eden 3. gövde motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.158’de gösterilmiştir.



Şekil 5.158. TUKSDAR'ın ayaklarının L_3 mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki ön ve arka ayaklarının L_3 mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir. L_1 ve L_2 mafsallarındakine benzer şekilde bu senaryonun yürüme senaryosunu kapsamamasından dolayı ayaklardaki tekrar eden hareketlerden kaynaklı olarak hız – tork çizgilerinin birbirine çok yakın geçtiği görülmektedir. Tutucu kolun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarını tahrik eden motorlarının hız – tork grafikleri Şekil 5.159'da gösterilmiştir.



Şekil 5.159. TUKSDAR'ın tutucu kolunun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarına ait motorlarında gerçekleşen hız – tork grafikleri

TUKSDAR'ın kapı kolu tutma ve açma senaryosu sırasındaki tutucu kolunun $A_{t1} - A_{t6}$ mafsallarına ait motorların gerekli torkları ve hızları sağladığı görülmektedir.

Bu senaryoda A_{t1} mafsalının tork ihtiyacı -1 Nm ile 19 Nm aralığında ve -8 RPM ile 16 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD X8 Pro motorunun limitleri içerisindedir.

Kapı kolu tutma ve açma senaryosunda A_{t2} mafsalının nesne tutma senaryosuna göre çok yoğun kullanıldığı görülmüştür. A_{t2} mafsalına ait motor, ortalamada -16 Nm ile 5 Nm aralığında ve -14 RPM ile 30 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD X8 Pro motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t3} mafsalına ait motor -26 Nm ile 4 Nm aralığında ve -16 RPM ile 13 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD X8 Pro motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t4} mafsalının konumu bu senaryoda 0° 'de sabit tutulmuştur. A_{t4} mafsalına ait motor -0.05 Nm ile 0.06 Nm momente maruz kalmaktadır. Bu sınırlar Maxon EC-i 30 motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t5} mafsalına ait motor -0.001 Nm ile 0.002 aralığında ve -16 RPM ile 20 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar Maxon EC-i 30 motorunun limitleri içerisindedir.

A_{t6} mafsalına ait motor -0.06 Nm ile 0.006 Nm aralığında ve -18 RPM ile 40 RPM aralığında gerçekleşmektedir. Bu sınırlar RMD-L-5005-35T motorunun limitleri içerisindedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, tutucu kol sahip dört ayaklı bir robot olan TUKSDAR'ın empedans kontrol tekniği kullanılarak gerçekleştirilen konum değiştirme ve nesne manipülasyonu senaryoları matematiksel olarak modellenmiştir. Matematiksel olarak modellenen senaryolar arasında TUKSDAR'ın dengesini sağlaması, yerinde sayması, kendi etrafında dönüşü, düz yürümesi, yan yürümesi, viraj dönüşü, belirli bir hedefe yürümesi, bir bardağı kavrayıp başka bir noktaya taşıması, bir kapıyı açması ve kapıdan geçmesi gibi durumlar yer almaktadır.

Bu çalışmada, sistem tasarımı, kinematik ve dinamik matematiksel modeller sunulmuştur. Tüm bu senaryoları kapsayan özgün bir kontrol mimarisi önerilmiş ve bu senaryoların tümü MATLAB Simulink/Simscape aracılığıyla simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir.

Giriş bölümünde, genel hatlarıyla tezin özeti verilmiş, temel motivasyon faktörleri açıklanmış ve literatüre katkıları ve özgün yönleri belirtilmiştir. Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

Kaynak Araştırması bölümünde dört ayaklı robotlar, nesne manipülasyonu, kapı açma ve empedans kontrolüyle ilgili temel ve güncel çalışmalar sunulmuştur. Robotların gelişimine genel olarak bir bakışın ardından, robot sisteminin modellenmesi, kontrolü ve yürüyüşüyle ilgili olarak deneysel ve benzetim çalışmalarının izah edildiği, sistematik bir literatür derlemesi yapılmıştır. Tezin kaynak araştırması bölümündeki empedans kontrolü ve dört ayaklı robotlarla ilgili literatür araştırmasının, gelecekteki çalışmalara rehberlik edebileceği düşünülmektedir.

Tutucu Kola Sahip Dört Ayaklı Robotun Matematiksel Modellenmesi bölümünde, genel teorik esaslar ve sistemin her bir mafsalının matematiksel modeli tüm aşamaları ile oluşturulmuştur. Bu matematiksel model ile tüm gövdenin kinematik ve dinamik denklemleri sembolik olarak elde edilmiş ve ekler halinde sunulmuştur.

Optimum Empedans Kontrolü bölümünde empedans kontrolünün teorik esasları ve sistemin matematiksel modeli ile entegrasyonu yapılmıştır. Dengede kalma senaryosu, yerinde sayma senaryosu, yürüme senaryosu, kendi etrafında dönüş senaryosu ve yan yürüme senaryolarının dört ayaklı robot bölümünün empedans

kontrolü ile modellenmesi için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda ana gövde eğim açılarına bağlı olarak dört ayaklı robotun ayak uçlarının etkileşim mesafelerinin değiştirilmesi matematiksel olarak oluşturulmuştur.

Ayrıca nesne manipülasyonu için nesne tutma ve taşıma senaryosunda ve kapı kolu tutma ve açma senaryosunda tutucu kolun empedans kontrolünün uygulanması için de yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda ise manipülasyon yapılacak nesnenin konumuna bağlı olarak tutucu kolun uç noktasının etkileşim mesafesinin değişimi matematiksel olarak oluşturulmuştur.

TUKSDAR'ın yürüyüş optimizasyonu için ana gövde α ve β eğim açılarına bağlı olarak amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Optimizasyon algoritması olarak Arı Algoritması kullanılmıştır. Rastgele başlangıç koşullarıyla başlayarak, 13 değişken optimize edilmiş ve amaç fonksiyonunda %98.5 azalma elde edilmiştir.

Tüm CAD modellemeler ve matematiksel modeller MATLAB Simulink/Simscape ortamına aktarılarak, TUKSDAR'ın empedans kontrolü için gerekli altyapı hazırlanmıştır.

TUKSDAR'ın dengeli ve kararlı bir şekilde yürüyüşü için, ana gövde eğim dengeleme sistemi empedans kontrol modeli Ayakların Empedans Kontrolünün Modellenmesi ve Dengede Kalma Sisteminin Modellenmesi başlıkları altında modellenmiştir.

Sayısal Uygulama ve Değerlendirme bölümünde TUKSDAR'ın simülasyonu için MATLAB Simulink/Simscape kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen sayısal sonuçlar kısaca şu şekilde özetlenebilir.

- Yürüyüş çalışmalarının temel performans kriteri, TUKSDAR'ın dengesini korumasıdır. Bunun sayısal karşılığı olan ana gövde α ve β eğimlerinin mümkün olduğunca 0° eğime yaklaştırılması anlamına gelir. Gerçekleştirilen sayısal uygulamalar sırasında elde edilen α ve β eğimleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur. TUKSDAR'ın bir hedefe yürürken ana gövdesinin en fazla 3° eğime ulaştığı görülmüştür. TUKSDAR'ın kapı açma senaryosu sırasında ana gövde eğiminin en fazla değeri olan 4° eğime ulaşarak sürekli olarak dengesini başarıyla koruyabildiği görülmüştür.

- V_{ileri} değişkeni ile ileri ve geri yönde yürüme işlemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yürüme sırasında her adımın yaklaşık 0.25 m olarak gerçekleştiği görülmüştür.
- Kendi etrafında dönüş sırasında $\theta_{yön}$ ve V_{ileri} değişkenleri birlikte kullanılarak robotun üstten görünüşteki merkezi etrafında başarılı bir şekilde dönüş gerçekleştirdiği görülmüştür.
- Viraj dönüşü sırasında 2 m yarıçaplı virajda başarılı bir şekilde dönüş gerçekleştirilmiştir.
- Bir hedefe yürüme sırasında, TUKSDAR'ın doğrultusuyla hedef arasındaki açı $\theta_{yön}$ değişkenine atanmaktadır. Bu sayede yürüyüş sırasında TUKSDAR'ın başarılı bir şekilde hedefe ulaştığı görülmüştür.
- Nesne tutma sırasında, nesne ile tutucu kol arasındaki kuvvetin 0.5 – 0.6 N aralığında olduğu görülmüştür. Bu kuvvet, 6. mafsalın empedans kontrolcüsünün oransal kazancı ile ayarlanabilmektedir. Bardağın çöp kutusuna hizalanması ve serbest düşüşe bırakılması da başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Kapı kolu tutma sırasında, kapı kolu ile tutucu kol arasındaki kuvvetin 40 N pik değerine sahip olduğu ve ortalama olarak 3 N olduğu görülmüştür. Kapı kolu tutularak geri geri yürüme ve daha sonra kapı kolunun geriye kapanması önlemek için kapıyı tutma ve kapıdan geçme işlemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Seçilen motorların TUKSDAR'ın hız ve tork gereksinimlerini karşıladığı görülmüştür.

TUKSDAR'ın bu senaryoları uygulaması için optimize edilen tasarımının belirtilen görevleri yerine getirebilecek yapıda olduğu görülmüştür. Önerilen empedans kontrol algoritmasının gelecekteki empedans kontrolü çalışmalarına ışık tutacağı düşünülmektedir.

6.2. Öneriler

TUKSDAR'ın viraj dönüşü sırasında, viraj merkezi tarafındaki ayakların 1. mafsallarında dışarıdaki ayakların 1. mafsallarına göre daha fazla sarfiyatı olduğu görülmüştür. Bu durum Şekil 5.146'da gösterilmiştir. Bu problemin çözümü olarak,

arzu edilen viraj dönüş merkezine olan uzaklığa bağlı olarak ayakların yana ve ileriye doğru hareketlerinin değiştirilmesi araştırılabilir. Bu şekilde, viraj dönüşü sırasındaki tork dağılımlarının birbirine yakın olması mümkün olabilir.

TUKSDAR'da tırs yürüyüş şekli uygulanmıştır. Önerilen empedans kontrol algoritması, diğer yürüyüş de çeşitlerinde uygulanarak performansının değerlendirilmesi mümkündür.

TUKSDAR'da koşma modelleri uygulanmamıştır. Önerilen empedans kontrol algoritmasının koşma türlerinde uygulanarak performansları değerlendirilmesi mümkündür.



KAYNAKLAR

- Albu-Schäffer, A., Ott, C., Hirzinger, G., 2007, A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. *The international journal of robotics research*, 26, 1, 23-39.
- Angelini, F., Xin, G., Wolfslag, W. J., Tiseo, C., Mistry, M., Garabini, M., Bicchi, A., Vijayakumar, S., 2019, Online optimal impedance planning for legged robots. *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 6028-6035.
- Arisumi, H., Chardonnet, J.-R., Yokoi, K., 2009, Whole-body motion of a humanoid robot for passing through a door-opening a door by impulsive force. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 428-434.
- Bakırcıoğlu, V., 2019, Dört ayaklı hidrolik tahrikli bir robotun modellenmesi ve uygulaması, *Konya Teknik Üniversitesi*.
- Bakırcıoğlu, V., Kalyoncu, M., 2020, Bacaklı robotların yürüme stratejileri üzerine bir literatür taraması. *Politeknik Dergisi*, 23, 4, 961-986.
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M., Kalyoncu, M., 2015, Dört Ayaklı Robotun Bir Bacağı İçin PID Kontrolcü Tasarımı ve Arı Algoritması Kullanarak Optimizasyonu, *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu – (UMTS 2015)*, İzmir, 661-665.
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A., Kalyoncu, M., 2016a, Adaptive neural-network based fuzzy logic (ANFIS) based trajectory controller design for one leg of a quadruped robot. *Proceedings of the 5th International Conference on Mechatronics and Control engineering*, 82-85.
- Bakırcıoğlu, V., Şen, M. A., Kalyoncu, M., 2016b, Optimization of PID controller based on The Bees Algorithm for one leg of a quadruped robot. *MATEC web of conferences*, 03004.
- Balatti, P., Kanoulas, D., Rigano, G. F., Muratore, L., Tsagarakis, N. G., Ajoudani, A., 2018, A self-tuning impedance controller for autonomous robotic manipulation. *2018 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, 5885-5891.
- Banerjee, N., Long, X., Du, R., Polido, F., Feng, S., Atkeson, C. G., Gennert, M., Padir, T., 2015, Human-supervised control of the ATLAS humanoid robot for traversing doors. *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 722-729.
- Boaventura, T., Medrano-Cerda, G. A., Semini, C., Buchli, J., Caldwell, D. G., 2013, Stability and performance of the compliance controller of the quadruped robot HyQ. *2013 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, 1458-1464.

- Bruzzone, L., Quaglia, G., 2012, Locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments. *Mechanical sciences*, 3, 2, 49-62.
- Chen, Z.-J., Gao, F., Pan, Y., 2017, Novel door-opening method for six-legged robots based on only force sensing. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30, 5, 1227-1238.
- Chitta, S., Cohen, B., Likhachev, M., 2010, Planning for autonomous door opening with a mobile manipulator. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1799-1806.
- Chung, J. H., Velinsky, S. A., Hess, R. A., 1998, Interaction control of a redundant mobile manipulator. *The International Journal of Robotics Research*, 17, 12, 1302-1309.
- Denavit, J., Hartenberg, R., 1956, A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 23, 1, 151-153.
- Denavit, J., Hartenberg, R. S., 1955, A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.
- Dynamics, B., 2009, *BigDog Overview (Updated March 2010)* [online], <https://www.youtube.com/watch?v=cNZPRsrwumQ>, [Ziyaret Tarihi: 2 Mayıs 2023].
- Dynamics, B., 2017, *Introducing Spot (previously SpotMini)* [online], <https://www.youtube.com/watch?v=tf7IEVTDjng>, [Ziyaret Tarihi: 2 Mayıs 2023].
- Dynamics, B., 2018, *Testing Robustness* [online], <https://www.youtube.com/watch?v=aFuA50H9uek>, [Ziyaret Tarihi: 2 Mayıs 2023].
- Erdemir, A., Alver, V., Kalyoncu, M., 2022, Arı Algoritması Kullanılarak Önden Dümenlemeli Bir Aracın Dümenleme Mekanizmasının Optimizasyonu, *International Aegean Conferences on Innovation Technologies & Engineering* 6, İzmir, Türkiye, 50-59.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2015, Bir Ağır Vasıtanın Çok Akslı Direksiyon Mekanizmasının Arı Algoritması Kullanılarak Optimizasyonu, *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu UMTS 2015*, 421-426.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2019, Optimization of a Multi-Axle Steered Heavy Vehicle Steering Mechanism by using the Bees Algorithm and the Hooke-Jeeves Algorithms Simultaneously, *International Symposium on Automotive Science And Technology (ISASTECH 2019)*, Ankara/Turkey, 613-622.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023a, Comparison of Energy Consumptions of Input Trajectory Functions in Impedance Controlled 2R Planar Robot Manipulator,

International Euroasia Congress on Scientific Researches and Recent Trends 10, Baku, Azerbaijan, 312-325.

- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023b, Energy Consumption Evaluation of 3 DOF Impedance-Controlled Robots Using Sinusoidal and Sigmoid Input Trajectory Functions, *Tokyo 7th International Innovative Studies & Contemporary Scientific Research Congress*, Tokyo, Japan, 299-313.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023c, Modeling Impedance Control with Limited Interaction Power for A 2R Planar Robot Arm, *4th Latin American International Congress on Natural and Applied Sciences*, Rio de Janeiro, Brazil, 107-119.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023d, Optimal Impedance Control of A 2R Planar Robot Manipulator, *Mas 17th International European Conference on Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, Cairo, Egypt, 82-92.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023e, Optimal Impedance Control of A 3 DOF Robot, *International Paris Congress on Applied Sciences*, Paris, France, 229-240.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023f, Polynomial Input Trajectory Functions for Improved Energy Efficiency in 3 DOF Impedance Controlled Robots, *7th International European Conference on Interdisciplinary Scientific Research*, Frankfurt, Germany, 568-581.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023g, Programming 3 DOF Industrial Robots with Natural Hand Motions: An Impedance Control Approach, *8th International New York Conference on Evolving Trends in Interdisciplinary Research & Practices*, New York, USA, 129-138.
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023h, *TUKSDAR "Door Opening and Passing Through the Door" Scenario* [online], <https://www.youtube.com/watch?v=8hrWNKKReT4>, [Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2023].
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023i, *TUKSDAR "Turning Around" Scenario* [online], <https://www.youtube.com/watch?v=bxCeMgYwrCQ>, [Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2023].
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023j, *TUKSDAR "Walking to Target and Manipulating Objects" Scenario* [online], <https://www.youtube.com/watch?v=pvTp1TaQ2lM>, [Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2023].
- Erdemir, A., Kalyoncu, M., 2023k, *TUKSDAR (Quadruped Robot with Gripper Arm) "Quadruped March" Scenario* [online], <https://www.youtube.com/watch?v=ejCwAuwMNwE>, [Ziyaret Tarihi: 1 Haziran 2023].
- Focchi, M., Orsolino, R., Camurri, M., Barasuol, V., Mastalli, C., Caldwell, D. G., Semini, C., 2020, Heuristic planning for rough terrain locomotion in presence of external disturbances and variable perception quality. *Advances in robotics*

research: From lab to market: ECHORD++: Robotic science supporting innovation, 165-209.

- Fu, K. S., Gonzalez, R., Lee, C. G., 1987, *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, Tata McGraw-Hill Education, p.
- Gehring, C., Coros, S., Hutter, M., Bellicoso, C. D., Heijnen, H., Diethelm, R., Bloesch, M., Fankhauser, P., Hwangbo, J., Hoepflinger, M., 2016, Practice makes perfect: An optimization-based approach to controlling agile motions for a quadruped robot. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 23, 1, 34-43.
- Harris, S. E., 2017, *Horse Gaits, Balance, and Movement: The natural mechanics of movement common to all breeds*, Souvenir Press, p.
- Hiller, M., Germann, D., de Gois, J. M., 2004, Design and control of a quadruped robot walking in unstructured terrain. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications*, 2004., 916-921.
- Hogan, N., 1984a, Impedance control of industrial robots. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 1, 1, 97-113.
- Hogan, N., 1984b, Impedance control: An approach to manipulation. *1984 American control conference*, 304-313.
- Huynh, B.-P., Kuo, Y.-L., 2020, Optimal fuzzy impedance control for a robot gripper using gradient descent iterative learning control in fuzzy rule base design. *Applied Sciences*, 10, 11, 3821.
- Hyun, D. J., Seok, S., Lee, J., Kim, S., 2014, High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah. *The International Journal of Robotics Research*, 33, 11, 1417-1445.
- Kalakrishnan, M., Buchli, J., Pastor, P., Mistry, M., Schaal, S., 2011, Learning, planning, and control for quadruped locomotion over challenging terrain. *The International Journal of Robotics Research*, 30, 2, 236-258.
- Kang, J.-H., Hwang, C.-S., Park, G.-T., 2003, A simple control method for opening a door with mobile manipulator. *제어로봇시스템학회: 학술대회논문집*, 1593-1597.
- Kim, J. T., San Cho, J., Park, B.-Y., Park, S., Lee, Y., 2013, Experimental investigation on the design of leg for a hydraulic actuated quadruped robot. *IEEE ISR 2013*, 1-5.
- Krestovnikov, K., Saveliev, A., Cherskikh, E., 2020, Development of a circuit design for a capacitive pressure sensor, applied in walking robot foot. *2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, 243-247.

- Kurtuhuz, A., Dumitru, C., 2021, Second Order Dynamic Modelling Of A Trimobil Scara Robot Using A Symbolic Computational Method. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 9, 40-44.
- Lee, J., Ajoudani, A., Hoffman, E. M., Rocchi, A., Settini, A., Ferrati, M., Bicchi, A., Tsagarakis, N. G., Caldwell, D. G., 2014a, Upper-body impedance control with variable stiffness for a door opening task. *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 713-719.
- Lee, J., Hyun, D. J., Ahn, J., Kim, S., Hogan, N., 2014b, On the dynamics of a quadruped robot model with impedance control: Self-stabilizing high speed trot-running and period-doubling bifurcations. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4907-4913.
- Li, J., Gao, H., Wan, Y., Humphreys, J., Peers, C., Yu, H., Zhou, C., 2022, Whole-Body Control for a Torque-Controlled Legged Mobile Manipulator. *Actuators*, 304.
- Li, M., Yin, H., Tahara, K., Billard, A., 2014, Learning object-level impedance control for robust grasping and dexterous manipulation. *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 6784-6791.
- Mosadeghzad, M., Medrano-Cerda, G. A., Saglia, J. A., Tsagarakis, N. G., Caldwell, D. G., 2012, Comparison of various active impedance control approaches, modeling, implementation, passivity, stability and trade-offs. *2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 342-348.
- Mussa-Ivaldi, F. A., Hogan, N., 1991, Integrable solutions of kinematic redundancy via impedance control. *The International Journal of Robotics Research*, 10, 5, 481-491.
- Niquille, S. C., 2019, Regarding the pain of spotmini: Or what a robot's struggle to learn reveals about the built environment. *Architectural Design*, 89, 1, 84-91.
- Ott, C., 2008, Cartesian impedance control of redundant and flexible-joint robots, Springer, p.
- Ott, C., Albu-Schaffer, A., Kugi, A., Stamigioli, S., Hirzinger, G., 2004, A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots-part I: Torque feedback and gravity compensation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, 2659-2665.
- Ott, C., Bäuml, B., Borst, C., Hirzinger, G., 2005, Employing cartesian impedance control for the opening of a door: A case study in mobile manipulation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop on mobile manipulators: Basic techniques, new trends & applications*,

- Önen, Ü., Botsalı, F. M., Kalyoncu, M., Şahin, Y., Tinkır, M., 2017, Design and motion control of a lower limb robotic exoskeleton. *Design, control and applications of mechatronic systems in engineering*, 135-152.
- Önen, Ü., Botsalı, F. M., Kalyoncu, M., Tinkır, M., Yılmaz, N., Şahin, Y., 2013, Design and actuator selection of a lower extremity exoskeleton. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 19, 2, 623-632.
- Petit, F., Albu-Schäffer, A., 2011, Cartesian impedance control for a variable stiffness robot arm. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4180-4186.
- Pham, D., Kalyoncu, M., 2009, Optimisation of a fuzzy logic controller for a flexible single-link robot arm using the Bees Algorithm. *2009 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 475-480.
- Pham, D. T., Castellani, M., 2009, The bees algorithm: modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223, 12, 2919-2938.
- Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M., 2006, The bees algorithm—a novel tool for complex optimisation problems. In: *Intelligent production machines and systems*. Eds: Elsevier, p. 454-459.
- Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R., 2008, Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*, 41, 2, 10822-10825.
- Raiola, G., Cardenas, C. A., Tadele, T. S., De Vries, T., Stramigioli, S., 2018, Development of a safety-and energy-aware impedance controller for collaborative robots. *IEEE Robotics and automation letters*, 3, 2, 1237-1244.
- Reddy, A. C., 2014, Difference between Denavit-Hartenberg (DH) classical and modified conventions for forward kinematics of robots with case study. *International Conference on Advanced Materials and manufacturing Technologies (AMMT)*, 267-286.
- Remy, C. D., 2011, Optimal exploitation of natural dynamics in legged locomotion, *ETH Zurich*.
- Remy, C. D., Baur, O., Latta, M., Lauber, A., Hutter, M., Hoepflinger, M. A., Pradalier, C., Siegwart, R., 2011, Walking and crawling with ALoF: a robot for autonomous locomotion on four legs. *Industrial Robot: An International Journal*.
- Rong, X., Li, Y., Ruan, J., Li, B., 2012, Design and simulation for a hydraulic actuated quadruped robot. *Journal of mechanical science and technology*, 26, 1171-1177.

- Sun, T., Yang, J., Pan, Y., Yu, H., 2023, Repetitive Impedance Learning-Based Physically Human-Robot Interactive Control. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.
- Şahin, Y., Botsalı, F. M., Kalyoncu, M., Tinkir, M., Önen, Ü., Yılmaz, N., Baykan, Ö. K., Çakan, A., 2014a, Force feedback control of lower extremity exoskeleton assisting of load carrying human. *Applied Mechanics and Materials*, 546-550.
- Şahin, Y., Botsalı, F. M., Kalyoncu, M., Tinkir, M., Önen, Ü., Yılmaz, N., Çakan, A., 2014b, Mechanical design of lower extremity exoskeleton assisting walking of load carrying human. *Applied Mechanics and Materials*, 141-145.
- Şen, M. A., 2020, Dört ayaklı bir robotun engebeli yüzeylerde yürüme analizi ve kontrolü, *Konya Teknik Üniversitesi*.
- Şen, M. A., Bakircioglu, V., Kalyoncu, M., 2017, Inverse kinematic analysis of a quadruped robot. *International journal of scientific & technology research*, 6, 9, 285-289.
- Şen, M. A., Bakircioğlu, V., Kalyoncu, M., 2020, Three degree of freedom leg design for quadruped robots and fractional order pid (pildm) based control. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8, 2, 237-247.
- Şen, M. A., Kalyoncu, M., 2018, Optimal tuning of PID controller using grey wolf optimizer algorithm for quadruped robot. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6, 1, 29-35.
- Şen, M. A., Kalyoncu, M., 2019, Grey wolf optimizer based tuning of a hybrid LQR-PID controller for foot trajectory control of a quadruped robot. *Gazi University Journal of Science*, 32, 2, 674-684.
- Şen, M. A., Kalyoncu, M., 2021, Dört Ayaklı Robotların Modellenmesi, Kontrolü ve Engibeli Yüzeylerde Yürüyüşü Üzerine Bir Literatür Araştırması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9, 1, 250-279.
- Takahashi, Y., Nishiwaki, K., Kagami, S., Mizoguchi, H., Inoue, H., 2005, High-speed pressure sensor grid for humanoid robot foot. *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3909-3914.
- Tokuda, K., Toda, T., Koji, Y., Konyo, M., Tadokoro, S., Alain, P., 2003, Estimation of fragile ground by foot pressure sensor of legged robot. *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*, 447-453.
- Tran, H. T., Cheng, H., Rui, H., Lin, X., Duong, M. K., Chen, Q., 2016, Evaluation of a fuzzy-based impedance control strategy on a powered lower exoskeleton. *International Journal of Social Robotics*, 8, 103-123.
- Ur Rehman, B., Focchi, M., Frigerio, M., Goldsmith, J., Caldwell, D. G., Semini, C., 2016, Design of a hydraulically actuated arm for a quadruped robot. *ASSISTIVE*

ROBOTICS: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR 2015, 283-290.

- Volpe, R., Khosla, P., 1993, A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38, 11, 1634-1650.
- Volpe, R., Khosla, P., 1995, The equivalence of second-order impedance control and proportional gain explicit force control. *The International journal of robotics research*, 14, 6, 574-589.
- Wang, J., Li, Y., 2010, Hybrid impedance control of a 3-DOF robotic arm used for rehabilitation treatment. *2010 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 768-773.
- Weisstein, E. W., 2002, CRC concise encyclopedia of mathematics, Chapman and Hall/CRC, p.
- Winiarski, T., Banachowicz, K., 2013, Opening a door with a redundant impedance controlled robot. *9th International workshop on robot motion and control*, 221-226.
- Winkler, A., Suchý, J., 2006, Force-guided motions of a 6-dof industrial robot with a joint space approach. *Advanced Robotics*, 20, 9, 1067-1084.
- Won, J., Stramigioli, S., Hogan, N., 1997, The Equivalence of Second-Order Impedance Control and Proportional Gain Explicit Force Control. *The International Journal of Robotics Research*, 16, 6, 873-875.
- Xin, G., Wolfslag, W., Lin, H.-C., Tiseo, C., Mistry, M., 2020, An optimization-based locomotion controller for quadruped robots leveraging cartesian impedance control. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 48.
- Xin, G., Zeng, F., Qin, K., 2022, Loco-Manipulation Control for Arm-Mounted Quadruped Robots: Dynamic and Kinematic Strategies. *Machines*, 10, 8, 719.
- Yu, C., Zhou, L., Qian, H., Xu, Y., 2018, Posture correction of quadruped robot for adaptive slope walking. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1220-1225.
- Zeng, G., Hemami, A., 1997, An overview of robot force control. *Robotica*, 15, 5, 473-482.
- Zucker, M., Jun, Y., Killen, B., Kim, T.-G., Oh, P., 2013, Continuous trajectory optimization for autonomous humanoid door opening. *2013 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, 1-5.

EKLER**EK-1** Ayak mafsallarına ait U_{ija} hız matrisi [m/s]

$$U_{11a} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_{1a}) & 0 & -\cos(\theta_{1a}) & 0 \\ \cos(\theta_{1a}) & 0 & -\sin(\theta_{1a}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{12a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{13a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{21a} = \begin{bmatrix} U_{21a11} & U_{21a12} & -\cos \theta_{1a} & U_{21a14} \\ U_{21a21} & U_{21a22} & -\sin \theta_{1a} & U_{21a24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{21a,11} = -0.5\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a})$$

$$U_{21a,12} = -0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}) + 0.5\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a})$$

$$U_{21a,14} = -0.0865\cos(\theta_{1a})f - 0.175\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.175\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a})$$

$$U_{21a,21} = 0.5\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) + 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a})$$

$$U_{21a,22} = -0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a}) + 0.5\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a})$$

$$U_{21a,24} = -0.0865f\sin(\theta_{1a}) + 0.175\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) + 0.175\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a})$$

$$U_{22a} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{1a})\sin(\theta_{2a}) & -\cos(\theta_{1a})\cos(\theta_{2a}) & 0 & -0.35\cos(\theta_{1a})\sin(\theta_{2a}) \\ -\sin(\theta_{1a})\sin(\theta_{2a}) & -\sin(\theta_{1a})\cos(\theta_{2a}) & 0 & -0.35\sin(\theta_{1a})\sin(\theta_{2a}) \\ -\cos(\theta_{2a}) & \sin(\theta_{2a}) & 0 & -0.35\cos(\theta_{2a}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{23a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{31a} = \begin{bmatrix} U_{31a11} & U_{31a12} & -\cos(\theta_{1a}) & U_{31a14} \\ U_{31a21} & U_{31a22} & -\sin(\theta_{1a}) & U_{31a24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{31a,11} = -0.5\sin(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a}) - 0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a})$$

$$U_{31a,12} = -0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) + 0.5\cos(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a})$$

$$U_{31a,14} = -0.0865\cos(\theta_{1a})f - 0.157\sin(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a}) - 0.157\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) - 0.175\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.175\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a})$$

$$U_{31a,21} = 0.5\cos(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a}) + 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a})$$

$$U_{31a,22} = -0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) + 0.5\sin(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a})$$

$$U_{31a,24} = -0.0865f\sin(\theta_{1a}) + 0.157\cos(-\theta_{2a} - \theta_{3a} + \theta_{1a}) + 0.157\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a} + \theta_{3a}) + 0.175\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) + 0.175\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a})$$

$$\begin{aligned}
U_{32a} &= \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{1a})\sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) & -\cos(\theta_{1a})\cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) & 0 & U_{32a14} \\ -\sin(\theta_{1a})\sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) & -\sin(\theta_{1a})\cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) & 0 & U_{32a24} \\ -\cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) & \sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) & 0 & U_{32a34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
U_{32a,14} &= -(0.313\sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) + 0.35\sin(\theta_{2a}))\cos(\theta_{1a}) \\
U_{32a,24} &= -(0.313\sin(\theta_{2a} + \theta_{3a}) + 0.35\sin(\theta_{2a}))\sin(\theta_{1a}) \\
U_{32a,34} &= -0.313\cos(\theta_{2a} + \theta_{3a}) - 0.35\cos(\theta_{2a}) \\
U_{33a} &= \begin{bmatrix} U_{33a11} & U_{33a12} & 0 & U_{33a14} \\ U_{33a21} & U_{33a22} & 0 & U_{33a24} \\ -\cos(\theta_{2a})\cos(\theta_{3a}) + \sin(\theta_{2a})\sin(\theta_{3a}) & U_{33a32} & 0 & U_{33a34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
U_{33a,11} &= (-0.5\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\sin(\theta_{3a}) + (-0.5\sin(\theta_{1a} \\
&\quad + \theta_{2a}) + 0.5\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}))\cos(\theta_{3a}) \\
U_{33a,12} &= (-0.5\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\cos(\theta_{3a}) - (-0.5\sin(\theta_{1a} \\
&\quad + \theta_{2a}) + 0.5\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}))\sin(\theta_{3a}) \\
U_{33a,14} &= 0.313(-0.5\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\sin(\theta_{3a}) \\
&\quad + 0.313(-0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a}) + 0.5\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}))\cos(\theta_{3a}) \\
U_{33a,21} &= (-0.5\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) + 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\cos(\theta_{3a}) + (-0.5\sin(-\theta_{2a} \\
&\quad + \theta_{1a}) - 0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\sin(\theta_{3a}) \\
U_{33a,22} &= (-0.5\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\cos(\theta_{3a}) - (-0.5\cos(-\theta_{2a} \\
&\quad + \theta_{1a}) + 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\sin(\theta_{3a}) \\
U_{33a,24} &= 0.313(-0.5\cos(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) + 0.5\cos(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\cos(\theta_{3a}) \\
&\quad + 0.313(-0.5\sin(-\theta_{2a} + \theta_{1a}) - 0.5\sin(\theta_{1a} + \theta_{2a}))\sin(\theta_{3a}) \\
U_{33a,32} &= \cos(\theta_{2a})\sin(\theta_{3a}) + \cos(\theta_{3a})\sin(\theta_{2a}) \\
U_{33a,34} &= -0.313\cos(\theta_{2a})\cos(\theta_{3a}) + 0.313\sin(\theta_{2a})\sin(\theta_{3a})
\end{aligned}$$

EK-2 Ayak mafsallarına ait U_{ij} hız matrisi [m/s]

$$\begin{aligned}
 U_{11} &= \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{12} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{15} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{16} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{21} &= \begin{bmatrix} U_{2111} & U_{2112} & -\cos(\theta_1) & -0.325 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) + 2.93 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \\ U_{2121} & U_{2122} & -\sin(\theta_1) & 0.325 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + 2.93 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{2111} &= -0.5 \sin(-\theta_2 + \theta_1) - 0.5 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
 U_{2112} &= -0.5 \cos(\theta_1 + \theta_2) + 0.5 \cos(-\theta_2 + \theta_1) \\
 U_{2121} &= 0.5 \cos(-\theta_2 + \theta_1) + 0.5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\
 U_{2122} &= -0.5 \sin(\theta_1 + \theta_2) + 0.5 \sin(-\theta_2 + \theta_1) \\
 U_{22} &= \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1) \sin(\theta_2) & -\cos(\theta_1) \cos(\theta_2) & 0 & -0.325 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \\ -\sin(\theta_1) \sin(\theta_2) & -\sin(\theta_1) \cos(\theta_2) & 0 & -0.325 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \\ -\cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) & 0 & -0.325 \cos(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{23} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{24} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{25} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{26} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{31} &= \begin{bmatrix} U_{3111} & \cos(\theta_1) & U_{3113} & U_{3114} \\ U_{3121} & \sin(\theta_1) & U_{3123} & U_{3124} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 U_{3111} &= -0.5 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 0.5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 U_{3113} &= -0.5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.5 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) \\
 U_{3114} &= -0.325 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) - 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2.93 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \\
 U_{3121} &= 0.5 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) + 0.5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 U_{3123} &= -0.5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.5 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) \\
 U_{3124} &= 0.325 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) + 2.93 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1) \\
 U_{32} &= \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & -\cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) & U_{3214} \\ -\sin(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & -\sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) & U_{3224} \\ -\cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & \sin(\theta_2 + \theta_3) & U_{3234} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$U_{3214} = (-0.325 \sin(\theta_2) - 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2 + \theta_3)) \cos(\theta_1)$$

$$U_{3224} = (-0.325 \sin(\theta_2) - 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2 + \theta_3)) \sin(\theta_1)$$

$$U_{3234} = -0.325 \cos(\theta_2) - 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$U_{33} = \begin{bmatrix} U_{3311} & 0 & U_{3313} & U_{3314} \\ U_{3321} & 0 & U_{3323} & U_{3324} \\ -\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) + \sin(\theta_2)\sin(\theta_3) & 0 & U_{3333} & U_{3334} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{33,11} = -0.5(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))\sin(\theta_3) + 0.5(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))\cos(\theta_3)$$

$$U_{33,13} = -0.5(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))\sin(\theta_3) - 0.5(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))\cos(\theta_3)$$

$$U_{33,14} = -0.031(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))\sin(\theta_3) + 0.031(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))\cos(\theta_3)$$

$$U_{33,21} = -0.5(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))\cos(\theta_3) - 0.5(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))\sin(\theta_3)$$

$$U_{33,23} = -0.5(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))\cos(\theta_3) + 0.5(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))\sin(\theta_3)$$

$$U_{33,24} = -0.031(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))\cos(\theta_3) - 0.031(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))\sin(\theta_3)$$

$$U_{33,33} = \cos(\theta_2)\sin(\theta_3) + \sin(\theta_2)\cos(\theta_3)$$

$$U_{33,34} = -6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2)\cos(\theta_3) + 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2)\sin(\theta_3)$$

$$U_{34} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{35} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{36} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{41} = \begin{bmatrix} U_{4111} & U_{4112} & U_{4113} & U_{4114} \\ U_{4121} & U_{4122} & U_{4123} & U_{4124} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{4111} = -0.5 \sin(-\theta_4 + \theta_1) - 0.25 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) - 0.25 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) - 0.25 \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 0.25 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.5 \sin(\theta_1 + \theta_4)$$

$$U_{4112} = -0.5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.5 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1)$$

$$U_{4113} = -0.5 \cos(-\theta_4 + \theta_1) - 0.5 \cos(\theta_1 + \theta_4) - 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) - 0.25 \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + 0.25 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$U_{4114} = (-6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_3) + 0.399 \sin(\theta_3) - 0.325) \cos(\theta_2) + 0.399 \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) + 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) \sin(\theta_1) + 2.93 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1)$$

$$U_{4121} = -0.5 \cos(\theta_1 + \theta_4) + 0.5 \cos(-\theta_4 + \theta_1) + 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + 0.25 \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$\begin{aligned}
U_{4122} &= -0.5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.5 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) \\
U_{4123} &= -0.5 \sin(-\theta_4 + \theta_1) - 0.5 \sin(\theta_1 + \theta_4) - 0.25 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) \\
&\quad - 0.25 \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) \\
&\quad + 0.25 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
U_{4124} &= (-0.399 \sin(\theta_3) + 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_3) + 0.325) \cos(\theta_2) \\
&\quad - 0.399 \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) - 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) \cos(\theta_1) + 2.93 \\
&\quad \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1)
\end{aligned}$$

$$U_{42} = \begin{bmatrix} U_{42,11} & -\cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) & U_{4213} & U_{4214} \\ U_{42,21} & -\sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) & U_{4223} & U_{4224} \\ U_{42,31} & \sin(\theta_2 + \theta_3) & U_{4233} & U_{4234} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U_{42,11} &= -0.5 \cos(\theta_1) (\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \\
U_{42,13} &= -0.5 \cos(\theta_1) (-\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3)) \\
U_{42,14} &= (-0.399 \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) - 6.19 \\
&\quad \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) + 0.399 \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) - 0.325 \sin(\theta_2)) \cos(\theta_1) \\
U_{42,21} &= -0.5 \sin(\theta_1) (\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \\
U_{42,23} &= -0.5 \sin(\theta_1) (-\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3)) \\
U_{42,24} &= (-0.399 \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) - 6.19 \\
&\quad \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) + 0.399 \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) - 0.325 \sin(\theta_2)) \sin(\theta_1) \\
U_{42,31} &= -0.5 \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) - 0.5 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
U_{42,33} &= -0.5 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.5 \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) \\
U_{42,34} &= -0.325 \cos(\theta_2) - 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3) + 0.399 \sin(\theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$U_{43} = \begin{bmatrix} U_{4311} & U_{4312} & U_{4313} & U_{4314} \\ U_{4321} & U_{4322} & U_{4323} & U_{4324} \\ U_{4331} & U_{4332} & U_{4333} & U_{4334} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U_{4311} &= -0.25 (\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2)) (\sin(-\theta_4 + \theta_3) + \sin(\theta_3 + \theta_4)) \\
&\quad + 0.25 (-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1)) (\cos(-\theta_4 + \theta_3) + \cos(\theta_3 + \theta_4)) \\
U_{4312} &= -0.5 (-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1)) \sin(\theta_3) - 0.5 (\cos(-\theta_2 + \theta_1) \\
&\quad + \cos(\theta_1 + \theta_2)) \cos(\theta_3) \\
U_{4313} &= -0.25 (\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2)) (-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) \\
&\quad - 0.25 (-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1)) (-\sin(\theta_3 + \theta_4) + \sin(-\theta_4 + \theta_3)) \\
U_{4314} &= (-0.2 \cos(\theta_3) - 0.031 \sin(\theta_3)) \cos(-\theta_2 + \theta_1) + (-0.2 \cos(\theta_3) \\
&\quad - 0.031 \sin(\theta_3)) \cos(\theta_1 + \theta_2) + (-0.2 \sin(\theta_3) + 0.031 \cos(\theta_3)) \sin(-\theta_2 \\
&\quad + \theta_1) + (-0.031 \cos(\theta_3) + 0.2 \sin(\theta_3)) \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
U_{4321} &= -0.25 (\cos(-\theta_4 + \theta_3) + \cos(\theta_3 + \theta_4)) (-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1)) \\
&\quad - 0.25 (\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2)) (\sin(-\theta_4 + \theta_3) + \sin(\theta_3 + \theta_4)) \\
U_{4322} &= -0.5 (\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2)) \cos(\theta_3) + 0.5 (-\cos(\theta_1 + \theta_2) \\
&\quad + \cos(-\theta_2 + \theta_1)) \sin(\theta_3) \\
U_{4323} &= -0.25 (\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2)) (-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) \\
&\quad + 0.25 (-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1)) (-\sin(\theta_3 + \theta_4) + \sin(-\theta_4 + \theta_3)) \\
U_{4324} &= (-0.2 \cos(\theta_3) - 0.031 \sin(\theta_3)) \sin(-\theta_2 + \theta_1) + (-0.2 \cos(\theta_3) \\
&\quad - 0.031 \sin(\theta_3)) \sin(\theta_1 + \theta_2) + (-0.2 \sin(\theta_3) + 0.031 \cos(\theta_3)) \cos(\theta_1 \\
&\quad + \theta_2) + (-0.031 \cos(\theta_3) + 0.2 \sin(\theta_3)) \cos(-\theta_2 + \theta_1) \\
U_{4331} &= -0.5 \cos(\theta_2) (\cos(-\theta_4 + \theta_3) + \cos(\theta_3 + \theta_4)) + 0.5 \sin(\theta_2) (\sin(-\theta_4 + \theta_3) \\
&\quad + \sin(\theta_3 + \theta_4)) \\
U_{4332} &= \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) + \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) \\
U_{4333} &= 0.5 \sin(\theta_2) (-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) + 0.5 (-\sin(\theta_3 + \theta_4) \\
&\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_3)) \cos(\theta_2)
\end{aligned}$$

$$U_{4334} = (-6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_3) + 0.399 \sin(\theta_3)) \cos(\theta_2) + 0.399 \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) + 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)$$

$$U_{44} = \begin{bmatrix} U_{4411} & 0 & U_{4313} & 0 \\ U_{4421} & 0 & U_{4323} & 0 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) & 0 & -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{4411} = -\cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4) + \sin(\theta_1) \cos(\theta_4)$$

$$U_{4413} = \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4) + \sin(\theta_1) \sin(\theta_4)$$

$$U_{4421} = -\cos(\theta_1) \cos(\theta_4) - \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_4)$$

$$U_{4423} = -\cos(\theta_1) \sin(\theta_4) + \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_4)$$

$$U_{45} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad U_{46} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{51} = \begin{bmatrix} U_{5111} & U_{5112} & U_{5113} & U_{5114} \\ U_{5121} & U_{5122} & U_{5123} & U_{5124} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{5111} = -0.25 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) - 0.25 \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 0.25 \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 0.25 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.125 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) - 0.125 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 0.125 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 0.125 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 0.125 \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.125 \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 0.125 \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 0.125 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.25 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + 0.25 \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25 \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 0.25 \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5)$$

$$U_{5112} = -0.25 \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 0.25 \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 0.25 \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 0.25 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.125 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) - 0.125 \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 0.125 \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.125 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.25 \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 0.25 \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 0.125 \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 0.125 \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 0.125 \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.125 \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$U_{5113} = -0.5 \cos(-\theta_4 + \theta_1) - 0.5 \cos(\theta_1 + \theta_4) - 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) - 0.25 \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + 0.25 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$U_{5114} = -0.325 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) - 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) - 0.028 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014 \sin(\theta_1) \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014 \sin(\theta_1) \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.014 \sin(\theta_1) \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 0.014 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.399 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) + 0.028 \sin(\theta_1) \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.028 \cos(\theta_1) \sin(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028 \cos(\theta_1) \sin(\theta_4 + \theta_5) + 2.93 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1)$$

$$\begin{aligned}
U_{5121} = & -0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 0.25\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 0.25\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 0.25\cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 + \theta_1) + 0.25\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 0.25\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) \\
& + 0.25\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) \\
& + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 \\
& + \theta_1) + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 0.125\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) + 0.125\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.125\cos(-\theta_5 + \theta_1 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.125\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5122} = & -0.25\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 0.25\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 0.25\sin(-\theta_5 \\
& + \theta_1 + \theta_4) - 0.25\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 \\
& + \theta_5) - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 0.125\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) - 0.125\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 \\
& + \theta_5) + 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.25\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) \\
& + 0.25\sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) \\
& + 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 0.125\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) + 0.125\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5123} = & -0.5\sin(-\theta_4 + \theta_1) - 0.5\sin(\theta_1 + \theta_4) - 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) \\
& - 0.25\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + 0.25\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5124} = & -0.399\cos(\theta_1)\sin(\theta_2 + \theta_3) - 0.028\cos(\theta_1)\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.325\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) + 6.19 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.028\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 0.028\sin(\theta_1)\sin(-\theta_5 + \theta_4) \\
& + 0.028\sin(\theta_1)\sin(\theta_4 + \theta_5) + 0.014\cos(\theta_1)\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& + 0.014\cos(\theta_1)\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014\cos(\theta_1)\cos(-\theta_5 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4) + 0.014\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2.93 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)
\end{aligned}$$

$$U_{52} = \begin{bmatrix} U_{5211} & U_{5212} & U_{5213} & U_{5214} \\ U_{5221} & U_{5222} & U_{5223} & U_{5224} \\ U_{5231} & U_{5232} & U_{5233} & U_{5234} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U_{5211} = & -0.25\cos(\theta_1)(-2\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 2\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + \sin(-\theta_4 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5212} = & -0.25\cos(\theta_1)(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& + 2\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 2\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5))
\end{aligned}$$

$$U_{5213} = -0.5\cos(\theta_1)(-\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3))$$

$$\begin{aligned}
U_{5214} = & (-0.325\sin(\theta_2) - 0.399\cos(\theta_2 + \theta_3) - 6.19 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3) \\
& - 0.028\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& - 0.014\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.014\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& - 0.014\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.028\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3))\cos(\theta_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5221} = & -0.25\sin(\theta_1)(-2\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 2\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + \sin(-\theta_4 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5222} = & 0.25\sin(\theta_1)(-2\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 2\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - \cos(-\theta_4 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) - \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))
\end{aligned}$$

$$U_{5223} = -0.5\sin(\theta_1)(-\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3))$$

$$\begin{aligned}
U_{5224} &= (-0.325\sin(\theta_2) - 0.399\cos(\theta_2 + \theta_3) - 6.19 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - 0.028\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad - 0.014\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.014\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
&\quad - 0.014\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.028\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3))\sin(\theta_1) \\
U_{5231} &= -0.5\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.25\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.25\cos(-\theta_4 \\
&\quad - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.25\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 0.25\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
&\quad + \theta_5) + 0.5\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
U_{5232} &= -0.25\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.25\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
&\quad + 0.5\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.5\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 0.25\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_5) + 0.25\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
U_{5233} &= -0.5\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.5\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) \\
U_{5234} &= -0.325\cos(\theta_2) - 6.19 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3) - 0.028\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad - 0.014\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - 0.014\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 0.014\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
&\quad + 0.399\sin(\theta_2 + \theta_3) + 0.028\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
U_{53} &= \begin{bmatrix} U_{5311} & U_{5312} & U_{5313} & U_{5314} \\ U_{5321} & U_{5322} & U_{5323} & U_{5324} \\ U_{5331} & U_{5332} & U_{5333} & U_{5334} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
U_{5311} &= -0.125(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))(-2\cos(\theta_3 + \theta_5) - \cos(-\theta_4 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_5) - \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) - \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
&\quad + 2\cos(-\theta_5 + \theta_3)) + 0.125(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))(-2\sin(\theta_3 \\
&\quad + \theta_5) - \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) - \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) \\
&\quad - \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2\sin(-\theta_5 + \theta_3)) \\
U_{5312} &= -0.125(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 + \theta_3) + 2\cos(\theta_3 + \theta_5) + \cos(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad + \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) - 0.125(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(-\theta_4 \\
&\quad - \theta_5 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_5 + \theta_3) + 2\sin(\theta_3 + \theta_5) \\
&\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) + \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5313} &= -0.25(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) \\
&\quad - 0.25(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(\theta_3 + \theta_4) + \sin(-\theta_4 + \theta_3)) \\
U_{5314} &= (-0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) - 0.031)\cos(\theta_3) + (0.028\sin(\theta_5) \\
&\quad + 0.2)\sin(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2) + (-0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) - 0.031)\sin(\theta_3) \\
&\quad + (-0.028\sin(\theta_5) - 0.2)\cos(\theta_3)\cos(-\theta_2 + \theta_1) + (-0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) \\
&\quad - 0.031)\sin(\theta_3) + (-0.028\sin(\theta_5) - 0.2)\cos(\theta_3)\cos(\theta_1 + \theta_2) \\
&\quad + (-0.028\sin(\theta_5) - 0.2)\sin(\theta_3) + (0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) \\
&\quad + 0.031)\cos(\theta_3)\sin(-\theta_2 + \theta_1) \\
U_{5321} &= 0.125(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))(-2\cos(\theta_3 + \theta_5) - \cos(-\theta_4 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_5) - \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) - \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
&\quad + 2\cos(-\theta_5 + \theta_3)) + 0.125(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))(-2\sin(\theta_3 \\
&\quad + \theta_5) - \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) - \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) \\
&\quad - \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2\sin(-\theta_5 + \theta_3)) \\
U_{5322} &= -0.125(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 + \theta_3) + 2\cos(\theta_3 + \theta_5) + \cos(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad + \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) + 0.125(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(-\theta_4 \\
&\quad - \theta_5 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_5 + \theta_3) + 2\sin(\theta_3 + \theta_5) \\
&\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) + \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5323} &= -0.25(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) \\
&\quad + 0.25(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(\theta_3 + \theta_4) + \sin(-\theta_4 + \theta_3))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5324} &= (-0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) - 0.031)\cos(\theta_3) + (0.028\sin(\theta_5) \\
&\quad + 0.2)\sin(\theta_3)\cos(-\theta_2 + \theta_1) + (-0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) - 0.031)\sin(\theta_3) \\
&\quad + (-0.028\sin(\theta_5) - 0.2)\cos(\theta_3)\sin(-\theta_2 + \theta_1) + (-0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) \\
&\quad - 0.031)\sin(\theta_3) + (-0.028\sin(\theta_5) - 0.2)\cos(\theta_3)\sin(\theta_1 + \theta_2) \\
&\quad + (-0.028\sin(\theta_5) - 0.2)\sin(\theta_3) + (0.028\cos(\theta_4)\cos(\theta_5) \\
&\quad + 0.031)\cos(\theta_3)\cos(\theta_1 + \theta_2) \\
U_{5331} &= -0.25\sin(\theta_2)(-2\sin(\theta_3 + \theta_5) - \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) - \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) \\
&\quad - \sin(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) - \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2\sin(-\theta_5 + \theta_3)) \\
&\quad + 0.25\cos(\theta_2)(-2\cos(\theta_3 + \theta_5) - \cos(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) - \cos(-\theta_4 - \theta_5 \\
&\quad + \theta_3) - \cos(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) - \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2\cos(-\theta_5 + \theta_3)) \\
U_{5332} &= 0.25\sin(\theta_2)(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 \\
&\quad + \theta_3) + 2\cos(\theta_3 + \theta_5) + \cos(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) + \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) \\
&\quad + 0.25\cos(\theta_2)(-\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 + \theta_3 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_5 \\
&\quad + \theta_3) + 2\sin(\theta_3 + \theta_5) + \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5) + \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5333} &= 0.5\sin(\theta_2)(-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) + 0.5(-\sin(\theta_3 + \theta_4) \\
&\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_3))\cos(\theta_2) \\
U_{5334} &= -6.19 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3) - 0.028\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\cos(-\theta_4 + \theta_2 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.014\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_4) - 0.014\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.399\sin(\theta_2 + \theta_3) \\
&\quad + 0.028\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$U_{54} = \begin{bmatrix} U_{5411} & U_{5412} & U_{5413} & U_{5414} \\ U_{5421} & U_{5422} & U_{5423} & U_{5424} \\ U_{5431} & U_{5432} & U_{5433} & U_{5434} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U_{5411} &= -0.5\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(\sin(-\theta_5 + \theta_4) + \sin(\theta_4 + \theta_5)) \\
&\quad + 0.5\sin(\theta_1)(\cos(-\theta_5 + \theta_4) + \cos(\theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5412} &= 0.5\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(-\cos(\theta_4 + \theta_5) + \cos(-\theta_5 + \theta_4)) \\
&\quad + 0.5\sin(\theta_1)(-\sin(\theta_4 + \theta_5) + \sin(-\theta_5 + \theta_4)) \\
U_{5413} &= \cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_4) + \sin(\theta_1)\sin(\theta_4) \\
U_{5414} &= \sin(\theta_1)(0.028\cos(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\cos(\theta_4 + \theta_5)) - \cos(\theta_1)\cos(\theta_2 \\
&\quad + \theta_3)(0.028\sin(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\sin(\theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5421} &= -0.5\cos(\theta_1)(\cos(-\theta_5 + \theta_4) + \cos(\theta_4 + \theta_5)) - 0.5\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 \\
&\quad + \theta_3)(\sin(-\theta_5 + \theta_4) + \sin(\theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5422} &= -0.5\cos(\theta_1)(-\sin(\theta_4 + \theta_5) + \sin(-\theta_5 + \theta_4)) + 0.5\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 \\
&\quad + \theta_3)(-\cos(\theta_4 + \theta_5) + \cos(-\theta_5 + \theta_4)) \\
U_{5423} &= -\cos(\theta_1)\sin(\theta_4) + \sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_4) \\
U_{5424} &= -\cos(\theta_1)(0.028\cos(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\cos(\theta_4 + \theta_5)) - \sin(\theta_1)\cos(\theta_2 \\
&\quad + \theta_3)(0.028\sin(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\sin(\theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5431} &= 0.5\sin(\theta_2 + \theta_3)(\sin(-\theta_5 + \theta_4) + \sin(\theta_4 + \theta_5)) \\
U_{5432} &= -0.5\sin(\theta_2 + \theta_3)(-\cos(\theta_4 + \theta_5) + \cos(-\theta_5 + \theta_4)) \\
U_{5433} &= -\sin(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_4) \\
U_{5434} &= 0.028\sin(\theta_2 + \theta_3)(\sin(-\theta_5 + \theta_4) + \sin(\theta_4 + \theta_5))
\end{aligned}$$

$$U_{55} = \begin{bmatrix} U_{5511} & U_{5512} & 0 & U_{5514} \\ U_{5521} & U_{5522} & 0 & U_{5524} \\ U_{5531} & U_{5532} & 0 & U_{5534} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U_{5511} &= -0.25(-2\cos(\theta_1 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) \\
&\quad + \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_4))\sin(\theta_5) + 0.5(-\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\cos(\theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5512} &= -0.5(-\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\sin(\theta_5) - 0.25(-2\cos(\theta_1 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\cos(\theta_5) \\
U_{5514} &= -0.014(-2\cos(\theta_1 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5) + 0.028(-\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\cos(\theta_5) \\
U_{5521} &= -0.5(-\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\cos(\theta_5) - 0.25(-2\sin(\theta_1 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5) \\
U_{5522} &= -0.25(-2\sin(\theta_1 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\cos(\theta_5) + 0.5(-\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\sin(\theta_5) \\
U_{5524} &= -0.028(-\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\cos(\theta_5) - 0.014(-2\sin(\theta_1 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5) \\
U_{5531} &= 0.5(\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5) - \cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_5) \\
U_{5532} &= 0.5(\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\cos(\theta_5) + \cos(\theta_2 + \theta_3)\sin(\theta_5) \\
U_{5534} &= -5.61 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_5) + 0.028(\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{56} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
U_{61} &= \begin{bmatrix} U_{6111} & U_{6112} & U_{6113} & U_{6114} \\ U_{6121} & U_{6122} & U_{6123} & U_{6124} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{6111} &= -0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 0.25\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 0.25\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 0.25\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
&\quad - 0.125\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 0.125\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - 0.125\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 0.125\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 0.25\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
&\quad + 0.25\sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
U_{6112} &= -0.25\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 0.25\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - 0.25\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 0.25\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 0.125\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 0.125\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
&\quad + 0.25\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 0.25\cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
&\quad + 0.125\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.125\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{6113} &= -0.5\cos(-\theta_4 + \theta_1) - 0.5\cos(\theta_1 + \theta_4) - 0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) \\
&\quad - 0.25\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) \\
&\quad + 0.25\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
U_{6114} &= -0.325\sin(\theta_1)\cos(\theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3) - 0.028\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad - 0.014\sin(\theta_1)\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\sin(\theta_1)\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 \\
&\quad + \theta_3) - 0.014\sin(\theta_1)\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 0.014\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_4 + \theta_5) + 0.399\sin(\theta_1)\sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\cos(-\theta_5 - \theta_6 \\
&\quad + \theta_2 + \theta_3) + 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 4.83 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.028\sin(\theta_1)\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad + 0.028\cos(\theta_1)\sin(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\cos(\theta_1)\sin(\theta_4 + \theta_5) + 2.93 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1) \\
U_{6121} &= -0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 0.25\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - 0.25\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 0.25\cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.25\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 0.25\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.25\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 0.25\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \\
&\quad + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
&\quad + 0.125\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 0.125\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 0.125\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad + 0.125\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.125\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
&\quad + \theta_5 + \theta_6) \\
U_{6122} &= -0.25\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 0.25\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - 0.25\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 0.25\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 \\
&\quad + \theta_5 + \theta_6) - 0.125\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 0.125\sin(\theta_1 + \theta_2 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 0.25\sin(-\theta_2 \\
&\quad - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 0.25\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 0.25\sin(\theta_1 + \theta_4 \\
&\quad + \theta_5 + \theta_6) + 0.125\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 0.125\sin(-\theta_2 \\
&\quad - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 0.125\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad + 0.125\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
U_{6123} &= -0.5\sin(-\theta_4 + \theta_1) - 0.5\sin(\theta_1 + \theta_4) - 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) \\
&\quad - 0.25\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.25\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) \\
&\quad + 0.25\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
U_{6124} &= -0.399\cos(\theta_1)\sin(\theta_2 + \theta_3) - 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - 0.028\cos(\theta_1)\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.325\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) + 2.41 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(-\theta_4 \\
&\quad - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
&\quad + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 4.83 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\sin(-\theta_5 - \theta_6 \\
&\quad + \theta_4) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)\sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 6.19 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 \\
&\quad + \theta_3) + 0.028\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 0.028\sin(\theta_1)\sin(-\theta_5 + \theta_4) \\
&\quad + 0.028\sin(\theta_1)\sin(\theta_4 + \theta_5) + 0.014\cos(\theta_1)\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad + 0.014\cos(\theta_1)\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014\cos(\theta_1)\cos(-\theta_5 + \theta_2 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_4) + 0.014\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2.93 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1)
\end{aligned}$$

$$U_{62} = \begin{bmatrix} U_{6211} & U_{6212} & U_{6213} & U_{6214} \\ U_{6221} & U_{6222} & U_{6223} & U_{6224} \\ U_{6231} & U_{6232} & U_{6233} & U_{6234} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} U_{6211} &= -0.25\cos(\theta_1)(-2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\ &\quad + \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\ U_{6212} &= -0.25\cos(\theta_1)(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(-\theta_4 \\ &\quad + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\ U_{6213} &= -0.5\cos(\theta_1)(-\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3)) \\ U_{6214} &= (-0.325\sin(\theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\ &\quad \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 0.399\cos(\theta_2 + \theta_3) \\ &\quad - 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3) \\ &\quad - 0.028\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\ &\quad - 0.014\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.014\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad - 0.014\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\ &\quad + 0.028\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3))\cos(\theta_1) \\ U_{6221} &= -0.25\sin(\theta_1)(-2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\ &\quad + \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\ U_{6222} &= -0.25\sin(\theta_1)(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(-\theta_4 \\ &\quad + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\ U_{6223} &= -0.5\sin(\theta_1)(-\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3)) \\ U_{6224} &= (-0.325\sin(\theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\ &\quad \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 0.399\cos(\theta_2 + \theta_3) \\ &\quad - 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_2 + \theta_3) \\ &\quad - 0.028\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\ &\quad - 0.014\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.014\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad - 0.014\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\ &\quad + 0.028\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3))\sin(\theta_1) \\ U_{6231} &= -0.5\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 0.25\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad - 0.25\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 0.25\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad - 0.25\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.5\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\ U_{6232} &= -0.25\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 0.25\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad + 0.5\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 0.5\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 0.25\sin(-\theta_4 \\ &\quad + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 0.25\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\ U_{6234} &= -0.325\cos(\theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\ &\quad \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3) - 0.028\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\ &\quad - 0.014\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\ &\quad - 0.014\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 0.014\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\ &\quad + 0.399\sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\ &\quad + 0.028\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\ U_{6233} &= -0.5\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.5\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

$$U_{63} = \begin{bmatrix} U_{6311} & U_{6312} & U_{6313} & U_{6314} \\ U_{6321} & U_{6322} & U_{6323} & U_{6324} \\ U_{6331} & U_{6332} & U_{6333} & U_{6334} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} U_{6311} &= -0.125(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))(-2\cos(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \cos(-\theta_4 \\ &\quad + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad - \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3)) + 0.125(\cos(-\theta_2 + \theta_1) \\ &\quad + \cos(\theta_1 + \theta_2))(-2\sin(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad - \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) - \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \\ &\quad + \theta_6) + 2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3)) \\ U_{6312} &= -0.125(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) \\ &\quad - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3) + 2\cos(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad + \cos(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) - 0.125(-\sin(\theta_1 \\ &\quad + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_4) + 2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3) + 2\sin(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 \\ &\quad + \theta_6) + \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\ U_{6313} &= -0.25(\cos(-\theta_2 + \theta_1) + \cos(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) \\ &\quad - 0.25(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(\theta_3 + \theta_4) + \sin(-\theta_4 + \theta_3)) \\ U_{6314} &= -0.028(0.5\sin(\theta_3)\cos(-\theta_5 + \theta_4) + 0.5\sin(\theta_3)\cos(\theta_4 + \theta_5) + (\sin(\theta_5) \\ &\quad + 7.12)\cos(\theta_3) + 1.72\cos(\theta_3)\sin(\theta_5 + \theta_6) + 0.861\sin(\theta_3)\cos(-\theta_5 - \theta_6 \\ &\quad + \theta_4) + 0.861\sin(\theta_3)\cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.1\sin(\theta_3))(\cos(-\theta_2 + \theta_1) \\ &\quad + \cos(\theta_1 + \theta_2)) + 0.014(-\sin(\theta_1 + \theta_2) + \sin(-\theta_2 \\ &\quad + \theta_1))(-3.44\sin(\theta_3)\sin(\theta_5 + \theta_6) + 1.72\cos(\theta_3)\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) \\ &\quad + 1.72\cos(\theta_3)\cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(\theta_3)\cos(-\theta_5 + \theta_4) + \cos(\theta_3)\cos(\theta_4 \\ &\quad + \theta_5) + 2.21\cos(\theta_3)) \\ U_{6321} &= 0.125(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))(-2\cos(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \cos(-\theta_4 \\ &\quad + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) \\ &\quad - \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3)) + 0.125(\sin(-\theta_2 + \theta_1) \\ &\quad + \sin(\theta_1 + \theta_2))(-2\sin(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad - \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) - \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \\ &\quad + \theta_6) + 2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3)) \\ U_{6322} &= -0.125(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) \\ &\quad - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3) + 2\cos(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad + \cos(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) + 0.125(-\cos(\theta_1 \\ &\quad + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 \\ &\quad + \theta_4) + 2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3) + 2\sin(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 \\ &\quad + \theta_6) + \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\ U_{6323} &= -0.25(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))(-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) \\ &\quad + 0.25(-\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1))(-\sin(\theta_3 + \theta_4) + \sin(-\theta_4 + \theta_3)) \\ U_{6324} &= -0.028(\sin(-\theta_2 + \theta_1) + \sin(\theta_1 + \theta_2))(0.5\sin(\theta_3)\cos(-\theta_5 + \theta_4) \\ &\quad + 0.5\sin(\theta_3)\cos(\theta_4 + \theta_5) + (\sin(\theta_5) + 7.12)\cos(\theta_3) + 1.72\cos(\theta_3)\sin(\theta_5 \\ &\quad + \theta_6) + 0.861\sin(\theta_3)\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 0.861\sin(\theta_3)\cos(\theta_4 + \theta_5 \\ &\quad + \theta_6) + 1.1\sin(\theta_3)) - 0.014(-3.44\sin(\theta_3)\sin(\theta_5 + \theta_6) \\ &\quad + 1.72\cos(\theta_3)\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 1.72\cos(\theta_3)\cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\ &\quad + \cos(\theta_3)\cos(-\theta_5 + \theta_4) + \cos(\theta_3)\cos(\theta_4 + \theta_5) + 2.21\cos(\theta_3))(-\cos(\theta_1 \\ &\quad + \theta_2) + \cos(-\theta_2 + \theta_1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{6331} &= -0.25\sin(\theta_2)(-2\sin(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \sin(-\theta_4 \\
&\quad - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) - \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3)) + 0.25\cos(\theta_2)(-2\cos(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \cos(-\theta_4 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) \\
&\quad - \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3)) \\
U_{6332} &= 0.25\sin(\theta_2)(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) - \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) \\
&\quad + 2\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3) + 2\cos(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) + 0.25\cos(\theta_2)(-\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_3) \\
&\quad - \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_3) + 2\sin(\theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\
U_{6333} &= 0.5\sin(\theta_2)(-\cos(\theta_3 + \theta_4) + \cos(-\theta_4 + \theta_3)) + 0.5(-\sin(\theta_3 + \theta_4) \\
&\quad + \sin(-\theta_4 + \theta_3))\cos(\theta_2) \\
U_{6334} &= -2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 \\
&\quad - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad - 6.19 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3) - 0.028\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\cos(-\theta_4 + \theta_2 \\
&\quad + \theta_3 + \theta_5) - 0.014\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 0.014\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_4) - 0.014\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.399\sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 0.028\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
U_{64} &= \begin{bmatrix} U_{6411} & U_{6412} & U_{6413} & U_{6414} \\ U_{6421} & U_{6422} & U_{6423} & U_{6424} \\ U_{6431} & U_{6432} & U_{6433} & U_{6434} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
U_{6411} &= -0.5\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\
&\quad + 0.5\sin(\theta_1)(\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + \cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\
U_{6412} &= 0.5\cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(-\cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4)) \\
&\quad + 0.5\sin(\theta_1)(-\sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4)) \\
U_{6413} &= \cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_4) + \sin(\theta_1)\sin(\theta_4) \\
U_{6414} &= \sin(\theta_1)(4.83 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.028\cos(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\cos(\theta_4 + \theta_5)) - \cos(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(4.83 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.028\sin(-\theta_5 \\
&\quad + \theta_4) + 0.028\sin(\theta_4 + \theta_5)) \\
U_{6421} &= -0.5\cos(\theta_1)(\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + \cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\
&\quad - 0.5\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\
U_{6422} &= -0.5\cos(\theta_1)(-\sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4)) \\
&\quad + 0.5\sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(-\cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4)) \\
U_{6423} &= -\cos(\theta_1)\sin(\theta_4) + \sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_4) \\
U_{6424} &= -\cos(\theta_1)(4.83 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
&\quad + 0.028\cos(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\cos(\theta_4 + \theta_5)) - \sin(\theta_1)\cos(\theta_2 + \theta_3)(4.83 \\
&\quad \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.028\sin(-\theta_5 \\
&\quad + \theta_4) + 0.028\sin(\theta_4 + \theta_5)) \\
U_{6431} &= 0.5\sin(\theta_2 + \theta_3)(\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\
U_{6432} &= 0.5\sin(\theta_2 + \theta_3)(-\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + \cos(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) \\
U_{6433} &= -\sin(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_4) \\
U_{6434} &= \sin(\theta_2 + \theta_3)(4.83 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 4.83 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_4 + \theta_5 \\
&\quad + \theta_6) + 0.028\sin(-\theta_5 + \theta_4) + 0.028\sin(\theta_4 + \theta_5))
\end{aligned}$$

$$U_{65} = \begin{bmatrix} U_{6511} & U_{6512} & 0 & U_{6514} \\ U_{6521} & U_{6522} & 0 & U_{6524} \\ U_{6531} & U_{6532} & 0 & U_{6534} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_{6511} = -0.25(-2\cos(\theta_1 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5 + \theta_6) + 0.5(-\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\cos(\theta_5 + \theta_6)$$

$$U_{6512} = -0.5(-\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\sin(\theta_5 + \theta_6) - 0.25(-2\cos(\theta_1 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\cos(\theta_5 + \theta_6)$$

$$U_{6514} = -0.25(-2\cos(\theta_1 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))(9.65 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_5)\sin(\theta_6) + 9.65 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5)\cos(\theta_6) + 5.61 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5)) + 0.5(-\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))(-9.65 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5)\sin(\theta_6) + 9.65 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_5)\cos(\theta_6) + 5.61 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_5))$$

$$U_{6521} = -0.5(-\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\cos(\theta_5 + \theta_6) - 0.25(-2\sin(\theta_1 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5 + \theta_6)$$

$$U_{6522} = -0.25(-2\sin(\theta_1 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\cos(\theta_5 + \theta_6) + 0.5(-\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))\sin(\theta_5 + \theta_6)$$

$$U_{6524} = -0.5(-\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1))(-9.65 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5)\sin(\theta_6) + 9.65 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_5)\cos(\theta_6) + 5.61 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_5)) - 0.25(-2\sin(\theta_1 + \theta_4) + 2\sin(-\theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4))(9.65 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_5)\sin(\theta_6) + 9.65 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5)\cos(\theta_6) + 5.61 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5))$$

$$U_{6531} = 0.5(\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\sin(\theta_5 + \theta_6) - \cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_5 + \theta_6)$$

$$U_{6532} = 0.5(\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))\cos(\theta_5 + \theta_6) + \cos(\theta_2 + \theta_3)\sin(\theta_5 + \theta_6)$$

$$U_{6534} = (-9.65 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_6) - 5.61 \cdot 10^{-2})\cos(\theta_5) + 9.65 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5)\sin(\theta_6)\cos(\theta_2 + \theta_3) + 0.5(\sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4))(9.65 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_5)\sin(\theta_6) + 9.65 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5)\cos(\theta_6) + 5.61 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_5))$$

$$U_{66} = \begin{bmatrix} U_{6611} & U_{6612} & 0 & U_{6614} \\ U_{6621} & U_{6622} & 0 & U_{6624} \\ U_{6631} & U_{6632} & 0 & U_{6634} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U_{6632} &= -0.25\cos(\theta_6)(-2\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - \sin(-\theta_4 \\
&\quad - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
&\quad + 2\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3)) + 0.25\sin(\theta_6)(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \\
&\quad - \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 2\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) \\
U_{6634} &= -2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_6)(-2\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
&\quad - \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
&\quad + \theta_5) + 2\sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3)) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_6)(-\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 \\
&\quad + \theta_3) - \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 2\cos(\theta_2 + \theta_3 \\
&\quad + \theta_5) + \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5))
\end{aligned}$$



EK-3 Tutucu kola ait τ_{act} eyleyici tork denklemleri [Nm]

$$\begin{aligned} \tau_{act1} = & (((((-1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x + 9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) + 1.12 \\ & \cdot 10^{-2} g_x) \sin(\theta_5) + (-1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_x - 9.98 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_5) - 4.19 \cdot 10^{-6} g_x) \cos(\theta_4) - 1.55 \cdot 10^{-1} g_x + 8.88 \\ & \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_4)) \sin(\theta_3) + ((-1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_x - 9.98 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \sin(\theta_5) + (-9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_x + 1.99 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_5) - 8.44 \cdot 10^{-1} g_x) \cos(\theta_3) - 2.66 \\ & \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_2) + ((((-9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_x + 1.99 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \sin(\theta_5) + (1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) + 0.054 g_x + 9.98 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_5) + 4.19 \cdot 10^{-6} g_x) \cos(\theta_4) - 8.88 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_4) \\ & + 0.155 g_x) \cos(\theta_3) + ((-1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_x - 9.98 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \sin(\theta_5) + (-9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_x + 1.99 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_5) - 8.44 \cdot 10^{-1} g_x) \sin(\theta_3) + 1.02 g_x) \\ & \cos(\theta_2) + (-1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 1.12 \\ & \cdot 10^{-2} g_y) \sin(\theta_4) \sin(\theta_5) + (-1.99 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_y - 9.98 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) - 2.5 \cdot 10^{-6} g_x - 8.88 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_4) g_y \\ & - 0.15 g_y - 4.19 \cdot 10^{-6} g_y \sin(\theta_4)) \sin(\theta_1) + (((((-1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y \\ & + 9.98 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 1.12 \cdot 10^{-2} g_y) \sin(\theta_5) + (-1.99 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) \\ & - 5.4 \cdot 10^{-2} g_y - 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \cos(\theta_5) - 4.19 \cdot 10^{-6} g_y) \\ & \cos(\theta_4) - 1.55 \cdot 10^{-1} g_y + 8.88 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_4)) \cos(\theta_3) + ((-1.99 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 1.12 \cdot 10^{-2} g_y) \cos(\theta_5) + (1.99 \\ & \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 0.054 g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_5) \\ & + 0.844 g_y) \sin(\theta_3) - 1.02 g_y) \cos(\theta_2) + ((((-9.98 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) - 1.12 \\ & \cdot 10^{-2} g_y + 1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_5) + (1.99 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) \\ & + 0.054 g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \cos(\theta_5) + 4.19 \cdot 10^{-6} g_y) \\ & \cos(\theta_4) - 8.88 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_4) + 0.155 g_y) \sin(\theta_3) + ((-1.99 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 1.12 \cdot 10^{-2} g_y) \cos(\theta_5) + (1.99 \\ & \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 0.054 g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_5) \\ & + 0.844 g_y) \cos(\theta_3) + 2.66 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_2) + (-1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x \\ & + 9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) + 1.12 \cdot 10^{-2} g_x) \sin(\theta_4) \sin(\theta_5) + (-1.99 \\ & \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_x - 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_5) \sin(\theta_4) \\ & - 8.88 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_4) g_x - 0.15 g_x - 4.19 \cdot 10^{-6} g_x \sin(\theta_4) + 2.5 \\ & \cdot 10^{-6} g_y) \cos(\theta_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{act2} = & (((((-9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_x + 1.99 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \sin(\theta_5) + 4.19 \cdot 10^{-6} g_x) \cos(\theta_1) + ((-9.98 \\ & \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_y + 1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_5) + 4.19 \\ & \cdot 10^{-6} g_y) \sin(\theta_1) + ((1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) + 0.054 g_x + 9.98 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_1) + (1.99 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 0.054 g_y + 9.98 \\ & \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_1)) \cos(\theta_5)) \cos(\theta_4) + (-8.88 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_4) \\ & + 0.155 g_x) \cos(\theta_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(-8.88 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_4) + 0.155 g_y) \sin(\theta_1) + (-1.99 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) \\
& - 5.4 \cdot 10^{-2} g_z - 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z) \sin(\theta_5) + (-9.98 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) \\
& - 1.12 \cdot 10^{-2} g_z + 1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z) \cos(\theta_5) - 8.44 \cdot 10^{-1} g_z \cos(\theta_3) \\
& + (((-1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z + 9.98 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) + 1.12 \\
& \cdot 10^{-2} g_z) \sin(\theta_5) + (-1.99 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_z - 9.98 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z + 1.42 \cdot 10^{-11} \cos(\theta_1) g_y + 1.42 \cdot 10^{-11} g_x \sin(\theta_1)) \cos(\theta_5) \\
& - 4.19 \cdot 10^{-6} g_z) \cos(\theta_4) + ((-1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_x - 9.98 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \sin(\theta_5) - 8.44 \cdot 10^{-1} g_x \cos(\theta_1) + ((-1.99 \\
& \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_y - 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_5) - 8.44 \\
& \cdot 10^{-1} g_y) \sin(\theta_1) + ((-9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_x + 1.99 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_1) + (-9.98 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_y - 1.42 \\
& \cdot 10^{-11} g_y \sin(\theta_4) + 1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_1)) \cos(\theta_5) - 1.55 \\
& \cdot 10^{-1} g_z + 8.88 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_4)) \sin(\theta_3) - 2.66 \cdot 10^{-3} g_z + 1.02 \cos(\theta_1) g_x \\
& + 1.02 g_y \sin(\theta_1)) \sin(\theta_2) + (((((-9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_x \\
& + 1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \sin(\theta_5) + 4.19 \cdot 10^{-6} g_x) \cos(\theta_1) + ((-9.98 \\
& \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_y + 1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_5) + 4.19 \\
& \cdot 10^{-6} g_y) \sin(\theta_1) + ((1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) + 0.054 g_x + 9.98 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \cos(\theta_1) + (1.99 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 0.054 g_y \\
& + 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_1)) \cos(\theta_5)) \cos(\theta_4) + (-8.88 \\
& \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_4) + 0.155 g_x) \cos(\theta_1) + (-8.88 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_4) \\
& + 0.155 g_y) \sin(\theta_1) + (-1.99 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) - 5.4 \cdot 10^{-2} g_z - 9.98 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z) \sin(\theta_5) + (-9.98 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) - 1.12 \cdot 10^{-2} g_z + 1.99 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z) \cos(\theta_5) - 8.44 \cdot 10^{-1} g_z \sin(\theta_3) + (((-1.99 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x + 9.98 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) + 1.12 \cdot 10^{-2} g_x) \cos(\theta_1) + (-1.99 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) + 1.12 \cdot 10^{-2} g_y + 1.42 \\
& \cdot 10^{-11} g_y \sin(\theta_4)) \sin(\theta_1)) \cos(\theta_5) + ((-9.98 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) - 1.12 \\
& \cdot 10^{-2} g_z + 1.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z) \sin(\theta_5) + (-1.42 \cdot 10^{-11} g_x \sin(\theta_1) + 1.99 \\
& \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_6) + 0.054 g_z + 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_z) \cos(\theta_5) + 4.19 \\
& \cdot 10^{-6} g_z) \cos(\theta_4) + ((1.99 \cdot 10^{-3} g_x \sin(\theta_6) + 0.054 g_x + 9.98 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_x) \sin(\theta_5) + 0.844 g_x) \cos(\theta_1) + ((1.99 \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_6) \\
& + 0.054 g_y + 9.98 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_6) g_y) \sin(\theta_5) + 0.844 g_y) \sin(\theta_1) - 8.88 \\
& \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_4) + 0.155 g_z) \cos(\theta_3) + 2.66 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_1) g_x + 2.66 \\
& \cdot 10^{-3} g_y \sin(\theta_1) + 1.02 g_z) \cos(\theta_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{act3} = & (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + \\
& + (-2.22 \cdot 10^{-3} g_x - 1.05 \cdot 10^{-6} g_y) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-2.22 \cdot 10^{-3} \\
& g_x + 1.05 \cdot 10^{-6} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + (-2.22 \cdot 10^{-3} g_y - 1.05 \\
& \cdot 10^{-6} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(-2.22 \cdot 10^{-3} g_y + 1.05 \cdot 10^{-6} g_x) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-1.05 \\
& \cdot 10^{-6} g_x + 2.22 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + (-1.05 \cdot 10^{-6} g_y \\
& + 2.22 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x - 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x - 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y - 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_y - 4.97 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-4} g_x \\
& + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \cdot 10^{-4} g_x \\
& + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (-2.49 \cdot 10^{-4} g_y \\
& + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-4} g_y \\
& + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_x \\
& + 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + (-1.35 \\
& \cdot 10^{-2} g_x + 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_y \\
& + 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x - 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x - 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + (-6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_y - 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y \\
& - 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_x + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_x + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 2.49 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 2.49 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (-1.4 \cdot 10^{-3} g_x \\
& + 6.75 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + (-1.4 \cdot 10^{-3} g_x + 6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-1.4 \cdot 10^{-3} g_y + 6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-1.4 \cdot 10^{-3} g_y + 6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& + (-7.77 \cdot 10^{-2} g_x + 0.422 g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) + (-7.77 \cdot 10^{-2} g_y \\
& + 0.422 g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (1.25 \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 \\
& + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (1.25 \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 \\
& + \theta_5 + \theta_6) + (2.22 \\
& \cdot 10^{-3} g_x + 1.05 \cdot 10^{-6} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + (2.22 \cdot 10^{-3} g_y + 1.05 \\
& \cdot 10^{-6} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (0.422 g_x + 7.77 \cdot 10^{-2} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1) + (0.422 g_y + 7.77 \cdot 10^{-2} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_x \\
& + 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_x + 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_x \\
& + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 4.44 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& - 8.44 \cdot 10^{-1} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3) - 2.7 \cdot 10^{-2} \\
& \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) g_z - 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 \\
& + \theta_3) - 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 4.99 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 \\
& - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) g_z - 5.59 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 5.59 \\
& \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 4.44 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) + 9.95 \\
& \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 9.95 \cdot 10^{-4} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 2.09 \cdot 10^{-6} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) g_z + 2.09 \cdot 10^{-6} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z \\
& + 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) g_z + 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 - \theta_5 \\
& - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) g_z + 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) g_z + 0.027 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) g_z + 1.35 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) g_z + 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) g_z \\
& + 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z + 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
& + \theta_5) g_z + 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_5 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.155 \cos(\theta_2 + \theta_3) g_z + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5 + \theta_6) + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 4.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) g_z
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{act4} = & (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& + (-4.44 \cdot 10^{-3} g_x + 2.09 \cdot 10^{-6} g_y) \cos(\theta_1 + \theta_4) + (-4.44 \cdot 10^{-3} g_y - 2.09 \\
& \cdot 10^{-6} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_4) + (-2.09 \cdot 10^{-6} g_x + 4.44 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1) \\
& + (-1.05 \cdot 10^{-6} g_x + 2.22 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + (-1.05 \\
& \cdot 10^{-6} g_x + 2.22 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-1.05 \cdot 10^{-6} g_y \\
& + 2.22 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + (-1.05 \cdot 10^{-6} g_y + 2.22 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x - 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x - 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(-2.49 \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + \\
& (-2.49 \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + \\
& (-2.49 \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \\
& (-2.49 \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + \\
& (-1.35 \cdot 10^{-2} g_x - 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_x \\
& - 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) \\
& +(-1.35 \cdot 10^{-2} g_x + 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_x \\
& + 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x - 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \\
& \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x - 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 + \\
& \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \\
& \theta_5 + \theta_1) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y - 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + (-6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_y - 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y \\
& + 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + (-2.79 \cdot 10^{-3} g_x + 1.35 \\
& \cdot 10^{-2} g_y) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-2.79 \cdot 10^{-3} g_x + 1.35 \cdot 10^{-2} g_y) \cos(\theta_1 \\
& + \theta_4 + \theta_5) + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_x + 2.49 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_x + 2.49 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (-1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x + 6.75 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-1.4 \cdot 10^{-3} g_x \\
& + 6.75 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (-1.4 \cdot 10^{-3} g_y + 6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + (-1.4 \cdot 10^{-3} g_y + 6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (1.25 \cdot 10^{-3} g_x + 2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (1.25 \\
& \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (1.25 \\
& \cdot 10^{-3} g_y + 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (4.44 \\
& \cdot 10^{-3} g_x + 2.09 \cdot 10^{-6} g_y) \cos(-\theta_4 + \theta_1) + (2.22 \cdot 10^{-3} g_x + 1.05 \\
& \cdot 10^{-6} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1) + (2.22 \cdot 10^{-3} g_x + 1.05 \\
& \cdot 10^{-6} g_y) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (2.22 \cdot 10^{-3} g_y + 1.05 \\
& \cdot 10^{-6} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4) + (2.22 \cdot 10^{-3} g_y + 1.05 \cdot 10^{-6} g_x) \sin(\theta_1 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (2.49 \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_5 \\
& + \theta_1 + \theta_4) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) \\
& + (6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + (6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 4.44 \\
& \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) - 4.44 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.09 \\
& \cdot 10^{-6} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3) g_z - 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) g_z \\
& - 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) g_z - 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) g_z - 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) g_z - 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2.09 \cdot 10^{-6} \\
& \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z + 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) g_z + 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& g_z + 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) g_z + 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) + 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{act5} = & (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x - 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x - 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x \\
& + 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y \\
& - 4.97 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y - 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (-2.49 \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-1.35 \\
& \cdot 10^{-2} g_x - 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_x \\
& - 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_x + 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_x + 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_y - 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_5 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_y - 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-1.35 \cdot 10^{-2} g_y \\
& + 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(-6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (-6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (-6.75 \cdot 10^{-3} g_y \\
& + 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + (-2.79 \cdot 10^{-3} g_x + 1.35 \\
& \cdot 10^{-2} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + (-2.79 \cdot 10^{-3} g_x + 1.35 \\
& \cdot 10^{-2} g_y) \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + (-2.79 \cdot 10^{-3} g_y + 1.35 \cdot 10^{-2} g_x) \sin(-\theta_5 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-2.79 \cdot 10^{-3} g_y + 1.35 \cdot 10^{-2} g_x) \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_x + 2.49 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + \\
& (-4.97 \cdot 10^{-4} g_x + 2.49 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-4.97 \cdot 10^{-4} \\
& g_y + 2.49 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_y + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (2.49 \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (2.49 \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (2.49 \cdot 10^{-3} g_y \\
& + 4.97 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_x + 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_x + 2.79 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) + (1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) \\
& + (1.35 \cdot 10^{-2} g_y + 2.79 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_x \\
& + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + (6.75 \\
& \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_x \\
& + 1.4 \cdot 10^{-3} g_y) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_x + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + (6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + (6.75 \cdot 10^{-3} g_y + 1.4 \cdot 10^{-3} g_x) \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 9.95 \\
& \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 \\
& + \theta_3) g_z - 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z - 1.35 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) g_z - 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z \\
& - 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 \\
& + \theta_3) - 2.79 \\
& \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.79 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
& - 5.59 \cdot 10^{-3} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 9.95 \cdot 10^{-4} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) g_z + 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) g_z + 0.027 \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) g_z + 0.027 \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5) g_z + 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) g_z + 1.35 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4 + \theta_5) g_z + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4) + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 4.99 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) g_z + 4.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) g_z \\
& + 5.59 \cdot 10^{-3} g_z \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{act6} = & (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_x - 2.49 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& + (-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(-1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (\\
& -1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (\\
& -1.25 \cdot 10^{-3} g_y - 2.49 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x - 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x \\
& - 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y \\
& - 4.97 \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y - 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-2.49 \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (-2.49 \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \\
& \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_x + 1.25 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (-2.49 \\
& \cdot 10^{-4} g_y + 1.25 \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + (-4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x + 2.49 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_x \\
& + 2.49 \cdot 10^{-3} g_y) \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_y + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (-4.97 \cdot 10^{-4} g_y + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x) \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + (2.49 \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + (2.49 \\
& \cdot 10^{-3} g_x + 4.97 \cdot 10^{-4} g_y) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + (2.49 \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + (2.49 \cdot 10^{-3} g_y + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_x) \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 9.95 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) g_z - 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) g_z + 9.95 \cdot 10^{-4} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 2.49 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) g_z + 2.49 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \\
& + \theta_6) g_z + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 4.97 \\
& \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4) + 4.97 \cdot 10^{-4} g_z \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 4.99 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) g_z + 4.99 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) g_z
\end{aligned}$$

EK-4 Tutucu kola ait **P** uç nokta konum denklemleri [m]

$$\begin{aligned}
 P_x = & -0.2\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
 & \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
 & - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) \\
 & - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 1.4 \\
 & \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 0.2\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) + 1.21 \\
 & \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \\
 & + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \\
 & \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 \\
 & + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \\
 & \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \\
 & \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.163\cos(-\theta_2 + \theta_1) \\
 & + 0.163\cos(\theta_1 + \theta_2) + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \\
 & \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
 & + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 2.93 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1) \\
 & + 0.031\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) + 0.031\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014\cos(-\theta_2 \\
 & - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) \\
 & + 0.014\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
 & + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 \\
 & - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 7.01 \\
 & \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\
 & + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_5 \\
 & + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_y = & -0.2\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
 & \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
 & - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 2.93 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1) - 1.4 \\
 & \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \\
 & \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 1.4 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 0.2 \\
 & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
 & \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \\
 & - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \\
 & \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 \\
 & + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2} \\
 & \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
 & + \theta_5 + \theta_6) + 0.163\sin(-\theta_2 + \theta_1) + 0.163\sin(\theta_1 + \theta_2) + 2.41 \\
 & \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
 & + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 \\
 & + \theta_6) + 0.031\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) + 0.031 \\
 & \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014\sin(-\theta_4 + \theta_1 \\
 & + \theta_5) + 0.014\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \\
 & \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 \\
 & + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 \\
 & - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \\
 & \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\
 & + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_z = & -3.25 \cdot 10^{-1} \sin(\theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 3.99 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_2 + \theta_3) \\
& - 4.83 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2 + \theta_3) - 2.8 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 4.83 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.028 \sin(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.13
\end{aligned}$$



EK-5 Tutucu kolun **P** uç noktasına ait J_f Jakobiyen matrisi denklemleri

$$\begin{aligned}
 J_{f11} = & -3.25 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 \\
 & + \theta_6) \sin(\theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_1) - 2.41 \\
 & \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
 & + \theta_5 + \theta_6) \sin(\theta_1) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \sin(\theta_1) - 6.19 \\
 & \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_1) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \sin(\theta_1) \\
 & - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \sin(\theta_1) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 \\
 & + \theta_3) \sin(\theta_1) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) - 1.4 \\
 & \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \sin(\theta_1) + 2.93 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \\
 & + 0.399 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_1) \\
 & + 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) + 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \sin(\theta_4 + \theta_5 \\
 & + \theta_6) + 0.028 \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_1) + 0.028 \cos(\theta_1) \sin(-\theta_5 + \theta_4) \\
 & + 0.028 \cos(\theta_1) \sin(\theta_4 + \theta_5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{f12} = & -0.2 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 0.2 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 \\
 & + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 & - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 \\
 & + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.63 \cdot 10^{-1} \sin(\theta_1 + \theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
 & + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
 & - 3.1 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \\
 & \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
 & - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
 & + \theta_3 + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 \\
 & - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
 & + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
 & - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 0.163 \sin(-\theta_2 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 \\
 & - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.031 \sin(-\theta_2 \\
 & - \theta_3 + \theta_1) + 0.014 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014 \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
 & + \theta_3) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 \\
 & - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 7.01 \\
 & \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J_{f13} = & -0.2 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 0.2 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 \\
 & + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 & - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 \\
 & + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
 & \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
 & - 3.1 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \\
 & \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
 & - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
 & + \theta_3 + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 \\
 & - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 \\
& + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f21} = & -3.99 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_1) \sin(\theta_2 + \theta_3) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 \\
& + \theta_3) \cos(\theta_1) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_1) \\
& + 0.325 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \cos(\theta_1) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 \\
& - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 \\
& + \theta_6) \\
& + 2.93 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1) + 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 4.83 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_4) \sin(\theta_1) + 4.83 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1) \sin(\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) + 0.028 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& + 0.028 \sin(-\theta_5 + \theta_4) \sin(\theta_1) + 0.028 \sin(\theta_1) \sin(\theta_4 + \theta_5) + 0.014 \cos(-\theta_4 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \cos(\theta_1) + 0.014 \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_1) \\
& + 0.014 \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) + 0.014 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
& + \theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f22} = & -0.2 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 0.2 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 \\
& - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 1.63 \cdot 10^{-1} \cos(-\theta_2 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) \\
& - 3.1 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) \\
& - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 0.163 \cos(\theta_1 + \theta_2) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 0.031 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.014 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f23} = & -0.2 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 0.2 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 \\
& - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f26} = & -1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 \\
& - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 \\
& + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6)
\end{aligned}$$

$$J_{f31} = 0$$

$$\begin{aligned}
J_{f32} = & -3.25 \cdot 10^{-1} \cos(\theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
& + 0.399 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.028 \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f33} = & -2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.399 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 0.028 \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f34} = & -2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4 + \theta_5) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014 \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& + 0.014 \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f35} = & -2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 0.014 \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014 \cos(-\theta_5 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{f36} = & -2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)
\end{aligned}$$



EK-6 Tutucu kola ait τ_e empedans tork denklemleri [Nm]

$$\begin{aligned}
\tau_{e1} = & (-0.2\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 \\
& - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2} \\
& \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 1.63 \cdot 10^{-1}\sin(-\theta_2 + \theta_1) - 1.63 \cdot 10^{-1}\sin(\theta_1 + \theta_2) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 \\
& + \theta_6) - 3.1 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) \\
& - 3.1 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) \\
& - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \\
& - \theta_5 + \theta_1) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 7.01 \\
& \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.2\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 \\
& + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2.93 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1) + 0.014\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) + 0.014\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 0.014\sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5))F_x \\
& + (-0.2\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_1 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 0.2\sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 0.163\cos(-\theta_2 + \theta_1) \\
& + 0.163\cos(\theta_1 + \theta_2) + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 2.93 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1) + 0.031 \\
& \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) + 0.031\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 \\
& + \theta_1) + 0.014\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014 \\
& \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 \\
& + \theta_1) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_4 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\
& + \theta_5))F_y
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{e2} = & (-0.2\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 0.2\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_1 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.63 \cdot 10^{-1}\sin(\theta_1 + \theta_2) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 3.1 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 \\
& - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 0.163\sin(-\theta_2 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.031\sin(-\theta_2 \\
& - \theta_3 + \theta_1) + 0.014\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014\sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 \\
& + \theta_1) + 7.01 \cdot 10^{-3}\sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4))F_x + (-0.2\sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1) - 0.2\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 \\
& + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2} \\
& \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 1.63 \cdot 10^{-1}\cos(-\theta_2 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) - 3.1 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) \\
& - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 \\
& + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 7.01 \\
& \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 \\
& + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 0.163\cos(\theta_1 + \theta_2) + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 0.031\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.014\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3}\cos(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5))F_y + (-3.25 \cdot 10^{-1}\cos(\theta_2) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 \\
& + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 \\
& + \theta_3) - 2.8 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& - 1.4 \cdot 10^{-2}\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 0.399\sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \\
& \cdot 10^{-2}\cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 0.028\cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3))F_z \\
\\
\tau_{e3} = & (-0.2\cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 0.2\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 + \theta_1 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2}\sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2}\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6)
\end{aligned}$$

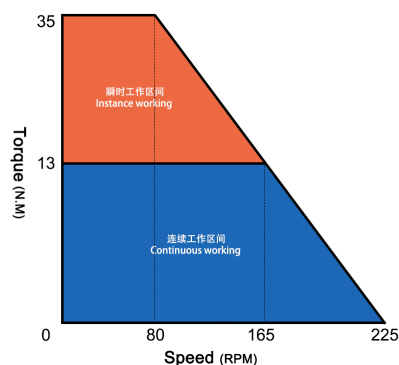
$$\begin{aligned}
& -3.1 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) \\
& - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 \\
& - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.031 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) \\
& + 0.014 \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014 \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 \\
& + \theta_1) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4)) F_x + (-0.2 \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1) - 0.2 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 \\
& + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 \\
& - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 3.1 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) \\
& - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 \\
& + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 \\
& + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 0.031 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.014 \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) F_y + (-2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 6.19 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \\
& + 0.399 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 0.028 \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3)) F_z
\end{aligned}$$

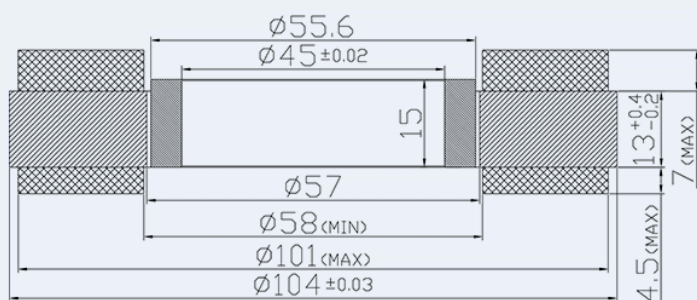
$$\begin{aligned}
\tau_{e4} = & (-1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 \\
& + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) - 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 \\
& + \theta_1) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 \\
& - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 \\
& + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) F_y + (-1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 \\
& + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 0.014 \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014 \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014 \\
& \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 0.014 \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3)) F_x + (-2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\
& - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 \\
& + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014 \cos(-\theta_4 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) + 0.014 \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3)) F_z
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{e5} = & (-1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 \\
& - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) - 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3) - 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \\
& + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 \\
& + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 \\
& - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 0.014 \\
& \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014 \cos(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014 \cos(-\theta_5 + \theta_1 \\
& + \theta_4) + 0.014 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 \\
& + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(-\theta_4 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5)) F_y \\
& + (-1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 \\
& + \theta_6) - 1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5)
\end{aligned}$$

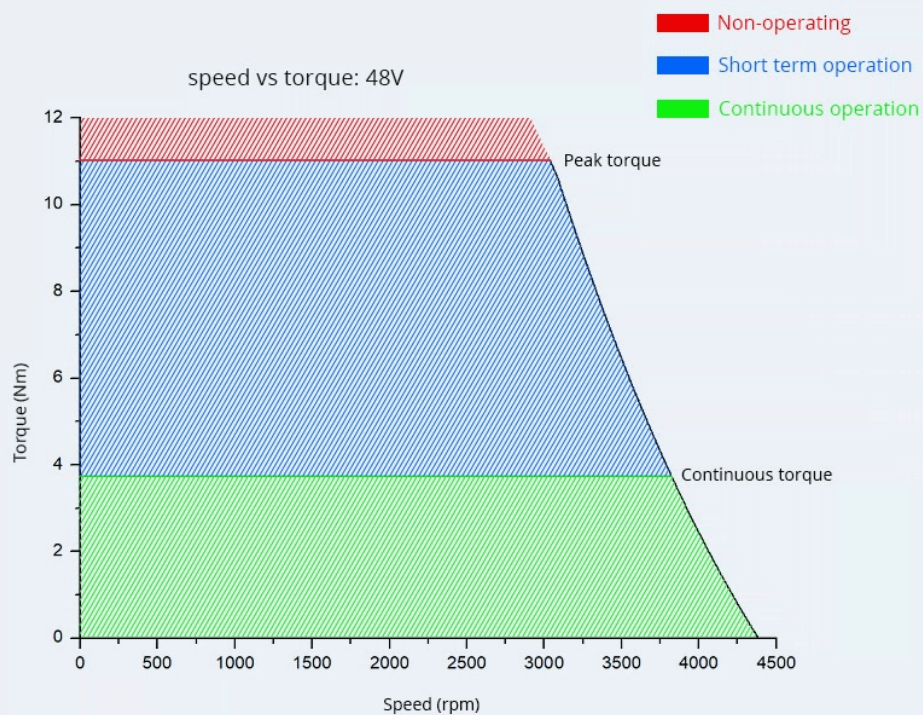
$$\begin{aligned}
& -1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 1.4 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_4) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5) \\
& - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5) - 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 \\
& - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 \\
& + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 \\
& + \theta_6) + 0.014 \sin(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5) + 0.014 \\
& \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014 \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 0.014 \sin(\theta_1 + \theta_4 \\
& + \theta_5) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 + \theta_1) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_2 \\
& - \theta_3 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_4) + 7.01 \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 7.01 \\
& \cdot 10^{-3} \sin(-\theta_5 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) F_x + (-2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.8 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3) - 2.8 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5) - 1.4 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4) + 0.014 \cos(-\theta_4 - \theta_5 + \theta_2 + \theta_3) + 0.014 \cos(-\theta_5 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) F_z \\
\tau_{e6} = & (-1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 \\
& - \theta_3 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 \\
& + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 1.21 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) \\
& + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6)) F_y + (-1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) \\
& - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) - 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) \\
& + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_4) + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
& + 1.21 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 \\
& + \theta_1 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_2 - \theta_3 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \sin(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_1) + 2.41 \cdot 10^{-2} \sin(\theta_1 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6)) F_x \\
& + (-2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) - 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 + \theta_3 \\
& + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) - 4.83 \cdot 10^{-2} \cos(\theta_2 \\
& + \theta_3 + \theta_5 + \theta_6) + 2.41 \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_4 - \theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3) + 2.41 \\
& \cdot 10^{-2} \cos(-\theta_5 - \theta_6 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) F_z
\end{aligned}$$



R100 KV90 R

maximum diameter of shaft shoulder : $\Phi 50$

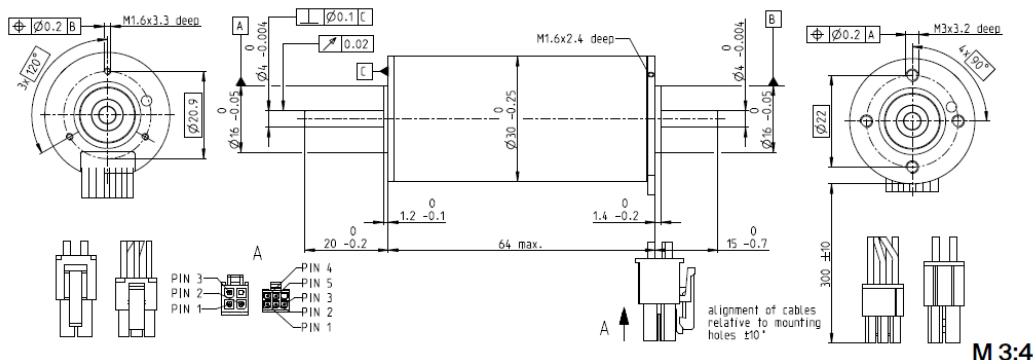
Weight(g)	731	K_e (V/rpm)	0.0111
Voltage(V)	48	K_m (Nm/√w)	0.47
Rated Torque(Nm)	3.7	Number of Pole-Pair	21
Peak Torque(Nm)	11	Resistance Phase to Phase(mΩ)	51
Max Speed@Rated Torque(rpm)	3800	Inductance Phase to Phase(uH)	33
Rated Current(A)	35	OD(mm)	$\Phi 106.8$
Peak Current(A)	104	Height(mm)	40.5
K_t (Nm/A)	0.106	Max torque weight ratio(Nm/kg)	16.4
K_v (RPM/V)	90		



EC-i 30

EC-i 30 Ø30 mm, brushless, 75 watt

High Torque



EC-i

M 3:4

- Stock program
 □ Standard program
 ■ Special program (on request)

Part Numbers

	with Hall sensors	539485	539486	539487	539488	539489
Motor Data (provisional)						
Values at nominal voltage						
1 Nominal voltage	V	12	18	24	36	48
2 No load speed	rpm	7940	7950	7950	7950	8210
3 No load current	mA	447	298	223	149	117
4 Nominal speed	rpm	6760	6840	6870	6890	7150
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	108	110	107	110	104
6 Nominal current (max. continuous current)	A	7.32	4.97	3.64	2.48	1.83
7 Stall torque ¹	mNm	1460	1770	1800	1970	1910
8 Stall current	A	102	82.5	63.1	46	34.6
9 Max. efficiency	%	87.3	88.5	88.6	89	88.8
Characteristics						
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.118	0.218	0.38	0.782	1.39
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.0975	0.219	0.39	0.877	1.46
12 Torque constant	mNm/A	14.3	21.4	28.6	42.9	55.4
13 Speed constant	rpm/V	668	446	334	223	173
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	5.5	4.54	4.45	4.07	4.33
15 Mechanical time constant	ms	0.893	0.736	0.722	0.66	0.702
16 Rotor inertia	gcm ²	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5

Specifications

- 17 Thermal resistance housing-ambient 9.01 K/W
 18 Thermal resistance winding-housing 2.46 K/W
 19 Thermal time constant winding 32.7 s
 20 Thermal time constant motor 1090 s
 21 Ambient temperature -40...+100°C
 22 Max. winding temperature +155°C

Mechanical data (preloaded ball bearings)

- 23 Max. speed 10000 rpm
 24 Axial play at axial load < 9.0 N 0 mm
 > 9.0 N 0.14 mm
 25 Radial play preloaded 5 N
 26 Max. axial load (dynamic) 98 N
 27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported) 1300 N
 28 Max. radial load, 5 mm from flange 25 N

Other specifications

- 29 Number of pole pairs 4
 30 Number of phases 3
 31 Weight of motor 242 g

Values listed in the table are nominal.

Connection motor (Cable AWG 20)

- red Motor winding 1 Pin 1
 black Motor winding 2 Pin 2
 white Motor winding 3 Pin 3
 N.C. Pin 4

Connector Article number

- Molex 39-01-2040
 Connection sensors (Cable AWG 26)

- yellow Hall sensor 1 Pin 1
 brown Hall sensor 2 Pin 2
 grey Hall sensor 3 Pin 3
 blue GND Pin 4
 green V_{hall} 4.5...24 VDC Pin 5
 N.C. Pin 6

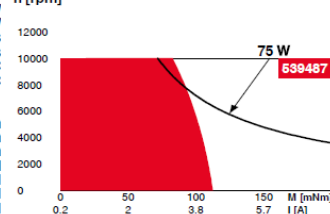
Connector Article number

- Molex 430-25-0600
 Wiring diagram for Hall sensors see p. 59

¹ Calculation does not include saturation effect (p. 71/178)

Operating Range

n [rpm]



Comments

■ Continuous operation
 In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
 = Thermal limit.

□ Short term operation
 The motor may be briefly overloaded (recurring).

— Assigned power rating

maxon Modular System

Planetary Gearhead

Ø32 mm

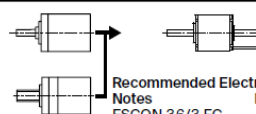
1.0-6.0 Nm

Page 269

Screw Drive

Ø32 mm

Page 426-434



Recommended Electronics:

Notes Page 42

ESCON 36/3 EC 501

ESCON Mod. 50/4 EC-S 501

ESCON Mod. 50/5 501

ESCON Mod. 50/8 (HE) 502

ESCON 50/5 503

DEC Module 50/5 505

EPOS4 Micro 24/5 509

EPOS4 Mod./Comp. 50/5 510

EPOS4 Comp. 24/5 3-axes 511

EPOS4 Mod./Comp. 50/8 511

EPOS4 50/5 515

EPOS4 70/15 515

EPOS2 P 24/5 520

Details on catalog page 42

Encoder 16 EASY/XT

128-1024 CPT, 3 channels

Page 465/467

Encoder 16 EASY Absolute/XT

4096 steps

Page 469/471

Encoder 16 RIO

1024-32768 CPT, 3 channels

Page 482

Encoder AEDL 5810

1024-5000 CPT, 3 channels

Page 485

Encoder HEDL 5540

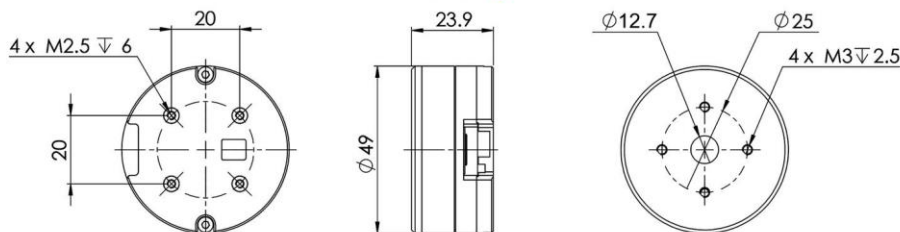
500 CPT, 3 channels

Page 492

RMD-L-5005-35T

INSTALLATION DRAWING

尺寸安装图



PRODUCT PARAMETERS

产品参数

产品型号	[Item Name]	RMD-L-5005-35T
额定电压	[Nominal Voltage] V	16
额定电流	[Nominal Current] A	1.67
额定扭矩	[Nominal Torque] N.M	0.13
额定转速	[Nominal Speed] rpm	1360
最大空载转速	[Max Speed] rpm	1970
最大瞬时扭矩	[Max Instant Torque] N.M	0.42
最大瞬时电流	[Max Instant Current] A	5
线电阻	[Line Resistance] Ω	2
接线方式	[Wire Connect]	Y
相间电感	[Phase to Phase Inductance] mH	0.65
转速常数	[Speed Constant] rpm/v	123
扭矩常数	[Torque Constant] N.M/A	0.08
转子惯量	[Rotor Inertia] gc m²	136
极对数	[Number of Pole Pairs]	14
电机重量	[Motor Weight] g	92
工作温度范围	[Working Temperature] °C	(-20 ~ 80 °C)
最高退磁温度	[Max Demagnetize Temperature] °C	120°C
适配驱动器 Matched Driver		适配驱动器 Matched Driver
适配驱动类型	[Drive]	DRC06
驱动器输入电压范围	[Input Voltage] V	8~24
驱动器电流范围	[Current] A	Normal : 5A Instant: 8A
额定功率	[Normminal Power] W	100
通信方式	[Communication]	RS-485 /CAN BUS
编码器精度	[Encoder]	14-bit magnetic encoder
波特率	[Baut Rate]	9600、19200、57600、115200(default)
通信频率	[Communication frequency]	CAN BUS @1MBPS: 2KHZ ; RS485@ 115200BPS:500HZ
控制频率	[Control frequency]	Torque loop:24KHZ / Speed loop:8KHZ / Position loop :4KHZ
控制模式	[control mode]	Torque loop(current loop) / speed loop/position loop
加速度曲线	[S-Curve]	YES
地址选择开关	[ID switch]	YES
接插件	[connector]	ZH1.5 /6PIN
温度传感器	[connector]	YES

MOTOR CHARACTERISTIC CURVE

电机特性曲线

