



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**PROTON DEĞİŞİMLİ
MEMBRAN YAKIT PİLİ
TAHRİKLİ BİR OTOMATİK
YÖNLENDİRMELİ ARACIN
PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU
TABANLI YÖRÜNGE TAKİP
PERFORMANSI**

Mehmet DEMİROK

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2022





**PROTON DEĞİŞİMLİ MEMBRAN YAKIT PİLİ TAHRİKLİ BİR
OTOMATİK YÖNLENDİRMELİ ARACIN PARÇACIK SÜRÜ
OPTİMİZASYONU TABANLI YÖRÜNGE TAKİP PERFORMANSI**

Mehmet DEMİROK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OCAK 2022

Mehmet DEMİROK tarafından hazırlanan “Proton Değişimli Membran Yakıt Pili Tahrikli Bir Otomatik Yönlendirmeli Aracın Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Yörünge Takip Kontrolü” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Hakan DEMİR

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Başkan: Doç. Dr. Ahmet Çağdaş SEÇKİN

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa İNCİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

TezSavunmaTarihi: 17/01/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Yükseköğretim Kuruluna gönderilen kopya ile tarafından Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'ne verilen basılı ve/veya elektronik kopyaların birebir aynı olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Mehmet DEMİROK

...../...../.....

PROTON DEĞİŞİMLİ MEMBRAN YAKIT PİLİ TAHRİKLİ BİR OTOMATİK
YÖNLENDİRMELİ ARACIN PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU TABANLI
YÖRÜNGE TAKİP PERFORMANSI
(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet DEMİROK

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Otomatik yönlendirmeli araçlar (OYA), bir tesisteki malzemeleri taşımak için programlanmış sürücüsüz ve mobil araçlardır. Çalışanların eksikliklerini telafi etmek, işçilik maliyetlerini düşürmek ve depo verimliliğini arttırmak için birçok sektördeki depo ve malzeme aktarımı uygulamalarında kullanılırlar. OYA'lar, taşınan yüklerle insan etkileşimlerini en aza indirerek işlem sürecinde malların hasarını ve endüstriyel kazaları önemli ölçüde azaltmaktadır. OYA'larda mobil çalışmayı mümkün kılmak için enerjiyi depolayan ve bunu istenen oranda mekanik dönme veya öteleme enerjisine dönüştüren güç sistemleri bulunmaktadır. Bu güç sistemleri enerji depolayan bataryalar ve bataryadan enerji alıp mekanik enerjiye dönüştüren motorları içermektedir. Boyutuna bakılmaksızın, mobil robotlar, yeniden batarya dolumu yapmadan önce sahada faydalı bir çalışma süresi elde etmek için yeterli miktarda enerji taşımalıdır. Enerjisel özerklik olarak bilinen bu kavram, faydalı bir süre çalışabilme yeteneği ve harici bir güç kaynağından bağımsız çalışabilme yeteneği olarak iki kriter içermektedir. Bu amaçla bir mobil robot çeşidi olan OYA'ların çalışması için bu çalışmada alternatif enerji kaynaklı tahrik sistemi üzerinde durulmuş olup yakıt pili tahrikli bir OYA tasarımı ve analizleri yapılmıştır. Yakıt pilleri hidrojeni yakıt olarak kullanıp, enerji üreten alternatif bir enerji kaynağı olarak OYA'lar için daha uzun çalışma süresi avantajını sağlamaktadır. Bu çalışmada, ilk olarak istenen isterleri karşılayacak ve yük taşımaya müsait ortamı oluşturacak modüler bir OYA tasarımı gerçekleştirilmiştir. 4 adet mecamum tekerleğe ve bu tekerlekleri tahrik edecek 4 adet DC motora sahip sistemin taşıyabileceği yük kapasitesinin belirlenmesi için yapısal analizler ve sistemin mukavemeti üzerine geliştirmeler yapılarak nihai tasarım elde edilmiştir. Ek olarak, tasarımı yapılan OYA'nın global koordinat sisteminde ve her bir tekerlek için oluşturulan koordinat sisteminde kinematik modeli oluşturulup OYA için ve her bir tekerlek için lineer hız ve açısal hız değişimlerini kullanarak Newton mekaniği ve Lagrange enerji denklemleri ile bu hız değişimlerinden yararlanıp sistemin kinematik modeli, dinamik modeli ve DC motor modeli elde edilmiştir. Bu modellerle beraber batarya sistemi olarak kullanılacak olan PEM yakıt pili modeli de oluşturulup elde edilen genel sistem modeliyle sistemin belirli bir yörüngeyi gerçek zamanlı takibi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Otomatik yönlendirmeli araç(OYA), modelleme, yakıt hücresi, analiz, parçacık sürü, optimizasyon
Sayfa Adedi : 77
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Hakan DEMİR

PARTICLE SWARM OPTIMIZATION BASED TRAJECTORY TRACKING
CONTROL OF A PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL DRIVEN
AUTOMATED GUIDED VEHICLE
(M. Sc. Thesis)

Mehmet DEMİROK

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2022

ABSTRACT

Automatic guided vehicles (AGV) are driverless, mobile vehicles programmed to transport materials in a facility. They are used in many warehouse and material transfer applications in many industries to compensate for employee deficiencies, reduce labor costs and increase warehouse efficiency. AGVs significantly reduce the damage of goods and industrial accidents during the process by minimizing human interactions with the transported loads. AGVs have power systems that store energy to make mobile work possible and convert it into mechanical rotation or displacement energy at the desired rate. These power systems include batteries that store energy and motors that take energy from the battery and convert it into mechanical energy. Regardless of their size mobile robots must carry enough energy to achieve useful uptime in the field before re-charging the battery. This concept, known as energetic autonomy, includes two criteria: the ability to operate for a useful period of time and the ability to operate independently of an external power source. For this purpose, for the study of AGVs, a type of mobile robot, this study focused on an alternative energy-derived drive system, and the design of a fuel cell-driven AGV and analysis of this AGV were performed. Fuel cells use hydrogen as a fuel and provide the advantage of a longer working time for AGVs as an alternative energy source that generates energy. In this study, firstly a modular AGV design that will meet the desired requirements and create an environment suitable for carrying loads has been realized. Structural analyzes were made to determine the load capacity of the system, which has mecanum wheels and DC motors to drive these wheels, and the final design was achieved by improving the strength of the system. In addition, the kinematic model was created in the global coordinate system of AGV and the coordinate system created for each wheel and the kinematic model of the system, dynamic model and Lagrange energy equations using linear velocity and angular velocity changes for the AGV and for each wheel. Along with these models, the PEM fuel cell model, which will be used as a battery system, was also created and real-time tracking of the system's specific trajectory was performed using the overall system model obtained.

Key Words : Automated guided vehicle(AGV), modelling, fuel cell, analysis, particle swarm, optimization
Page Number : 77
Supervisor : Assist Prof. Dr. Mehmet Hakan DEMİR

TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü derslerimde ve çalışmalarımda tavsiyelerini, maddi-manevi yardımlarını, bilimsel katkılarını ve hiçbir zaman desteğini eksik etmeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Hakan DEMİR'e, tez çalışmam boyunca değerli bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen Ar. Gör. Dr. Berkay EREN'e ve Bilg. Müh. Mustafa ASANA hocama teşekkürlerimi sunarım.

Lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca bilgi alışverişinde ve destekte bulunduğumuz değerli arkadaşlarım Alican KAZMACI, Salih KUNDUZ, Zakaria ATWANY ve Ahmet TİNTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi her zaman yanımda olan, desteklerini her daim gösteren başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	6
2.1. Literatürde OYA’larda ve Mobil Robotlarda Yörünge Kontrolü.....	6
2.2. Literatürde Hidrojen Yakıt Pili Modellenmesi ve Simülasyonu.....	12
3. ARACIN TASARIMI VE YAPISAL ANALİZLERİ.....	16
3.1. Aracın Tasarımı ve Araç Özellikleri.....	16
3.2. Aracın Yapısal Analizleri.....	20
4. OYA ’NIN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU.....	25
4.1. Kinematik Model.....	25
4.2. Dinamik Model.....	27
4.3. DC Motor Modeli.....	37
4.4. PEM Yakıt Pili Modeli.....	40
4.5. DC/DC Buck Dönüştürücü Modeli.....	43
4.6. PID Denetleyici Sistemler.....	46
4.7. Parçacık Sürü Algoritması (PSO) ve PID Uygulaması.....	47

	Sayfa
4.7.1. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO).....	47
4.7.2. PSO algoritmasının PID uygulaması.....	49
4.7.3. PSO'nun aracın ve DC/DC dönüştürücü kontrolcülerine uygulanması....	50
4.8. Simülasyon Çalışmaları.....	52
4.8.1. Yörünge takip performansı.....	52
4.8.2. DC/DC buck dönüştürücülerin giriş ve çıkış gerilimi takip performansı...	58
4.8.3. Yakıt pili performans analizi.....	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	68
KAYNAKLAR.....	70
DİZİN.....	76

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Ana gövde çelik malzeme özellikleri.....	21
Çizelge 3.2. Mesh özellikleri.....	21
Çizelge 3.3. Birimler.....	21
Çizelge 4.1. Dinamik model parametreleri ve değerleri.....	36
Çizelge 4.2. Dc motor modeli parametreleri ve değerleri.....	39
Çizelge 4.3. Yakıt pili özellikleri.....	43
Çizelge 4.4. Pid denetleyicilerin optimizasyonu için üst ve alt sınırlar.....	51
Çizelge 4.5. Pso optimizasyonu ile elde edilen pid değerleri.....	51
Çizelge 4.6. Dc/dc buck dönüştürücülerin optimizasyonu için üst sınır ve alt sınırlar...	51
Çizelge 4.7. Pso optimizasyon algoritması ile elde edilen dc/dc buck dönüştürücü parametreleri.....	52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. a)Araç ön görünüm, b)araç yan görünüm, c)araç üst görünüm, d)araç perspektif görünüm.....	16
Şekil 3.2. Oya mekanik donanımda kullanılan mecanum tekerlek.....	17
Şekil 3.3. Mecanum tekerleklerin dönme yönleri ve bu dönme yönlerine bağlı olarak aracın hareket yönlerinin gösterimleri.....	17
Şekil 3.4. Oya mekanik donanımda kullanılan redüktörlü dc motor.....	18
Şekil 3.5. Oya çeşitli sistem parçalarının görünümü.....	19
Şekil 3.6. Dokunmatik panel ve bazı sensörlerin araçtaki görünümleri.....	20
Şekil 3.7. a) Aracın global temas görünümü b) statik analiz uygulanan parçaların model referans görünümü.....	21
Şekil 3.8. Aracın toplam ağırlığının etkiyeceği alan.....	22
Şekil 3.9. 1 kg , 10 kg, 100 kg ve 850 kg yük uygulanan taşıyıcı alan.....	22
Şekil 3.10. a)1 kg'lık yük ile motor milinde oluşan maximum ve minimum gerilme değerleri b) 1 kg'lık yük ile oluşan yer değiştirme değeri.....	23
Şekil 3.11. a) 10 kg'lık yük ile motor milinde oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri b) 10 kg'yük ile oluşan yer değiştirme değeri.....	23
Şekil 3.12. a) 100 kg'lık yük ile motor milinde oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri b) 100 kg'lık yük ile oluşan yer değiştirme değeri.....	24
Şekil 3.13. a) 850 kg yük ile motor milinde oluşan maximum ve minimum gerilme değerleri b) 850 kg yük ile oluşan yer değiştirme değeri.....	24
Şekil 4.1. Oya iki boyutlu koordinat sistemi görünümü.....	25
Şekil 4.2. 1. ve 3. tekerleklere gelen kuvvetler	29
Şekil 4.3. 2. ve 4. tekerleklere gelen kuvvetler	29
Şekil 4.4. Dinamik matlab/simulink blok modeli.....	35
Şekil 4.5. Dinamik subsystem model görünümü.....	35
Şekil 4.6. Konum-hız matlab/simulink blok modeli.....	36
Şekil 4.7. Armatürün elektrik eşdeğer devresi ve dc motorun serbest gövde diyagramı	37

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Dc motor modeli Matlab/Simulink blok görünümü.....	39
Şekil 4.9. Pem yakıt pili çalışma prensibi	40
Şekil 4.10. Pem yakıt pilinin kayıp eğrisi.....	40
Şekil 4.11. Yakıt pili matlab/simulink blok model görünümü.....	43
Şekil 4.12. Dc/dc buck dönüştürücü matlab/simulink blok modeli.....	45
Şekil 4.13. Pid denetleyici genel blok şeması.....	46
Şekil 4.14. Pid kontrol matlab/simulink blok modeli.....	47
Şekil 4.15. Pso algoritmasının adım şeması.....	49
Şekil 4.16. Pso'nun pid üzerinde uygulanması.....	50
Şekil 4.17. Aracın referans spiral rotayı takip performansı.....	53
Şekil 4.18. Aracın x eksenindeki yörüngeyi takip hatası.....	54
Şekil 4.19. Aracın y eksenindeki yörüngeyi takip hatası.....	54
Şekil 4.20. a) Aracın β açısının referans ve anlık karşılaştırılması b) β açısının takip hatası.....	55
Şekil 4.21. Birinci tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata.....	56
Şekil 4.22. İkinci tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata.....	56
Şekil 4.23. Üçüncü tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata.....	57
Şekil 4.24. Dördüncü tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata.....	57
Şekil 4.25. Aracın x yönündeki referans ve gerçek hızının karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.26. Aracın y yönündeki referans ve gerçek hızının karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.27. Birinci motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı.....	59
Şekil 4.28. İkinci motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı.....	60

Şekil	Sayfa
Şekil 4.29. Üçüncü motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı.....	61
Şekil 4.30. Dördüncü motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı.....	62
Şekil 4.31. Yakıt pilinin yığın gerilim-akım ve yığın gücü-akım karakteristikleri.....	63
Şekil 4.32. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinin çıkış geriliminin zamana göre değişimi.....	64
Şekil 4.33. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinin çıkış akımının zamana göre değişimi.....	64
Şekil 4.34. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinin çıkış gücünün zamana göre değişimi.....	65
Şekil 4.35. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinde tüketilen hava ve yakıt miktarlarının zamana göre değişimi.....	66
Şekil 4.36. Oya'nın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinde tüketilen a) yakıt b) hava besleme debilerinin zamana bağlı değişimi.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve kısaltmalar açıklamalarıyla birlikte aşağıda verilmiştir.

Simgeler

Simgeler	Açıklamalar
mm	Milimetre
sn	Saniye
kg	Kilogram
N	Newton
K	Kelvin
Rad	Radyan
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp

Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklamalar
AB	Avrupa Birliği
AGV	Automatic Guided Vehicles
DC	Doğru Akım
OYA	Otomatik Yönlendirmeli Araçlar
PEM	Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi
PID	Oransal-Integral-Türevsel
SI	Uluslararası Birim Sistemi
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu

1. GİRİŞ

Genel Bakış

Endüstri 4.0 ile birlikte gelişen teknolojik faaliyetler, üretimde ve üretime bağlı lojistikte, zamandan tasarruf, malzeme kaybını en aza indirmek, maliyeti düşürmek, iş işleyişini daha otomatik hale getirmek gibi nedenlerden yeni çalışmalar ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalardan biri olan Otomatik Yönlendirmeli Araçlar (OYA), insan müdahalesi olmadan, çalışma alanındaki belirlenen yörüngeyi takip eden, işletme özelliklerine bağlı olarak, malzeme yükleme, malzeme taşıma, malzeme boşaltma, malzeme istifleme gibi farklı işlerde kullanılan otonom araçlardır. Örneğin; Toyota otomobil fabrikalarında kullanılan Otomatik yönlendirmeli araçlar (OYA) yıllık 1 milyon dolar üzerinde tasarruf sağlamakta, fabrika içinde insanlar tarafından kat edilen yolu 1574 kilometre azaltmakta, her nakliye turunda insana göre 35 saniye daha az sürede turunu tamamlayarak iş süresine katkı sağlamaktadırlar. [1]

Otomatik Yönlendirmeli Araç Tipleri

İnsan müdahalesi olmadan otonom hareket yapan Otomatik Yönlendirmeli Araçların(OYA) birçok çeşidi vardır. Bunlar Forklift OYA, Çekici Tipi OYA, Birim Yük Taşıyıcı OYA, Ağır Yük Taşıyıcı OYA ve Mobil Robotlar olarak sınıflandırılabilir.

Forklift OYA;

Forklift tipi Otomatik Yönlendirmeli Araçlar yaygın olarak kullanılan bir OYA türüdür. İnsan müdahalesiyle kullanılan standart forkliftin gerçekleştirdiği görevlerin aynısını insan müdahalesi olmadan yapabilmesi şeklinde tasarlanmıştır. Bir fabrikada, depoda veya herhangi bir iş alanında paletlerin veya malzemenin taşınması ve istiflenmesi işlevini gerçekleştirir. Maksimum verimlilik alabilmek için taşınan malzeme boyutunun ve ağırlığının, aracın taşıma kapasitesinin üzerinde olmaması gerekmektedir.

Çekici Tip OYA;

Sürücüsüz trenler olarak adlandırılan çekici tipi OYA'lar, insan müdahalesi olmadan, kendi arkasına bağlanan bir veya birden fazla römorku ya da vagonu çeken bir Otomatik

Yönlendirmeli Araç tipidir. Bu tip OYA'ların arkasına bağlanan römork ve vagonların da kendisine ait tekerlekleri vardır. Bir çekici tipi OYA'nın bir fabrika veya bir iş alanında izlemesi gereken yol boyunca birden fazla yerde duraklama ve bu duraklarda malzeme boşaltma, malzeme yükleme gibi işlevleri gerçekleştirmesi mümkündür. Genellikle ağır ve boyutu büyük yükleri daha uzun mesafelere taşımak için kullanılırlar.

Birim Yük Taşıyıcı OYA;

İsminden de anlaşılacağı gibi tek bir nesneyi veya birden çok nesne içeren bir paleti, bir kutuyu sadece belirlenen birime taşıyan Otomatik Yönlendirmeli Araç türüdür. Birim yük taşıyıcı OYA yalnızca malzeme taşıyacağı birimler arasında görev yapmaktadır.

Ağır Yük Taşıyıcı OYA;

Normal bir Otomatik Yönlendirmeli Araç veya insan tarafından kontrol edilen bir araç için taşınması zor olan en ağır yükleri taşıyan bir OYA tipidir. Standart bir ağır yük taşıyıcı OYA, metal levha, metal rulo, döküm malzemeleri, büyük montaj malzemeleri gibi ağır yükleri taşımaktadır. Ayrıca bu tip OYA'lar çok yönlü direksiyona sahip olabileceğinden dolayı, taşıyacağı malzemeyi kendi kendine yükleme ve boşaltma işlevi gerçekleştirebilmektedir.

Mobil Robotlar;

Standart Otomatik Yönlendirmeli Araçlara göre teknolojik anlamda daha gelişmiş olan mobil robotlar, üzerinde çeşitli sensörler, kamera sistemleri, navigasyon sistemleri bulunan bir Otomatik Yönlendirmeli Araç tipidir. Üzerinde bulunan sistemler ve sensörler sayesinde engelleri algılayan, etrafta rahatça gezinebilmelerini sağlayan akıllı navigasyon yetenekleriyle birlikte verilen görevleri yerine getirebilmektedirler. Gelişmiş teknolojik donanıma sahip mobil robotlar çalışılan iş alanında dinamik olarak en verimli yolları planlayarak, kendisinden beklenen görevleri yerine getirmesi beklenir. [2]

Otomatik Yönlendirmeli Araç Avantaj ve Dezavantajları;

Otomatik yönlendirmeli araçlar genellikle yapılması kolay işleri insanlar yerine yapabilen basit mobil robotlardır. Ancak otomatik yönlendirmeli araçlar tüm işletmeler ve görevler için uygun olmamaktadır. Bu yük taşıyan ve basit işleri yapan mobil robotların bu işleri

gerçekleştirirken personel, işletme, çalışılan alan ve görevler açısından avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.[3]

Avantajları;

- İşçilik maliyetlerinin az olması

Bir iş için personel yerine kullanılan otomatik yönlendirmeli araçlar, işletmeye tek bir alım masrafı ve bakım masrafına neden olmaktadır. Aynı iş için çalışacak personelin ise maaş, sigorta gibi her ay ödenmesi gereken bir maliyeti olduğundan dolayı otomatik yönlendirmeli araçlar işçilik maliyetini ciddi anlamda azaltmaktadır.

- Yüksek güvenli olması

İnsan kontrolünde çalışan forklift ve bu benzeri araçlar güvenli bir yapıya sahip olmamakla birlikte insan kontrolünde olduğu için çalışılan durum tehlikeye yol açabilmektedir. Otomatik yönlendirmeli araçlar yapısında bulundurduğu kameralar, sensörler ve lazerler sayesinde çalışılan alandaki yapılar ve personel açısından yüksek güvenli bir şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca taşınan veya istiflenen malzemenin güvenliği de ön plandadır.

- Yüksek verimlilik

İnsan unsurunu ortadan kaldırarak işi sadece otomatik yönlendirmeli araçların yaptığı varsayılırsa hata oranı çok yüksek seviyelerde azalmaktadır. Bu hata payındaki azalma yapılan işin en verimli olması demektir. Çalışılan zaman da göz önünde bulundurulursa insanın gün içerisinde çalışma kapasitesi belli iken otomatik yönlendirmeli araçlar günün tamamı çalışabilir. Bu da hata payının azaltılmasında artan verim gibi verimliliği arttırmaktadır.

- Modüler Olması

İşletmede bir süre sonra yapılacak iş kapasitesi arttıkça, bu iş kapasitesine uygun yeni otomatik yönlendirmeli araç eklenerek, işletme verimliliği ve iş kapasitesi artırılabilir. Tek

seferde çok otomatik yönlendirmeli araç olarak toplu bir maliyete gerek olmamaktadır. İş hacmine göre yeni eklemeler yapılarak daha potansiyelli bir süreç yönetilebilmektedir.

Dezavantajları;

- Yüksek ilk yatırım

İşletme işçilik maliyetini azaltmak ve daha üretken bir iş potansiyeli oluşturmak için ilk yatırımda otomatik yönlendirme araçlardan birden fazla almak zorunda kalır ve bu da işletmenin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması demektir. Uzun vadede avantaj sağlamasına rağmen bu yüksek yatırım maliyeti o yatırım yapılan zaman için bir personel masrafından daha pahalı görünecektir. Küçük işletmeler ve ilk yatırımı yapamayacak sermayesi olmayan işletmeler için bu bir dezavantajdır.

- Bakım onarım maliyeti

Bütün makinelerde olduğu gibi otomatik yönlendirmeli araçlarda da bir bakım ve onarım masrafı vardır. Ayrıca bakım ve onarım yapılan otomatik yönlendirmeli aracın bu bakım onarım süresince çalışmaması da işletme için bir dezavantajdır.

- Sürekli olmayan işler için uygun olmaması

Otomatik yönlendirmeli araçlar sürekli olarak tekrarlayan işler için uygun mobil robotlardır. Ancak işletme içerisinde tekrarlamayan bir iş olduğunda pek uygun bir araç değildir. Tekrarlamayan işlerde personelin kullanılması otomatik yönlendirmeli araca göre daha avantajlı olmaktadır.

- Durum müdahale eksikliği

Yapılan iş esnasında olağanüstü bir durum olduğunda o duruma maruz kalan personel müdahale yeteneğine sahip iken, otomatik yönlendirmeli araçlar bu olağanüstü duruma müdahale yeteneğine sahip olmadan programlanmıştır. Bu o an oluşacak olağanüstü duruma müdahale edemeyen otomatik yönlendirmeli araçlar yapılan görev için ve işletme için dezavantaj oluşturmaktadır.

Tez Organizasyonu:

Bu tez çalışmasında, Cad-Cam ortamında tasarımı ve yapısal analizi yapılmış dört mecanum tekerlekli ve yakıt pili tahrikli otomatik yönlendirmeli bir aracın yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, simülasyon çalışmasında kullanılan kontrolcülerin ve DC/DC dönüştürücülerin indüktans, kapasitans ve direnç değerleri PSO algoritması ile belirlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde yapılan çalışma ile ilgili literatür taraması iki kısımda incelenmiştir. İlk kısımda OYA'ların ve mobil robotların yörünge kontrolü ve modellenmesiyle ilgili çalışmalar, diğer kısımda ise yakıt pilinin kullanımı, modellenmesi ve simülasyonu ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde Solidworks programında OYA'nın tasarımı yapılmış ve yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapısal analiz sonuçları irdelenmiştir. Tasarımda mekanik donanım, elektriksel parçalar ve yakıt pili sistemi bulunmaktadır. Tasarımda kullanılan donanım ve parçaların bazıları tanıtılmıştır. Tasarımın yapısal analiz kısmı ise sadece mekanik donanım üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünde ise OYA'nın modellenmesi ve simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Kinematik model, dinamik model, DC motor modeli, yakıt pili modeli, DC/DC dönüştürücü modeli ve kontrol sistemi modeli Matlab/Simulink blokları kullanılarak oluşturulmuştur. Kinematik model ve dinamik model, OYA'nın iki boyutlu global koordinat sisteminden ve mekanik-enerji denklemlerinden faydalanılarak oluşturulmuştur. DC motor modeli ve yakıt pili modeli, motor model denklemleri ve yakıt pili denklemleri kullanılarak oluşturulmuştur. DC/DC dönüştürücü modeli ve kontrol sistemi modeli de simulink bloklar ile oluşturulmuştur. Simülasyonda kullanılan kontrol parametreleri ve DC/DC dönüştürücü için gerekli parametreler PSO algoritması ile bulunmuştur. Oluşturulan modeller ve kontrol parametreleri kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

Son olarak beşinci bölümde tüm çalışmanın sonuçlar özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasının literatür araştırması; OYA'ların ve mobil robotların kontrolü, modellenmesi ve güç sistemlerinin geliştirilmesiyle ilgili iki farklı araştırma alanı oluşturularak yapılmıştır. Literatür araştırması yapılırken günümüzden geçmiş yıllara doğru gidilmiştir.

2.1. Literatürde OYA'larda ve Mobil Robotlarda Yörünge Kontrolü

Teknolojik gelişmelerle birlikte tüketim talebini daha hızlı karşılamak ve üretim verimliliğini arttırmak için üretim ve üretimin devamı olan sistemlerin daha otomatik hale getirilmesi bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu otomatik sistemlerin bir parçası olan mobil robotların ve OYA'ların geliştirilmesi ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle mobil robotlar ve OYA'larla ilgili 1950'li yılların başından başlayarak günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları OYA'ların ve mobil robotların güç sistemleri, kontrol sistemleri, kontrol sistemlerinin optimizasyonu, pozisyonlanması, hareket kabiliyetinin geliştirilmesi, modellenmesi ile ilgili çalışmalardır.

Hassan M. Alwan 2020 yılında, bir mobil robotun kinematik ve dinamik hesaplamaları ve ortaya çıkan bu kinematik ve dinamik modellerin simülasyon çalışmaları ile yörünge kontrolünü gerçekleştirmiştir. Çalışmalarının sonucu olarak, tekerlek torklarının, robotun platform hızı ve yörünge takibi üzerindeki etkileri gözlenmiş ve küçük hatalar dışında yörünge kontrolünü başarıyla uygulamıştır. [4]

Zhe Sun, Hao Xie ve arkadaşları 2020 yılında, tasarladıkları mobil robotta kullandıkları mecanum tekerlekler sayesinde üstün hareketlilik ve manevra kabiliyeti ve farklı denetleyicilerle doğru pozisyonlamayı ve yörünge kontrolünü hedeflemişlerdir. Geleneksel kayan tipli bir denetleyiciyle kontrol ve pozisyonlama açısından belirgin bir üstünlük ve doğruluk elde etmişlerdir. [5]

Musa Matlı, Ahmet Albayrak ve Raif Bayır 2020 yılındaki çalışmalarında mecanum tekerlekli bir mobil robotun kinematik ve dinamik analizleri ile lazer mesafe sensörü kullanarak bulanık mantık ve boşluk takibi yöntemiyle engelden kaçmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada ilk olarak engelin yerinin tespiti yapılmış, ikinci olarak engele olan mesafe

hesaplanmış, son olarak ise mobil robot ile engel arasında açığı bulunmuş ve bu şekilde engelde kaçınma kontrolü gerçekleştirilmiştir. [6]

Abdulrahman Alhalabi ve arkadaşları 2020 yılındaki çalışmalarında mecanum tekerleklerle entegre ettikleri yüksek hassasiyetli kodlayıcılar ve ana şasiye yerleştirmiş oldukları dört ivmeölçerli bir mobil robot için oluşturdukları algoritmayla aracın yol izleme kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarında, küçük hatalar dışında başarılı bir yol izleme performansı ile mecanum tekerleklerin kaymasının engellenmesinde başarı sağlamışlardır. [7]

Cuneyd Demir ve Mustafa Bozdemir 2019 yılındaki çalışmalarında, yüksek manevra yeteneği nedeniyle seçtikleri Swedish yani mecanum tekerlekleri kullanarak ürettikleri bir mobil robotun arduino ile kontrolünü sağlamışlardır. Çalışmada seçilen mecanum tekerlekler ve robotun ana platformu üç boyutlu yazıcıyla üretilmiştir. Özel tasarıma sahip olan mecanum tekerlekler sayesinde dönüş yeteneklerinin artırılması hedeflenmiştir. Sonuç olarak, birçok farklı zemin üzerinde rahatça hareket edebilen, yüksek manevra yeteneğine sahip bir mobil robot üretmişlerdir. [8]

Gökhan Bayar ve Salih 2020 yılındaki çalışmalarında mecanum tekerlekli mobil robotun zeminle temasında, temas yüzeyiyle mecanum tekerleklerin silindirleri arasındaki kuvvetlerin etkilerini, tekli ve çoklu temas kuvvetleri olarak incelemişlerdir. Çalışmada verilerin gerçekliğe uygun olması için bir model kullanılmış ve simülasyonda karşılaştırmaları ile sonuçları incelenmiştir. Sonuç olarak tek temas kuvvetinin dikey titreşim oluşturarak istenmeyen sonuçlar doğurduğu gözlenmiştir. Çoklu temas kuvvetinin ise bu söz konusu istenmeyen etkilerinde tek temaslı kuvvete göre az olduğu izlenmiştir. Ayrıca fazladan temas kuvveti eklenen silindirin, tekerleklerde ve robotta genel titreşime olumlu anlamda katkıda bulunduğu gözlenmiştir. [9]

Igor Zeidis ve Klaus Zimmermann 2019'daki çalışmalarında dört mecanum tekerleği olan holonomik olmayan kısıtlara sahip bir mobil robotun Chaplygin ve Lagrange denklemleri ile Psödoinverse matrisini kullanarak tam hareket denklemi elde ederek yörünge kontrolü gerçekleştirilmiştir. [10]

Veer Alakshendra ve Shital Chiddarwar 2017 yılındaki çalışmasında dört mecanum tekerlekli mobil robot üzerinde yük olarak belirlenen ve taşınması amaçlanan düzlemsel olmayan bir silindirin kontrolsüz bir şekilde yere düşmesini engellemek ve buna bağlı dengeleme ile yörünge kontrolünü gerçekleştirmeye çalışmıştır. Bu çalışmada ilk olarak Newton-Euler metodunu kullanarak mobil robotun üzerindeki silindir ile birlikte bir matematiksel model ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra silindirin düşmesini engellemek için Lyapunov stabilite kanıtı ile iki kontrolcü arasında geçiş yaparak oluşturulan referans yörüngeyi takibi gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen bu yörünge takibiyle birlikte istatistiksel analiz sonuçlarının üstünlüğünü kanıtlamak için PID denetleyiciyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuç olarak silindirin yuvarlanma hareketi silindiri düz bir zeminde ve herhangi hızlarda taşınmanın mümkün olmadığı anlaşılmıştır. Bu düşmeyi engellemek için yapılan yöntem ve yörünge kontrolü ise başarıyla uygulanmış ve uygulanan yöntem lehine sonuçlar elde edilmiştir. [11]

Ebubekir Pekdemirli 2017'deki tez çalışmasında "MBR-01" adlı mobil robotun hem PID hem de Parçacık Sürü Algoritması ile Matlab/Simulink eşdeğer modelinin hız ve konumlarının PID kontrolü gerçekleştirilip, bu iki kontrol mekanizmasının hız ve konum sonuçlarını karşılaştırmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda PID kontrolü ile yatay eksenlerdeki hata oranı %1,83 iken, Parçacık Sürü Algoritmasında bu oran %0,15 olarak görülmüştür. Çıkan sonuçlardan yola çıkarak yapılacak bazı iyileştirmeler sistem kontrolündeki başarı oranının artacağına karar verilmiştir. Bazı iyileştirmeler şöyledir;

- Araç ağırlığının düşürülmesi,
 - Hareketli mekanizmaların kalitesinin artırılması,
 - Mikrodenetleyicideki osilatörün çalışma frekansının değerinin yükseltilmesi
- dir. [12]

Z. Hendzel ve L. Rykala 2017 yılındaki çalışmalarında, dört adet mecanum tekerlek kullandıkları bir mobil robotun, Lagrange denklemi kullanılarak sistemin kinetik enerjisi ve sistemi etkileyen genelleştirilmiş kuvvetler tarafından türetilen dinamik hareket denklemlerini elde etmişler ve elde edilen bu hareket denklemlerini kullanarak yörünge takibini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda ise hem aracın belirlenen referans yörünge üzerinde başarılı bir simülasyonu gerçekleştirilmiş hem de analiz edilen araç için

türetilmiş dinamik hareket denklemlerinin küçük hatalar dışında doğruluğu kanıtlanmıştır. [13]

Yu Shen ve arkadaşları 2016 yılındaki çalışmalarında geleneksel bir Otomatik Yönlendirmeli Aracın global koordinat sistemi ve mecanum tekerleklerin koordinat sistemi altında ortaya çıkarılan hareket denklemleri ile simülasyon tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra gerçekleştirilen simülasyona bağlı olarak, araçta hareketi sağlayan alt birimlerden biri olan step motorun tahrik parametreleri ile birleştirilerek Otomatik Yönlendirmeli Aracın sürüşünün kontrolü yapılmıştır. [14]

Emina Petrovic ve arkadaşları 2016 yılındaki araştırmalarında iki tekerlekli bir mobil robotun kinematik denklemlerle oluşturulan modelini analiz etmiş ve simülasyonu yapılarak yörünge takibini gerçekleştirmişlerdir. Mobil robotta kontrolcü olarak PID kontrolör ve PID denetleyicinin en uygun parametreleri bulması için Parçacık Sürü Algoritması kullanılmıştır. Aracın bu PID denetleyicisinin Parçacık Sürü Algoritmasını kullanarak gerçekleştirdiği biri daire şeklinde, diğeri düz bir yol şeklinde olan iki referans yörüngeyi takibi başarıyla uygulanmıştır. [15]

Maciej Trojnacki ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada PIAP SCOUT adlı dört tekerlekli mobil robotun tipik ofis zemini üzerindeki kontrolünü iki kontrol sistemi konfigürasyonunda gerçekleştirmişlerdir. Birincisi sadece normal tekerlek hızlarının kontrolü, ikincisi yaw oranına bağlı bir denetleyiciyle kontrolüdür. Yaw hızı MEMS jiroskobu ile ölçülmüştür. Mümkün olan yaw hızı kontrolcüsünün, açısal hatayı 90 derecelik dönüş manevrasıyla büyük oranda azalttığı görülmüştür. [16]

Rached Dhaouadi ve Ahmad Abu Hatab'ın 2013 yılındaki çalışmalarında mobil robotlarda navigasyon ve yörünge takibine yardımcı olacak uygun kontrolörlerin modellenmesi ve tasarımının gerçekleştirilmesi için holonomik olmayan diferansiyel tahrikli mobil robotlarda Langrange ve Newton-Euler yönteminden yararlanarak matematiksel ve dinamik modeller elde edilmiştir. Ek olarak tam dinamik model için DC motor aktüatörlerinin hareket denklemleri de eklenmiştir. Sonuç olarak bulunan dinamik modelin, mobil robotlarda navigasyon ve yörünge takibi için uygun olacağı öngörülmüştür. [17]

Özgür Aydın'ın 2012'deki tez çalışmasında bir Otomatik Yönlendirmeli Aracın yörünge kontrolü amaçlanmıştır. Bu yörünge kontrolü iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Birincisinde PI denetleyici kullanılarak ve aracın yörüngesi için gerilim ve araç açısı verilerek, Simulink ortamında oluşturulan blok diyagramlarıyla yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. PD denetleyici kullanılan ikinci çalışmada ise aracın dinamik hareket denklemleri için komutlar oluşturulmuş ve bu komutlarla araca fonksiyonel bir yörünge verilmiş ve referans yörünge ile takip edilen yörünge arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. [18]

Sulabh Kumra, Rajat Saxena ve Shilpa Mehta'ın 2012 yılındaki çalışmalarında temel olarak kodlayıcı kullanılan, her yöne hareketi sağlayan silindirler bulunan dört adet mecanum tekerlekli bir Otomatik Yönlendirmeli Aracın yaklaşık 20 cm/s ve 38 cm/s'de 20 metrelik bir uzaklıktaki yana doğru hareketin lokalizasyon doğruluğunun analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin sonucunda lokalizasyon doğruluğu 20 cm/s için 27.4944 mm ve 38 cm/s için 29.2521 mm olarak bulunmuştur. [19]

Nguyen Hung, Jae Sung Im ve arkadaşları 2010 yılındaki çalışmalarında kinematik model ve sürgülü mod dinamik modelini birleştiren bir kontrol şeması ile Otomatik yönlendirmeli bir aracın belirlenen sabit bir hızda istenilen bir yörüngeyi takibini gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak kinematik kontrolör için hız kontrol girişleri, izleme hatası vektörü kararlı hale getirilmiştir. Daha sonra hareketli robotun hızlarının, hız kontrol girişleri için sürgülü modlu dinamik bir kontrolör tasarlanmıştır. Burada sistemin kararlılığı Lyapunov stabilite yöntemiyle doğrulanmıştır. Ek olarak, hataları ölçmek ve bu hataları gösteren bir şema oluşturmak için USB kamera ile denetleme sistemi olarak PIC mikrodenetleyici kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ve simülasyona bağlı olarak denetleyicinin pratik uygulamalarda uygulanabilir olduğunu göstermiştir. [20]

Nkgatho Tlale ve Mark de Villiers'in 2008'deki çalışmalarında otonom bir mobil robotun çarpışmadan kaçınma, görev başarısı gibi durumlarda en uygun araç hareketini seçmesi için bir matematiksel model geliştirilmesinden bahsedilmektedir. Geliştirilen matematiksel model, bir ofis ortamında optimum otonom kontrol yapan mecanum tekerleklerle sahip mobil robotun kontrolünü sağlamak için kullanılacaktır. Dört mecanum tekerleğe sahip mobil robotun 81 farklı hareket kombinasyonu olduğu elde edilmiştir. Bu hareket kombinasyonlarından 51 tanesi fonksiyonel hareketle sonuçlanmış, diğer 30 hareket

kombinasyonu işlevsel olmayan, düzensiz torklar üreten, hizalanamayan davranışlarda bulunmuştur. Ve bu 30 işlevsel hareket için gelecek çalışmalarda düzeltilebileceği öngörülmüştür. [21]

Jeong-Hyeong Lee ve Seul Jung 2008 yılındaki çalışmalarında, global koordinat sisteminde, kinematik ve dinamik modellerini elde ettikleri üç tekerlekli mobil robotun konum izleme kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada yönlendirme açısının hatasının telafi edilmesi için manyetik pusula kullanılmıştır. [22]

Jakup Cercala ve Anna Jadlovská'nın 2015'deki çalışmalarında diferansiyel tahrikli bir mobil robotun küresel koordinat sisteminde ve yerel koordinat sisteminde matematiksel modeli ile kinematik model ve dinamik modellerden yararlanarak simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Newton yasası kullanılarak elde edilen dinamik modelde düzlemin ve tekerleklerin temas yüzeyleri arasındaki sürtünmede hesaba katılmıştır. Bu elde edilen tüm modellerle açık ve kapalı çevrim simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda dinamik modele eklenen sürtünme kuvveti, genel harekete etki eden kuvvetleri etkilediğinden dolayı mobil robotun son konumunda ciddi bir değişme gözlenmiştir. [23]

N. Leena ve K. K. Saju 2015 yılındaki çalışmalarında, kinematik model, dinamik model ve yuvarlanma dirençleri hesaba katılarak modellenen diferansiyel tahrikli bir mobil robotun, yörünge kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Gerçek hayattaki durumlara benzer oluşturdukları yörüngeler üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarını başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir. [24]

Saadettin Erhan Kesen 2004 yılındaki yüksek lisans tez çalışmasında, Japonya'da ortaya çıkan, sistem içi envanteri minimum düzeyde tutmaya çalışan ve talepteki dalgalanmalara karşı duyarlı olan Tam Zamanlı Üretim (TZÜ) Sistemine bağlı ofis tipi üretim yapan bir otomatik yönlendirmeli araçların simülasyonunu gerçekleştirmeye çalışmıştır. Simülasyon, iki yönlü akışa ve birden çok aracın seyahat edebildiği bir fabrikada uygulanmıştır. Fabrika içerisinde malzeme taşıyacak yada farklı görevlerde bulunacak Otomatik Yönlendirmeli Araçların sistem içinde daha etkin taşıma ve görev yapabilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca sistemde makine bozulmaları dikkate alınmamıştır. Ama makine bozulmalarının dikkate alınması sistemi gerçeğe daha da yaklaştıracığı öngörülmüştür. [25]

Tong-Tin Park ve arkadaşları tarafından yapılan 2002'deki bu çalışmada bir OYA üzerindeki sensörler yardımıyla aldığı verilere göre yörünge-yol kontrolü ve çıkarılan kinematik modellerle motor kontrolü ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. [26]

Zylski W. 1996 yılında mecanum tekerleklerle sahip mobil robotun kinematik hareket denklemleri ile ikinci türden Langrange denklemleriyle sistemin kinetik enerjisini ve sistemi etkileyen genel kuvvetleri bularak dinamik hareket denklemleri elde etmek ve bu denklemlere bağlı matematiksel bir model oluşturup yörünge kontrolü üzerine çıkarımlarda bulunmuşlardır. [27]

Wittenburg J. ve çalışma arkadaşları 1989 yılında dönme ve kayma hareketi tekerleklerin üzerindeki 45 derece açılı bulunan silindirler sayesinde gerçekleştiren mecanum tekerleklerle sahip araçların kinematiği, dinamiği ve bu hareket denklemlerine bağlı kontrol analizi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. [28]

P.F. Muir ve C.P. Neuman, 1987 yılında çok yönlü ve silindir tekerlekli mobil robotlarda düzleme ve araca koordinat eksenini atayarak Sheth-Uicker yöntemi ve Jacobian matrisi ile kinematik ve hareket denklemleri elde etmeye çalışmışlardır. [29]

2.2. Literatürde Hidrojen Yakıt Pili Modellenmesi ve Simülasyonu

Pouria Ahmadi ve arkadaşları 2020 yılındaki araştırmalarında hidrojen yakıt hücreli araçların, simülasyonunu ve diğer geleneksel araçlarla olan çevresel faktör hesaplamalarını ve karşılaştırmalarını yapmışlardır. Rejeneratif frenlemeye sahip hidrojen yakıt hücreli araçlar, fren sisteminde boşa harcanan enerjiyi geri kazanmak için büyük bir güç harcarlar. Bundan dolayı, sürüş döngüsü hidrojen yakıt pilli araçların işleyişini önemli ölçüde etkileyebilir. Hem araç maliyeti hem de yaşam döngüsü emisyonunun hesaplanıp karşılaştırılması için sürüş modellerinin etkilerinin araştırılması gerekmektedir. Çalışmanın sonucu olarak, otoyol sürüş modelinin CoS sürüş modeli ve UDDS sürüş modeline kıyasla en düşük toplam yaşam döngüsü emisyonuna sahip olduğunu gösterdi. Ayrıca yakıt hücre bozulmasının, aracın ortama yakıt maliyetine yaklaşık $\frac{1}{4}$ oranında etkisinin olduğunu göstermiştir. [30]

Fahri Işıklı 2020 yılındaki yüksek lisans tez çalışmasında PEM yakıt pilinin matematiksel modellenmesini ve bir araç üzerindeki performansının etkilerini incelemiştir. Bazı elektrik

parçalarından ve yakıt pilinden oluşacak aracın genel güç sisteminin ana güç üretici PEM yakıt pilidir. Bu genel güç sistemi araca maksimum 75 kW enerji temini ve aktarımı yapmaktadır. Genel güç sistemi içerisinde bulunan DC/DC dönüştürücü ve DC elektrik motoru elektrik sisteminde bulunmaktadır. Güç sisteminin modellenmesi; yakıt pili sisteminde yakıt (hidrojen) ve yakıt hücresindeki alt bileşenler, elektrik sisteminde DC/DC dönüştürücünün modellenmesiyle genel güç sistem modeli elde edilmiştir. Elde edilen bu model Matlab/Simulink'de matematiksel olarak analiz edilmiştir ve modelin başarılı bir şekilde çalıştığı ve araç için uygun olduğu görülmüştür. [31]

Mert Ali Özel ve Gürsel Şefkat 2018'deki araştırmalarında bir PEM yakıt pilinin analizi ve simulink modelini gerçekleştirmişlerdir. PEM yakıt pilinin matematiksel modelinin oluşturulmasıyla elde edilecek sayısal datalar, gelecekte üretilecek ya da varolan yakıt pili tasarımlarının daha uygun hale getirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, Matlab/Simulink ortamında modellenen PEM yakıt pilinin benzetimi yapılarak çıkarılan sonuçların tartışılması mümkün olmuştur. Buradaki PEM yakıt pili sisteminde modelleme, membran içi akışın, gerilim üretiminin ve kayıplarının modellenmesi ile bulunmuştur. Sonuç olarak ise bulunan parametreler iki ve üç boyutlu grafikler şeklinde sunulmuştur. [32]

Hassan Fathabadi 2018 yılındaki çalışmasında, yakıt hücreli bir elektrikli araç ile içten yanmalı motorlu hibrit bir aracın karşılaştırmasını yapmış ve bu karşılaştırmadan kaynaklı bir yakıt hücreli aracın yakıt pili güç sistemini tasarlamıştır. Çalışmada 90 kW'lık bir proton membranlı yakıt hücresi kullanmıştır. Çalışmanın sonucunda PMW tekniğini kullanıp 158 km/s maksimum hız, 12 s'de 0-100 km's hızlanma ve 435 km seyir menzili elde etmiştir. [33]

L. An ve R. Chen 2017 yılındaki çalışmalarında elektrokimyasal süreçleri içeren yakıt hücreleri için matematiksel model geliştirmişlerdir. Ayrıca çalışma ve yapısal parametrelerin hücre gerilimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, hücre geriliminin aktivasyon polarizasyonu ve konsantrasyon polarizasyonundan kaynaklı hidrooksit iyonları ve oksijen reaktan konsantrasyonu ile arttığını göstermiştir. Ek olarak anot difüzyon tabakasının gözenekliliğinin arttırılması ve anot difüzyon tabakasının veya membranın kalınlığının azaltılması ile hücre performansının yükseltildiği bulunmuştur. [34]

Rihab Jaralla 2015 yılındaki doktora çalışmasında, xy ve yz düzlemlerindeki PEM yakıt hücreleri için iki boyutlu matematiksel model geliştirip, üç boyutlu bir PEM yakıt hücresiyle

eşdeğerliğini incelemiştir. Ayrıca hesaplama maliyetinin az olması nedeniyle daha fazla bilgi edinilmeyi amaçlamıştır. PEM yakıt hücresi için momentum, enerji, tür konsantrasyonu ve elektrik potansiyelleri denklemleri ile komle bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model kullanılarak çalışma basıncı, membran gözenekliliği, ortam sıcaklığı, proton iletkenliği, hava giriş hızı, bağıl nem gibi parametreler incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda birçok parametrede olumlu anlamda artışlar ve azalışlar görülmüştür. Bunlardan biri, membran gözenekliliğinin ve hava giriş hızının su içeriği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu olmuştur. Ek olarak, geliştirilen bu PEM yakıt hücresi modellerinin, yakıt hücresindeki taşıma ve elektrokimyasal olayların, hücre tasarımı ve farklı çalışma koşulları için yararlı bir araç olacağını göstermiştir. [35]

Bhangchand D. Thavrani ve arkadaşlarının 2015 yılındaki çalışmalarında yenilenebilir enerji kaynakları ile hibrit üretim sistemlerinin analizinin yapılması için 36 W PV modülüne sahip bir PEM fotovoltaiik yakıt hücresinin modellenmesi ve Matlab/Simulink ortamında simülasyonu amaçlanmıştır. [36]

Tunacan Akfıdan 2010'daki yüksek lisans tez çalışmasında, güç sistemi olarak 1.5kW'lık batarya grubu ve yakıt olarak 17 bar basınçlı toplam 5400 sl hidrojen gazı depolayan 6 tane tank kullanan 2 kW'lık güç üreten yakıt pili grubundan oluşan bir yolcu aracının gerçek zamanlı veriler ve Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş modelin simülasyonu ile karşılaştırmasını ve iyileştirmesini gerçekleştirmiştir. Buradaki aracın elektriksel sistemleri gereken enerjiyi yakıt pilinden karşılamaktadır. Ama yakıt pili dışında bataryalarında gereken enerjiyi karşıladığı durumlar mevcuttur. Yakıt pilindeki oluşacak hasarların önüne geçmek veya yakıt pilinin ısınarak tamir edilemez arızaların oluşmaması adına, eğer yakıt pili tarafından sağlanan enerji düşerse aracın elektriksel sistemleri ve motoru için gerekli enerjiyi batarya grubu ile yakıt pili grubu birlikte karşılamaktadır. Bu sayede yakıt pili yığındaki hasarların ve bozulmaların önüne geçilmiş olur. [37]

Colleen Spiegel 2008 yılındaki çalışmasında daha verimli yakıt hücrelerinin tasarlanması ve yakıt hücresi kütlesi, ısı ve yük taşıma olaylarının daha iyi anlaşılması için polimer elektrolit bazlı yakıt hücrelerinin bir matematiksel modelini oluşturup bu modelin Matlab ortamında simülasyon çalışmasını gerçekleştirmiştir. Model, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan ve her bir yakıt hücresi katmanını bir kontrol hacmi olarak kullanan iki boyutlu geçici bir modeldir. Ayrıca, her bir yakıt hücresi katmanı, kullanıcısının modele girdiği geçici ısı ve kütle transfer denklemi ile oluşturulan düğümlerin sayısına bölünmüştür. Membran modeli

için Fick'in difüzyon yasasından ve su alımı iletkenliği ilişkisinden yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak, gelecekte polimer elektrolit yakıt hücrelerinin tasarımlarının ve çalışma başarılarının geliştirilmesine katkıda bulunulmuştur. [38]

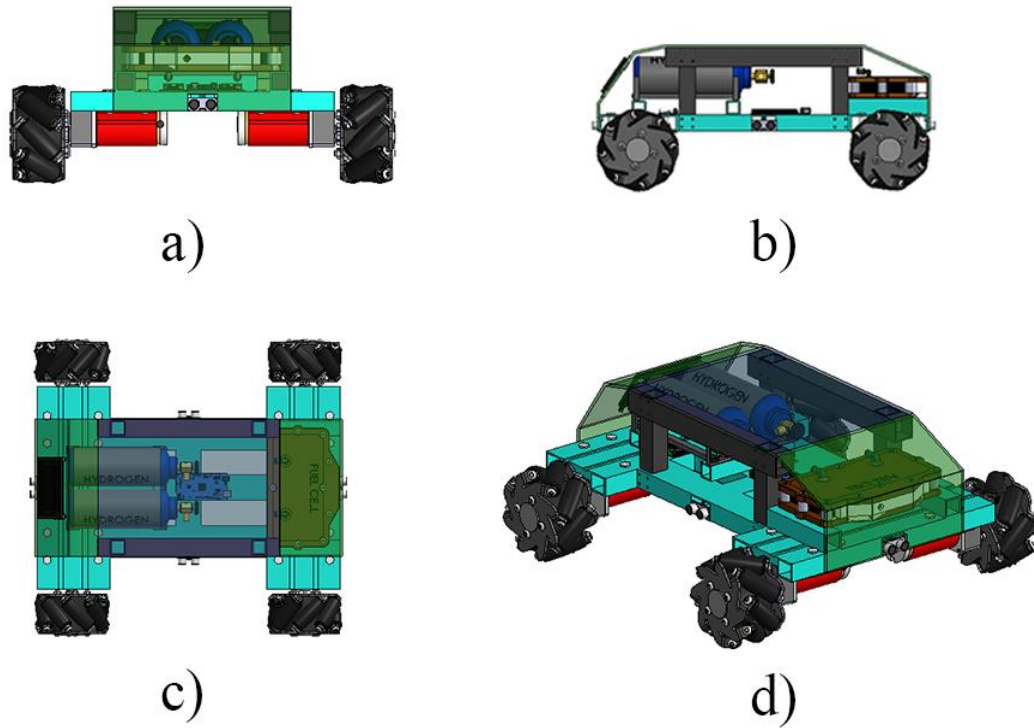
Christos N. Maxoulis ve arkadaşları 2004 yılındaki araştırmalarında bir yakıt hücresinin yığın tasarım optimizasyonunun ve araç uygulamalarının daha güçlü ve düşük hata oranı sahip olması için bir matematiksel model geliştirmiştir. Geliştirilen model, sürüş döngüsü esnasında ani sıcaklık değişimlerinin yakıt hücresinin üzerindeki etkilerinin incelenmesine olanak sağlamıştır. Bu model ayrıca, maksimum yığın gücü, katalizör etkisi ve su konsantrasyonu gibi yakıt hücresi tasarım parametrelerinin değişmesine, iyileştirmesine ve yakıt kullanımına bağlı etkilerin incelenmesini mümkün kılmıştır. [39]



3. ARACIN TASARIMI VE YAPISAL ANALİZLERİ

3.1. Aracın Tasarımı ve Araç Özellikleri

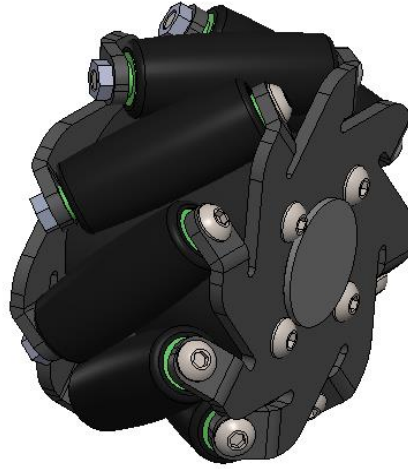
Belirli bir yörüngede malzeme taşınması ve bu yörünge kontrolünün amaçlandığı bu tez çalışmasındaki araç tasarımı Solidworks Cad-Cam programında gerçekleştirilmiştir. Bu araç mekanik ve elektriksel parçalar ile hidrojen yakıt pili mekanizmasından oluşmaktadır. Tasarımı yapılan aracın Cad model görüntüleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. a) Araç ön görünüm, b) araç yan görünüm, c) araç üst görünüm, d) araç perspektif görünüm

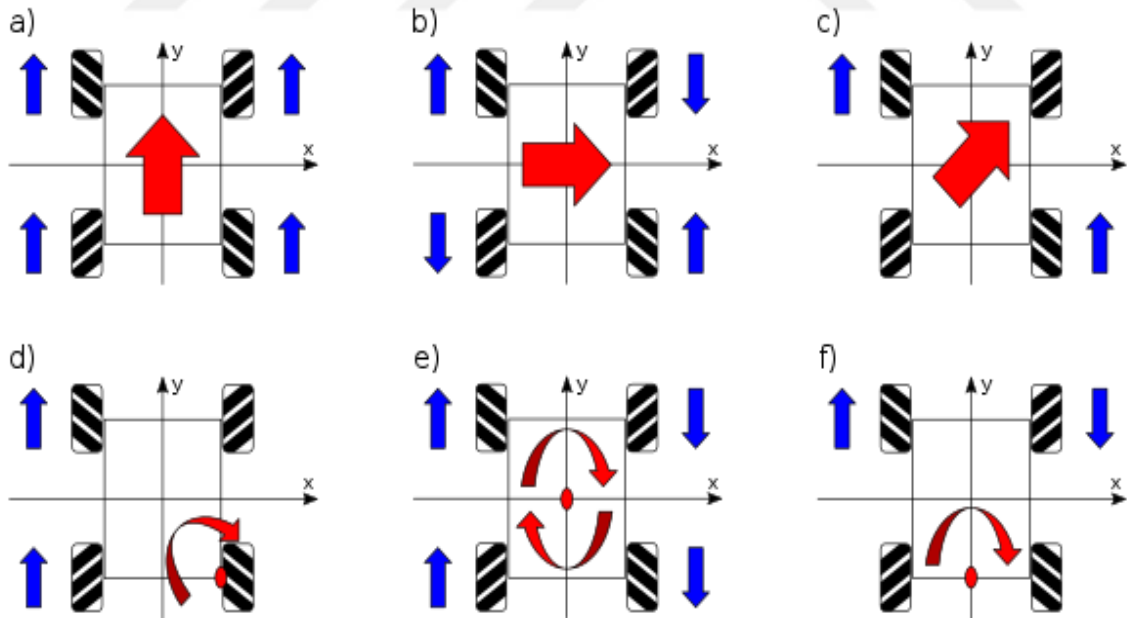
Otomatik yönlendirmeli aracın mekanik donanımı;

- Mecanum tekerleklerden,
 - Redüktörlü DC motorlardan,
 - Ana şasiden,
 - Malzeme taşıyıcı bölümden,
- oluşmaktadır.



Şekil 3.2. Oya mekanik donanımında kullanılan mecanum tekerlek

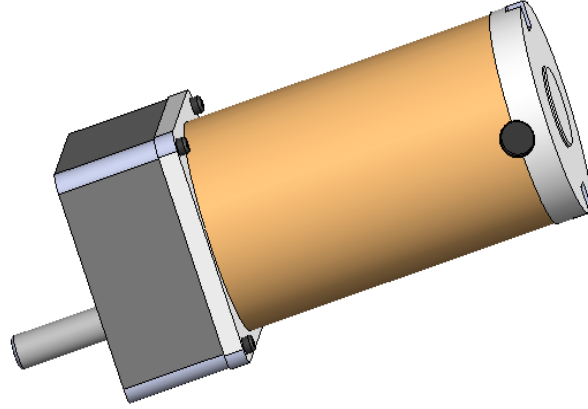
Bu Otomatik Yönlendirmeli Araçta(OYA) farklı zeminlerde daha rahat ve istenilen yöne kolaylıkla hareket edebilen 8 silindire sahip 4 adet Şekil 3.2’de görülen mecanum tekerlekler kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Mecanum tekerleklerin dönme yönleri ve bu dönme yönlerine bağlı olarak aracın hareket yönlerinin gösterimleri [40]

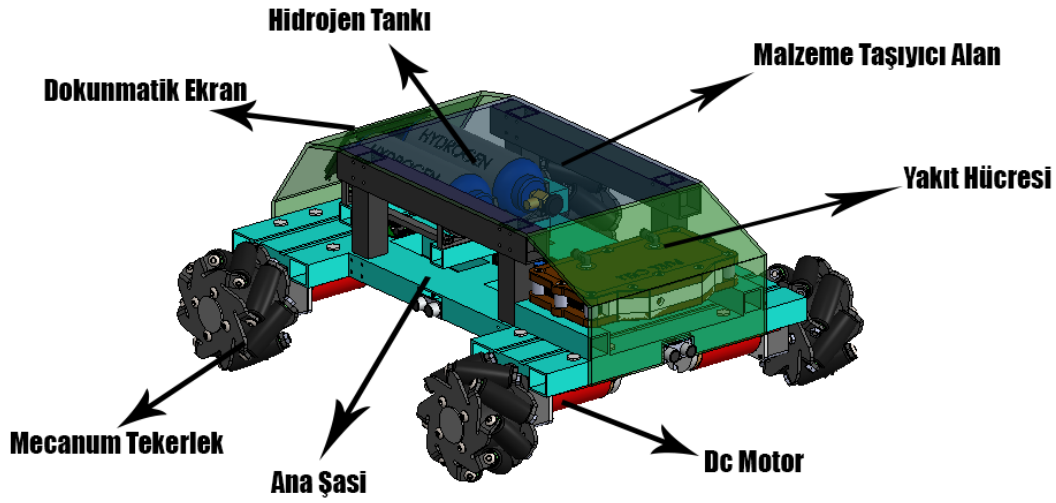
“Mecanum tekerlekler çok yönlü tekerlekler olarak bilinmektedir. Bu çok yönlü tekerlekler, kullanıldığı aracın ileri-geri, çaprazlama-yanlama, olduğu yerde dönme ve her yöne gidebilme hareketlerini sağlayan 45° açılarla özel bir şekilde yerleştirilen ve özel bir

geometriye sahip makaralardan (silindirlerden) oluşur. Çok yönlü tekerlekler teorik olarak kullanıldığı aracın serbestlik derecesini arttırmaktadır. 1970 yılında İsveç firması Mecanum AB mühendisliklerinden Bengt ILON tarafından icat edildi. Daha sonra Amerika Birleşik Devletleri ordusu bu patenti satın aldı ve Panama’da geliştirme çalışmalarında bulundu. Bu tekerlekler orduda malzeme taşımak ve gemileri hareket ettirebilmek için kullanıldı. Şekil 3.3’de görüldüğü üzere İleri-geri hareketi esnasında tüm makaralar, dişli kutusu çıkış mili ekseninde dönmekte ve ötelenmektedir. Çapraz hareket esnasında ise bir ön, bir de arkadan olmak üzere yalnızca iki teker üzerinde bulunan makaralar dönme ve ötelenme hareketi yapmakta, diğer teker üzerinde yer düzlemiyle temas halinde olan makaralar ise kendi mil eksenleri etrafında dönerek ötelenmektedir. Yanlamasına hareketi esnasında ise arka ve ön tekerlekler birbirine göre ters yönde dönmektedir. Dönme hareketinin, yanal bir kuvvete dönüşmesiyle makaralar kendi mil eksenlerinde dönmekte ve oluşan yanal kuvvetin etkisiyle kaymaktadır.” [41]



Şekil 3.4. Oya mekanik donanımda kullanılan redüktörlü dc motor

Otomatik yönlendirmeli aracın hareketini sağlamak için her bir tekerlekte birer adet kullanılmak üzere Şekil 3.4’deki redüktörlü DC motordan kullanılmıştır. Aracın şasisi ve malzeme taşıyıcı bölümü ise genel olarak aracın daha hafif ve sağlam bir yapıya sahip olması için 1.0037-S235JR içi boş kare paslanmaz çelik profillerden oluşturulmuştur.



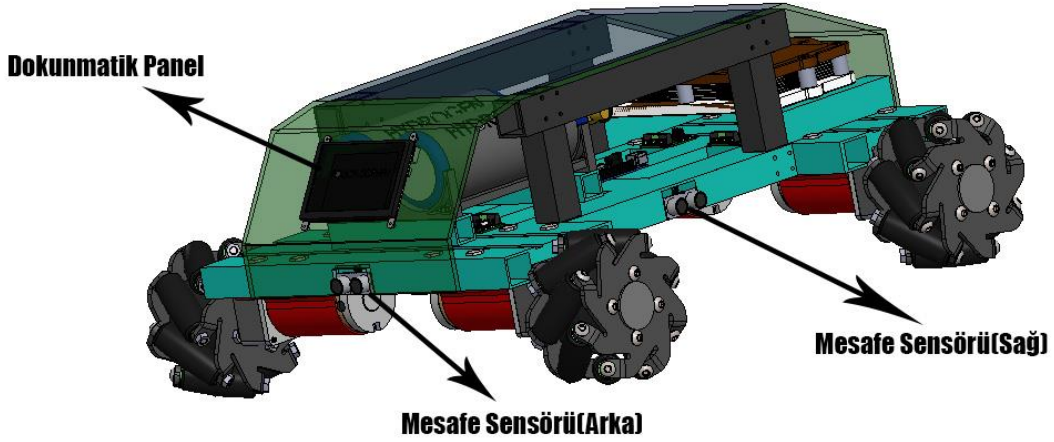
Şekil 3.5. Oya çeşitli sistem parçalarının görünümü

Tasarımı yapılan OYA'da mekanik donanımla birlikte sisteme gerekli gücü vermesi için batarya sistemi olarak hidrojen yakıt pili ve bu hidrojen yakıt pilinin sisteme fazladan vereceği gerilimi ve akımı önlemek için ise akım-gerilim düşürücü regülatör kartı kullanılmıştır. Şekil 3.5'de OYA'daki hidrojen yakıt pili sistemi ve diğer sistem parçaları görülmektedir.

Araçın elektriksel sisteminden de bahsedecek olursak OYA;

- Çeşitli sensörlerden,
- Motor sürücü kartlarından,
- Kontrol kartı olarak Arduino Mega 2560'dan,
- Tuş panelinden ve dokunmatik ekrandan,
- Kablo bağlantılarından,

oluşmaktadır.



Şekil 3.6. Dokunmatik panel ve bazı sensörlerin araçtaki görünüşleri

Şekil 3.6’da gösterildiği gibi aracın önünde, arkasında ve her iki yanında olmak üzere 4 adet mesafe sensörü kullanılmıştır. Bu mesafe sensörleri araç hareket halinde olduğu durumlarda engellere çarpmaması ve hedefe giden alternatif yollar bulması için kullanılmıştır. Mesafe sensörlerinin yanında bir de aracımızda taşıma alanında bulunan ağırlık sensörü kullanılmıştır. Bu ağırlık sensörü belirli ağırlığı aştığı durumlarda sistemde uyarı vermektedir. Aracın arka kısmında bulunan dokunmatik panel sistemin kontrolünün gerçekleştirildiği ve yazılımsal işlemlerin düzenlenmesi ve yüklenmesi için kullanılmıştır. Aracımızın kontrolcüsü ise Arduino Mega 2560’dır. Arduino Mega 2560 aracımızdaki motor hızlarını, mesafe sensörlerini ve ağırlık sensörünü kontrol etmektedir.

3.2. Aracın Yapısal Analizleri

Bu bölümde, belirli bir yörüngede, belirli ağırlıklar arasında malzeme taşınması amaçlanan Otomatik Yönlendirmeli Aracımızın(OYA) bu belirli ağırlıklar arasında malzemenin uğrayacağı deformasyonu en aza indirmek ve aracımızın kendi ağırlığı ile taşıyacağı malzeme ağırlık sınırlarını belirlemek için yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Ana gövdede kullanılan çelik malzeme özellikleri fiziksel prototip oluşturmaya kıyasla sanal sonucun doğruluğunu göstermektedir. Çizelge 3.1’de ana gövdede kullanılan çelik malzeme özellikleri, Çizelge 3.2’de analizde uygulanan mesh özellikleri ve Çizelge 3.3’de analizde kullanılan birimler görülmektedir. Şekil 3.7’de ise OYA’nın global koordinat sistemindeki

görünümü ve bu global koordinat sistemindeki statik analiz uygulanan parçaların model referansın genel araç üzerinde görünümü gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Ana gövde çelik malzeme özellikleri

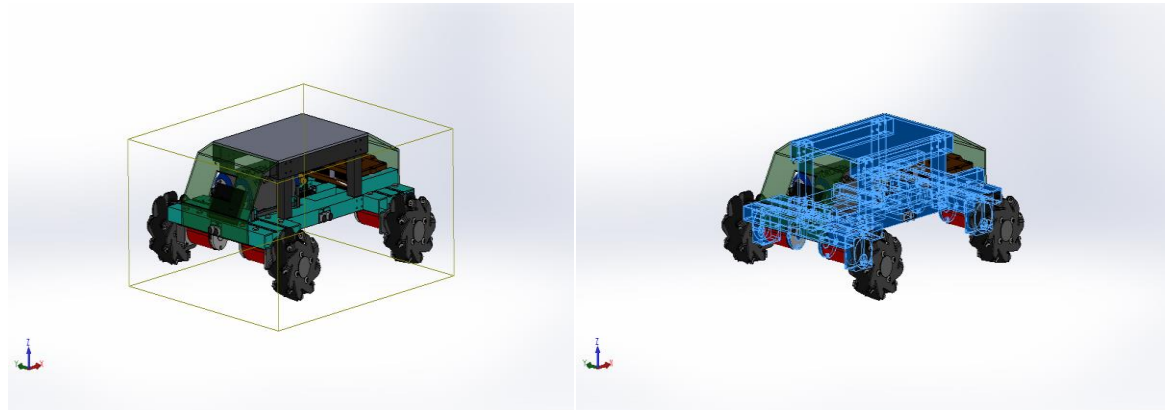
Özellik	Değer
Akma Mukavemeti	2,35e+08 N/m ²
Gerilme	3,6e+08 N/m ²
Elastik Modül	2,1e+11 N/m ²
Poisson Oranı	0,28
Kütle Yoğunluğu	7.800 kg/m ³
Yırtılma Modülü	7,9e+10 N/m ²
Termal Genleşme Katsayısı	1,1e-05 /K

Çizelge 3.2. Mesh özellikleri

Mesh Tipi	Katı Mesh
Kullanılan Meshleyici	Karışık Eğrilik Tabanlı Mesh
Jakoben Noktalar	4 Noktalar
Maksimum Eleman Boyutu	22,8615
Minimum Eleman Boyutu	4,5723
Mesh Kalitesi Grafiği	Yüksek

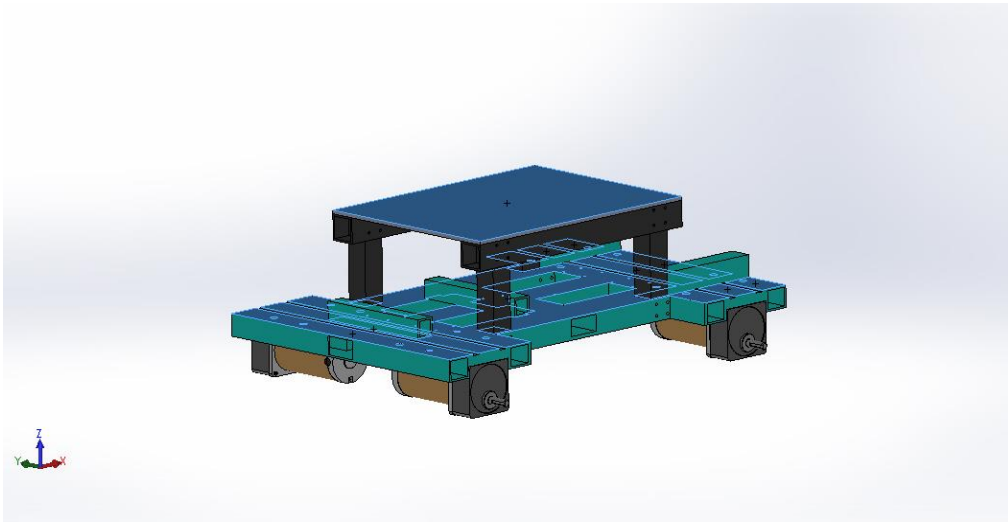
Çizelge 3.3. Birimler

Birim Sistemi	SI
Uzunluk/Yer Değiştirme	mm
Sıcaklık	Kelvin(K)
Açısal Hız	Rad/sn
Basınç/Gerilim	N/m ²

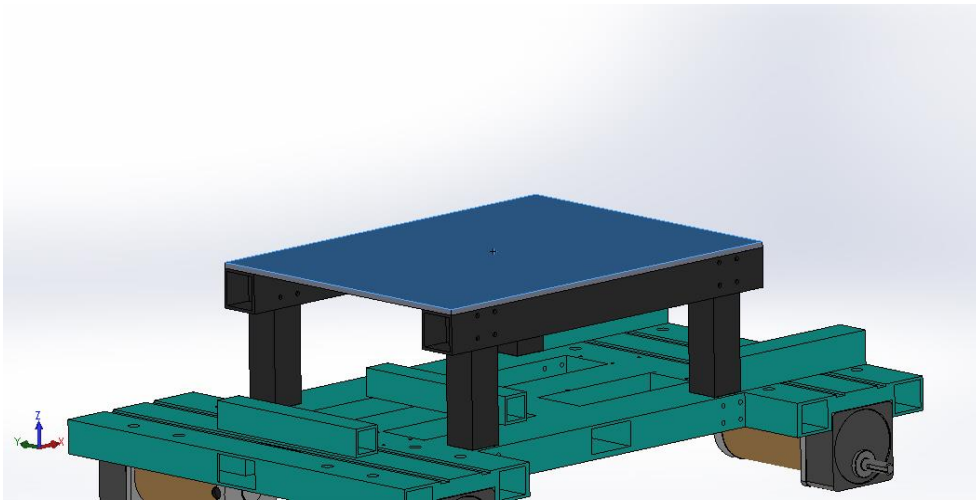


Şekil 3.7. a) Aracın global temas görünümü b) statik analiz uygulanan parçaların model referans görünümü

Bu statik analiz işleminde ilk olarak aracın kendi ağırlığı belirlenmiştir. Solidworks Simülasyonda şasiye ve malzeme taşıyıcı bölüme atadığımız çelik malzemenin ağırlığı ve aracın diğer elemanlarına yaklaşık bir değer ile toplamda araç ağırlığı 10 kg olarak belirlenmiştir. Daha sonra zemindeki temas yüzeyi olan tekerleklerin bağlı olduğu motor milinde deformasyonlar en çok olacağından dolayı motor mili sabitlenmiş kabul edilip malzeme taşıyıcı alana sırasıyla 1kg, 10kg, 100kg yük atayarak analiz sonuçları incelenmiştir. Uygulanacak yüklerin etkiyeceği alanlar Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



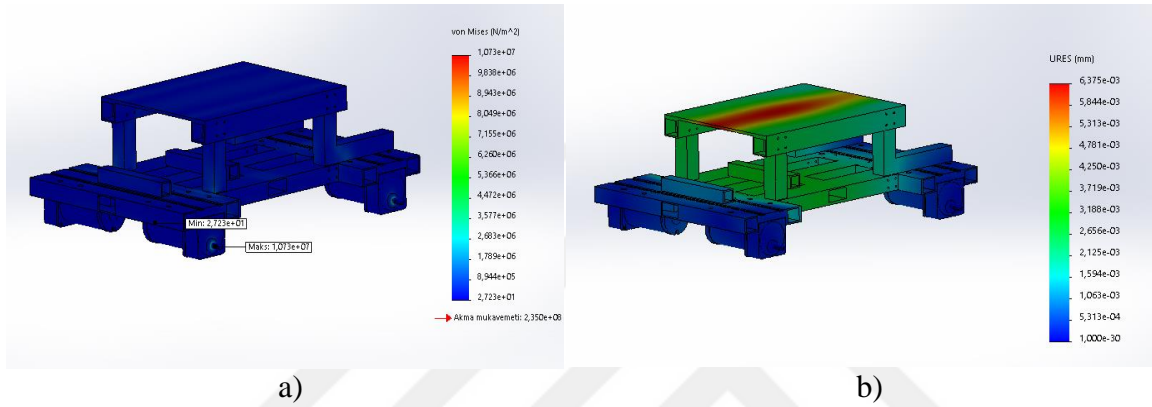
Şekil 3.8. Aracın toplam ağırlığının etkiyeceği alan



Şekil 3.9. 1 kg , 10 kg, 100 kg ve 850 kg yük uygulanan taşıyıcı alan

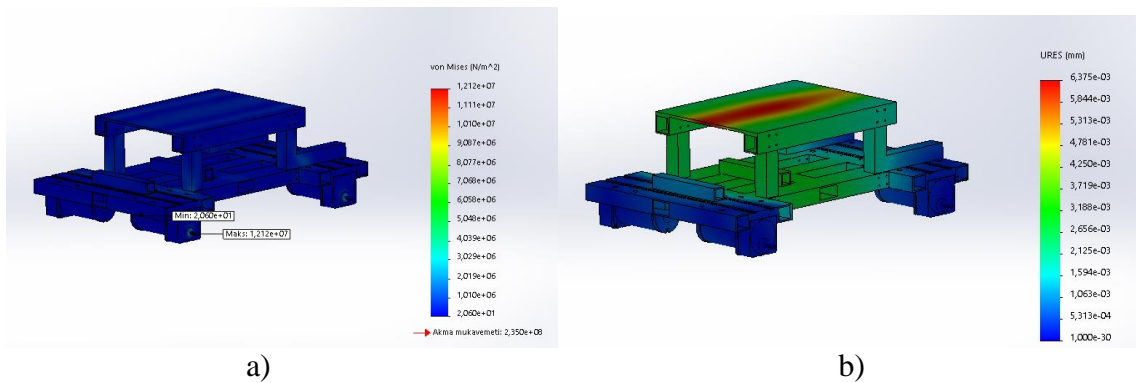
Aracımızın 4 motor milini sabitlenmiş yaptıktan sonra aracın kendi ağırlığı olarak belirlediğimiz 10 kg dışında taşıyıcı bölüme 1 kg yük yani 9.81 N'luk yük kuvvet uygulanmıştır. Ve deformasyon sonuçları incelenmiştir. Taşıyıcı alan ve ana şaside herhangi

bir değişim olmamıştır. Sabitlenmiş yaptığımız ve deformasyonun en çok olacağını tahmin ettiğimiz motor milinde ise çok minimal boyutlarda deformasyon olmuştur. Bu sonuç aracın işleyişine herhangi bir zarar vermemektedir. Şekil 3.10'da 1 kg yük altında oluşan gerilmeler ve yer değiştirme değeri görülmektedir. Burada Von Mises tipindeki maximum gerilme $1,073e+07$ N/m², minimum gerilme $2,723e+01$ N/m² olarak bulunmuştur. Ek olarak 1 kg yük altında maximum yer değiştirme değeri ise Ures(mm) tipinde $6,375e-03$ mm bulunmuştur.

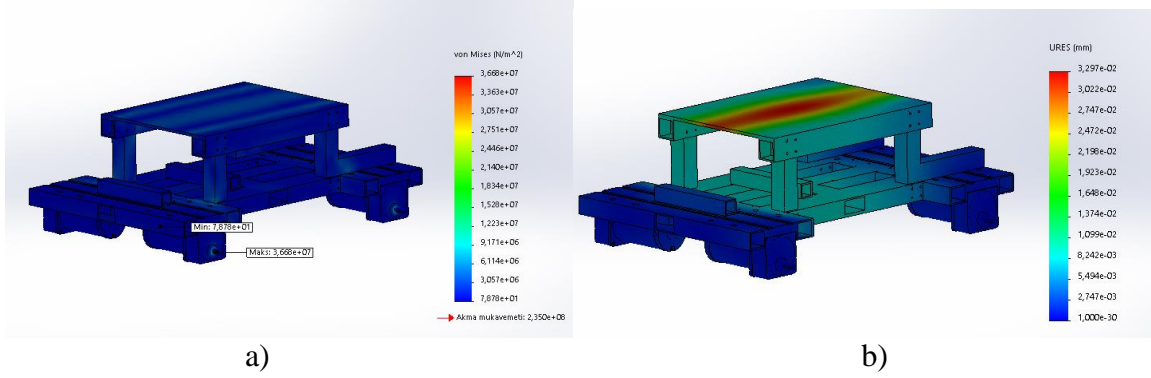


Şekil 3.10. a) 1 kg'lık yük ile motor milinde oluşan maximum ve minimum gerilme değerleri b) 1 kg'lık yük ile oluşan yer değiştirme değeri

10 kg'lık ve 100 kg'lık yükler altında oluşan maximum gerilmeler sırasıyla $1,212e+07$ N/m² ve $3,668e+07$ N/m², minimum gerilmeler sırasıyla $2,060e+01$ N/m² ve $7,878e+01$ N/m² olarak bulunmuştur. 10 kg'lık ve 100 kg'lık yükler altında maximum yer değiştirme değerleri ise sırasıyla $6,375e-03$ mm ve $3,297e-02$ mm bulunmuştur. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de bulunan 10 kg'lık ve 100 kg'lık gerilme değerleri ve yer değiştirme değerleri Von Mises ve Ures(mm) tipinde gösterilmektedir.

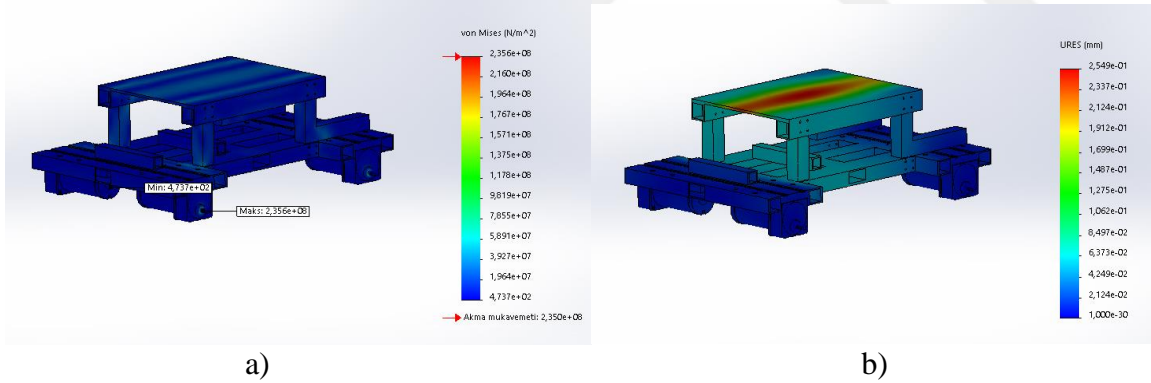


Şekil 3.11. a) 10 kg'lık yük ile motor milinde oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri b) 10 kg'yük ile oluşan yer değiştirme değeri



Şekil 3.12. a) 100 kg'lık yük ile motor milinde oluşan maksimum ve minimum gerilme değerleri b) 100 kg'lık yük ile oluşan yer değiştirme değeri

Motor milinde kırılmanın gerçekleştiği maximum akma mukavemeti ise 8.338,5 N kuvvet ile yani yaklaşık 850 kg yük altında gerçekleşmiştir. 850 kg yük ile motor milinde oluşan maximum gerilme değeri $2,356e+08$ N/m², minimum gerilme değeri $4,737e+02$ N/m²'dir. 850 kg yük ile oluşan maximum yer değiştirme değeri ise $2,549e-01$ mm bulunmuştur. Çelik malzemenin akma mukavemeti $2,356e+08$ N/m²'dir. (Bkz. Çizelge 3.1) 850 kg yük ile oluşan gerilme değerleri ve yer değiştirme değeri Şekil 3.13'de gösterilmektedir.

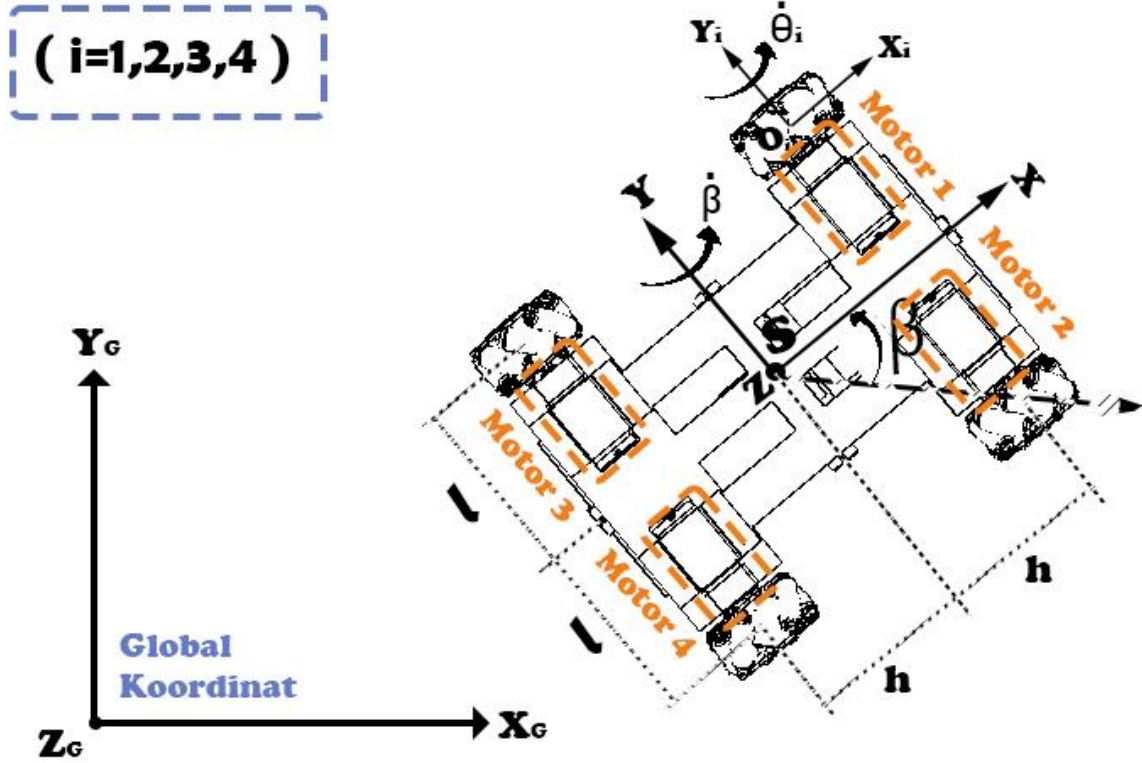


Şekil 3.13. a) 850 kg yük ile motor milinde oluşan maximum ve minimum gerilme değerleri b) 850 kg yük ile oluşan yer değiştirme değeri

Tasarımı yapılan OYA'nın analizleri sonucunda 1 kg ile 850 kg yükler arasında aracımızdaki deformasyonun yük arttıkça arttığı gözlenmiştir. 850 kg yük ile oluşan analiz sonucunda ise motor milinde oluşan kırılma değeri bulunmuştur. Bu da ağır yükler taşımak için tasarlanan OYA'nın bu görevde başarılı olduğu ve bu yüke kadar olan yükleri mukavim bir şekilde taşıdığı belirlenmiştir.

4. OYA'NIN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde aracın sistem blok diyagramının ve yörünge kontrolünün gerçekleştirilmesi için gerekli kinematik, dinamik, motor, elektrik analizleri gerçekleştirilecektir. Aracın iki boyutlu ve koordinat sisteminde görünümü şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Oya iki boyutlu koordinat sistemi görünümü

4.1. Kinematik Model

Şekil 4.1'deki modele göre kinematik tanım şu şekilde yazılır.

$$V_x \mp V_y \mp \dot{\beta}(h + l) \mp \dot{\theta}_i(R + r) = 0 \quad (i=1,2,3,4) \quad (4.1)$$

$$V_x - V_y - \dot{\beta}(h + l) - \dot{\theta}_1(R + r) = 0 \quad (4.2)$$

$$V_x + V_y + \dot{\beta}(h + l) - \dot{\theta}_2(R + r) = 0 \quad (4.3)$$

$$V_x + V_y - \dot{\beta}(h + l) - \dot{\theta}_3(R + r) = 0 \quad (4.4)$$

$$V_x - V_y + \dot{\beta}(h + l) - \dot{\theta}_4(R + r) = 0 \quad (4.5)$$

h = araç merkezi ile tekerlek merkezi arası dikey uzunluk, l = araç merkezi ile tekerlek merkezi arası yatay uzunluk, R = tekerlek yarıçapı, r = silindir yarıçapı, $\dot{\beta}$ = araç açısal hızı, $\dot{\theta}_i$ = her bir tekerlek açısal hızı, V_x = x yönü lineer hız, V_y = y yönü lineer hız.

Yukarıdaki denklemlerin ters kinematiği ise;

$$\dot{\theta}_1 = \frac{1}{(R+r)} (V_x - V_y - \dot{\beta}(h + l)) \quad (4.6)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{1}{(R+r)} (V_x + V_y + \dot{\beta}(h + l)) \quad (4.7)$$

$$\dot{\theta}_3 = \frac{1}{(R+r)} (V_x + V_y - \dot{\beta}(h + l)) \quad (4.8)$$

$$\dot{\theta}_4 = \frac{1}{(R+r)} (V_x - V_y + \dot{\beta}(h + l)) \quad (4.9)$$

$$\dot{\theta} = J \cdot V \quad (4.10)$$

eşitliğinden yola çıkarak;

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{1}{R+r} & \frac{-1}{R+r} & \frac{-(h+l)}{R+r} \\ \frac{1}{R+r} & \frac{1}{R+r} & \frac{(h+l)}{R+r} \\ \frac{1}{R+r} & \frac{1}{R+r} & \frac{-(h+l)}{R+r} \\ \frac{1}{R+r} & \frac{-1}{R+r} & \frac{(h+l)}{R+r} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

J matrisi dikdörtgen matris olduğundan, Moore-Penrose teoremi ile ters çevirme işlemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$J_{mp} = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \quad (4.14)$$

$$V = J_{mp} \cdot \dot{\theta} \quad (4.15)$$

denkleminin eldesi için J matrisinin tersi aşağıdaki gibi yazılır.

$$J_{mp} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (R+r) & (R+r) & (R+r) & (R+r) \\ -(R+r) & (R+r) & (R+r) & -(R+r) \\ \frac{-(R+r)}{(h+l)} & \frac{(R+r)}{(h+l)} & \frac{-(R+r)}{(h+l)} & \frac{(R+r)}{(h+l)} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$V = J_{mp} \cdot \dot{\theta}$ eşitliğinin sonucu ileri kinematik denklemleri verecektir.

$$V_x = \left(\frac{R+r}{4}\right) [\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4] \quad (4.17)$$

$$V_y = \left(\frac{R+r}{4}\right) [-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4] \quad (4.18)$$

$$\dot{\beta} = \left(\frac{R+r}{4(h+l)}\right) [-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4] \quad (4.19)$$

[42]

4.2. Dinamik Model

Araç dinamik denklemlerinin eldesi için enerji denklemi olan Langrange denklemi kullanılır.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (4.20)$$

T= Kinetik enerji + Potansiyel enerji, q_i = Global koordinat değeri, Q_i = Global kuvvet

Araç düz bir zeminde hareket edeceğinden potansiyel enerji sıfır olur ve aşağıdaki denklem oluşur.

$$E_k = E_A + E_T \quad (4.21)$$

E_k = Toplam kinetik enerji, E_A = Araç kinetik enerji, E_T = Tekerlek kinetik enerji.

Buna göre; xyz koordinat sisteminde oluşan aracın kinetik enerjisi şu şekilde yazılır.

$$E_A = \frac{1}{2}m_A(V_x^2 + V_y^2) + \frac{1}{2}I_A\dot{\beta}^2 \quad (4.22)$$

m_A = Araç toplam ağırlığı, I_A = z eksenindeki araç atalet momenti

Yapısı gereği karmaşık hareket yapan mecanum tekerleklerde de kinetik enerji oluşur. Bu kinetik enerji denklemi de şu şekilde yazılır.

$$E_T = \frac{1}{2}I_T(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2 + \dot{\theta}_4^2) + 4\left[\frac{1}{2}m_T(V_x^2 + V_y^2) + \frac{1}{2}I_z\dot{\beta}^2\right] \quad (4.23)$$

I_T = Tekerleklerin kendi eksenindeki atalet momenti, I_z = Tekerleklerin z eksenindeki atalet momenti, m_T = Tekerleklerin ağırlığı.

$$m_c = m_A + 4m_T \quad (4.24)$$

$$I_c = I_A + 4I_z \quad (4.25)$$

m_c = Toplam ağırlık, I_c = Toplam atalet momenti.

Toplam kinetik enerji şu şekilde yazılır.

$$E_k = \frac{1}{2}m_c(V_x^2 + V_y^2) + \frac{1}{2}I_c\dot{\beta}^2 + \frac{1}{2}I_T(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2 + \dot{\theta}_4^2) \quad (4.26)$$

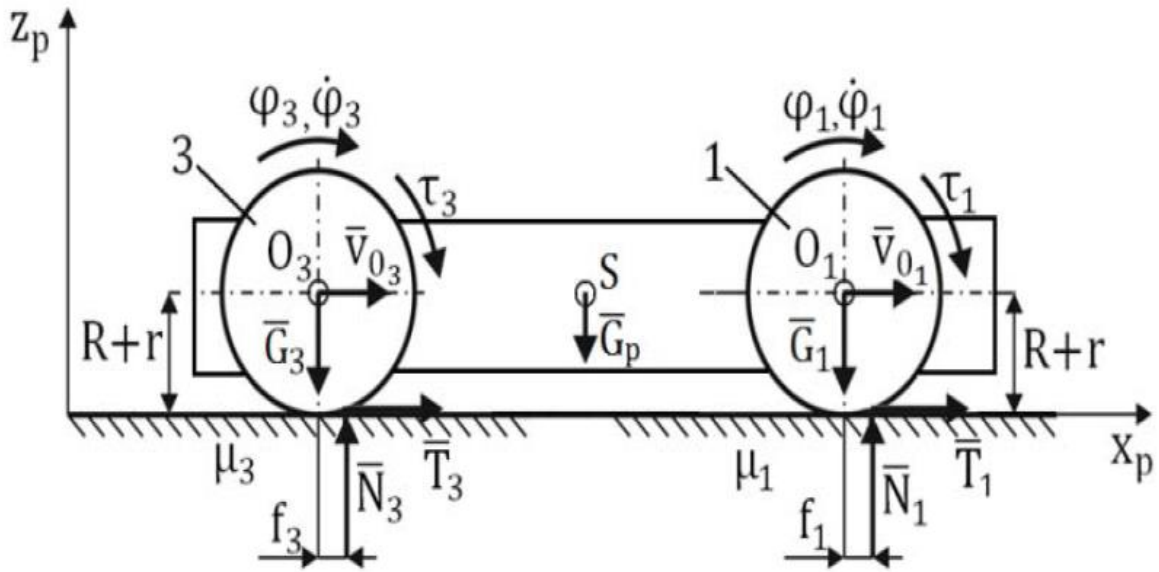
Daha sonra sistemin kinetik enerjisinin(E_k) tekerleklerin açısal hızlarıyla ilgili bağıntısını kurabilmek için yardımcı değişkenler kullanılır ve aşağıdaki denklemler elde edilir. (Yardımcı değişkenler; A, B, C)

$$A = \frac{m_c(R+r)^2}{8} \quad (4.27)$$

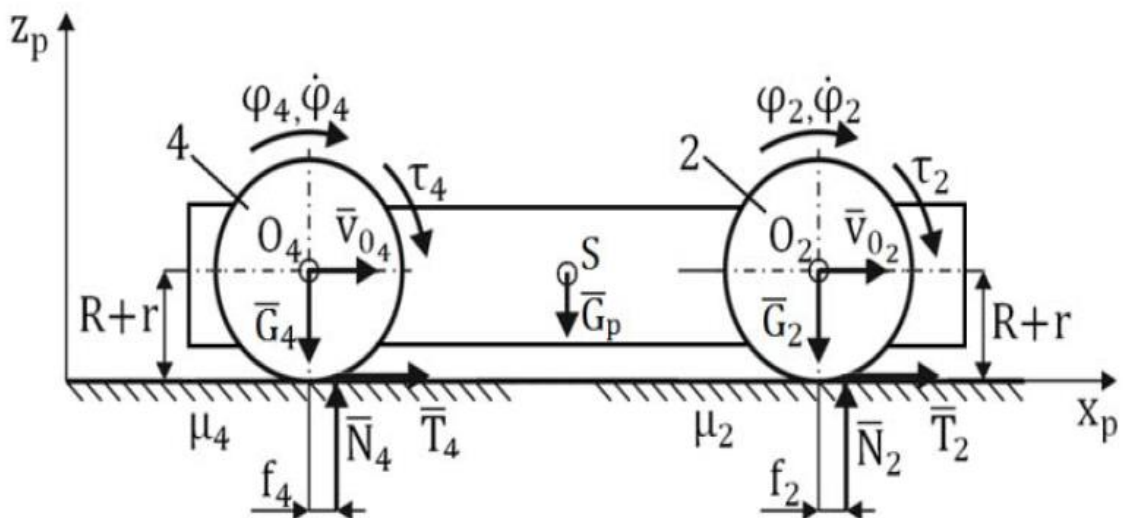
$$B = \frac{I_c(R+r)^2}{16(h+l)} \quad (4.28)$$

$$C = I_T \quad (4.29)$$

$$E_k = \frac{1}{2}(A + B + C)[\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + \dot{\theta}_3^2 + \dot{\theta}_4^2] + (A - B)(\dot{\theta}_1\dot{\theta}_4 + \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3) - B[\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2\dot{\theta}_4] \quad (4.30)$$



Şekil 4.2. 1. ve 3. tekerleklere gelen kuvvetler [42]



Şekil 4.3. 2. ve 4. tekerleklere gelen kuvvetler [42]

Analiz edilen aracın dört serbestlik derecesi olduğundan global koordinat değerleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'deki parametrelere göre kuvvetlerin temel çalışma denklemi şu şekilde yazılır.

$$\partial L = (\tau_1 - N_1 f_1) \partial \theta_1 + (\tau_2 - N_2 f_2) \partial \theta_2 + (\tau_3 - N_3 f_3) \partial \theta_3 + (\tau_4 - N_4 f_4) \partial \theta_4 \quad (4.32)$$

τ_i =Güç aktarım sisteminden kaynaklanan sürüş momenti, G_p = Araç kasa ağırlığı, G_i =Tekerleklerin ağırlığı, μ_i =Sürtünme katsayısı, f_i =Yuvarlanma sürtünme katsayısı, T_i =Sürtünme kuvveti, N_i =Zeminden gelen basınç kuvveti.

Temel çalışma denklemi, signum işaret fonksiyonu ve açısal hız değerleri kullanılarak yeniden düzenlenirse aşağıdaki denklemler oluşur.

$$Q_1 = \tau_1 - N_1 f_1 \quad (4.33)$$

$$Q_2 = \tau_2 - N_2 f_2 \quad (4.34)$$

$$Q_3 = \tau_3 - N_3 f_3 \quad (4.35)$$

$$Q_4 = \tau_4 - N_4 f_4 \quad (4.36)$$

$$Q_1 = \tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \quad (4.37)$$

$$Q_2 = \tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) \quad (4.38)$$

$$Q_3 = \tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) \quad (4.39)$$

$$Q_4 = \tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4) \quad (4.40)$$

(4.20)'deki Langrange denklemi ve (4.30)'daki toplam kinetik enerji denkleminin yola çıkarak aşağıdaki dikkörtgen matris oluşur.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} (A+B+C)\dot{\theta}_1 & (A-B)\dot{\theta}_4 & -B(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) \\ (A+B+C)\dot{\theta}_2 & (A-B)\dot{\theta}_3 & -B(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \\ (A+B+C)\dot{\theta}_3 & (A-B)\dot{\theta}_2 & -B(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_1) \\ (A+B+C)\dot{\theta}_4 & (A-B)\dot{\theta}_1 & -B(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

(4.41) denkleminin zamana göre türevi alınır;

$$M \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$M = \begin{bmatrix} (A+B+C) & -B & B & (A-B) \\ -B & (A+B+C) & (A-B) & B \\ B & (A-B) & (A+B+C) & -B \\ (A-B) & B & -B & (A+B+C) \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

(4.42)'den yararlanarak ters dinamik denklem aşağıdaki gibi oluşur.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) \\ N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) \\ N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4) \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Tekerleklerin açısal ivmelerinin eldesi için aşağıdaki dönüşüm yapılır.

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2AB+AC+3BC+C^2}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} & \frac{B}{(4B+C)C} & \frac{-B}{(4B+C)C} & \frac{-(2AB+AC-BC)}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} \\ \frac{B}{(4B+C)C} & \frac{2AB+AC+3BC+C^2}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} & \frac{-(2AB+AC-BC)}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} & \frac{-B}{(4B+C)C} \\ B \frac{-B}{(4B+C)C} & \frac{-(2AB+AC-BC)}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} & \frac{2AB+AC+3BC+C^2}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} & \frac{B}{(4B+C)C} \\ \frac{-(2AB+AC-BC)}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} & \frac{-B}{(4B+C)C} & \frac{B}{(4B+C)C} & \frac{2AB+AC+3BC+C^2}{(8AB+2AC+4BC+C^2)C} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} \tau_1 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ \tau_2 - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) \\ \tau_3 - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) \\ \tau_4 - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4) \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Bir xyz koordinat sisteminde nesneyi tanımlamak ve matematiksel bir model oluşturmak için homojen dönüşüm matrisleri kullanılır. Bu dönüşüm matrisleri kullanılarak V_x ve V_y hızları aşağıdaki gibi yazılır.

$$V_x = \dot{x}_s \cos \beta + \dot{y}_s \sin \beta \quad (4.47)$$

$$V_y = -\dot{x}_s \sin \beta + \dot{y}_s \cos \beta \quad (4.48)$$

(4.47) ve (4.48) denklemlerinin türevi alınıp (4.17), (4.18), (4.19) denklemleri ile bağlantı kurulursa aşağıdaki denklemler oluşur.

$$\ddot{x}_s \cos \beta - \dot{x}_s \dot{\beta} \sin \beta + \ddot{y}_s \sin \beta + \dot{y}_s \dot{\beta} \cos \beta = \left(\frac{R+r}{4}\right) \cdot [\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4] \quad (4.49)$$

$$-\ddot{x}_s \sin \beta - \dot{x}_s \dot{\beta} \cos \beta + \ddot{y}_s \cos \beta + \dot{y}_s \dot{\beta} \sin \beta = \left(\frac{R+r}{4}\right) \cdot [-\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3 - \ddot{\theta}_4] \quad (4.50)$$

$$\ddot{\beta} = \left(\frac{R+r}{4(h+l)}\right) \cdot [-\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_3 + \ddot{\theta}_4] \quad (4.51)$$

(4.46)'daki denklemden yararlanarak torkları içeren yeni denklemler aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_s \cos \beta - \dot{x}_s \dot{\beta} \sin \beta + \ddot{y}_s \sin \beta + \dot{y}_s \dot{\beta} \cos \beta &= \left(\frac{R+r}{4(2A+C)}\right) \cdot [\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 - \\ N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) - N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4)] \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_s \sin \beta - \dot{x}_s \dot{\beta} \cos \beta + \ddot{y}_s \cos \beta + \dot{y}_s \dot{\beta} \sin \beta &= \left(\frac{-(R+r)}{4(2A+C)}\right) \cdot [\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 - \\ N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) + N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) + N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) - N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4)] \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\beta} &= \left(\frac{-(R+r)}{4(h+l)(4B+C)}\right) \cdot [\tau_1 - \tau_2 - \tau_3 - \tau_4 - N_1 f_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) + \\ N_2 f_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) - N_3 f_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) + N_4 f_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4)] \end{aligned} \quad (4.54)$$

Mesafeler eşit olduğundan $f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f$ olarak kabul edilir.

(4.27), (4.28), (4.29)'daki yardımcı değişken denklemlerinden yararlanarak (4.52), (4.53) ve (4.54) denklemler düzenlenirse aşağıdaki denklemler oluşur.

$$(m_c + \frac{4I_T}{(R+r)^2})[\cos\beta(\ddot{x}_s + \dot{y}_s\dot{\beta}) + \sin\beta(\ddot{y}_s + \dot{x}_s\dot{\beta})] = \frac{1}{(R+r)} \cdot [\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 - f(N_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) + N_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) + N_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) + N_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4))] \quad (4.55)$$

$$(m_c + \frac{4I_T}{(R+r)^2})[\cos\beta(\ddot{y}_s - \dot{x}_s\dot{\beta}) - \sin\beta(\ddot{x}_s + \dot{y}_s\dot{\beta})] = \frac{-1}{(R+r)} \cdot [\tau_1 - \tau_2 - \tau_3 + \tau_4 - f(N_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) - N_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) - N_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) + N_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4))] \quad (4.56)$$

$$(I_c + 4I_T \frac{(h+l)^2}{(R+r)^2})\ddot{\beta} = \frac{-(h+l)}{(R+r)} \cdot [\tau_1 - \tau_2 + \tau_3 - \tau_4 - f(N_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) - N_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) + N_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) - N_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4))] \quad (4.57)$$

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 göz önünde bulundurularak toplam kuvvet eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - G_p - G_1 - G_2 - G_3 - G_4 = 0 \quad (4.58)$$

S noktasına göre moment alınırsa;

$$(N_1 + N_2)h - (N_3 + N_4)h - (G_1 + G_2)h + (G_3 + G_4)h = 0 \quad (4.59)$$

$$G_c = G_p + 4G_t \quad (4.60)$$

$G_t = G_1 = G_2 = G_3 = G_4$ = Tekerlek ağırlıkları, G_c = Toplam ağırlık G_p = Kasa ağırlığı

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - G_c = 0 \quad (4.61)$$

Mesafeler eşit kabul edildiğinden;

$$N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = \frac{G_c}{4} \quad (4.62)$$

Denklem (4.55), (4.56) ve (4.57) denklem (4.62)'ye göre düzenlenirse;

$$\begin{aligned} (m_c + \frac{4I_T}{(R+r)^2})[\cos\beta(\ddot{x}_s + \dot{y}_s\dot{\beta}) + \sin\beta(\ddot{y}_s - \dot{x}_s\dot{\beta})] = \frac{1}{(R+r)} \cdot [\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 - \\ \frac{G_{cf}}{4}(\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) + \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) + \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) + \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4))] \end{aligned} \quad (4.63)$$

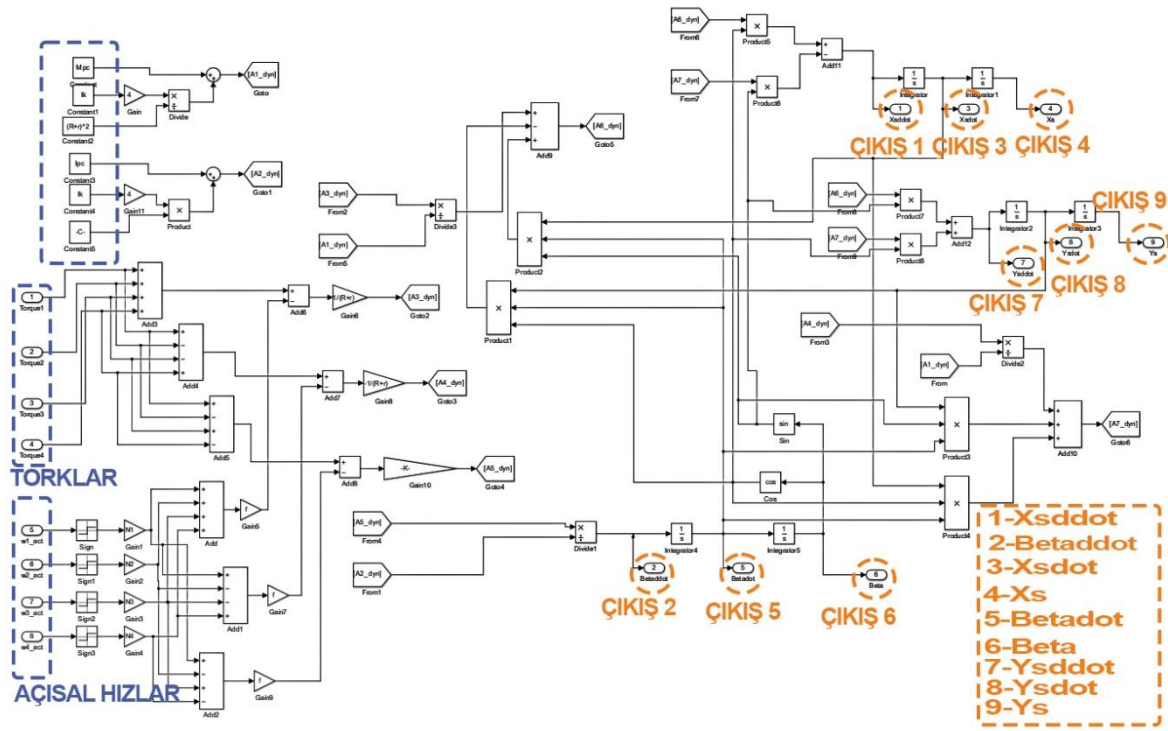
$$\begin{aligned} (m_c + \frac{4I_T}{(R+r)^2})[\cos\beta(\ddot{y}_s - \dot{x}_s\dot{\beta}) + \sin\beta(\ddot{x}_s - \dot{y}_s\dot{\beta})] = \frac{-1}{(R+r)} \cdot [\tau_1 - \tau_2 - \tau_3 + \tau_4 - \\ \frac{G_{cf}}{4}(\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) - \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) - \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) + \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4))] \end{aligned} \quad (4.64)$$

$$\begin{aligned} (I_c + 4I_T \frac{(h+l)^2}{(R+r)^2})\ddot{\beta} = \frac{-(h+l)}{(R+r)} \cdot [\tau_1 - \tau_2 + \tau_3 - \tau_4 - \frac{G_{cf}}{4}(\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) - \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) + \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) - \\ \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_4))] \end{aligned} \quad (4.65)$$

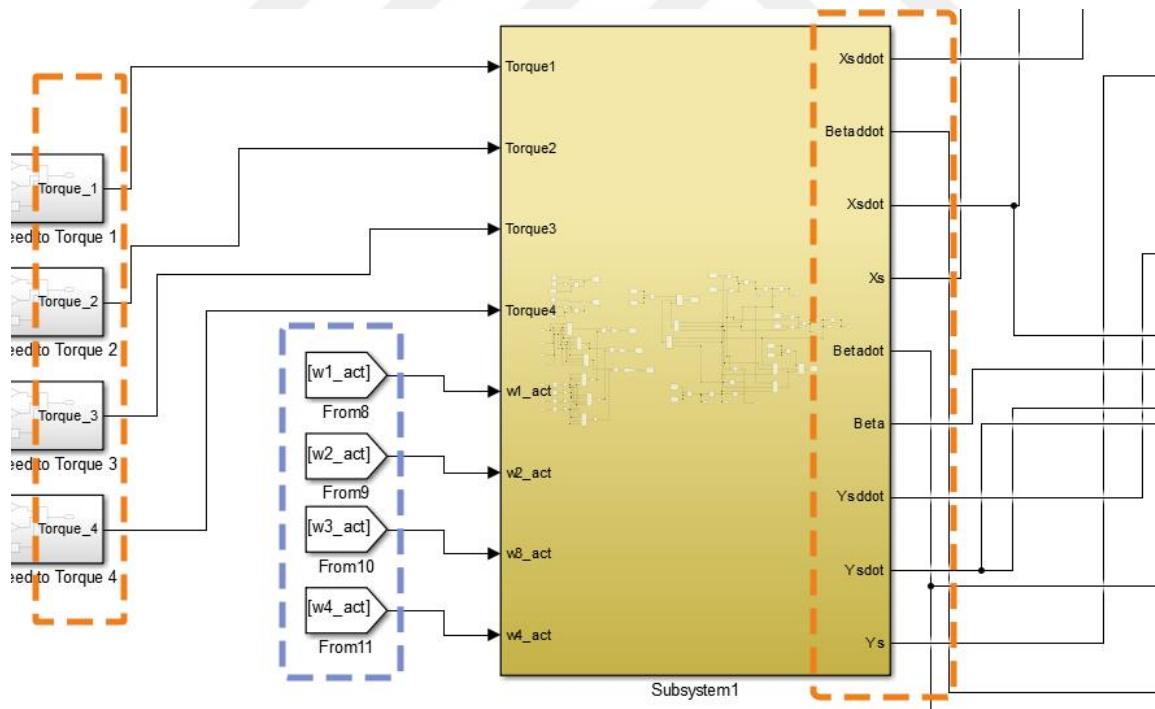
[42]

Dinamik denklemlerin simulink blok modeli;

OYA'nın dinamik blok modeli denklem 4.63, 4.64 ve 4.65 kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan bu blok modeli Şekil 4.4'de gösterilmektedir. Dinamik blok modelinde her bir tekerleğin açısal hızları ve torkları giriş, X_s , Y_s , beta konum ve açılarının birinci ve ikinci dereceden türevleri ise çıkış olacak şekilde tasarlanmıştır. Blok modelinin girişlerinin ve çıkışlarının genel sistem modelinde daha anlaşılır olabilmesi için subsystem blok'u oluşturulmuştur. Subsystem blok modeli Şekil 4.5'de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Dinamik matlab/simulink blok modeli



Şekil 4.5. Dinamik subsystem model görünümü

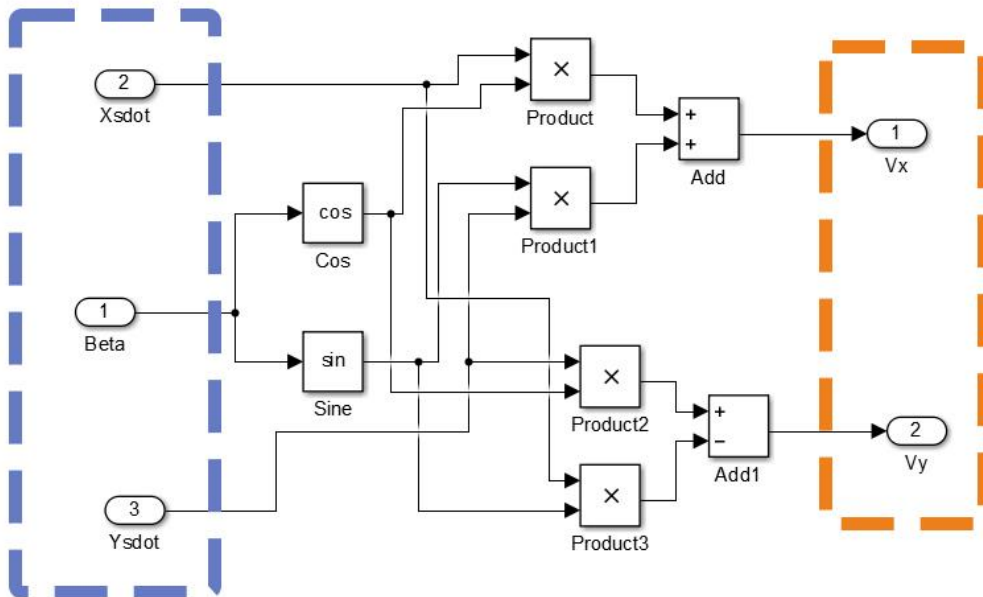
Dinamik modelinin blok içerisinde değeri tanımlanmayan parametreler ve değerleri Matlab editörün içerisinde yeni bir sayfa açılarak tanıtılmıştır. Bu parametreler ve değerleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Dinamik model parametreleri ve değerleri

Parametreler	Değerler
Taşıyacak Ağırlık Kütlesi (Mt)	1-45 kg
Araç kütlesi (Mp)	10 kg
Tekerlek kütlesi (Mk)	1.5 kg
Toplam kütle (Mpc)	$Mp+4*Mk+Mt$ kg
Araç atalet momenti (Ipzp)	0.0178 kg.m ²
Tekerlek atalet momenti (Ikzp)	0.0139 kg.m ²
Toplam atalet momenti (Ipc)	$Ipzp+4*Ikpz$ kg.m ²
Tekerleklerin kendi eksen ataleti (Ik)	0.0005 kg.m ²
Tekerlek yarıçapı (R)	0.055 m
Silindir yarıçapı (r)	0.015 m
X yönündeki mesafe (l)	0.49 m
Y yönündeki mesafe (h)	0.46 m
Sürtünme katsayısı (f)	0.002 kg.m ² /s
Araç ağırlığı (Gp)	$Mp*9.81$ N
Tekerlek ağırlığı (Gk)	$Mk*9.81$ N
Toplam ağırlık (Gr)	$Gp+4*Gk$ N
Tepki kuvvetleri (N1=N2=N3=N4)	$Gr/4$ N

Konum-Hız denklemlerinin simulink blok modeli;

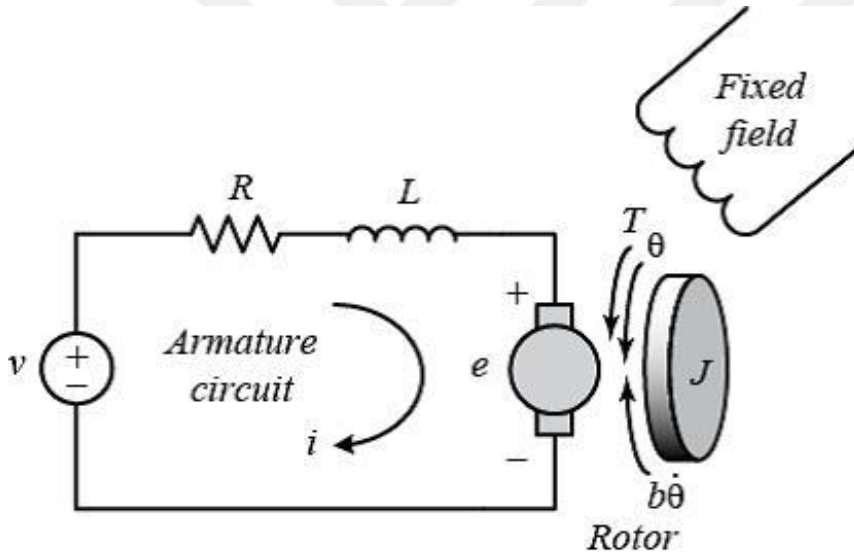
Yörünge takibi gerçekleştirilen OYA'nın konum-hız blok modeli X_s , Y_s ve beta giriş, V_x ile V_y hızları ise çıkış olacak şekilde denklem 4.47 ve denklem 4.48 kullanılarak tasarlanmıştır. Bu konum-hız blok modeli Şekil 4.6'de gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Konum-hız matlab/simulink blok modeli

4.3. DC Motor Modeli

Tasarımı yapılan OYA'nın her bir tekerleğinde tahrik için serbest uyarmalı redüktörlü doğru akım motoru kullanılmıştır. Redüktörlü DC motor, yüksek tork ve güce sahip olmasından dolayı tercih edilmiştir. Dakikada 300 rpm devir sayısı, 30 W güç, 24 V gerilim ve 3.4 A akım ile çalışan redüktörlü DC motorun ürettiği moment, bir dişli kutusu üzerinden motor miline, motor milinden de tekerleğe iletilmektedir. Bu nedenle sistemin dinamiği çıkarılırken motor modelinin ayrı olarak incelenmesi gerekmektedir. Belirlenen referans yörüngeyi takip etmesi amacıyla kontrolcü tarafından karar verilen doğrultuda yakıt piline ve DC-DC dönüştürücüye her bir motor için üretilmesi gereken gerilim ile motorun ürettiği tork ve motor hızı arasındaki transfer fonksiyonu bulunmuştur. Motora gelen gerilim doğrultusunda motorun açısal hızı ve motor torku eşitsizliklerle bulunur.



Şekil 4.7. Armatürün elektrik eşdeğer devresi ve dc motorun serbest gövde diyagramı [43]

DC motor tarafından üretilen tork, armatür akımı ve manyetik alan gücüyle orantılıdır. Manyetik alanın sabit olduğu kabul edilip motor torkunun, motor tork sabiti ve armatür akımı bağlantılı varsayılmaktadır ve buna bağlı aşağıdaki denklem oluşur. τ_M = Motor torku, K_T = Motor tork sabiti, I_M = Armatür akımı. [43]

$$\tau_M = K_T \cdot I_M \quad (4.66)$$

Ters emk kuvveti ile açısal hız arasında ise ters emk sabiti kullanılarak aşağıdaki eşitsizlik oluşur. e = Emk kuvveti, K_E = Emk sabiti, $\dot{\theta}_M$ = Motor açısal hızı

$$e = K_E \cdot \dot{\theta}_M \quad (4.67)$$

SI biriminde motor tork sabiti(K_T) ile ters emk sabiti(K_E) eşit olduğundan aşağıdaki gibi kabul edilir.

$$K_T = K_E = K \quad (4.68)$$

Şekil 4.4 ile Newton'un 2. yasasından ve Kirchoff'un gerilim yasasından yararlanarak aşağıdaki denklemleri oluşturabiliriz. J = Rotor atalet momenti, b = Motor viskoz sürtünme sabiti, $\ddot{\theta}_M$ = Motor açısal ivme, L = İndüktans, R = Direnç, V_M = Motor gerilimi

$$J\ddot{\theta}_M + b\dot{\theta}_M = Ki \quad (4.69)$$

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri = V_M - K\dot{\theta}_M \quad (4.70)$$

Denklem (4.69) ve (4.70)'e Laplace dönüşümü uygulanırsa, s cinsinden Laplace değişkeni aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$s(Js + b)\theta(s) = KI(s) \quad (4.71)$$

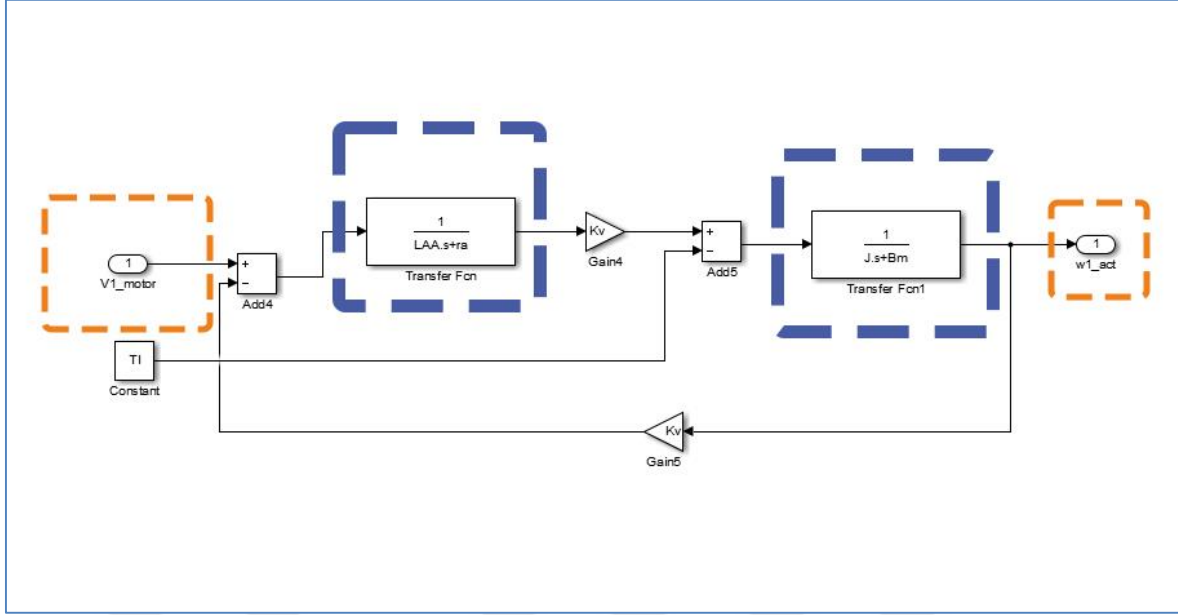
$$(Ls + R)I(s) = V(s) - s\theta(s) \quad (4.72)$$

Denklem (4.71) ve (4.72)'den $I(s)$ değerlerini kaldırırsak, aşağıdaki açık-çevrim transfer fonksiyonuna ulaşabiliriz. Burada armatür gerilimi giriş, motor açısal hızı çıkış olarak kabul edilir. ($w = \dot{\theta}_M$ = Motor açısal hız)

$$T(s) = \frac{w(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js+b)(Ls+R)+K^2} \left[\frac{rad/sn}{V} \right] \quad (4.73)$$

Motor modeli denklemlerinin simulink blok modeli;

Matlab/Simulink ortamında DC motor modeli, denklem 4.66 ile 4.73 arasındaki denklemler kullanılarak bir simulink blok model şeklinde oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model Şekil 4.8'da gösterilmektedir.



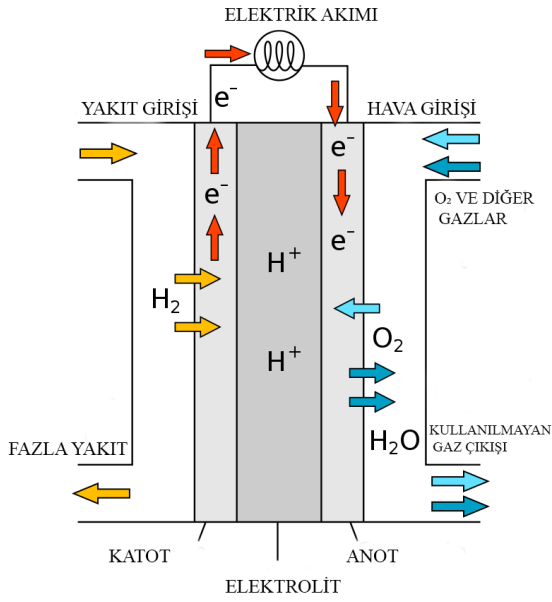
Şekil 4.8. Dc motor modeli matlab/simulink blok görünümü

DC motor modelinin girişi ve çıkışı $i=1,2,3,4$ olmak üzere sırasıyla V_i gerilimi ve w_i açısal hızı olarak verilmiştir. Diğer motor modeli parametreleri ve değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Dc motor modeli parametreleri ve değerleri

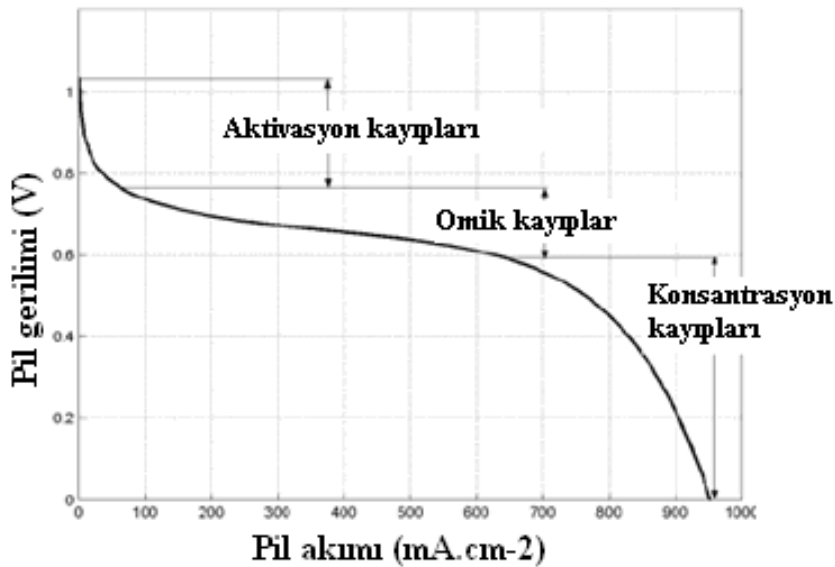
Parametreler	Değerler
Sürtünme katsayısı (Bm)	0.250 kg.m ² /s
Motor tork sabiti (Tl)	0.002 N.m/A
Emk sabiti (Kv)	0.2 V.s/rad
Atalet Momenti (J)	0.15 kg.m ²
Bobin değeri (LAA)	0.12 H
Direnç değeri (ra)	0.5 ohm

4.4. PEM Yakıt Pili Modeli



Şekil 4.9. Pem yakıt pili çalışma prensibi [44]

Şekil 4.9’de görüldüğü üzere, hidrojen ve havadan gelen oksijen ayrı ayrı gaz kanallarına girmektedir. Daha sonra hidrojen gazı katalizörde elektronunu kaybederek oksijenin bulunduğu kanala doğru hareket eder. Bu kanalda oksijen ile tepkimeye giren hidrojen, su açığa çıkarır. Katalizörden geçemeyen hidrojen elektronu ise dış devreyi dolanarak katoda doğru hareket eder ve bu hareket elektrik üretimini sağlar. [46-47]



Şekil 4.10. Pem yakıt pilinin kayıp eğrisi [45-46]

Bir yakıt hücresinde akım artış gösterirse hücre gerilimi azalır. Şekil 4.10'de buna bağlı PEM yakıt pili kayıp eğrisi görülmektedir. Hücre gerilimi aşağıdaki denklem ile bulunabilir. Bu denklemde yüksüz gerilim (E); gerilimi düşüren, aktivasyon gerilimi, omik gerilim ve konsantrasyon gerilimleri tarafından azaltılır.

$$V_{hücre} = E - V_{akt} - V_{omik} - V_{kon} \quad (4.74)$$

Açık devre hücre gerilimini yani yüksüz gerilimi (E) kısmi basınçlarla ve sıcaklıkla aşağıdaki gibi yazabiliriz. Burada; E_0 = refefans gerilimi, R= gaz sabiti, F= Faraday sabiti, P_{O_2} , P_{H_2} , P_{H_2O} = sırasıyla oksijen, hidrojen ve su buharı basınçları, P= toplam basınç. [46-47]

$$E = E_0 - 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 298,15) + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right) \quad (4.75)$$

Gerilimi düşüren ve kayıp oluşturan aktivasyon, omik ve konsantrasyon gerilimleri ise aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$E_{akt} = \frac{R \cdot T}{n \cdot \alpha \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (4.76)$$

Negatiflikten kurtulmak için; [45-46]

$$V_{akt} = -E_{akt} \quad (4.77)$$

Omik gerilimi; R_{mem} = membran direnci, t_m = membran kalınlığı, σ = membran iletkenliği.

$$V_{omik} = I \cdot R_{mem} \quad (4.78)$$

$$R_{mem} = \frac{t_m}{\sigma} \quad (4.79)$$

Konsantrasyon gerilimi ise; $a = 1,1 \cdot 10^{-4} - 12 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273)$, $b = 8 \cdot 10^{-3}$

$$V_{kons} = a \cdot e^{b \cdot l} \quad (4.80)$$

Bir hücrenin potansiyeli ($V_{hücre}$), akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, hidrojen basıncı ve oksijen basıncının bir fonksiyonu olarak çözülebilir. Eğer tüm hücreler seri olarak bağlanmışlarsa yığın gerilimi hücre gerilimi ile hücre sayısının çarpımına eşit olur.

$$V_{fc} = V_{hücre} \cdot \text{Hücre Sayısı} \quad (4.81)$$

“Hücre potansiyeli ise; hidrojen, oksijen ve kısmi buhar basınçlarına bağlıdır.” [46] Buna bağlı olarak aşağıdaki denklemler oluşur.

$$\frac{V}{R \cdot T} \frac{dP_g}{dt} = m_g - m_{\zeta} \mp \frac{I}{n \cdot F} \quad (4.82)$$

Anot akış modeli;

$$\frac{V_a}{R \cdot T} \frac{dP_{H_2}}{dt} = m_{H_2-g} - m_{H_2-\zeta} - \frac{I}{4 \cdot F} \quad (4.83)$$

$$m_{H_2} = k_a \cdot (P_{H_2} - P_{amb}) \quad (4.84)$$

Katot akış modeli;

$$\frac{V_c}{R \cdot T} \frac{dP_{O_2}}{dt} = m_{O_2-g} - m_{O_2-\zeta} - \frac{I}{4 \cdot F} \quad (4.85)$$

$$m_{O_2} = k_c \cdot (P_{O_2} - P_{amb}) \quad (4.86)$$

Katot su akışı modeli;

$$\frac{V_c}{R \cdot T} \frac{dP_{H_2O-c}}{dt} = m_{H_2O-g \cdot c} - m_{H_2O-\zeta \cdot c} - \frac{I}{2 \cdot F} \quad (4.87)$$

Burada; P_{amb} = çevreleyen basınç, V_a = anot hacmi, k_a = anot akış sabiti, V_c = katot hacmi, k_c = katot akış sabitidir.

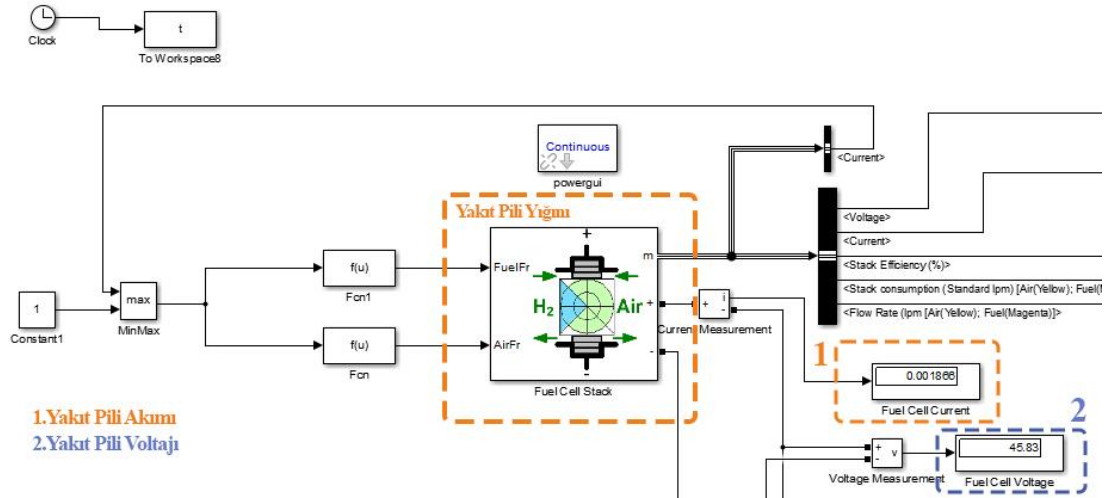
Hidrojen yakıt pili simulink modeli;

Hidrojen yakıt pili batarya sisteminin Matlab/Simulink blok modelinde, hidrojen yakıtı giriş fonksiyonu ile hava girişi fonksiyonu giriş olarak kullanılarak yakıt pili blok modeli

oluşturulmuştur. Yakıt pili özellikleri Çizelge 4.3'te, yakıt pili blok modeli ise Şekil 4.11'de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Yakıt pili özellikleri

Yakıt pili modeli	24 V DC PEMFC
Nominal ve maksimum güç	1.26 Kw-2 Kw
0 A ve 1 akımlardaki gerilim	$V(0 A)=42 V$, $V(1 A)= 35 V$
Nominal çalışma noktası	$I_{nom} = 52 A$, $V_{nom} = 24.23 V$
Maksimum operasyon noktası	$I_{end} = 100 A$, $V_{nom} = 20 V$
Hücre sayısı	42
Nominal yığın verimliliği	%46
Çalışma sıcaklığı	55 C°
Nominal hava akış oranı	2400 lpm
Nominal besleme basıncı	Yakıt için: 1.5 bar, Hava için: 1 bar
Nominal kompanzasyon	%99.95 H ₂ , %2 O ₂ , %1 H ₂ O



Şekil 4.11. Yakıt pili matlab/simulink blok model görünümü

4.5. DC/DC Buck Dönüştürücü Modeli

DC-DC buck dönüştürücü, hidrojen yakıt pilinden aldığı motor için yüksek olan gerilim değerini, bir Integral (I) kontrolcü yardımıyla motor için gerekli gerilim değerine düşürmektedir. Bu gerilim değeri çıkış gerilimidir. Çıkış gerilimi olan V_0 , dönüştürücü devresindeki anahtarın açık ya da kapalı olması durumlarındaki indüktör üzerinden geçen akım ve gerilim değerine göre hesaplanmaktadır. Bu dönüştürücü devresinde anahtar olarak, PWM sinyali uygulanarak kontrol edilen bir Mofset ve kontrolsüz bir diyot bulunmaktadır.

Anahtar kapalıyken indüktördeki gerilim denklem 4.88’de verilmiştir. Burada V_S giriş gerilimi, V_0 ise çıkış gerilimidir.

$$v_L = V_S - V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.88)$$

Denklem 4.88 yeniden düzenlenirse;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_0}{L} \quad (4.89)$$

Anahtar kapalıyken indüktör üzerinden geçen akım ise denklem 4.89’un değiştirilmesi ile hesap edilir. İndüktör üzerinden geçen akım denklem 4.90 ve 4.91’de elde edilmiştir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S - V_0}{L} \quad (4.90)$$

$$(\Delta i_L)_{KAPALI} = \left(\frac{V_S - V_0}{L} \right) DT \quad (4.91)$$

Anahtar açık durumdayken indüktördeki gerilim denklem 4.92’de verilmiştir.

$$v_L = -V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.92)$$

Denklem 4.92 yeniden düzenlenirse;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_0}{L} \quad (4.93)$$

Anahtar açıkken indüktör üzerinden geçen akım ise denklem 4.93’ün değiştirilmesi ile hesap edilir. İndüktör üzerinden geçen akım denklem 4.94 ve 4.95’de elde edilmiştir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_0}{L} \quad (4.94)$$

$$(\Delta i_L)_{AÇIK} = - \left(\frac{V_0}{L} \right) (1 - D)T \quad (4.95)$$

Kararlı duruma ulaşmış, dengede olan bir devrede anahtarlama süresince indüktörden geçen akımının değişim miktarı sıfırdır. Bu değişimi gösteren denklem 4.96’da verilmiştir.

$$(\Delta i_L)_{KAPALI} + (\Delta i_L)_{AÇIK} = 0 \quad (4.96)$$

Denklem 4.91 ve 4.95 yerine yazılırsa denklem 4.97 elde edilir.

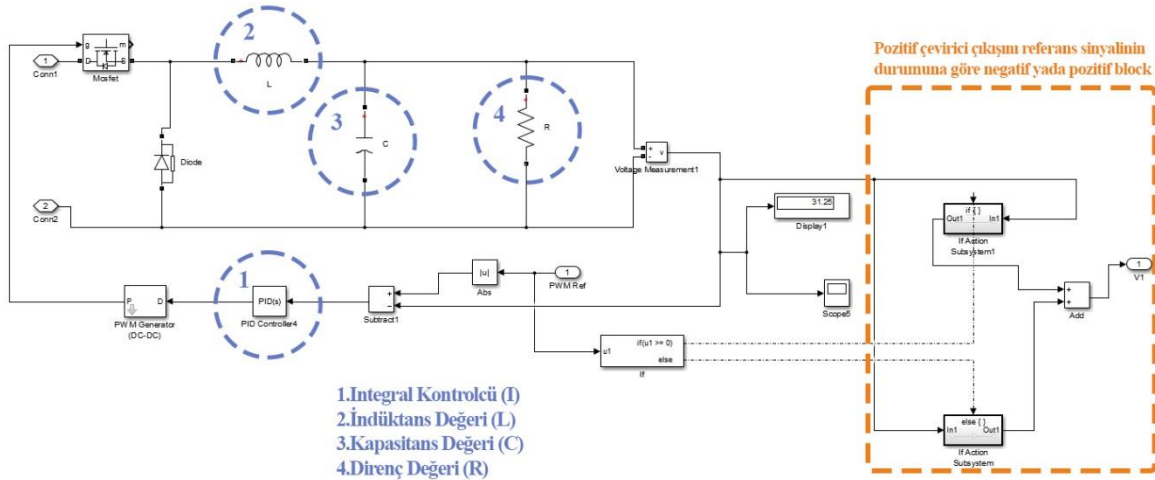
$$\left(\frac{V_S - V_0}{L}\right) DT - \left(\frac{V_0}{L}\right) (1 - D)T = 0 \quad (4.97)$$

Denklem 4.97, V_0 çıkış gerilimi için çözümlenirse denklem 4.98 elde edilir.

$$V_0 = V_S D \quad (4.98)$$

Giriş gerilimi ve çalışma oranıyla doğru orantılı olan çıkış gerilimi, uygun bir çalışma oranı kullanılarak kontrol edilebilmektedir. [48]

DC/DC buck dönüştürücü modelinde Integral (I) kontrolcü kullanılmıştır. Bu kontrolcü yüksek gerilim değerini gerekli olan gerilim değerine gelmesi için gerekli denetimi yapmaktadır. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan DC-DC buck dönüştürücü blok modeli Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Dc/dc buck dönüştürücü matlab/simulink blok modeli

DC/DC buck dönüştürücüdeki indüktans, kapasitans ve direnç değerleri için ise optimizasyon uygulanmıştır. PSO optimizasyonu ile ayarlanan DC/DC buck dönüştürücüde giriş olan pozitif gerilim referans sinyalinin (dönüştürücüye mutlak değeri alınarak pozitif giriş yapılıyor) negatif veya pozitif olma durumuna göre pozitif dönüştürücü çıkışını ayarlayan blok bulunmaktadır. Integral(I) kontrolcüye ait kontrol değerleri ile indüktans,

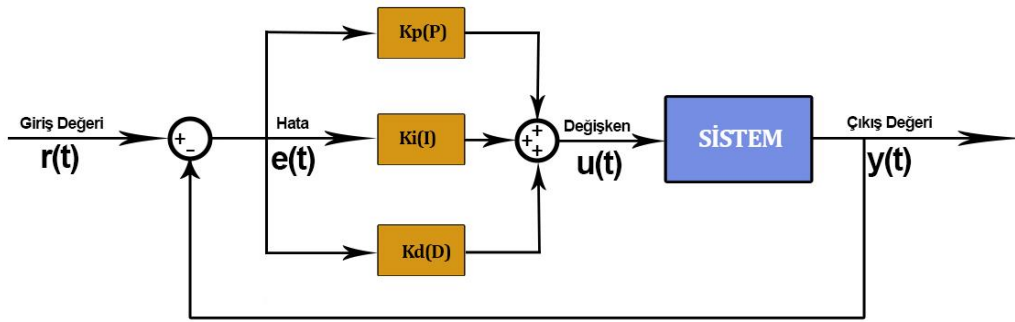
kapasitans ve direnç değerlerine ilişkin optimizasyon sonuçları parçacık sürü optimizasyonun yapıldığı bölüm 4.7.3’de detaylı olarak anlatılmaktadır.

4.6. PID Denetleyici Sistemler

Çıkış değeri ($y(t)$) ile giriş değeri ($r(t)$) arasındaki fark hata değerini ($e(t)$) vermektedir. PID denetleyiciler bu hata değerini en aza indirmeye çalışan kontrol sistemleridir.

$$e(t) = y(t) - r(t) \quad (4.99)$$

Buradaki giriş değeri referans olarak belirlenen ya da istenilen değerdir. PID kontrolcüye ait genel blok şeması Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Pid denetleyici genel blok şeması

PID denetleyicilerin temel mantığı hata değerini en az tutarak referans değerinin çıkış değeriyle aynı olmasını sağlamaktır. PID denetleyiciler üç kontrolcüden oluşmaktadır. Bu kontrolcüler; Oransal (P), Integral (I), Türevsel (D)’dir. PID kontrol blok şemasındaki değişken ise kontrol değişkenidir. Kontrol değişkeni ($u(t)$) formülü denklem 4.103’de verilmektedir.

$$\text{Oransal (P)} = k_p e(t) \quad (4.100)$$

$$\text{Integral (I)} = k_i \int_0^t e(t) dt \quad (4.101)$$

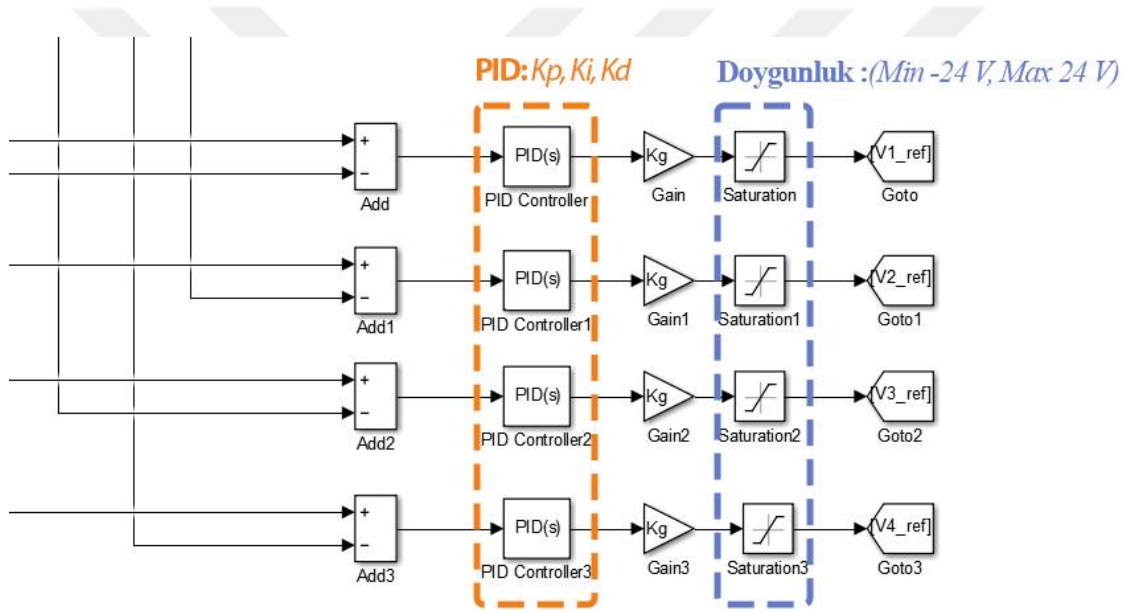
$$\text{Türevsel (D)} = \frac{de(t)}{d(t)} \quad (4.102)$$

$$\text{Kontrol Değişkeni } u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + \frac{de(t)}{d(t)} \quad (4.103)$$

Burada t zaman değeri olarak kullanılmaktadır.

PID kontrolcünün simulink blok modeli;

Bu çalışmanın denetleyici sistemi olarak PID kontrol kullanılmıştır. PID kontrolcü gerilim değerlerini ayarlayarak lineer ve açısal hızı kontrol etmekte ve OYA'nın verilen referans yörüngeyi takip etmesi için gerekli kontrolü yapmaktadır. Genel sistem blok modelinin PID kontrol blok modeli Şekil 4.14'de görülmektedir.



Şekil 4.14. Pid kontrol matlab/simulink blok modeli

4.7. Parçacık Sürü Algoritması (PSO) ve PID Uygulaması

4.7.1 Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

PSO, ilk olarak 1995 yılında, Kennedy J. ve Eberhart R. tarafından ortaya konan, sürü halinde gezinen kuş ve benzeri canlıların yiyecek bulma, yırtıcılardan kaçma gibi ekosistem yaşam davranışlarının incelenmesiyle oluşturulan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir.

Bu optimizasyon yönteminde, bir kuş sürüsünün yırtıcı bir avcıdan kaçması örneği verilecek olursa, sürüdeki her bir kuş kendi başına bir bireydir ve parçacık olarak tanımlanır. Kuş

sürüsünün amacı, saldırı hazırlığında bulunan yırtıcı avcıdan kaçmak olacaktır. Burada saldırı hazırlığındaki yırtıcı avcının ne taraftan saldıracağı bilinmemektedir. Fakat saldırı hangi taraftan gelirse gelsin, kuş sürüsünün her iterasyonda bir kaçış yönü ve bir çözümü olacaktır. Bu kaçış yönü de saldırı yönüne bağlı olarak, saldırıdan kurtulması en mümkün olan kuş yönüne doğru olacaktır. Burada saldırıdan kurtulmak için gerekli çözüm her bir kuşa denk gelmektedir. Kuşların yani parçacıkların hepsi amaç fonksiyonu ile optimizasyonu yapılarak incelenir ve tüm iterasyonlarda en iyi çözümler bulunur. Bu çözümler, her bir parçacığın kendi hızları olduğundan ve hızını kendisinden daha iyi bir durumdaki parçacığın hızına yaklaştırmaya çalıştığından sürekli olarak yeniden hesaplanır ve güncellenir. Bu şekilde sürüdeki her bir birey daha iyi bir konuma ulaşır ve böylelikle en iyi çözümler bulunur.

PSO algoritmasında her bir parçacık için en iyi iki çözüm yani değer vardır. Bu değerlerden birincisi, her bir parçacığın bir önce elde ettiği en iyi değerdir. Bu değer *pbest* olarak isimlendirilir. İkinci en iyi değer ise başlangıç iterasyonundan itibaren yapılan bütün iterasyonlar arasından elde edilen en iyi değerdir. Bu değer ise *gbest* olarak isimlendirilir. [49]

Buradan yola çıkarak, her bir parçacık kendi değerini, o değere sahip olduğu durumdaki hızını *pbest* ve *gbest* ile arasındaki mesafeye göre belirler ve P adet parçacıktan i. parçacığın (P_i) hızı V_i denklem 4.104'deki gibi hesaplanır. 4.105'deki denklemde ise n. iterasyondaki konum bilgisi hesaplanmaktadır.

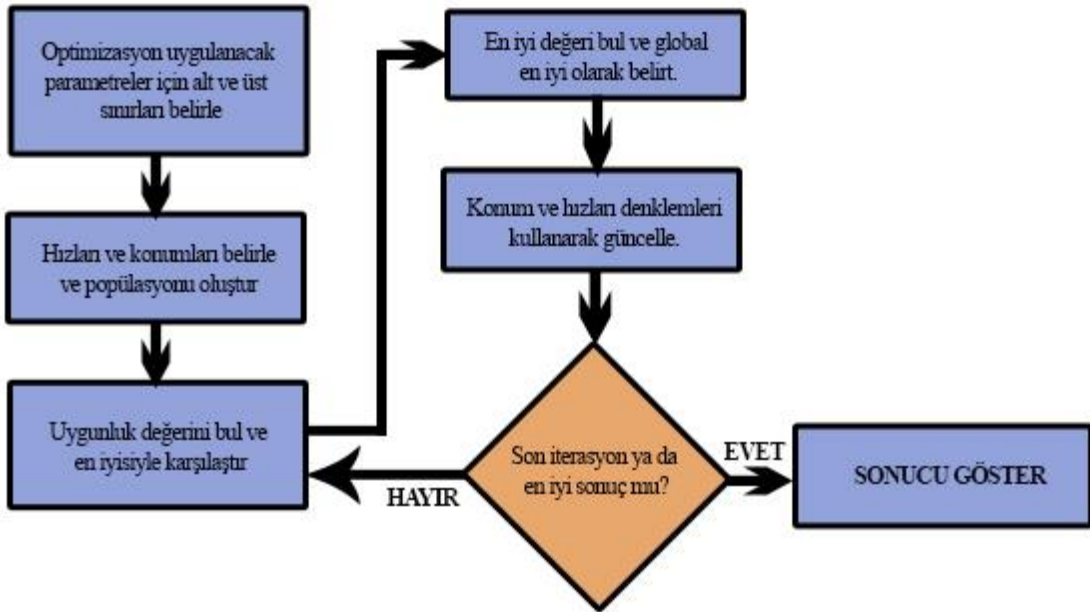
$$V(n+1) = w(n+1) * V(n) + \alpha_1(n+1) * r_1 * (P^{pbest}(n+1) - (P(n))) + \alpha_2(n+1) * r_2 * (P^{gbest}(n+1) - P(n)) \quad (4.104)$$

$$P(n+1) = P(n) + V(n+1) \quad (4.105)$$

Burada $V(n)$ ve $V(n+1)$, n ve n+1'inci iterasyondaki parçacık hızları, $P(n)$ ve $P(n+1)$ ise n ve n+1'inci parçacık konumlarını belirtmektedir. $w(n+1)$, n+1'inci iterasyondaki atalet ağırlığını, α_1 ve α_2 pozitif öğrenme katsayıları, r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında rastgele sayıları, P^{pbest} kendi en iyi değerini, P^{gbest} ise global en iyi değeri belirtmektedir. Bu denklemler ile PSO algoritmasının adımları aşağıdaki gibi yapılabilir.

1. Optimizasyon uygulanacak parametreler için alt ve üst sınırlar belirlenir.
2. Her bir parçacığa başlangıç hızları ve konumları belirlenen sınırlar içerisinde rastgele atanarak sürü popülasyonu oluşturulur.
3. Parçacıkların uygunluk değerleri belirlenir ve $pbest$ ve $gbest$ 'e göre uygunluk değerleri karşılaştırılır.
4. Karşılaştırma yapıldıktan sonra daha iyi durumda olan parçacık varsa yer değiştirilir.
5. Parçacıkların konumları ve hızları denklem 4.93 ve denklem 4.94 kullanılarak yenilenir.
6. Döngü, en iyi değer bulunana kadar ya da bütün iterasyonları bitene kadar üçüncü, dördüncü ve beşinci maddeler içerisinde devam eder.

Bu algoritma adımlarının şematik gösterimi Şekil 4.15'de gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Pso algoritmasının adım şeması

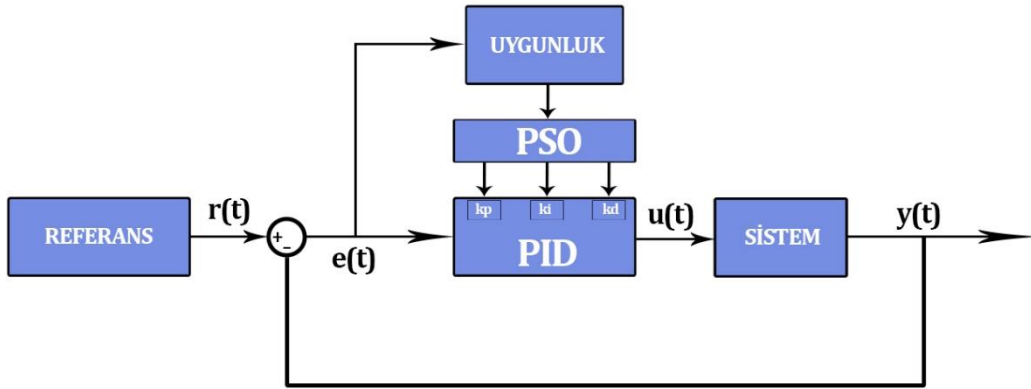
4.7.2 PSO algoritmasının PID uygulaması

PID kontrolcüler kolay ve güvenli bir şekilde uygulanabilir olmasından dolayı birçok kontrol uygulamasında kullanılmaktadır. Tasarımı ve modellemesi yapılan aracın genel kontrolü için PID uygun görülmüştür. DC/DC buck dönüştürücünün gerilim kontrolü için ise Integral (I) kontrolcü kullanılmıştır. Bu kontrolcüler için kontrol parametrelerinin belirlenmesi

deneme yanılma yoluyla bazen mümkün olmakta bazen ise mümkün olamamaktadır. İki kontrolcü için de sistemin karmaşık olması, genel sistemin 4 serbestlik dereceli olması ve DC/DC buck dönüştürücüye yakıt pilinden gelecek yüksek gerilim değerinin en verimli şekilde kullanılması gibi nedenlerden dolayı kontrol parametrelerinin doğru belirlenmesi önemli olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı kontrolçülere, geleneksel ve sıklıkla kullanılan bir optimizasyon yöntemi olan PSO algoritması uygulanmıştır. Bu optimizasyon sonrasında hata değerlerinin en az çıkmasının sağlanması için sıklıkla kullanılan uygunluk fonksiyonlarından olan, hataların hesaplanmasında zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (Integral Time-Weighted Absolute Error (ITAE) kullanılmıştır. ITAE uygunluk fonksiyonu denklem 4.106'da gösterilmektedir.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (4.106)$$

PSO algoritmasının PID kontrolcüye uygulandığı blok diyagramı Şekil 4.16'de gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Pso'nun pid üzerinde uygulanması

4.7.3 PSO'nun aracın ve DC/DC dönüştürücü kontrolçülerine uygulanması

Aracın PID kontrolçüsünün optimizasyonu;

Otomatik yönlendirmeli aracın yörünge takibi için bir referans rota tasarlanmıştır. Bu rotadaki takip performansının gözlemi yapılmadan önce PSO algoritması ile her bir tekerleğinin açısal hızları geri beslenerek kontrol işlemini gerçekleştiren PID kontrolçülerinin katsayıları bulunmuştur. PSO'da temel amaç fonksiyonları, rotanın takip

performans hatasını en aza indirmek için kullanılmıştır. Yapılan bu optimizasyon ile bulunması istenen parametreler için sınır değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. PID kontrolcünün optimizasyonu için belirlenen bu sınır değerleri Çizelge 4.4 verilmiştir.

Çizelge 4.4. Pid denetleyicilerin optimizasyonu için üst ve alt sınırlar

J=1,2,3,4	Kp_j	Ki_j	Kd_j
Maksimum	7500	5000	25
Minimum	1	1	1

Her bir tekerleğin açılma hızları geri beslenerek kontrol işlemi gerçekleştirilen her bir PID kontrolcü için K_p , K_i , K_d olmak üzere 3 parametre optimize edilmiştir. Bu parametreler referans açılma hızları ile anlık açılma hızları arasındaki hata ve harcanan güç miktarı minimum olacak şekilde amaç fonksiyonları kullanılarak PSO optimizasyonu ile elde edilmiştir. Optimize edilen 16 adet PID parametresi Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Pso optimizasyonu ile elde edilen pid değerleri

Kp_1	Ki_1	Kd_1	Kp_2	Ki_2	Kd_2
667,91830	3043,41076	6,99876	1907,50583	3154,132757	16,63205
Kp_3	Ki_3	Kd_3	Kp_4	Ki_4	Kd_4
7500	1	25	3498,62756	5000	8,10674

DC/DC buck dönüştürücü optimizasyonu;

DC/DC buck dönüştürücülerin direnç, indüktans ve kapasitans değerleri ile DC/DC buck dönüştürücülerin Integral (I) denetleyici katsayısı belirlenmiştir. PSO'nun temel amaç fonksiyonları, DC/DC buck dönüştürücülerin gerilim takip hatasını ve yakıt pilinden çekilen gücü minimize etmek için kullanılmıştır. PID kontrolcünde belirlendiği gibi DC/DC buck dönüştürücü için de kontrol parametrelerinin sınır değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. DC/DC buck dönüştürücü için belirlenen bu sınır değerleri Çizelge 4.6'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. Dc/dc buck dönüştürücülerin optimizasyonu için üst sınır ve alt sınırlar

Değer	Integral Değeri (I)	İndüktans Değeri, L (H)	Kapasitans Değeri, C (F)	Direnç Değeri, R (Ohm)
Minimum	0	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1
Maksimum	50	100×10^{-6}	1000×10^{-6}	100

DC/DC buck dönüştürücünün optimize edilmesinde her bir DC/DC buck dönüştürücü için 4 adet parametre optimize edilmiştir. Dönüştürücülerin gerilim kontrolü Integral (I) kontrol ile

sağlanmaktadır. Her bir dönüştürücünün indüktans değeri, kapasitans değeri, direnç değeri ve Integral (I) değeri gerilim kontrolünün minimum hatayla yapılması ve yakıt pilinden çekilen gücün mümkün olduğunca düşük tutulması hedefleri doğrultusunda optimize edilmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilen optimizasyon ile her bir dönüştürücü için 4 adet olmak üzere toplamda 16 adet parametre elde edilmiştir. Bu parametreler Çizelge 4.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7. Pso optimizasyon algoritması ile elde edilen dc/dc buck dönüştürücü parametreleri

Dönüştürücü	Integral Değeri (I)	İndüktans Değeri (L)	Kapasitans Değeri (C)	Direnç Değeri (R)
1.Motor	30,646195458	2,5144095579e-05	1,9095902447e-05	59,639317735
2.Motor	22,747017789	4,9990133202e-05	6,6347926426e-06	95,972231156
3.Motor	36,411406444	2,4350565864e-05	3,1518011115e-06	80,998134743
4.Motor	44,0617226666	8,2933376471e-05	6,2723523176e-06	95,372351267

PSO algoritması uygulanarak bulunan indüktans, kapasitans ve direnç değerlerinin gerçek bir devrede kullanımı aynı değerler ile mümkün olmasa bile piyasada bulunan devre elemanlarının yakın değerli olanlarıyla kullanılabilir.

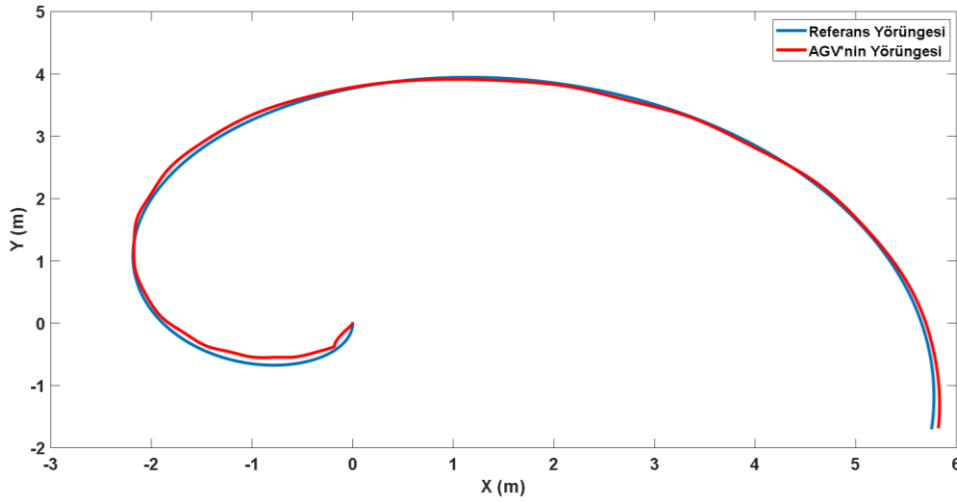
4.8. Simülasyon Çalışmaları

Bu bölümde tasarımı, modellemesi yapılan ve kontrol parametreleri belirlenen OYA’nın spiral rota üzerinde yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DC/DC buck dönüştürücülerin ve yakıt pilinin performansı simüle edilmiştir. Bu simülasyonlarda kullanılan kontrol parametreleri Çizelge 4.5 ve 4.7’de diğer parametreler ise Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

4.8.1 Yörünge takip performansı

Senaryo: Spiral Rota;

Aracın yörünge takibi spiral rota üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi araç verilen referans yörüngeyi yeterli bir performansta takip etmiştir.

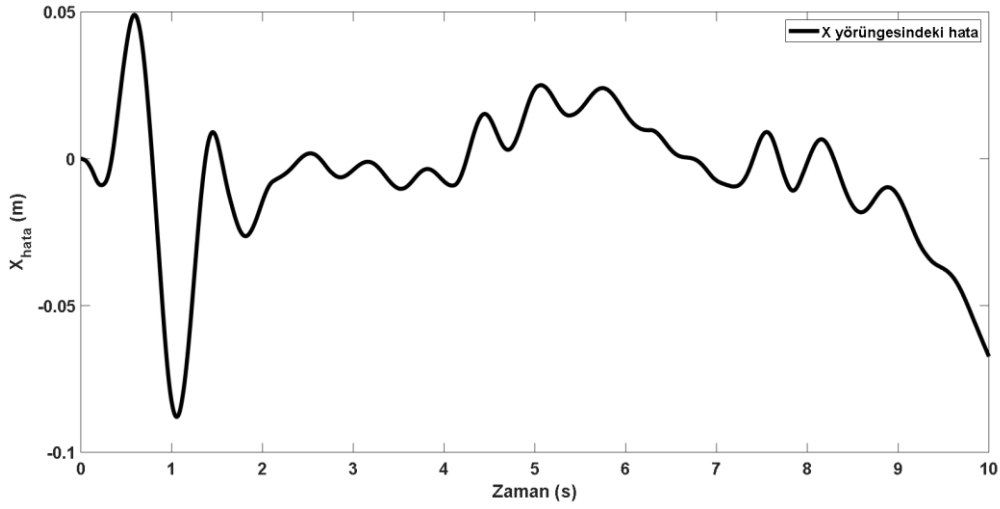


Şekil 4.17. Aracın referans spiral rotayı takip performansı

Referans yörünge ve aracın yörüngesi arasındaki x ve y yörüngelerindeki küçük farklar motorlara gelen akım değerlerinin bazen yetersiz ya da fazla yani düzensiz gelmesinden kaynaklanmaktadır. Fakat bu düzensiz akımlara rağmen yeterli bir takip performansı gözlenmiştir. Rota takibi sırasında x ve y yörüngesindeki referans yörünge ve aracın yörüngesi arasındaki farklar hata değeridir. Bu hata değerleri referans açısal hız ile gerçek açısal hızın farkının x ve y yörüngesindeki değerleridir. X ve y yönündeki hata değerlerinin zamana göre grafikleri sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da gösterilmektedir.

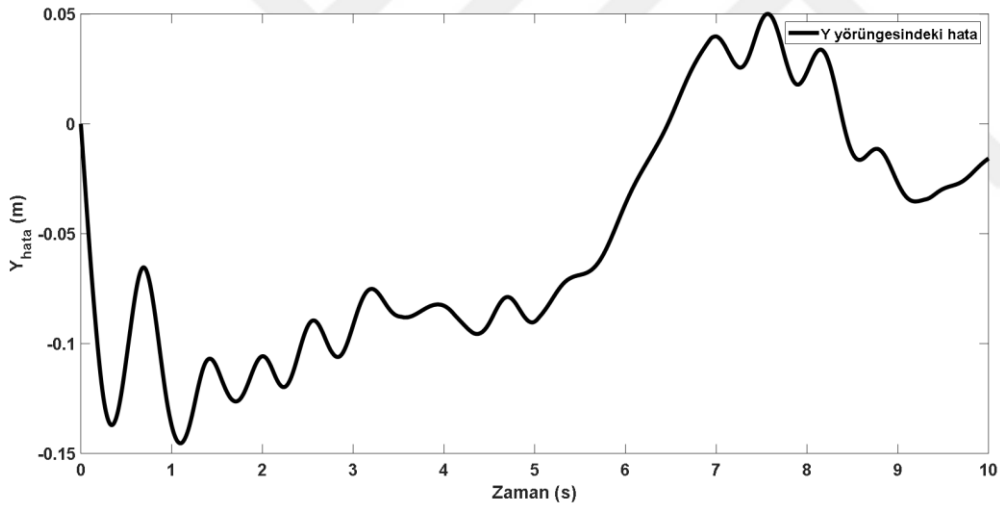
X yörüngesindeki Hata (X_{hata}):

Rota takibi süresince motorlara gelen akımın bazen düzensiz olmasından dolayı Şekil 4.18 ve 4.19’da görüldüğü gibi x ve y yörüngesinde hata değerleri oluşmuştur. X yörüngesindeki hata değeri başlangıçta biraz daha fazla görülürken ilerleyen sürelerde azalmaktadır. Rota takibinin sonlarına doğru yine hata değeri fazla görülmektedir. Y yörüngesindeki hata değeri ise genel olarak düzensiz görülmektedir. Fakat bazı süreler boyunca daha düzenli görülmektedir.



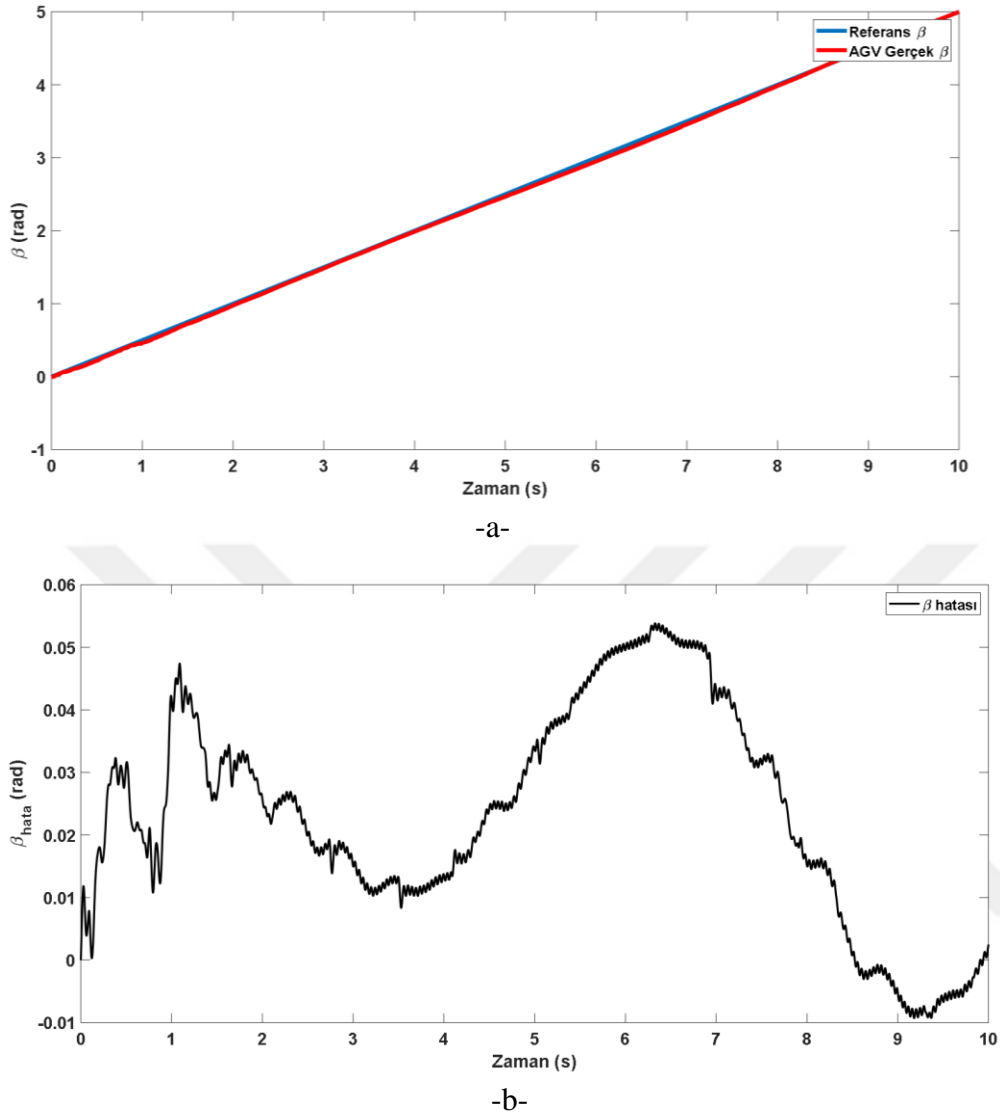
Şekil 4.18. Aracın x eksenindeki yörüngeyi takip hatası

Y yörüngesindeki Hata (Y_{hata}):



Şekil 4.19. Aracın y eksenindeki yörüngeyi takip hatası

β 'nin referans değeri ile aracın rota takibi sırasındaki β gerçek değerinin karşılaştırılması Şekil 4.20.a'da verilmiştir. β 'nin referans ve gerçek değerlerinin küçük hatalar dışında birbirine yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu karşılaştırmadan sonra ortaya çıkan hata değeri Şekil 4.20.b'de gösterilmektedir.

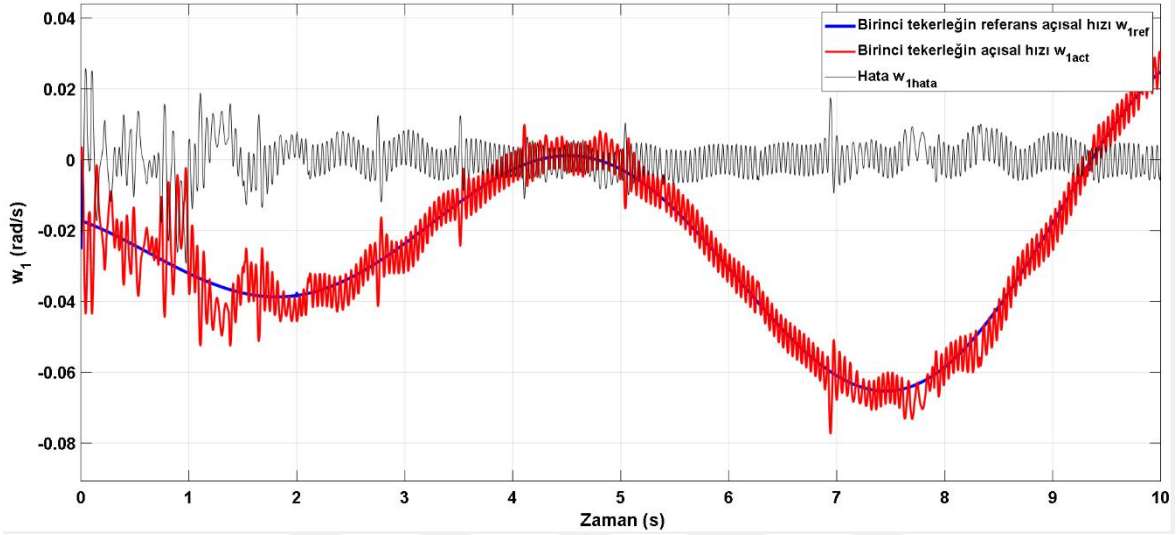


Şekil 4.20. a) Aracın β açısının referans ve anlık karşılaştırılması b) β açısının takip hatası

Otomatik yönlendirmeli aracın koordinat sistemine göre konumu ve yörünge takibi sırasındaki oluşan hataların analizini yaptıktan sonra referans rota takip edilirken tekerleklerin referans açısal hızları ve gerçek açısal hızlarının zaman göre değişimleri ve burada çıkan hata değerleri, birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü tekerlekler için sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'da verilmiştir. Burada referans açısal hız ile gerçek açısal hızların yakın değerlerde olması yörünge takip performansının başarılı olmasında önemli etkindir. Simülasyonda bu referans açısal hız ile gerçek açısal hızın takibinin yeterli olduğu görülmektedir. Burada çıkan hata değerleri referans açısal hız ile gerçek açısal hızın farkıdır.

Birinci motorun açısal hız takip performansı;

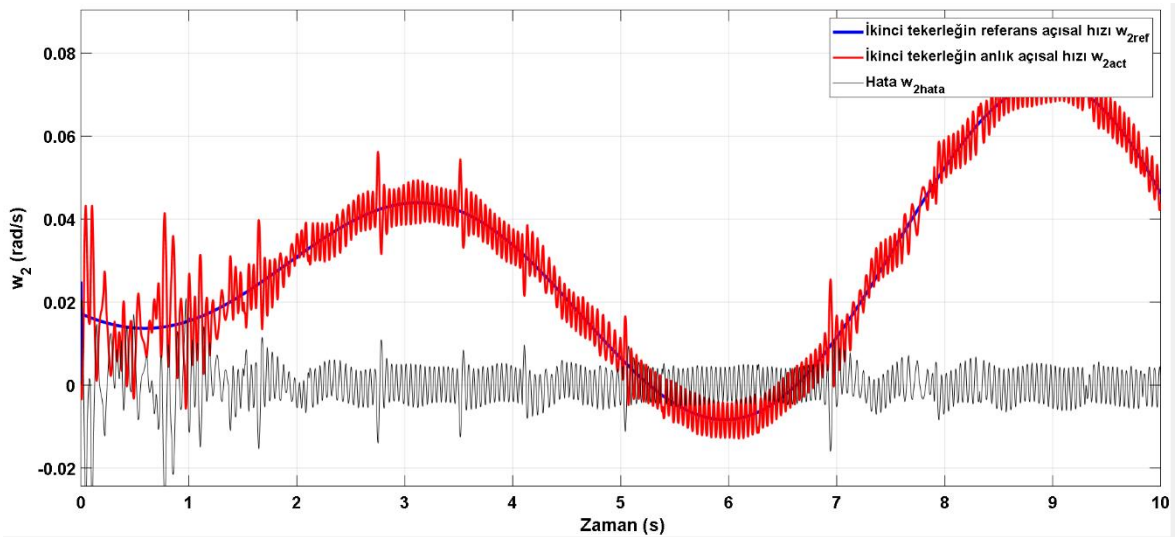
Rota takibi süresince birinci motorda oluşan açısal hız maksimum hata değeri 0.029342 rad/s'dir. Bu hata değeri ile gerçek açısal hızın referans açısal hızı yeterli bir şekilde takip ettiği söylenebilir. Simülasyon süresince hata değerinin çok fazla olmaması PID kontrolcünün başarılı bir denetim yaptığından dolayıdır.



Şekil 4.21. Birinci tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata

İkinci motorun açısal hız takip performansı;

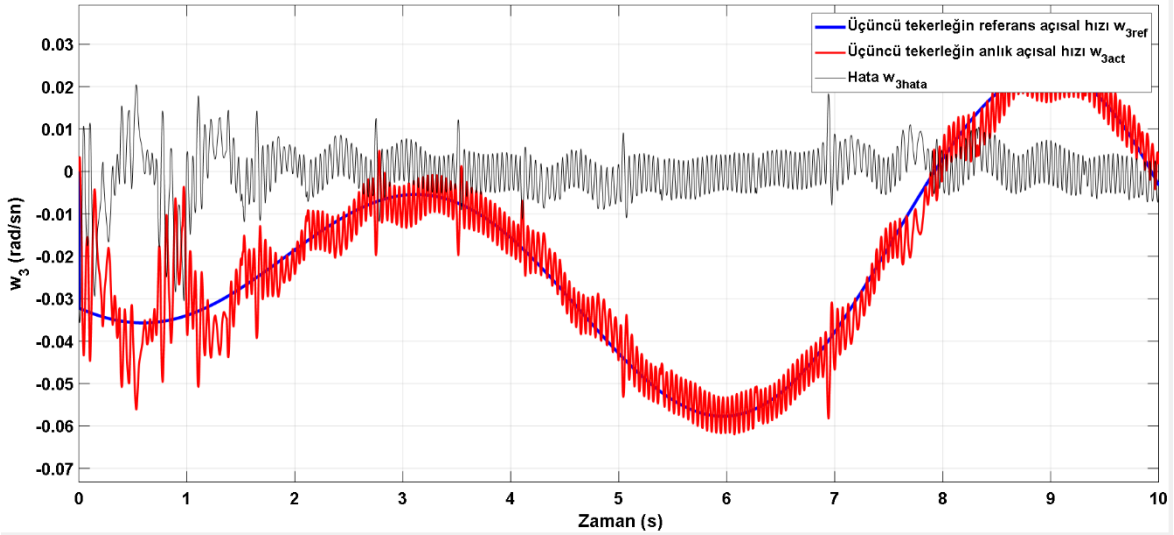
İkinci motorda oluşan açısal hızın maksimum hata değeri 0.027424 rad/s'dir. Bu hata değeri birinci motorda olduğu gibi yeterli bir değerdir ve PID kontrolcünün başarılı bir denetim yaptığını göstermektedir.



Şekil 4.22. İkinci tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata

Üçüncü motorun açısal hız takip performansı;

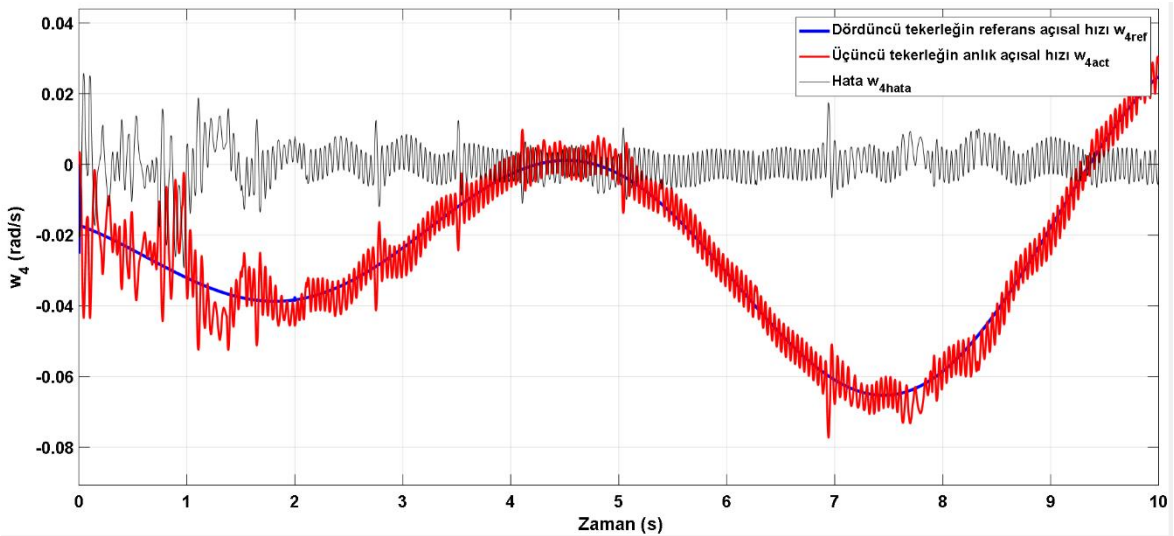
Rota takibi süresince üçüncü motorda gerçek hız ve referans hız farklı ile oluşan maksimum hata değeri 0.035662 rad/s'dir. Bu hata değeri birinci ve ikinci motordan fazla olmasına rağmen yeterlidir. PID kontrolcü denetimi başarıyla gerçekleştirmiştir.



Şekil 4.23. Üçüncü tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata

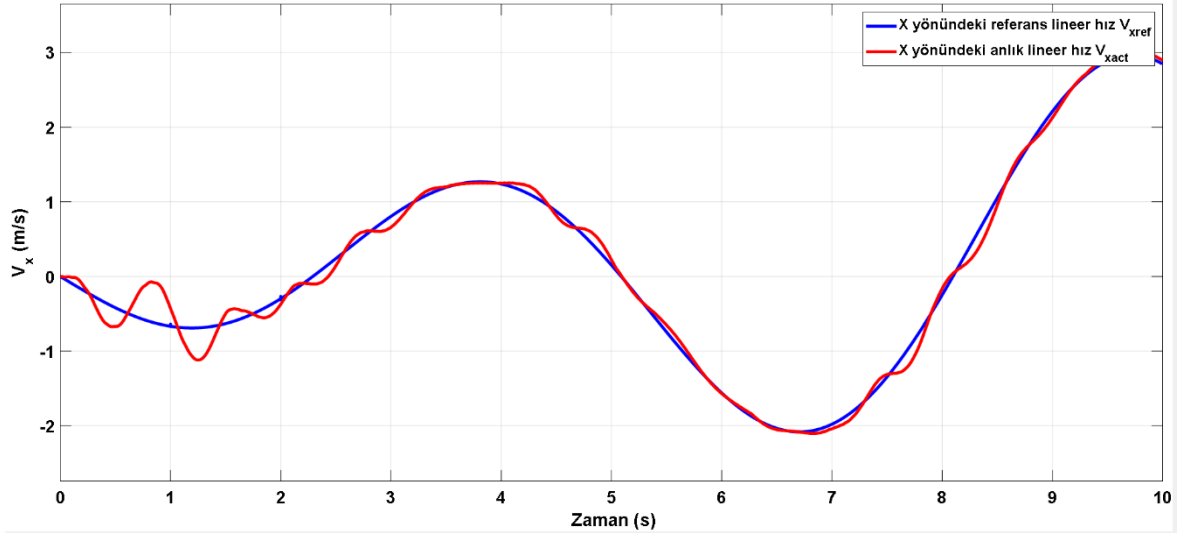
Dördüncü motorun açısal hız takip performansı;

Dördüncü motorda oluşan maksimum hata değeri ise 0.029342 rad/s'dir. Bu motorda da PID kontrolcü denetimi yeterli bir şekilde gerçekleştirmiştir.

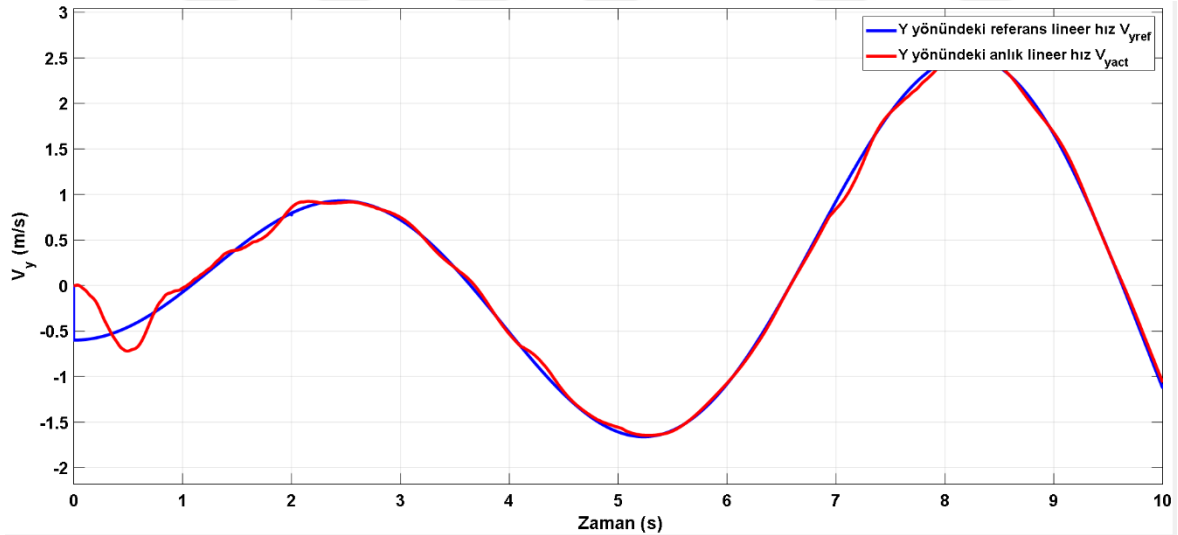


Şekil 4.24. Dördüncü tekerleğin referans ve anlık açısal hızının karşılaştırılması ve meydana gelen hata

Tekerleklerin sahip olduğu açısal hızlara kontrolcü uygulanması sonrasında, aracın x ve y eksenleri yönündeki lineer hızlarının da kontrolcüler altındaki karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'de sırasıyla x ve y yönündeki lineer hızların zamana bağlı değişimlerini ve karşılaştırmalarını göstermektedir.



Şekil 4.25. Aracın x yönündeki referans ve gerçek hızının karşılaştırılması



Şekil 4.26. Aracın y yönündeki referans ve gerçek hızının karşılaştırılması

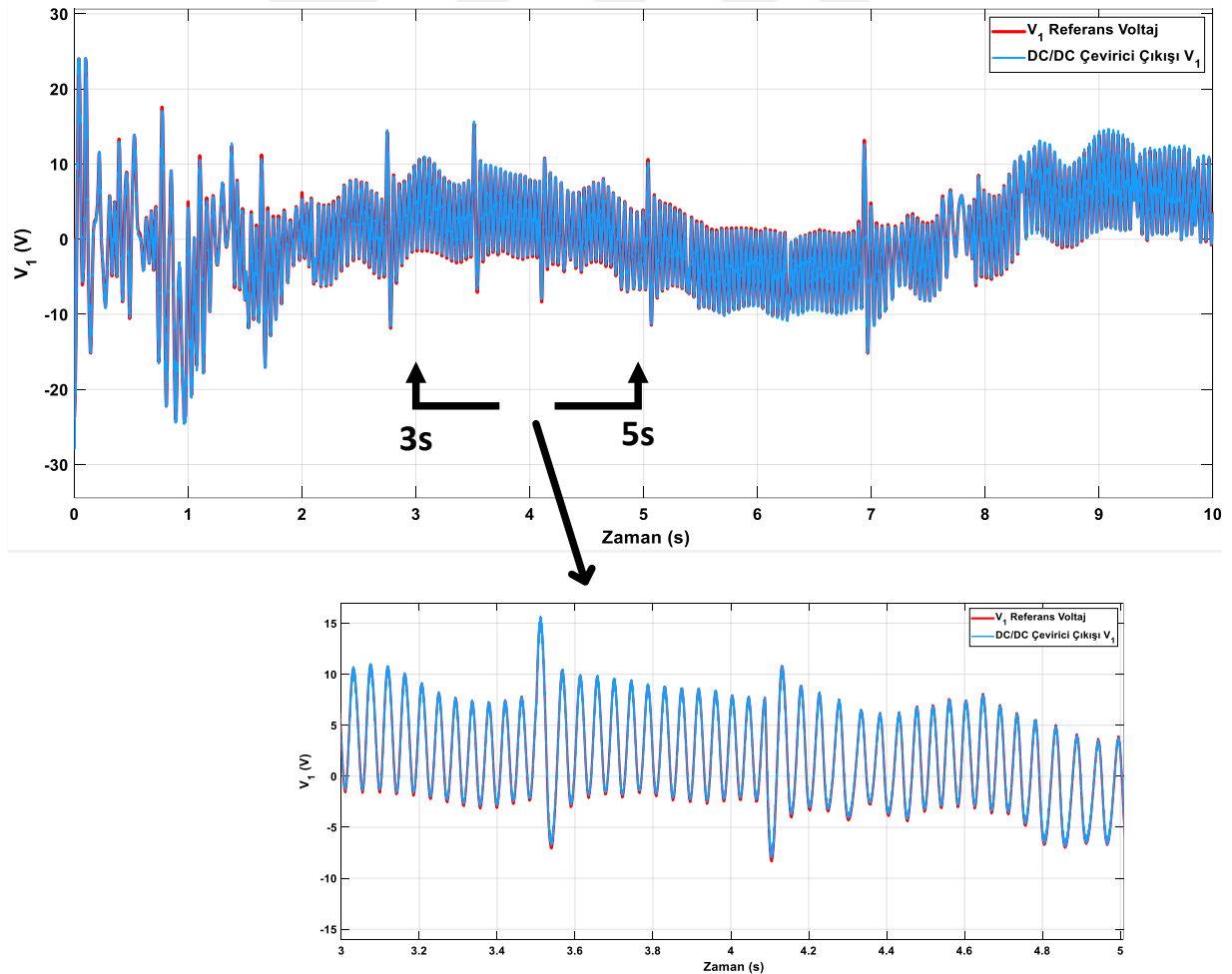
4.8.2 DC/DC buck dönüştürücülerin giriş ve çıkış gerilimi takip performansı

Simülasyon süresince yakıt pilinden çekilen akımın kontrolünü sağlayan DC/DC buck dönüştürücü, 4 motor içinde ayrı ayrı ele alınmıştır. Dört motor içinde referans gerilim değeri ile gerçek gerilim değeri farkı olan hata değerinin minimize edilmesi Integral (I) kontrolcü ile dönüştürücü devresi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yakıt pilinde üretilen gücün

verimliliği için kontrolcünün ve dönüştürücünün kullanımı önemli bir etken olmuştur. Hem kontrolcü hem de DC/DC buck dönüştürücü yakıt pilinden çekilen gücü minimize etmiştir. DC/DC buck dönüştürücülerin performans analizi aşağıda değerlendirilmiştir.

Birinci motor için kullanılan DC/DC buck dönüştürücü referans kontrol gerilim girişi takip performansı;

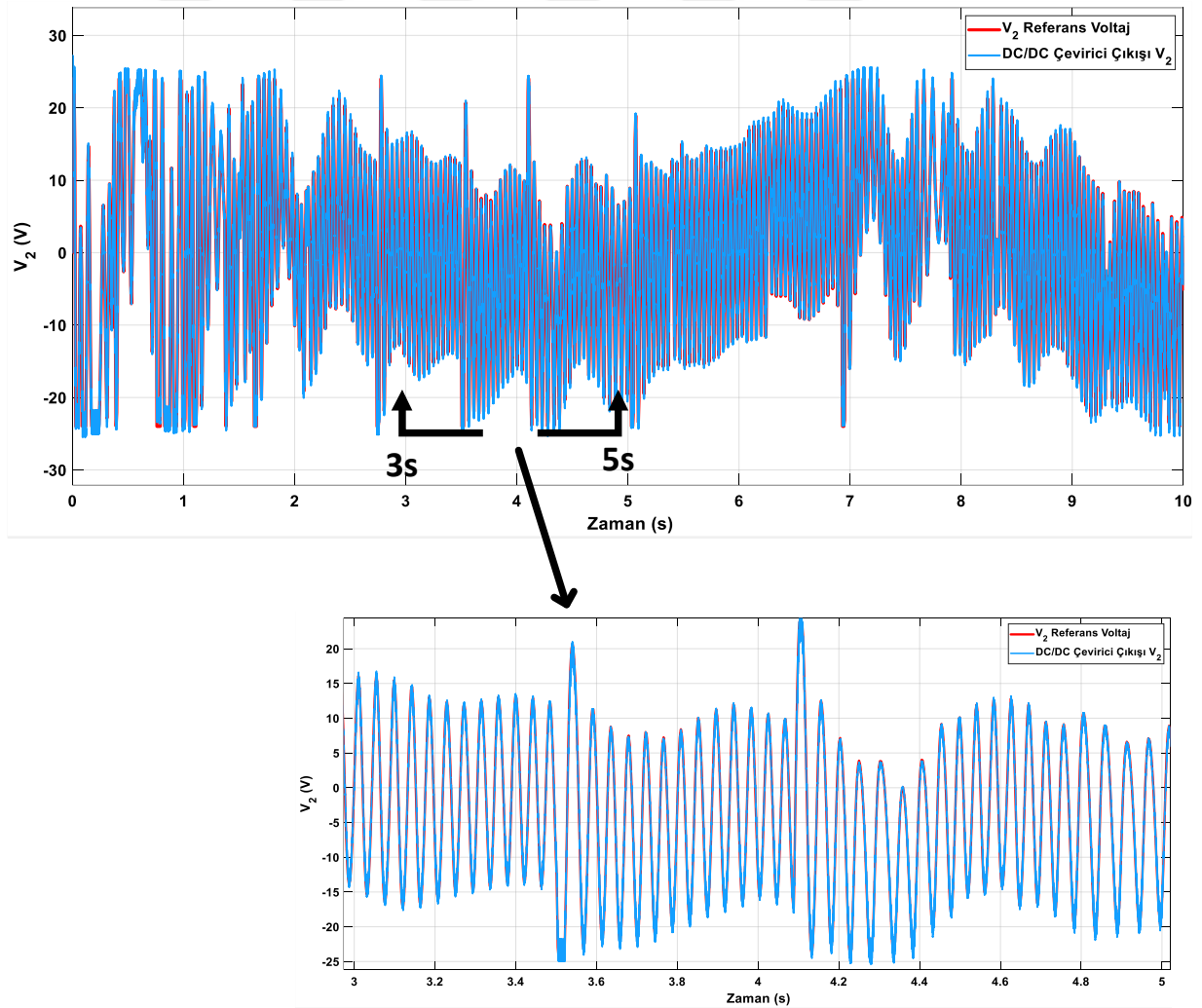
Birinci DC/DC buck dönüştürücü takip performansı sonrasında oluşan hataların ortalaması alındığında ortalama hata 0.3082 V çıkmıştır. Oluşan bu hata takip performansı için yeterli bir seviyede olup çıkış sinyalinin giriş sinyalini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Genel olarak simülasyonun erken safhalarında hatanın büyük, ilerleyen safhalarında ise hem DC/DC dönüştürücü içerisindeki Integral (I) kontrolcü hem de açısal hızların referansındaki PID kontrolcünün etkisiyle azaldığı tespit edilmiştir. Kontrol geriliminin ve DC/DC buck dönüştürücü çıkışının zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.27’de gösterilmektedir.



Şekil 4.27. Birinci motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı

İkinci Motor için kullanılan DC/DC buck dönüştürücü referans kontrol gerilimi girişi takip performansı;

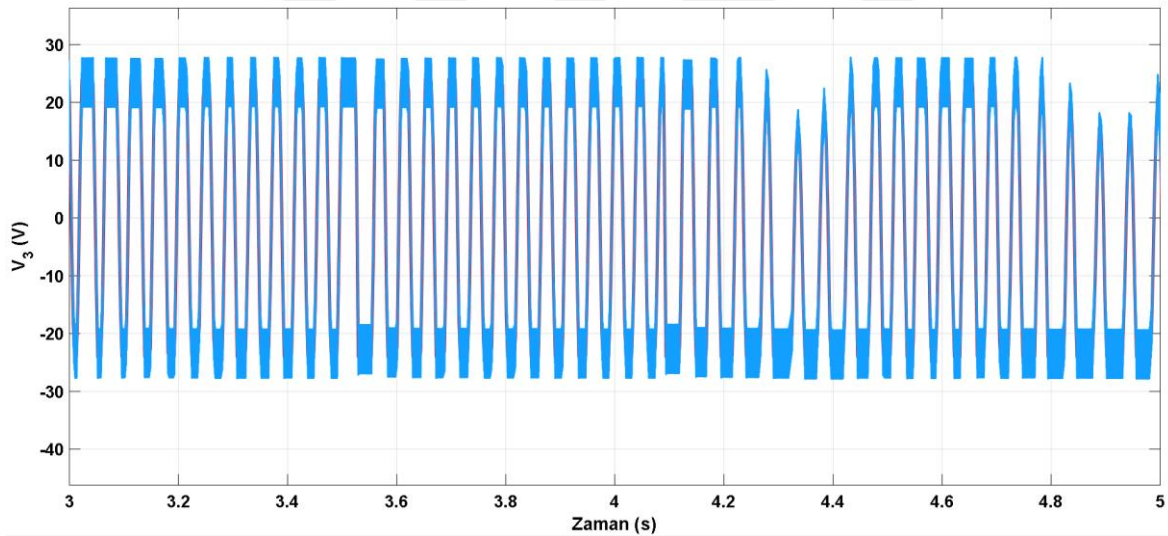
İkinci DC/DC buck dönüştürücü takip performansı sonrasında oluşan hataların ortalaması alındığında ortalama hata 0.7385 V çıkmıştır. Oluşan bu hata takip performansı için yeterli bir seviyede olup, çıkış sinyalinin giriş sinyalini başarılı bir şekilde takip edildiği görülmektedir. Oluşan bu ortalama hatanın birinci motorun takip performansındaki ortalama hatadan fazla olmasının nedeni olarak referans rotayı takip etmek için ikinci motora ait kontrol geriliminin daha yüksek gerilimlerde çalışması gösterilebilir. Benzer şekilde bu DC/DC buck dönüştürücü için de simülasyonun erken safhalarında hatanın büyük, ilerleyen safhalarında kontrolcülerin etkisiyle azaldığı tespit edilmiştir. Kontrol geriliminin ve DC/DC buck dönüştürücü çıkışının zamana bağlı değişimi Şekil 4.28’de gösterilmektedir.



Şekil 4.28. İkinci motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı

Üçüncü Motor için kullanılan DC/DC buck dönüştürücü referans kontrol gerilimi girişi takip performansı;

Üçüncü motor için kontrol geriliminin ve DC/DC buck dönüştürücü çıkışının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Bahsi geçen rota için yüksek gerilimler gerekmesi nedeniyle 10 sn'lik değişim grafiğinde oldukça yoğun görüldüğünden, değişim grafiği bu dönüştürücü için 3 saniye ile 5 saniye arasında olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Şekil 4.29'dan da görüldüğü üzere bu motor için bazı saniyelerde motor maksimum gerilim olan 24 V'ta sürülmektedir. Dönüştürücünün örnekleme frekansı olan 10000 Hz değerine bağlı olarak bu referans geriliminin sabit kaldığı bölümlerde yaklaşık gerilim 24 V'a eşit olacak şekilde yüksek frekansla salınım hareketi yapmaktadır. Dönüştürücüdeki 10000 Hz olan örnekleme frekansı voltaj takip performansına göre belirlenmiştir. 1000 ile 40000 değer aralığında, hatası en az olacak ve simülasyon hızı yavaş olmayacak bir değer olan 10000 Hz seçilmiştir.

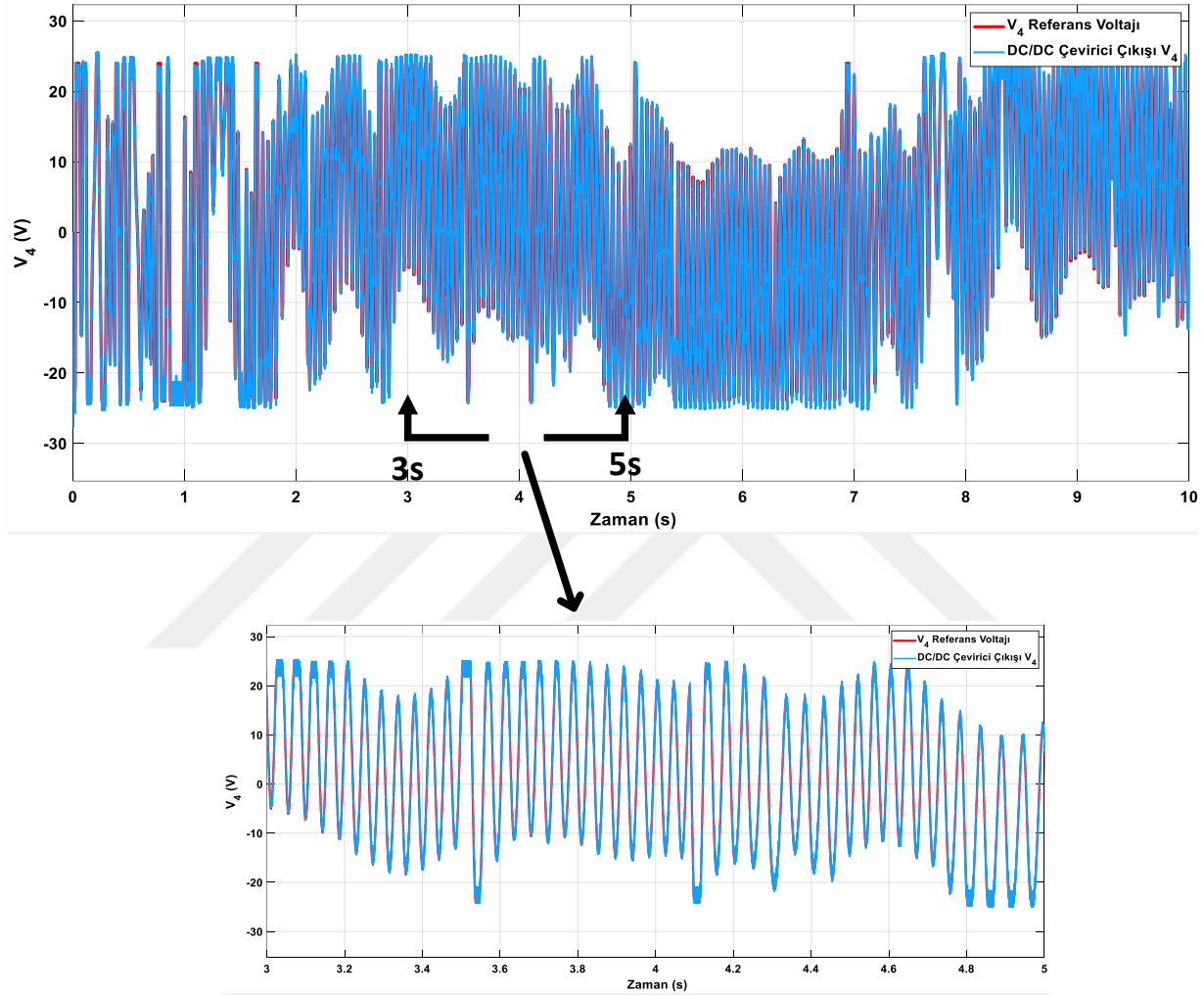


Şekil 4.29. Üçüncü motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı

Üçüncü DC/DC buck dönüştürücü takip performansı sonrasında oluşan hataların ortalaması alındığında ortalama hata yukarıda bahsedilen durumdan dolayı 2.6669 V çıkmıştır. Oluşan bu hata takip performansı için yeterli bir seviyede olup giriş sinyalinin başarılı bir şekilde takip edildiği görülmektedir. Oluşan bu ortalama hatanın birinci motorun takip performansındaki ortalama hatadan fazla olmasının nedeni referans rotayı takip etmek için ikinci motora ait kontrol geriliminin daha yüksek gerilimlerde çalışması gösterilebilir.

Benzer şekilde bu dönüştürücü içinde simülasyonun erken safhalarında hatanın büyük, ilerleyen safhalarında kontrolcünün etkisiyle azaldığı tespit edilmiştir.

Dördüncü Motor için kullanılan DC/DC buck dönüştürücünün referans kontrol geriliminin girişi takip performansı;



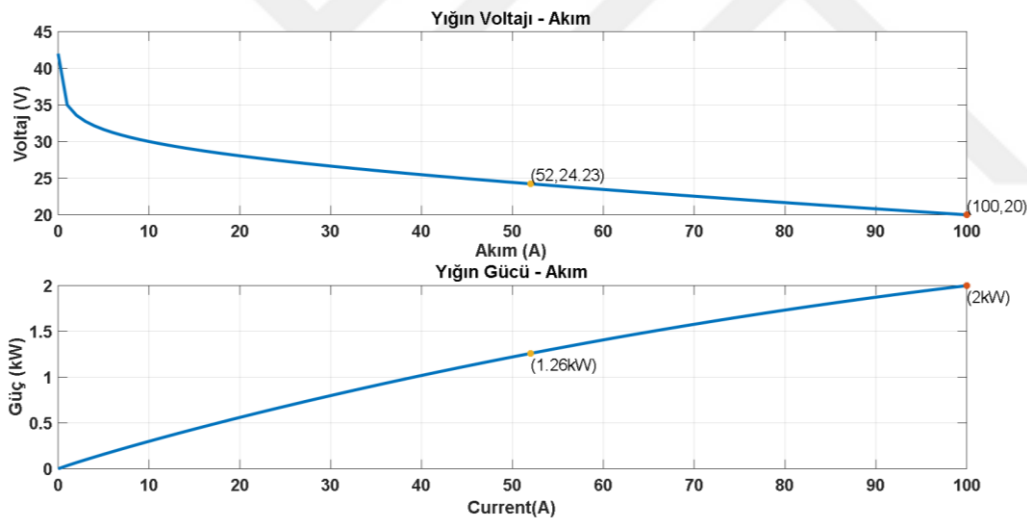
Şekil 4.30. Dördüncü motor için gerekli kontrol geriliminin dc/dc buck dönüştürücü girişi ve çıkışı

Dördüncü DC/DC buck dönüştürücü takip performansı sonrasında oluşan hataların ortalaması alındığında ortalama 0.6042 V çıkmıştır. Oluşan bu hata takip performansı için yeterli bir seviyede olup giriş sinyalinin başarılı bir şekilde takip edildiği görülmektedir. Oluşan bu ortalama hatanın birinci motorun takip performansındaki ortalama hatadan fazla olmasının nedeni olarak referans rotayı takip etmek için ikinci motora ait kontrol geriliminin daha yüksek gerilimlerde çalışması gösterilebilir. Benzer şekilde bu DC/DC buck dönüştürücü içinde simülasyonun erken safhalarında hatanın büyük, ilerleyen safhalarında

kontrolcülerin etkisiyle azaldığı tespit edilmiştir. Kontrol geriliminin ve DC/DC buck dönüştürücü çıkışının zamana bağlı takip performansı Şekil 4.30'de gösterilmektedir.

4.8.3 Yakıt pili performans analizi

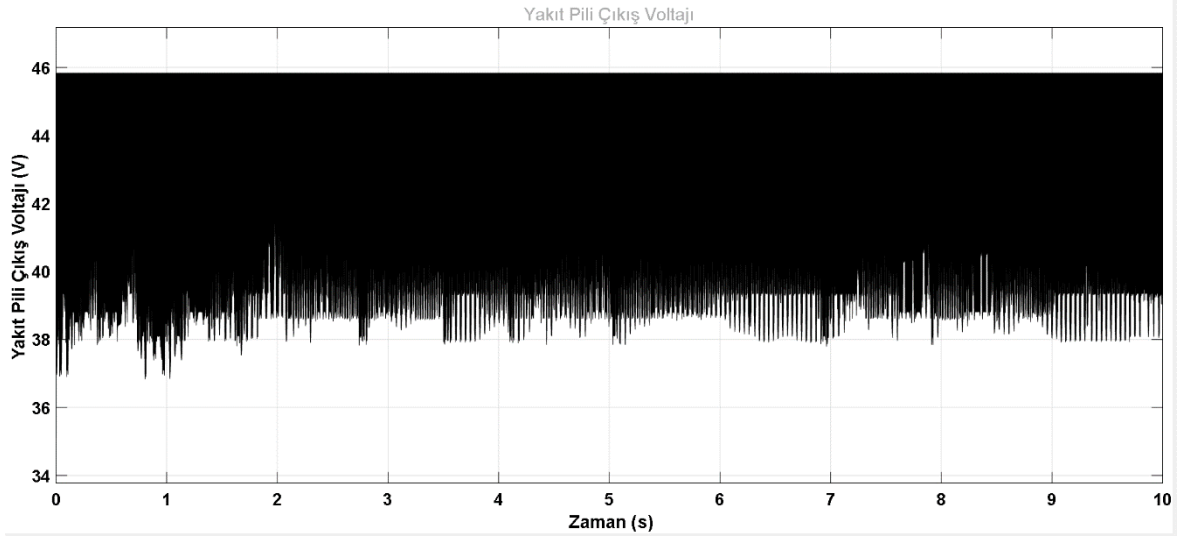
Simülasyonu yapılan otomatik yönlendirmeli aracın güç sistemi olarak kullanılan yakıt pilinin özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Bu yakıt pili gerilim-akım ve güç-akım karakteristikleri ile bu karakteristiklerin çalışma gerilimi, çalışma akımı ve çalışma gücü Şekil 4.31'te gösterilmektedir. Yakıt pili gerilim karakteristiğinin maksimum gerilim değeri, minimum gerilim değeri ve çalışma gerilimi sırasıyla 45 V, 20 V ve 24.23 V'dur. Yakıt pili akım karakteristiğinin maksimum akım, minimum akım ve çalışma akım değeri sırasıyla 100 A, 0 A ve 52 A'dır. Yakıt pili güç-akım karakteristiğinin maksimum güç değeri, minimum güç değeri ve çalışma gücü değeri ise sırasıyla 2 kW, 0 kW ve 1.26 kW'dır.



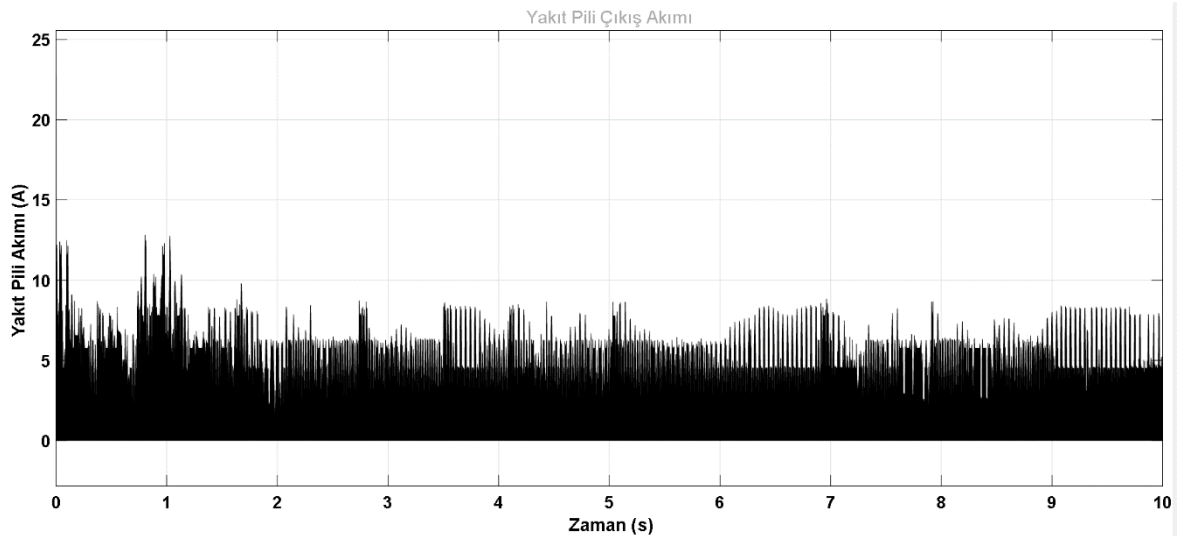
Şekil 4.31. Yakıt pilinin yığın gerilim-akım ve yığın gücü-akım karakteristikleri

DC/DC buck dönüştürücünün yüksek olan örnekleme frekansına bağlı olarak yakıt pili çıkış geriliminin zamana bağlı değişimi Şekil 4.32'de görülmektedir. Şekil 4.32'de görüldüğü üzere, gelen yüklerin artmasıyla beraber besleme geriliminde düşmeler meydana gelmiştir. Gelen yükler doğrultusunda akımın artmasıyla beraber düşen gerilim incelendiğinde, verilen spiral rotanın takip edilmesi sırasında yakıt pili tarafından 10 saniyede verilen ortalama gerilim 43,38 V olarak gözlenmiştir. Rotanın ve buna bağlı olarak motorların ihtiyacı olan gerilim değiştiğinde bu ortalama gerilim de değişecektir. Sisteme gelen yükün değişimine bağlı olarak yakıt pilinden çekilen akımda değişecektir. Yakıt pilinin gerilim-akım eğrisi incelendiğinde de yakıt pilinin çıkış geriliminin ve akımın ters orantılı olduğu görülmektedir.

Bu sebeple akımın arttığı yerde çıkış gerilimi düşmekte, azaldığı yerde de çıkış gerilimi artmaktadır. Ele alınan spiral rotada yakıt pilinden çekilen akımın zamana bağlı grafiği Şekil 4.33'te gösterilmektedir. Çalışma zamanı boyunca yakıt pilinden çekilen ortalama akım ise 1,4625 A'dır.



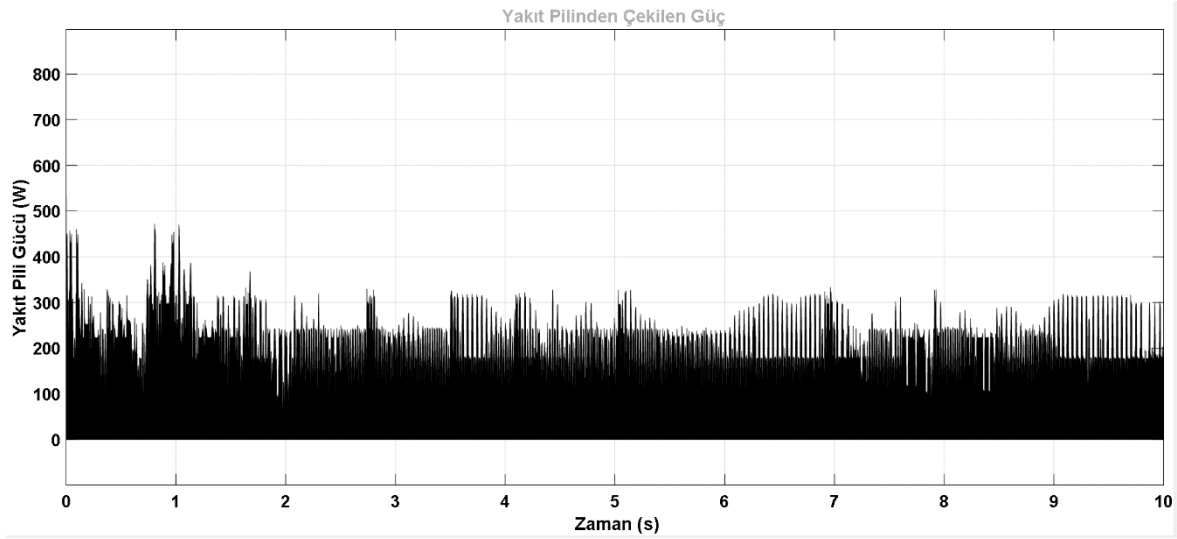
Şekil 4.32. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinin çıkış geriliminin zamana göre değişimi



Şekil 4.33. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinin çıkış akımının zamana göre değişimi

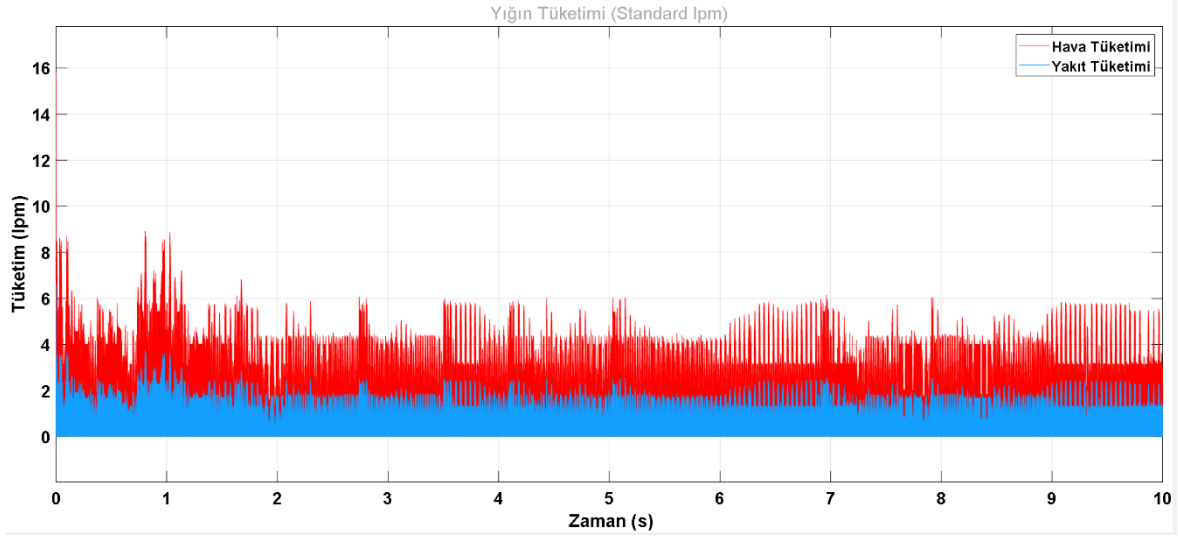
Simülasyonu yapılan aracın bir ortamda uzun süreli olarak çalışmasında en önemli etki olan güç kavramı bu çalışmada optimizasyonun içerisine bir amaç fonksiyonu olarak dahil edilmiştir. Bu nedenle yukarıda bulunan yakıt pili çıkış geriliminin ve çıkış akımının zamana

bağlı ortalama değerlerine bağlı olarak, yakıt pilinden çekilen gücün optimizasyonu yapılan kontrolcüler ve DC/DC buck dönüştürücü parametreleri ile minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan simülasyonda spiral rota takibi sırasında yukarıda bulunan gerilim ve akım değerleri ile yakıt pilinden çekilen gücün zamana bağlı değişimi Şekil 4.34’da verilmiştir. Bu rota takibi sırasındaki hareket boyunca ortalama olarak yakıt pilinden 58,2675 W güç çekilmiştir. Bu ortalama güç değerinin aracın performansında önemli rol oynayacağı tespiti yapılmıştır. Bunun nedeni optimizasyonu yapılan kontrolcüler ve DC/DC buck dönüştürücü parametreleri ile yakıt pilinden çekilen ortalama güç olan 58,2675 W, 1.26 kW nominal çalışma gücünün çok altında bir değer çıkmıştır.



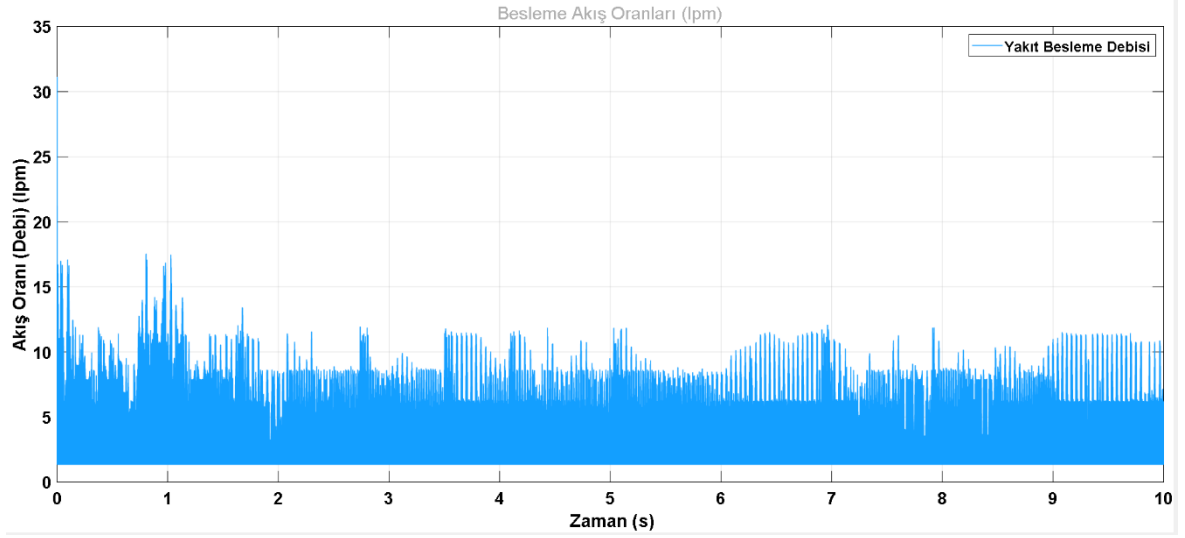
Şekil 4.34. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinin çıkış gücünün zamana göre değişimi

Spiral rota boyunca hareket sırasında yakıt pili beslemesi için hava ve hidrojen yakıtı kullanılmıştır. Bu hava ve hidrojen yakıtının tüketimi, hava için saniye başına metre küp ve hidrojen yakıtı için dakika başına litre olarak Şekil 4.35’de verilmiştir. Hidrojen yakıtının ve havanın tüketim miktarı yakıt pilinden çekilen güç ve boşa harcanan gücün toplamına göre değişmektedir. Boşa harcanan güç, kontrolcüler ile minimize edilmiş ve yakıt-hava tüketimi verimli kullanılmıştır.

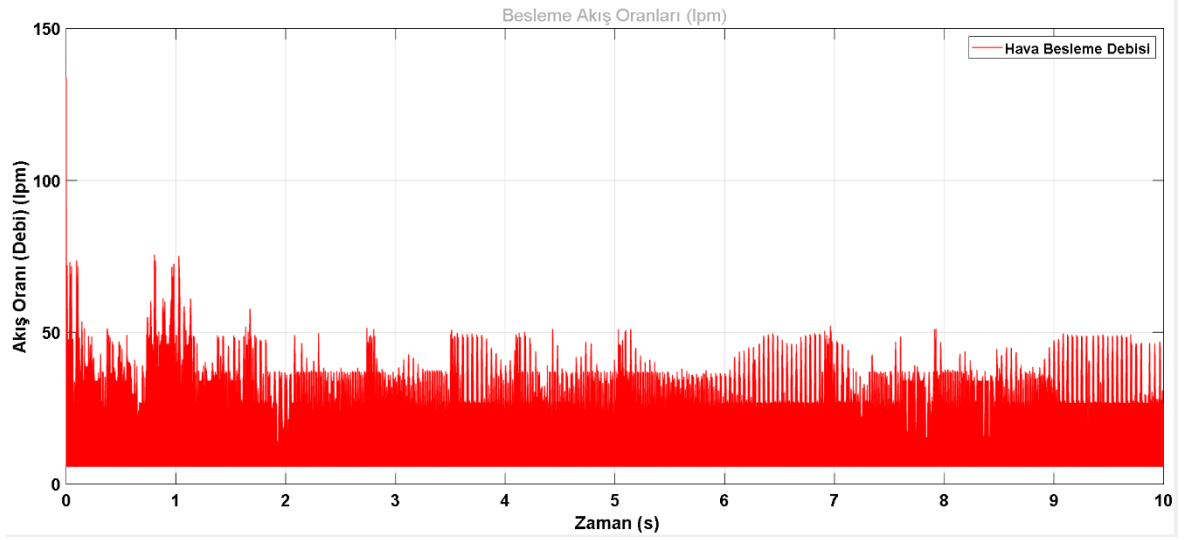


Şekil 4.35. Aracın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinde tüketilen hava ve yakıt miktarlarının zamana göre değişimi

Aracın spiral rotayı takibi sırasında yakıt deposundan ve havadan yakıt piline olan yakıt ve hava girişlerinin akış debilerinin zamana bağlı değişimleri ise Şekil 4.36'de verilmiştir.



-a-



-b-

Şekil 4.36. Oya'nın hedef rotayı takibi sırasında yakıt pilinde tüketilen a) yakıt b) hava besleme debilerinin zamana bağlı değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında, bir fabrikada, depoda ya da herhangi bir malzeme taşıma sektöründe, malzeme taşınması amaçlanan bir Otomatik Yönlendirmeli Aracın (OYA) Cad-Cam ortamında tasarımı ve bu tasarımın yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımın ana gövde malzemesi olarak 1.0037 çeliği atanmıştır. Bu tasarımda hareket kabiliyetinin fazla olması nedeniyle mecanum tekerlekler kullanılmıştır. Bu mecanum tekerleklerinin her birini redüktörlü bir motor, bu motorları ise bir güç ünitesi tahrik etmektedir. Bu güç sistemi, OYA'lar da sıklıkla kullanılan bataryaların aksine çalışma sahasında enerji ihtiyacı olan sistemin daha uzun süreli çalışmasını sağlayan ve enerjisel bağımsızlık kavramını destekleyen alternatif enerji kaynağı olan hidrojen yakıt pili sistemi kullanılmıştır.

Tasarımı yapılan OYA'nın küresel bir koordinat sisteminde enerji ve hız denklemleri kullanılarak kinematik ve dinamik denklemleri, DC motor parametreleri göz önünde bulundurularak motor modeli denklemleri ve hidrojen yakıt pili parametreleri kullanılarak da yakıt pili denklemleri elde edilmiştir. Kinematik, dinamik, motor model ve yakıt pili modeli denklemleri elde edilen OYA'nın, Matlab/Simulink ortamında simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışması için elde edilen kinematik denklemlerin, dinamik denklemlerin, motor modeli denklemlerinin, yakıt pilinin, yakıt pilinden gelecek yüksek gerilim değerlerinin motorlar için gerekli gerilim değerlerine çevirecek olan DC/DC buck dönüştürücünün, blok modelleri Matlab/Simulink ortamında bloklar kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca genel sistemin kontrolünü sağlayacak olan PID kontrolcü ve DC/DC buck dönüştürücünün gerilim kontrolünü sağlayacak olan Integral (I) kontrolcü de Matlab/Simulink ortamında bloklar kullanılarak oluşturulmuştur.

Belirlenen spiral rota üzerinde optimum yörünge kontrolü gerçekleştirmesinin amaçlandığı bu simülasyon çalışmasında OYA, belirlenen spiral rotayı yeterli bir şekilde başarıyla takip etmiştir. Ayrıca DC/DC buck dönüştürücü parametreleri belirlenerek yakıt pilinden çekilen güç minimize edilmiş ve yakıt pilinin kontrolü de başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Yörünge kontrolünün daha başarılı olabilmesi ve hata oranının azaltılması ile yakıt pilinden çekilen gücün minimize edilmesi nedeniyle yörünge kontrolü için kullanılan PID kontrolcü parametreleri K_p , K_i , K_d ile DC/DC buck dönüştürücü için kullanılan Integral (I) kontrolcü parametresi olan K_i ve DC/DC buck dönüştürücünün indüktans, kapasitans ve direnç değerleri, hatanın hesaplanmasında zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (Integral Time-

Weight Absolute Error (ITAE) uygunluk fonksiyonu kullanılarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması uygulanıp belirlenmiştir.

Dünyada son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlayan otonom araçlar, üretim hızını ve kalitesini arttırmaktadır. Bu nedenden dolayı otonom araçlara rağbet artmakta ve bu otonom araçların güç sistemleri, çalışma programları ve dayanıklılığı gibi konularda geliştirici çalışmalar yapılmaktadır. Otonom araçların güç sistemleri için yapılan çalışmalar ve sorunlara aranan çözümler, otonom araçların çalışma süresinin uzatılması, enerji verimliliğinin artırılması ve enerji depolanmasının daha iyi bir hale gelmesi için yapılan çalışmalardan bazılarıdır. Bu çalışmada kullanılan alternatif bir enerji kaynağı olan hidrojenin, yakıt pili sistemiyle otonom bir aracın enerji verimliliğinin, enerji depolama ve çalışma süresinin artırılması amaçlanarak başarılı bir yörünge kontrolü yapılmış ve otonom araçların, robotların fabrika, depo gibi sahalarda daha verimli yüksek performansta çalışması hedeflenmiştir. Bu gibi alternatif enerji kaynaklarının, otonom araç ve robotlarda kullanımının artırılması ve kontrolünün yapılması gelecek çalışmalar için önemli olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] M. Rasim Yıldırım (2018). Otomatik Yönlendirmeli Bir Aracın Gerçek Zamanlı Yörünge Kontrolünün Kayan Tipli Kontrolcü İle Gerçekleştirilmesi, *Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*, Erzurum.
- [2] İnternet: <https://6river.com/what-are-automated-guided-vehicles/> Natali Taglic (2019). What are automated guided vehicles?, Son Erişim Tarihi: 29.06.2021
- [3] İnternet: <https://www.conveyco.com/advantages-disadvantages-automated-guided-vehicles-agvs/> Chris Benevides (2020). The Advantages and Disadvantages of Automated Guided Vehicles (AGVs), Son Erişim Tarihi: 11.08.2021
- [4] Hassan M. Alwan (2020). Dynamic Analysis Modelling of a Holonomic Wheeled Mobile Robot with Mecanum Wheels Using Virtual Work Method, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43, 373-380
- [5] Zhe S., Hao X. (2020). Path-following control of Mecanum-wheels omnidirectional mobile robots using non-singular terminal sliding mode, *Zhejiang University of Technology, Swinburne University of Technology*, Melbourne, Australia, 147, 1-14.
- [6] Musa Matli, Ahmet Albayrak and Raif Bayir (2020). Development of a Mecanum-Wheeled Mobile Robot for Dynamic and Static Obstacle Avoidance Based on Laser Range Sensor, *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 20, 188-200.
- [7] Abdulrahman Alhalabi, Mert Ezim, Kansu O. Canberk and Ery A. Baran (2020). A multiple sensor fusion based drift compensation algorithm for mecanum wheeled mobile robots, *Turkish Journal of Electrical Engineering-Computer Sciences*, TÜBİTAK, 29, 704-716.
- [8] Cüneyd Demir ve Mustafa Bozdemir (2019). Swedish Tekerlekli Mobil Robot Tasarımı ve 3B Yazıcıyla İmalatı, *4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry*, Antalya, 11-14.

- [9] Salih Öztürk and Gökhan Bayar (2020). Investigation of The Effect of Contact Forces Acting on Rollers of a Mecanum Wheeled Robot, *Zonguldak Bulent Ecevit University*, 72, 1-13.
- [10] Igor Zeidis and Klaus Zimmermann (2019). Dynamics of a four-wheeled mobile robot with Mecanum wheels, *Technische Universitat Ilmenau, Thuringia, Germany*, 1-22.
- [11] Veer Alakshendra and Shital S. (2017). Simultaneous balancing and trajectory tracking control for an omnidirectional mobile robot with a cylinder using switching between two robust controllers, *International Journal of Advanced Robotics Systems*, 1-16.
- [12] Ebubekir Pekdemir (2017). Otonom Bir Mobil Robotun Parçacık Sürü Algoritması ile Optimum Yörünge Kontrolü, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş.
- [13] Z. Hendzel ve L. Rykala (2017). Modelling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot With Mecanum Wheel With The Use of Langrange Equations of The Second Kind, *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, 81-99.
- [14] Yu Shen and Sijie Shang (2016). Omni-directional AGV Motivation Trajectory Planning under the Polar Coordinate System, *IEEE International Conference on Consumer Electronics-China(ICCE-China)*, School of Information Science and Engineering Nanjing University, Nanjing, China, 1-5.
- [15] Emina Petrovic, Vlastimir Nikolic (2016). Kinematic Model and Control of Mobile Robot for Trajectory Tracking, *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering, University of Nis, Nis, Serbia*, 14, 161-164.
- [16] Maciej Trojnacki, Przemyslaw Dabek (2014). Trajectory Tracking Control of a Four-Wheeled Mobile Robot with Yaw Rate Linear Controller, *Industrial Research Institute for Automation and Measurements PIAP, Warsaw, Poland*, 267, 507-521.
- [17] Rached Dhaouadi and Ahmad Abu Hatab (2013). Dynamic Modelling of Differential-Driv Mobile Robots using Langrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified

Framework, *Advances in Robotics and Automation, College of Engineering, American University of Sharjah, Sharjah, UAE, 2(2), 1-7.*

[18] Özgür Aydın, Asaf Varol (2012). Otomatik Yörüngeli Araçlarda Yörünge Kontrolü, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.*

[19] Sulabh Kumra, Rajat S. and Shilpa M. (2012). Navigation System for Omni-directional Automatic Guided Vehicle with Mecanum Wheel, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSRJEEE), 2(3) 35-39.*

[20] Nguyen Hung, Jae Sung Im (2010). Design of a Sliding Mode Controller for an AGV and Its Implementation, *International Journal of Control, Automation and Systems, 8, 81-90.*

[21] Nkgatho T. and Mark de V. (2008). Kinematics and Dynamics Modelling of a Mecanum Wheeled Mobile Platform, *15th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP08), Auckland, New Zealand, 657-662.*

[22] Jeong-Hyeong Lee and Seul Jung (2008). Global Position Tracking Control of an Omni-directional Mobile Robot Using Fusion of a Magnetic Compass and Encoders, *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems Seoul, Korea, 246-251.*

[23] Jakup Cercala and Anna Jadlovska (2015). Nonholonomic Mobile Robot with Differential Chassis Mathematical Modelling and Implementation in Simulink with Friction in Dynamics, *Acta Electrotechnica et Informatica, 15, 3-8.*

[24] N. Leena and K. K. Saju (2015). Modelling and Trajectory Tracking of Wheeled Mobile Robots, *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology, ICETEST, 24, 538-545.*

[25] Saadettin Erhan Kesen (2004). Tam Zamanında Üretim Felsefesine Dayalı Otomatik Yönlendirmeli Araç Sistemlerinin Simülasyonu, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.*

- [26] Tong-Tin Park, Jung-Woo Abn (2002). A path generation Algorithm of an automatic guided vehicle using sensor scanning method. *KSE International Journal*, 16, 137-146.
- [27] Zylski W. (1996). Kinematics and dynamics of wheeled mobile robots. –*Rzeszow University of Technology Publishing House*, Rzeszow, 42, 1348-1353.
- [28] Wampfler G., Salecker M. And Wittenburg J. (1989). Kinematics, dynamics, and control of omnidirectional vehicles with mecanum wheels. –*Mechanicals Based Design of Structures and Machines*, 22, 165-177.
- [29] P.F. Muir and C.P. Neuman (1987). Kinematic Modelling of Wheeled Mobile Robots, *Journal of Robotic Systems*. 4(2), 281-340.
- [30] Pouria Ahmadi, Seyed Hosain Torabi (2020). The Effects of Driving Patterns and PEM Fuel Cell Degradation on the Lifecycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 3595-3608.
- [31] Fahri Işıklı (2020). PEM Yakıt Pilinin Modellenmesi ve Bir Araç Üzerinde Performansının İncelenmesi, *Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Bursa.
- [32] Gürsel Şefkat ve Mert Ali Özel (2018). PEM Yakıt Pilinin Simulink Modeli ve Analizi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 351-366.
- [33] Hassan Fathabadi (2018). Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle: Novel Fuel Cell/SC Hybrid Power Generation System, *Energy Conversation and Management*, National Technical University of Athens(NTUA), Athens, Greece, 192-201.
- [34] L. An and R. Chen (2017). Mathematical modelling of direct formate fuel cells, *Applied Thermal Engineering*, *The Hong Kong Polytechnic University and Chongqing University*, China, 124, 232-240.
- [35] Rihab Jaralla (2015). Proton Exxhange Membrane (PEM) Fuel Cell Parametric Study via Mathematical Modelling and Numerical Simulation, *Ryerson University*, Doctor of Philosophy, Toronto, Ontario, Canada, 1-146.

[36] Bhagchand D. Thavrani, H.B. Patel and Ketan Bariya (2015). Mathematical Modelling of PEMFC and Photovoltaic Module, *Sigma Institute of Engineering, Vadodara, Gujarat, India, December, 2(12), 240-248.*

[37] Tunacan Akfidan (2010). Bir Hibrit (Yakıt Pili & Güneş Pili) Enerjili Aracın Modellenmesi, Simülasyonu ve Prototip Uygulaması, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.*

[38] Colleen Spiegel (2008). Mathematical Modelling of Polymer Exchange Membrane Fuel Cell, *University of South Florida, Graduate Theses and Dissertations, Doctor of Philosophy.*

[39] Chistos N. Maxoulis, Dimitrios N. Tsinoglou, Grigorios C. Koltsakis (2004). Modelling of Automotive Fuel Cell Operation in Driving Cycles, Aristotle University of Thessaloniki, Laboratory of Applied Thermodynamics, *Energy Conversion and Management, 45, 559-573.*

[40] İnternet: https://en.wikipedia.org/wiki/Mecanum_wheel Son Erişim Tarihi: 06/05/2021

[41] Kadir Can K., Mehmet A., (2020). Çok Yönlü Hareket Kabiliyeti Olan Robot Tasarımı ve İmalatı, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, MM4006 Bitirme Projesi, Trabzon.*

[42] Z. Hendzel ve L. Rykala (2017). Modelling of Dynamics of a Wheeled Mobile Robot With Mecanum Wheel With The Use of Langrange Equations of The Second Kind, *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering, 22, 81-99.*

[43] Bharat J., Rakesh S. ve Ramesh C. (2014). Modelling, Simulation and Implementation of Brushed DC Motor Speed Control Using Optical Incremental Encoder Feedback, *Proceedings of IOE Graduate Conference, 497-505.*

[44] İnternet: https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell Son Erişim Tarihi: 03.06.2021

[45] Zeynep Ural B. (2007). Yakıt Pilleri ve Bir PEM Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi, *Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.*

[46] Gürsel Ş. ve M. Ali Ö. (2018). PEM Yakıt Pili'nin Simulink Modeli ve Analizi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 351-366.

[47] M. Umut K. ve N. Sefa K. (2014). PEM Yakıt Hücre Modeli, *Mühendis ve Makine*, 55(657), 51-58.

[48] Daniel W. Hart (2010). Power Electronics, *Complete Online Solutions Manual Organization System (COSMOS)*, Valparaiso University, Valparaiso, Indiana, 1, 198-205.

[49] Oğuzhan K. (2012). Seri ve Paralel Robotlarda Parçacık Sürü Optimizasyonu İle Yörünge Kontrolü Tasarımı, *Kocaeli Üni., Doktora Tezi*, Kocaeli.

DİZİN

A

Akım 18, 37, 42, 43, 53, 63, 65
 Algoritma..... 8
 Amaç fonksiyonu..... 51
 Analiz..... 7, 8, 12, 20, 21, 24
 Arduino 18, 19

D

DC v, xiii, 9, 12, 37, 38, 39, 40, 44,
 45, 49, 51, 52, 58, 59, 60, 61,
 62, 63, 64, 68, 75
 Denetleyici9, 46, 51
 Denklem28, 31, 34, 35, 37, 38,
 39, 42, 46, 48, 50
 Dinamik .. iv, 2, 6, 8, 9, 10, 11, 25,
 27, 31, 35, 68
 Direnç.....45, 51, 52, 68
 dönüştürücü ix, xi, xii, xiii, 44, 45,
 50, 51, 52, 58, 59, 60, 61, 62,
 64, 65, 68

E

Enerji iv, 12, 13, 14, 27, 28, 31, 68

F

Forklift..... 1

G

Gerilim.18, 37, 44, 45, 46, 49, 51,
 58, 61, 63, 65, 68

Global.. iv, v, 8, 10, 19, 20, 21, 30,
 48
 Güç.....12, 30

H

Hata .. 3, 8, 14, 45, 46, 49, 51, 53,
 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 62,
 68
 Hidrojen 12, 13, 14, 15, 18, 41,
 42, 43, 44, 65, 66, 67, 68

I

Integral xiii, 45, 46, 49, 51, 52, 58,
 68
 ITAE.....50, 69

i

İndüktans 45, 51, 52, 68
 İterasyon48, 49

K

Kapasitans..... 45, 51, 52, 68
 Kinematik..iv, 6, 8, 10, 11, 12, 25,
 27, 68
 Kontrol .. 2, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14,
 19, 45, 46, 49, 50, 51, 52, 58,
 59, 60, 61, 62
 Kontrolcü 7, 8, 37, 44, 45, 46, 49,
 51, 57, 58, 68

L

Langrange ... iv, v, 8, 9, 11, 27, 31,
 71, 72, 74

M

Matlab7, 8, 12, 13, 14, 35, 36, 37,
 39, 40, 44, 45, 47, 68
 Mecanum . iv, v, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
 16, 28, 68, 70, 73
 mobil robot.....iv, 6, 7
Model14, 25, 27, 36, 71
 Motor iv, 9, 11, 17, 19, 21, 22, 23,
 24, 25, 37, 38, 39, 40, 44, 58,
 60, 61, 62, 68

O

Optimizasyon.. 45, 47, 48, 49, 50,
 52
 Oransalxiii, 46
 otomatik yönlendirmeli .. 3, 4, 11,
 63
 OYA. iv, xiii, 1, 2, 6, 11, 16, 17, 18,
 19, 24, 25, 35, 37, 46, 52, 67,
 68

P

Parçacık Sürü xiii, 8, 47, 49, 50,
 69, 71, 75
 PEM .. iv, v, xiii, 12, 13, 14, 41, 42,
 73, 74, 75
 PID xiii, 7, 8, 44, 45, 46, 47, 49,
 50, 51, 59, 68

PSO xiii, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52,
69

R

Referans 7, 8, 9, 21, 37, 45, 46,
50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,
58, 59, 60, 61, 62

Rota 50, 52, 54, 55, 61, 64, 65, 68

S

Simulink 7, 8, 9, 12, 13, 14, 35, 37,
39, 40, 44, 45, 47, 68, 73, 75

Spiral 52, 53, 63, 64, 66, 68

T

Türevsel xiii, 46

Y

Yakıt hücresi 13, 14

Yapısaliv, 13, 19, 68

Yığın 63

Yörünge .6, 7, 8, 9, 11, 25, 50, 52,
53, 55, 68





TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

